

Guilherme Augusto Santos da Silva

***Desenvolvimento de um Analisador
Multicanal, baseado em Lógica
Programável, para Detectores de
Radiação***

Rio de Janeiro – RJ

Maio / 2020

Guilherme Augusto Santos da Silva

***Desenvolvimento de um Analisador
Multicanal, baseado em Lógica
Programável, para Detectores de
Radiação***

Dissertação apresentada à Coordenação de Formação Científica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas para a obtenção do título de Mestre em Física com ênfase em Instrumentação Científica.

Orientador:

Herman Pessoa Lima Junior

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E
COMUNICAÇÕES CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM FÍSICA**

Rio de Janeiro – RJ

Maio / 2020

Dissertação de mestrado em Física sob o título “*Desenvolvimento de um Analisador Multicanal, baseado em Lógica Programável, para Detectores de Radiação*”, defendida por Guilherme Augusto Santos da Silva e aprovada em 29 de maio de 2020, no Rio de Janeiro, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Dr. Herman Pessoa Lima Júnior
CBPF
Orientador – Presidente da banca

Dr José Brant de Campos
UERJ
Membro externo

Dr Geraldo Roberto Carvalho Cernicchiaro
CBPF
Membro interno

A minha família. Para a Fernanda.

Resumo

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um Analisador Multicanal (MCA) para utilização com detectores de radiação, no estudo de física de partículas. O MCA é incorporado em um módulo de aquisição de dados, SPRO, desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Detecção, no CBPF. Especificações de *hardware*, assim como detalhamento da programação do *firmware* são evidenciados no decorrer do trabalho. O maior objetivo desse desenvolvimento é utilizar a tecnologia de sistemas programáveis para implementar o MCA sob uma filosofia de conversores analógico-digitais pipeline de alta velocidade e memória RAM. Testes para corroborar o funcionamento do módulo são detalhados e postos a discussão. Esses incluem medições com geradores de sinais e detectores a gás. Também foi desenvolvido um programa de interface com usuário, o qual permite a configuração do MCA, assim como a visualização gráfica e armazenamento dos dados coletados.

Abstract

This paper presents the development of a Multi-Channel Analyzer (MCA) to work with radiation detectors in the scope of the Particle Physics field. The MCA is designed in the standalone acquisition module SPRO, developed in Detection Systems Laboratory, in CBPF. Hardware specifications, as well as the firmware detailing are hereafter described on this document. The main target of this project is to use a programmable technology system to implement an MCA, under a high-speed pipeline analog-to-digital converter and RAM memory philosophy. Tests to confirm the firmware design are detailed and put under discussion. Measurements with a function generator and gas detectors are included in the scope of work. A Human-Machine-Interface software was developed to allow MCA configuration, graphical visualization and data storage.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xii
Introdução	1
Contextualização	1
Motivação	2
Roteiro	3
1 Fundamentação Teórica	4
1.1 Fontes de Radiação	4
1.2 Interação da Radiação com a Matéria	5
1.2.1 Efeito Fotoelétrico	6
1.2.2 Efeito Compton.....	9
1.2.3 Produção de Pares	11
1.3 Raios-X	13
2 Instrumentação para Detecção de Radiação	16
2.1 Detectores de Radiação e Modos de Operação	17
2.1.1 Modos de Operação	17

2.1.1.1	Modo Corrente	18
2.1.1.2	Modo MSV	19
2.1.1.3	Modo Pulso	21
2.1.2	Altura de Pulso e Resolução	23
2.1.3	Tempo Morto	26
2.2	Analizador Multicanal	26
2.3	Detectores a Gás	29
2.3.1	Detectores a gás sensíveis à posição	32
3	Descrição do Hardware do Analisador Multicanal	36
3.1	FPGA	37
3.2	Circuito de Entrada Analógica	38
3.2.1	Amplificador Diferencial	38
3.2.2	ADC - Conversor Analógico-Digital	39
3.3	Interface USB.....	41
4	Desenvolvimento do Firmware e Programa de Interface com o Usuário do MCA	42
4.1	Firmware	44
4.1.1	Bloco MCA.....	48
4.1.2	Detector de Pico.....	51
4.1.2.1	Discriminador de Sinal.....	52
4.1.2.2	Detecção de Pico Positivo e Negativo	53
4.1.3	Histograma	54

	vii
4.1.3.1 Memória RAM	56
4.1.4 Controle da Interface USB.....	57
4.2 Programa de Interface com o Usuário	59
4.2.1 Comunicação USB	59
4.2.1.1 Dados de entrada no MCA	59
4.2.1.2 Dados de saída do MCA	61
5 Medidas de caracterização e Resultados experimentais	63
5.1 Tempo Morto	63
5.2 Curva de Calibração	65
5.3 Teste com sinal de entrada senoidal.....	68
5.4 Ruído do Sistema de Aquisição de Dados	71
5.5 Resolução	72
5.6 Aquisição com Detector	73
6 Conclusão	79
Referências	81
Apêndice A - Programa de Interface com Usuário	83
A.1 Tela Principal.....	83
A.2 Gerenciamento de Arquivo	86
A.3 Configuração para Aquisição e Zoom	87
A.4 Logs.....	90

Lista de Figuras

1.1	Interação de fótons com a matéria. Fonte: [1]	9
1.2	Ilustração do Efeito Compton. Fonte: [1]	10
1.3	Produção de Pares. Fonte: https://physics.stackexchange.com/questions/50106/pair-production-mathematically	12
1.4	Primeira imagem gerada a partir de uma emissão de raios-X. Fonte: American Institute of Physics (https://history.aip.org/history/exhibits/curie/resbr1.htm)	14
2.1	Diagrama em blocos de um processo de medição de radiação	16
2.2	Detector em Modo Corrente. Fonte: [1]	18
2.3	Sinal produzido por um detector, sob irradiação constante, operando em Modo Corrente. Fonte: [1]	19
2.4	Detector em modo pulso. Fonte: [1]	21
2.5	Exemplo de Distribuição Diferencial de Altura de Pulso. Fonte: [1] .	24
2.6	Definição da Função Resposta do detector. Fonte: [1]	25
2.7	Separação mínima para a distinção de dois níveis de energia diferentes. Fonte: [2]	26
2.8	Definição de Discriminador Diferencial. Fonte: [1]	28
2.9	Matriz de SCAs para formação de um MCA. Fonte: Modificada de [1]	29
2.10	Construção básica de um Detector a Gás	29
2.11	Zonas de funcionamento de um detector a gás. Fonte: [2]	30

2.12	Detector a gás unidimensional desenvolvido e construído no laboratório LSD/CBPF. Fonte: [3]	33
2.13	Esquemático de um detector unidimensional. Fonte: [4]	33
2.14	Esquemático de um detector bidimensional. Fonte: [4]	34
2.15	Esquemático genérico do catodo de um MWPC. Fonte: [5]	34
3.1	Diagrama em blocos do módulo SPRO	37
3.2	Circuito Pré-Amplificador de Aquisição de Dados Analógicos do SPRO para o canal A. Fonte: LSD, CBPF.....	38
3.3	Diagrama de onda dos sinais de clock do conversor ADC9627-125. Fonte: [6]	40
3.4	Configuração da faixa dinâmica do sinal analógico de entrada no módulo SPRO. Fonte: LSD, CBPF	40
3.5	Diagrama em Blocos simplificado FT245BM. Fonte: [7].....	41
4.1	Diagrama em Blocos do <i>firmware</i> MCA.	46
4.2	Diagrama em blocos do <i>firmware</i> do MCA.	47
4.3	Máquina de Estados do bloco MCA.	48
4.4	Máquina de Estados do bloco Detector de Pico.	51
4.5	Funcionamento da função de detecção de pico.	54
4.6	Máquina de Estados do bloco Histograma.	55
4.7	Representação em bloco da memória RAM.	56
4.8	Diagrama em blocos do processo de transferência e armazenamento do conteúdo do SPRO no programa de interface com o usuário do MCA	62
5.1	Setup de teste para levantamento da Curva de Calibração do MCA	66
5.2	Exemplo de pulso utilizado para curva de calibração	66

5.3	Curva de calibração para configuração de 1 V_{pp}	67
5.4	Curva de calibração para configuração de 2 V_{pp}	68
5.5	Aquisição de eventos com sinal de entrada senoidal - excursão positiva.	70
5.6	Aquisição de eventos com sinal de entrada senoidal - excursão negativa.	70
5.7	Ruído do Sistema de Aquisição SPRO.	71
5.8	Distribuição de eventos, para valor fixo de 1 V , utilizada para o cálculo da resolução do MCA	73
5.9	Distribuição de eventos para o sistema de aquisição sem fonte radioativa.	74
5.10	Sinal de saída do sistema detector/pré-amplificador com fonte radioativa.....	75
5.11	Distribuição de eventos com Fe-55 em 2048 canais: tela do programa de interface com o usuário do MCA.	76
5.12	Distribuição de eventos com Fe-55 em 2048 canais: dados plotados.	76
5.13	Distribuição de eventos com Fe-55 em 1024 canais: dados plotados.	77
5.14	Distribuição de eventos com Fe-55 em 128 canais: dados plotados.	77
A.1	Programa de Interface do Usuário: Tela Principal.	85
A.2	Programa de Interface do Usuário: Funções de Gerenciamento de Arquivo.	86
A.3	Programa de Interface do Usuário: Tela de Diálogo "Save As..."	87
A.4	Programa de Interface do Usuário: Funções de "View" e "Setup"	87
A.5	Programa de Interface do Usuário: Configuração dos Parâmetros do MCA.	88
A.6	Programa de Interface do Usuário: Configuração do Tempo de Leitura dos Dados do MCA.	90
A.7	Programa de Interface do Usuário: Logs.	90

A.8 Programa de Interface do Usuário: Log dos últimos dados adquiridos. 91

Lista de Tabelas

3.1	Características FPGA Cyclone II EP2C20Q240C8	37
4.1	Sinais de entrada e saída do MCA	49
4.2	Condições para início da máquina de estados do bloco MCA.	50
4.3	Condições para início da máquina de estados do bloco Detector de Pico	52
4.4	Condições para início da máquina de estados do bloco Histograma	55
4.5	Características do bloco de memória RAM na FPGA	56
4.6	Condições para início da máquina de estados do bloco de Controle da Interface USB.....	57
4.7	Registros de configuração e gerenciamento do MCA	60
5.1	Tempo morto do MCA e taxa de aquisição	64
5.2	Tempo de leitura da memória RAM pela interface USB	65
5.3	Número total de eventos para cada teste de aquisição	69
A.1	Funções da tela principal	84

Introdução

Contextualização

No final do século XIX, quando acreditava-se que o conhecimento da física adquirido até então era o bastante para o ser humano modificar seu meio conforme seu interesse, o mundo é apresentado a uma teoria que lança um novo enfoque: em seu artigo "Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia de Espectro Normal", Max Planck atravessa a fronteira da física para o mundo microscópico, que até então pouco havia sido explorado. O nascimento da Física Quântica, e alguns anos depois a formulação das teorias da Mecânica Quântica, apontaram os "olhares" científicos para um universo não visível até então. Eventos subatômicos agora tinham que ser detectados e medidos para se obter a comprovação empírica das novas teorias, dando à instrumentação científica uma importância vital para a evolução da física. No início do século XXI a humanidade já contava com uma gama de ferramentas e instrumentos capazes de nos levar não só a um entendimento muito profundo das estruturas das quais somos formados, como nos indicaram novas perguntas e questionamentos que nos guiam para um próximo passo, demandando que a instrumentação científica evolua no mesmo sentido. A atualização dessa instrumentação existente para tecnologias novas consegue aumentar a capacidade das medidas que são necessárias em um determinado experimento, e é de suma importância para que novos resultados sejam encontrados, ou antigos melhor analisados.

O Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e, mais especificamente, o Laboratório de Sistemas de Detecção (LSD), faz parte dessa imensa rede que visa movimentar a roda da ciência ao encontro de novas comprovações e respostas. Este trabalho se dedica à construção de um inovador Analisador Multicanal (*Multichannel Analyzer* – MCA), utilizando duas tecnologias modernas: os conversores analógico-digitais

de alta velocidade e os dispositivos lógicos programáveis FPGA (*Field Programmable Gate Array*).

Motivação

O objetivo a ser alcançado no projeto é a implementação de um Analisador Multicanal utilizando as tecnologias de conversores analógicos-digitais de alta velocidade e dispositivos lógicos programáveis, FPGA, afim de realizar a caracterização dos detectores a gás desenvolvidos no laboratório LSD.

Analisadores Multicanal são utilizados na indústria em várias aplicações como, por exemplo, nos medidores multifásicos de vazão que conseguem identificar a vazão de cada fase de um determinado fluido, sem a necessidade da separação destes. Na indústria de exploração de petróleo esse instrumento é utilizado para se obter a produção de água, gás e óleo de cada poço individualmente, possibilitando maior controle técnico e fiscal.

O módulo de aquisição de dados SPRO será utilizado como hardware base para o projeto. Este módulo foi projetado de maneira a atender várias aplicações em física experimental que demandem conversão e processamento de sinais analógicos de tensão e conversão de tempo entre eventos. Para isso, o módulo contém componentes como conversores analógico-digitais (ADC), conversor tempo-digital (TDC), além de uma interface USB para comunicação com computadores pessoais. Além dos componentes citados, o SPRO utiliza um dispositivo FPGA para controle e processamento digital dos dados, cujo modelo é um Cyclone II EP2C20Q240C8, do fabricante Altera (atual Intel), no qual será sintetizado o analisador multicanal, cujo projeto será descrito na linguagem VHDL.

Esse projeto, de certa forma, se apresenta como uma evolução natural do analisador multicanal apresentado em [3] e [8], já que se propõe a realizar as mesmas funções, porém se adequando às novas tecnologias de conversão e de processamento digital de sinais, culminando em melhores especificações quando comparado aos projetos anteriores.

Roteiro

No capítulo 1 é apresentada a fundamentação teórica que contempla uma pequena introdução à fontes de radiações, interação com a matéria, Raios-X.

No capítulo 2 uma passagem pelos tipos de instrumentações existentes para detecção de radiação é feita, citando tipos e modos de operação de detectores. Além de apresentar fundamentos importantes, como os conceitos de altura de pulso e resolução, e tempo morto. Nesse capítulo é abordado também o conceito do Analisador Multicanal, e por fim os detectores a gás.

No capítulo 3 é apresentado o *hardware* do módulo de aquisição de dados SPRO, onde as suas características que serão utilizadas nesse projeto são abordadas de maneira informativa, e de forma a embasar o *firmware* programado.

No capítulo 4 é detalhado o desenvolvimento do *firmware* e do programa de interface com o usuário do MCA. São descritas as premissas adotadas para o projeto, assim como a descrição dos blocos utilizados para realização do mesmo.

No capítulo 5 são apresentados os testes funcionais e de caracterização do MCA, detalhando o tempo morto do MCA, curva de calibração, ruído do sistema de aquisição, resolução, assim como aquisições utilizando um detector a gás e uma fonte radioativa de Raios-X (Fe-55).

No apêndice A é mostrado o manual de uso do programa de interface com o usuário, assim como um detalhamento das funções que nele são programadas.

1 *Fundamentação Teórica*

1.1 Fontes de Radiação

Radiações, em geral, são emissões originadas de processos atômicos, sejam nucleares ou provenientes de suas órbitas eletrônicas. Apesar de sempre estarem presentes na natureza, seu estudo ganha força no século XX onde várias formas e propriedades foram usadas tanto como poderosos e "milagrosos" tratamentos, quanto como artefatos para destruição em massa. Algumas definições importantes referentes ao estudo das radiações são vistas abaixo [1]:

- **Radioatividade:** nível da atividade radioativa de uma fonte, definido pela taxa de decaimento, descrita na equação 1.1:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.1)$$

Sendo N o número de partículas total da radioatividade, e λ a constante de decaimento. Em termos de unidades, no S.I., λ é expresso em Becquerel (Bq).

- **Energia:** unidade de medida que define a capacidade de um corpo/sistema de realizar um determinado trabalho que, na escala de radiação, é comumente expressa em eV (elétron-Volt)¹.

As radiações são classificadas da seguinte forma, conforme explicado em [1]:

¹ Elétron-Volt é o ganho de energia cinética de elétron quando acelerado por uma diferença de potencial elétrico de 1 Volt. Sua relação com o sistema SI, cuja a unidade padrão é Joule (J). $1eV = 1,602 \times 10^{(-19)}J$.

- **Partículas carregadas**

Dentro de *Partículas Carregadas* tem-se a seguinte divisão: *Partículas Pesadas Carregadas e Elétrons Acelerados*. Como exemplos de Partículas Pesadas Carregadas temos os Íons Energéticos, como partículas Alfa e prótons, que são originados de diversas reações nucleares, tem massa unitária ou maior. Na categoria de Elétrons Acelerados temos as partículas Beta e elétrons livres, onde a primeira é originada de um decaimento nuclear, enquanto o segundo é resultado de eventos que acontecem na órbita eletrônica dos átomos.

- **Partículas não carregadas**

Em *Partículas não Carregadas* as seguintes classificações são encontradas: *Radiação Eletromagnética e Nêutrons*. A Radiação Eletromagnética tem como exemplo os Raios Gama e Raios-X. O primeiro é originado por transições do núcleo atômico, e o segundo de rearranjos da órbita eletrônica do átomo. Já os Nêutrons, sempre originados de processos do núcleo do átomo, ainda podem ser classificados como Nêutrons Térmicos, Intermediários e Rápidos.

Toda e qualquer radiação, além da classificação acima, também é dividida, de acordo com seu nível energético, em dois grandes grupos: *Radiação Não-Ionizante e Radiação Ionizante*. Como [1] indica, o valor mínimo para que se considere uma Radiação Ionizante é de 10 eV , ou seja, acima desse valor a radiação é capaz de produzir ionização no material o qual essa incide, seja por atuação direta ou secundária de suas interações. Radiação a qual sua energia seja menor que 10 eV , essa é classificada como Radiação Não-Ionizante, como é o exemplo da luz visível que, como pode ser visto em [9], tem níveis de energia bem menores que 10 eV .

1.2 Interação da Radiação com a Matéria

Existem processos que descrevem as possíveis interações da radiação com a matéria, onde podemos citar três que envolvem espalhamento ou absorção de ra-

dição, conforme visto em [9]: Efeito Fotoelétrico, Efeito Compton e Produção de Pares. Outros dois envolvem a produção de radiação pela matéria: Aniquilação de Pares e Bremsstrahlung². As secções a seguir abordam as diversas interações.

1.2.1 Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico talvez seja mais conhecido por ser o fenômeno estudado por Einstein. Porém, o mesmo foi primeiramente notado por Heinrich Hertz durante seus estudos para comprovar a existência das ondas eletromagnéticas, previstas teoricamente por Maxwell. Logicamente Hertz primeiramente observou o efeito sob a luz da física clássica, o que levou a certas inconsistências práticas resolvidas exatamente pela descrição quântica dada ao fenômeno por Einstein mais tarde. Hertz observou que uma descarga elétrica tornava-se mais fácil entre dois eletrodos quando sobre um deles se aplicasse uma luz ultravioleta. Foi identificado mais tarde que a incidência da luz ultravioleta na superfície do catodo levava que elétrons fossem emitidos do material. Naturalmente era esperado que o efeito fosse totalmente modelado sob as leis da física ondulatória recém teorizada a época, porém alguns aspectos teóricos não eram verificadas experimentalmente, a saber:

1. Energia cinética dos Elétrons: esperava-se que a energia aumentasse de acordo com a intensidade da luz que incide sob a superfície. Foi observado, contudo, que independente da intensidade luminosa o valor máximo de energia cinética é sempre expresso pela equação 1.2, como encontrada em [9]:

$$K_{max} = eV_0 \quad (1.2)$$

onde:

- K_{max} - Energia Cinética Máxima do elétron emitido

²**Bremsstrahlung** tem origem alemã e significa, em uma tradução livre, "Radiação de Desaceleração". Bremsen = "frear" e Strahlung = "radiação". A expressão original em alemão foi adotada no uso corriqueiro.

- e – carga do elétron
 - V_0 – Potencial Elétrico de Corte
2. Ocorrência do efeito Fotoelétrico: era esperado que o efeito deveria ocorrer para toda e qualquer frequência da luz, só dependendo da intensidade desta para que o elétron fosse ejetado da superfície. Mais uma vez o observado contradiz a teoria clássica, e indica que existe uma frequência mínima f_0 para a qual o efeito fotoelétrico ocorre.
 3. Tempo morto para emissão de elétrons: tomando uma intensidade luminosa suficientemente baixa, do momento em que a luz começa a incidir sobre a superfície e a detecção dos primeiros elétrons ejetados deveria ser possível observar um tempo morto onde os elétrons estariam absorvendo a energia da luz até que alcançassem o patamar de excitação necessário para que conseguissem escapar do material. Novamente a teoria clássica falhou, tendo em vista que nenhum retardo foi observado.

Para que as três questões acima fossem solucionadas, Einstein abordou a luz com a mesma perspectiva quântica que Planck havia usado para a matéria. Ao invés de um campo contínuo variante no espaço, a luz passou a ser tratada como pacotes individuais de energia, chamados de fótons. Assim sendo, os fótons deveriam ter uma quantidade de energia que fosse um múltiplo inteiro da frequência que este carregava, como demonstrado por [9] na equação 1.3:

$$E = hf \quad (1.3)$$

$$E_{max} = hf - w_0 \quad (1.4)$$

onde:

- E_{max} – Energia Cinética Máxima do emitido

- h – constante de Planck
- f – frequência do fóton incidente
- w_0 – função trabalho característica do material que indica a energia mínima para um elétron ser ejetado

Da equação 1.4 consegue-se observar que a energia do elétron ejetado depende somente da frequência do fóton incidente. Sendo $w = hf_0$, é fácil observar que só é possível a emissão de um elétron pela atuação de um fóton se, e somente se, $f > f_0$; além disso a própria energia cinética do elétron ejetado será diretamente proporcional a frequência do fóton incidente, não dependendo da intensidade da fonte luminosa. Por último, a ideia de que os elétrons devem acumular energia por um tempo para que o efeito seja observado não faz sentido já que agora trata-se a luz como partícula.

Como explicado em [9], o efeito fotoelétrico acontece com elétrons mais fortemente ligados ao átomo, ou seja, os elétrons ejetados pela incidência do fóton estarão nas camadas K, L e M, sendo 80 % provenientes da camada K. Esse fato se explica pela lei de conservação de energia, já que a massa do núcleo é significativamente maior que a do elétron, absorvendo por isso níveis mínimos de energia do fóton incidente. O elétron ejetado deixa uma vacância na camada onde se encontrava, sendo esta preenchida por um elétron de camadas superiores.

Como subprodutos dessa transição, descrita no parágrafo anterior, ocorrerão emissões secundárias de fótons característicos ou elétrons de Auger³. Por fim, cabe destacar que o efeito fotoelétrico é predominante na interação dos fótons com a matéria em níveis energéticos de até 100 keV. Acima deste valor de energia, outros efeitos, como o Efeito Compton, predominam em probabilidade de ocorrência mediante a incidência de radiação, conforme ilustra a figura 1.1.

³Elétron Auger: descobertos entre os anos de 1922 e 1923, simultaneamente por Pierre Victor Auger e Lise Meitner, é o elétron ejetado de um átomo por consequência de uma emissão causada pela transição entre camadas de um elétron no mesmo átomo.

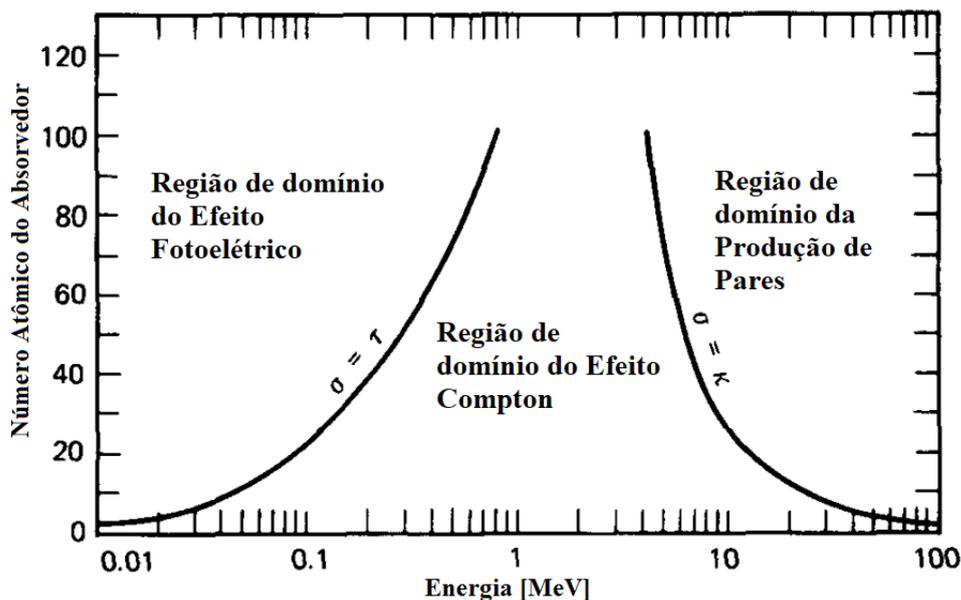


Figura 1.1: Interação de fótons com a matéria.

Fonte: Adaptado de KNOLL, 2010.

1.2.2 Efeito Compton

Diferente do Efeito Fotoelétrico, o Efeito Compton não é uma interação onde há a absorção de energia pela matéria. Ocorre somente um fenômeno de espalhamento. Por esse motivo também é conhecido como o Espalhamento Compton. Nomeado em função do seu descobridor, Arthur Compton, o efeito trata da interação de um fóton com elétrons de camadas mais exteriores da eletrosfera, ou seja, com elétrons mais fracamente ligados ao átomo.

Ao incidir fótons de Raios-X de energia hf , Compton observou que o espalhamento resultante era constituído de fótons hf' , onde $f' < f$. Também foi observado que a diferença entre f' e f , que podemos chamar de Δf , varia de acordo com o ângulo que os fótons espalhados são observados. Mais uma vez, a teoria ondulatória clássica não dispõe de mecanismos que expliquem o valor de f' . Pela teoria, era esperado que a onda irradiada pela vibração dos elétrons excitados, devido à incidência do feixe de Raios-X, fosse de mesma frequência f .

Quando o fóton interage com um elétron mais externo, livre e estacionário em

um primeiro momento não é absorvido como no efeito fotoelétrico. Neste caso a analogia que deve-se utilizar é a de duas bolas de sinuca em uma mesa, onde uma é arremessada ao encontro da outra. A primeira bola, ao ser arremessada com uma velocidade v e, portanto, contendo energia cinética, atinge a segunda bola que encontra-se inicialmente em repouso. É intuitivo assumir que a primeira bola terá sua trajetória alterada em θ graus, com uma velocidade $v^j < v$, enquanto a segunda bola ganhará energia cinética com uma velocidade v^{jj} e trajetória de ϕ graus em relação a trajetória original da primeira bola, como mostrado na figura 1.2:

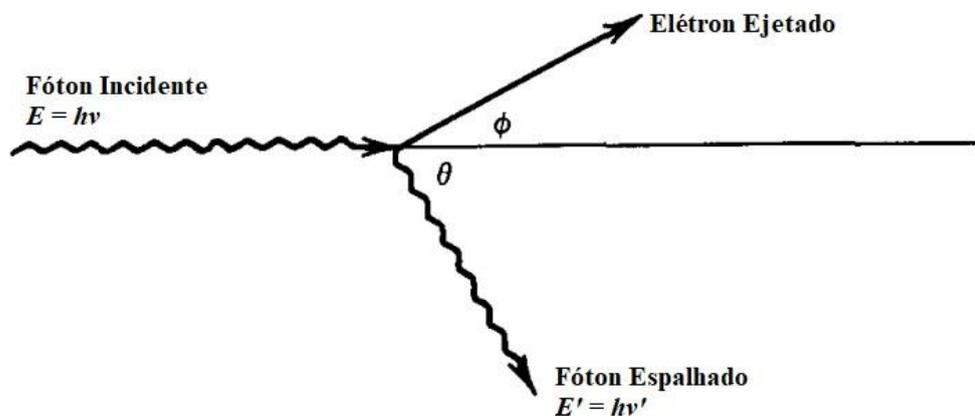


Figura 1.2: Ilustração do Efeito Compton.
Fonte: Adaptado de KNOLL, 2010.

Em termos matemáticos, Compton, utilizando equações relativísticas - visto que os fótons e o elétron ejetado se movem com velocidades compatíveis com essas equações - desenvolveu a equação 1.5 que leva seu nome (desenvolvimento completo da equação pode ser encontrado em [9]):

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = \lambda_c(1 - \cos \theta) \quad (1.5)$$

onde:

- $\Delta\lambda$ – deslocamento Compton
- λ_0 – comprimento de onda associado ao fóton espalhado

- λ_1 – comprimento de onda associado ao elétron ejetado
- λ_c – comprimento de onda Compton
- θ – ângulo de espalhamento do fóton

A equação 1.6 resolve o comprimento de onda Compton (λ_c):

$$\lambda_c \equiv h/m_0c = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m} \quad (1.6)$$

Na equação 1.5 pode-se observar que o deslocamento Compton é dependente apenas do espalhamento θ . Esse ângulo pode ir de um espalhamento frontal ($\theta = 0^\circ$), até um retro espalhamento ($\theta = 180^\circ$).

O efeito Compton é dominante em níveis de energia a partir de 100 keV , exatamente quando a probabilidade do o efeito fotoelétrico ocorrer se torna menor, até cerca de 10 MeV , a partir de onde o fenômeno Produção de Pares se torna mais provável.

1.2.3 Produção de Pares

O fenômeno Produção de Pares ocorre quando um fóton incidente interage perto do núcleo atômico. A condição básica para que esse efeito ocorra é que a energia do fóton incidente seja de no mínimo $1,022 \text{ MeV}$, o dobro da energia do elétron em repouso. Após a interação do fóton com o núcleo do átomo, é formado um par elétron-pósitron. Como mostrado na figura 1.3, o fóton incide com uma energia hf e os subprodutos da interação, o elétron e o pósitron, apresentam respectivamente, $E_-(v_1)$ e $E_+(v_2)$ como energia relativística total.

A equação 1.7 mostra a conservação de energia na formação do par. Lembrando que o núcleo do átomo tem uma massa muito grande e que por isso esse absorve níveis ínfimos de energia. Na verdade a presença do núcleo é crucial para que haja a conservação de energia e o efeito ocorra.

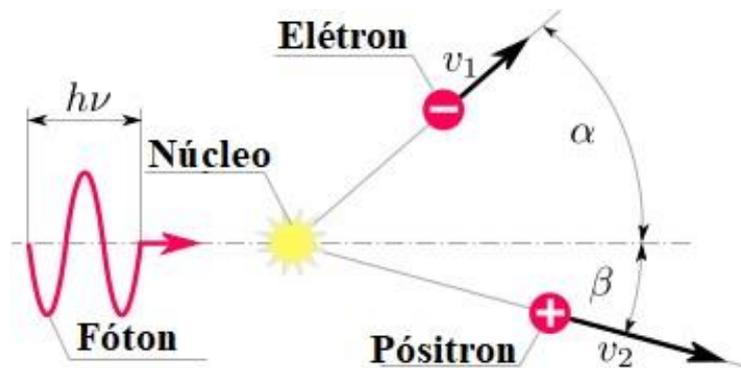


Figura 1.3: Produção de Pares.
Fonte: Website sobre Física⁴.

$$hf = E_- + E_+ = (m_0c^2 + K_-) + (m_0c^2 + K_+) = K_- + 2m_0c^2 \quad (1.7)$$

onde:

- E_- – energia relativística total do elétron criado
- E_+ – energia relativística total do pósitron criado
- K_- – energia cinética do elétron criado
- K_+ – energia cinética do pósitron criado
- m_0 – massa em repouso do elétron e do pósitron
- c – velocidade da luz no vácuo

A equação 1.7 também confirma que a energia mínima para a ocorrência do efeito é de $1,022 \text{ MeV}$. A componente da equação $2m_0c^2$ indica que é necessário duas vezes a energia do elétron em repouso para que o par seja criado. Como a energia em repouso do elétron é $0,511 \text{ MeV}$, e para que a conservação de energia e momento sejam mantidas, a criação do par exige que a energia mínima seja duas

⁴Disponível em: <<https://physics.stackexchange.com/questions/50106/pair-production-mathematically>>. Acesso em maio 2020.

vezes o valor acima. Essa premissa vale para qualquer criação de pares partícula-antipartícula. Porém, a criação do par elétron-pósitron é o mais comum pois a massa do elétron é a menor conhecida, exigindo assim o menor nível de energia para que o processo ocorra. A energia cinética do pósitron tende a ser um pouco maior que a do elétron, simplesmente porque a interação de cargas entre o núcleo e o par acelera o pósitron e desacelera o elétron.

Como visto anteriormente, a partir de 10 MeV o processo Produção de Pares se torna o efeito de maior probabilidade de ocorrer no caso de incidência de fóton no átomo. Portanto, é esperado que esse efeito ocorra em fótons na faixa de Raios-X de altas energias ou de Raios Gama. Compreender bem os três efeitos descritos nos últimos parágrafos é de fundamental importância para o desenvolvimento de novos detectores de radiação e partículas, assim como da instrumentação científica avançada necessária para ler e processar os sinais de tais detectores.

1.3 Raios-X

Na categoria Radiação Eletromagnética estão os Raios-X, observados e estudados pioneiramente pelo físico alemão Wilhelm Röntgen em 1895 [10]. Caracterizam-se por fótons, em determinada faixa de energia de até uma centena de keV , apresentando características típicas das ondas eletromagnéticas como polarização, difração e interferência. Posicionados no espectro eletromagnético entre os Raios UV (ultravioleta) e os Raios Gama (γ), os Raios-X diferem deste último primeiramente por sua origem: Raios Gama são originado de transições do núcleo atômico.

Durante seus estudos, Röntgen pediu para sua esposa, Bertha Röntgen, para que colocasse sua mão a frente de uma placa fotográfica (ver figura 1.4). Após alguns minutos de exposição, obteve a imagem clara dos ossos de seus dedos e dos anéis que Bertha usava, sendo esta considerada a primeira radiografia da história e também o nascimento da radiologia medicinal. Hoje, as aplicações dos Raios-X são as mais diversas possíveis, indo da medicina, até microscópios eletrônicos e detectores de radiação em geral.



Figura 1.4: Uma das primeiras imagens geradas a partir de uma emissão de raios-X.

Fonte: American Institute of Physics⁵.

Várias são as maneiras de se obter uma fonte de Raios-X, podendo esta ser natural ou artificial. Como fontes artificiais podemos citar os geradores de Raios-X, que utilizam tubos a vácuo, onde elétrons emitidos por um catodo vão de encontro a um anodo, que funciona como fonte dos Raios-X. O espectro dos Raios-X emitidos depende do material do anodo, sendo quanto maior o número atômico maior a energia do fóton de Raio-X [1].

Como fontes naturais, as astronômicas são de grande importância na ciência, incluindo as estrelas, buracos negros, núcleos de galáxias e a própria radiação de fundo. As emissões destas fontes são usadas para o estudo dos corpos celestes e suas características.

Ainda como fontes naturais tem-se os radionuclídeos, que são materiais cons-

⁵ <<https://history.aip.org/history/exhibits/curie/resbr1.htm>>. Acesso em maio 2020.

tituídos de átomos (núcleos) instáveis que emitem naturalmente radiação em seu processo de decaimento. Esses materiais podem estar presentes na natureza, como por exemplo o Urânio, o Rádio e o Carbono-14. Neste último caso, o processo de criação da fonte pode ser a criação ou morte de uma estrela ou planeta, assim como processos de bombardeamento gradual por radiações vindas do espaço. Outro método de produção de radionuclídeos envolve o uso de fissão nuclear.

Neste trabalho, a caracterização dos detectores a gás utiliza uma fonte radioativa Fe-55, isótopo de Raios-X bem conhecido, e largamente utilizado para propósitos científicos. Uma fonte radioativa Fe-55 apresenta as seguintes características [11]:

- Meia-vida ($T_{\frac{1}{2}}$): 2,7 anos
- Linhas emitidas de radiação:
 - Raios X/Gama: 6 keV (25%) e 7 keV (3%)
 - Elétrons Auger: 5,2 keV

Para as aplicações no Laboratório de Sistemas de Detecção, a fonte radioativa Fe-55 também é utilizada para a aquisição de imagens de Raios-X de pequenos objetos, em experimentos que utilizam o mesmo módulo de aquisição de dados deste trabalho, porém fazendo uso do dispositivo TDC (Time-to-Digital Converter) presente no módulo.

2 Instrumentação para Detecção de Radiação

Para determinar e/ou quantificar um evento radioativo devemos seguir alguns passos até que a grandeza física medida faça sentido ao usuário interessado no experimento. Um fluxograma básico possível de um processo de detecção/medição de radiação é apresentado na figura 2.1.

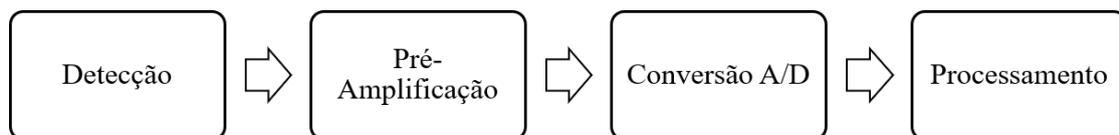


Figura 2.1: Diagrama em blocos de um processo de medição de radiação.

No processo de detecção da radiação ou partícula, esta interage com o meio do detector produzindo, na maioria dos casos, um sinal elétrico na saída do bloco de detecção. O sinal de interesse geralmente apresenta amplitudes muito pequenas e duração curta para que possa ser processado diretamente por uma eletrônica de conversão. Por isso a pré-amplificação é um estágio necessário para que este sinal possa ser processado pelo circuito de conversão A/D.

Este trabalho é baseado em um sistema de processamento digital, que é utilizado de maneira dominante atualmente em sistemas de detecção. Por este motivo, além da amplificação, o sinal deve passar pelo processo de conversão analógica-digital. Um sinal analógico, como é o produzido pelo detector, pode assumir qualquer valor dentro de uma faixa contínua, ou seja, assume qualquer valor real [12]. Este sinal é convertido para valores discretos inteiros - processo detalhado também em [12] -

que são amostras do sinal original, e que por fim são codificados em bits na saída do bloco de conversão A/D.

Após a conversão A/D, o sinal vai para o bloco de processamento digital, onde as amostras do evento detectado serão armazenadas e trabalhadas, de modo que este se tornem dados passíveis de análise pelo usuário final. O processamento será projetado de acordo com o esperado para cada experimento; cada projeto pode ser feito de maneira a ter um *hardware* dedicado, ou seja, desenhado para processar somente um determinado experimento ou, como é o caso deste trabalho, por meio de um dispositivo baseado em lógica programável.

Primeiramente, veremos os detectores e algumas características relacionadas a estes.

2.1 Detectores de Radiação e Modos de Operação

Detectores de radiação são dispositivos capazes de determinar se em um determinado ambiente há ou não radiação, sendo que os detectores mais complexos podem identificar o tipo de radiação e suas características. Como princípio básico, o detector tem que ser sensível à radiação que queira se identificar ou medir, ou seja, a escolha de um detector tem que ser feita pensando inicialmente no tipo de radiação a ser medida. Algumas propriedades, no entanto, são comuns aos diferentes tipos de detectores existentes.

2.1.1 Modos de Operação

O trabalho em questão é focado em um tipo de detector específico que produz cargas elétricas em sua saída em resposta a alguma radiação incidente. Para esta classe de detectores tem-se os seguintes modos de operação:

1. Modo Corrente
2. Modo MSV (*Mean Square Voltage* - Média Quadrática da Tensão)

3. Modo Pulso

Apesar de distintos, os modos de operação têm em comum o fato de processarem a corrente elétrica produzida pela detecção da radiação.

2.1.1.1 Modo Corrente

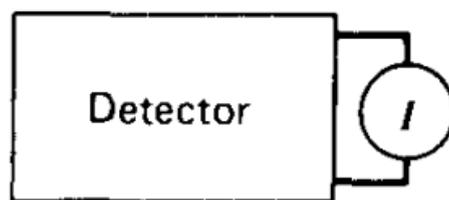


Figura 2.2: Detector em Modo Corrente.

Fonte: Adaptado de KNOLL, 2010.

Neste modo, um amperímetro é ligado à saída do detector de radiação, como visto na figura 2.2. A medição de corrente se dará em um período específico T que, por definição, será bem maior que o tempo entre eventos no detector. Desta forma, o valor da corrente será sempre dependente do período T , ou seja, será um somatório de todos os valores de corrente detectados individualmente - ver a equação 2.1:

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i(t') dt' \quad (2.1)$$

A corrente média é dada pela equação 2.2:

$$I_0 = rQ = r \frac{E}{W} q \quad (2.2)$$

onde:

- I_0 - corrente média
- r - taxa de ocorrência dos eventos
- Q - carga produzida por cada evento

- E – energia média transferida por cada evento
- W – energia média necessária para a produção de um par elétron-íon
- q – carga elétrica de um elétron ($1,6 \times 10^{-19}C$)

Detectores em modo de corrente produzem um sinal de saída, como mostra a figura 2.3, que é diretamente proporcional ao número de eventos que ocorrem, assim como a carga produzida por cada evento. Experimentos em que a taxa de eventos se torna muito grande, diminuindo o tempo entre um evento e outro, o modo de corrente é um método eficaz de detecção. Contudo, ele sempre estará suscetível a erros estatísticos por natureza. Se analisamos a equação 2.2, vemos que a carga produzida por cada evento contribui linearmente para o resultado final, o que acarreta um erro estatístico grande se duas fontes radioativas muito diferentes forem medidas por esse método.

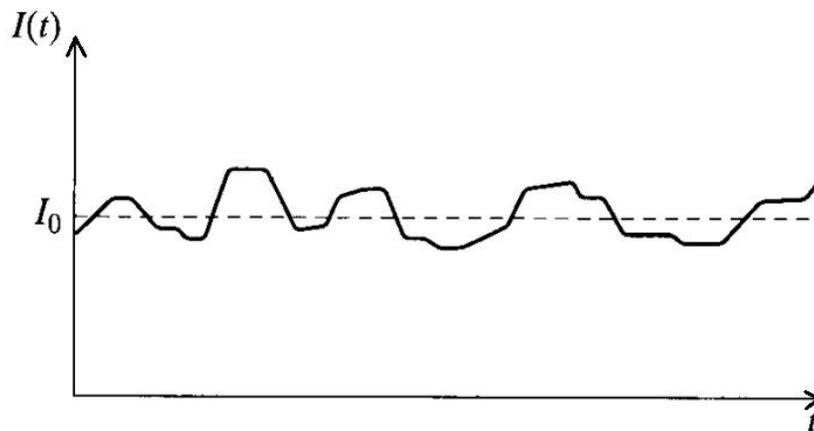


Figura 2.3: Sinal produzido por um detector, sob irradiação constante, operando em Modo Corrente.

Fonte: Adaptado de KNOLL, 2010.

2.1.1.2 Modo MSV

Para os casos quando as radiações incidentes no detector produzem grandes diferenças nas cargas geradas, o método MSV é o mais indicado.

Neste modo, um sinal de corrente, semelhante ao modo anterior, passa por um circuito onde o elemento de corrente médio I_0 é removido. Considerando que

cada evento individual no detector produza a mesma carga, o desvio padrão médio do sinal de corrente mostrado na 2.3 pode ser deduzido matematicamente como sendo a equação 2.3:

$$\overline{\sigma_I(t)} = \frac{I_0}{\sqrt{rT}} \quad (2.3)$$

onde:

- I_0 – corrente média
- r - taxa de ocorrência dos eventos
- T – tempo de resposta do instrumento de medida de corrente

Com o auxílio de processamento de sinais, utilizando um filtro passa-alta por exemplo, filtra-se a componente média tendo como resultado somente as variações flutuantes. Com o resultado em mãos, realiza-se a média quadrática. A equação 2.4 mostra o resultado final.

Com o auxílio de técnicas de processamento de sinais, utilizando um filtro passa-alta por exemplo, filtra-se a componente média I_0 obtendo-se como resultado somente as flutuações σ_i . Com este resultado disponível, calcula-se a média quadrática produzindo $\overline{\sigma_i^2(t)}$, conforme a equação 2.4.

$$\overline{\sigma_I^2(t)} = \frac{rQ^2}{T} \quad (2.4)$$

onde:

- Q – carga produzida por cada evento
- r - taxa de ocorrência dos eventos
- T – tempo de resposta do instrumento de medida de corrente

Como no modo corrente, o resultado final é diretamente proporcional a taxa de eventos, assim como a carga de cada evento. A carga passa a ter uma relação quadrática que, no cenário onde duas fontes muito diferentes de radiação estão sendo medidas, dá um maior peso aos sinais das maiores médias.

2.1.1.3 Modo Pulso

No dois modos de operação anteriores, algumas informações são impossíveis de se obter de um experimento. Informações individuais de cada evento, como a amplitude e o momento de ocorrência não são possíveis de se medir pelo simples fato de que os modos de corrente e MSV trabalham com a média do sinal criado pelos eventos individuais. Para os casos quando é necessário conhecer informações individuais de cada evento utiliza-se o "Modo Pulso".

Imaginando a ocorrência de um único evento no detector, este é enviado a um circuito de tratamento de sinal, sendo o primeiro estágio geralmente um pré-amplificador. Como dito anteriormente, a escolha do circuito pré-amplificador influencia diretamente o sinal resultante e deve ser feita de acordo com a necessidade da medida a ser realizada. A Figura 2.4 indica o circuito equivalente desse modo de operação. Neste caso, observamos que a entrada do circuito pré-amplificador é tipicamente um circuito RC paralelo, o que em termos de eletrônica significa impor ao sinal lido uma duração da ordem da constante de tempo $\tau = RC$.

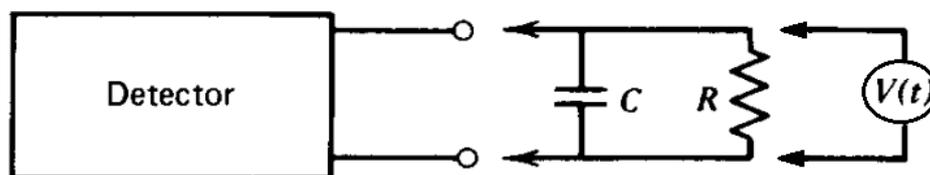


Figura 2.4: Detector em modo pulso.
Fonte: Adaptado de KNOLL, 2010.

Com relação ao tempo para o sinal produzido por um único evento atingir sua tensão máxima e retornar a zero, o chamado "tempo de coleta" (t_c), dois cenários devem ser observados para a escolha do circuito pré-amplificador:

1. RC ($\tau \ll t_c$): caso extremo quando o circuito pré-amplificador tem sua constante

de tempo muito menor que o tempo de coleta. Neste caso, o sinal resultante do pré-amplificador será uma reprodução fiel, em termos de tempo de subida e tempo de descida do sinal gerado pelo evento no detector. Operar nesta configuração é bastante útil em situações quando os eventos ocorrem em taxas muito elevadas, ou quando o conhecimento do instante de ocorrência dos eventos é de extrema importância.

2. $RC (\tau \gg t_c)$: neste caso o circuito pré-amplificador tem sua constante de tempo muito maior que o tempo de coleta, fazendo com que o tempo de descida do sinal resultante do pré-amplificador seja mais lento que o do sinal original produzido pelo detector. Obviamente, o intervalo entre eventos deve ser maior que o tempo de descarga do circuito RC.

O caso 2 é a configuração de operação mais comum quando se trata de detectores operando em "Modo Pulso". Algumas considerações extras devem ser colocadas neste caso. A amplitude máxima do sinal (V_{max}) é proporcional à carga Q criada pelo evento no detector, dividida pela capacitância C resultante do circuito elétrico equivalente. Como a capacitância é conhecida e constante, é possível afirmar que a amplitude do sinal é diretamente proporcional a carga produzida por um evento, como visto na equação 2.5. Em termos de análise dos resultados produzidos pelo detector, isso significa uma relação direta com a energia do evento. A análise da saída do detector por um determinado período de tempo revelará uma sequência de pulsos de amplitudes bem definidas, que quando somados e avaliados neste período nos informam a taxa de interações que são observadas no detector. Uma análise mais detalhada, pulso a pulso, informa o nível energético de cada evento no detector.

$$V_{max} = Q/C \quad (2.5)$$

Traduzindo em termos de análise dos resultados produzidos pelo detector, isso significa ter uma relação direta da energia do evento. A análise da saída do detector por um determinado período de tempo revelará uma sequência de pulsos de amplitudes bem definidas, que quando somados e avaliados neste período nos informam

a taxa de interações que são observadas no detector e, numa análise mais detalhada pulso a pulso nos informam o nível energético de cada um deles.

2.1.2 Altura de Pulso e Resolução

A importância da altura de pulso está na informação que esta carrega. Como visto na seção anterior, um detector operando em "Modo Pulso" pode fornecer informações importantes sobre a natureza da radiação que está sendo estudada. Retornando à equação (2.5), onde tem-se que a amplitude de um pulso gerado por um evento é diretamente proporcional ao sinal de saída do detector, é fácil inferir que quanto maior a carga, maior será o sinal elétrico na saída. Ou seja, um sinal elétrico com maior amplitude leva a compreender o evento ocorrido como mais energético do que um onde o sinal elétrico na saída do detector seja menor.

A importância da altura de pulso está na informação de energia que esta carrega. Como visto na seção anterior, um detector operando em "Modo Pulso" pode fornecer informações importantes sobre a natureza da radiação que está sendo estudada. Retornando à equação 2.5, onde tem-se que a amplitude de um pulso gerado por um evento é diretamente proporcional à carga total na saída do detector, é fácil inferir que quanto maior a carga, maior será o sinal elétrico na saída. Ou seja, sinais elétricos com maior amplitude correspondem à detecção de radiação com maiores níveis de energia, e menor amplitude correspondem a menores níveis de energia.

Em posse de tais informações é conveniente pensar que agora pode se obter uma análise quantitativa e qualitativa da radiação incidente. Há duas maneiras para se visualizar esses dados: Distribuição Diferencial de Altura de Pulso e Distribuição Integral de Altura de Pulso. A Distribuição Diferencial é mais utilizada, e é a forma em que este trabalho se baseará, por isso vale uma explicação mais detalhada sobre esta.

Na Distribuição Diferencial de Altura de Pulso, o resultado do experimento é um gráfico (como mostrado na figura 2.5) onde o eixo X é a amplitude do sinal da saída do detector (H_x , sendo $x \geq 0$) e o eixo Y é a diferença infinitesimal de pulsos

observados (dN) dividido por um intervalo infinitesimal de amplitude (dH) - como explicado na referência [1] - que em termos matemáticos corresponde a $\frac{dN}{dH}$.

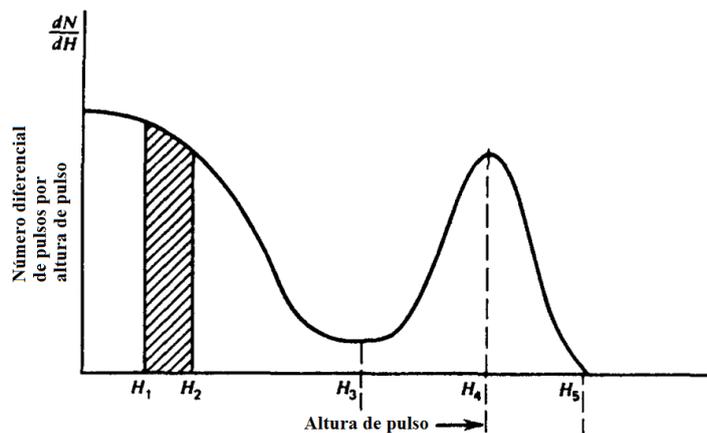


Figura 2.5: Exemplo de Distribuição Diferencial de Altura de Pulso.
Fonte: Adaptado de KNOLL, 2010.

Realizando a integral entre dois níveis de amplitude, como descrito na equação 2.6 o resultado é a quantidade total de pulsos naquele intervalo.

$$N = \int_{H_x}^{H_{x+c}} \frac{dN}{dH} dH \quad (2.6)$$

A interpretação física desse tipo de distribuição indica quais os níveis de energia mais frequentes dentro da faixa de detecção. Com isso, monta-se o espectro de energia que confirma, por exemplo, uma assinatura característica do material da fonte da radiação. O resultado N é também chamado de Contagem, o qual nada mais indica que o número de ocorrências de um nível de energia ou, dito de outra forma, a probabilidade de aquela energia ocorrer.

Em uma análise separada, obter N como o número de eventos para uma diferença não ajuda com relação a montagem de um espectro de energia; num espectro espera-se que um valor conhecido e único (H_0) de energia seja relacionado com a quantidade de vezes que este ocorreu. Para essa análise, tem que se abordar um conceito de grande importância para detectores de radiação que é sua resolução em energia.

Imaginemos a incidência de uma radiação monoenergética em um detector. Ide-

almente espera-se apenas um nível de energia na saída do detector, nem valores acima nem abaixo do valor H_0 , considerando H_0 o valor esperado. Na prática, o resultado de várias medidas com um detector será uma distribuição entre H_x e H_{x+C} , sendo H_0 o valor médio nessa distribuição local, que é chamado Função Resposta do detector.

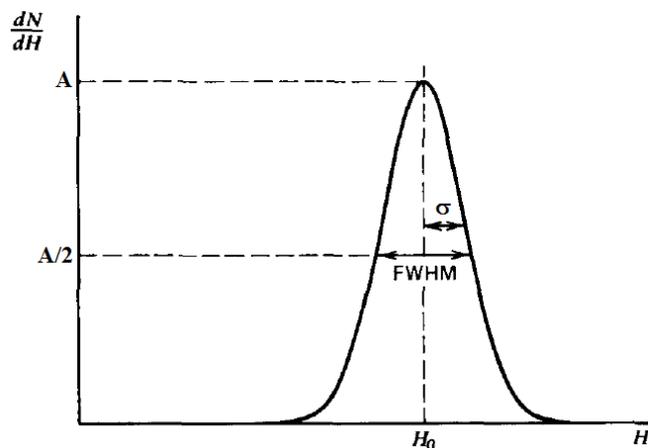


Figura 2.6: Definição da Função Resposta de um detector.
Fonte: Adaptado de KNOLL, 2010.

Num gráfico de Função Resposta, as distâncias de H_x e H_{x+C} em relação a H_0 indicam se o detector tem resolução em energia boa ou ruim. Como explicado em [2], o ideal seria que a Função Resposta fosse sempre uma função Delta (δ). Porém, características como o tipo de detector, qualidade do circuito eletrônico, variações das curvas de funcionamento do detector, interferências internas e externas, causam flutuações na curva, que se assemelha a uma distribuição de Poisson.

Na Figura 2.6 tem-se a formalização matemática da resolução de um detector, onde é apresentado o conceito de FWHM (*Full Width at Half Maximum*). FWHM é a largura do pulso no nível correspondente a metade do valor de pico (A) do mesmo ($FWHM = A/2$). Obviamente, quanto menor a FWHM, mais a forma do pulso se aproxima da função Delta (δ).

$$R = \frac{FWHM}{H_0} \quad (2.7)$$

A resolução de um detector (R) é definida como a FWHM dividida pelo centro de distribuição (H_0), como podemos ver na equação 2.7. R é expresso em porcentagem (%), ficando claro que quanto menor for R melhor é o detector, que será capaz de diferenciar níveis energéticos mais próximos. Dois níveis energéticos são considerados distinguíveis se forem separados por uma distância maior que a largura à meia altura, como mostra a figura 2.7.

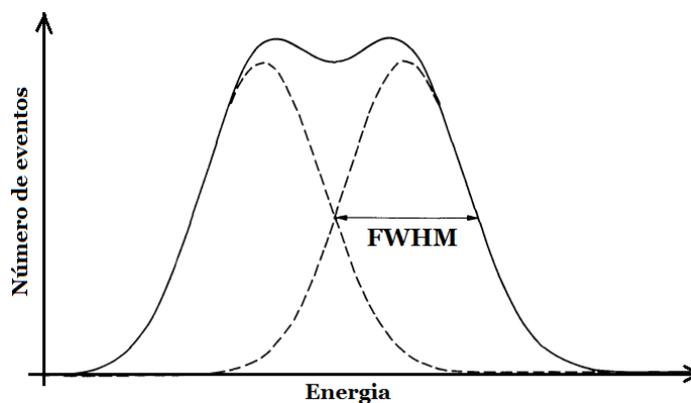


Figura 2.7: Separação mínima para a distinção de dois níveis de energia diferentes.
Fonte: Adaptado de LEO, 1994.

2.1.3 Tempo Morto

O Tempo Morto (*Dead Time*) de um detector é o intervalo mínimo em que este consegue distinguir um evento de outro, ou seja, para valores inferiores a este intervalo somente um evento pode ser detectado. O Tempo Morto de um experimento com detector é resultante de características intrínsecas do próprio detector e do tempo necessário para o processamento de cada evento no sistema de aquisição de dados - o tempo de aquisição será mais bem discutido à frente.

2.2 Analisador Multicanal

Dentre as mais variadas aplicações e demandas envolvendo radiações ionizantes, ter a possibilidade de se obter um espectro em energia da radiação incidente é

com certeza uma das mais importantes. Como visto em 2.1.2, as informações que são produzidas por esse tipo de medição permitem a caracterização de uma fonte radioativa, por exemplo. O MCA é o instrumento utilizado exatamente para esse fim.

A radiação incidente em um detector linear, ao interagir com o meio detector (seja ele gás, líquido ou sólido) gera um pulso que carrega duas informações: o tempo (momento) de ocorrência do evento e sua amplitude. Num primeiro instante vamos deixar o momento de ocorrência de lado e analisar somente a amplitude do pulso.

Primeiramente, deve-se observar um instrumento que tenha a capacidade de mensurar uma determinada faixa energética, eventos que ocorram entre um limite inferior e um superior, denominados respectivamente de LD (*Low Discriminator*) e HD (*High Discriminator*) [1], [2]. Com isso, define-se a janela de energia (*energy window*), dada pela equação 2.8.

$$\Delta E = HD - LD \quad (2.8)$$

Essa capacidade de tratar como evento válido apenas sinais entre determinados níveis de energia cria um tipo de filtro chamado de Discriminador Diferencial, cuja função básica é exatamente indicar a diferença entre um evento válido e ruído, ou um evento de interesse e outro que não seja de interesse naquele momento. A figura 2.8 demonstra a janela de energia tanto em termos de tensão, como em termos de contagem de pulsos.

A figura 2.8 também apresenta o que é conhecido como SCA (*Single Channel Analyzer*), um instrumento que identifica e conta pulsos energéticos dentro de uma faixa determinada. Em uma análise mais ampla, pode-se ajustar a janela de um SCA, teoricamente, para todo e qualquer nível de energia que se queira. Com isso, pode-se analisar diferentes partes de um espectro energético, sempre separadamente. Se um número N de SCAs forem ligados ao mesmo detector, cada um ajustado para uma janela de energia diferente do seus vizinhos, como demonstra [1] no capítulo 18, ao final teríamos um resultado de N contagens de eventos para uma única fonte de radiação.

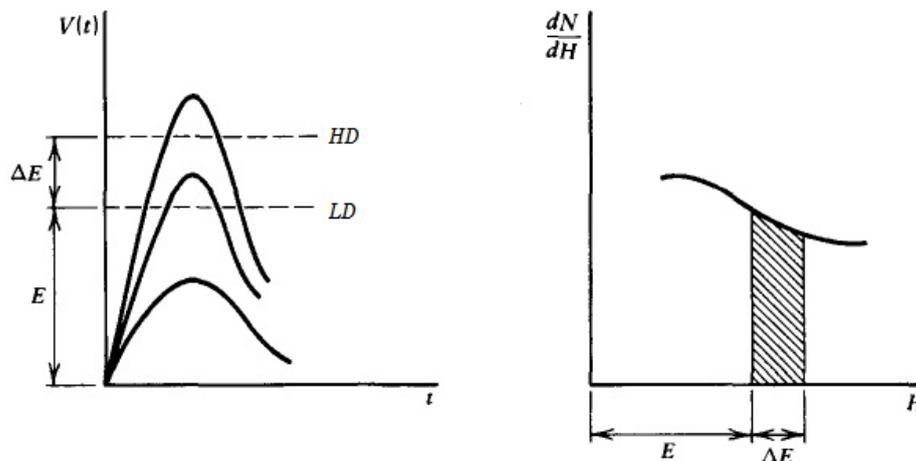


Figura 2.8: Definição de Discriminador Diferencial.
Fonte: Adaptado de KNOLL, 2010.

Uma distribuição dessas contagens pelos canais resulta em um espectro das alturas de pulsos, que são proporcionais aos níveis de energia de uma fonte de radiação qualquer. Esse processo é conhecido como *Multichannel Pulse Height Analysis*, e o instrumento padrão para este fim é chamado de *Multichannel Analyzer (MCA)*, objeto principal de estudo deste trabalho.

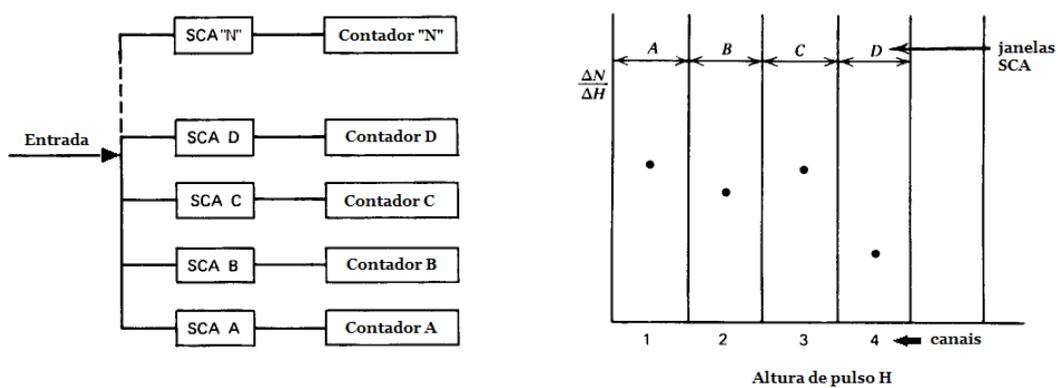


Figura 2.9: Matriz de SCAs para formação de um MCA.
Fonte: Adaptado de KNOLL, 2010.

2.3 Detectores a Gás

Como explicado em [2], detectores por ionização foram os primeiros dispositivos elétricos criados para detecção de radiação. São detectores simples onde a radiação incidente provoca a ionização dos átomos do meio interno do detector, o que acarreta na criação de pares elétron-íon ($e^- - ion^+$) que, sob o efeito de um campo elétrico induzido, são capturados por eletrodos. Por fim, nos terminais desses eletrodos, pode-se observar uma variação de um sinal elétrico o qual se interpreta como a incidência da radiação primeiramente citada. É fácil imaginar que por uma questão de facilidade na mobilidade de elétrons, o meio mais comum para esses detectores seja o meio gasoso. A figura 2.10 ilustra a construção básica de um detector a gás.

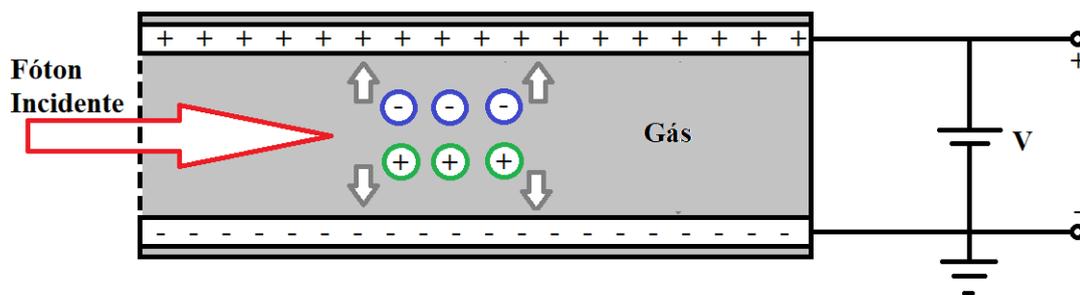


Figura 2.10: Construção básica de um Detector a Gás.

Pode-se citar três tipos básicos de um detector a gás, sendo que a diferença entre eles se baseia na a intensidade do campo elétrico aplicado e o número de elétrons coletados pelo anodo. Podemos observar nitidamente na figura 2.11 as regiões de funcionamento de um detector, sendo esse podendo ser classificado como:

- Câmaras por Ionização
- Contadores Proporcionais
- Contadores Geiger-Müller

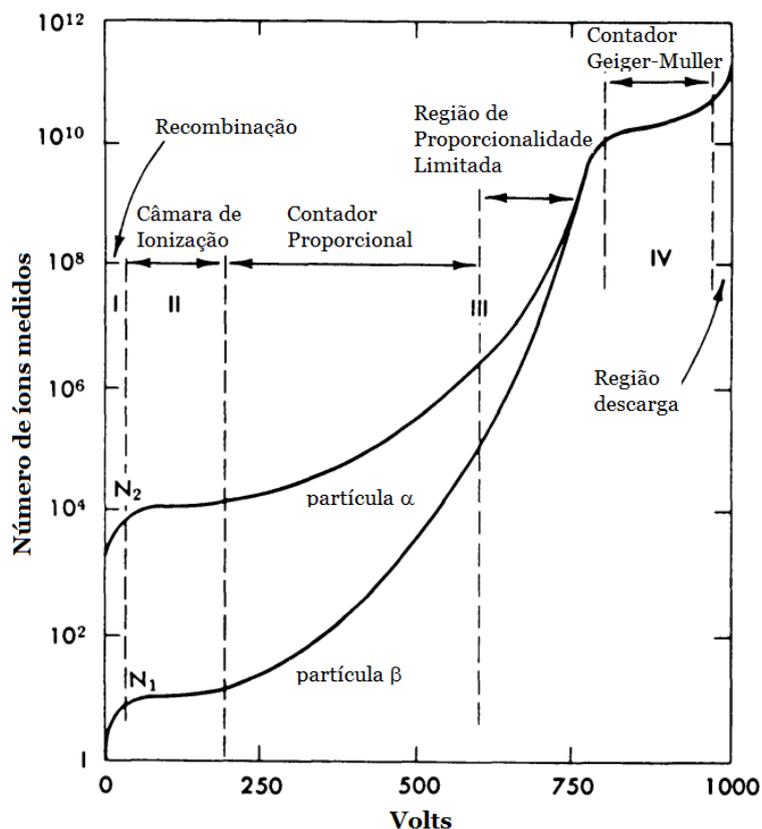


Figura 2.11: Zonas de funcionamento de um detector a gás.

Fonte: Adaptado de LEO, 1994.

A primeira região (I) é onde a tensão aplicada entre os eletrodos é insuficiente para que os pares sejam coletados pelos anodos. Nessa região a atração entre os pares será mais forte que o campo elétrico aplicado sobre estes, o que levará a uma recombinação desses pares. Não por acaso essa região é chamada "Região de Recombinação antes da Coleta".

Aumentando a tensão entre os eletrodos há uma tendência de que os pares sejam acelerados para os eletrodos, aumentando a corrente elétrica de saída nos terminais do detector. A corrente elétrica aumenta a um certo nível onde se estabiliza, e é representada pela região (II) na figura 2.11. No início o aumento do campo elétrico aumenta também a quantidade de pares que são coletados pelos eletrodos, porém esses pares são somente os pares criados pela ionização do gás pelo fóton incidente.

Haverá um certo ponto onde todos os pares serão coletados e o aumento do campo elétrico no detector não fará diferença nessa coleta. A região em questão é chamada de zona de ionização, e é onde os detectores do tipo Câmara de Ionização trabalham.

Uma característica de um detector tipo Câmara de Ionização é que a corrente elétrica produzida é extremamente pequena, já que essa é proporcional a energia do fóton incidente. É fácil imaginar que esse tipo de detector seja mais adequado para eventos de alta energia, como a detecção de raios Gama.

Durante a aceleração de um par sob o efeito de um campo elétrico, até que esses sejam coletados pelos seus respectivos eletrodos ocorrem colisões desde com outros elétrons de outros átomos, porém a energia cinética que esses pares possuem não é suficiente para causar perturbações nesses átomos. Contudo, se aumentarmos a intensidade do campo elétrico a níveis maiores os pares, e em especial os elétrons, terão energia cinética suficiente para ocasionar novas ionizações secundárias nos átomos por eles atingidos. Se formos mais a frente, os próprios elétrons secundários, agora livres e sendo acelerados por esse campo elétrico, causarão outras colisões podendo causar novas ionizações. Como explicado no [1], esse processo é conhecido como *Avalanche de Townsend*, e em gases típicos, em pressão atmosférica, ocorre em campos elétricos da ordem de 10^6 V/m.

Pode-se observar que uma relação diretamente proporcional entre os pares criados originalmente pela radiação e o sinal elétrico na saída do detector. Essa proporcionalidade é multiplicada pelo fator relativo a intensidade do campo elétrico no interior do detector. O tipo de detector que trabalha nessa região específica é chamado de Contador Proporcional ou Câmara Proporcional.

A figura 2.11 mostra que ao continuar aumentando o campo elétrico a proporcionalidade da terceira região (III) vai sendo perdida, entrando em uma região semi-proporcional, ou região de proporcionalidade limitada. Essa parte da terceira região é caracterizada pela distorção criada pelos íons positivos, por causa de seu grande número, no próprio campo elétrico.

A quarta região (IV) é onde as avalanches ocorrem de maneira generalizada, ao invés de pontuais como na região proporcional. A reação em cadeia é causada por fótons secundários, originados na re-organização molecular do gás, que antes fora excitado por um fóton primário. Aos detectores que trabalham nesta região é dado o nome de Contadores Geiger-Müller, e a característica do sinal de saída do detector é uma corrente elétrica saturada, com a mesma amplitude independente do evento inicial incidente.

Finalmente a última região mostrada na figura 2.11 corresponde às Descargas Contínuas, onde mesmo sem uma radiação incidente há criação de pares e consequentemente uma corrente elétrica na saída do detector. É uma região a ser evitada pois pode causar danos ao detector, além de não ter uma funcionalidade como instrumento de medida.

2.3.1 Detectores a gás sensíveis à posição

Uma classe específica de detectores de radiação são os detectores sensíveis à posição, que permitem conhecer, além da energia do evento, a posição de incidência da radiação. Basicamente, eles podem ser de dois tipos: unidimensional e bidimensional. A construção de ambos segue os princípios mostrados na figura 2.10, com alterações nas geometrias do catodo e do anodo, como descrito em [3], que descreve a construção de um detector unidimensional de teste utilizado no LSD, o qual será usado para testes finais do MCA desenvolvido neste trabalho. Neste detector vemos uma geometria retangular com sua parte interna sendo o catodo, e um fio centralizado fazendo o papel de anodo, como mostra a figura 2.13.

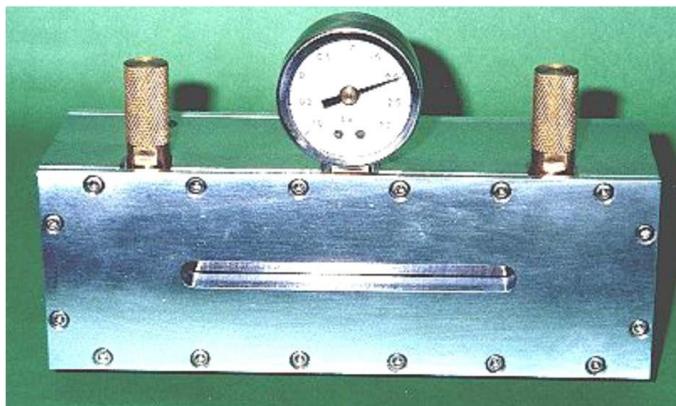


Figura 2.12: Detector a gás unidimensional desenvolvido no laboratório LSD/CBPF.
Fonte: JUNIOR, 2001.

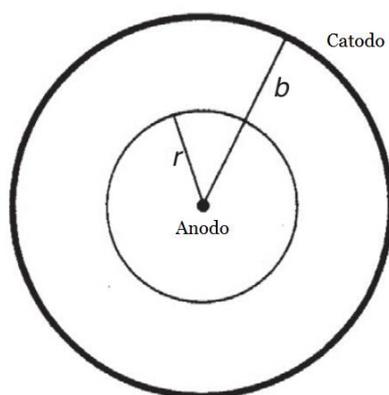


Figura 2.13: Esquemático de um detector unidimensional.
Fonte: Adaptado de SAULI, 2014.

Esse tipo de detector é utilizado para detecção de posição e quantização da energia da radiação, podendo ser aplicado inclusive em Tomografia. Suas características para determinação de localização de um evento são limitadas, contudo é possível com alterações de tamanho do detector que esse propósito seja alcançado, como explica [4], nos capítulos 7 e 8.

A segunda possibilidade de construção de um detector a gás é utilizar uma geometria bidimensional. Esse tipo de construção possibilita que a localização do evento seja mapeada em um plano, ou seja, é possível a formação de uma imagem.

Neste detector temos ao uma série de fios de anodo colocados, equidistantes um do outro, entre duas placas de catodo, como mostra a figura 2.14, gerando o campo elétrico. A figura 2.14 mostra as duas placas de catodo, sendo que uma delas é exatamente a janela ativa do detector, por onde entra a radiação sendo medida.

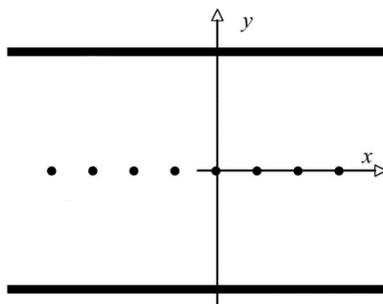


Figura 2.14: Esquemático de um detector bidimensional.
Fonte: Adaptado de SAULI, 2014.

Para se determinar o ponto exato onde um evento ocorreu, a outra placa de catodo é composta de uma matriz de elementos condutores conectados em linha e coluna alternadamente, e nos extremos às linhas de retardo, como mostra a figura 2.15. Esse plano é chamado Catodo X&Y.

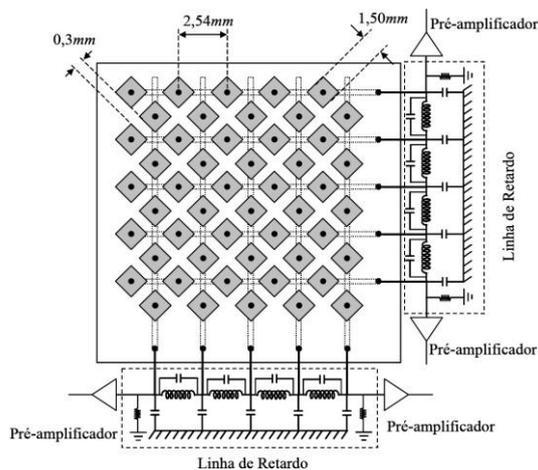


Figura 2.15: Esquemático genérico do catodo de um MWPC.
Fonte: MARINHO, 2006.

Cada fóton detectado e coletado pelo Catodo X&Y irá gerar dois sinais nos extremos de cada linha de retardo. Identificando a diferença temporal entre um sinal de trigger e esses dois sinais, para cada linha, consegue-se determinar a posição bidimensional (X,Y) onde o evento ocorreu. Para isso faz-se uso do dispositivo TDC, presente no módulo SPRO, como citado em 3. Neste trabalho, porém, o TDC não foi necessário.

3 Descrição do Hardware do Analisador Multicanal

Desenvolvido no LSD, o módulo de aquisição de dados SPRO (*Standalone Prototype*), utilizado como *hardware* base para o projeto, foi projetado de maneira a atender diferentes aplicações em física experimental. O módulo contém conversores analógico-digital (ADC), conversor tempo-digital (TDC), além de um circuito de interface USB para comunicação com computadores pessoais. O diagrama em blocos do módulo pode visto na figura 3.1.

O módulo opera com uma única tensão de alimentação de $+6 V_{DC}$, com consumo máximo de $1,5 A$.

Além dos componentes citados, o SPRO possui um dispositivo FPGA, modelo Cyclone II EP2C20Q240C8, do fabricante ALTERA (atual Intel), no qual é programado o circuito de processamento digital do MCA. O módulo funciona com tensão de alimentação $+6 V_{dc}$ e consumo máximo de $1,5 A$. Contém um conector (PROG) para configuração não volátil do FPGA, um segundo para configuração volátil e verificação interna dos sinais no FPGA (*Joint Test Access Group - JTAG*), além de um terceiro conector com 10 entradas/saídas (I/O) digitais (CON3). Para o desenvolvimento do Analisador Multicanal foram utilizados os circuitos de conversão analógica-digital, interface USB e, logicamente, o dispositivo FPGA, onde o novo *firmware* específico do MCA é programado. Nas seções seguintes esses componentes são descritos com mais detalhes.

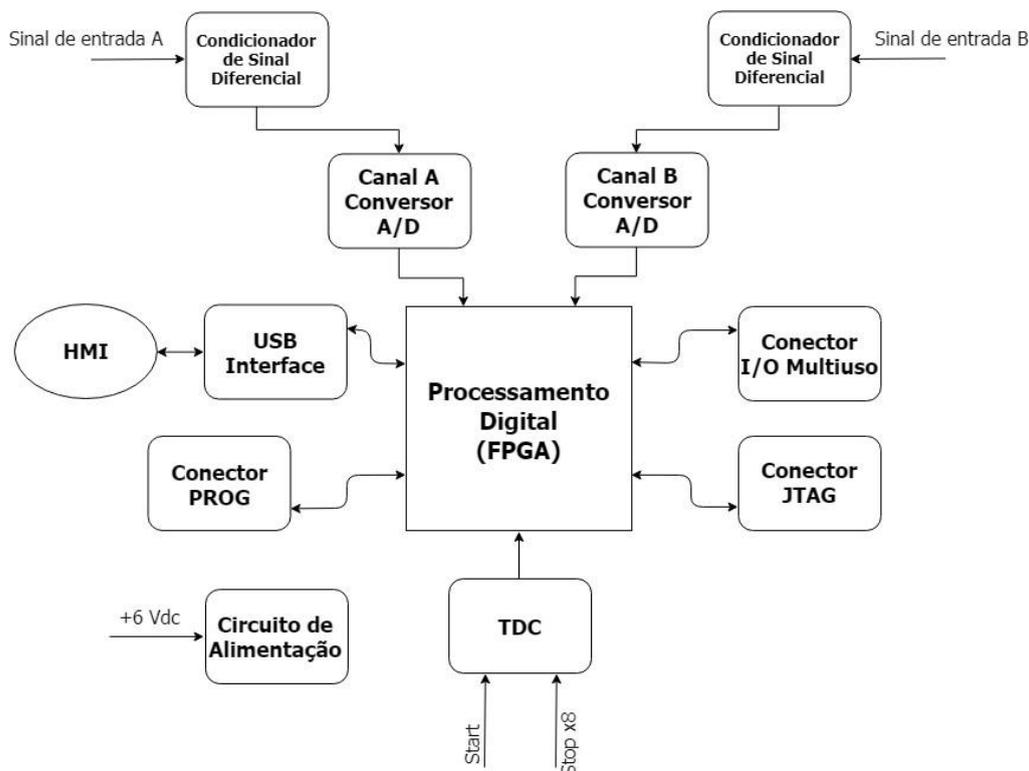


Figura 3.1: Diagrama em blocos do módulo SPRO.

3.1 FPGA

Com capacidade de 18.752 elementos lógicos, o Cyclone II EP2C20Q240C8 é um dos dispositivos de uma família de baixo custo de FPGAs, lançada em 2004, que sucede a família Cyclone de 2002. Suas principais características são listadas na tabela 3.1.

O chip conta com 240 pinos no total, em um encapsulamento tipo PQFP (*Plastic*

Característica	Qtd
Elementos lógicos	18.752
Blocos de memória RAM (M4K)	52
Bits RAM	239.616
PLLs (<i>Phase-Locked Loop</i>)	4
Nº máximo de pinos I/O	315

Tabela 3.1: Características FPGA Cyclone II EP2C20Q240C8

Quad Flat Pack), com espessura de 4,1 mm. Além de um clock global, o FPGA tem 4 unidades PLL (*Phase-locked Loop*), que sincronizam sinais internos de clock com sinais externos. Como recurso fundamental para a implementação do MCA, o FPGA contém blocos de memória RAM (*Random Access Memory*) do tipo M4K. Cada bloco é constituído de 4096 bits, acrescidos de bits de paridade, totalizando 4608 bits. Neste tipo de memória são armazenados a contagem de eventos identificados pelo MCA, que posteriormente serão acessados pela interface USB.

3.2 Circuito de Entrada Analógica

Como entrada de dados no módulo SPRO, foi desenhado um circuito que realiza o tratamento do sinal, assim como a conversão deste de analógico para digital. Esse circuito é composto de dois componentes principais, separados em dois canais (canal A e canal B). Cada canal contém um amplificador diferencial (que coloca o sinal de entrada em modo diferencial), e um conversor analógico-digital.

3.2.1 Amplificador Diferencial

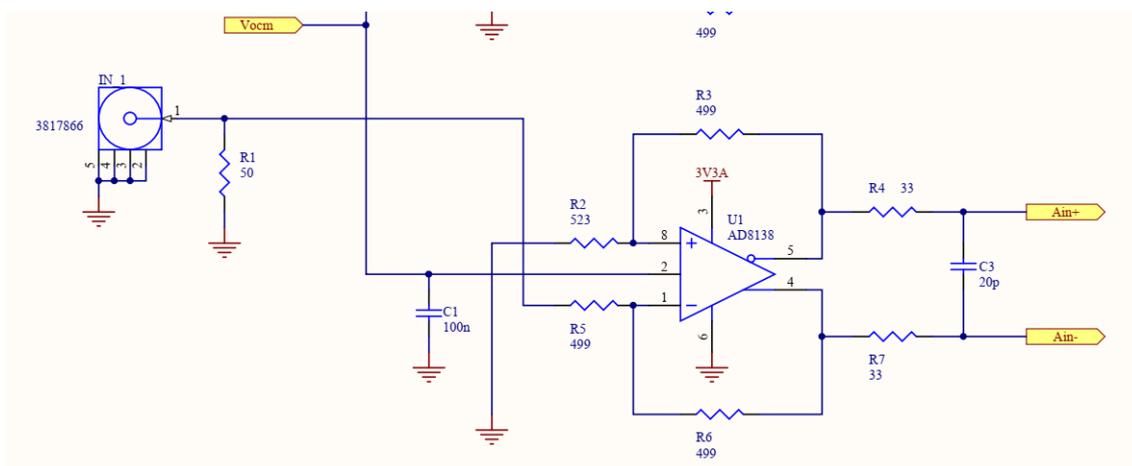


Figura 3.2: Circuito Pré-Amplificador de Aquisição de Dados Analógicos do SPRO para o canal A.

Fonte: LSD, CBPF.

O circuito é composto por um amplificador operacional diferencial de baixa

distorção, da empresa Analog Devices, modelo AD8138, configurado para apresentar ganho igual a 1, que transforma o sinal vindo do detector em um sinal diferencial, como podemos ver na figura 3.2. Esse tratamento é necessário para adequar o sinal ao modo de funcionamento do conversor A/D, que só aceita sinais de entrada em modo diferencial.

3.2.2 ADC - Conversor Analógico-Digital

Após ser condicionado pelo amplificador diferencial, o sinal entra no conversor A/D (Analógico-Digital) existente no módulo, que contém dois canais independentes (dual), com taxa de amostragem de 125 *MSPS* (*Mega Samples per Second*). O conversor, modelo AD9627-125 do fabricante Analog Devices, fornece um sinal diferencial de clock (DCO), de 125 *MHz*, produzido a partir do sinal de clock de entrada. O sinal DCO é síncrono com os dados digitais na saída e serve para que a FPGA capture os dados em sua entrada. Como premissa de projeto, a busca de pico (valor máximo) do sinal convertido será feita de forma síncrona com este clock DCO.

Como mencionado anteriormente, o dispositivo FPGA irá ler a saída do conversor AD9627-125 utilizando a transição de subida do clock DCO para capturar o sinal de entrada no canal A do conversor, enquanto a borda de descida será utilizada para ler o canal B, como pode ser observado na figura 3.3.

O conversor A/D é configurado para operação em modo LVDS (*Low Voltage Differential Signaling*), que se mostra mais eficaz em termos de transmissão de sinais em alta velocidade, pois é menos suscetível a interferências eletromagnéticas. O resultado do sinal convertido em cada canal está disponível em um único barramento de 8 bits (CH A/CH B DATA na figura 3.3) que é ligado ao dispositivo FPGA.

Todo o *firmware* para interface de controle e dados entre o conversor A/D e o FPGA já havia sido desenvolvido para projetos anteriores que usaram este mesmo módulo. Para o desenvolvimento deste projeto levou-se em consideração apenas o critério de utilização de cada canal descrito acima, ou seja: apenas o canal A

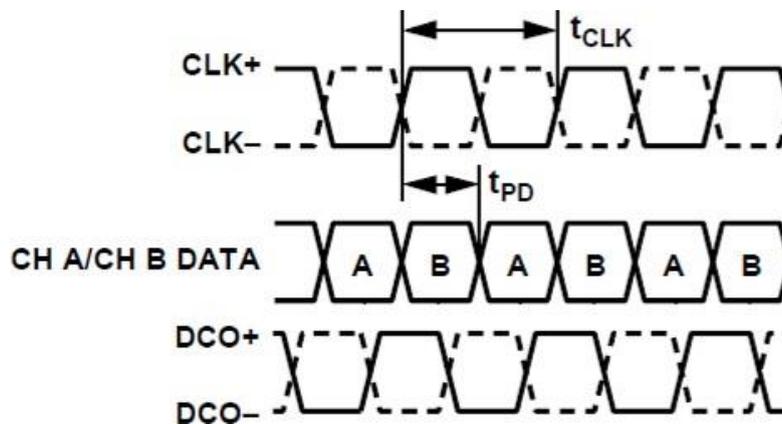


Figura 3.3: Diagrama de onda dos sinais de clock do conversor ADC9627-125.
Fonte: Website da empresa Analog Devices⁶.

do módulo SPRO está sendo considerado como entrada para o MCA. Em termos práticos isso significa ter que sincronizar na programação a aquisição dos dados com a borda de subida do clock DCO, como pode-se ver na figura 3.3.

No módulo SPRO existem duas opções de faixa dinâmica do sinal analógico de entrada: sinal bipolar com excursão de $1 V_{pp}$ ou sinal bipolar com excursão de $2 V_{pp}$. Essa opção é realizada no circuito do conversor AD9627-125, como visto na figura 3.4, onde ligando-se os pinos "1" e "2" do header H1 configuramos o módulo para um sinal de $2 V_{pp}$. Já na escolha alternativa, ligando-se os pinos "3" e "2", o módulo fica preparado para um sinal de $1 V_{pp}$.

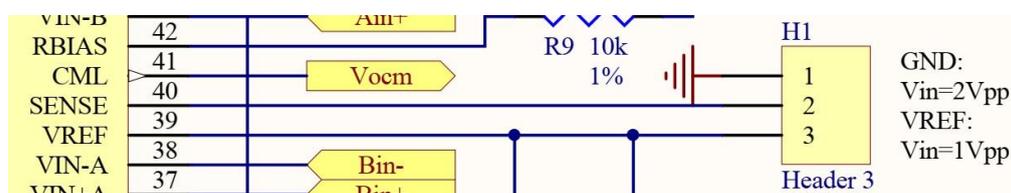


Figura 3.4: Configuração da faixa dinâmica do sinal analógico de entrada no módulo SPRO.

Fonte: LSD, CBPF.

⁶Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9627.pdf>>. Acesso em maio 2020.

3.3 Interface USB

A interface de comunicação USB entre o módulo e um computador pessoal é realizada pelo componente FT245BM do fabricante FTDI Chip (*Future Technology Devices International*). Essa interface tem uma arquitetura baseada em uma memória FIFO bi-direcional, que apresenta uma capacidade máxima de transferência de dados de 1 *MByte/s*, utilizando-se os *drivers D2xx*. A figura 3.5 apresenta o diagrama em bloco simplificado do componente, tirado de [7], onde podemos ver sua arquitetura.

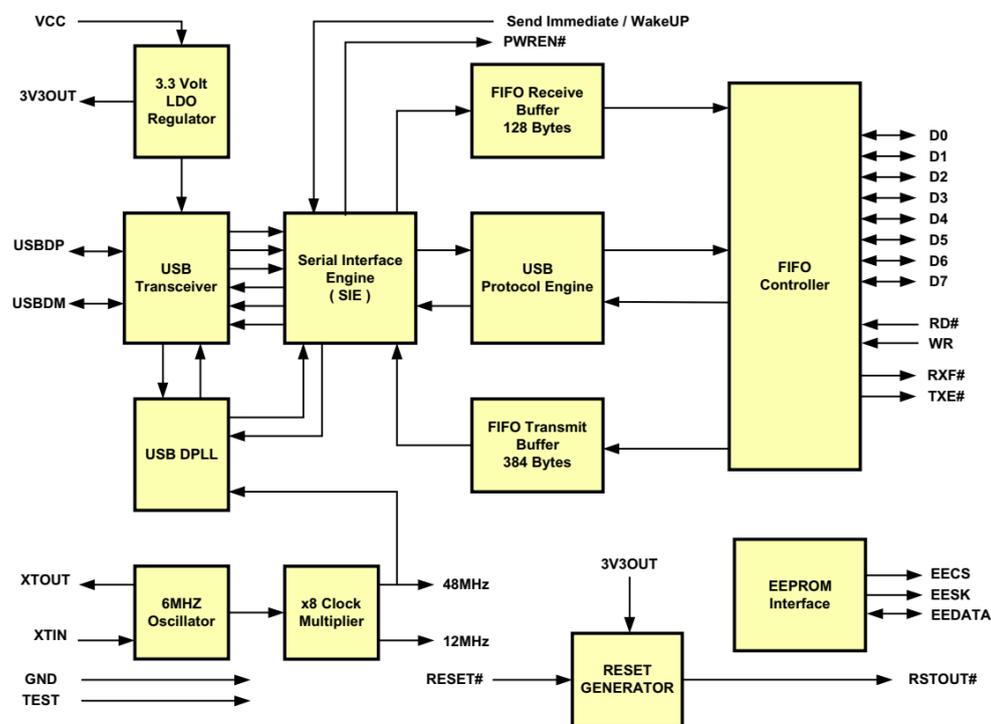


Figura 3.5: Diagrama em Blocos simplificado FT245BM.
Fonte: Website da empresa Future Technology Devices International⁷.

⁷Disponível em: <https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT245BL.pdf>. Acesso em maio 2020.

4 Desenvolvimento do Firmware e Programa de Interface com o Usuário do MCA

O *firmware* desenvolvido para o MCA contém as seguintes funções e características:

- Discriminador de sinal por nível (amplitude).
- Detector de pico de amplitude de um sinal (pulso).
- Cada pico de amplitude detectado é correspondente a um endereço de uma memória RAM. Cada endereço corresponde a um canal.
- Contador do número total de eventos ocorridos.
- Acesso via protocolo USB para dispositivo externo que tenha a interface de usuário instalada.

A figura 4.1 mostra o diagrama em blocos do MCA, onde pode se observar sua sequência lógica de funcionamento. Inicialmente em um estado de espera, o programa passa para a fase onde fará a análise do sinal sendo recebido pelo módulo SPRO. O discriminador de sinal realiza essa comparação com um parâmetro pré-configurado pelo usuário, que na figura é representado por "min_sig"; se a condição

for satisfeita o programa continua para o próximo passo, caso contrário retorna ao estado de espera.

Na sequência, o MCA passa a buscar o pico da amplitude do sinal, analisando amostra a amostra dentro de um período específico, também escolhido pelo usuário ("set_win"). Ao final do processo, o resultado obtido é um dado de 12 bits que irá corresponder a um endereço de memória, ou seja, um canal do MCA.

Os próximos três blocos da figura 4.1 são relacionados exatamente ao procedimento de gerenciamento do dado adquirido. Primeiro a leitura do conteúdo atual da posição de memória correspondente ao canal ("Leitura de Memória"), onde também é incrementado um registro "count" responsável por indicar que um evento válido foi registrado, que sua função ainda será explicada. Após a leitura do conteúdo da posição de memória em questão, passa-se ao próximo passo, "Adição de 1 evento", que, como já deixa claro o nome do bloco, incrementa o conteúdo da memória lida em uma unidade. Naturalmente o passo subsequente é a "Gravação da Memória", onde o novo valor sobrescreve o antigo.

O MCA avança para o passo "Conclusão de Processo", onde ocorre a comparação do registro "count" com o valor pré-definido pelo usuário. Se o resultado da comparação for verdadeiro (" $count = set_count$ "), o MCA indica que a leitura pela interface USB pode ser realizada. Como já explicado, "count" significa quantos eventos válidos foram registrados, ou seja, o MCA autoriza a interface USB a ler os dados da memória RAM após um número determinado de eventos.

Ao fim do processamento de um evento, o MCA retorna ao estado de espera onde aguardará o próximo sinal de trigger. Nas seções seguintes serão detalhados os passos de programação do *firmware* e do programa de interface com o usuário para que a lógica acima fosse acalçada.

4.1 Firmware

Neste trabalho, o *firmware* foi todo desenvolvido em VHDL, sigla para *VHSIC Hard-ware Description Language*, que é uma linguagem tradicional para descrição e síntese de *hardware* em dispositivos tipo FPGA. A linguagem VHDL foi criada e desenvolvida a partir da década de 1980 em um esforço conjunto que englobava avanços tecnológicos em materiais, testes, litografia, encapsulamento e algoritmos para elaboração circuitos digitais integrados padrões de alta velocidade. Tornou-se padrão da indústria muito por ser um padrão oficial IEEE, primeiramente sendo lançado sob alcunha de IEEE 1076, em 1987. Futuramente atualizações foram lançadas com os seguintes nomes IEEE 1164, IEEE 2000 e IEEE 2002. Para o desenvolvimento do *firmware* foi utilizado o ambiente de programação *Altera Quartus II Web Edition*.

As seguintes premissas foram utilizadas para o desenvolvimento do *firmware*:

- A detecção do pico energético deve ser sincronizada com o sinal de clock do conversor A/D (DCO), de 125 MHz.
- O sinal proveniente do conversor A/D deve ser filtrado para eliminação de ruídos.
- O MCA deve processar sinais positivos e negativos vindos do pré-amplificador.
- A detecção de pico deve ser feita em uma janela configurável de tempo.
- O armazenamento dos eventos contabilizados deve ser feito em uma memória RAM configurada dentro do FPGA.
- O módulo de leitura externa deve ser integrado com a programação já existente para interface USB no SPRO.
- Assegurar que nenhuma etapa ocorra enquanto uma outra esteja acontecendo.

O desenvolvimento foi realizado a partir de um projeto já existente para o módulo SPRO, denominado "angra". Desenvolvido para outra aplicação, o projeto "angra" contém algumas funcionalidades que serão utilizadas na programação do MCA,

como por exemplo o gerenciador de clock que realiza a divisão de 40 para 20 *MHz*, que será chamado de "Clock Principal", a configuração, inicialização e interface com o sinal dos canais A e B do conversor A/D, e por último a interface com o dispositivo FTDI responsável pelo protocolo de comunicação USB.

Com estas premissas, chegou-se à configuração vista na figura 4.2. Cada bloco e sinal desse diagrama será explicado de maneira mais detalhada a seguir.

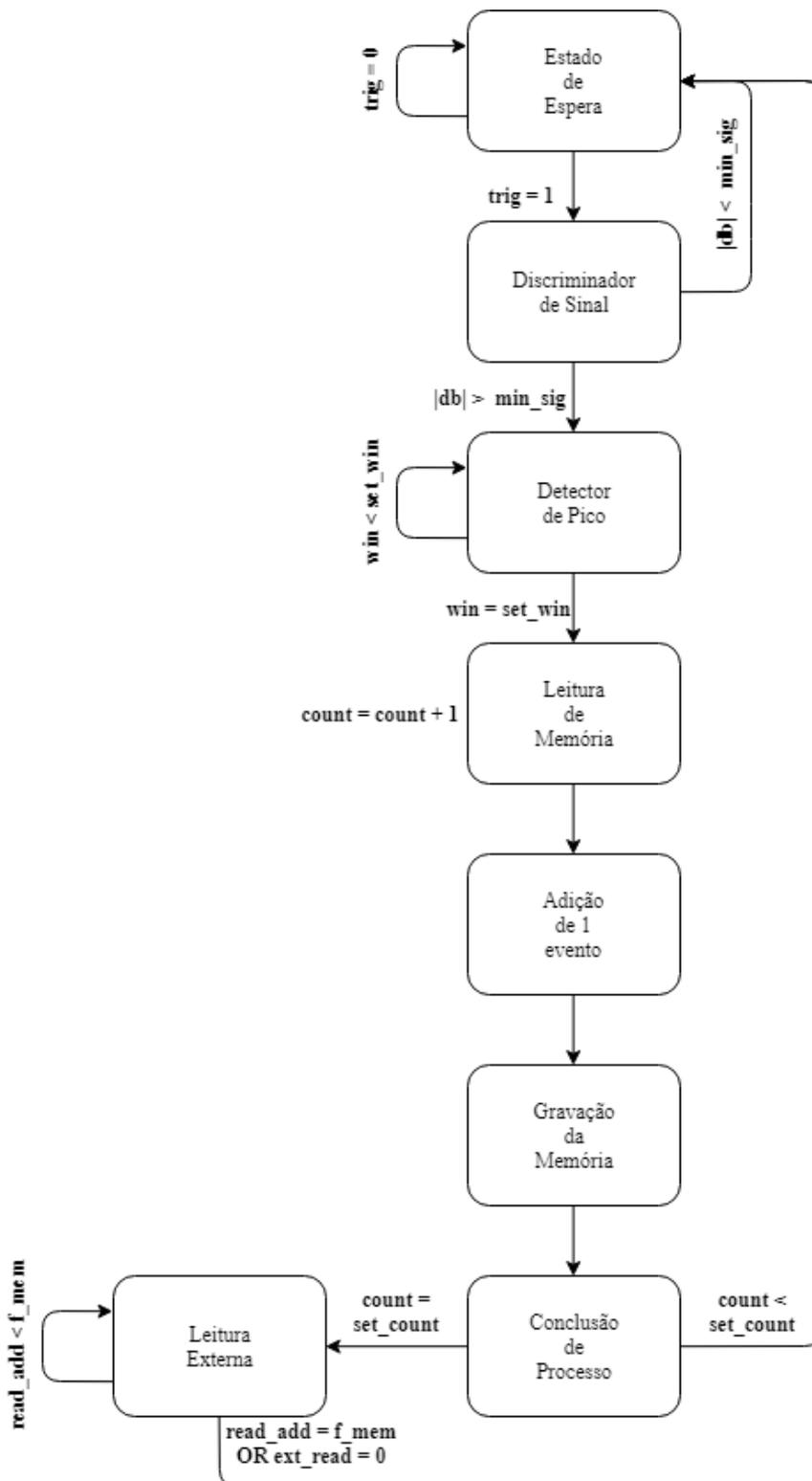


Figura 4.1: Diagrama em Blocos do *firmware* MCA.

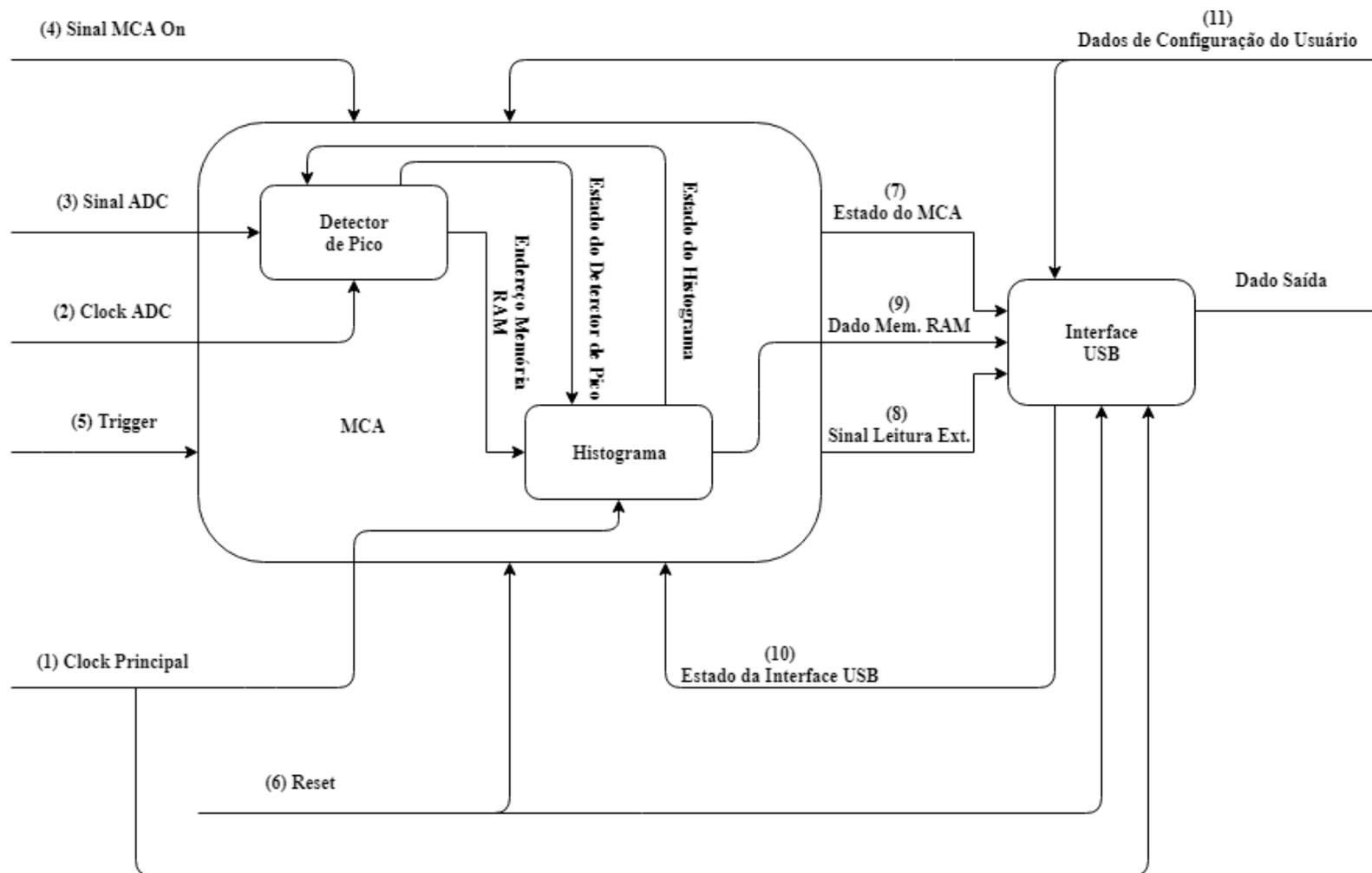


Figura 4.2: Diagrama em blocos do *firmware* do MCA.

4.1.1 Bloco MCA

O bloco principal do analisador multicanal é chamado exatamente de MCA. Ele é o componente mapeado na entidade principal: angra. A tabela 4.1 mostra a lista de sinais de entrada e saída, como visto na figura 4.2:

O bloco MCA, além de conter os componentes de detecção de pico e histogramação, é responsável também pelo gerenciamento dos sinais que iniciam cada um desses componentes. Na figura 4.3 pode-se observar os 10 estados que compõem a máquina de estados deste bloco.

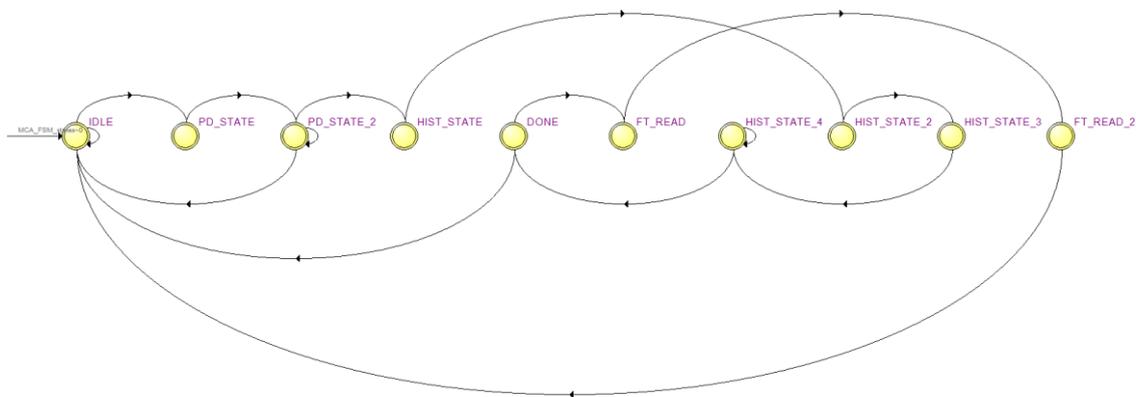


Figura 4.3: Máquina de Estados do bloco MCA.

1. IDLE
2. PD_STATE
3. PD_STATE_2
4. HIST_STATE
5. HIST_STATE_2
6. HIST_STATE_3
7. HIST_STATE_4
8. DONE

#	Descrição	Comentário
1	Clock Principal	Sinal de clock de 20 MHz, responsável pela sincronização da maior parte dos componentes no projeto "angra".
2	Clock ADC	Sinal de clock (DCO) de 125 MHz sincroniza os dados convertidos na saída do conversor A/D.
3	Sinal ADC	Sinal de 16 bits de dado da saída do conversor A/D.
4	MCA On	Sinal digital que habilita o MCA para uso. Gerado pela interface de usuário.
5	Trigger	Sinal digital de trigger para que o MCA seja iniciado. Há três opções de uso para este sinal: interno (vindo da interface do usuário), externo, contínuo.
6	Reset	Sinal digital, padrão do módulo SPRO, que reinicia todos os processos do projeto.
7	Estado MCA	Sinal digital que indica se o bloco MCA está processando um evento ou não.
8	Sinal de leitura externa	Sinal digital que autoriza a interface USB acessar e adquirir os dados da memória RAM do MCA.
9	Dados Memória RAM	Sinal de 16 bits com o conteúdo da memória RAM do MCA.
10	Estado interface USB	Sinal digital que indica se o bloco da interface USB está realizando leitura ou não.
11	Dados de Configuração do Usuário	Sinais de 16 bits que parametrizam o MCA: janela de detecção de pico, tempos de espera, Threshold para o discriminador, endereços mínimo e máximos a serem lidos pela interface USB.

Tabela 4.1: Sinais de entrada e saída do MCA.

Sinal	Estado
MCA On, Trigger	1
Reset, Estado do Detector de Pico, Estado do Histograma, Estado do MCA, Estado da Interface USB, Sinal de Leitura Externa	0

Tabela 4.2: Condições para início da máquina de estados do bloco MCA.

9. FT_READ

10. FT_READ 2

A máquina sempre inicia no estado IDLE e aguarda as condições iniciais para iniciar, que são mostradas na tabela 4.2.

Ao encontrar essas condições, e não havendo sinal de Reset ativo, a máquina de estados passa ao PD_STATE, onde ativa um sinal que dará início ao bloco "Detector de Pico", e durará exatamente um período de clock: "Trigger do Det. de Pico". Ao passar para o estado PD_STATE_2, o sinal que foi ativado retorna para nível lógico baixo, desta forma, cria-se um pulso de trigger para o bloco "Detector de Pico" com duração de apenas um período de clock.

A máquina é síncrona com o "Clock Principal".

Após o término do bloco "Detector de Pico", dois cenários são possíveis. Em um a máquina analisa o sinal de "Watchdog": se este for ativo (1), a máquina retorna ao estado IDLE. Caso contrario, passa ao próximo passo onde o pico do sinal será detectado, e por fim seguirá para o próximo estado do bloco MCA. O próximo estado HIST_STATE que, utilizando o mesmo modo operacional citado acima, inicia o bloco "Histograma". É também em HIST_STATE que é realizada a contagem do número de eventos válidos, como mostrado na figura 4.1 sob o nome de "count". Por questões de sincronização a máquina de estado passa pelos próximos dois estados, HIST_STATE 2 e HIST STATE 3, que acabam passando ao estado HIST_STATE 4.

Esse último aguarda o fim do bloco "Histograma" e passa ao estado DONE.

No estado DONE realiza-se a comparação do número de eventos válidos com a janela pré configurada pelo usuário. Caso o número de leituras não tenha alcançado o parâmetro, a máquina retorna ao estado IDLE, e aguarda a próxima condição de trigger para reiniciar. Caso contrário, ou seja, o número de eventos válidos para que seja autorizado a leitura via interface USB tenha sido alcançado, o próximo estado a ser FT_READ.

O estado FT_READ tem a função de gerar um pulso de trigger que para autorizar a interface USB de acessar os dados da memória RAM. FT_READ gera o "Sinal de leitura externa" mostrado pelo número (8) da figura 4.2 e na tabela 4.1. Um período de clock depois passa-se ao estado FT_READ_2, onde o sinal retorna ao nível lógico baixo garantindo que o pulso tenha apenas um período de duração.

4.1.2 Detector de Pico

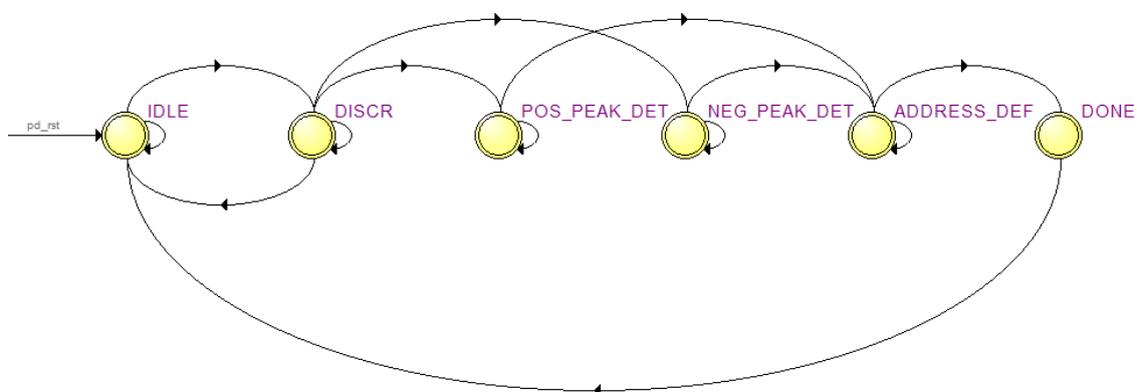


Figura 4.4: Máquina de Estados do bloco Detector de Pico.

O bloco "Detector de Pico", agora abordado detalhadamente, exerce as funções dentro do MCA que são sincronizadas com o "Clock ADC". Também utilizando-se de uma máquina de estados, como se ve na figura 4.4, o bloco "Detector de Pico" tem no total 6 estados.

1. IDLE

Sinal	Estado
Trigger do Det. de Pico	1
Reset, Estado do Detector de Pico,	0

Tabela 4.3: Condições para início da máquina de estados do bloco Detector de Pico

2. DISCR
3. POS_PEAK_DET
4. NEG_PEAK_DET
5. ADDRESS_DEF
6. DONE

É iniciado quando a máquina de estados do bloco MCA entra no estado PD_STATE, e os seguintes sinais são respeitados, como visto na tabela 4.3.

O estado fundamental da máquina de é sempre o estado IDLE. Ao se satisfazer a condição citada na 4.3, a máquina de passa para o estado DISCR, que é o "Discriminador de Sinal". Esse estado é responsável por duas tarefas, citadas abaixo:

- Identificar se o sinal vindo do conversor A/D é positivo ou negativo.
- Identificar se o sinal é válido ou não, baseado em um valor pré-definido, ou *threshold*.

4.1.2.1 Discriminador de Sinal

Quando no estado DISCR o "Sinal ADC", visto na figura 4.2 e na tabela 4.1 pelo número (3), é comparado a dois parâmetros de 16 bits cada um, MCA_PD_POS_DB e MCA_PD_NEG_DB, que nada mais são que os níveis mínimos de sinal que o usuário considera ser um evento válido. São dois níveis pois um é relativo a um sinal positivo vindo do conversor A/D, e o outro a um sinal negativo. Não é esperado que haja um sinal que transite entre negativo e positivo. O sinal de saída do detector é bem

definido em um ou outro, como explicado anteriormente. Observa-se que o DISCR então funciona como um filtro de sinais que o usuário reconheça como ruídos durante o experimento.

Se o sinal não atingir um dos dois níveis indicados acima, a máquina continua em DISCR analisando os níveis do "Sinal ADC". Imaginando que por qualquer motivo o "Sinal ADC" não atinja, um contador foi implementado onde uma janela seja determinada para que o estado DISCR valide ou não o sinal sendo adquirido. Se o fim da janela for alcançado sem que um nível de sinal válido seja atingido um bit, que nesse trabalho será chamado de "Watchdog", será colocado em nível lógico alto fazendo com que o MCA retorne ao estado fundamental de IDLE, como foi citado no bloco MCA. O tamanho da janela é determinada via interface pelo usuário, por um parâmetro de 16 bits, chamado de MCA_WD.

Por outro lado, detectando um nível de sinal que supere os mínimos configurados, passa-se ao próximo estado que podem ser dois, a depender da característica do sinal.

4.1.2.2 Detecção de Pico Positivo e Negativo

Passando pelo discriminador, a máquina pode seguir para um de dois estados possíveis: POS_PEAK_DET ou NEG_PEAK_DET. Obviamente o que se um ou outro é exatamente a análise do sinal feita pelo discriminador.

Nesse estado tem-se um contador de pulsos que é comparado a um parâmetro de 16 bits, chamado de MCA_WINDOW. Esse contador funcionará como a janela de detecção do pico do sinal, assim sendo a cada ciclo de clock o contador é incrementado em uma unidade, até chegar ao parâmetro configurado. Durante o período em que a janela de detecção estiver ativa, um registro será utilizado para armazenar o maior ou menor valor (maior se positivo, menor se negativo) do sinal sendo analisado. A figura 4.5 mostra o comportamento do descrito acima, quando submetido a um sinal senoidal, somente com valores positivos.

Ao final da janela, a máquina passa ao estado ADDRESS_DEF, onde o último valor registrado como pico do sinal será traduzido como o endereço da memória

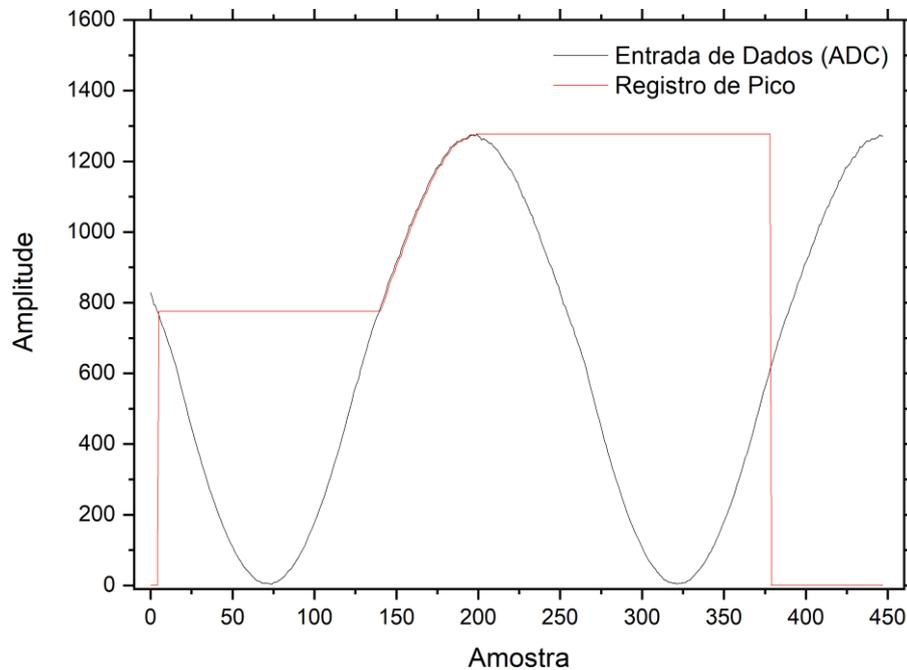


Figura 4.5: Funcionamento da função de detecção de pico.

RAM utilizada no MCA.

Um período de clock depois a máquina passa ao estado DONE, e mais um ciclo passado retorna a IDLE, dando o processo de detecção de pico finalizado.

4.1.3 Histograma

O bloco "Histograma" terá início assim que o "Detector de Pico" terminar, fazendo com que o bloco MCA entre no estado HIST_STATE. Esse bloco é sincronizado pelo "Clock Principal", e também faz uso de uma máquina de estados como mostra a figura 4.6, e tem no total 8 estados.

1. IDLE
2. GET ADDR

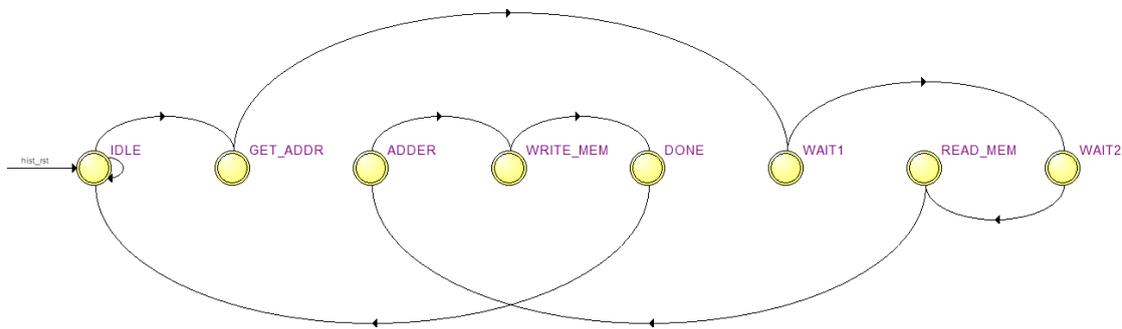


Figura 4.6: Máquina de Estados do bloco Histograma.

Sinal	Estado
Hist Trig	1
Reset, Hist STATUS,	0

Tabela 4.4: Condições para início da máquina de estados do bloco Histograma.

3. WAIT1
4. WAIT2
5. READ MEM
6. ADDER
7. WRITE MEM
8. DONE

Mais uma vez a máquina sempre estará inicialmente em IDLE, e tendo as condições de início presentes passa ao próximo estado, como mostra a tabela 4.4.

Após o estado IDLE, a máquina passa a GET ADDR. Neste estado é colocado no barramento de endereços da memória RAM. Os passos seguintes, WAIT1, WAIT2 e READ MEM, são designados pelo modo de funcionamento do bloco da memória RAM.

Característica	Valor
Tipo	M4K
Clock	Único
Barramento de Dados	16 bits
Quantidade de Dados	4096
Barramento de Endereços	12 bits
Reset	Assíncrono

Tabela 4.5: Características do bloco de memória RAM na FPGA.

4.1.3.1 Memória RAM

O microcontrolador FPGA utilizado tem a capacidade de programação de blocos de memória RAM internos. Como já referenciado na tabela 3.1, pode-se programar até 52 blocos de memória RAM do tipo M4K, como podemos verificar em [13], sendo cada bloco composto por 4096 bits, mais 512 bits de paridade.

Para o desenvolvimento deste MCA é usada uma memória com as características descritas na tabela 4.5.

A figura 4.7 pode-se ver uma representação em bloco da memória RAM.

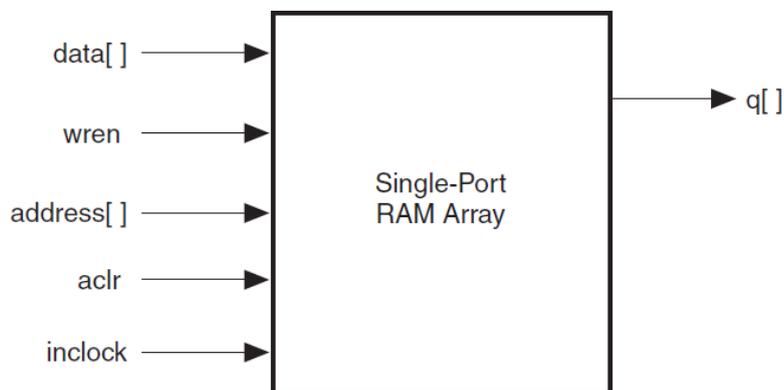


Figura 4.7: Representação em bloco da memória RAM.

O bloco de memória RAM é construído com o auxílio de uma função do ambiente de programação do *firmware*, *Altera Quartus II Web Edition*, chamado *MegaWizard Plug-In Manager*, o qual pode-se ver em detalhes em [14]. O funcionamento da memória RAM pode ser encontrado no [15], onde se têm os diagramas de tempo

Sinal	Estado
Arbiter Enabled, MCA Trigger	1
Reset, Estado do MCA, Leitura pelo Host, Estado de transferência USB	0

Tabela 4.6: Condições para início da máquina de estados do bloco de Controle da Interface USB

para leitura e escrita na memória.

O conteúdo atual do endereço previamente designado é adicionado de uma unidade no passo subsequente: `ADDER`. Após a adição, o novo dado é reescrito na mesma alocação de memória no estado `WRITE_MEM`. Finalmente passa ao estado `DONE`, indicando que o bloco "Histograma" chegou ao seu fim. O bloco retorna ao estado `IDLE`, aguardando um novo sinal de início.

4.1.4 Controle da Interface USB

O bloco responsável pela interligação com o bloco de controle da interface USB é um bloco adaptado de um pré existente no módulo `SPRO`, que é detalhado em [16]. A adaptação teve que ser realizada pois a maneira de acessar os dados mudou, pois ao invés do uso de uma memória `FIFO` (*First-In, First-Out*) como antes, no atual projeto foi necessário o uso de memória `RAM`. Assim sendo o acesso aos dados armazenados não dependiam mais da ordem de entrada destes na memória, mas sim de um local definido de memória pelo qual o dado deve ser buscado - descrito na secção anterior.

O bloco de controle da interface USB, como pode-se ver na figura 4.2, é externo ao bloco principal do MCA. Suas condições de início podem ser vistas na tabela 4.6.

Uma vez satisfeitas as condições de início, o bloco sai do estado de `IDLE` indo para o estado `WAIT_HOST`. Neste verifica se o programa de interface com o usuário está requisitando a leitura da memória por até 0,0128 s; após o término desse tempo

se não houver um sinal do host para leitura, o bloco volta ao estado de IDLE. Tendo um sinal de leitura por parte do usuário, a máquina segue ao próximo estado: DEF_ADDR.

No estado DEF_ADDR são definidos os endereços que serão lidos da memória. Esse valor é definido também pelo programa de interface com o usuário.

Após um ciclo, passa-se aos passos de leitura do conteúdo do primeiro endereço de memória. Esse processo é o mesmo utilizado no bloco de histograma, já descrito anteriormente em 4.1.3.

Após ler o conteúdo do endereço inicia-se o envio do dado para a memória FIFO do gerenciador do protocolo USB (FT245BM). Nesse ponto devemos realizar a quebra do conteúdo da memória em duas partes, pois esse é composto por 16 bits, ao passo que o barramento USB comporta 8 bits por transmissão/recebimento. O dado é separado em LSB (*Less Significant Byte*) e MSB (*Most Significant Byte*), e os próximos passos se dedicam a transferir esses dados.

Primeiro é enviada a parte LSB do dado, e os estados SEND_LSB_1, SEND_LSB_2, SEND_LSB_3 e SEND_LSB_4 são os responsáveis. Logo após aguarda-se o gerenciador do protocolo USB liberar novamente a transmissão, e é enviada a parte MSB do dado. SEND_MSB_1, SEND_MSB_2, SEND_MSB_3, SEND_MSB_4 são os estados responsáveis por esse envio.

Aguarda-se mais uma vez o gerenciador do protocolo ser liberado, passando ao estado MEMCHK.ST. Nessa etapa é verificado se o último endereço desejado foi alcançado ou não; em caso afirmativo um bit verificador é colocado em estado alto, indicando que a máquina concluiu os passos designados e portanto pode retornar ao seu estado inicial (IDLE). Caso contrário é indicado que devemos passar ao próximo endereço de memória, retornando então ao estado GET_ADDR dando prosseguimento ao processo.

4.2 Programa de Interface com o Usuário

Como parte do desenvolvimento, um programa de interface com o usuário foi desenvolvido. Seus principais objetivos são listados abaixo:

- Visualização gráfica dos dados do MCA.
- Configuração dos parâmetros do MCA.
- Salvar os dados em formato separado por ”;” para análise em outros *softwares* (.dat).

O Desenvolvimento do programa de interface com o usuário teve como base um outro já previamente desenhado para a calibração do MPD (Módulo Processador de Dados), onde as funções de montagem do gráfico e comunicação USB foram usadas como base para o desenvolvimento atual, tendo como resultado da aparência final mostrado na figura A.1, no apêndice A.

Na seção seguinte será detalhada exatamente o desenvolvimento da comunicação via interface USB, e como essa interage com o *firmware* do FPGA. Para mais detalhes de funcionamento do programa de interface com o usuário em si, seguir para o apêndice A.

4.2.1 Comunicação USB

4.2.1.1 Dados de entrada no MCA

Parte da comunicação via USB é destinada a entrar com dados de configuração e/ou gerenciamento do MCA. A tabela 4.7 lista esses dados.

Como explicado em 4.1.4, cada dado transferido via o barramento USB deve ter 8 bits, porém a necessidade de termos valores maiores para certos dados de configuração levou ao fato que alguns desses ocupam dois registros cada um. O *firmware* do MCA trabalha para que o dado seja agrupado de forma com que faça

Descrição	Endereço no FPGA (Hex)	Registros
Seletor de Leitura USB (Árbitro)	80	oreg(1)
Gerenciamento do MCA bit 0: ADC Power bit 1: MCA Enable bit 2: Host Read	87	oreg(2)
Endereço mínimo de memória RAM	70 71	oreg(13) oreg(14)
Endereço máximo da memória RAM	72 73	oreg(15) oreg(16)
Threshold para sinal positivo	74 75	oreg(17) oreg(18)
Threshold para sinal negativo	76 77	oreg(19) oreg(20)
Janela de Detecção	78 79	oreg(21) oreg(22)
Intervalo de leitura USB	7A 7B	oreg(23) oreg(24)
Tempo de Watchdog	7C 7D	oreg(25) oreg(26)

Tabela 4.7: Registros de configuração e gerenciamento do MCA

sentido, assim como o programa de interface com o usuário realiza a divisão deste em duas partes. Ou seja, os dados de 16 bits listados na tabela 4.7 são primeiramente quebrados em duas partes de 8 bits, LSB e MSB, sendo transferidos dessa maneira pela USB.

O processo de envio dos dados ao MCA ocorre em acordo com o já programado bloco de interface USB. Os seguintes passos são necessários para realizar o envio

1. Enviar código de escrita em hexadecimal "AA".
2. Enviar endereço que se deseja acessar
3. Enviar dados de 8 bits

O detalhe de funcionamento do processo de transferência de dados via USB pode ser encontrado em [16].

4.2.1.2 Dados de saída do MCA

Os dados de saída do MCA são justamente o conteúdo da memória RAM, ou seja, a contagem dos eventos em cada nível de energia.

O programa de interface com o usuário requisita a leitura da memória ativando o bit 2 do registro *oreg(2)*, *Host Read*, como mostrado na tabela 4.7. Para iniciar a leitura, o programa de interface com o usuário aguarda que o bloco da interface USB seja liberado para a transferência.

O processo de leitura continua questionando ao dispositivo de controle USB (FTDI) qual o conteúdo da memória FIFO de transmissão. Confirmando-se que o conteúdo obedece a condição encontrada na equação 4.1, inicia-se a transferência entre o módulo SPRO e o computador do usuário.

$$FT_Q_Bytes > (Add_{max} - Add_{min} + 1) \times 2 \quad (4.1)$$

onde:

- FT_Q_Bytes - número de bytes na memória FIFO de transmissão
- Add_{max} - Endereço máximo a ser lido na memória RAM
- Add_{min} - Endereço máximo a ser lido na memória RAM

Em seguida o conteúdo da memória precisa ser processado para que cada byte (8 bits) seja transformado em uma palavra (*word* - 16 bits), que é exatamente o conteúdo original armazenado na memória RAM. Por ordem, o LSB é transferido primeiro, e o MSB logo após.

O conteúdo recém adquirido é colocado em uma matriz onde o índice de cada posição é exatamente o endereço de memória correspondente da memória RAM. Essa matriz é a base de dados para construir o gráfico e os dados que serão salvos no arquivo ".dat".

Esse processo se repete até que o endereço máximo requisitado anteriormente seja alcançado, e pode ser observado na figura 4.8.

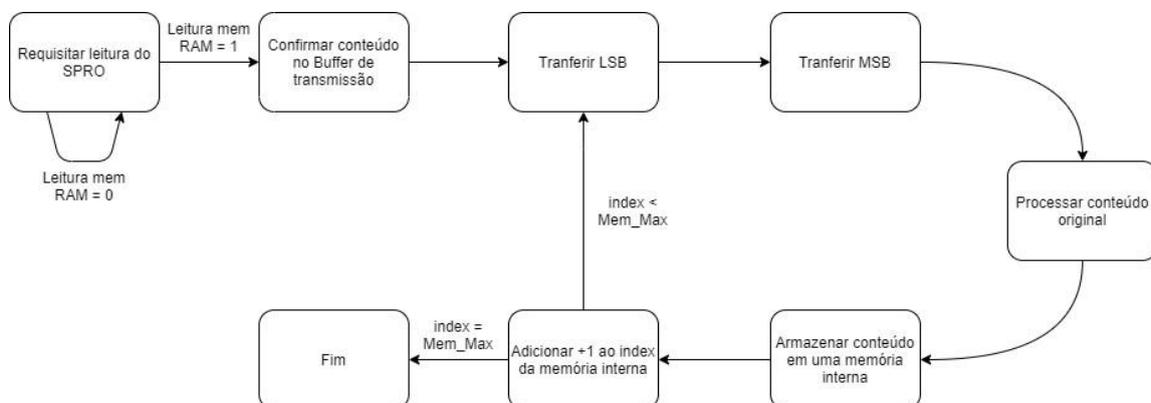


Figura 4.8: Diagrama em blocos do processo de transferência e armazenamento do conteúdo do SPRO no programa de interface com o usuário do MCA.

5 Medidas de caracterização e Resultados experimentais

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos por testes feitos com o MCA desenvolvido. A proposta é verificar seu funcionamento e levantar características típicas do MCA.

Este capítulo destina-se a mostrar os resultados experimentais obtidos por testes feitos com MCA. A proposta dos mesmos é observar o comportamento e levantar características do MCA, que serão apresentados a seguir.

5.1 Tempo Morto

Como já citado no capítulo 2, definimos o Tempo Morto como o tempo mínimo para processar somente um evento, ou seja, o intervalo mínimo entre dois eventos consecutivos para que o instrumento seja capaz de adquirir e processar ambos eventos.

Para medir o tempo morto total do MCA levou-se em conta duas contribuições: o tempo de processamento de um sinal proveniente do detector (t_{mca}), e o tempo de leitura da memória RAM pela interface de usuário (t_{usb}).

O tempo de processamento de um sinal é medido entre o instante em que o trigger é disparado externamente até o fim do processamento interno de histogramação do MCA. Um gerador de sinais foi utilizado para simular um sinal vindo de um detector, configurado com dois tipos de sinal: uma onda quadrada e uma onda senoidal.

Sinal	Janela de Detecção (ns)	t_{mca} (ns)	Taxa de Aquisição (ksps)
Onda Quadrada	125	1150	869,6
Onda Quadrada	250	1250	800,0
Onda Quadrada	500	1500	666,7
Onda Senoidal	125	1150	869,6
Onda Senoidal	250	1300	769,2
Onda Senoidal	500	1500	666,7

Tabela 5.1: Tempo morto do MCA e taxa de aquisição

Ambos os sinais são puramente positivos, com valor de tensão pico-a-pico de 500 mV , sendo que a onda quadrada tem um tempo de subida de 7 ns . A programação do MCA deixa a critério do usuário a escolha da janela de detecção do sinal, então foram escolhidos três períodos como padrões para o teste: 125, 250 e 500 ns .

O tempo morto encontrado para cada janela de detecção pode ser visto na tabela 5.1:

Pode-se calcular, então, a taxa de aquisição do MCA, que corresponde ao inverso do tempo morto (t_{mca}), como visto na equação 5.1.

$$T_{mca} = \frac{1}{t_{mca}} \quad (5.1)$$

O resultado obtido para cada janela de detecção pode ser encontrado também na tabela 5.1.

Para o tempo de leitura da memória RAM pela interface de usuário (t_{usb}), o teste proposto foi realizar ciclos de leitura de uma a três posições da memória RAM - por limitações do FPGA, não é possível monitorar a leitura de todos os endereços de memória disponíveis. Os tempos obtidos podem ser vistos na tabela 5.2.

O valor de 2047 endereços lidos, visto na tabela 5.2, é calculado com base no valor de um único endereço lido.

A interface USB, por meio do seu controlador FT245BM como visto no capítulo 3, tem uma taxa de transferência máxima de 1 Mbyte/s . Nos resultados obtidos

Número de Endereços Lidos	t_{usb} (ns)	Bytes Transmitidos	Taxa de Leitura (Mbyte/s)
1	2350	2	0,85
2	4570	4	0,87
3	6820	6	0,87
2047	4810450	4094	0,85

Tabela 5.2: Tempo de leitura da memória RAM pela interface USB

pode-se ver uma taxa de 0,85 Mbytes/s, calculados da seguinte maneira:

$$T_{usb} = 2N_{add} \times \frac{1}{t_{usb}} \times \frac{1}{10^6} \quad (5.2)$$

onde N_{add} é o número de endereços a serem lidos, e logicamente t_{usb} é o tempo necessário para a leitura desses. O fator de 2 para cada endereço é explicado pelo fato de que o conteúdo ser de 16 bits, e a transferência suportar 8 bits por vez, como explicado no capítulo 4.

5.2 Curva de Calibração

Nesta secção descreve-se como foi levantada a curva de calibração do sistema. Para esse levantamento, foi montado um arranjo de teste conforme a figura 5.1:

Para levantar a curva de calibração, foi gerado um trem de pulsos com frequência de 4 kHz e *duty cycle* de 99 %. O pulso foi configurado para que seu nível "inativo" ficasse fixo em 0 V (GND), enquanto o nível "ativo" pudesse variar em passos de 100 mV para o caso da configuração do SPRO para 2 V_{pp}, e 50 mV para a configuração de 1 V_{pp}. Na figura 5.2 pode ser observado um exemplo do pulso utilizado.

Ao mesmo tempo um trigger foi enviado para o FPGA para que esse pudesse iniciar o processo do MCA.

Utilizando-se a ferramenta *SignalTap II Logic Analyzer* (recurso do ambiente de programação do FPGA Intel (Altera) Quartus II), foi possível se registrar todos os

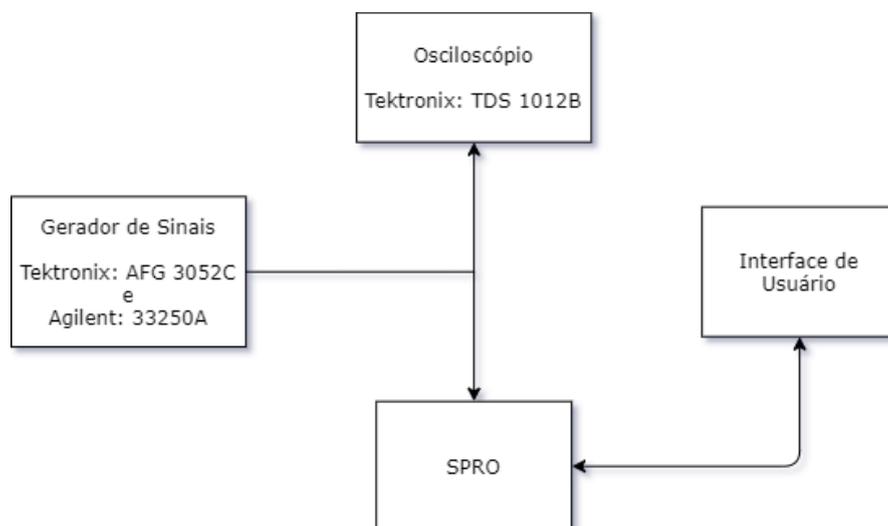


Figura 5.1: Setup de teste para levantamento da Curva de Calibração do MCA.

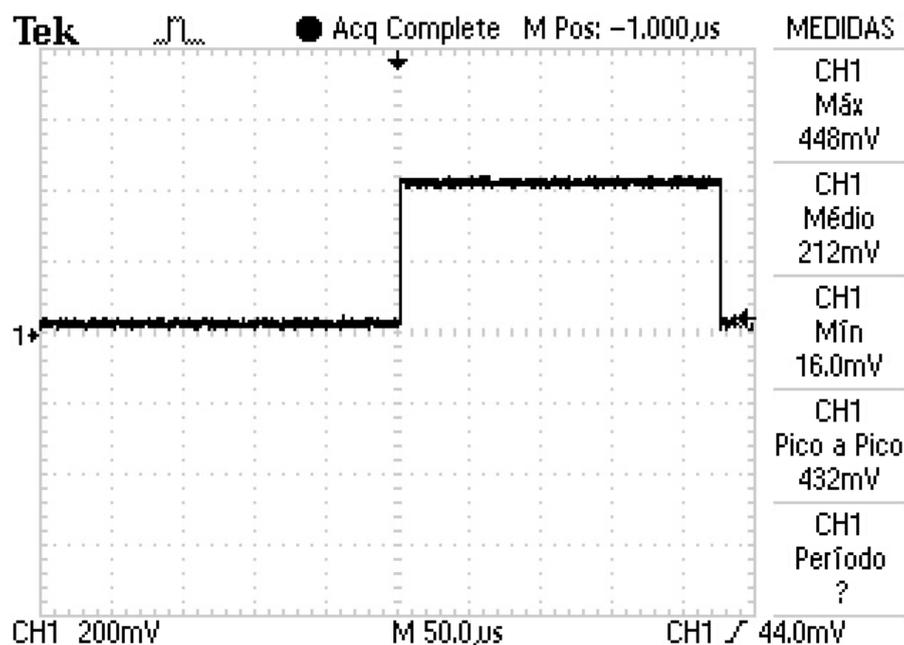


Figura 5.2: Exemplo de pulso utilizado para curva de calibração.

valores convertidos pelo conversor analógico-digital presentes naquele determinado espaço de tempo. Cem amostras foram retiradas desse registro para que um valor médio pudesse ser determinado; esse procedimento foi repetido três vezes para cada

valor de tensão do pulso.

As curvas de calibração obtidas são mostradas nas figuras 5.3 e 5.4, para as duas faixas dinâmicas do SPRO.

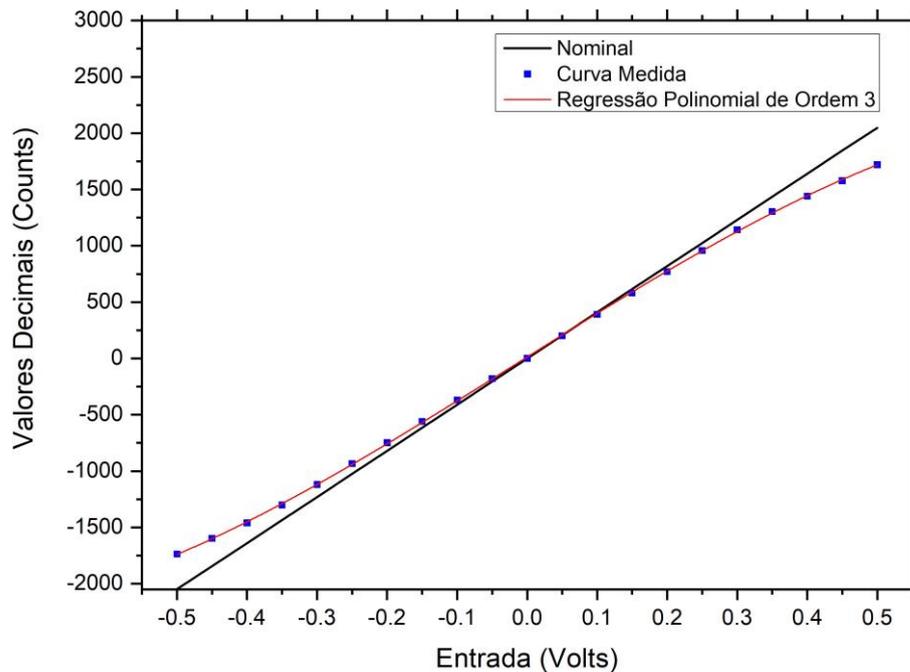


Figura 5.3: Curva de calibração para configuração de 1 V_{pp}

Nas figuras 5.3 e 5.4 nota-se um aumento de desvio da curva ideal quanto mais os valores de tensão se distanciam do ponto zero (GND). Este erro pode ser atribuído a um erro intrínseco de todo conversor A/D chamado INL (*Integral Non-Linearity*), que provoca um distanciamento em inclinação da curva medida para a curva ideal (nominal), como abordado em [3], [17].

Para cada curva de calibração foi criada uma linha de tendência baseada em uma regressão polinomial como visto nas equações 5.3 e 5.4, respectivamente para as configurações de 1 V_{pp} e 2 V_{pp}. O coeficiente de determinação referente a cada regressão realizada são, respectivamente para 5.3 e 5.4: $R^2_{1Vpp} = 0,99994$ e

$$R^2_{2Vpp} = 0,99947.$$

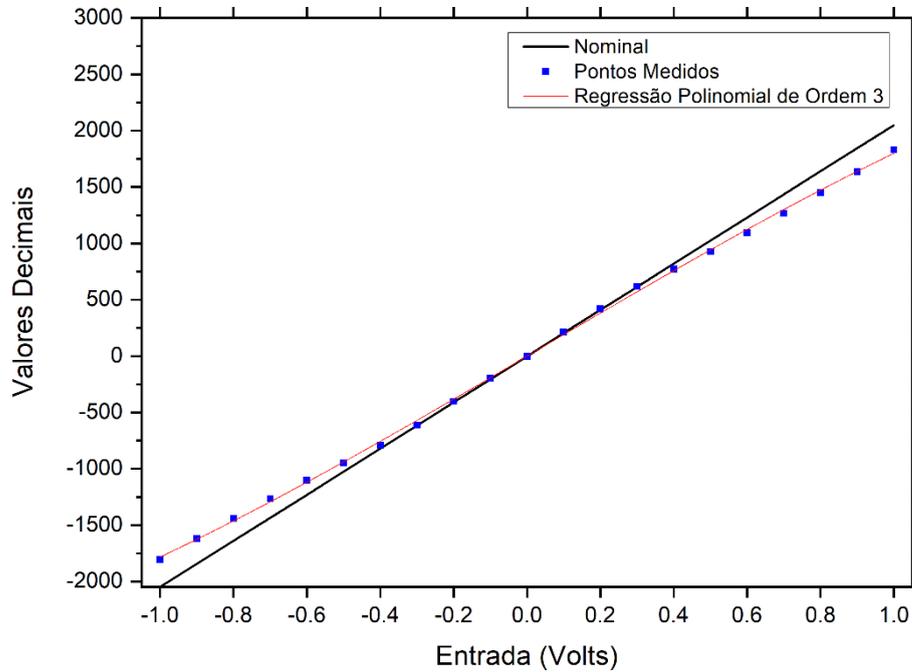


Figura 5.4: Curva de calibração para configuração de 2 V_{pp}.

$$ADC_{1V_{pp}} = -1776,3x^3 - 93,937x^2 + 3902,6x + 12,323 \quad (5.3)$$

$$ADC_{2V_{pp}} = -121,11x^3 + 9,4804x^2 + 1911,7x - 0,6879 \quad (5.4)$$

5.3 Teste com sinal de entrada senoidal

Neste teste, um sinal senoidal foi injetado no MCA simulando um sinal de detector, com o auxílio de um gerador de sinais. A amplitude do sinal senoidal foi variada para cobrir a faixa dinâmica disponível, sendo que a duração de cada aquisição foi definida como um período de tempo fixo. O intuito do teste é verificar se o MCA está realizando leituras somente quando um sinal válido for observado, assim como

Sinal (<i>mVp</i>)	Total de Eventos
-1000	1198
-900	1209
-800	1210
-700	1201
-600	1201
-500	1194
-400	1217
-300	1205
-200	1211
-100	1206
100	1218
200	1224
300	1211
400	1216
500	1215
600	1213
700	1216
800	1219
900	1217
1000	1217

Tabela 5.3: Número total de eventos para cada teste de aquisição

o comportamento de armazenamento deste evento no MCA.

O teste foi realizado com eventos em que o sinal de entrada no MCA era uma onda senoidal com período de 250 ns e intervalo de trigger entre eventos de 0,5 s. A duração de cada aquisição foi estipulada em 600 s, dando um total de 1200 eventos que devem ser coletados em cada teste realizado. Foi utilizado um módulo SPRO, configurado em 2 *Vpp*.

No total 20 configurações de teste foram realizadas alterando-se a amplitude do sinal de entrada em 200 *mVpp* (100 *mVp*). Inicialmente, o programa de interface com o usuário do MCA foi configurado para identificar somente a parte positiva da onda. Em um segundo momento, realizou-se as medidas para a excursão negativa da onda senoidal. As figuras 5.5 e 5.6 mostram os histogramas para cada teste realizado, e a tabela 5.3 mostra o total de eventos para cada teste.

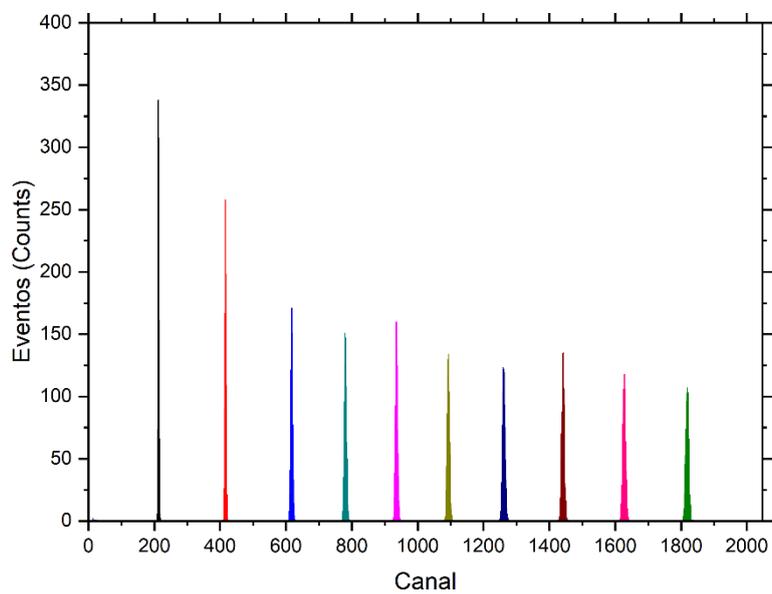


Figura 5.5: Aquisição de eventos com sinal de entrada senoidal - excursão positiva.

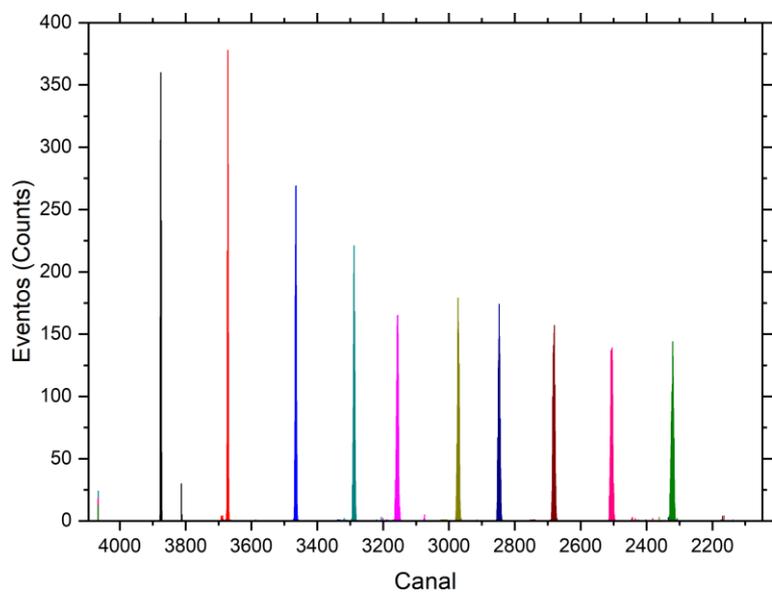


Figura 5.6: Aquisição de eventos com sinal de entrada senoidal - excursão negativa.

5.4 Ruído do Sistema de Aquisição de Dados

Um passo importante foi a caracterização do ruído inerente ao módulo de aquisição, sem a presença do detector. Para isso, o módulo de aquisição SPRO, com configuração para 1 V pp , foi montado sem um gerador de sinais ou um detector conectado em sua entrada. Para esse teste foi configurado um trigger interno no FPGA de $1,25\text{ ms}$ (800 Hz) para iniciar o MCA, já que configurar um *threshold* poderia mascarar possíveis resultados válidos.

Dois conjuntos de medidas foram obtidos utilizando o programa de interface com o usuário desenvolvido, sendo um com a entrada de sinal em aberto, e outro com uma terminação de $50\ \Omega$. Os resultados encontrados podem ser observados na figura 5.7, e revelam duas faixas de ruído, sendo uma em torno de $2,5\text{ mV}$, para o caso em que o circuito está terminado com $50\ \Omega$, e outra em torno de $24,5\text{ mV}$ para o caso sem a terminação.

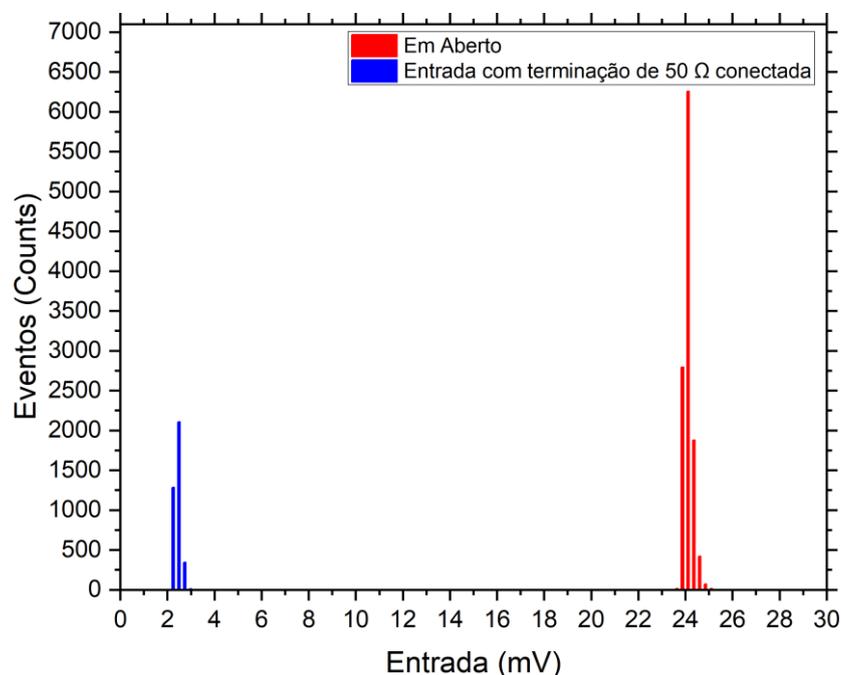


Figura 5.7: Ruído do Sistema de Aquisição SPRO.

Na configuração de teste em aberto, o nível de ruído do sistema se apresenta maior do que na configuração com a terminação de 50Ω conectada. Esse resultado é esperado já que na ausência da terminação de 50Ω o conector funciona como uma antena, que somado às correntes de *offset* do conversor AD, causam a distorção medida. Quando com a terminação, o aterramento melhora pelo fato de agora termos duas cargas resistências de 50Ω em paralelo, sendo uma do circuito de entrada analógica, como mostra a figura 3.2.

5.5 Resolução

A resolução do MCA pode ser calculada utilizando-se os resultados obtidos e descritos na secção 5.3. Observando as figuras 5.5 e 5.6, verifica-se claramente diferenças de resolução dependendo do nível de tensão na entrada do módulo. A altura máxima de contagem dos eventos capturados são diferentes apesar de o número total dos mesmos seja semelhante para todos os níveis de tensão. Para o cálculo da resolução foi utilizado o pior caso, onde o pico de contagens seja o menor. A figura 5.8 e a equação 5.5 demonstram o resultado encontrado.

$$R = \frac{FWHM}{H} = \frac{10,9}{1818} = 0,006 = 0,6\% \quad (5.5)$$

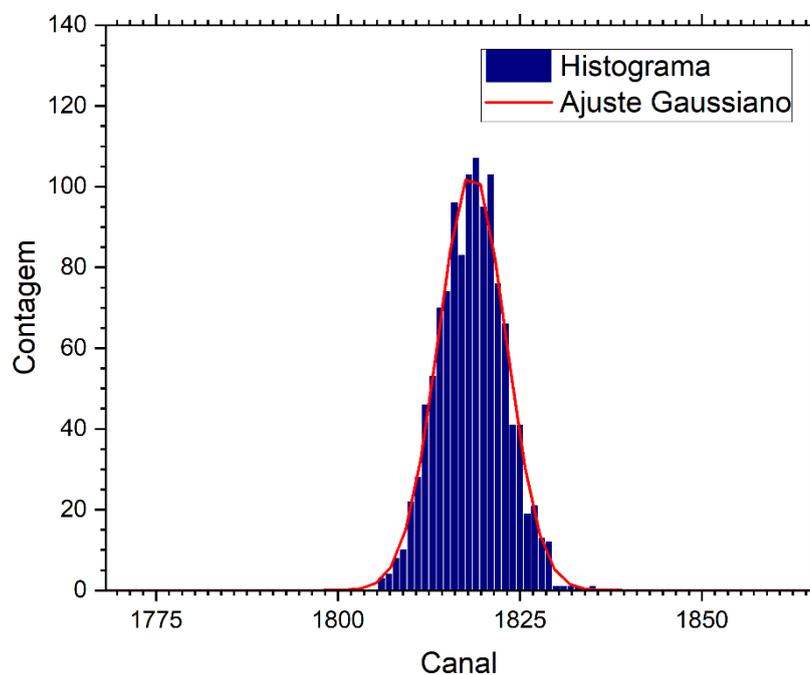


Figura 5.8: Distribuição de eventos, para valor fixo de 1 V, utilizada para o cálculo da resolução do MCA.

5.6 Aquisição com Detector

Por fim foi realizado o teste com o detector a gás unidimensional, referenciado na figura 2.12, com um módulo SPRO configurado para 1 V *pp*. O teste foi separado em duas partes:

- Aquisição com detector em aberto, sem fonte radioativa
- Aquisição com detector e fonte radioativa

Para o detector a gás foi alimentado com 2300 V, sendo que seu sinal é esperado ter excursão negativa. Um pré-amplificador de tensão de ganho 500 foi conectado em sua saída.

A primeira parte do teste mostrou o ruído geral do sistema Detector/Pré-amplificador/MCA. Com esse resultado pôde-se determinar o *threshold* a ser usado na aquisição com fonte radioativa, como mostra a figura 5.9, tirada da tela do software do MCA.

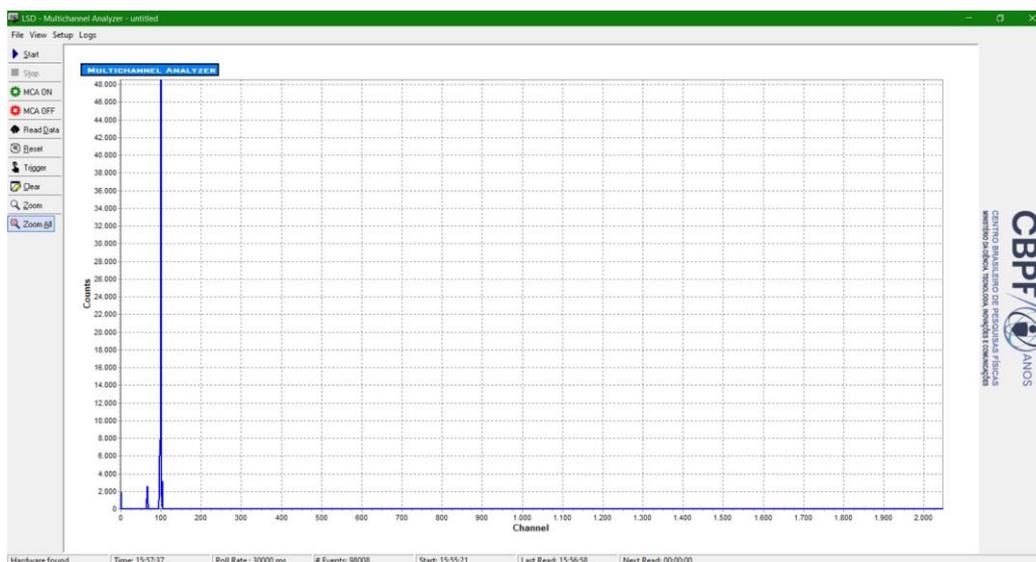


Figura 5.9: Distribuição de eventos para o sistema de aquisição sem fonte radioativa.

A figura 5.9 mostra que o ruído está na ordem do canal 100, que corresponde a aproximadamente a $24,5 \text{ mV}$.

Na segunda parte do teste a fonte radioativa de Fe-55 [11] foi colocada no detector. Um osciloscópio foi colocado na saída do pré-amplificador para se medir o sinal sendo gerado pelo sistema Detector/Pré-amplificador; o resultado pode ser visto na 5.10, onde vemos dois sinais predominantes entre -160 a -270 mV , com tempos de descida entre 77 e 583 ns .

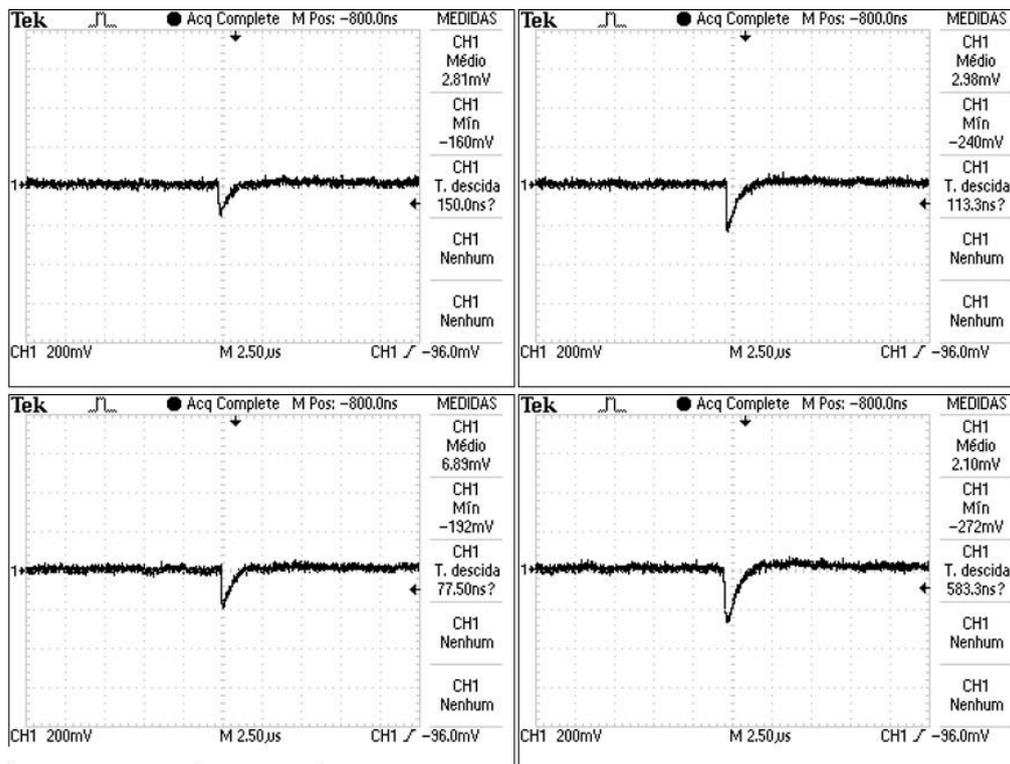


Figura 5.10: Sinal de saída do sistema detector/pré-amplificador com fonte radioativa.

O MCA foi configurado com os seguinte parâmetros:

- Threshold: -50 mV
- Janela de Detecção: $25\ \mu\text{s}$
- Janela de WatchDog: $50\ \mu\text{s}$

Os resultados da aquisição podem ser vistos na figura 5.11, tela retirada do programa de interface com o usuário do MCA.

A mesma distribuição pode ser vista na figura 5.12, onde os dados foram retirados em formato ".csv". As figuras 5.13 e 5.14 se tratam de um duas distribuições onde o número de canais para 1024 e 128, respectivamente.

Por fim essa distribuição teve início no dia 12-mar-2020 às 09:50, terminando dia

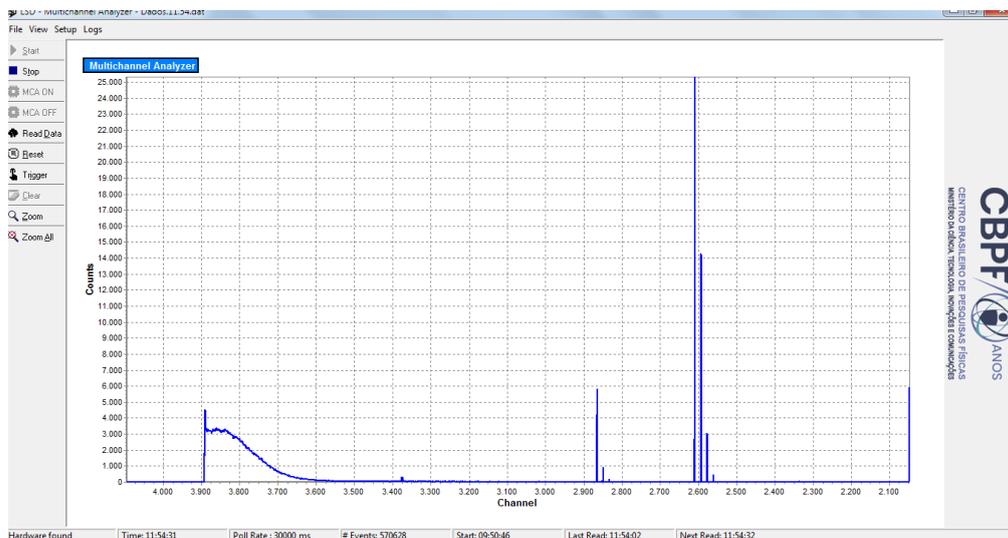


Figura 5.11: Distribuição de eventos com Fe-55 em 2048 canais: tela do programa de interface com o usuário do MCA.

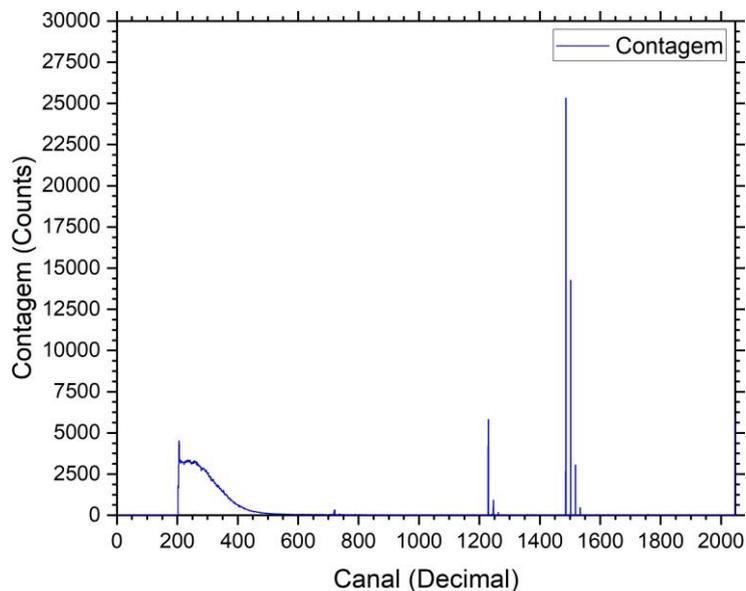


Figura 5.12: Distribuição de eventos com Fe-55 em 2048 canais.

13-mar-2020 às 11:54, totalizando 26 horas e 04 minutos de teste. Foram totalizados 570628 eventos, numa taxa de aproximadamente 6,1 eventos por segundo.

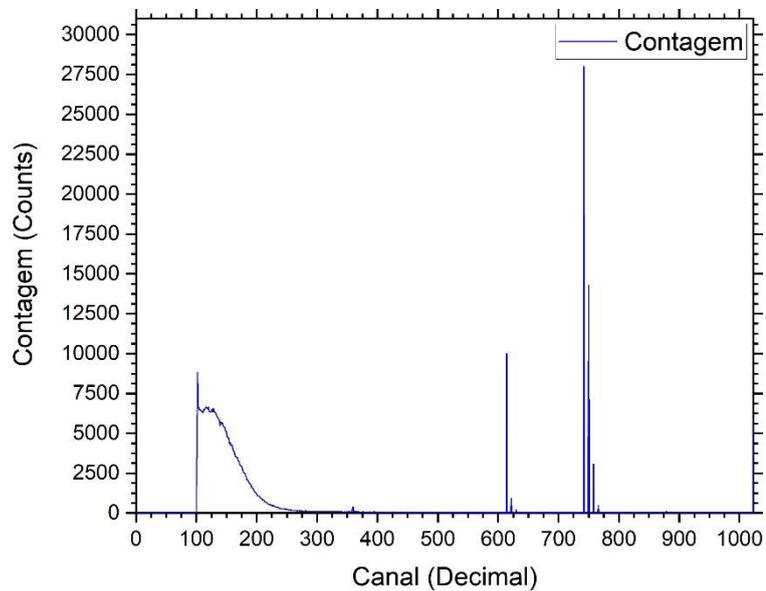


Figura 5.13: Distribuição de eventos com Fe-55 em 1024 canais.

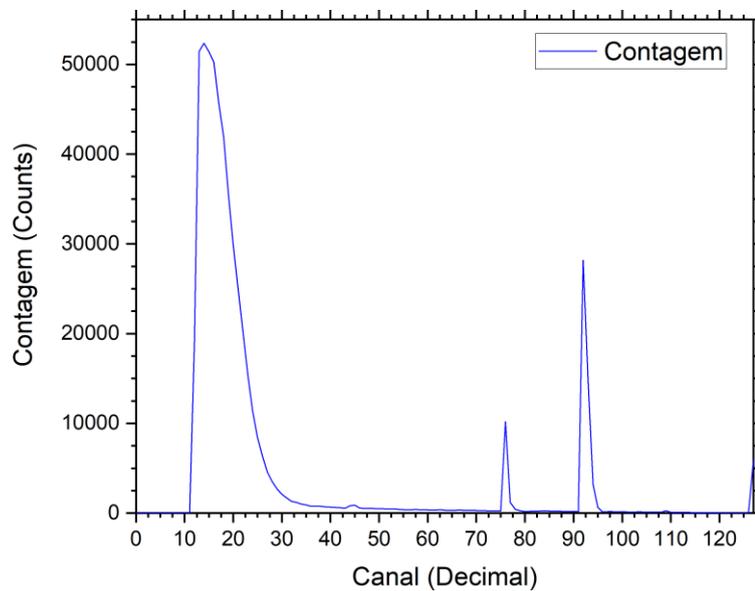


Figura 5.14: Distribuição de eventos com Fe-55 em 128 canais.

Tomando a figura 5.12 como exemplo, três regiões de interesse na distribuição podem ser notadas, sendo a primeira ainda ruído eletrônico proveniente das interações eletrônicas do detector em si. A segunda região apresenta um primeiro pico que corresponde aos eventos de elétron de Auger de $5,2 \text{ keV}$. A terceira região é um segundo pico que caracteriza os eventos relacionados a emissão de Raios-X e torno de 6 keV .

6 Conclusão

No presente projeto foi proposto o desenvolvimento de um MCA utilizando um dispositivo de lógica programável FPGA, com conversor analógico-digital pipeline de alta velocidade, e uma memória tipo RAM, assim como o desenvolvimento de um programa de interface com o usuário. Durante os testes realizados, as funções lógicas do MCA demonstraram concordância com o que foi proposto originalmente. A detecção do pico de um sinal de entrada ficou demonstrada através do uso de um gerador de sinais.

O MCA tem a capacidade de detecção de sinais tanto positivos como negativos, fornecendo até 2048 canais para cada excursão. O número de canais não pode ser alterado no *firmware* atual, ficando isso como perspectiva a ser implementada no futuro.

A curva de calibração demonstrou que para ambas as configurações de excursão de sinal, existe uma diferença integral que gera um erro em fundo de escala de 15 % para a faixa dinâmica de 1 V_{pp} , e 11 % para a faixa dinâmica de 2 V_{pp} . Esse erro pode ser compensado com o tratamento matemático apropriado.

O discriminado de sinal foi testado de forma que o MCS não registrasse eventos fora da faixa de amplitude escolhida. Com um gerador de sinais, em um período de 600 s com sinais senoidais periódicos de 0,5 s, foram contados aproximadamente 1200 eventos para cada uma das 20 aquisições feitas.

Em termos de Tempo Morto, obteve-se uma taxa de aquisição de 869,6 $ksps$, com o MCA configurado com uma janela de detecção de 125 ns . A taxa de transferência de dados via interface USB foi medida como 0,85 MB/s , o que significa 85 % da

especificação nominal padrão USB 1.1.

O ruído medido do sistema de aquisição de $2,5\text{ mV}$, com a entrada do MCA terminada com $50\ \Omega$, e $24,5\text{ mV}$ com sua entrada aberta. A resolução encontrada para o MCA foi de $0,6\%$, sendo essa medida em um valor fixo de 1000 mV . A resolução varia de acordo com a amplitude do sinal na entrada aplicado ao módulo. A avaliação é que isto ocorre devido aos erros sistemáticos intrínsecos do conversor analógico-digital.

O programa de interface do usuário performou conforme projetado, conseguindo realizar as configurações necessárias no módulo SPRO, assim como adquirindo e processando os dados da memória RAM do mesmo. Melhorias futuras desse programa de interface podem adicionar funcionalidades para o usuário, como o salvamento automático que vai aumentar a segurança em um teste de longa duração, assim como a possibilidade de se escolher o número de canais do MCA.

Esse trabalho teve como motivação principal desenvolver um MCA com arquitetura inovadora para, entre outras aplicações, caracterização de detectores de Raios-X desenvolvidos no LSD/CBPF. Uma comparação com MCAs de marcas comerciais não foram realizadas, e ficam como um exercício recomendado para o futuro.

Referências

- [1] KNOLL, G. F. *Radiation detection and measurements*. 4. ed. John Wiley and Sons Inc, 2010.
- [2] LEO, W. R. *Techniques for nuclear and particle physics experiments: A how-to approach*. 2. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
- [3] JUNIOR, H. P. L. Um sistema multi-canal rápido baseado em lógica programável. *Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ*, 2001.
- [4] SAULI, F. *Gaseous radiation detectors: Fundamentals and applications*. 1. ed. Cambridge University Press, 2014.
- [5] MARINHO, P. R. B. Desenvolvimento de detectores sensíveis à posição multifilares e multi-gem para obtenção de imagens de raios-x. *Dissertação de Doutorado, CBPF*, 2006.
- [6] Analog Devices. Analog devices website. <http://www.analog.com>.
- [7] FTDI Chip. *Ft245bm datasheet*, Dezembro 2005.
- [8] JUNIOR, H. P. L.; BARBOSA, A. F.; GUEDES, G. P.; SEIXAS, J. M. A fast multichannel-analyzer for radiation detection applications. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, , n. 002, 2004.
- [9] EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física quântica - Átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. 35. ed. Elsevier, 1979.
- [10] GILLISPIE, C. C. *Dicionário de biografias científicas*. 3. ed. Contraponto, 2007.
- [11] OF MANCHESTER, T. U. *Nuclide safety data sheet iron-55*. <http://www.hep.man.ac.uk/safety/RadiationDataSheets/>, 2012.
- [12] LATHI, B. P. *Sinais e sistemas lineares*. 2. ed. Bookman, 2007.
- [13] Altera Corporation. *Cyclone ii device handbook, volume 1*, Fevereiro 2008.
- [14] Altera Corporation. *Ram megafunction user guide*, Março 2007.

- [15] Altera Corporation. *Internal memory (ram and rom) user guide*, Novembro 2009.
- [16] GAMA, R. G. Desenvolvimento de instrumentação baseada em lógica programável para aquisição de dados no projeto neutrinos angra.
- [17] KESTER, W. *Data conversion handbook*. 2. ed. Newnes, 2004.

APÊNDICE A – Programa de Interface com Usuário

Nesta secção é detalhado o funcionamento da interface de usuário. Ela serve de manual de operação para orientação de como utilizar o MCA.

A.1 Tela Principal

A tabela A.1 enumera as funções encontradas na tela principal, vista na figura A.1, do programa de usuário. Detalhamentos de algumas funções serão feitos nas secções subsequentes.

Número	Descrição / Ação	Observação
1	Área de gráfico	Local onde o gráfico da aquisição em curso aparecerá
2	Barra de Ação	Local onde estão acesso a funções de gerenciamento de arquivos, configuração e log
3	Botão START	Inicia a aquisição automaticamente
4	Botão STOP	Termina a aquisição
5	Botão MCA ON	Liga SPRO de modo manual
6	Botão MCA OFF	Desliga SPRO de modo manual
7	Botão READ DATA	Força leitura da memória RAM
8	Botão RESET	Envia sinal de Reset para o SPRO
9	Botão TRIGGER	Enviar sinal de TRIGGER com 1 ms de duração
10	Botão CLEAR	Limpa gráfico na tela principal
11	Botão ZOOM	Aciona função para amplificar um ponto determinado do gráfico
12	Botão ZOOM ALL	Retira toda a amplificação dada no gráfico
13	Estado do SPRO	Indica se um módulo SPRO está disponível para aquisição
14	Tempo Agora	Tempo atual no formato HH:MM:SS
15	Poll Rate	Tempo de intervalo entre leituras da memória RAM do SPRO (configurável)
16	Número de Eventos Totais	Número total de eventos obtidos até momento
17	Hora de Início	Início da aquisição no formato HH:MM:SS
18	Última Leitura	Última leitura feita no formato HH:MM:SS
19	Próxima Leitura	Próxima Leitura a ser feita no formato HH:MM:SS

Tabela A.1: Funções da tela principal

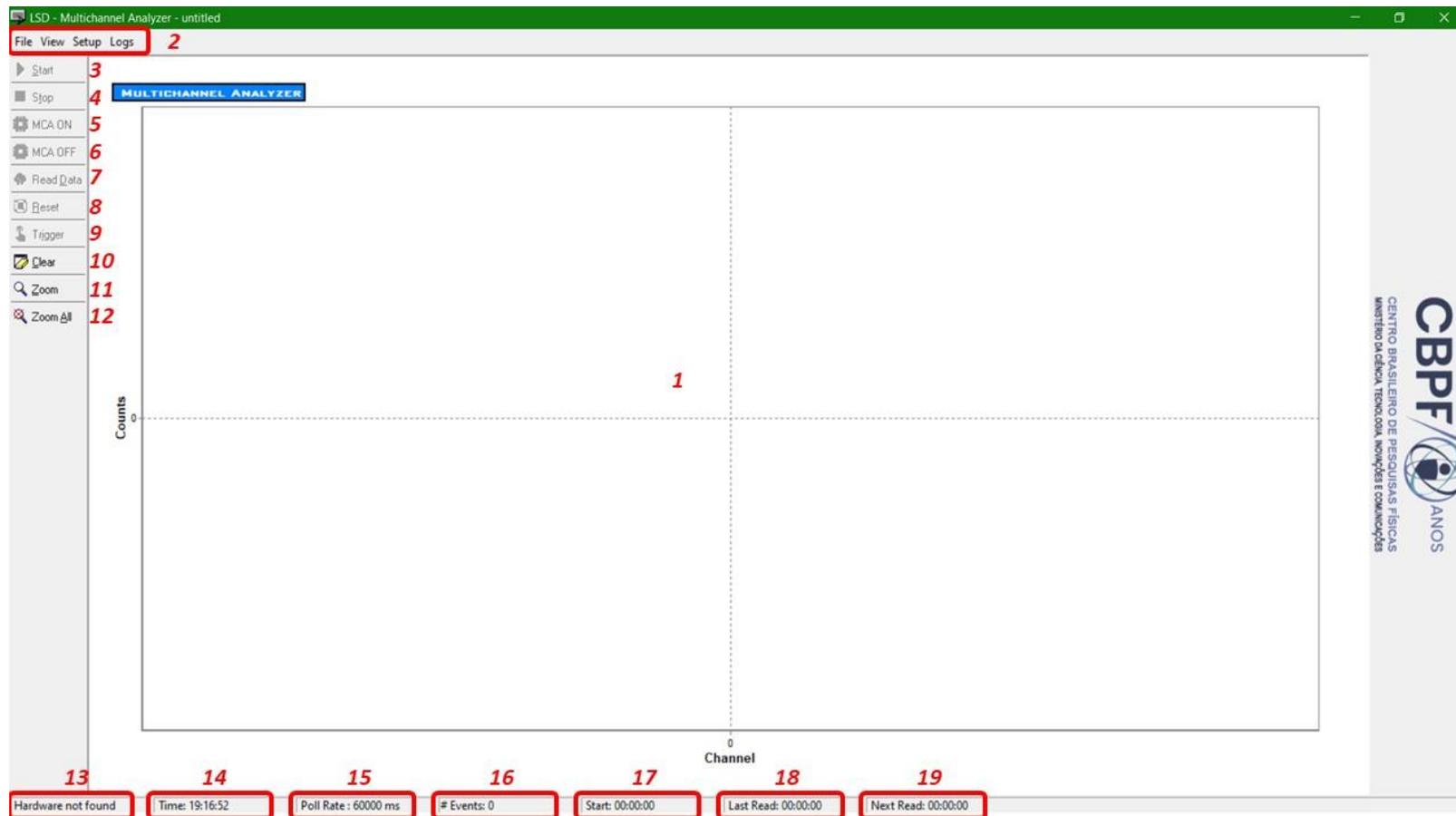


Figura A.1: Programa de Interface do Usuário: tela principal.

A.2 Gerenciamento de Arquivo

Nessa secção a figura A.2 mostra as opções de gerenciamento de arquivo disponíveis, que são padrão de muitas aplicações baseadas em Windows.

O número "1" é exatamente a função para criar um novo ambiente no programa de usuário. Ao selecionar essa função os dados existentes não salvos serão perdidos, e a aplicação irá reiniciar do zero.

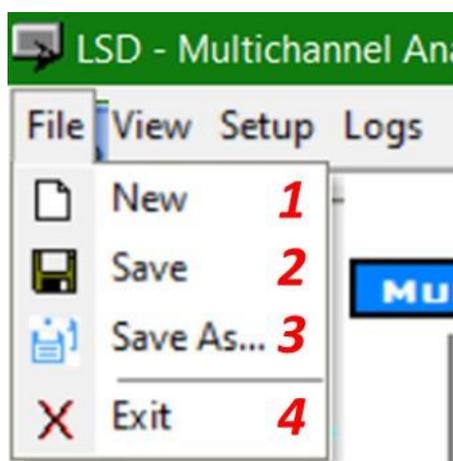


Figura A.2: Programa de Interface do Usuário: Funções de Gerenciamento de Arquivo.

O número "2" e "3" apresentam-se as funções de salvamento dos dados adquiridos, sendo que na função "Save" o salvamento se dá no arquivo previamente já salvo, enquanto "Save As..." abre-se uma janela de diálogo para que o arquivo de destino seja apontado - como mostra a figura A.3.

O arquivo salvo terá um formato ".dat", como visto na figura A.3, com seu conteúdo separado por ponto-e-vírgula. É encontrado no arquivo as seguintes informações:

1. Hora de início da aquisição
2. Hora da última aquisição realizada
3. Dados adquiridos (Canal;Contagem)

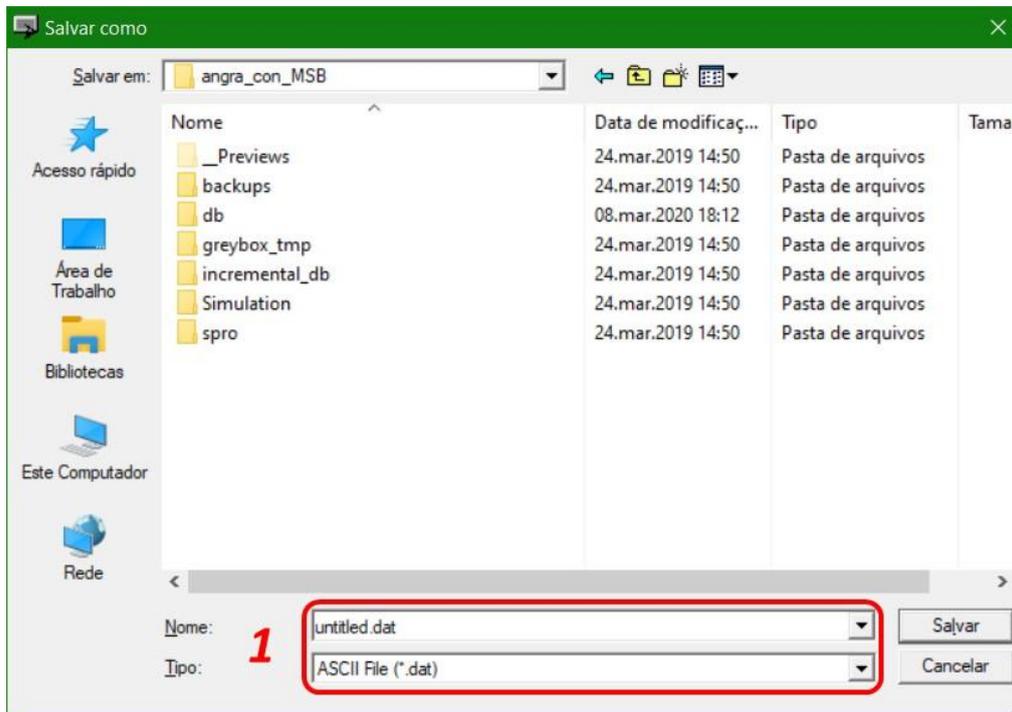


Figura A.3: Programa de Interface do Usuário: Tela de Diálogo "Save As...".

A.3 Configuração para Aquisição e Zoom

A figura A.4, na aba "View", temos as funções de "Zoom" e "Zoom All" já detalhadas na A.1.

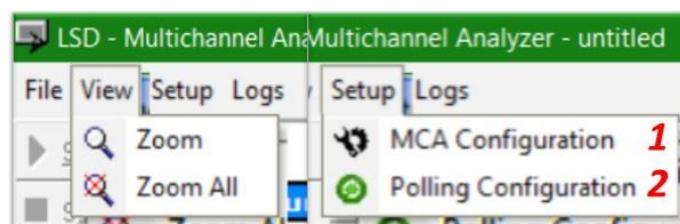


Figura A.4: Programa de Interface do Usuário: Funções de "View" e "Setup".

Na aba "Setup" encontram-se as funções de configuração do MCA:

1. MCA Configuration
2. Polling Configuration

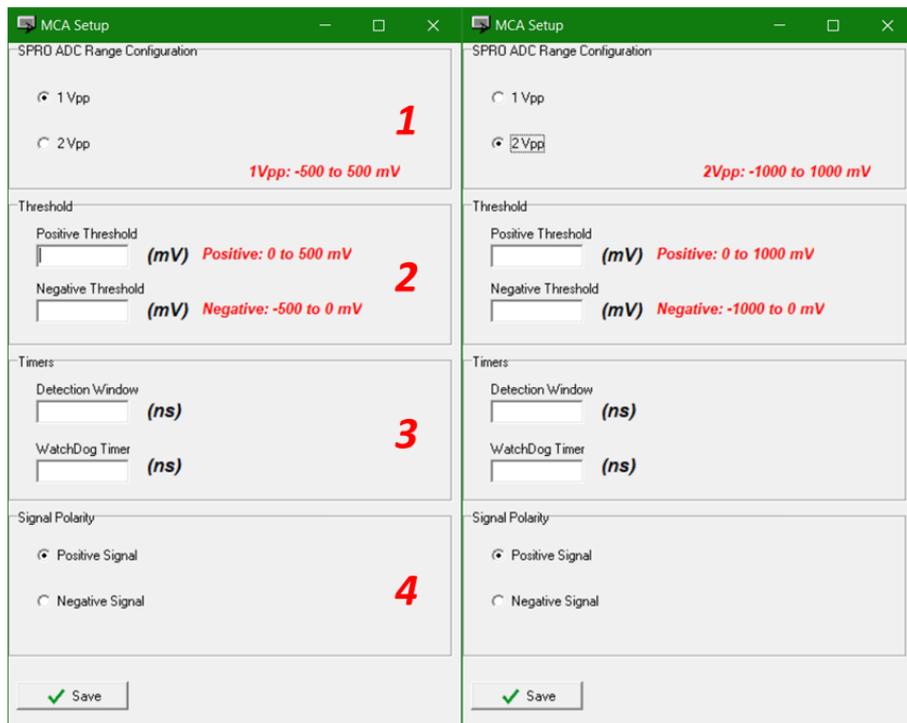


Figura A.5: Programa de Interface do Usuário: Configuração dos Parâmetros do MCA.

No "popup" "MCA Configuration", encontram-se os parâmetros de configuração do MCA. Este é uma função primordial para o funcionamento do instrumento, já que ela carrega no SPRO toda a configuração necessária para que a aquisição seja feita de forma correta. A figura A.5 mostra os parâmetros.

1. SPRO ADC Range Configuration
2. Threshold
3. Timers
4. Signal Polarity

O número "1" mostra onde é feita a seleção de qual configuração do SPRO está sendo utilizada, como já explicado no capítulo 3. Essa seleção é importante para que o cálculo dos "thresholds", vistos no item "2".

Os parâmetros "*Threshold*" são utilizados para que o usuário determine um valor mínimo em que o sinal possa ser considerado válido. Em outras palavras, funcionam como um filtro contra os ruídos existentes do sistema e/ou outras fontes. Em vermelho estão avisos sobre os limites que cada parâmetro pode aceitar, em uma determinada configuração. Os *thresholds* devem ser configurados dentro os limites indicados, que são:

- *Threshold* Positivo em 1 *Vpp*: 0 a 500 *mV*
- *Threshold* Negativo em 1 *Vpp*: -500 a 0 *mV*
- *Threshold* Positivo em 2 *Vpp*: 0 a 1000 *mV*
- *Threshold* Negativo em 2 *Vpp*: -1000 a 0 *mV*

Valores fora desses limites não serão interpretados corretamente pelo SPRO, assim podendo causar erro na aquisição de eventos pelo MCA.

No item "3", *Timers*, são definidos os tempos da janela de detecção e do *Watchdog*. A janela de detecção é o tempo em que o sinal será analisado para que o pico seja encontrado. Esse parâmetro deverá ser calculado de acordo com as características do sinal vindo do detector, como tempo de subida e período do sinal. É válido lembrar que a taxa de amostragem do circuito de detecção é 125 *MHz*, ou seja, 8 *ns*.

WatchDog é o tempo máximo ao qual o MCA espera por um sinal válido do detector; ao ser expirado, o MCA retorna ao estado inicial. Essa função visa não travar o MCA em um estado que possa ou não acontecer, não deixando outras funções, como a leitura da memória RAM pelo programa de usuário, acontecerem.

Os parâmetros de tempo configurados no MCA devem ter o limite máximo de 524.280 *ns*.

Por último, porém não menos importante, temos o item "4" a escolha da polaridade do sinal. Essa função existe para que o programa de usuário requisiite ao módulo SPRO apenas dados relativos a excursão de interesse.

Ainda na aba "Setup", há a função para configuração do tempo o qual o programa de usuário requisitará a leitura dos dados do SPRO. Nessa função o usuário pode configurar o tempo, em segundos como visto na A.6, de atualização que achar mais adequado para o teste.



Figura A.6: Programa de Interface do Usuário: Configuração do Tempo de Leitura dos Dados do MCA.

A.4 Logs

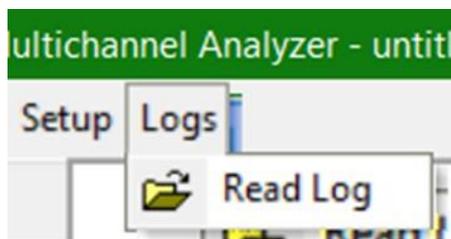


Figura A.7: Programa de Interface do Usuário: Logs.

Na figura A.7, a aba de funções "Logs" contém a função "Read Log". A janela demonstrada na figura A.8 mostra a tela que apresenta os dados adquiridos na última leitura válida, com alguns dados úteis numa investigação de algum problema que possa acontecer.

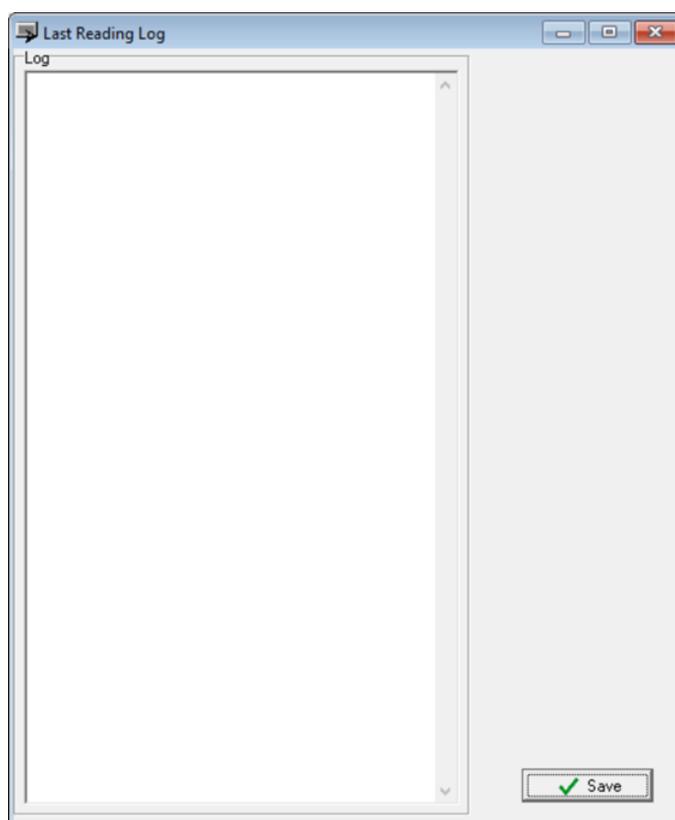


Figura A.8: Programa de Interface do Usuário: Log dos últimos dados adquiridos.