



Filipe Miguel Cruz Camarneiro

Desenvolvimento de um sistema de
caraterização de fotomultiplicadores
de câmaras gama

Dissertação de Mestrado de Engenharia Física

Setembro 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

TESE DE MESTRADO DE INSTRUMENTAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CARATERIZAÇÃO DE FOTOMULTIPLICADORES DE CÂMARAS GAMA

Filipe Miguel Cruz Camarneiro

Supervisores:

Prof. Dr. Vitali Iourievitch Chepel

Eng. Jorge Manuel Guieiro Pereira Isidoro

Tese submetida para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Física desenvolvida através da colaboração entre o Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e o Serviço de Medicina Nuclear dos Hospitais da Universidade de Coimbra



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Coimbra, Setembro de 2017

Pela memória de um dos meus melhores amigos, Filipe Resende.

Resumo

As Câmaras Gama são uma das ferramentas mais utilizadas na área da Medicina Nuclear. Os fotomultiplicadores incluídos nestas câmaras são dos seus elementos mais importantes, mas também aqueles que sofrem uma maior deterioração com o uso e o tempo. A única solução para estes casos de deterioração é a abertura do detetor da câmara gama e a substituição dos fotomultiplicadores marcados como problemáticos. Algumas das dificuldades que se enfrentam durante este processo passam pelo enorme trabalho na substituição e o ajuste do ganho de todos os fotomultiplicadores do detetor após a substituição.

Como resposta a este problema, foi desenvolvido um sistema, constituído por um LED, um pré-amplificador, um amplificador e um multi-canal, que permite avaliar os ganhos relativos dos fotomultiplicadores e verificar o seu ganho antes de serem introduzidos no detetor. A partir dos testes realizados em 17 fotomultiplicadores foi possível estabelecer um limite mínimo para o ganho relativo destes e assim garantir um parâmetro de qualidade na avaliação de futuros fotomultiplicadores.

Outro problema recorrente em câmaras gama é a existência de defeitos, ou o surgimento de novos, nas placas pré-amplificadoras dos fotomultiplicadores. A solução encontrada para este problema baseia-se numa montagem experimental que fornece todas as alimentações necessárias à placa e permite a observação do sinal de saída no osciloscópio. Assim torna-se possível comparar as várias placas pré-amplificadoras e, em conjunto com o teste de ganho relativo, verificar se o sinal de defeito apresentado na câmara gama corresponde a um problema no fotomultiplicador em questão ou na sua placa.

Foi ainda testado um fotomultiplicador no regime de fotoeletção único com o intuito de estabelecer um procedimento para determinação do valor absoluto do ganho. A medição do ganho absoluto de um fotomultiplicador e de ganhos relativos de um conjunto destes permitiu determinar os valores de ganhos de todos os fotomultiplicadores testados.

Palavras-Chave : Câmara Gama, Fotomultiplicador, Instrumentação, Engenharia Física, Espetro de Fóton Único

Abstract

Gamma Cameras are one of the most utilised tools in Nuclear Medicine. The photomultiplier tubes included in these cameras are one of its most important elements, but they are also the ones who suffer the most deterioration throughout time and use. The only solution for these cases of deterioration is opening the detector and substituting the problematic photomultipliers. During this process of substitution there are some difficulties to be faced, from the hard task of opening the detector to the difficult process of correcting every gain in every photomultiplier.

As an answer to this problem, a system was developed to evaluate the relative gains of the photomultipliers and check if they are in good conditions to be put back in the detector. This system includes a LED, a pre-amplifier, an amplifier and a multichannel analyzer. From the tests applied to 17 photomultipliers, it was possible to establish a minimum limit to the relative gain and therefore ensure the quality of the photomultipliers that will be tested in the future .

Another recurrent problem in gamma cameras is the existence of defects, or the emergence of new ones, in the pre-amplifier boards of each photomultiplier. The solution found is based on a experimental setup that applies all necessary voltages to the pre-amplifier board and allows the observation of the output in a oscilloscope. This way, it is possible to compare several pre-amplifier boards and, with the relative gain test, check if the stated defect is located in the photomultiplier or in its pre-amplifier board.

One of the photomultiplier tubes was also tested in the single photon regime with the purpose of establishing a procedure to determine its absolute gain. The determination of the absolute gain of this photomultiplier, in conjunction with the relative gain tests allowed the determination of the gain of every photomultiplier in the sample.

Keywords: Gamma Camera, Photomultiplier, Instrumentation, Physics Engineering, Single Photon Spectrum

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Dr. Vitaly Chepel e Eng. Jorge Isidoro, pelo tempo e paciência despendidos, pela partilha de conhecimentos e principalmente pelo apoio dado ao longo desta longa tese.

Em segundo lugar, quero agradecer ao LIP - Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas pelas condições proporcionadas para realizar este trabalho e ainda a todas as pessoas que me ajudaram a atingir este objetivo. Ao Dr. Francisco Neves pelas imensas dúvidas tiradas, aos Engenheiros Orlando e Nuno pelas dicas em Eletrónica e pela atitude sempre positiva mesmo com os problemas que causei durante a minha estadia no seu laboratório.

Tenho obrigatoriamente de agradecer ao André Silva, à Inês Corveira, à Joana Melo e ao Rui Nunes por terem aparecido na minha vida e por terem partilhado tanto comigo durante tantos anos. Por se terem tornado amigos para a vida.

Quero ainda agradecer à Andreia Fernandes, ao Pedro Silva, à Joana Faria e ao especialista em PMTs Carlos Henriques por serem a minha verdadeira família de Coimbra.

Agradeço à Ana Rita por ter entrado na minha vida e ter sido o meu apoio durante este último ano.

Tenho de agradecer ao meu irmão Guilherme por existir e porque sem ele a minha vida não seria a mesma.

Aos meus avós pelas incontáveis horas a rezar por mim, por todo o apoio.

Finalmente, quero agradecer às pessoas mais importantes da minha vida, os meus pais Célia e Fernando. Não existem palavras para descrever o quanto fizeram por mim, o quanto me apoiaram em tudo o que fiz, o quanto me ensinaram nestes 25 anos. Espero que estejam orgulhosos de mim e no que me tornei. Eu sei que nunca vou conseguir retribuir todos os sacrifícios e horas perdidas comigo mas quero que saibam que me tornei a pessoa que sou hoje por vossa causa e que um dia, quando crescer, quero ser exatamente como vocês. Quero ser alguém que ama os seus filhos incondicionalmente e os põe à frente de tudo e todos. Obrigado por tudo.

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	ii
Agradecimentos	iii
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Acrónimos	xiii
Introdução	1
1 Câmara Gama - Fundamentos e Estado de Arte	3
1.1 Radioisótopos	3
1.1.1 Radiação α, β, γ	3
1.1.2 Requisitos dos radioisótopos para a sua utilização em Imagiologia Médica	4
1.1.3 Interação da Radiação Gama com a Matéria	5
1.1.3.1 Efeito Fotoelétrico	6
1.1.3.2 Dispersão de Compton	6
1.1.3.3 Produção de Pares	7
1.2 Detetores	8
1.2.1 Arquitetura	8
1.2.2 Cristal Cintilador	9
1.2.3 Guia de Luz	9
1.2.4 Colimador	9
1.2.5 Fotomultiplicador	10
1.2.6 Métodos de Reconstrução	10
1.2.7 Características de Performance da Câmara Gama	13
1.2.7.1 Resolução em posição	13
1.2.7.2 Resolução em energia	15
1.2.7.3 Uniformidade	15
1.2.7.4 Linearidade	16
1.2.7.5 Taxa de Contagem Máxima	16
1.2.8 Parâmetros Típicos	17
2 Fotomultiplicadores	19
2.1 Arquitetura	19
2.2 Princípios de Funcionamento	20
2.2.1 Fotoemissão	20

2.2.2	Emissão Secundária	22
2.3	Fotocátodo, Janela e Resposta Espectral	23
2.3.1	Fotocátodo	23
2.3.2	Janela	24
2.3.3	Resposta Espectral	25
2.4	Tipos de Multiplicadores de Electrões e Ganho	26
2.4.1	Ganho	28
2.5	Outras Características	30
2.5.1	Dark Current	30
2.5.2	Características temporais	31
2.5.3	Estabilidade	33
2.5.4	Linearidade	33
2.5.5	Uniformidade	34
2.5.6	Efeitos da Temperatura	35
3	Câmara e PMT em estudo	37
3.1	Câmara	37
3.2	PMT	41
3.2.1	Divisor de tensão	43
3.2.2	Placa Pré-Amplificadora	44
3.2.3	Valores e Sinais Esperados	46
4	Sistema/Instrumentação	49
4.1	Desenho Mecânico	49
4.2	Eletrónica	51
4.3	Calibração	56
5	Testes e Resultados	61
5.1	Ganho Relativo	61
5.2	Ganho Absoluto	65
	Conclusão	75
	Bibliografia	77
A	Datasheets e Circuitos Relevantes	I

Lista de Figuras

1.1	Secção eficaz da interação dos raios gama com diferentes materiais [1]	5
1.2	Representação esquemática do Efeito Fotoelétrico [2]	6
1.3	Representação esquemática da Dispersão de Compton [2]	6
1.4	Representação esquemática da Produção de Pares [2]	7
1.5	Câmara de Anger [3]	8
1.6	Exemplo de um função de resposta normalizada [4]	12
1.7	Montagem utilizada na avaliação da resolução em posição de uma câmara gama. Imagem modificada a partir de [5]	14
1.8	À esquerda: Máscara para medições em Y. À direita: Máscara para medições em X [5]	14
1.9	Exemplo de um espectro obtido na avaliação da resolução em posição de uma câmara gama [5]	15
1.10	Exemplo de não linearidade [6]	16
1.11	Taxa de Contagem [6]	17
2.1	Estrutura de um Tubo Fotomultiplicador [7]	19
2.2	Head-On e Side-On [7]	20
2.3	Fotoemissão [8]	21
2.4	Absorção de fótons relativa numa camada fotoemissiva [8]	21
2.5	Variação relativa do coeficiente de emissão secundária em função da energia dos eletrões primários [8]	23
2.6	Transmitância de diferentes materiais usados como janela [7]	25
2.7	Resposta Espectral [7]	26
2.8	Tipos de arquiteturas de multiplicadores de eletrões [7]	28
2.9	Ganho [7]	29
2.10	Dark Current em função da tensão aplicada [7]	30
2.11	Dark Current em função da temperatura [7]	31
2.12	Características temporais vs Tensão [7]	32
2.13	Rise/Fall/Transit Time [7]	32
2.14	Exemplo de Drift [7]	33
2.15	Exemplo de Uniformidade Espacial de um tubo <i>Head-On</i> [7]	34
2.16	Coefficientes de temperatura para diferentes materiais [7]	35
3.1	Fotografia da Câmara XR	37
3.2	Ilustração da Câmara XR com os seus componentes [9]	38
3.3	Diagrama do Detetor [9]	39
3.4	Fotografia da <i>Matrix Board</i> da Câmara XR	40
3.5	Fotografia com mais pormenor da <i>Matrix Board</i> da Câmara XR	40
3.6	Fotografia do detetor aberto com o circuito do DETCON da Câmara XR	41
3.7	PMT em estudo [10]	42
3.8	PMT aberto [10]	42

3.9	Divisor de tensão do PMT [9]	43
3.10	Diagrama da Placa Pré-Amplificadora [9]	44
3.11	Placa Pré-Amplificadora	45
3.12	Resposta típica do PMT a radiação gama de uma fonte de Tecnécio-99m [9]	46
3.13	Resposta típica do PMT a um LED [9]	47
4.1	Planta da Sistema com (1) LED, (2) Braçadeiras, (3) Rolo Preto, (4) Filtro de luz, (5) PMT, (6) Peça de Encaixe para alimentação (parte de PVC), (7) Peça de Encaixe (parte de metal), (8) Base em PVC	49
4.2	Planta lateral	49
4.3	Montagem final, vista de cima	50
4.4	Montagem final, vista de lado	50
4.5	Peça de encaixe	51
4.6	Esquema do circuito utilizado para determinar o ganho relativo dos PMTs	52
4.7	Amarelo: Sinal do gerador de impulsos TGP110 com 2.6 V de amplitude e 1.4 μ s de largura. Verde: Sinal à saída do amplificador. Azul: Sinal à saída do PMT. Rosa: Sinal à saída do pré-amplificador.	52
4.8	Esquema utilizado para determinar o ganho de um PMT em conjunto com a placa pré-amplificadora	53
4.9	Amarelo: Sinal do gerador de impulsos Model PB-5 com 3.5 V de amplitude e 1 μ s de largura. Azul: Sinal à saída E da placa pré amplificador número 3 com o PMT 12.	54
4.10	Amarelo: Sinal do gerador de impulsos Model PB-5 com 3.5 V de amplitude e 1 μ s de largura. Azul: Sinal à saída E da placa pré-amplificadora número 3 com o PMT 12. Rosa: Sinal na entrada da placa pré-amplificadora	54
4.11	Esquema do circuito utilizado para determinar o ganho absoluto de um PMT a partir do espectro de fotão único obtido no multi-canal	55
4.12	Espectro obtido no MCA com sinais de diferentes amplitudes à entrada de teste do pré-amplificador Canberra 2005	56
4.13	Ajuste do primeiro pico do espectro ao qual corresponde um pulso de 9.8 mV. Centróide: 79.75 \pm 0.01	57
4.14	Ajuste do segundo pico do espectro ao qual corresponde um pulso de 19.6 mV. Centróide: 176.79 \pm 0.02	57
4.15	Ajuste do terceiro pico do espectro ao qual corresponde um pulso de 49 mV. Centróide: 475.74 \pm 0.02	58
4.16	Ajuste do quarto pico do espectro ao qual corresponde um pulso de 98 mV. Centróide: 985.43 \pm 0.03.	58
4.17	Reta de Calibração de Carga por Canal	59
5.1	Amplitude do impulso à saída dos PMTs testados com uma alta tensão aplicada de -1640 V.	62
5.2	Amplitude do impulso na saída E das placas pré-amplificadoras, testadas com o PMT 12	64
5.3	Espectro de amplitudes obtido com a caixa destapada	65
5.4	Espectro de amplitudes obtido com a caixa parcialmente coberta com um pano preto	66
5.5	Espectro de amplitudes obtido com a caixa completamente coberta com um pano preto	66
5.6	Espectro obtido com LED e luz natural	67

5.7	Espetros obtidos para as várias tensões aplicadas no PMT 12 com a caixa destapada e sem qualquer sinal no LED	68
5.8	Espetro obtido com -1640 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com 3 gaussianas. Centróide do pico: Canal 36.11 ± 1.27	68
5.9	Espetro obtido com -1740 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com 3 gaussianas. Centróide do pico: Canal 53.71 ± 0.18	69
5.10	Espetro obtido com -1840 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com 3 gaussianas. Centróide do pico: Canal 75.71 ± 0.35	69
5.11	Espetro obtido com -1940 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com 3 gaussianas. Centróide do pico: Canal 107.8 ± 0.95	69
5.12	Espetro obtido com -1640 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com uma gaussiana e a distribuição <i>Polya</i>	70
5.13	Espetro obtido com -1740 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com uma gaussiana e a distribuição <i>Polya</i>	70
5.14	Espetro obtido com -1840 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com uma gaussiana e a distribuição <i>Polya</i>	71
5.15	Espetro obtido com -1940 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com uma gaussiana e a distribuição <i>Polya</i>	71
5.16	Ganho vs HV	73
5.17	Ganhos de todos os PMTs testados com uma tensão aplicada de -1640 V	74

Lista de Tabelas

1.1	Isótopos mais utilizados em Imagiologia Médica [11]	4
3.1	Tabelas com resistências de dois PMTs diferentes (OC representa circuito aberto, <i>Open Circuit</i>)	43
3.2	Ganhos máximos de alguns PMTs existentes no mercado	47
5.1	Comparação das amplitudes dos sinais medidos com o osciloscópio Tektronix TDS7104.	62
5.2	Comparação das amplitudes dos sinais medidos, com o osciloscópio, na saída E das placas pré-amplificadoras testadas com o PMT 12	63
5.3	Tensões aplicadas no PMT e respectivos ganhos	72
5.4	Ganhos de todos os PMTs a partir dos testes de ganho relativo e do teste de ganho absoluto do PMT 12	73

Lista de Acrónimos

ADC Analogue-to-Digital Converter

CFOV Central Field of View

DETCO N Detector Controller

FWHM Full Width at Half Maximum

FWTM Full Width at Tenth Maximum

HUC Hospital da Universidade de Coimbra

HV High Voltage

LED Light Emitting Diode

LIP Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas

LRF Light Response Function

MCA Multichannel Analyzer

NEMA National Electrical Manufacturers Association

PET Positron Emission Tomography

PMT Photomultiplier Tube

TTS Transit Time Spread

UFOV Useful Field of View

Introdução

A Medicina Nuclear permite o estudo ou a observação do estado fisiológico do tecido do corpo humano de uma forma não invasiva. A partir da marcação, com radioisótopos específicos, de células participantes em fenómenos fisiológicos é possível observar o estado de determinados tecidos ou estruturas e através da visualização da distribuição espacial (e em alguns casos temporal) do radioisótopo, emissor de raios gama, no corpo.

Para que seja possível realizar este tipo de estudo ou observação são necessários sistemas que permitam a deteção da radiação e a análise de dados em tempo real. A Câmara de Anger ou como é mais conhecida, Câmara Gama, é um destes sistemas. Esta câmara é um bem essencial em qualquer hospital e é obrigatório que esta esteja no máximo das suas capacidades de modo a permitir um diagnóstico rápido e correto em todos os pacientes.

Uma Câmara Gama é essencialmente constituída por um cristal cintilador, que transforma a radiação gama em fotões visíveis, vários fotomultiplicadores, que transformam os ditos fotões num sinal analógico (este conjunto faz parte do detetor de raios gama), um dos vários métodos de reconstrução existentes, tanto analógicos como digitais, e um centro de controlo para controlar e monitorizar todos os parâmetros do sistema. Existe ainda um sistema mecânico de movimento do detetor que permite obter imagens em 3D.

Todos os componentes de uma câmara gama são indispensáveis para que esta cumpra as suas funções, mas nesta tese de mestrado o componente em foco são os fotomultiplicadores. Estes têm como função recolher os fotões provenientes do cristal, transformá-los em eletrões a partir do efeito fotoelétrico e, pela emissão secundária, multiplicá-los até que seja possível obter um sinal. Os fotomultiplicadores são instrumentos muito utilizados na imagiologia médica devido ao seu excelente desempenho. O seu alto ganho e baixo ruído são características essenciais quando o processo em causa, como no caso das câmaras gama, envolve quantidades de luz de apenas algumas centenas de fotões.

Os trabalhos desenvolvidos no âmbito desta dissertação de Mestrado em Instrumentação tiveram como objetivo o desenvolvimento de um sistema que permitisse avaliar o ganho dos PMTs e que no futuro fosse utilizado como uma ferramenta para garantir a qualidade dos fotomultiplicadores das câmaras gama utilizadas no Serviço de Medicina Nuclear dos Hospitais da Universidade de Coimbra e, potencialmente, em serviço semelhante de qualquer outro estabelecimento que utilize ou faça manutenção de câmaras gama. O trabalho realizado foi de encontro a uma solução tecnológica de baixo custo e fácil utilização que permitisse testar os fotomultiplicadores de uma forma simples, eficaz e rápida.

As câmaras gama de interesse nesta fase do trabalho foram as da General Electric AC/T e XR/T que estão a ser utilizadas nos HUCs. Uma das maiores dificuldades enfrentadas no decurso deste projeto foi o facto de não existirem muitas informações sobre os PMTs estudados, isto é, a inexistência de qualquer datasheet ou *pinout* ou

ainda qualquer referência exata ao modelo do PMT em questão (provavelmente por razões de carácter comercial por parte do fabricante das câmaras). Como tal, foi também um objetivo deste trabalho estudar exaustivamente os fotomultiplicadores e conseguir determinar o ganho absoluto destes, a partir do seu espectro de fotão único, para que fosse possível ter mais informação e mais termos de comparação com outros fotomultiplicadores. No decorrer deste estudo foi encontrada uma datasheet de um PMT da marca Burle cuja construção é muito similar à do fotomultiplicador em estudo, tanto o divisor de tensão como a colocação dos dínodos é muito parecida. A partir de um *educated guess*, esta datasheet serviu como o maior termo de comparação para os resultados obtidos nesta dissertação.

No **Capítulo 1** é apresentado o estado de arte das câmaras gama e os seus princípios de funcionamento. É apresentado também um estudo da sua arquitetura, dos seus elementos principais e os parâmetros típicos da câmara. Os métodos para avaliar alguns destes parâmetros segundo a NEMA (National Electrical Manufacturers Association) são também apresentados nesta parte da dissertação como forma de perceber melhor o complexo funcionamento das câmaras gama.

O **Capítulo 2** apresenta uma pequena secção teórica com o intuito de explicar os princípios físicos por detrás dos fotomultiplicadores. A construção dos PMTs e a sua influência nas características destes são um dos pontos em foco nesta parte. As características mais relevantes dos PMTs, como por exemplo o ganho, a *dark current* e a uniformidade são também estudadas neste capítulo.

No **Capítulo 3** é apresentado um estudo da câmara gama utilizada no Serviço de Medicina Nuclear do Hospital da Universidade de Coimbra. O estudo dos fotomultiplicadores em foco nesta tese é também apresentado neste capítulo.

O desenho mecânico do sistema construído é apresentado no **Capítulo 4**. A eletrónica utilizada e as montagens criadas para cada teste são também apresentadas neste capítulo em conjunto com a calibração do sistema.

Por fim, os testes realizados e os procedimentos relativos a cada um destes encontram-se no **Capítulo 5**.

Capítulo 1

Câmara Gama - Fundamentos e Estado de Arte

1.1 Radioisótopos

A primeira utilização de imagiologia por radioisótopos é atribuída a George de Hevesy em 1920. A partir da injeção de uma quantidade muito pequena de uma substância em cujas moléculas um dos átomos, normalmente estável, é substituído por um isótopo radioativo emissor de radiação gama, é possível medir a distribuição espacial dessa substância através da detecção de raios gama emitidos pelo traçador. Esta distribuição reflete o comportamento fisiológico dessa substância e o funcionamento do sistema biológico no que toca a fluxo sanguíneo, metabolismo, transporte celular, função de neurotransmissores, etc.

1.1.1 Radiação α , β , γ

Quando se refere a radioactividade, normalmente tem-se três radiações diferentes em mente, radiação α , β e γ . A emissão **alpha**, desintegração alpha ou decaimento alpha é uma forma de decaimento radioativo que ocorre quando um núcleo atómico instável emite uma partícula alpha transformando-se num núcleo atómico diferente. Esta partícula alpha é um núcleo do átomo de Hélio-4. O decaimento **beta** ocorre quando um núcleo atómico instável emite uma partícula beta transformando-se num núcleo atómico diferente. Esta partícula beta pode ser um eletrão ou um positrão. Ambas as radiações alpha e beta têm uma interação muito forte com a matéria e como tal são rapidamente absorvidas pelos tecidos biológicos. Esta característica torna a sua utilização em exames de diagnóstico impraticável já que o fundamento destes exames implica a coleção de radiação proveniente do corpo estudado com o mínimo de efeitos secundários para o paciente. Estas radiações têm muito maior utilidade em tratamentos já que nestes se procura exatamente este tipo de interação forte. Por fim, a radiação **gama** é a radiação mais utilizada para obter os exames em medicina nuclear e a mais importante para esta tese já que é a utilizada nas Câmaras de Anger ou Câmaras Gama. Devido à natureza da sua interação com a matéria, os raios gama constituem um tipo de radiação ionizante capaz de penetrar na matéria mais profundamente que a radiação alpha ou beta e por isso são os preferidos para estes tipos de exame. Os raios gama são uma radiação eletromagnética e são produzidos na passagem de um núcleo de um nível excitado para outro de menor energia ou na desintegração de isótopos radioativos. Por exemplo a de-excitação do núcleo de um átomo com emissão de um fóton.

1.1.2 Requisitos dos radioisótopos para a sua utilização em Imagiologia Médica

Existem certos requisitos para estas radiações de modo a ter o melhor exame possível e garantir a segurança do paciente:

- Radiação Emitida

Em muitos decaimentos não são produzidos apenas fotões gama, mas também partículas carregadas que são absorvidas pelo tecido biológico numa distância da ordem dos milímetros. Estas partículas não podem ser utilizadas na maior parte dos exames, excepto na tomografia por emissão de positrões (PET - Positron Emission Tomography) cuja a aniquilação resulta na emissão de um par de fotões. Em contraste com as partículas carregadas, a radiação gama está sujeita a uma atenuação exponencial na medida em que se propaga no meio (este fenómeno será discutido com mais pormenor na secção 1.1.3). É, ainda, altamente desejável que o fotão emitido não seja acompanhado de partículas carregadas já que a radiação extra resulta numa irradiação dos tecidos sem qualquer aproveitamento para o diagnóstico [6].

- Tempo de Vida

O tempo de vida do radioisótopo deverá ser, idealmente, por volta do tempo necessário para a realização do exame. Se for muito curto não existirá radiação suficiente pois a maior parte do isótopo decai antes do fim do exame. Se o tempo de vida do radioisótopo for muito longo funciona para o exame mas continuará a emitir radiação muito depois do exame acabar, algo que não é muito indicado para o paciente. Por fim temos o melhor caso, em que existe decaimento ao longo de todo o exame e atinge a sua meia-vida no fim do exame [6].

- Energia

A energia da radiação deverá ser suficientemente alta para que os fotões tenham uma probabilidade alta de não interagir com o tecido biológico após a sua emissão, ou seja, para que seja possível a sua deteção na câmara gama após toda a atenuação que ocorre durante o caminho. Apesar disto, a energia não pode ser tão alta que torne a sua deteção pouco eficaz pois levará ao aumento da dose aplicada no paciente. Para este tipo de exame o melhor intervalo de energia será entre os 80 e 300 keV, excepto para o PET (Positron Emission Tomography) em que a energia dos fotões é exactamente 511 keV. Na tabela 1.1 estão alguns exemplos de isótopos utilizados em exames de Medicina Nuclear e os seus tempos de vida tal como as respectivas energias das radiações emitidas [6].

Tabela 1.1: Isótopos mais utilizados em Imagiologia Médica [11]

Isótopo	Energia da Radiação Emitida	Tempo de Meia-Vida
Tecnécio-99m	140 keV	6 h
Iodo-123	159 keV	13 h
Iodo-131	364 e 606 keV	8 dias
Índio-111	171 e 245 keV	67 h

1.1.3 Interação da Radiação Gama com a Matéria

Conhecer bem os mecanismos de interação da radiação gama com a matéria é essencial para perceber o funcionamento de uma câmara gama. Esta interação ocorre essencialmente por três fenómenos físicos, Efeito Fotoelétrico, Efeito de Compton e Produção de Pares, dependendo da energia da radiação e do material com o qual interage. Existe ainda a possibilidade de ocorrer Espalhamento de Rayleigh ou Absorção Fotonuclear, mas a sua probabilidade é muito baixa. A probabilidade de ocorrência de cada um destes efeitos é demonstrada pela secção eficaz de interação como é possível observar na imagem seguinte. Na Figura 1.1 estão representadas as secções eficazes de cada interação para um átomo de Carbono (baixo número atómico) e Chumbo (elevado número atómico) em função da energia do fóton.

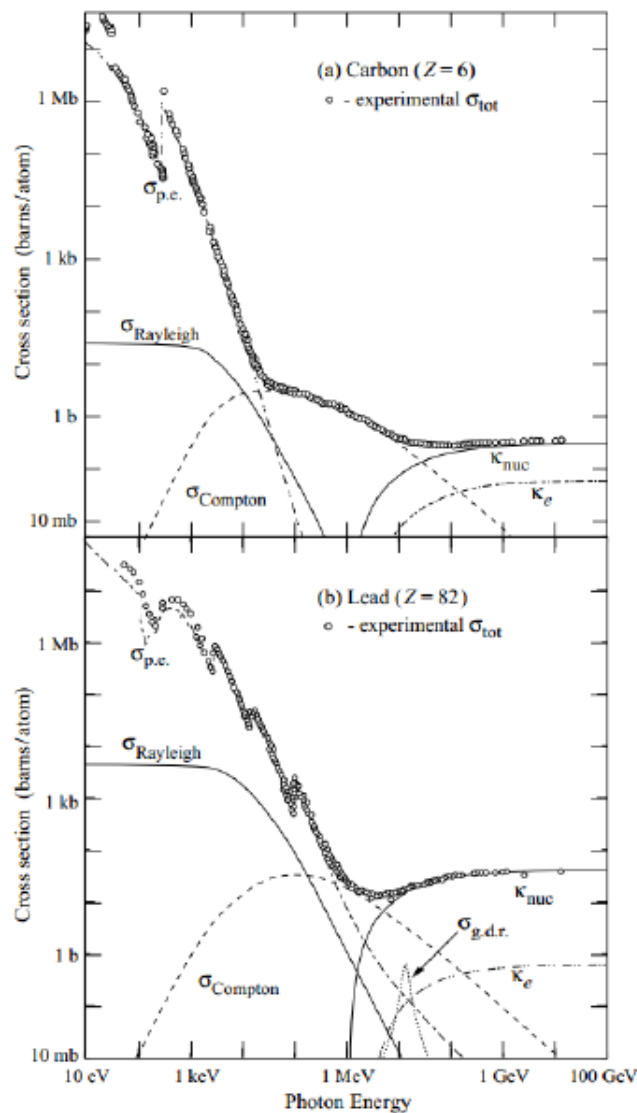


Figura 1.1: Secção eficaz da interação dos raios gama com diferentes materiais [1]

O efeito fotoelétrico é dominante para energias mais baixas e materiais com número atómico mais elevado. O efeito de Compton tem uma maior probabilidade de ocorrência quando a energia do fóton aumenta e torna-se dominante acima de um certo nível de energia. Por fim, a produção de pares apenas ocorre para energias maiores que 1022 keV .

1.1.3.1 Efeito Fotoelétrico

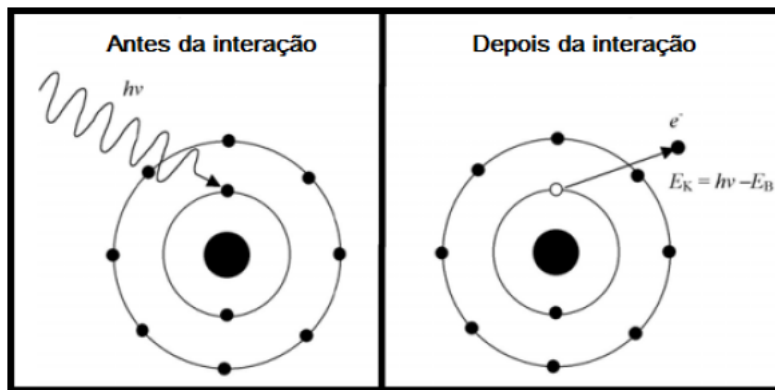


Figura 1.2: Representação esquemática do Efeito Fotoelétrico [2]

O efeito fotoelétrico consiste na ejeção de um elétron do átomo após a absorção de um fóton por este (Figura 1.2). O elétron ejetado tem uma energia, E_e , igual à diferença entre a energia da radiação, $h\nu$, e a energia de ligação do elétron no átomo, B , apresentada na equação 1.1 [11].

$$E_e = h\nu - B \quad (1.1)$$

A emissão do fotoelétrão cria uma lacuna na camada de onde este é ejetado o que faz com que o átomo esteja num estado excitado. Para voltar ao estado fundamental o átomo liberta energia na forma de radiação eletromagnética devido ao rearranjo dos elétrons das camadas superiores, sendo que esta radiação terá uma energia correspondente à diferença de energia entre as camadas envolvidas.

1.1.3.2 Dispersão de Compton

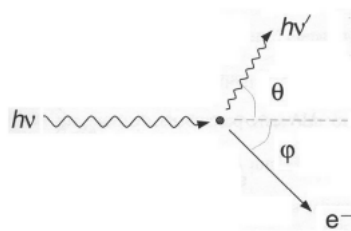


Figura 1.3: Representação esquemática da Dispersão de Compton [2]

A Dispersão de Compton é um processo no qual existe uma colisão inelástica entre um fóton e uma partícula carregada, normalmente um elétron, em que o fóton é depois desviado da sua trajetória inicial com uma energia mais baixa (Figura 1.3). Este fenómeno é mais provável quando a energia da radiação é muito superior à energia de ligação do elétron no átomo, tornando esta desprezável e assim permitindo considerar estes elétrons como elétrons livres. Aplicando as leis da conservação de energia e momento linear a este processo (equação 1.2), é possível relacionar a energia do fóton dispersado, E' , com a energia do fóton incidente, E^0 , tendo em consideração o ângulo de dispersão, θ , e a massa da partícula carregada, m_0 .

$$E' = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (1.2)$$

A partir desta equação chega-se à conclusão de que a energia máxima do fóton desviado será quando o ângulo entre o fóton incidente e o fóton desviado for 0° , e por consequência, será a energia mínima depositada na partícula carregada já que esta colisão cumpre a conservação de energia e momento. De forma inversa, a energia mínima do fóton desviado, ou seja o máximo de energia depositada na partícula carregada, será quando o ângulo for 180° . A esta energia máxima depositada, T_{max} , calculada pela equação 1.3, dá-se o nome de *Bordo de Compton*, do inglês *Compton Edge* [11].

$$T_{max} = \frac{2E_0^2}{m_0c^2 + 2E_0} \quad (1.3)$$

1.1.3.3 Produção de Pares

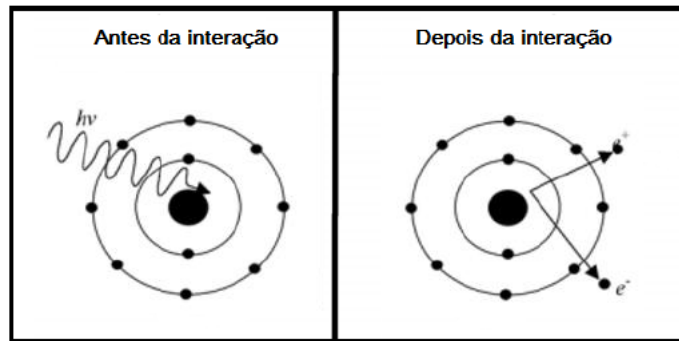


Figura 1.4: Representação esquemática da Produção de Pares [2]

A produção de pares é um fenômeno físico no qual um fóton é transformado num par de partículas de cargas opostas, normalmente um par elétron-pósitron, perto de um núcleo atômico (Figura 1.4). Este tipo de ocorrência é apenas possível quando o fóton incidente tem uma energia superior a 1022 keV , já que este é o limite mínimo de energia correspondente à soma das massas de repouso das duas partículas resultantes, e cumpre a conservação de energia e momento do sistema. Quando a energia for superior a este limite mínimo, o excedente será transformado em energia cinética.

Desta forma, é possível representar a produção de pares a partir da conservação de energia total do sistema com a equação 1.5,

$$h\nu = E_{c+} + E_{c-} + 2m_e c^2 + E_r \quad (1.4)$$

onde $h\nu$ corresponde à energia do fóton incidente, E_{c+} e E_{c-} correspondem às energias cinéticas do pósitron e do elétron respectivamente, m_e corresponde à massa do elétron, c corresponde à velocidade da luz e finalmente E_r corresponde à energia de recuo do núcleo. O termo $2m_e c^2$ estabelece o limite mínimo para o qual pode existir produção de pares já que representa a massa do par de partículas produzidas.

Este tipo de processo não é muito relevante para a maior parte dos exames de imagiologia médica já que estes utilizam radiações com energias muito mais baixas que o limite mínimo necessário.

1.2 Detetores

1.2.1 Arquitetura

Os primeiros scanners utilizados para este tipo de exame são, hoje em dia, obsoletos. O primeiro scanner era composto por um cristal cintilador acoplado a um fotomultiplicador que funcionava no modo de contagem de fótons gama e era deslocado para várias posições dentro da zona de estudo. O detetor estava ligado a um plotter que desenhava um ponto em cada posição do detetor e cuja cor refletia a taxa de contagem naquele ponto. Este tipo de scanner implicava que apenas se podia ter uma posição escolhida. No fim de várias posições obtia-se uma imagem 2D (cintigrama) [6].

Finalmente em 1957, H. O. Anger inventou um detetor sensível à posição em (x,y) composto por um cintilador em forma de disco com vários fotomultiplicadores (Figura 1.5). Esta invenção revolucionou o mundo da imagiologia com radioisótopos já que tornou possível a obtenção de imagens bidimensionais sem a necessidade de deslocamento. Este tipo de detetor passou então a chamar-se Câmara Gama ou Câmara de Anger [3].

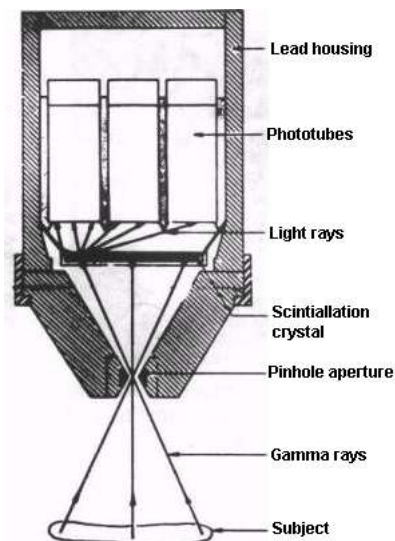


Figura 1.5: Câmara de Anger [3]

Uma câmara gama moderna é, normalmente, constituída pelos seguintes elementos:

- Colimador
- Cristal Cintilador
- Guia da luz
- Fotomultiplicadores
- Circuito eletrónico (onde se formam os sinais de posição)

Nos sistemas modernos, todos estes componentes funcionam em uníssono com um computador integrado no aparelho para que seja possível analisar todos os dados em tempo real de modo a obter a imagem pretendida.

1.2.2 Cristal Cintilador

Começamos com um dos mais importantes elementos de uma câmara gama, o Cristal Cintilador, normalmente Iodeto de Sódio dopado com Tálcio, (NaI(Tl)). Um cintilador é uma substância sólida ou líquida na qual uma parte significativa da energia da radiação incidente é transformada em luz na zona óptica (i.e. na zona do visível, ultravioleta ou infravermelhos próximos)

Assim sendo, quanto maior for a eficiência dessa transformação (que pode ser expressa em termos de número de fótons ópticos por unidade de energia absorvida, e.g. fótons/MeV) melhor será a resolução em energia. A eficiência de absorção dos raios gama por parte do cristal cintilador aumenta com a espessura do cristal, mas com esta também aumenta a probabilidade de existência de erros de paralaxe ou seja terá que existir um compromisso entre os dois de modo a obter a melhor imagem possível sem erros significativos.

Relativamente a dimensões, um cristal cintilador, tem normalmente um diâmetro entre os 20 e 60 centímetros e uma espessura entre os 6 e 12 milímetros [6].

1.2.3 Guia de Luz

O Guia de Luz é, habitualmente, formado por um disco de plástico com um índice de refração próximo do cristal para que se possa minimizar as perdas devido à reflexão. Este realiza uma tarefa fundamental na reconstrução de coordenadas já que a sua função é a de distribuir a luz emitida na cintilação por vários fotomultiplicadores.

A espessura desta guia deverá ser escolhida também com um compromisso entre os dois extremos. Uma guia demasiado fina implicará que apenas um fotomultiplicador receberá luz, e apenas um enviará um sinal, logo tornará a resolução espacial igual ao diâmetro do fotomultiplicador (tipicamente ≈ 50 mm) . Caso a guia seja demasiado espessa a distribuição de luz pelos fotomultiplicadores será praticamente uniforme, o que leva a uma resolução, mais ou menos, do tamanho do cristal, algo que também será contra produtor [6].

1.2.4 Colimador

Um colimador é usado para projectar a imagem do objecto, em raios gama, ao detector e por isso é feito de materiais com número atómico e densidade elevados, tipicamente chumbo. Como a atenuação dos raios gama é exponencial com a espessura, a colimação nunca é perfeita, já que a probabilidade de um fóton atravessar o colimador na direcção "errada" não é nula. Para que seja possível minimizar este acontecimento as paredes entre os orifícios do colimador devem ser suficientemente espessas.

Existem vários tipos de colimadores, estes podem ser convergentes, divergentes, com orifícios paralelos ou em *pinhole*. A sua escolha é normalmente baseada num estudo que confronta a resolução e a eficiência do colimador pois estas duas características são completamente opostas, isto é, quanto maior a resolução pior a eficiência e vice-versa. É necessário encontrar um compromisso entre ambas.

A resolução é dada pela largura á meia altura da distribuição do sinal em x e y , devido a uma fonte pontual, enquanto que a eficiência é a relação entre o número de fótons passantes e o número de fótons emitidos. Por exemplo, canais mais estreitos implicam uma melhor resolução devido a uma melhor colimação (i.e. escolha dos

fotões gama com a mesma direção de propagação) mas implica uma menor eficiência pela mesma razão, e ambas estas características têm repercussões na imagem obtida. A resolução é também afectada pela distância do objecto, quanto mais perto melhor.

O colimador mais utilizado é o colimador com orifícios paralelos pois é o que melhor preserva as dimensões do objecto (1:1) já que contém milhares de orifícios hexagonais o que permite a melhor cobertura possível. A sua espessura é cerca de 25 mm. O colimador *pinhole* é também bastante utilizado mas apresenta uma grande desvantagem, o facto de ter um ângulo sólido (eficiência geométrica) muito pequeno faz com que apenas uma fracção muito pequena dos fotões gama emitidos pelo objecto participe na formação da imagem, uma baixa eficiência portanto [6].

1.2.5 Fotomultiplicador

Um fotomultiplicador é um dispositivo eletrónico que transforma a luz emitida pelo cristal cintilador, e distribuída pelo guia de luz, em corrente eléctrica e que de seguida amplifica o sinal utilizando para isso emissão de electrões secundários. Os fotomultiplicadores são essencialmente constituídos por: um **fotocátodo** que converte o fluxo de fotões num fluxo de electrões por efeito fotoelétrico; um **sistema electro-óptico** que acelera os fotoelectrões emitidos do fotocátodo e foca-os no sistema de multiplicação; um **multiplicador de electrões** que consiste num série de eléctrodos de emissão secundária (dínodos); e por fim um **ânodo** que recolhe os electrões provenientes do multiplicador e mede o impulso. Os fotomultiplicadores têm geralmente um ganho alto (na ordem dos 10^6), ruído muito baixo e uma resposta rápida [6].

Como os fotomultiplicadores são o tema central desta tese, estes serão explorados em pormenor no capítulo seguinte.

1.2.6 Métodos de Reconstrução

Os métodos de reconstrução referem-se aos procedimentos utilizados para a obtenção de uma imagem final a partir dos sinais de saída de todos os fotomultiplicadores da câmara. A distribuição destes sinais permite estimar a energia e a posição do evento que os cria.

A probabilidade de um fotodetector i detetar n_i fotões de um evento na posição r com N fotões é dada pela aproximação da distribuição de *Poisson* (equação 1.5) [4],

$$P_i(n_i) = \frac{\mu_i^{n_i} e^{-\mu_i}}{n_i!} \quad (1.5)$$

onde μ_i representa o número médio de fotões detetados pelo fotodetector i e pode ser calculado a partir de $\mu_i = NF(\vec{r})$ [4].

O método mais conhecido para reconstruir uma imagem a partir dos sinais obtido é o método de Anger, também chamado método de centróide (equação 1.6). Este processo proposto em 1958, reconstrói uma coordenada X através do cálculo da média das coordenadas dos fotomultiplicadores X_i com os pesos iguais à amplitude do sinal do respectivo fotomultiplicador U_i (média pesada) [6].

$$X = \frac{\sum_{i=1}^N x_i U_i}{\sum_{i=1}^N U_i} \quad (1.6)$$

Fazendo o mesmo para Y (equação 1.7) [6],

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i U_i}{\sum_{i=1}^N U_i} \quad (1.7)$$

Desta forma é também possível estimar para a energia E , pela equação 1.8, já que esta será a soma das amplitudes de todos os sinais de todos os fotomultiplicadores[6].

$$E = \sum_{i=1}^N U_i \quad (1.8)$$

Essencialmente, existem duas maneiras de aplicar este algoritmo. A primeira e mais antiga é a partir da utilização de uma cadeia de resistências cujos valores são escolhidas de tal modo que a contribuição de cada fotomultiplicador para o sinal X e Y seja proporcional à respectiva coordenada do seu centro. A corrente de saída do PMT é dividida entre 4 saídas (X^+ , X^- , Y^+ , Y^-), assim que $X = X^+ + X^-$ e $Y = Y^+ + Y^-$. A segunda maneira é digitalmente, este método pode também ser utilizado com ajuda de um computador, sem ser necessário recorrer às resistências, caso os sinais de saída dos fotomultiplicadores sejam digitalizados.

Um dos maiores problemas do método do centróide é o facto de ignorar completamente a profundidade do evento e assumir que as funções de resposta à luz (*LRF - Light Response Function*) dos detetores são lineares. Como tal, os resultados obtidos com este método são bastante bons na zona central do detetor mas distorcem a imagem nas extremidades. Outro problema deste método é a impossibilidade de reconhecer múltiplos eventos.

A *LRF* ($F(\vec{r})$) na equação 1.5) caracteriza a resposta de um fotomultiplicador como uma função dependente da posição (x,y,z) da fonte de luz. Ao utilizar coordenadas radiais é possível definir esta função de resposta como $F = F(r, \theta)$ onde θ é o ângulo relativamente a um eixo escolhido no plano (x, y) , i.e. no plano do cristal. Para um qualquer caso em que o evento tenha uma energia E , a resposta do fotomultiplicador será dada por $V = EF(r, \theta)$. Ao considerar que os fotomultiplicadores têm simetria radial é ainda possível simplificar esta função de resposta para apenas depender de r [4].

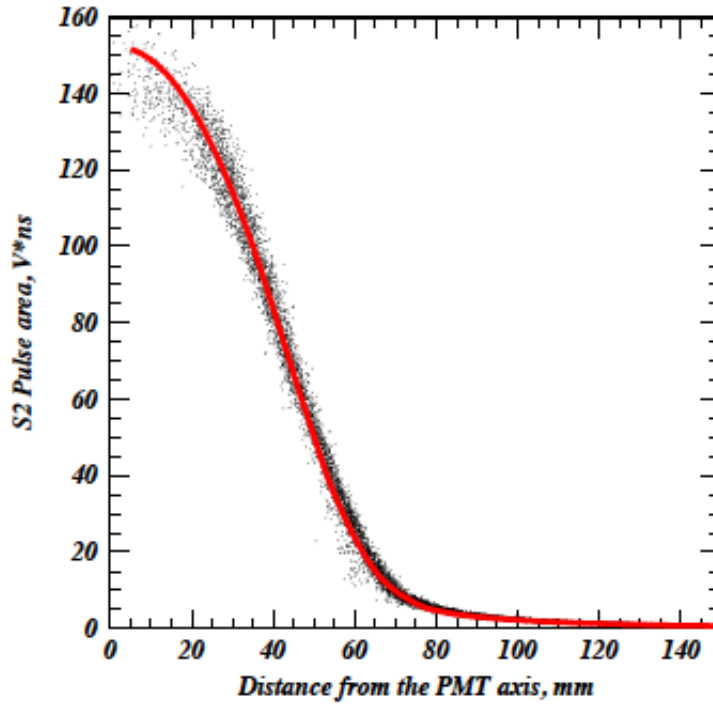


Figura 1.6: Exemplo de um função de resposta normalizada [4]

Tomando em consideração as desvantagens do método do centróide, muitos sistemas utilizam hoje em dia métodos estatísticos que têm em consideração a *LRF* de modo a melhorar a imagem obtida em exames de imagiologia. O método mais conhecido tem o nome de Máxima Probabilidade ou Máxima Verossimilhança (do inglês *Maximum Likelihood* ou apenas *ML*). Este tipo de técnica baseia-se na tentativa de descoberta das características que maximizam a probabilidade de obter o resultado obtido experimentalmente. Para um evento em que o número de fótons em cada fotomultiplicador, n_i , é conhecido, é possível representar a função de probabilidade L a partir da distribuição de Poisson (equação 1.9) [4].

$$\ln L = \sum_i \ln P(n_i, \mu_i) = \sum_i (n_i \ln \mu_i - \mu_i) - \sum_i \ln(n_i!) \quad (1.9)$$

Tendo em conta que $\mu_i = Nn_i(r)$ obtém-se a equação 1.10 [4]:

$$\ln L(r, N) = \sum_i (n_i \ln(Nn_i(r)) - Nn_i(r)) + C \quad (1.10)$$

onde C não depende nem de N nem de r . Se as funções de resposta dos detetores forem conhecidas, ou seja, conhecendo $n_i(r)$, é possível descobrir as melhores estimativas para r e N maximizando esta função. Nos casos em que existe simetria radial ainda é possível simplificar esta função de modo a depender apenas de r (equação 1.11) ao substituir N pela sua melhor estimativa possível, N' , já que esta apenas depende de r [4].

$$N'(r) = \frac{\sum_i n_i}{\sum_i n_i(r)} \quad (1.11)$$

Além deste método existe ainda o método dos mínimos quadrados (do inglês *Weighted Least Squares* ou *WLS*) que pode ser utilizado caso a amplitude do sinal U_i tenha uma distribuição normal. Neste método os valores estimados podem ser encontrados ao minimizar a função 1.12 [4].

$$\chi^2 = \sum_i w_i (U_{ei} - U_i)^2 \quad (1.12)$$

em que $U_{ei} = U_i q_{si} = N n_i(r) q_{si}$ é a amplitude esperada do sinal de saída do fotomultiplicador, q_{si} é a resposta típica do PMT a um fotoelétrão único e w_i é um fator de ponderação. Tal como no método *ML*, também neste método é possível obter as melhores estimativas para N' e r' ao minimizar a equação 1.13 [4].

$$\chi^2(r, N) = \sum_i w_i(r, N) (N n_i(r) q_{si} - U_i)^2 \quad (1.13)$$

Ao considerar que a amplitude do sinal medido, U_i , é medido de uma forma exata e que a variação da amplitude esperada, U_{ei} , é apenas devido a flutuações estatísticas do número de eletrões detetados é seguro dizer que o método *WLS* é equivalente ao *ML*. Contudo, num detetor real os valores de U_i não são exatos devido ao ruído e a variação de U_i também não é igual à estimada pela distribuição de Poisson. Desta forma, o método *WLS* é mais tolerante que o *ML* pois permite alterar o peso das contribuições dos fotomultiplicadores para os quais não se conhecem as funções de resposta *LRF* [4].

1.2.7 Características de Performance da Câmara Gama

A performance das câmaras gama caracteriza-se com alguns parâmetros bem definidos de acordo com as normas NEMA (National Electrical Manufacturers Association) que também determina os testes periódicos necessários para o controlo de qualidade das câmaras [9]. Os parâmetros mais importantes são:

- Resolução em posição
- Resolução em energia
- Uniformidade
- Linearidade
- Taxa de Contagem Máxima

1.2.7.1 Resolução em posição

Como o mesmo detetor pode ser utilizado com vários colimadores diferentes define-se parâmetros intrínsecos como os parâmetros da câmara sem o colimador. Enquanto que parâmetros do sistema (extrínsecos) são os referentes a todo o sistema incluindo o colimador. Assim sendo podemos obter a resolução em posição do sistema a partir da equação 1.14:

$$R_s = \sqrt{R_i^2 + R_c^2} \quad (1.14)$$

onde R_i é obtido a partir da resolução intrínseca do detetor e R_c a partir da resolução do colimador, que depende deste mas também da distância ao objecto. De acordo com a NEMA, para a medição da resolução espacial utiliza-se a configuração da figura 1.7. Uma fonte radioativa de Tc-99m dentro de uma proteção de chumbo, com placas de cobre entre si e a câmara para controlar a taxa de contagem. Introduce-se ainda uma máscara com fendas o mais próximo possível do cristal (Figura 1.8).

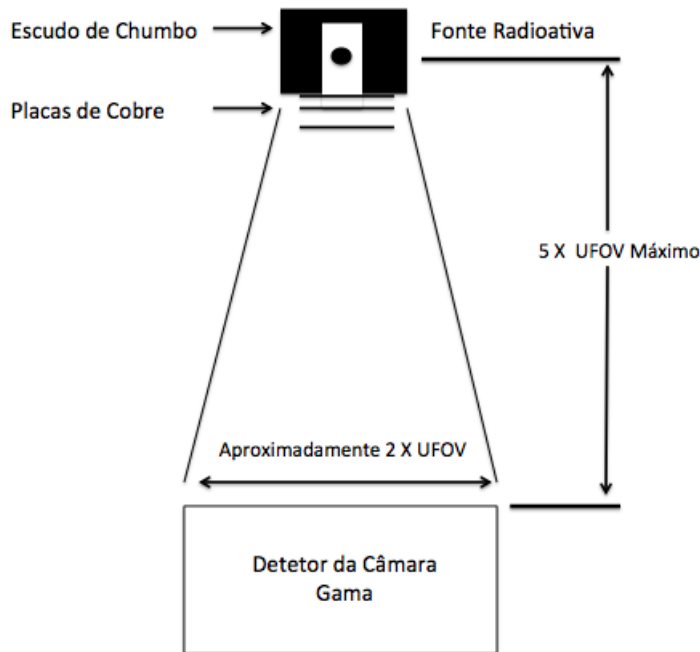


Figura 1.7: Montagem utilizada na avaliação da resolução em posição de uma câmara gama. Imagem modificada a partir de [5]

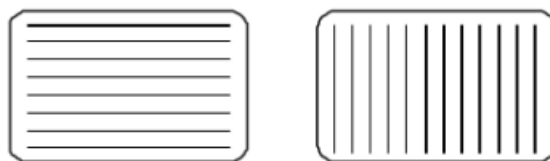


Figura 1.8: À esquerda: Máscara para medições em Y. À direita: Máscara para medições em X [5]

Para cada linha tem-se um espectro como o representado na figura 1.9. Os valores de FWHM (largura a meia altura do inglês *Full Width at Half Maximum*) e FWTM (largura à décima altura do inglês *Full Width at Tenth Maximum*), que correspondem à resolução intrínseca para UFOV (*Useful Field of View*) e CFOV (*Central Field of View*) respetivamente, são calculados pela média dos FWHM e FWTM de todos os sinais obtidos.

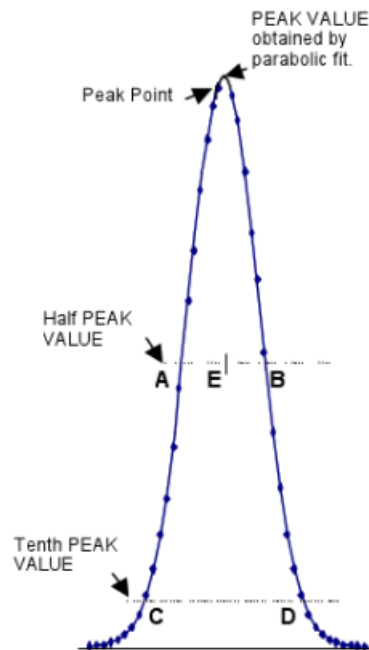


Figura 1.9: Exemplo de um espectro obtido na avaliação da resolução em posição de uma câmara gama [5]

1.2.7.2 Resolução em energia

A resolução em energia caracteriza-se normalmente com o FWHM do espectro dos sinais de energia para uma fonte monoenergética, normalmente Tecnécio-99 (^{99m}Tc) ou Cobalto-57 (^{57}Co). A energia total depositada no cristal é calculada pela soma das amplitudes de todos os sinais provenientes dos fotomultiplicadores. A resolução típica para estes sistemas é cerca de 12% da largura a meia altura para 140 keV. O espectro observado na determinação da resolução em energia é similar ao apresentado na figura 1.9 [5].

1.2.7.3 Uniformidade

Idealmente, uma irradiação uniforme do sistema deveria corresponder a uma imagem uniforme no final de todo o processo. Mas o que acontece na realidade não é bem assim, o número de contagens por unidade de área não é constante apesar da actividade da fonte ser constante. A origem deste problema é alguma dependência da amplitude do sinal de energia em relação à posição do evento. Apesar do problema ser do sistema em si, este pode ser corrigido, embora não todo, pelo algoritmo de reconstrução. Isto quer dizer que todos os sistemas têm um erro de não uniformidade intrínsecos a si, e que é preciso ter em conta este erro na sua utilização. Para a medição deste parâmetro, segundo a NEMA, utiliza-se o *setup* da figura 1.7. Coloca-se a fonte radioativa (Tc-99m) exatamente no eixo do detetor (a uma distância de pelo menos 1.5 vezes o diâmetro da câmara) e guardam-se os valores das contagens para cada pixel da imagem. A **uniformidade integral** é definida como a variação máxima da densidade de contagens numa área do detetor definida enquanto esta é submetida a uma radiação uniforme e pode ser calculada a partir de $UniformidadeIntegral = 100 \times \frac{max-min}{max+min}$, onde *max* e *min* são os respetivos valores máximos e mínimos do conjunto de todos os pixels da área irradiada [5].

1.2.7.4 Linearidade

A origem da não linearidade reside no algoritmo de reconstrução de coordenadas utilizado, mas é possível corrigi-la de modo a obter o máximo de linearidade. Este fenómeno está ilustrado na figura 1.10 onde se apresenta o exemplo de uma coordenada X medida (a que aparece na imagem) que não corresponde á coordenada X verdadeira.

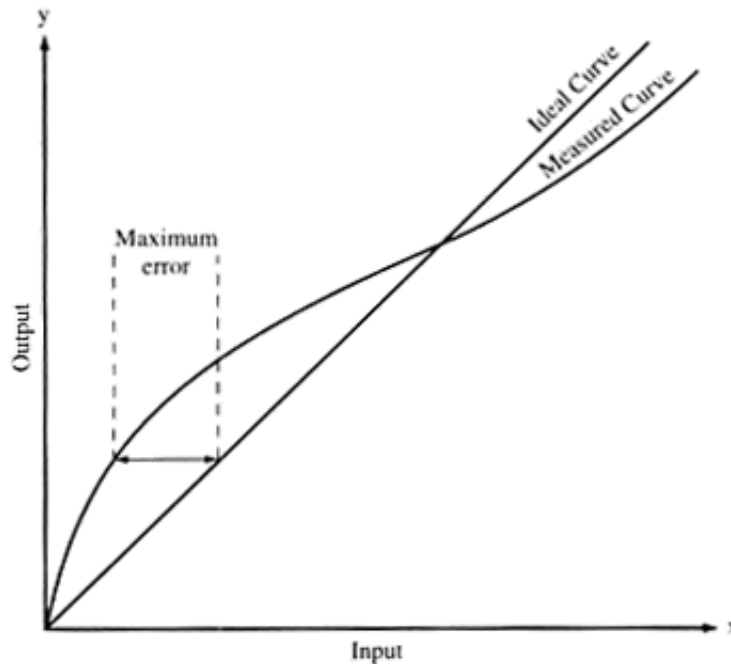


Figura 1.10: Exemplo de não linearidade [6]

Ou seja, a linearidade é a função que avalia se a informação medida no corpo é exactamente aquela que aparece na imagem, sem distorção [6].

1.2.7.5 Taxa de Contagem Máxima

Num detetor ideal a taxa de contagem observada R_o deveria ser sempre igual ou proporcional á taxa de contagem de fótons verdadeira em sistemas reais R_t , o que não acontece. Este fenómeno está representado na figura 1.11 onde se pode ver respostas ao aumento da taxa de contagem para um detetor ideal e para um detetor real que não consegue acompanhar este aumento. Existem dois tipos de reação, como é possível ver na imagem: a não paralisável em que a taxa de contagem satura; e a paralisável em que a taxa de contagem atinge um máximo e depois decresce. Para que seja possível reduzir ao máximo estes erros inerentes á tecnologia utilizada define-se intervalos entre impulsos fixos e obrigatórios assim reduzindo a perda a menos de 10%.

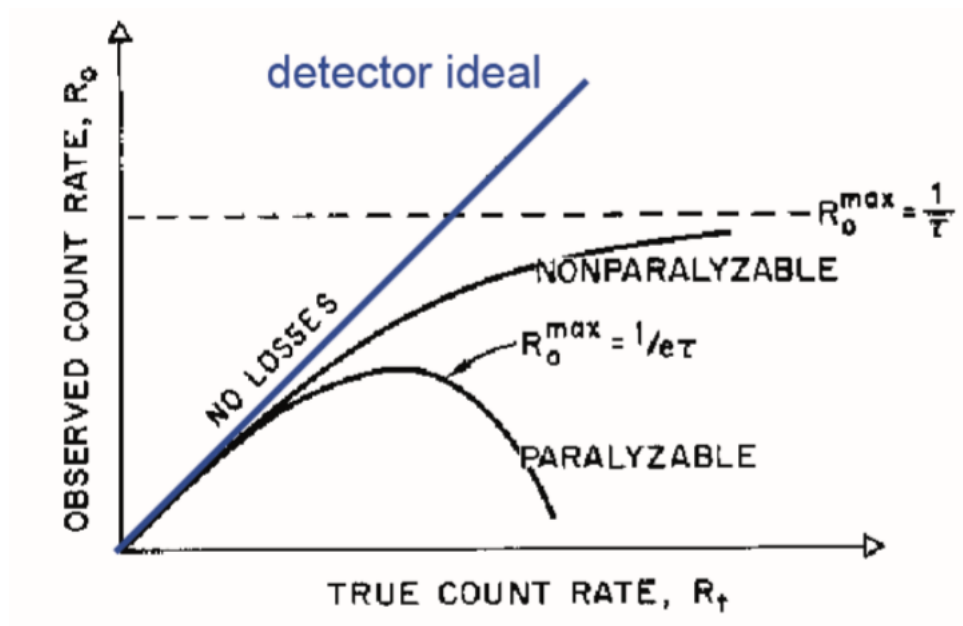


Figura 1.11: Taxa de Contagem [6]

1.2.8 Parâmetros Típicos

Os parâmetros típicos das câmaras gama modernas são [6]:

- Espessura do cristal Na(Tl) - de 0.6 a 1.3 cm
- FOV (field of view) 40 cm de diâmetro ou um rectângulo 40x50 cm
- Números de fotomultiplicadores - 61 a 100
- Eficiência de detecção (intrínseca) - 90% para 140 keV
- Resolução espacial intrínseca de cerca de 3,5 mm
- Resolução de energia de 9,5% para 140 keV
- Taxa de contagem máxima - 300 k
- Gama de energias 50 keV a 400 keV
- Não linearidade - 1mm
- Não uniformidade corrigida - 4,5%

Capítulo 2

Fotomultiplicadores

2.1 Arquitetura

Um tubo fotomultiplicador é normalmente constituído por um fotocátodo, seguido de eléctrodos de focagem, por um multiplicador de electrões (conjunto de dínodos) e por fim um coletor de electrões (ânodo) no tubo em vácuo (Figura 2.1).

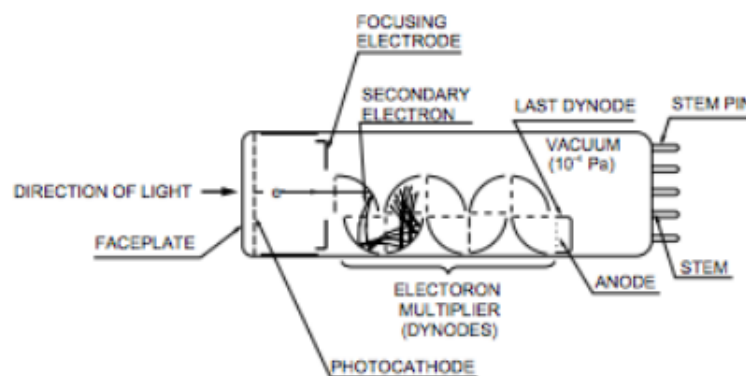


Figura 2.1: Estrutura de um Tubo Fotomultiplicador [7]

Quando fótons são absorvidos no fotocátodo este emite fotoelectrões que são direcionados para os dínodos que multiplicam os electrões pelo processo de emissão secundária. Por fim, os electrões multiplicados são recolhidos no ânodo e transformados num sinal de saída.

Como é possível ver na figura 2.2, existem dois tipos de fotomultiplicadores, o *Head-On* e o *Side-On*. O primeiro tem o fotocátodo na "cabeça" do fotomultiplicador enquanto que o segundo tem o fotocátodo na lateral.



Figura 2.2: Head-On e Side-On [7]

Cada um destes fotomultiplicadores tem as suas vantagens, mas o mais utilizado é o *Head-On*. A principal vantagem deste tubo fotomultiplicador é a sua superior resolução em amplitude, enquanto que o *Side-On* type é muito mais barato o que o torna preferível para aplicações que não precisem de grandes resoluções como espectrómetros e sistemas fotônicos semelhantes. Existe ainda outra diferenciação entre fotomultiplicadores dependendo do seu modo de funcionamento. Tubos com fotocátodo opaco chamam-se fotomultiplicadores de modo reflexão, enquanto que tubos com fotocátodo semitransparente têm o nome de fotomultiplicadores de modo transmissão. Os fotomultiplicadores do tipo *Head-On* têm sempre fotocátodo semitransparente.

2.2 Princípios de Funcionamento

O funcionamento de um fotomultiplicador baseia-se em dois fenómenos físicos importantes, a *Fotoemissão* e a *Emissão Secundária*.

2.2.1 Fotoemissão

A *fotoemissão* pode ser dividida em três fases (ver Figura 2.3), **(1)** a transmissão da energia dos fótons absorvidos para os eletrões do material, **(2)** a difusão dos fotoeletrões, perdendo alguma da sua energia, e por fim, **(3)** o *alcançar* da superfície por parte destes eletrões com energia suficiente em excesso para escapar desta para o vácuo.

Nem todos os fótons que incidem num material fotoemissor resultam na emissão de eletrões. A relação entre o número de fótons incidentes e o número de eletrões emitidos tem o nome de **Eficiência Quântica**. Os fatores que influenciam esta relação são o comprimento de onda da luz incidente e a composição e espessura do material fotoemissor.

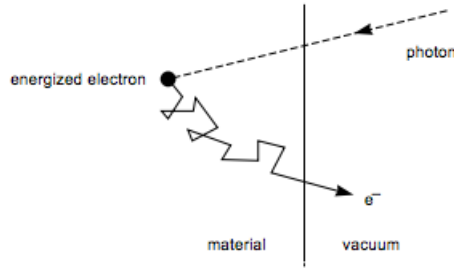


Figura 2.3: Fotoemissão [8]

A absorção de fótons numa camada fotoemissiva pode ser descrita de uma maneira bastante simples. Devido à espessura do fotocátodo ocorrem múltiplas reflexões internamente o que leva à ocorrência de também múltiplas interferências dentro da camada, aumentando assim a probabilidade de absorção do fóton. A figura 2.4 mostra um exemplo da probabilidade de absorção dos fótons no fotocátodo em função da distância x da superfície de entrada e representada como a variação do fluxo de fótons, ϕ_p , no interior do fotocátodo $\frac{d\phi_p}{dx}$. De notar que quanto mais perto das extremidades da camada, maior é a absorção devido à existência da interferência [8].

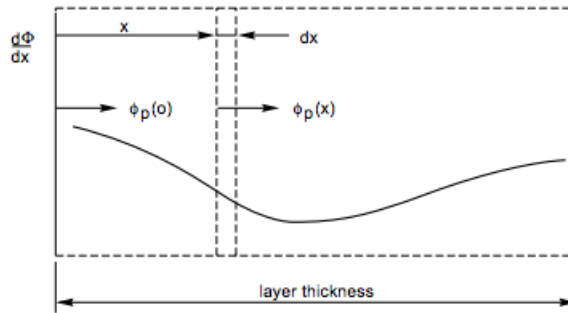


Figura 2.4: Absorção de fótons relativa numa camada fotoemissiva [8]

A absorção de fótons pode então ser descrita em função da distância à superfície pela equação 2.1 [8],

$$\frac{d\phi_p(\nu, x)}{dx} = -\alpha(\nu) \cdot \tau(x) \cdot \phi_p(\nu, x) \quad (2.1)$$

onde $\alpha(\nu)$ é o coeficiente de absorção do material e a função complexa $\tau(x)$ representa os efeitos das reflexões de ambas as extremidades da camada.

Numa camada fina dx , o número de elétrons excitados devido à transferência de energia dos fótons absorvidos será proporcional ao fluxo de fótons, e é calculado pela equação 2.2. [8]:

$$\frac{dn}{dx} = -\eta_e(\nu) \frac{d\phi_p(\nu, x)}{dx} \quad (2.2)$$

em que η_e representa a fração de fótons absorvidos que conseguiram excitar elétrons no material. Para a luz visível esta fração tende para a unidade.

2.2.2 Emissão Secundária

Tal como no caso da fotoemissão, também a emissão secundária pode ser descrita em três fases, (1) a transmissão da energia dos eletrões primários absorvidos para os eletrões do material, (2) a difusão dos eletrões excitados no material e finalmente, (3) a chegada dos eletrões à superfície do material com energia em excesso para poderem escapar para o vácuo [8].

Dentro do intervalo de energias de interesse (i.e. centenas de eV) existem 3 processos fundamentais nos quais os eletrões primários perdem energia:

- ionização dos átomos em níveis de energia profundos,
- excitação dos eletrões que estão entre níveis da banda de valência,
- excitação de plasmons de superfície e de volume.

O primeiro processo é o mais importante quando a energia dos eletrões é grande o suficiente para a probabilidade de dispersão elástica, em ângulos grandes, ser alta. Isto leva à existência de reflexões (*backscattering*) de cerca de 10 a 30% dos eletrões incidentes e à dispersão do feixe de eletrões.

A perda de energia de um eletrão com energia inicial E_p é dada pela equação 2.3 [8]

$$\frac{dE}{dx} = \frac{K}{E_p} \ln \frac{aE_p}{E_e} \quad (2.3)$$

onde K é a constante que representa as características do material, a é quase uma unidade e E_e é a energia de excitação média. É razoável assumir que a densidade de eletrões livres é proporcional à perda de energia do feixe incidente (equação 2.4) [8], logo,

$$\frac{dn}{dx} = \frac{1}{\epsilon} \left| \frac{dE}{dx} \right| \quad (2.4)$$

em que n é o número de eletrões livres e ϵ é a energia média necessária para gerar um par eletrão-lacuna. Assim, a partir da equação 2.5 [8],

$$R = \int_0^{E_p} \frac{dE}{\left| dE/dx \right|} \quad (2.5)$$

que define R como a profundidade da penetração do feixe de eletrões no material. Define-se a relação entre o número de eletrões livres e a profundidade de penetração pela equação 2.6. [8]

$$\frac{dn}{dx} = \frac{1}{\epsilon} \frac{E_p}{R} \quad (2.6)$$

Os eletrões livres no material viajam em direção à superfície, desta forma perdem uma parte da sua energia em excesso em colisões com outros eletrões ou em interações com a rede cristalina. Apenas os eletrões que chegam à superfície com energia em excesso suficiente conseguem ultrapassar a barreira de potencial e apenas estes contribuem para a *emissão secundária*. Tal como no caso da fotoemissão, os eletrões que forem excitados mais perto da superfície terão uma probabilidade muito maior de escapar para o vácuo. O número de eletrões excitados é proporcional à energia inicial dos eletrões primários, E_p .

A relação entre o número de eletrões secundários emitidos e o número de eletrões primários tem o nome de *Coefficiente de Emissão Secundária*, δ . Este rácio aumenta com a energia inicial dos eletrões primários até um máximo, E'_p , e depois decresce gradualmente devido ao aumento do número de eletrões excitados a profundidades maiores (Figura 2.5) [8].

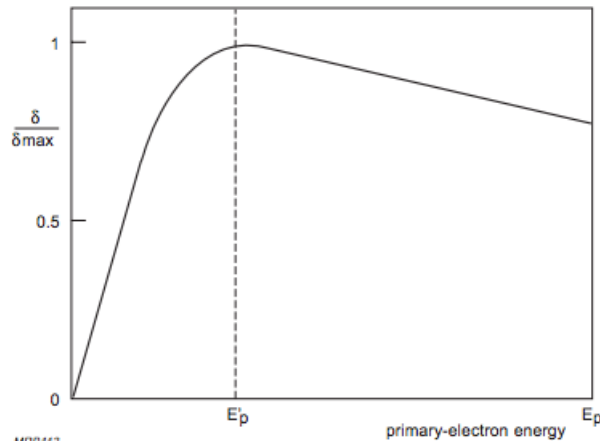


Figura 2.5: Variação relativa do coeficiente de emissão secundária em função da energia dos elétrons primários [8]

Estas são algumas das razões para se utilizar semicondutores em vez de metais neste tipo de instrumentação, já que os metais são fracos fotoemissores tal como são fracos emissores secundários. Os metais são caracterizados por terem profundidades de libertação muito baixas (cerca de 3 nanómetros) e coeficientes de emissão muito baixos. Pelo contrário, alguns isoladores e semicondutores com barreiras de potencial baixas são emissores secundários muito bons pois conseguem ter profundidades de libertação na ordem das centenas de microns [8].

2.3 Fotocátodo, Janela e Resposta Espectral

2.3.1 Fotocátodo

Os fotocátodos são normalmente feitos de semicondutores constituídos por metais alcalinos com funções de trabalho baixas. Nesta secção irei mostrar alguns dos materiais mais utilizados:

- Ag-O-Cs

O modo transmissão do fotocátodo com este material é designado S-1 e é sensível a luz incidente com comprimentos de onda compreendidos entre os 300 e os 1200nm. Como este tipo de material tem uma emissão termiônica relativamente alta (ver secção "Dark Current"), os tubos que utilizam o Ag-O-Cs são normalmente usados com o fotocátodo arrefecido para a deteção perto da região de infravermelhos [7].

- GaAs(Cs)

O GaAs activado com céσιο é também utilizado como fotocátodo. O espectro de resposta deste fotocátodo normalmente cobre uma gama de comprimentos de onda maior, desde o ultravioleta aos 930 nm [7].

- InGaAs(Cs)

Este fotocátodo tem uma sensibilidade maior na região dos infravermelhos que o anterior. Na região entre os 900 e 1000 nm, o InGaAs tem uma relação sinal-ruído muito maior que o Ag-O-Cs [7].

- Sb-Cs

Este é um dos fotocátodos mais utilizados já que tem um espectro de resposta para luz incidente com comprimentos de onda compreendidos entre as regiões do ultravioleta e do visível. Como tal, não é aconselhado para fotocátodos de modo transmissão mas sim para os de modo reflexão [7].

- Bialkali (Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs)

Este tipo de fotocátodo tem um espectro de resposta parecido ao de Sb-Cs, mas tem uma maior sensibilidade e um menor ruído em comparação com este. Estes fotocátodos têm uma boa sensibilidade para flashes de cintiladores de NaI(Tl) e por isso são frequentemente utilizados para deteção de partículas com cristais cintiladores no modo de impulso e também para contagens de fótons únicos [7].

- High Temperature/Low Noise Bialkali (Na-K-Sb)

Este tipo de material é particularmente útil a temperaturas de operação extremamente elevadas já que pode aguentar até cerca de 175° C. A aplicação mais conhecida é na indústria da exploração petrolífera. À temperatura ambiente este fotocátodo opera com um dark current extremamente baixa, tornando-o ideal para aplicações de contagem de fótons únicos (single photon counting) [7].

- Multialkali (Na-K-Sb-Cs)

O fotocátodo multiakali tem um largo espectro de resposta, desde o ultravioleta até quase á região dos infravermelhos. A sua sensibilidade pode ser estendida até 930 nm a partir de processamento especial. É muito utilizado em espectrómetros [7].

- Cs-Te, Cs-I

Estes materiais são sensíveis a radiação ultravioleta mas não são sensíveis á luz visível e por isto são chamadas de "solar blind"(cego á luz solar). O Cs-Te é praticamente insensível a comprimentos de onda maiores que 320 nm e o Cs-I a maiores que 200 nm [7].

2.3.2 Janela

A sensibilidade de um fotomultiplicador aos comprimentos de onda diferentes é também afetada pela transmitância da janela do tubo, especialmente na região ultravioleta (ver Figura 2.6). Os materiais mais utilizados para o fabrico de janelas são os seguintes:

- Vidro de Borossilicato

Este tipo de vidro é aquele que é utilizado mais frequentemente. Transmite radiação praticamente desde a região dos infravermelhos até cerca dos 300 nm. Não é adequado para deteção na região ultravioleta. Para algumas aplicações utiliza-se a combinação de um fotocátodo bialkali e um vidro de borossilicato de baixa radioatividade (chamado de K-free pois tem muito pouco potássio que contém um radioisótopo natural emissor de raios gama) [7].

- Vidro de Transmissão UV

Este vidro transmite radiação ultravioleta bastante bem, por isso o seu nome, e é muito utilizado em aplicações de espectroscopia. O cut-off deste tipo de vidro é nos cerca de 185 nm [7].

- Sílica Sintética

A sílica sintética transmite radiação ultravioleta até aos 160 nm e, em comparação com a sílica fundida, oferece uma absorção muito baixa na região dos ultravioleta [7].

- Fluoreto de Magnésio (MgF_2)

Os cristais de alkali são muito superiores na transmissão de radiação ultravioleta mas têm a desvantagem de absorverem humidade muito facilmente (Deliquescence). Entre estes cristais o MgF_2 é o mais utilizado pois é aquele que absorve menos e transmite radiação ultravioleta até a um nível perto dos 115 nm [7].

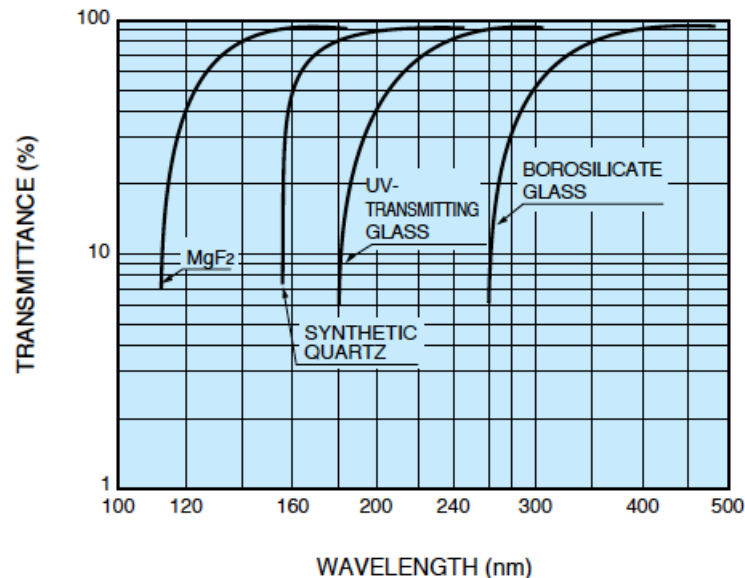


Figura 2.6: Transmittância de diferentes materiais usados como janela [7]

2.3.3 Resposta Espectral

O fotocátodo de um tubo fotomultiplicador converte energia da luz incidente em fotoelectrões. A eficiência de conversão (ou sensibilidade do fotocátodo) varia com o comprimento de onda da radiação incidente. Esta relação entre a sensibilidade do fotocátodo e o comprimento de onda dá a resposta espectral. Na prática a sensibilidade do fotocátodo é a relação entre a corrente no cátodo e o fluxo luminoso incidente enquanto que a eficiência quântica é a relação entre o número de fotoelectrões emitidos e o número de fótons incidentes. O parâmetro *sensibilidade* é normalmente utilizado quando o fotomultiplicador é usado para medir fluxos luminosos elevados, enquanto que o termo *eficiência quântica* adequa-se mais à situação em que é preciso detetar sinais de poucos fótons. A figura 2.7 mostra a resposta espectral, expressa em termos de sensibilidade e de eficiência quântica, de um fotomultiplicador bialkali típico [7].

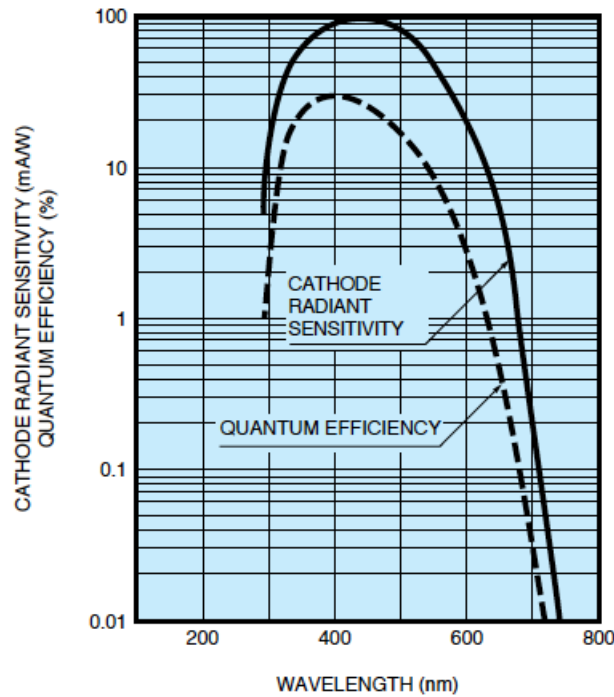


Figura 2.7: Resposta Espectral [7]

Como é possível ver na Figura 2.7, a resposta espectral de um fotomultiplicador é determinada pelos materiais utilizados no fotocátodo e na janela e por isso, é muito importante escolher a melhor combinação possível para a aplicação desejada.

2.4 Tipos de Multiplicadores de Electrões e Ganho

A alta sensibilidade (alto ganho e um baixo sinal-ruído) dos fotomultiplicadores é devido aos multiplicadores de electrões utilizados que aumentam o número de electrões por emissões secundárias. Estes são normalmente constituídos por 8 a 16 eléctrodos chamados dínodos mas existem várias geometrias possíveis, cada uma com diferentes vantagens e desvantagens:

- Circular Cage (Figura 2.8-1)

Este tipo de multiplicador é normalmente utilizado em fotomultiplicadores do tipo Side-On. As suas principais vantagens são o rápido tempo de resposta e o reduzido espaço utilizado [7].

- Box and Grid (Figura 2.8-2)

Este tipo consiste num 'comboio' de dínodos quarto-cilíndricos e é muito utilizado em fotomultiplicadores do tipo Head-On devido ao seu design simples e excelente uniformidade. Apesar destas vantagens o seu tempo de resposta pode ser muito elevado para determinadas aplicações [7].

- Linear-Focused (Figura 2.8-3)

Muito utilizado no tipo Head-On, onde a resolução em tempo e a linearidade da resposta em função da quantidade de luz incidente são muito importantes, já que tem um tempo de resposta extremamente baixo [7].

- Venetian Blind (Figura 2.8-4)

Principalmente utilizado em tubos que têm fotocátodos com grandes áreas pois tem uma zona de dínodos maior, oferece melhor uniformidade e um pulso de saída mais largo. Este tipo de multiplicador é normalmente utilizado quando o tempo de resposta não é um factor muito importante [7].

- Mesh (Figura 2.8-5)

Tem uma estrutura de eléctrodos de malha fina próximos uns dos outros. Este tipo de multiplicador oferece alta imunidade em relação a campos magnéticos tal como boa uniformidade e linearidade. Também tem sensibilidade em relação á posição quando utilizado em conjunto com múltiplos ânodos [7].

- Microchannel Plate (MCP) (Figura 2.8-6)

O MCP é um disco fino constituído por milhões de micro tubos de vidro (canais) unidos uns aos outros. Cada um dos canais funciona como um multiplicador de electrões independente. O MCP oferece respostas muito mais rápidas que qualquer outro dínodo e tal como o tipo Mesh tem alta imunidade em relação a campos magnéticos e a capacidade de deteção a duas dimensões quando se utilizam múltiplos ânodos [7].

- Metal Channel (Figura 2.8-7)

Este tipo de multiplicador tem uma construção de dínodos compacta e consegue respostas muito rápidas devido aos espaços muito pequenos entre os dínodos. Tem também capacidade para medições sensíveis á posição [7].

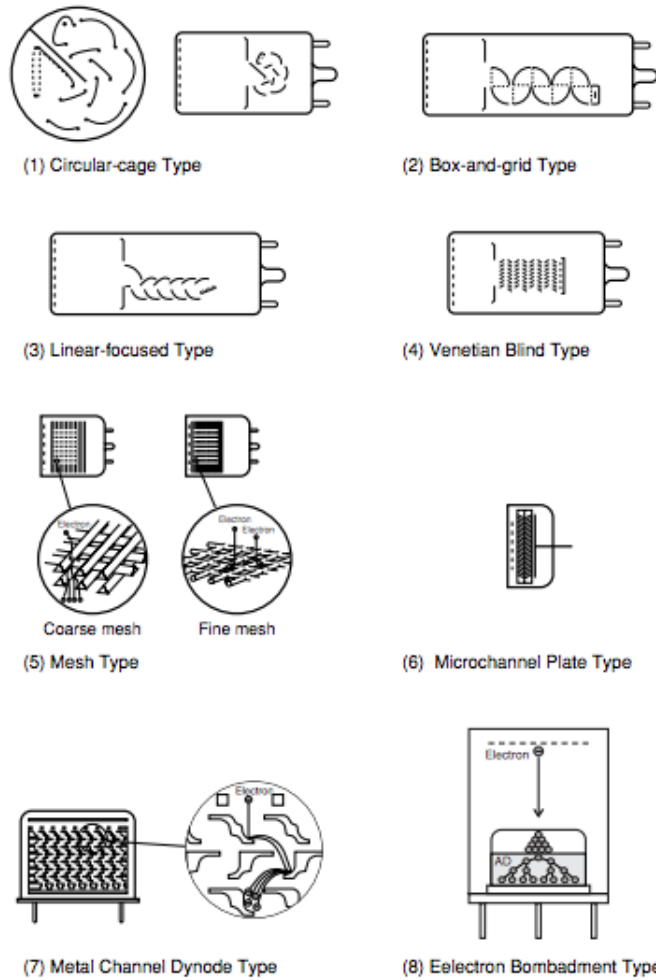


Figura 2.8: Tipos de arquiteturas de multiplicadores de elétrons [7]

2.4.1 Ganho

Como já foi descrito anteriormente, os fotoelétrons emitidos no fotocátodo são direcionados para o primeiro dínodo. Neste primeiro dínodo são produzidos mais elétrons pelo processo de emissão secundária e estes passam para o segundo dínodo onde são produzidos ainda mais elétrons, e assim sucessivamente até ao último dínodo. É a partir deste processo que se obtém o ganho (ou amplificação de corrente) característico de um fotomultiplicador.

Na secção 2.2.2 estabeleceu-se o coeficiente de emissão secundário, δ , como a relação entre o número de elétrons secundários emitidos e o número de elétrons primários. Sabe-se ainda que este coeficiente é dependente da diferença de potencial entre dínodos, E , e para $E < E_p$ da figura 2.5 é aproximada pela equação 2.7 [7]:

$$\delta = aE^k \quad (2.7)$$

onde a é uma constante e k é determinado pela estrutura e material do dínodo mas normalmente tem um valor compreendido entre 0.7 e 0.8.

O coeficiente de emissão secundário do primeiro dínodo, δ_1 é determinado pela equação 2.8 [7]. Esta representa relação entre a corrente emitida pelo fotocátodo que chega ao primeiro dínodo, I_k , e a corrente correspondente aos elétrons secundários libertados pelo dínodo, I_{d1} :

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad (2.8)$$

No tubo fotomultiplicador, os elétrons são multiplicados em cascata desde o primeiro dínodo ao último, o dínodo n , logo o coeficiente de emissão secundário no dínodo n é dado pela equação 2.9 [7].

$$\delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}} \quad (2.9)$$

A corrente no ânodo, I_p , é então determinada pela equação 2.10 [7]:

$$I_p = I_k \alpha \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n \quad (2.10)$$

onde α representa a eficiência de coleção dos fotoelétrons ao primeiro dínodo.

Por consequência, pode-se determinar o ganho, μ , de um fotomultiplicador com n dínodos ao relacionar a corrente à saída do ânodo com a corrente à saída do fotocátodo, como representado na equação 2.11 [7].

$$\mu = \frac{I_p}{I_k} = \alpha \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n \quad (2.11)$$

É ainda possível, relacionar o ganho de um fotomultiplicador com a tensão nele aplicada. Para o caso de um fotomultiplicador com a constante a igual à unidade, com n dínodos e cujo divisor de tensão divide a tensão igualmente por cada dínodo, tem-se a equação 2.12 [7]:

$$\mu = (aE^k)^n = a^n \left(\frac{V}{n+1} \right)^{kn} = AV^{kn} \quad (2.12)$$

onde $A = a^n / (n+1)^{kn}$. É claro, pela equação 2.12, que o ganho de um fotomultiplicador é proporcional ao exponencial kn da tensão aplicada. Na figura 2.9 está representado um gráfico onde se compara o ganho com a sensibilidade luminosa de um tubo fotomultiplicador, ambos dependentes da tensão aplicada.

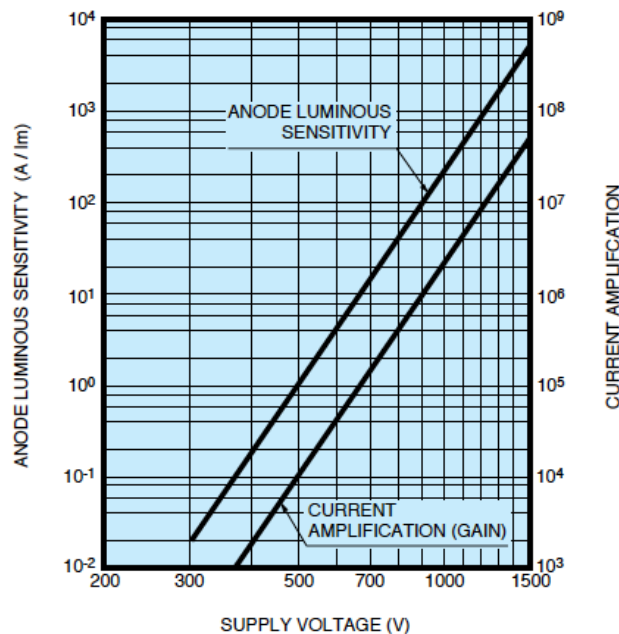


Figura 2.9: Ganho [7]

Na prática o método mais simples e direto para medir o ganho consiste na medição da corrente de fundo (ruído) no cátodo seguindo-se da medição da corrente no cátodo com um fluxo de luz conhecida. Por fim retira-se o ruído da corrente medida anteriormente e fica-se com a corrente real produzida no fotocátodo. Para o ânodo realizam-se os mesmos passos mas com um filtro de luz com atenuação conhecida, F. Por fim, o ganho será a relação entre as correntes reais no ânodo e no cátodo tendo sempre em conta o filtro de atenuação [8].

2.5 Outras Características

2.5.1 Dark Current

Existe sempre uma pequena corrente a correr pelo fotomultiplicador mesmo quando este está a ser operado na escuridão total. A esta corrente damos o nome de *Dark Current*. Esta corrente e o ruído que provém dela são fatores críticos na determinação das características do tubo fotomultiplicador. Tal como a figura 2.10 mostra, a *dark current* é muito dependente da tensão fornecida.

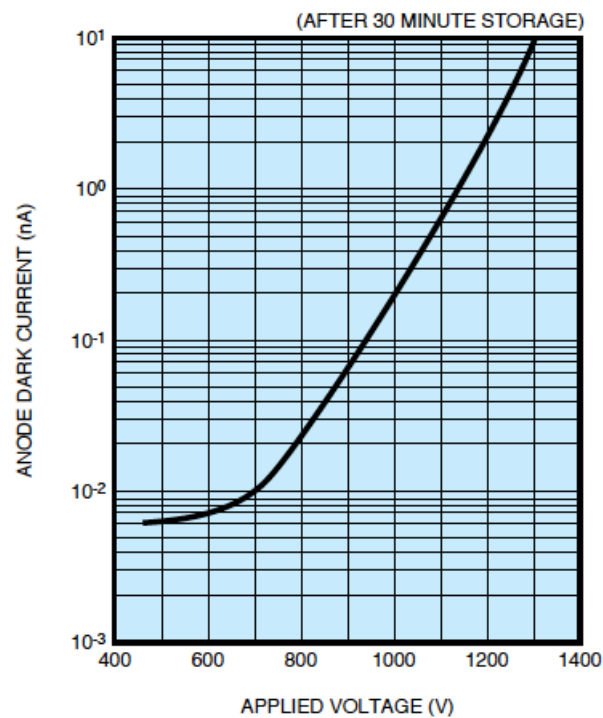


Figura 2.10: Dark Current em função da tensão aplicada [7]

As principais causas desta corrente são as seguintes:

- Emissão Termiônica de Electrões

A emissão termiônica (espontânea) de electrões do fotocátodo e dos dínodos, que entram no sistema de multiplicação tal como os fotoelectrões, é a principal causa de ruído em fotomultiplicadores (Figura 2.11). Como os electrões emitidos do fotocátodo espontaneamente são indistinguíveis dos fotoelectrões, o sinal produzidos por esses pode ser confundido com o sinal luminoso, especialmente quando se trata da deteção de fotoelectrões únicos. A principal solução (e a mais

eficiente) para este problema é o arrefecimento do fotocátodo durante o tempo de operação, algo indispensável em situações como a contagem de fótons únicos em que a dark current tem que ser mínima e idealmente zero [7].

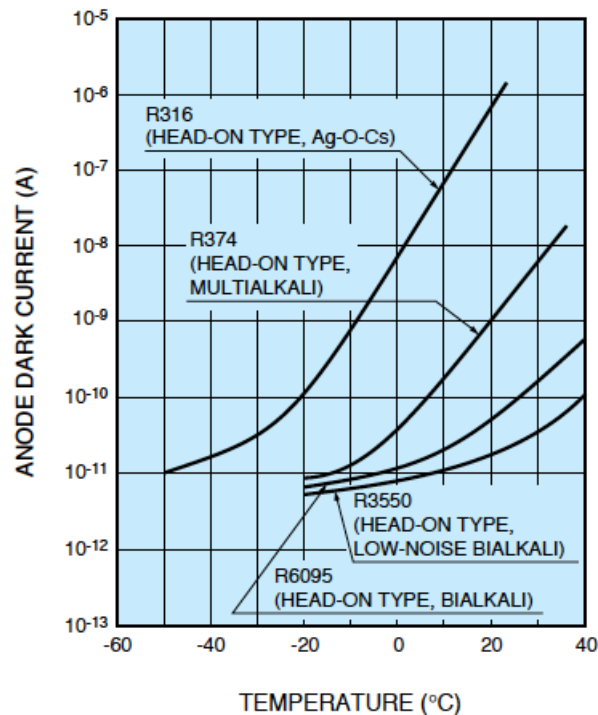


Figura 2.11: Dark Current em função da temperatura [7]

- Ionização de Gases Residuais

Os gases residuais dentro do tubo fotomultiplicador podem ser ionizados pela colisão com electrões. Quando estes iões embatem no fotocátodo ou no início do multiplicador de electrões, são emitidos electrões por emissão secundária resultando assim em pulsos de ruído bastante grandes na saída. Estes pulsos de ruído são normalmente vistos depois dos pulsos principais (por isso têm o nome de *afterpulses*) e podem ser um problema na deteção de pulsos de luz [7].

- Emissão de Campo (*Field Emission*)

Quando se opera o tubo fotomultiplicador a tensões perto do máximo especificado podem existir emissões de electrões do fotocátodo e dos dínodos devido ao campo eléctrico elevado junto às superfícies destes. Tal como na emissão termiónica de electrões, os electrões criados desta forma podem ser multiplicados e dar origem a uma dark current. Para prevenir esta situação recomenda-se operar o fotomultiplicador a cerca de 70/80% da tensão máxima permitida [7].

2.5.2 Características temporais

Um tubo fotomultiplicador é um fotodetector com uma resposta excepcionalmente rápida, ou seja, um tempo de resposta muito pequeno. Este tempo de resposta é determinado, principalmente, pelo tempo de trânsito (*transit time*) necessário para os fotoelectrões produzidos no fotocátodo chegarem ao ânodo depois de serem multiplicados tal como pelo intervalo de tempo entre cada fotoelectrão.

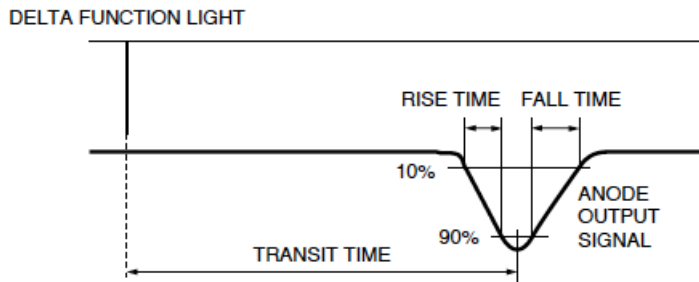


Figura 2.12: Características temporais vs Tensão [7]

O tempo de resposta é sobretudo determinado pelo tipo de dínodo utilizado mas também depende bastante da tensão aplicada. Como é possível ver no gráfico em cima, o aumento da tensão aplicada leva a uma melhoria no tempo de resposta, ou seja, uma diminuição do tempo de trânsito dos electrões. Em geral os tubos fotomultiplicadores com multiplicadores de electrões do tipo *Linear-Focused* ou *Circular Cage* exibem melhores tempos de resposta que os tubos do tipo *Box and Grid* e *Venetian Blind* [7].

Na medição de luz pulsada, o sinal de saída do ânodo deverá reproduzir fielmente a forma do pulso incidente. Como é possível ver na figura 2.12 e como foi explicado anteriormente, o tempo de trânsito é o intervalo entre a chegada da luz incidente ao fotocátodo e o instante em que o sinal de saída do ânodo atinge um pico. O *rise time* (ou tempo de subida) é definido como o tempo necessário para o sinal de saída passar de 10 a 90% de um pico. O tempo de trânsito do electrão tem uma flutuação entre pulsos de luz individuais. Esta flutuação chama-se *transit time spread* (TTS) e é definido como a largura a meia altura da frequência de distribuição do tempo de transição dos electrões num evento com apenas um fotoelectrão. O TTS é um importante factor em medições dependentes do tempo [7].

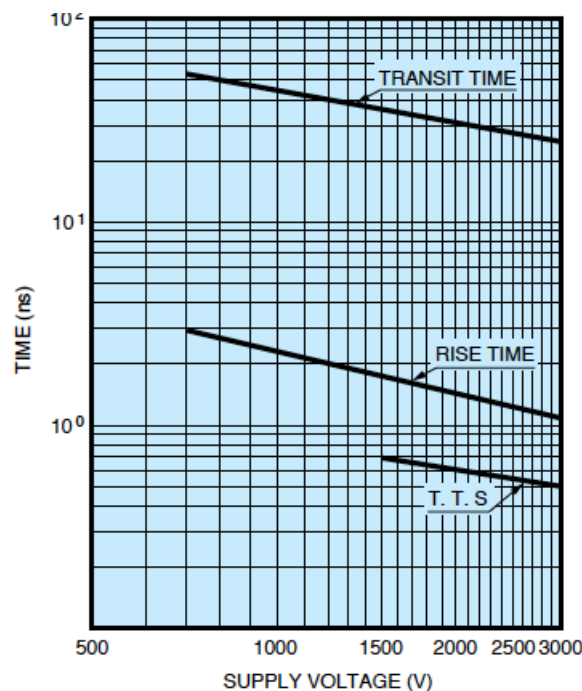


Figura 2.13: Rise/Fall/Transit Time [7]

2.5.3 Estabilidade

As variações no sinal de saída de um tubo fotomultiplicador durante o seu tempo de operação são normalmente chamadas de **Drift ou Deriva** (ver Figura 2.14). Por outro lado, a deterioração da performance como resultado do stress imposto no instrumento pela tensão aplicada, corrente e temperatura ambiente é chamada de **Fatigue ou Fadiga**. Como a sensibilidade do fotocátodo exibe uma boa estabilidade durante qualquer tempo de operação sabe-se que as variações no sinal de saída serão principalmente devido aos processos de emissão secundária que ocorrem nos dínodos. A principal causa deste problema é o dano causado no último dínodo já que é aquele que sofre maior intensidade de bombardeamento de electrões. A solução mais eficiente é a limitação da corrente no ânodo [7].

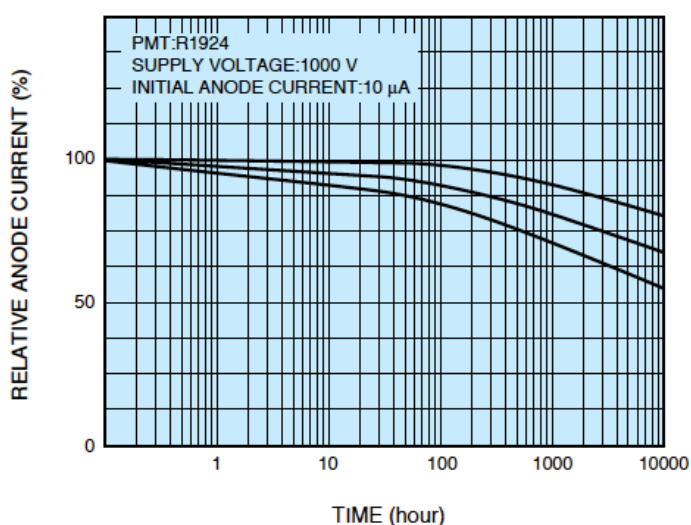


Figura 2.14: Exemplo de Drift [7]

2.5.4 Linearidade

O grau de proporcionalidade entre o número de electrões obtidos pelo ânodo e o número de fótons incidentes é chamado de linearidade de carga. O grau de proporcionalidade entre o fluxo incidente e a corrente do ânodo é chamada de linearidade de corrente (sensibilidade luminosa). Nestas relações o tempo é um parâmetro adicional e os limites destas relações/graus são estabelecidos por fatores internos e externos.

Os principais fatores externos que afetam a linearidade são a **tensão aplicada** e a **tensão criada no ânodo**. Em relação ao primeiro fator sabemos que a variação da tensão entre eléctrodos afeta o ganho ao influenciar os coeficientes de emissão secundária nos dínodos e a trajetória dos electrões. O segundo fator (tensão criada no ânodo) faz com que exista uma diminuição do potencial no último dínodo e caso esta diminuição seja considerável pode afetar a linearidade. Como a tensão no ânodo raramente excede alguns volts este fator é raramente considerado relevante.

Os fatores internos mais importantes são a **carga espacial**, **resistividade do cátodo** e o **drift do ganho**. A correntes elevadas, a carga espacial pode influenciar as trajetórias dos electrões o que leva a perda de colisões nos dínodos e consequentemente a perda de ganho. A correntes ainda mais altas pode fazer com que alguns electrões voltem ás superfícies de origem. A resistividade do cátodo é também

um fator importante já que o "electron-optical input system" de um tubo fotomultiplicador é desenhado na suposição de que o cátodo é uma superfície equipotencial. Qualquer variação desta condição pode levar á alteração das trajetórias dos electrões e como tal afetar a eficiência de recolha de fotoelectrões no primeiro dínodo. Por fim, o drift do ganho ou variação do ganho pode ocorrer quando a tensão média no ânodo varia. Apesar de se revelar como a perda de linearidade, é convencionalmente tratado como uma instabilidade [7].

2.5.5 Uniformidade

A uniformidade de um fotomultiplicador refere-se à variação ou dependência do sinal de saída tendo em consideração a posição no fotocátodo onde são emitidos os respectivos fotoelectrões (ver Figura 2.15). Esta dependência acontece principalmente devido a duas causas. Em primeiro lugar, a não-uniformidade do fotocátodo, ou seja, a variação da eficiência quântica ponto a ponto do fotocátodo, fazendo assim com que os fotoelectrões produzidos variem dependendo da posição em que os fotões embatem no fotocátodo. Em segundo lugar, a variação da eficiência de recolha dos fotoelectrões por parte do primeiro dínodo dependendo do ponto no fotocátodo onde o fotoelectrão é emitido. Apesar do eléctrodos que seguem o fotocátodo estarem preparados para coletar e direccionar os electrões produzidos com eficiência, alguns electrões podem perder-se nos processos de foco e de multiplicação dependendo da sua posição em relação aos componentes do tubo fotomultiplicador. Em geral, a uniformidade do fotocátodo diminui com o aumento do comprimento de onda, principalmente quando se chega perto dos comprimentos de onda limite. A uniformidade diminui também em função da energia cinética do fotoelectrão emitido já que é muito mais fácil encaminhar um electrão lento do que um com uma energia cinética elevada. A uniformidade também pode sofrer alterações caso a tensão aplicada seja muito baixa, já que esta situação corresponderia a uma perda de eficiência na coleção de electrões por parte dos dínodos [7].

Normalmente os tubos fotomultiplicadores do tipo *Head-On* têm melhor uniformidade espacial. A boa uniformidade do fotocátodo dos fotomultiplicadores usados em câmaras gama é muito importante pois a uniformidade da imagem é um fator decisivo na performance do sistema.

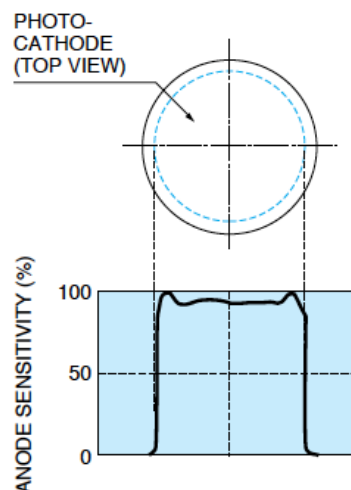


Figura 2.15: Exemplo de Uniformidade Espacial de um tubo *Head-On* [7]

2.5.6 Efeitos da Temperatura

Como foi explicado anteriormente, a diminuição da temperatura do tubo fotomultiplicador leva á diminuição da *dark current* criada pela emissão termiónica. A sensibilidade do fotomultiplicador também varia com a temperatura. Entre as regiões do ultravioleta e do visível, o coeficiente térmico de sensibilidade toma normalmente um valor negativo, enquanto perto do comprimento de onda máximo permitido toma um valor positivo. No caso da variação da sensibilidade do fotomultiplicador ser muito grande é necessário o controle da temperatura do tubo durante a sua operação de modo a obter resultados coerentes. Na figura 2.16 representam-se os coeficientes térmicos para diferentes materiais do fotocátodo em relação ao comprimento de onda [7].

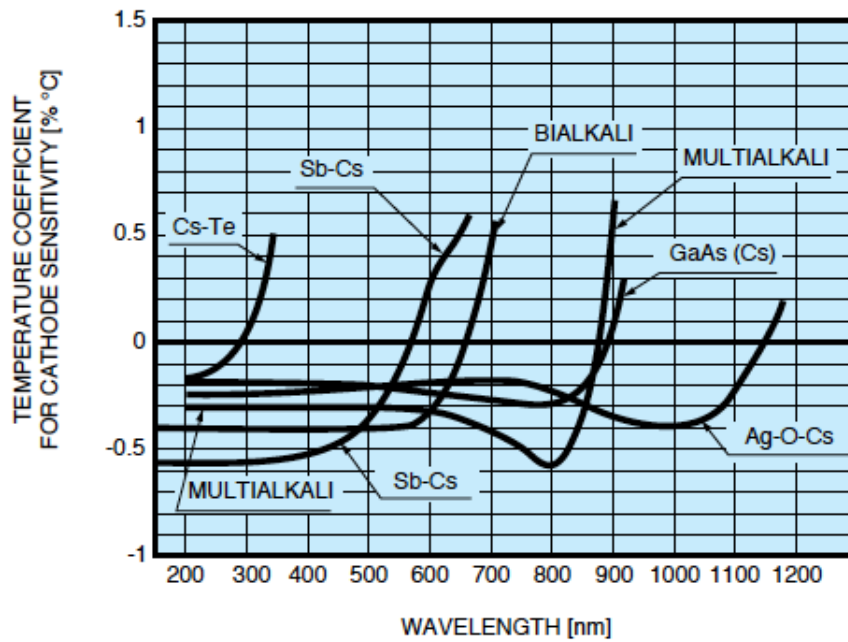


Figura 2.16: Coeficientes de temperatura para diferentes materiais [7]

Capítulo 3

Câmara e PMT em estudo

3.1 Câmara

A câmara em estudo nesta tese foi uma *XR Autotune Image Detector* produzida pela empresa GE Healthcare. O prefixo 'XR' indica que a câmara contém um detetor digital e retangular [9]. Na figura 3.1 é possível ver a câmara em questão e na figura 3.2 uma representação desta com os seus componentes legendados. Esta câmara é constituída por um **detetor**, onde os fotões gama são absorvidos e são formados os sinais de posição e de energia, um *gantry*, nome dado à parte do sistema que permite mover o detetor, incluindo o contra-peso, um **módulo de interface** e um **computador de aquisição**, onde é possível observar os resultados dos exames feitos e ainda verificar qualquer parâmetro técnico relativo ao detetor.



Figura 3.1: Fotografia da Câmara XR

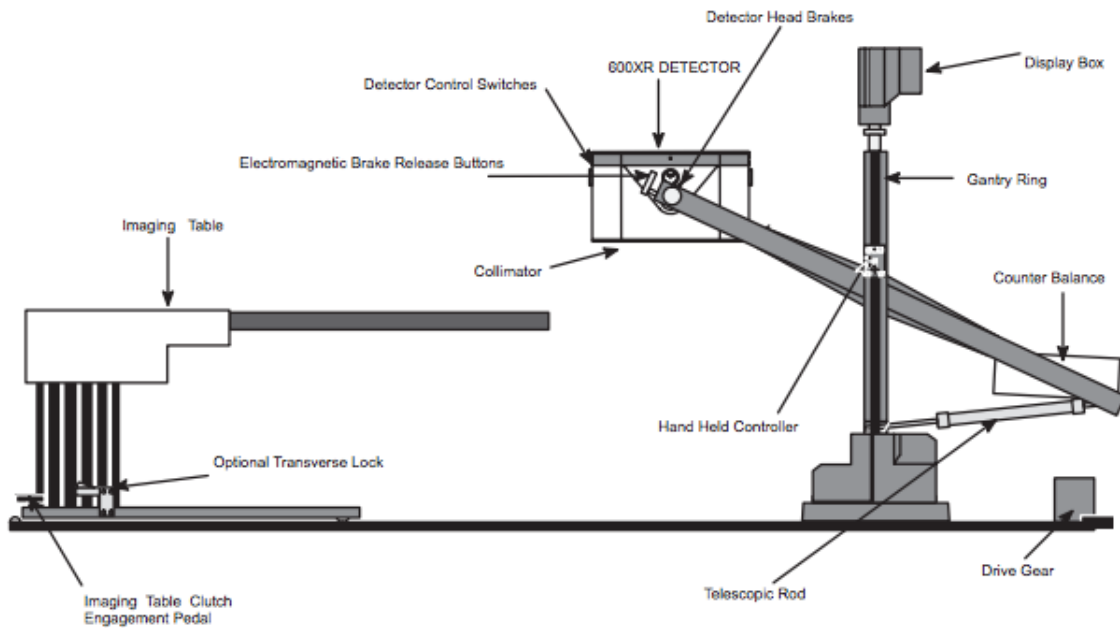


Figura 3.2: Ilustração da Câmara XR com os seus componentes [9]

A câmara XR tem como principais funções [9]:

- Detecção de *eventos* provenientes de radioisótopos.
- Produção de sinais que representem a posição e energia de ditos eventos.
- Memorização de valores de ajuste e monitorização do estado e possíveis falhas no hardware do detetor, incluindo fotomultiplicadores.
- Correção dinâmica da linearidade dos sinais de posição obtidos.
- Comunicação com o utilizador.
- Interpretação dos comandos do utilizador
- Alimentação de todo o sistema e respetivo controlo.

O detetor é o elemento mais importante de todo o sistema já que é neste que se processa a recolha da radiação e a sua transformação num sinal digital. Na figura 3.3 é apresentado um diagrama do detetor com os elementos que o constituem.

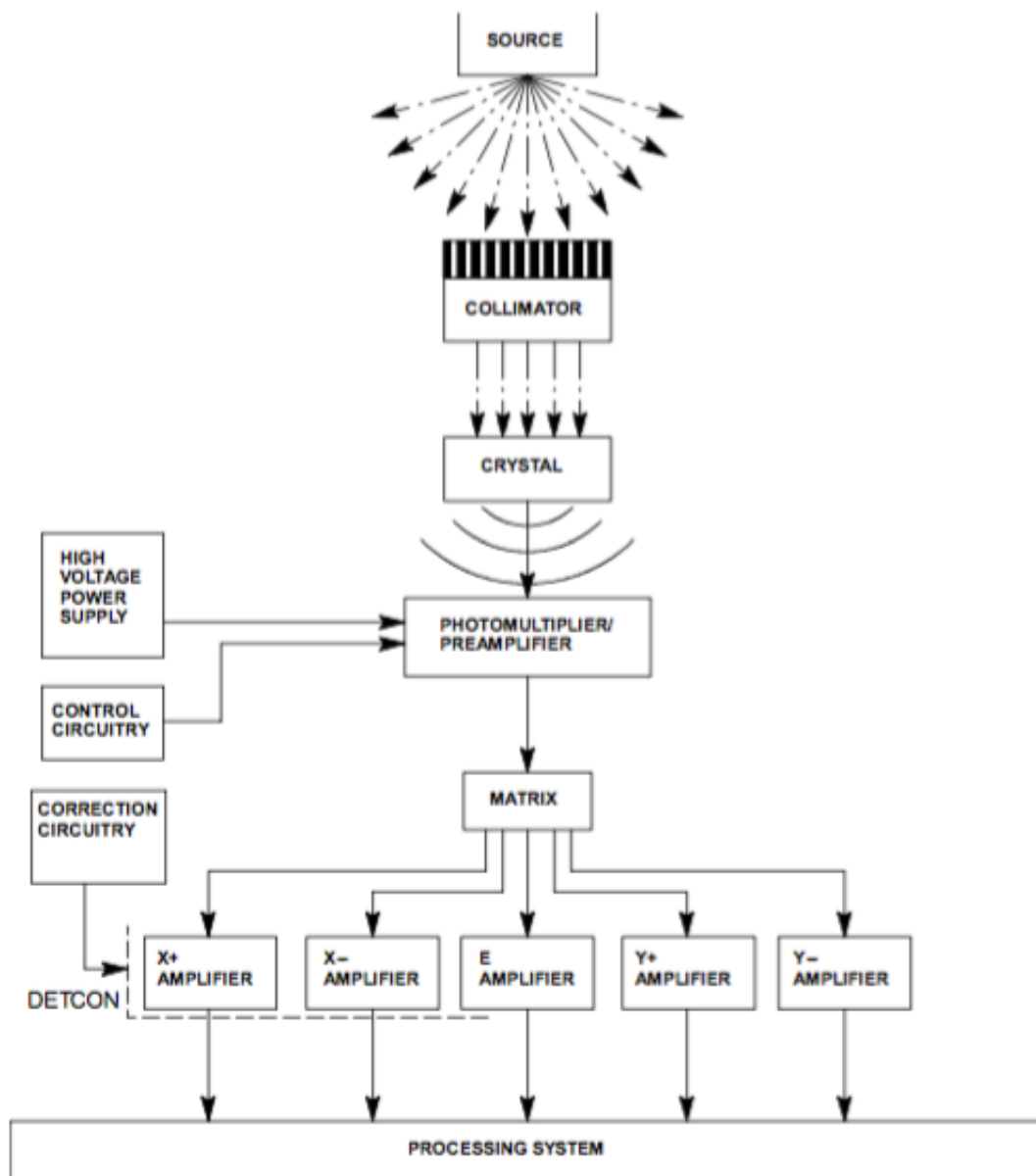


Figura 3.3: Diagrama do Detetor [9]

Os principais elementos do Detetor são:

- Colimador - Existem vários tipos de colimadores disponíveis para este detetor. O colimador é encaixado por baixo do cristal e a sua função é atingir uma correlação entre a emissão de raios gama do radioisótopo e a posição dos raios gama que atingem o cristal.
- Cristal de Iodeto de Sódio (NaI(TI)) - Este cristal é mantido num revestimento retangular de alumínio e chumbo.
- Fotomultiplicadores e respetivas Placas Pré-Amplificadoras - Localizados acima do cristal estão 91 PMTs hexagonais em que cada um está ligado ao seu pré-amplificador correspondente. Estas placas pré-amplificadoras têm como funções (1) a amplificação do sinal de saída do fotomultiplicador, (2) o controlo e ajuste automático do ganho, (3) uma driver para um LED associado à função de ajuste automático, (4) lógica para a operação de "Daisy-chain" do detetor, (5)

um circuito *sample-and-hold* para guardar tensões de ajuste e finalmente (6) monitorização de falhas no fotomultiplicador.

- *Matrix Board* - Esta *Matrix Board* contém um conjunto de quatro resistências e um diodo por cada fotomultiplicador do sistema. As resistências dividem o sinal de saída do PMT de modo a fornecer os sinais X_+ , X_- , Y_+ e Y_- ao *Detector Controller* enquanto que o diodo está inserido no circuito de correção dinâmica de linearidade. Este circuito de correção é utilizado para melhorar a linearidade espacial, isto é, utiliza a energia dos sinais obtidos para garantir a posição correta do evento. Na figura 3.4 é possível observar a *Matrix Board* completa com os cabos que saem das placas pré-amplificadoras. Na figura 3.5 é apresentada uma imagem com mais pormenor onde é possível ver as resistências em que dividem o sinal de saída para a reconstrução da posição. De notar que os valores das resistências são diferentes para cada localização [9].



Figura 3.4: Fotografia da *Matrix Board* da Câmara XR

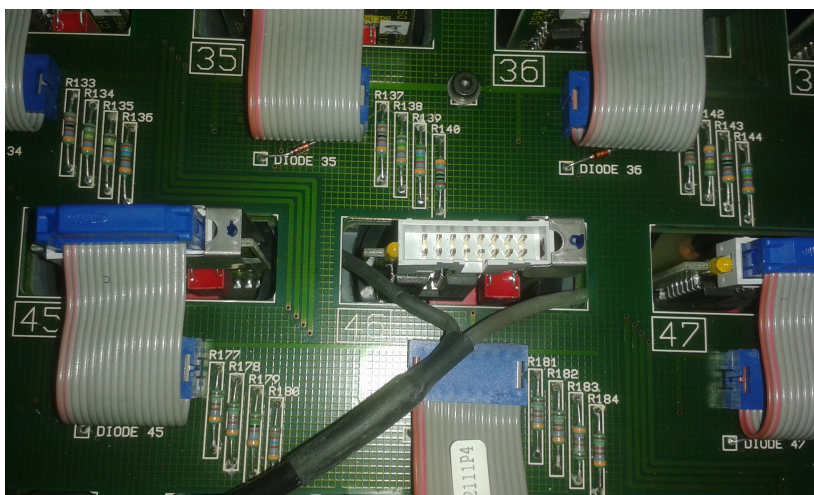


Figura 3.5: Fotografia com mais pormenor da *Matrix Board* da Câmara XR

- Placa de Alta Tensão - Esta placa está localizada entre os fotomultiplicadores e a *Matrix Board*. Na localização de cada PMT tem dois blocos de carbono que são pressionados contra os pinos com molas que transportam a alta tensão para os fotomultiplicadores.

- *Detector Controller* - O "Controlador do Detetor"(Figura 3.6) tem todos os circuitos e software necessários para controlar, monitorizar e comunicar funções em todo o sistema. Uma das maiores vantagens deste sistema é a possibilidade de guardar parâmetros pré-estabelecidos no software que controlam todos os ajustes eletrónicos necessários. Além do ganho de cada fotomultiplicador, este centro permite o ajuste da alta tensão, da duração do pulso do LED e ainda controla os circuitos de correção e os circuitos X,Y e E a partir do software [9].



Figura 3.6: Fotografia do detetor aberto com o circuito do DETCON da Câmara XR

- Fontes de Alimentação - As fontes de alimentação necessárias para este sistema são as seguintes, **(1)** +5V para o *Detector Controller*, **(2)** Alta Tensão (entre -1150 e -1750V) para os PMTs, e **(3)** +35V, +22.5V, +5V e -7.5V para alimentar a placa pré-amplificadora do PMT.

O detetor desta câmara XR funciona praticamente da mesma maneira que um detetor AC (Analógico) mas com algumas diferenças. Em primeiro lugar, a configuração do ganho de cada fotomultiplicador é controlada pelo Centro de Controlo do sistema por via de software, ao contrário do detetor AC em que cada fotomultiplicador tem um potenciómetro incluído para alterar o seu respetivo ganho. Em segundo, e completando o ponto anterior, todos os ajustes no detetor são controlados por software sem a necessidade de recorrer a potenciómetros. Finalmente, a terceiro e última diferença é referente à calibração do sistema que é feita para todas as energias de uma vez, ao contrário da sua antecessora cuja calibração tinha de ser feita primeiro para baixas energias e depois para altas energias.

3.2 PMT

Uma das maiores dificuldades encontradas no decorrer desta tese foi o facto de não existirem datasheets sobre o fotomultiplicador em estudo. Na figura 3.7 encontra-se o PMT estudado nesta tese.

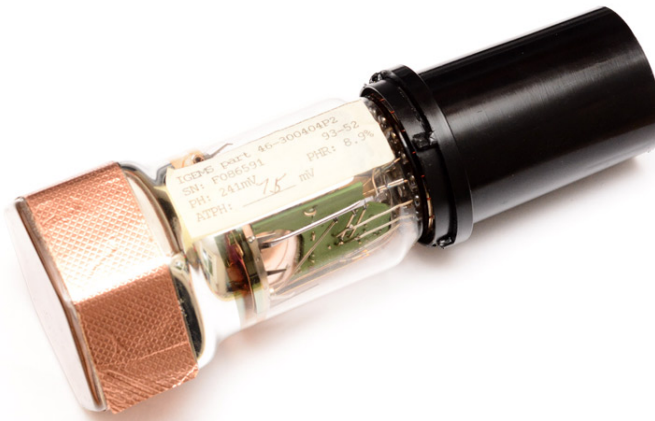


Figura 3.7: PMT em estudo [10]

Apesar de não existir nenhuma informação sobre *pin-outs*, eficiência quântica ou qualquer característica do PMT, existe um circuito geral obtido a partir do manual da câmara gama e o circuito da respetiva placa pré-amplificadora. No lado esquerdo da figura 3.8 é apresentado o PMT sem a proteção de plástico, onde é possível ver as duas bases onde assentam os pinos com molas que conectam a terra e a alta tensão, tal como o conector com 6 pinos. No lado direito está o PMT aberto para possibilitar a visualização dos dínodos. Esta desconstrução do PMT foi feita em [10].



Figura 3.8: PMT aberto [10]

A partir da secção 2.4 é possível concluir que se trata de um multiplicador do tipo híbrido pois não se encontra bem na categoria de multiplicador circular ou de caixa mas sim uma mistura dos dois. A partir da observação da estrutura, dimensões e pinout do PMT, e ainda algumas indicações indiretas, foi possível identificar o fabricante (Burle) e por conseguinte uma datasheet de um fotomultiplicador muito parecido (PMT S83020F). Esta datasheet encontra-se no Anexo A e durante esta tese será utilizada como termo de comparação para valores medidos ou conclusões tiradas.

3.2.1 Divisor de tensão

O divisor de tensão apresentado na figura 3.9 é o circuito fornecido no manual da câmara gama em estudo.

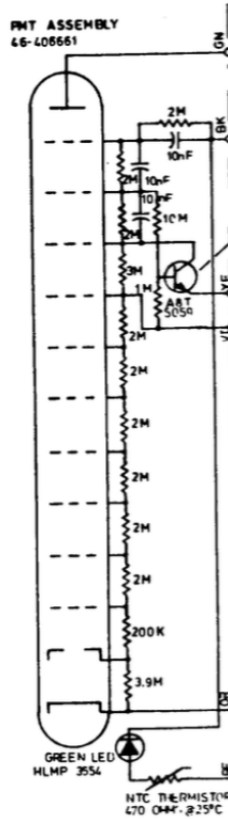


Figura 3.9: Divisor de tensão do PMT [9]

Para confirmar que se trata do circuito real do fotomultiplicador e qual o pinout deste, foram medidas as resistências entre o pino de alta tensão (HV), o pino da terra (Ground) e os 6 diferentes pinos do conector para dois PMTs diferentes. Os resultados destas medições estão apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Tabelas com resistências de dois PMTs diferentes (OC representa circuito aberto, *Open Circuit*)

PMT 1	HV	Ground	PMT 2	HV	Ground
1	OC	OC	1	OC	OC
2	21,38 MΩ	0,8 Ω	2	22,03 MΩ	0,8 Ω
3	OC	OC	3	OC	OC
4	OC	OC	4	OC	OC
5	15,89 MΩ	6,49 MΩ	5	17,30 MΩ	6,51 MΩ
6	13,44 MΩ	7,14MΩ	6	14,66 MΩ	7,17MΩ

Ao medir a resistência entre o pino de alta tensão e o pino do ground em ambos os fotomultiplicadores obteve-se um valor de cerca de 22 MΩ, confirmando assim que se trata do circuito em questão já que a soma das resistências do circuito dá um valor bastante próximo, 23 MΩ. Desta forma também foi possível concluir que os dois últimos dínodos do PMT, apesar de serem controlados pelo circuito de ajuste de ganho

da placa pré-amplificadora a partir da alteração das suas respectivas resistências (ver secção seguinte), funcionam na capacidade máxima caso não existam indicações em contrário. Por fim, chega-se à conclusão que para a medição do ganho máximo real do PMT é necessário que não existam outras correntes a passar pelo circuito de ajuste já que se quer que os últimos dois dínodos do fotomultiplicador funcionem no modo normal (*default*).

Outras duas conclusões foram retiradas desta tabela. Primeiro, o pino número 2 do conector é uma terra já que a resistência entre este e a alta tensão é igual à resistência medida entre o pino de alta tensão e o pino da terra e também porque a resistência medida entre este e a terra é de cerca de 1Ω , algo que irá facilitar a construção do sistema. A última conclusão a retirar é o facto de se saber agora que o sinal de saída do PMT será no pino 1, 3 ou 4 já que são os únicos sem ligação à alta tensão ou à terra. A partir do circuito da placa pré amplificadora, que se encontra no Anexo A, confirmam-se estas conclusões já que as entradas da placa mostram uma terra no pino 2 e a saída do sinal do PMT no pino 3.

A tensão aplicada a este PMT pode variar entre -1250 V e -1750 V e é aplicada no fotocátodo.

3.2.2 Placa Pré-Amplificadora

Como foi referido na secção 3.1, a câmara XR tem 91 PMTs e cada um deles inclui uma placa pré-amplificadora. Esta placa além de funcionar como um pré-amplificador tem elementos que permitem o ajuste automático do ganho do fotomultiplicador. O diagrama de blocos seguinte representa o funcionamento da placa de uma maneira simplificada, o circuito real está incluído no Anexo A.

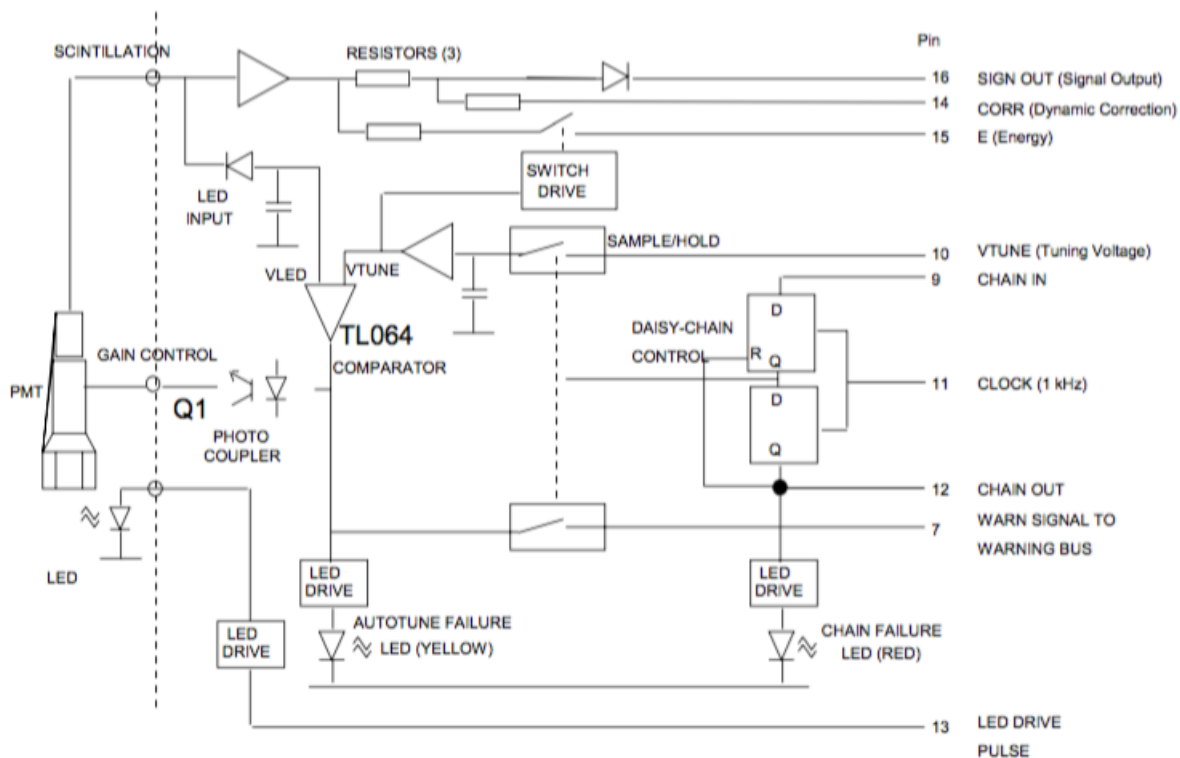


Figura 3.10: Diagrama da Placa Pré-Amplificadora [9]

Na figura 3.10 vê-se que o sinal de saída da placa passa por uma série de resistências antes de entrar na *Matrix Board*. O sinal de posição ou sinal espacial (SIGN OUT)

passa por uma resistência e um díodo antes de entrar na *Matrix Board*, enquanto que o sinal de energia (E) passa por uma resistência e por um interruptor antes de entrar num canal que soma as energias de todos os tubos. Este interruptor é controlado pela tensão de ajuste (VTUNE) que caso esteja acima dos 3V (a gama normal de ajuste é negativa) é desligado e não permite a soma deste sinal. O sinal de correção (CORR) é gerado pelo DETCON e é recebido por cada placa. Existem ainda 2 LEDs imbutidos na placa, 1 vermelho que caso esteja ligado indica uma falha no circuito "daisy-chain" e 1 amarelo que caso esteja ligado indica uma falha no ajuste automático do ganho do PMT.

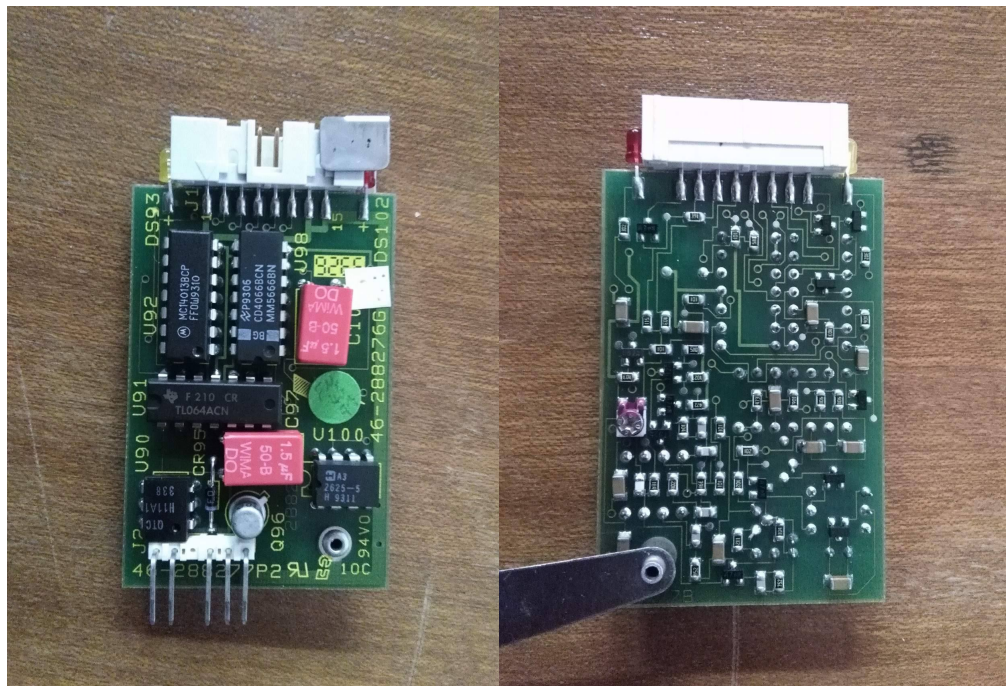


Figura 3.11: Placa Pré-Amplificadora

A função fundamental desta placa é amplificar o sinal obtido do fotomultiplicador. O **circuito principal de ganho** é um amplificador de transresistência inverso, ou seja, transforma corrente negativa fornecida pelo fotomultiplicador num sinal de tensão positivo. O amplificador consiste num amplificador operacional HA2625 e 3 transístores, 2 dos quais são coletores comuns e o terceiro proporciona um ganho de 200 em tensão. O sinal de saída do amplificador operacional HA2625 é uma tensão positiva de cerca de +5V em condições normais (sem cintilação).

Os coletores comuns são considerados fontes de tensão ideais e levam a corrente para o canal de energia que é diretamente proporcional à corrente de entrada da placa pré-amplificadora.

Existe ainda um díodo no caminho do sinal espacial antes do transístor. Este tem a função de evitar o contributo da *dark current* e de pequenos sinais criados por cintilações localizadas longe do tubo no sinal de posição.

A corrente de saída do fotomultiplicador varia com o isótopo utilizado, mas o máximo é cerca de -160 mA [9]. A tensão máxima à saída da placa é cerca de 30V[9].

A partir do circuito da figura 3.9, e como foi referido anteriormente, é possível perceber que os valores das duas resistências referentes aos dois últimos dínodos do PMT podem ser alterados. Desta forma, a alteração do valor das resistências implica uma alteração do ganho referente ao respetivo dínodo e por consequência uma alteração do ganho do PMT. A parte do circuito da placa que controla estas

resistências é o **circuito de controlo**. Cada placa tem um circuito que ajusta automaticamente o ganho do seu fotomultiplicador, algo que é fundamental para garantir uma boa performance do detetor. Esta parte do circuito funciona num ciclo fechado em que começa por medir a tensão de saída do PMT em resposta a um evento de luz conhecido (o pulso do LED que se encontra dentro do PMT, VLED), compara esta tensão com um valor pré definido (VTUNE) e por fim ajusta a condutividade do transístor Q1 de modo a alterar a tensão de saída do PMT até ir ao encontro do valor pré definido. Como o pulso do LED tem uma amplitude muito maior que qualquer sinal de radiação, a placa pré-amplificadora satura e dá uma resposta plana. Desta forma garante-se que apenas o pulso do LED irá afetar esta parte do circuito.

Nota: O PMT na realidade só recebe 50% da luz do seu próprio LED, os outros 50% são dos LEDs dos PMTs à sua volta. Este método de ajuste automático apenas funciona na câmara gama dado que necessita dos outros LEDs à sua volta [9].

Por fim, a operação de *Daisy-Chain* é o processo pelo qual o sistema mantém os ganhos dos fotomultiplicadores atualizados. Isto é, o sistema DETCON tem um ciclo controlado por um *clock* que envia um sinal para o primeiro PMT e regista o ganho deste, caso este não esteja de acordo com os valores pré definidos a placa pré-amplificador inicia o circuito de ajuste automático. O sinal enviado para o primeiro fotomultiplicador passa então deste para o segundo e volta a repetir o processo até voltar ao DETCON [9].

3.2.3 Valores e Sinais Esperados

Nas figuras 3.12 e 3.13 estão representadas as respostas do PMT em estudo a um radioisótopo e a um LED respetivamente. As características mais importantes a retirar destes sinais são: a tensão de pico, a largura do pulso e o tempo de decaimento do sinal já que serão estes os parâmetros que se tentarão simular para obter uma resposta o mais fiel possível à realidade dentro da câmara. Na primeira figura o pulso tem um pico com cerca de 250 mV, uma largura de pulso de 1 μ s e um tempo de decaimento perto de 0,8 μ s. Na segunda figura observa-se um pulso com um pico muito maior, perto de 5 V, com uma largura de pulso um pouco maior que 1 μ s e um tempo de decaimento de 0,6 μ s.

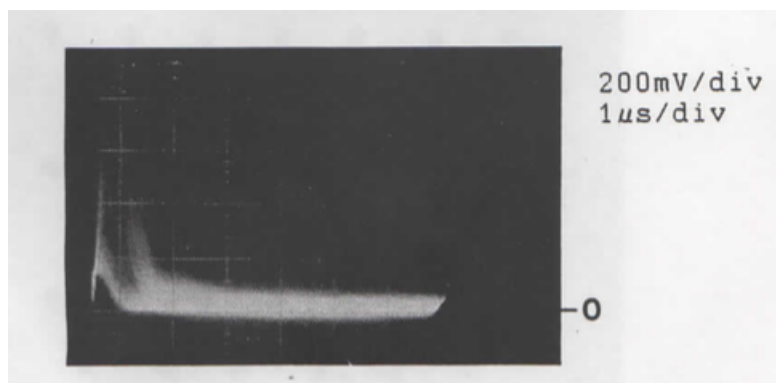


Figura 3.12: Resposta típica do PMT a radiação gama de uma fonte de Tecnécio-99m [9]

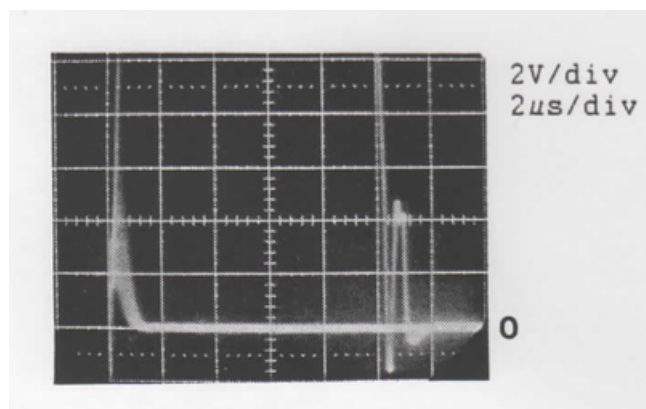


Figura 3.13: Resposta típica do PMT a um LED [9]

Como foi referido na secção "Circuito", não existem datasheets nem valores esperados para o ganho destes fotomultiplicadores. Para contornar esta falta de informação, os valores obtidos no decurso deste projeto serão comparados com a datasheet do PMT S83020F da Burle que se encontra no Anexo A e com os ganhos estipulados de PMTs conhecidos, apresentados na tabela 3.2. Os valores utilizados para a comparação serão os ganhos máximos já que a gama de tensões para o qual cada PMT funciona é diferente e desta forma garante-se uma comparação mais razoável.

Tabela 3.2: Ganhos máximos de alguns PMTs existentes no mercado

PMT	Ganho Máximo
Eletron 9205KB	0.6×10^6
Burle S83020F	1.8×10^6
Hamamatsu R10601	8.0×10^5
Hamamatsu R1924A	1.0×10^7
Hamamatsu R13478	1.0×10^6

Capítulo 4

Sistema/Instrumentação

4.1 Desenho Mecânico

Para a avaliação dos fotomultiplicadores, foi necessário criar um ambiente que permitisse trabalhar com os PMTs sem influências externas. Com este objetivo em mente foi aproveitada uma caixa negra de outro projeto (caixa de PVC com 2cm de espessura em todos os lados, com conetores coaxiais LEMO 50Ω e alta tensão nas laterais) e foi construída uma base em PVC de modo a permitir alterações à mesma sem alterar a caixa em si. Nas figuras 4.1 e 4.2 está representada a planta da montagem e nas figuras 4.3 e 4.4 a montagem final. Esta montagem consiste numa placa de 15 cm por 60 cm com 1 apoio em cada canto, 4 braçadeiras de metal revestidas em borracha para isolamento e estabilidade, 1 tubo revestido a fita preta onde encaixa o LED para evitar reflexões, 1 filtro de luz com uma fenda, 1 peça de encaixe que permite a condução da alta tensão para o PMT e finalmente 1 fresta para permitir que a peça de encaixe se desloque para a frente e para trás.

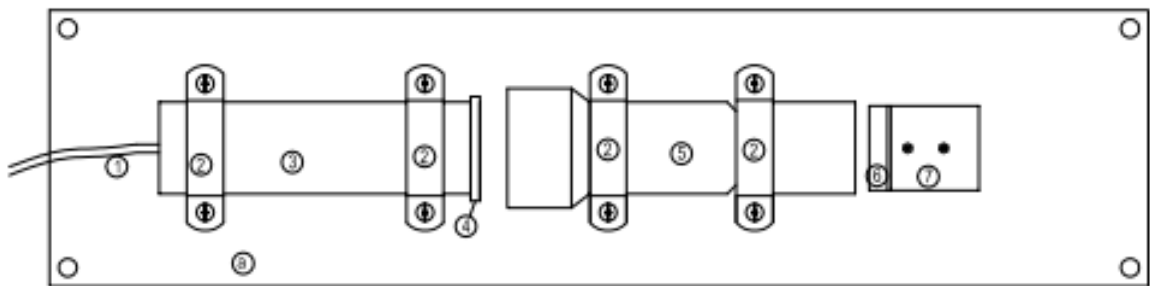


Figura 4.1: Planta da Sistema com (1) LED, (2) Braçadeiras, (3) Rolo Preto, (4) Filtro de luz, (5) PMT, (6) Peça de Encaixe para alimentação (parte de PVC), (7) Peça de Encaixe (parte de metal), (8) Base em PVC

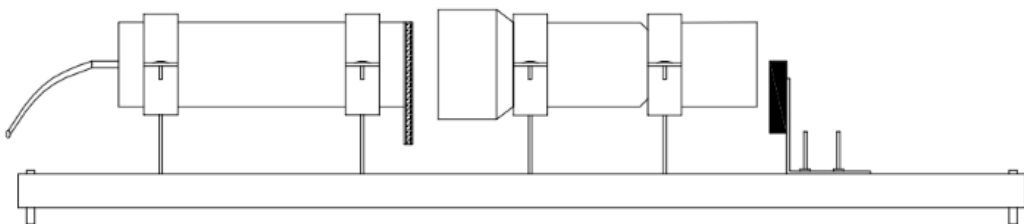


Figura 4.2: Planta lateral

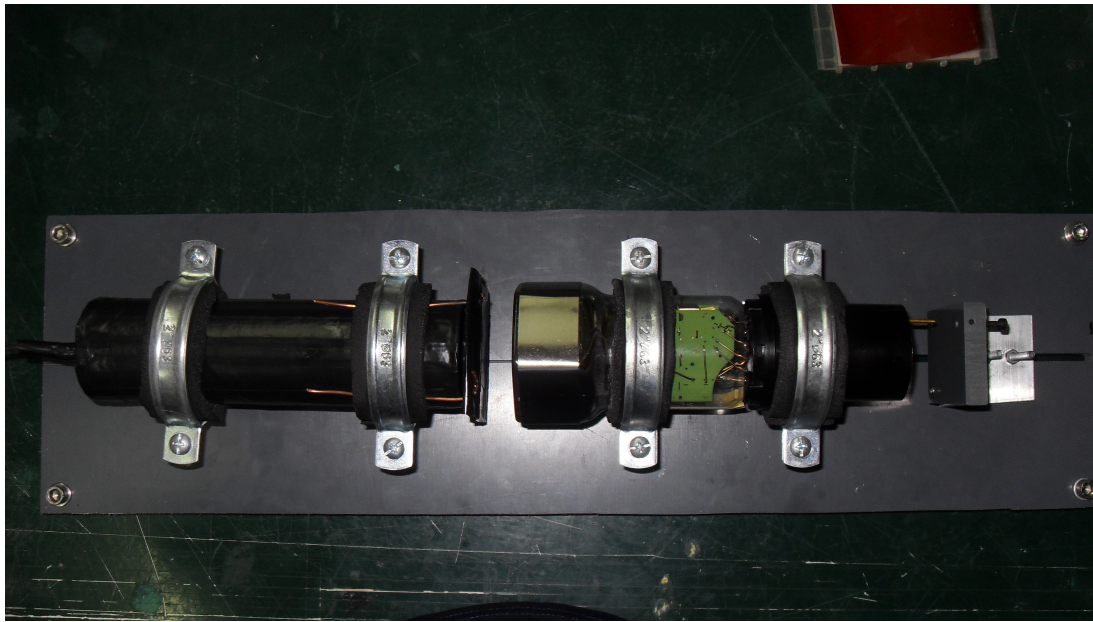


Figura 4.3: Montagem final, vista de cima

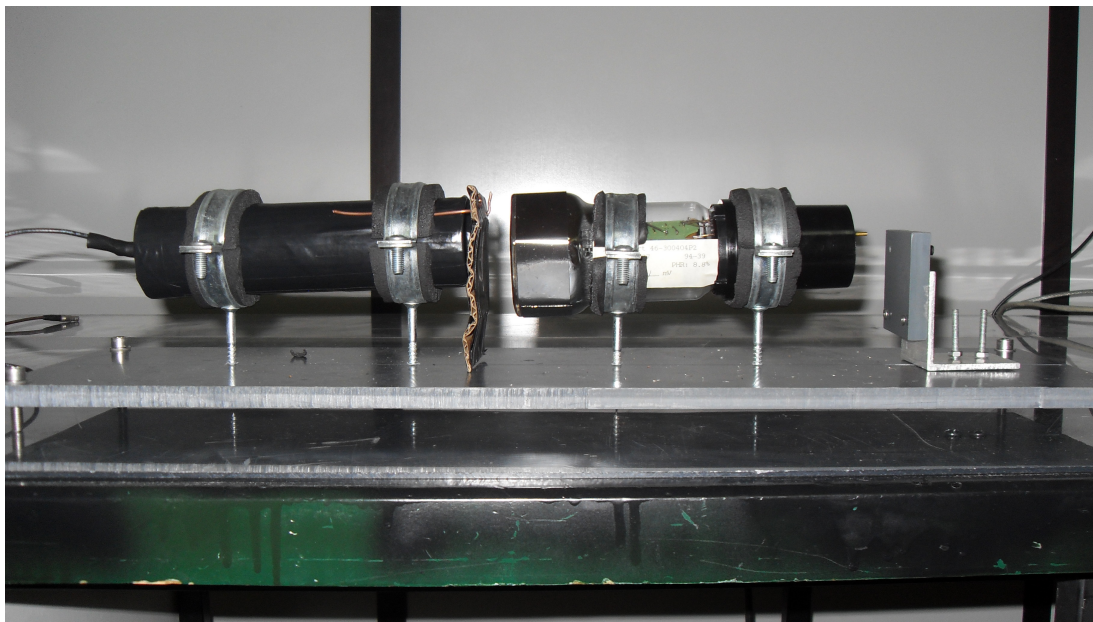


Figura 4.4: Montagem final, vista de lado

Uma das maiores dificuldades encontradas durante o curso deste projeto foi o facto da alta tensão ser aplicada no PMT por pinos com molas. Isto é, para que exista alta tensão no PMT o pino correspondente tem de ser empurrado até a mola dentro deste fazer contacto com ambas as extremidades do pino. A solução encontrada foi a peça de encaixe apresentada na figura 4.5, esta é constituída por uma placa de metal dobrada em L com dois parafusos para a manter na direção correta e prender a peça no sítio certo. Para manter pressão no pino e aplicar a alta tensão neste decidiu-se utilizar uma placa de PVC com dois furos, um para o pino e outro para o cabo de alta tensão. Para manter este projeto com um custo mais baixo possível, todas as peças foram feitas a partir de material em excedente nas oficinas do LIP (Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas) no Departamento de Física da Universidade de Coimbra.

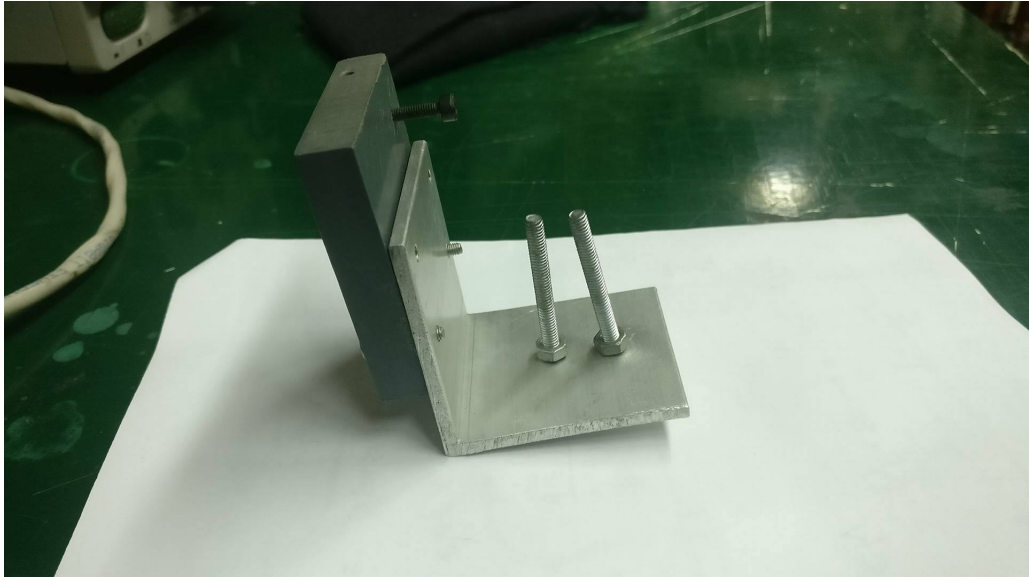


Figura 4.5: Peça de encaixe

4.2 Eletrônica

Neste trabalho, os fotomultiplicadores foram testados de duas maneiras diferentes, o PMT sozinho e o PMT com a placa pré-amplificadora da câmara. Esta abordagem permite localizar eventuais problemas com o PMT ou com a placa pré-amplificadora. De modo a atingir os objetivos propostos, foram idealizadas 3 montagens diferentes. A primeira para determinar o ganho relativo dos fotomultiplicadores, a segunda para determinar o ganho relativo do conjunto PMT + Placa pré-amplificadora e por fim a terceira para determinar o ganho absoluto de um PMT.

Para a determinação do ganho relativo dos fotomultiplicadores foi decidido utilizar um método normalmente utilizado em espectroscopia. Este método consiste na iluminação do PMT com uma quantidade de luz conhecida seguida pela observação do sinal de saída do PMT depois da sua amplificação. Na figura 4.6 está representado o esquema do circuito elétrico utilizado. Este circuito consiste num gerador de impulsos TGP110, um LED, um PMT, um pré-amplificador Canberra 2005, um amplificador Canberra 2022 e um Osciloscópio Tektronix TDS7104 com uma impedância de entrada de $1\text{ M}\Omega$. Nesta montagem, utilizou-se o fotomultiplicador com o divisor de tensão apresentado figura 3.9, mas sem o circuito eletrónico desta. Como tal, isto obrigou a adicionar uma resistência de $1.8\text{ k}\Omega$ entre o ânodo e a terra (*load resistor*) para fechar o circuito de alimentação do fotomultiplicador e possibilitar a observação do sinal do ânodo nas condições próximas das do funcionamento normal (i.e. na câmara).

Foi ainda necessário adicionar uma resistência $3,3\text{ k}\Omega$ à entrada do LED para facilitar o ajuste da quantidade de luz emitida. O LED utilizado é um LED de 3mm com um comprimento de onda de 420 nm (azul). Vários pré-amplificadores e amplificadores foram testados neste sistema mas nenhuns apresentaram sinais tão bons como os apresentados aqui.

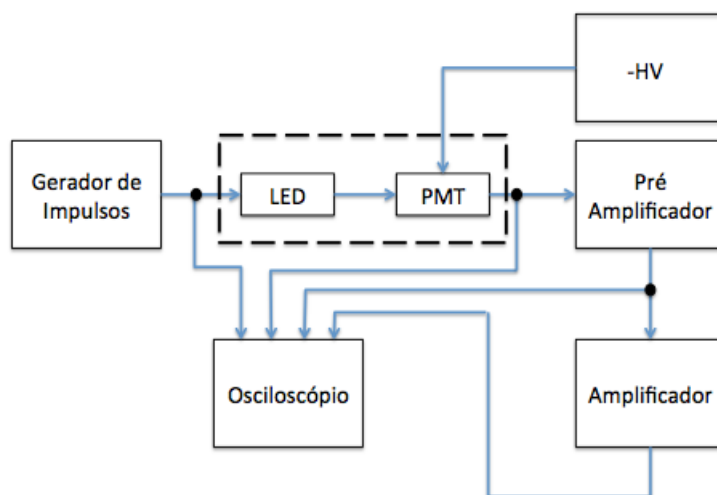


Figura 4.6: Esquema do circuito utilizado para determinar o ganho relativo dos PMTs

Neste sistema o pré-amplificador tem como função converter a carga negativa de saída do PMT num sinal de tensão positivo para que este seja depois amplificado no amplificador linear. Na figura 4.7 apresenta-se o sinal obtido no osciloscópio com o LED, sem filtro, alimentado com um impulso de 2,6 V de amplitude e uma largura de 1,4 μ s. A alta tensão aplicada no PMT é de -1500 V e o amplificador linear tem um ganho de 9 . O shaping time, definido no amplificador, nestes testes foi de 1 μ s para condizer com a duração do impulso do LED (e com o tempo de decaimento da cintilação do cristal NaI(Tl) na camara gama). No canal 1 (amarelo) está o sinal fornecido pelo gerador de pulsos ao LED, é neste sinal que se faz o *Trigger* no osciloscópio. No canal 2 (azul) aparece o sinal de saída do PMT antes da sua entrada no pré-amplificador. No canal 3 (rosa) está o sinal à saída do pré-amplificador e finalmente no canal 4 (verde) está o sinal à saída do amplificador linear.

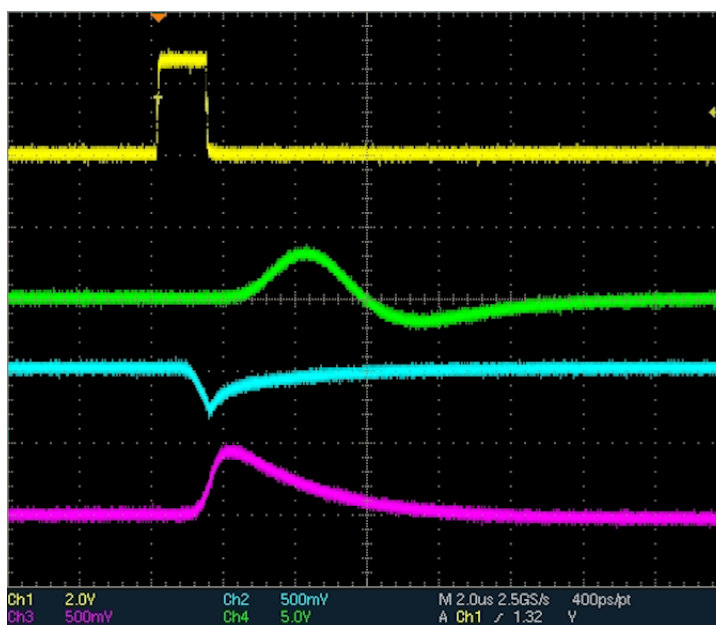


Figura 4.7: **Amarelo:** Sinal do gerador de impulsos TGP110 com 2.6 V de amplitude e 1.4 μ s de largura. **Verde:** Sinal à saída do amplificador. **Azul:** Sinal à saída do PMT. **Rosa:** Sinal à saída do pré-amplificador.

Na figura 4.7 percebe-se claramente as funções de cada um dos elementos do sistema no processamento do sinal. O pré amplificador além de transformar a carga do PMT em tensão funciona ainda como um amplificador para estes sinais fracos. Este elemento deve ser colocado o mais próximo possível da saída do PMT de modo a aumentar a relação de sinal-ruído antes da introdução de interferências no sistema [11]. O amplificador tem como função inserir o ganho no circuito e preservar ao máximo as características de interesse. De modo a manter estas características o amplificador precisa de preencher alguns requisitos. Primeiro, este tem de ser linear e manter uma relação de proporcionalidade entre a amplitude do pulso processado e a amplitude do pulso proveniente do detetor. Por fim, o amplificador tem ainda a função de otimizar a relação sinal-ruído ao limitar a largura de banda e reduzir também sobreposições nas taxas de contagens elevadas.

Na figura 4.8 está representado o circuito utilizado para fazer as medidas com a placa pré-amplificadora da própria câmara gama (ver Figuras 3.10 e 3.11). Como esta funciona como um pré-amplificador, já que polariza positivamente o sinal, e como um amplificador, o pré-amplificador e amplificador externos foram retirados do sistema. Todas as alimentações necessárias foram fornecidas para que os elementos da placa pudessem funcionar como na câmara. Durante os testes não serão utilizadas todas as funções da placa já que o objetivo é confirmar se a parte do circuito referente ao ganho está a funcionar corretamente. Para isso é necessário não ativar o circuito de ajuste automático, ao não colocar uma tensão de referência na entrada VTUNE da placa, ou o circuito de "Daisy-Chain", ao não enviar qualquer sinal pela entrada do circuito de "Daisy-Chain"(ver Figura 3.10 e Secção 3.2.2).

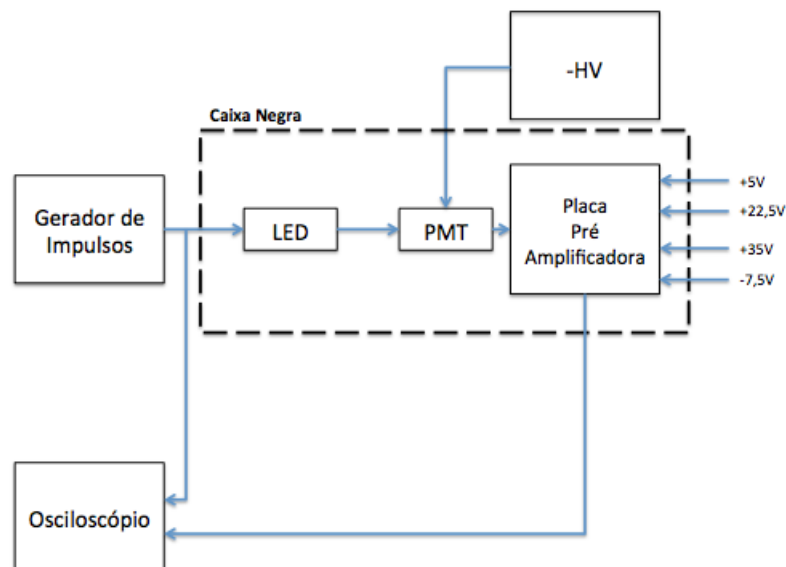


Figura 4.8: Esquema utilizado para determinar o ganho de um PMT em conjunto com a placa pré-amplificadora

O sinal obtido do PMT 12 com a placa pré-amplificadora 3, na sua saída E, está representado a azul na Figura 4.9. Este sinal foi obtido com a montagem apresentada na Figura 4.8, com o LED alimentado por um impulso com 3.5 V de amplitude e $1\mu\text{s}$ de largura (sinal amarelo).

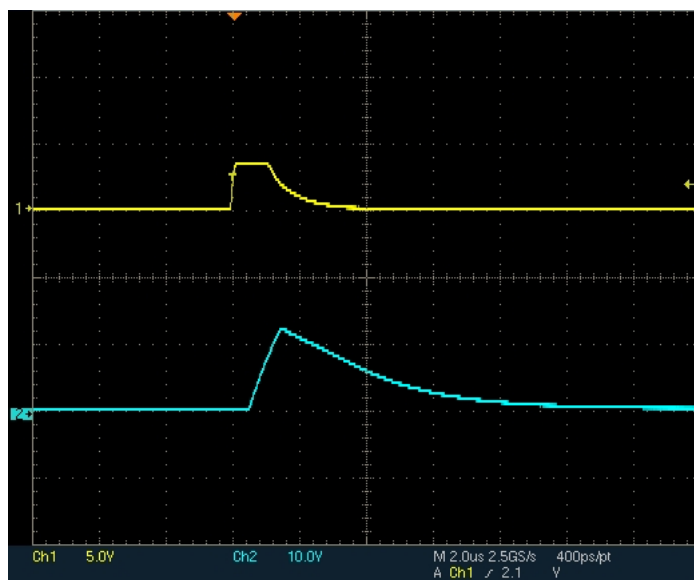


Figura 4.9: **Amarelo:** Sinal do gerador de impulsos Model PB-5 com 3.5 V de amplitude e $1\mu\text{s}$ de largura. **Azul:** Sinal à saída E da placa pré amplificadora número 3 com o PMT 12.

Na Figura 4.10 é apresentado, a azul, o sinal da saída E da placa pré-amplificadora 3 em conjunto com o PMT 12, e a rosa o sinal na entrada da placa pré-amplificadora. Repara-se imediatamente que o sinal à saída da placa pré-amplificadora é diferente do obtido na figura 4.9. Isto acontece porque é introduzida capacitância no circuito ao soldar um cabo à entrada da placa para conseguir obter o sinal.

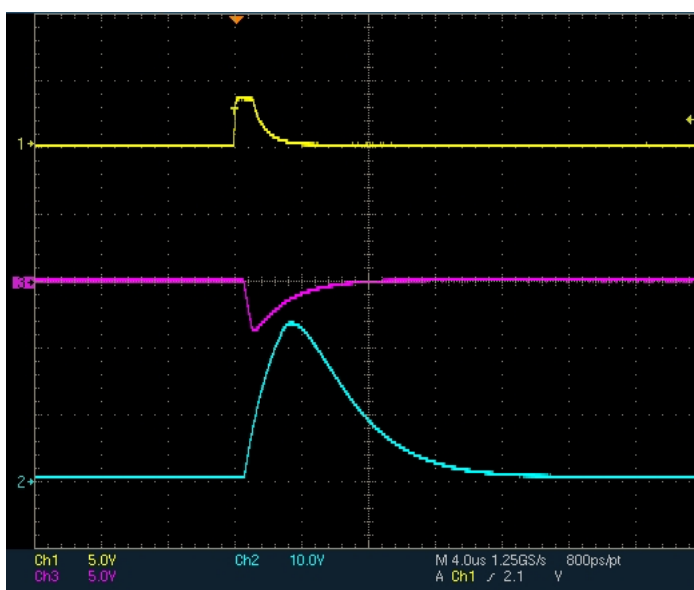


Figura 4.10: **Amarelo:** Sinal do gerador de impulsos Model PB-5 com 3.5 V de amplitude e $1\mu\text{s}$ de largura. **Azul:** Sinal à saída E da placa pré-amplificadora número 3 com o PMT 12. **Rosa:** Sinal na entrada da placa pré-amplificadora

Finalmente, na figura 4.11 está representado o esquema do circuito utilizado para obter o espectro de fóton único de um PMT. Trata-se de um circuito semelhante ao representado na figura 4.6 mas foi adicionado o multi-canal PGT 8000 e as ligações do circuito ao osciloscópio Tektronix TDS7104 foram retiradas para diminuir qualquer ruído proveniente de cabos ou conectores. A única ligação que se manteve ao osciloscópio foi a que se encontrava entre o gerador de impulsos Model PB-5 e o LED

para facilitar o controlo deste e porque esta não teria qualquer efeito no sinal de saída do fotomultiplicador. O multi-canal é o responsável pela digitalização do sinal, este quantifica a característica que traduz a energia do evento em causa, neste caso a amplitude do sinal.

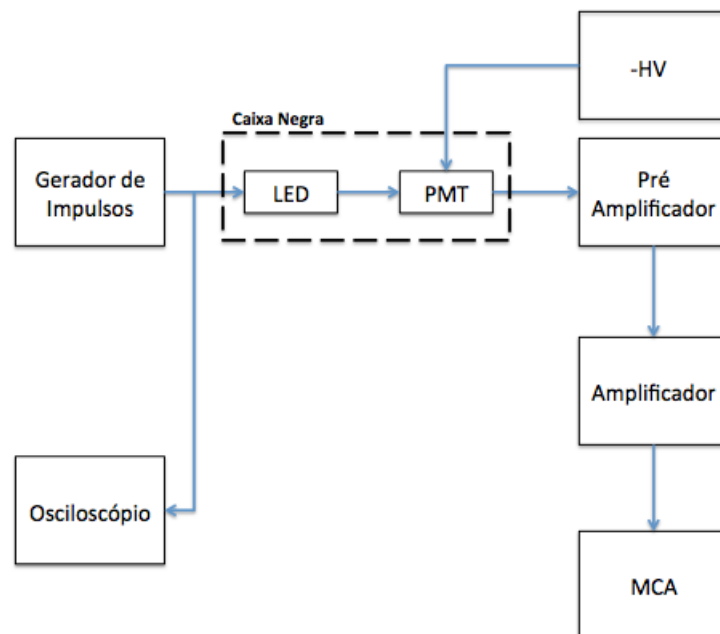


Figura 4.11: Esquema do circuito utilizado para determinar o ganho absoluto de um PMT a partir do espectro de fóton único obtido no multi-canal

4.3 Calibração

Para medir o ganho do PMT em teste, é necessário saber o ganho do sistema de modo a relacionar a carga à entrada do pré-amplificador com os valores apresentados no espectro do MCA. Com este objetivo em mente, foi utilizado o gerador de impulsos Model PB-5 para fornecer vários impulsos, com características bem definidas, diretamente na entrada de teste do pré-amplificador Canberra 2005. O espectro de calibração adquirido pelo MCA está representado na Figura 4.12. Os picos presentes neste espectro correspondem às diferentes amplitudes dos impulsos aplicados diretamente no pré-amplificador.

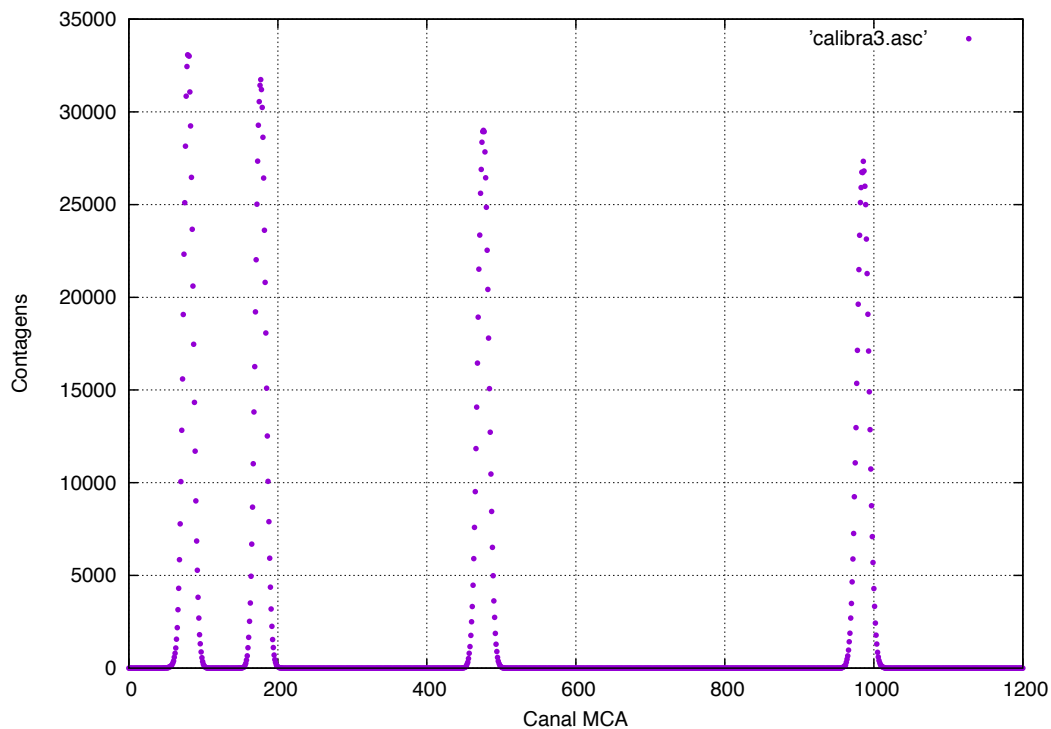


Figura 4.12: Espectro obtido no MCA com sinais de diferentes amplitudes à entrada de teste do pré-amplificador Canberra 2005

Em cada pico foi aplicado um ajuste com uma gaussiana para determinar o centróide de cada um e assim relacionar o canal apresentado no espectro com a amplitude do impulso aplicado. Nas figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 estão representados os picos com os respectivos ajustes.

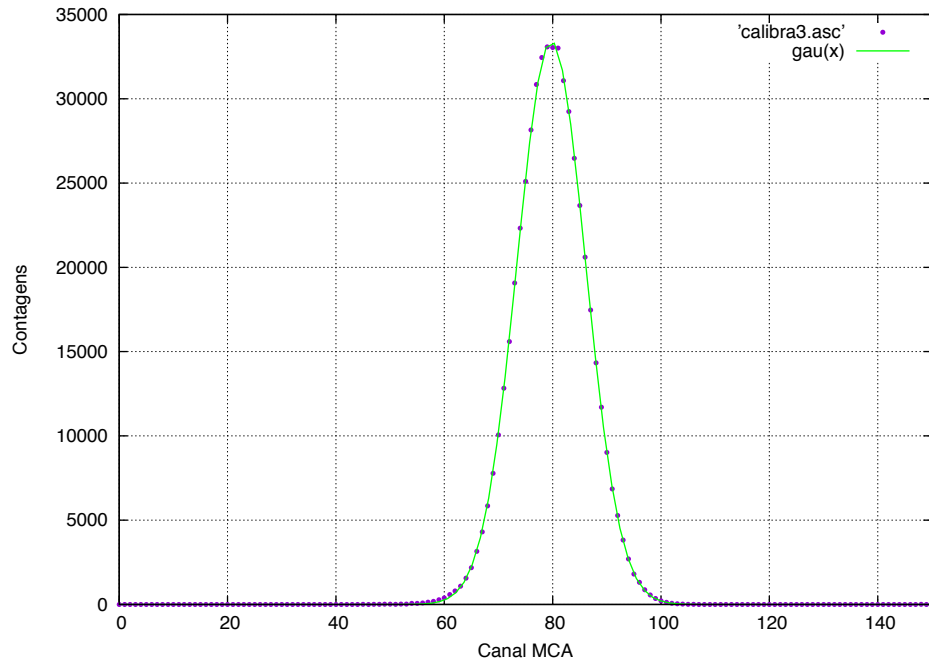


Figura 4.13: Ajuste do primeiro pico do espectro ao qual corresponde um pulso de 9.8 mV. Centróide: 79.75 ± 0.01 .

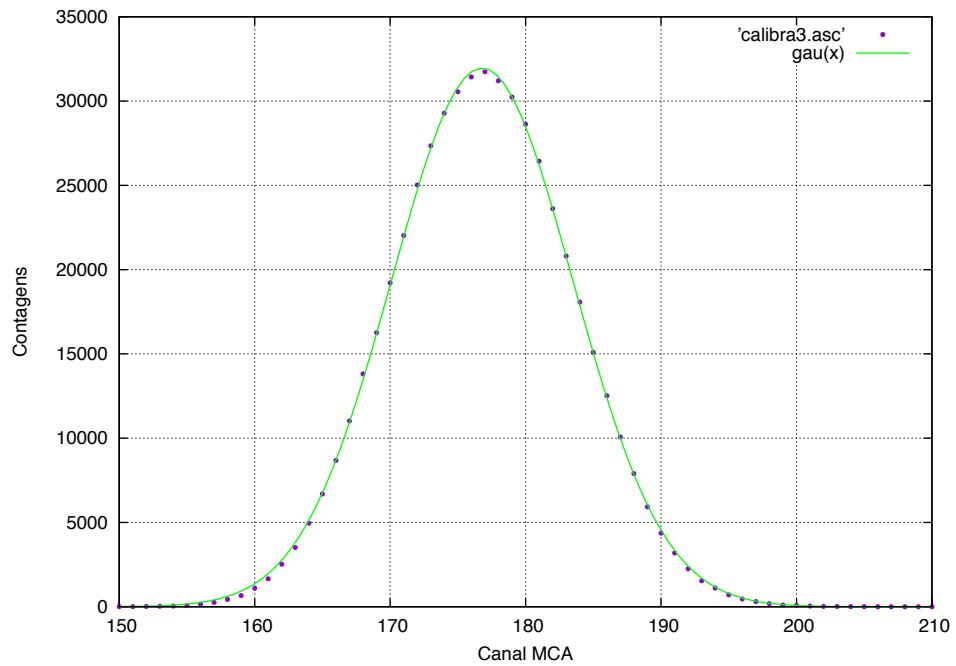


Figura 4.14: Ajuste do segundo pico do espectro ao qual corresponde um pulso de 19.6 mV. Centróide: 176.79 ± 0.02 .

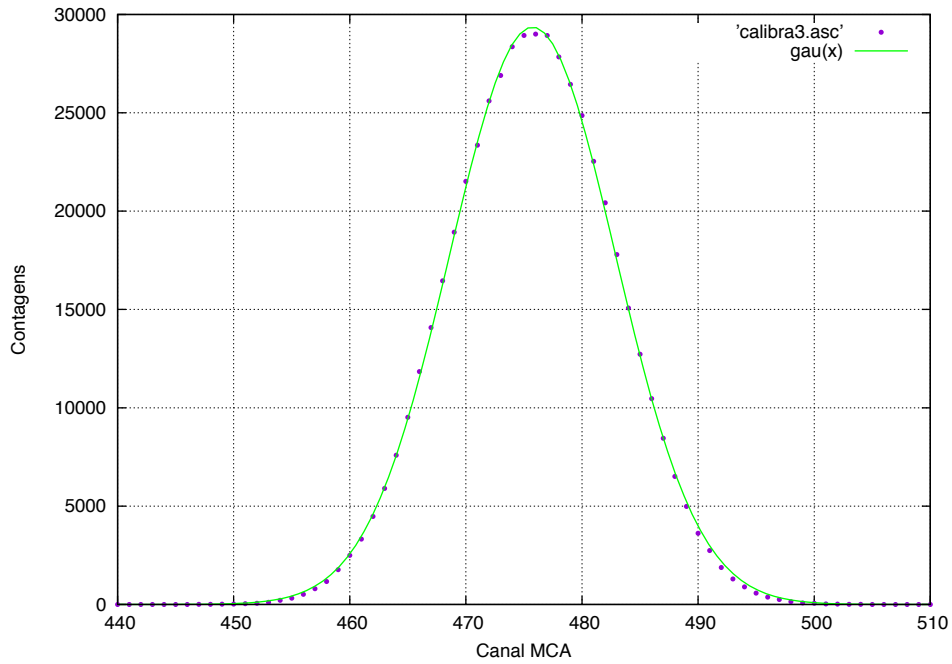


Figura 4.15: Ajuste do terceiro pico do espectro ao qual corresponde um pulso de 49 mV. Centróide: 475.74 ± 0.02 .

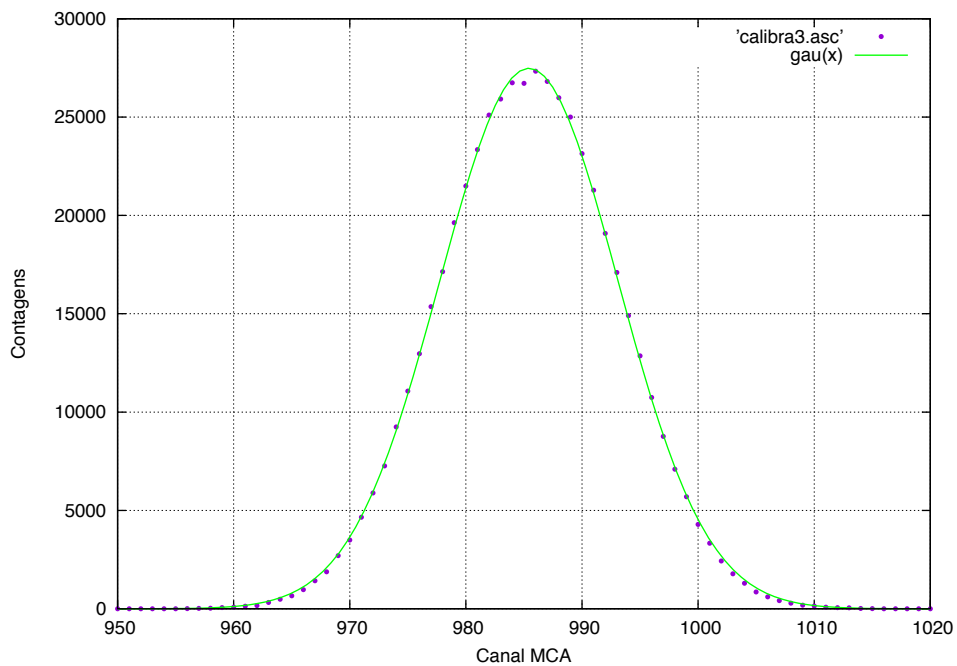


Figura 4.16: Ajuste do quarto pico do espectro ao qual corresponde um pulso de 98 mV. Centróide: 985.43 ± 0.03 .

A partir da datasheet do pré-amplificador Canberra 2005 sabe-se que este tem um condensador na entrada de teste com 33 pC/V. Esta relação permite transformar os valores de tensão aplicados pelo gerador de pulsos em carga e assim relacionar os centróides, encontrados com os ajustes anteriores, com a carga à entrada do pré-amplificador em cada caso. O resultado é a reta de calibração da figura 4.17.

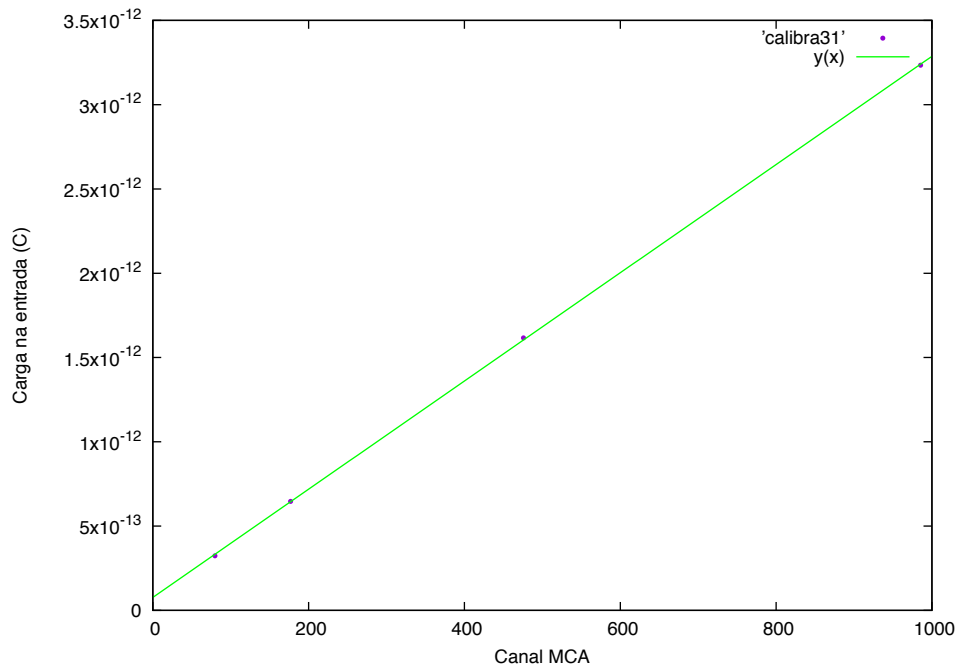


Figura 4.17: Reta de Calibração de Carga por Canal

Esta reta é definida pela equação $y = mx + b$ onde $m = (3.20981 \pm 0.017) \times 10^{-15}$ C/Canal e $b = (7.69118 \pm 0.97) \times 10^{-14}$ C

No Capítulo 5, "Testes e Resultados", esta reta será utilizada para relacionar a amplitude do impulso medida pelo espectro no MCA com a carga à saída do PMT e assim, pelo espectro de fotoelétrão único, determinar o ganho do fotomultiplicador. Esta reta apenas funciona para o ganho do sistema utilizado durante a calibração, ou seja, se o ganho do amplificador for alterado esta reta não poderá ser utilizada. Como tal, o ganho estabelecido no amplificador para fazer esta calibração foi de 1300, o mesmo que será utilizado no capítulo 5 para obter os espectros de fóton único.

Capítulo 5

Testes e Resultados

Neste capítulo serão apresentados dois métodos utilizados para a caracterização de fotomultiplicadores, o método de ganho relativo e o método de ganho absoluto, e os resultados obtidos em cada um.

O primeiro método consiste na iluminação de cada PMT com um pulso de luz conhecido de modo a possibilitar a comparação dos sinais de resposta dos fotomultiplicadores e assim estabelecer os ganhos relativos entre estes.

No segundo método utiliza-se o espectro de fotoelétrão único, obtido com a montagem experimental apresentada na Figura 4.11, para determinar o ganho absoluto dos PMTs testados.

5.1 Ganho Relativo

Uma câmara gama funciona tão bem quanto os seus fotomultiplicadores. Garantir que os PMTs utilizados numa câmara gama estão em perfeitas condições é de uma importância essencial para o funcionamento correto de todo o sistema. Para isto a câmara tem processos de ajuste automático e de atualização de ganhos. No entanto, frequentemente acontece que os ganhos e o nível de ruído de alguns fotomultiplicadores degradam demasiado com o tempo para que o sistema de correção os possa ajustar automaticamente. É preciso, nestes casos, intervenção de um técnico. Tendo em conta o enorme trabalho que dá abrir o detetor e atualizar todos os ganhos dos PMTs, estabeleceu-se um procedimento que permite avaliar os fotomultiplicadores fora da câmara e assim garantir que estes estão em condições para serem utilizados ou para serem substituídos por outros melhores (que serão também testados antes de serem montados na câmara).

No decorrer deste trabalho foram testados 17 PMTs, dos quais 4 já tinham sido retirados da câmara devido à perda de ganho ao longo do tempo (PMTs 2, 14, 15 e 17), 3 estão em boas condições (PMTs 1, 6 e 8) e os restantes 10 nunca foram testados. O objetivo do procedimento desenvolvido é simular as condições em que os fotomultiplicadores funcionam numa câmara gama e estabelecer um limite mínimo para o ganho relativo, podendo assim ser aplicado no hospital para verificar quais PMTs estão em condições para uso.

Utilizando a montagem com o pré-amplificador Canberra 2005, representado na Figura 4.6, começa-se por colocar o fotomultiplicador no seu encaixe dentro da caixa. Escolhe-se a amplitude e duração do impulso com que vai ser alimentado o LED para iluminar o PMT. Aplica-se a alta tensão pretendida no PMT e observa-se o sinal no osciloscópio. Neste caso foi utilizado um impulso retangular com uma amplitude de

2.6 V e uma largura de 1.4 μ s. A alta tensão aplicada no PMT foi de -1640 V e o ganho do amplificador (Canberra 2022) igual a 9.

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados obtidos neste teste para todos os fotomultiplicadores. Os valores foram obtidos com o Osciloscópio Digital Tektronix TDS7104. A incerteza nos valores da amplitude foi estimada em 3%.

Tabela 5.1: Comparação das amplitudes dos sinais medidos com o osciloscópio Tektronix TDS7104.

PMT	Referência	Amplitude do sinal à saída do PMT (V)
1	J063687	-0.259 \pm 0.008
2	F84373	-0.108 \pm 0.003
3	F83441	-0.112 \pm 0.003
4	J062029	-0.167 \pm 0.005
5	J062687	-0.589 \pm 0.018
6	J066369	-0.489 \pm 0.015
7	J066483	-0.784 \pm 0.024
8	J064386	-1.484 \pm 0.045
9	J064033	-0.517 \pm 0.016
10	J064030	-0.499 \pm 0.015
11	J064188	-0.525 \pm 0.016
12	J064534	-0.914 \pm 0.027
13	J064193	-0.345 \pm 0.011
14	F82998	-0.182 \pm 0.005
15	F82460	-0.137 \pm 0.004
16	J066488	-1.524 \pm 0.046
17	F78183	-0.159 \pm 0.005

A partir da tabela 5.1 foi construído o gráfico da figura 5.1, este apresenta os valores da amplitude do sinal obtido à saída dos PMTs testados. Os 4 fotomultiplicadores, que foram retirados da câmara gama XR em serviço nos HUCs por serem identificados como defeituosos (indicados com barras vermelhas na Figura 5.1), serviram como base para estabelecer o limite mínimo de ganho (Linha preta no gráfico da Figura 5.1)

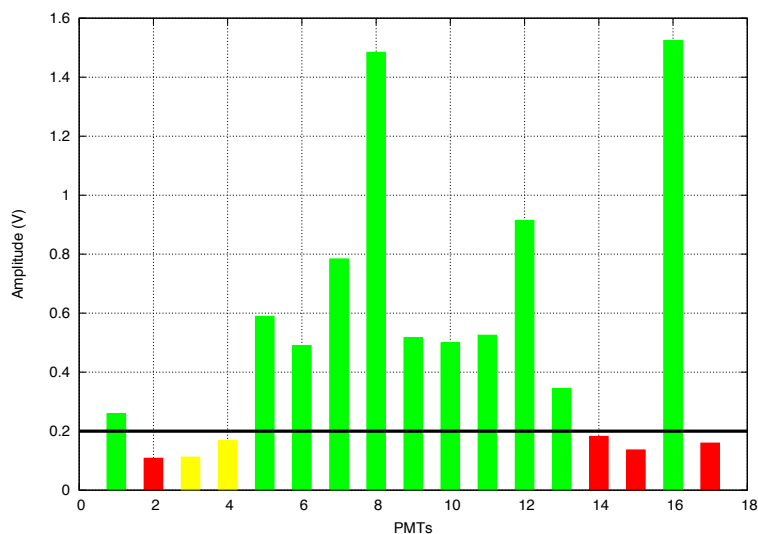


Figura 5.1: Amplitude do impulso à saída dos PMTs testados com uma alta tensão aplicada de -1640 V.

No gráfico da figura 5.1 estão representados os fotomultiplicadores que estão aptos a ser utilizados, marcados a verde, tal como aqueles que já não estão em condições, marcados a vermelho. Além dos 4 PMTs que já se sabia que estavam abaixo do limite mínimo existem ainda mais dois que não podem ser utilizados na câmara devido ao seu baixo ganho, PMTs 3 e 4 (marcados a amarelo). Os restantes fotomultiplicadores estão bons apesar de existirem diferenças bastante grandes entre os seus ganhos. Estas diferenças justificam-se a partir do processo de fabrico, já que dentro do mesmo lote de PMTs irão existir diferenças significativas [manual]. Este método correspondeu às expectativas já que foi possível avaliar o ganho dos vários fotomultiplicadores (num tempo bastante curto, cerca de 5 minutos por PMT) em relação uns aos outros e definir um limite mínimo que será utilizado com outros fotomultiplicadores no futuro.

Para comparar as placas pré-amplificadoras de todos os fotomultiplicadores foi utilizado o sistema apresentado na Figura 4.8. Foi aplicado um impulso de 3.5 V e $1\mu\text{s}$ no LED e foi medido o sinal na saída E da placa pré-amplificadora com o osciloscópio. Os testes foram todos realizados com o PMT 12 para garantir as mesmas condições em todos os testes. Os sinais obtidos na saída E das placas estão apresentados na tabela 5.2 e no gráfico da figura 5.2. A única placa em mau estado nesta amostra, isto é, que anteriormente teve de ser retirada da câmara por mau funcionamento, é a placa número 3.

Tabela 5.2: Comparação das amplitudes dos sinais medidos, com o osciloscópio, na saída E das placas pré-amplificadoras testadas com o PMT 12

Placa Pré-amplificadora	Amplitude do sinal na saída E (V)
1	12.31 ± 0.37
2	12.44 ± 0.37
3	12.25 ± 0.37
4	12.09 ± 0.36
5	11.99 ± 0.36
6	12.26 ± 0.37
7	11.85 ± 0.36
8	12.19 ± 0.37
9	12.01 ± 0.36
10	12.13 ± 0.36
11	12.10 ± 0.36
12	12.38 ± 0.37
13	11.99 ± 0.36
14	12.49 ± 0.37
15	12.42 ± 0.37
16	12.19 ± 0.36
17	12.59 ± 0.37

Os resultados deste teste mostram que em todas as placas, a parte do circuito relativo ao ganho está a funcionar corretamente. A placa número 3 teve que ser trocada na câmara gama pois não estava a funcionar corretamente logo é seguro afirmar que o problema desta placa não será na parte do circuito que insere o ganho no sinal mas sim noutra parte responsável por outra função.

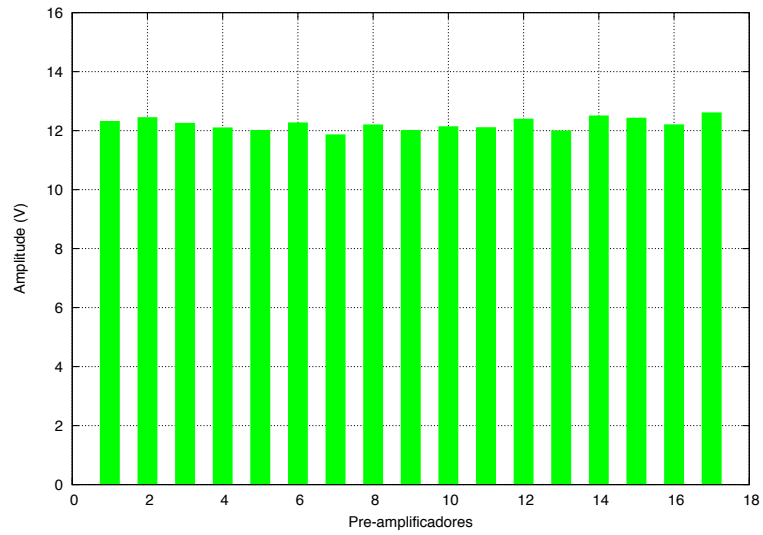


Figura 5.2: Amplitude do impulso na saída E das placas pré-amplificadoras, testadas com o PMT 12

5.2 Ganho Absoluto

Para determinar o ganho em termos absolutos foi medido o espectro de fotoelétrão único utilizando a montagem apresentada na Figura 4.11. O valor da carga medida, Q_a , no ânodo do fotomultiplicador é igual, neste caso, ao produto da carga do eletrão, e com o ganho, M : $Q_a = e \times M$. Uma das formas de garantir que o pulso representado no espectro corresponde ao fotoelétrão único consiste em fornecer um pulso de luz a partir de um LED e diminuir gradualmente a sua intensidade. Enquanto se diminui a intensidade verifica-se que o centro do pulso no espectro se desloca para a esquerda. Quando este pulso parar de se deslocar e começar apenas a perder altura, ou seja a diminuir o número de contagens, pode-se afirmar que se está na região de fotoelétrão único já que é impossível ter menos carga que aquela à saída do PMT e apenas varia o número de vezes que este acontecimento ocorre.

Durante as tentativas para conseguir um pulso de fotoelétrão único com o LED no espectro do multi-canal, reparou-se que quando o LED estava desligado e a caixa negra estava fechada mas sem um pano preto por cima, um pulso aparecia no espectro. Este pulso poderia ser ruído da eletrónica do sistema ou ruído do próprio fotomultiplicador (*dark current*). Para testar estas possibilidades foram medidos os espectros das figuras 5.3, 5.4 e 5.5 com o PMT 12, sempre com o LED desligado, e com uma tensão de -1740 V aplicada no PMT. O primeiro com a caixa completamente destapada, o segundo com a caixa parcialmente coberta por um pano preto e finalmente o terceiro com a caixa completamente coberta.

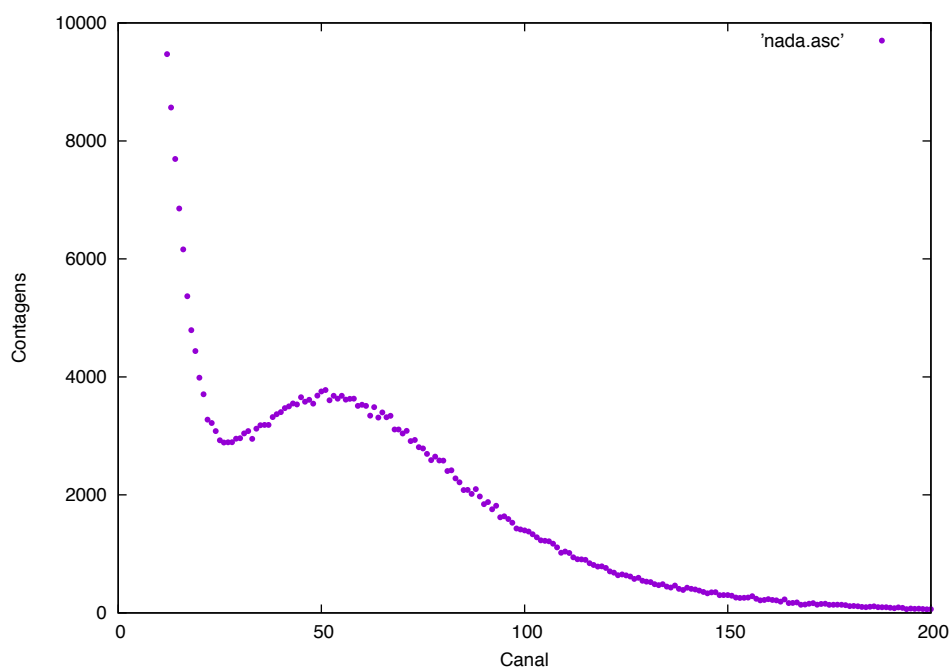


Figura 5.3: Espectro de amplitudes obtido com a caixa destapada

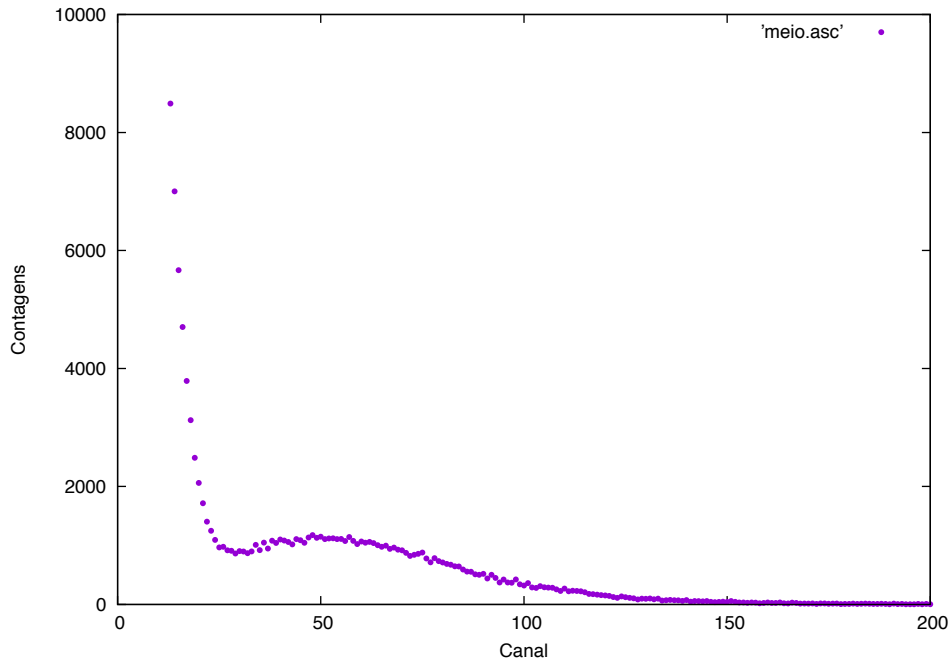


Figura 5.4: Espectro de amplitudes obtido com a caixa parcialmente coberta com um pano preto

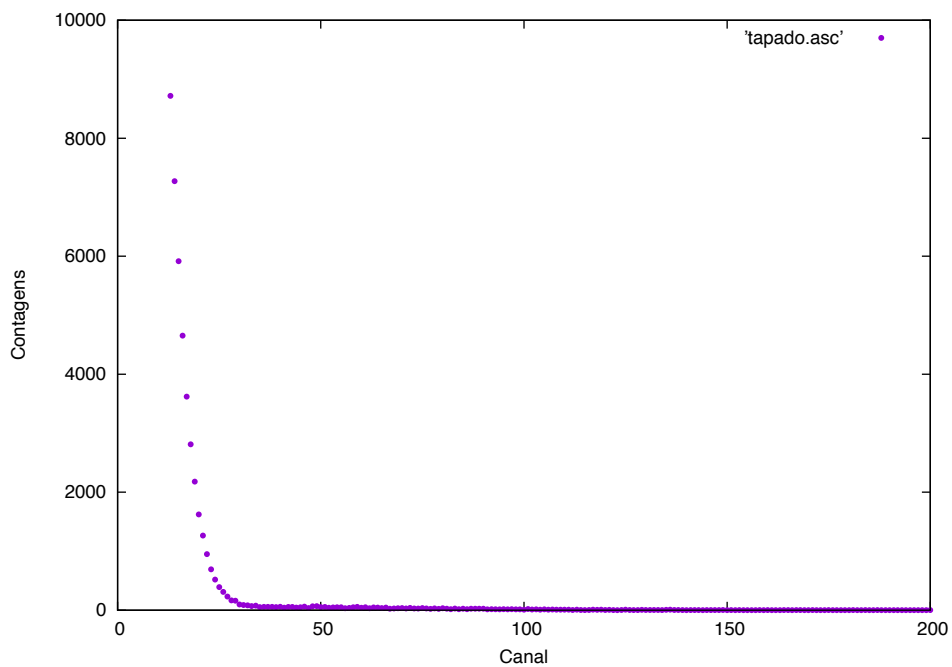


Figura 5.5: Espectro de amplitudes obtido com a caixa completamente coberta com um pano preto

Pode-se concluir a partir destes espectros que não se trata de nenhum ruído de

natureza não luminosa, caso contrário existiria de qualquer forma e não variaria com a quantidade de luz. É possível assim concluir que se trata de um pulso de luz, algo que não deveria acontecer já que a luz natural não é pulsada mas sim contínua. Só é possível existir um sinal tão bem definido no espectro quando o número de fótons à entrada do PMT é também bem definido, logo a única explicação para este fenómeno é então o facto de apenas estar a chegar um fóton ao fotocátodo do PMT. A probabilidade de se estar perante apenas um fóton ou mais que um é dada pela distribuição de Poisson (equação 5.1) [12],

$$P(n) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \quad (5.1)$$

onde μ corresponde ao número médio de fotoeletrões emitidos pelo fotocátodo e n representa o número de fotoeletrões detetados numa medição. Como se trata de uma probabilidade, é correto assumir que durante as medições não é sempre detetado apenas um fotoeletrão, mas que na maior parte das vezes é apenas um. Esta probabilidade justifica a forma dos pulsos encontrados nos espectros, isto é, existem sempre contribuições de dois ou três fotoeletrões mas num número bastante pequeno e por isto a forma do espectro não corresponde exatamente a uma gaussiana mas sim a uma aproximação desta.

O espectro do fotoeletrão único foi também reproduzido com o LED. Ligou-se o LED e diminui-se gradualmente a luz emitida por este até ao ponto em que o sinal no espectro não se deslocou mais para esquerda. A figura 5.6 mostra o espectro medido nessas condições. Nota-se claramente que a posição do pico coincide com a medida com luz natural (Figuras 5.3 e 5.4). Este espectro foi tirado com a caixa sem nenhuma cobertura e como tal o número de contagens e a relação pico-vale são maiores e mais bem definidas já que correspondem à soma das características de ambos os sinais.

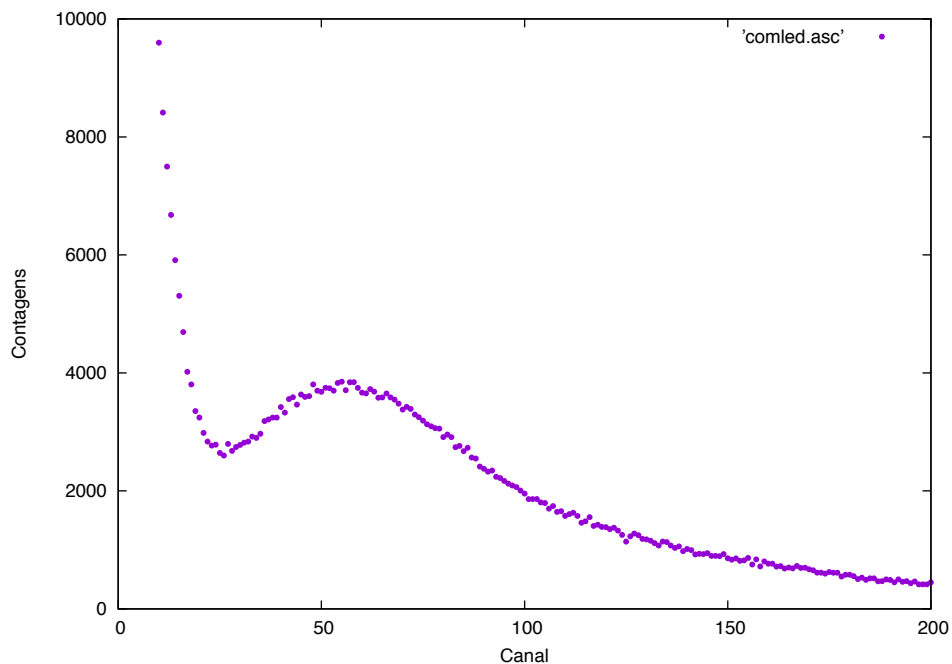


Figura 5.6: Espectro obtido com LED e luz natural

Depois de garantido que se tratava realmente de um espectro de fotoelétrão único, foram feitas 4 medidas para diferentes tensões aplicadas no fotomultiplicador. Como apenas foi possível ver um pulso no espectro quando tinha pelo menos -1740 V aplicados no PMT, estendeu-se a sua utilização até aos -1940 V apesar de no manual da câmara ser recomendado um máximo de -1750. Na figura 5.7 estão representados os sinais encontrados nos espectros obtidos. Nas figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 apresentam-se os ajustes feitos para cada um destes sinais de modo a encontrar o centróide de cada um.

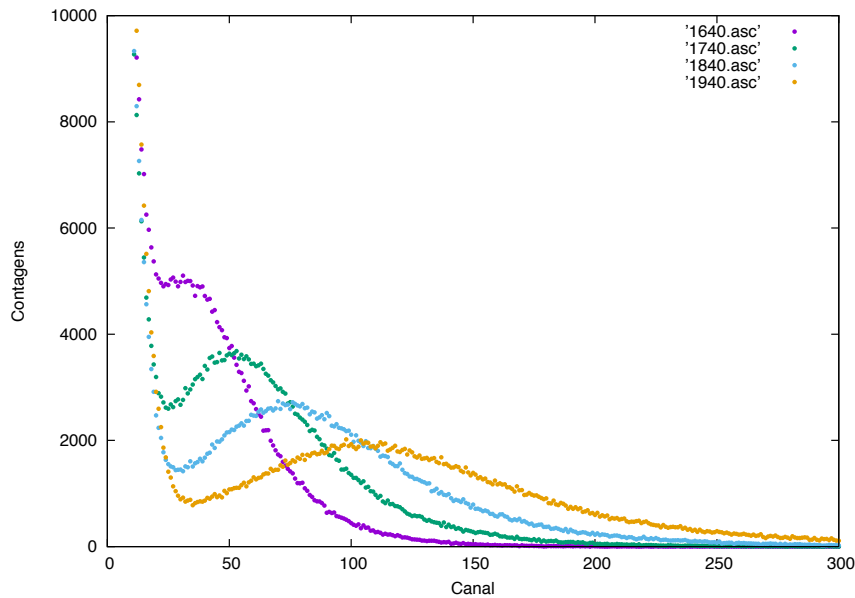


Figura 5.7: Espectros obtidos para as várias tensões aplicadas no PMT 12 com a caixa destapada e sem qualquer sinal no LED

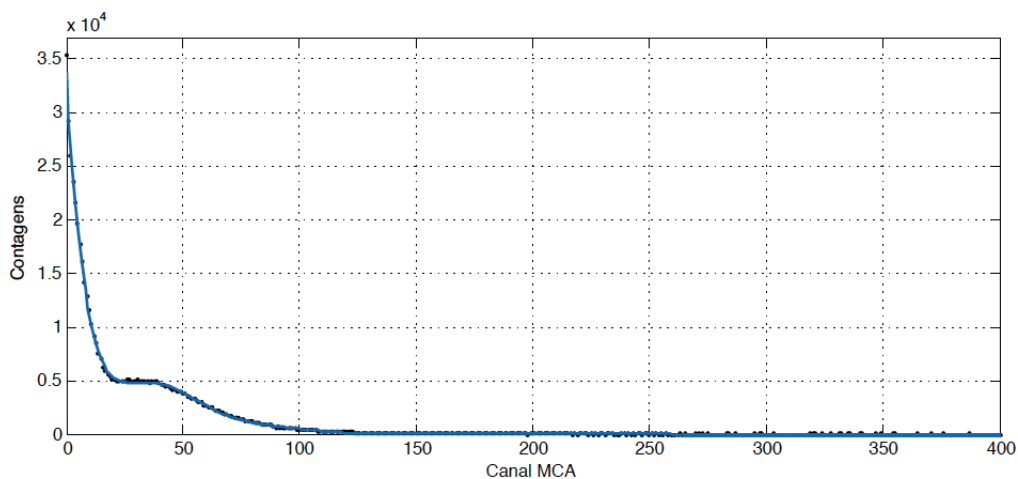


Figura 5.8: Espectro obtido com -1640 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com 3 gaussianas. Centróide do pico: Canal 36.11 ± 1.27

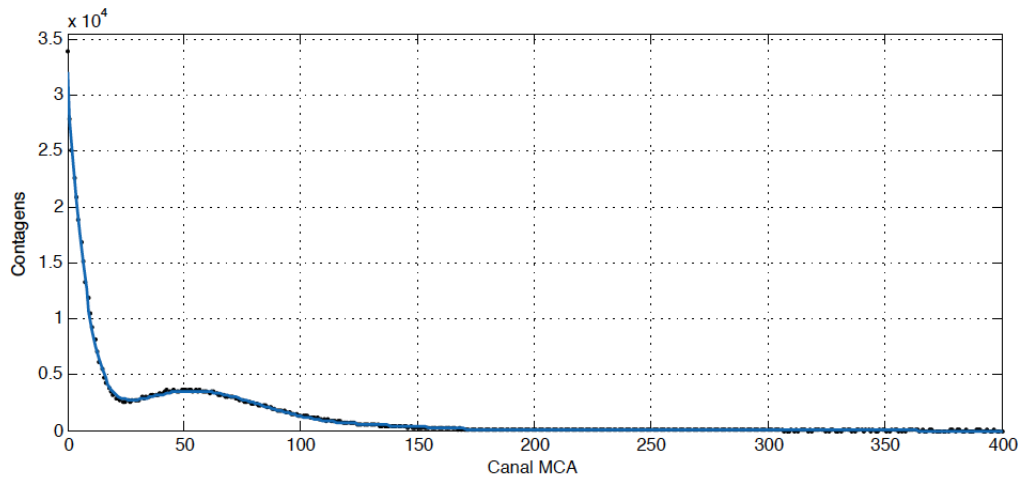


Figura 5.9: Espectro obtido com -1740 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com 3 gaussianas. Centr oide do pico: Canal 53.71 ± 0.18

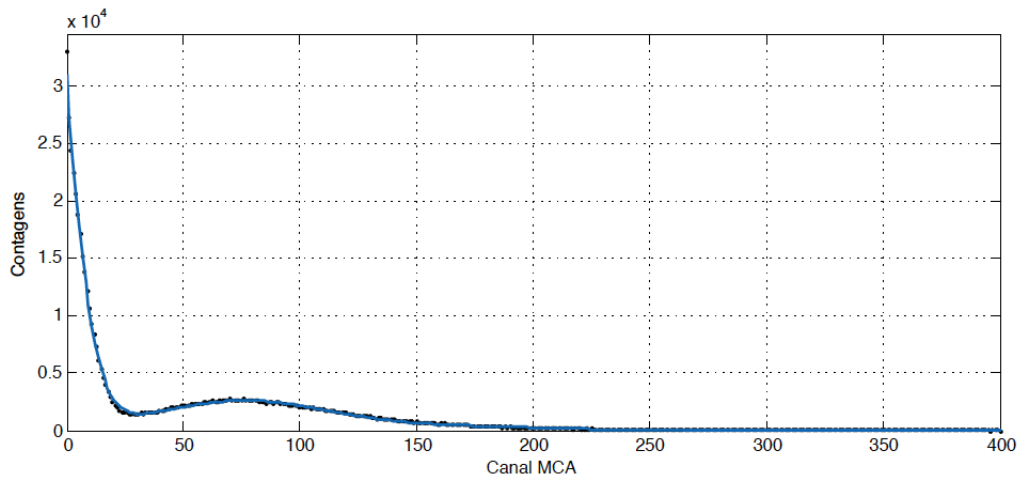


Figura 5.10: Espectro obtido com -1840 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com 3 gaussianas. Centr oide do pico: Canal 75.71 ± 0.35

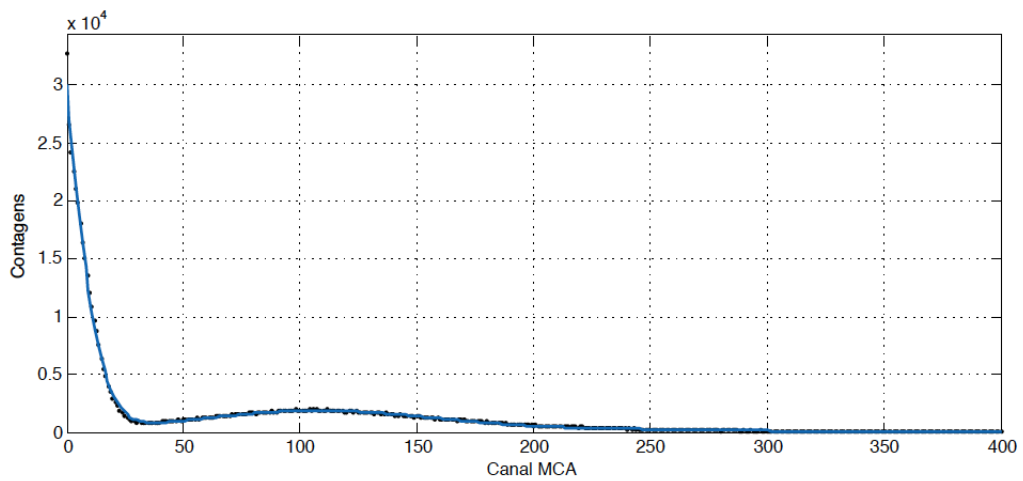


Figura 5.11: Espectro obtido com -1940 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com 3 gaussianas. Centr oide do pico: Canal 107.8 ± 0.95

Existem alguns métodos diferentes para fazer ajustes de picos de fotoeletrão único. Uns métodos utilizam duas gaussianas e uma exponencial [12], outros utilizam 3 gaussianas (como é feito no GIAN do Departamento de Física da Universidade de Coimbra) e outros utilizam uma gaussiana em conjunto com uma distribuição *Polya*.

Neste trabalho foi decidido utilizar um conjunto de 3 gaussianas para fazer os ajustes aos picos de fotoeletrão único obtidos. A primeira gaussiana é utilizada para definir a componente exponencial do pedestal, a segunda determina o pico do fotoeletrão único e finalmente a terceira é utilizada para determinar as contribuições correspondentes a mais do que um fotoeletrão.

Foi ainda pedido ao Dr. Francisco Neves do LIP para fazer os ajustes, aos mesmos dados, com uma distribuição *Polya* e uma gaussiana, a partir do código que este escreveu para outra experiência, como termo de comparação (Figuras 5.12, 5.13, 5.14, 5.15). Estes ajustes já incluem o offset do multi-canal enquanto que os ajustes feitos com as 3 gaussianas não, logo é necessário retirar 30 canais aos valores dos centróides do Dr. Francisco (designados como *polya mean* nos gráficos) para que seja possível a sua comparação.

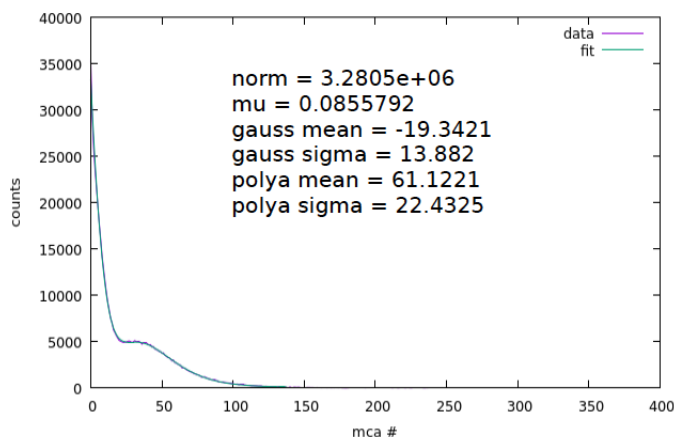


Figura 5.12: Espectro obtido com -1640 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com uma gaussiana e a distribuição *Polya*.

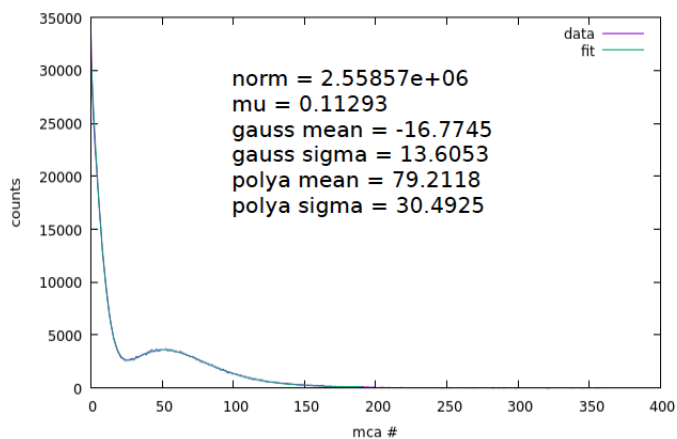


Figura 5.13: Espectro obtido com -1740 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com uma gaussiana e a distribuição *Polya*.

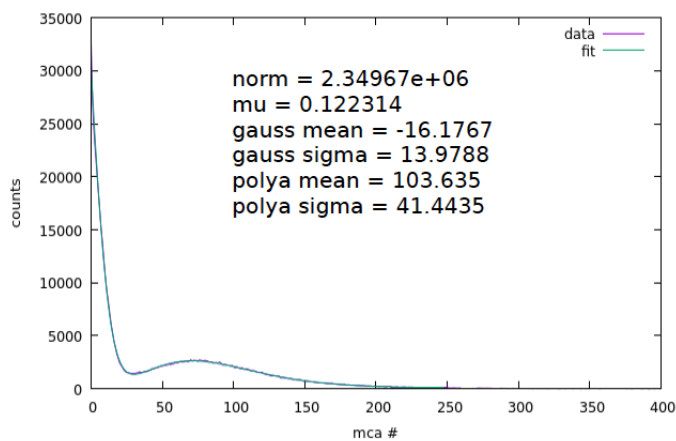


Figura 5.14: Espectro obtido com -1840 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com uma gaussiana e a distribuição *Polya*.

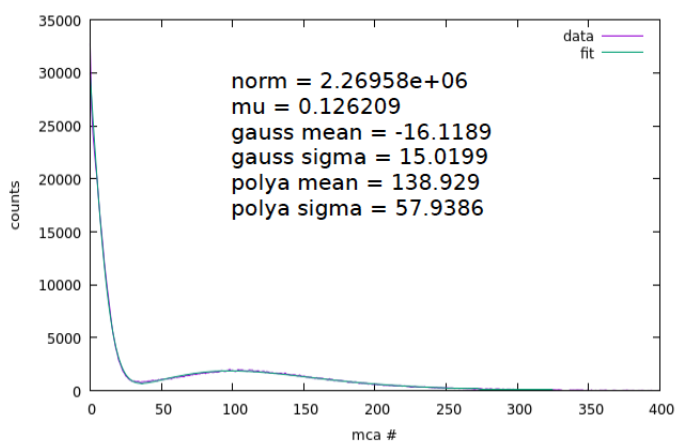


Figura 5.15: Espectro obtido com -1940 V aplicados no PMT 12 e respetivo ajuste com uma gaussiana e a distribuição *Polya*.

Os valores obtidos, a partir do ajuste de 3 gaussianas, para os centróides dos picos de fotoeltrão único são muito próximos aos obtidos no ajuste do Dr. Francisco Neves (uma diferença de alguns canais apenas). Pode-se, assim, concluir que os ajustes com 3 gaussianas, embora fisicamente menos corretos do que os com a distribuição *Polya*, oferecem uma abordagem bastante boa com a vantagem de puderem ser efetuados com o software de uso comum. O mesmo já não se pode dizer sobre os ajustes com um exponencial e uma ou duas gaussianas à semelhança de [12]. Os ajustes dos espectros, medidos neste trabalho, feitos com esse método foram sempre muito piores do que com 3 gaussianas ou *Polya*.

A partir da equação que descreve a reta de calibração obtida no Capítulo 4 para um ganho de 1300 no amplificador Canberra 2022, fez-se a conversão de cada centróide, determinados nos ajustes anteriores, para a respetiva carga à entrada do pré-amplificador Canberra 2005, em Coulomb.

A carga à entrada do pré-amplificador é igual à carga à saída do fotomultiplicador logo, para se determinar o ganho deste, divide-se esta carga pela carga do eletrão, $\bar{e} = -1.602176565(35) \times 10^{-19}C$, obtendo-se assim o numero de eletrões à saída do PMT que correspondem ao ganho, já que o número de fotoeltrões à entrada é 1.

Na tabela 5.3 encontram-se os ganhos do PMT para as diferentes tensões aplicadas.

Tabela 5.3: Tensões aplicadas no PMT e respetivos ganhos

Tensão	Centróide	Carga (C)	Ganho
-1640	36.11 ± 1.3	$(1.92 \pm 0.041) \times 10^{-13}$	$(1.20 \pm 0.03) \times 10^6$
-1740	53.71 ± 0.2	$(2.49 \pm 0.005) \times 10^{-13}$	$(1.56 \pm 0.004) \times 10^6$
-1840	75.71 ± 0.4	$(3.19 \pm 0.014) \times 10^{-13}$	$(2.00 \pm 0.007) \times 10^6$
-1940	107.8 ± 1.0	$(4.22 \pm 0.036) \times 10^{-13}$	$(2.64 \pm 0.02) \times 10^6$

O ganho esperado para as tensões de -1640 e -1740 V, obtido a partir da datasheet do PMT Burle modelo S83020F, é 1.5×10^6 e 1.9×10^6 respetivamente. Os valores medidos estão relativamente perto dos valores esperados mas não são exatamente os mesmos. As razões desta discrepância são, em primeiro lugar, a variação do ganho relativa ao processo de fabrico dos fotomultiplicadores referido no manual providenciado pela GE Healthcare, em segundo, o facto do PMT utilizado como termo de comparação não ser exatamente o mesmo já que no próprio manual da câmara XR é referido que os PMTs utilizados nas câmaras gama desta empresa foram otimizados por um *standard* de qualidade da própria empresa, e por fim terceiro, o facto dos PMTs testados já terem sido utilizados por um tempo indeterminado, algo que pode levar à perda de ganho destes.

Ao comparar estes valores com os ganhos de outros PMTs, referidos na tabela 3.2 do Capítulo 3, é relativamente fácil concluir que estes ganhos estão na mesma ordem de grandeza e que refletem um bom comportamento do PMT. Os ganhos máximos esperados estão sempre na casa das 10^5 e 10^6 unidades, tal como o obtido neste PMT.

No gráfico da figura 5.16 está representada a relação entre o ganho e a alta tensão a partir de uma função exponencial já que a relação entre a tensão aplicada e o ganho é exponencial (ver Secção 2.4.1). É possível comparar esta reta com a reta do ganho típico do modelo S83020F e observam-se algumas semelhanças apesar dos ganhos obtidos estarem um bocado a baixo do ganho típico esperado. De qualquer forma, a reta obtida encontra-se ainda acima do limite mínimo estabelecido na datasheet e apresenta uma relação entre o ganho e a tensão aplicada muito próxima do esperado.

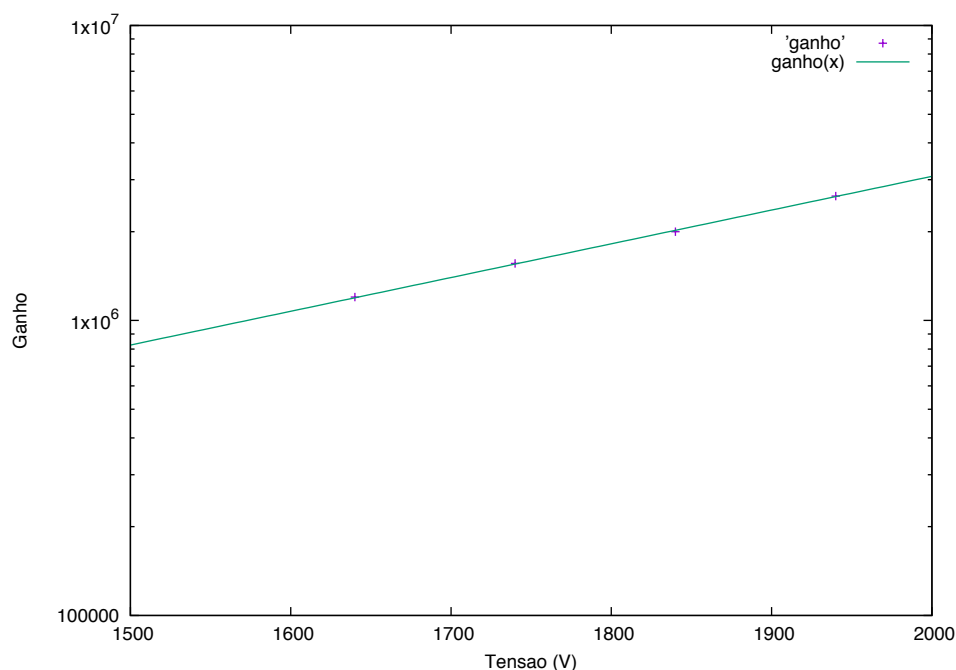


Figura 5.16: Ganho vs HV

Partindo dos testes feitos para determinar o ganho relativo dos fotomultiplicadores estudados e complementando com o teste realizado para determinar o ganho absoluto do PMT 12, foi possível determinar o ganho absoluto de todos os PMTs para uma tensão aplicada de -1640 V.

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Ganhos de todos os PMTs a partir dos testes de ganho relativo e do teste de ganho absoluto do PMT 12

PMT	Amplitude na saída do pré-amplificador (V)	Relação ao PMT 12 em (%)	Ganho Absoluto
1	-0.259 ± 0.008	28.32 ± 0.85	$(3.40 \pm 0.07) \times 10^5$
2	-0.108 ± 0.003	11.81 ± 0.35	$(1.42 \pm 0.03) \times 10^5$
3	-0.112 ± 0.003	12.25 ± 0.37	$(1.47 \pm 0.03) \times 10^5$
4	-0.167 ± 0.005	18.29 ± 0.55	$(2.20 \pm 0.05) \times 10^5$
5	-0.589 ± 0.018	64.46 ± 1.93	$(7.73 \pm 0.16) \times 10^5$
6	-0.489 ± 0.015	53.54 ± 1.61	$(6.42 \pm 0.14) \times 10^5$
7	-0.784 ± 0.024	85.71 ± 2.57	$(1.03 \pm 0.02) \times 10^6$
8	-1.484 ± 0.045	162.30 ± 4.87	$(1.95 \pm 0.04) \times 10^6$
9	-0.517 ± 0.016	56.52 ± 1.69	$(6.78 \pm 0.14) \times 10^5$
10	-0.499 ± 0.015	54.61 ± 1.64	$(6.55 \pm 0.14) \times 10^5$
11	-0.525 ± 0.016	57.43 ± 1.72	$(6.89 \pm 0.15) \times 10^5$
12	-0.914 ± 0.027	100 ± 3	$(1.20 \pm 0.03) \times 10^6$
13	-0.345 ± 0.011	37.69 ± 1.13	$(4.52 \pm 0.1) \times 10^5$
14	-0.182 ± 0.005	19.95 ± 0.6	$(2.39 \pm 0.05) \times 10^5$
15	-0.137 ± 0.004	14.93 ± 0.45	$(1.79 \pm 0.04) \times 10^5$
16	-1.524 ± 0.046	166.68 ± 5	$(2.00 \pm 0.04) \times 10^6$
17	-0.159 ± 0.005	17.45 ± 0.52	$(2.09 \pm 0.05) \times 10^5$

No gráfico da Figura 5.17 são apresentados os valores dos ganhos medidos para cada fotomultiplicador e os valores dos ganhos esperados para a tensão de -1640 V.

Pela datasheet do modelo S083020F, existem duas retas que relacionam o ganho com a tensão aplicada. A primeira representa o ganho de um PMT típico deste modelo, neste caso para a tensão de -1640 V o ganho esperado é 1.5×10^6 (representado pela linha verde tracejada). A segunda apresenta o limite mínimo aproximado para este modelo e o valor esperado do ganho para -1640 V é 4.5×10^5 (representado pela linha vermelha tracejada).

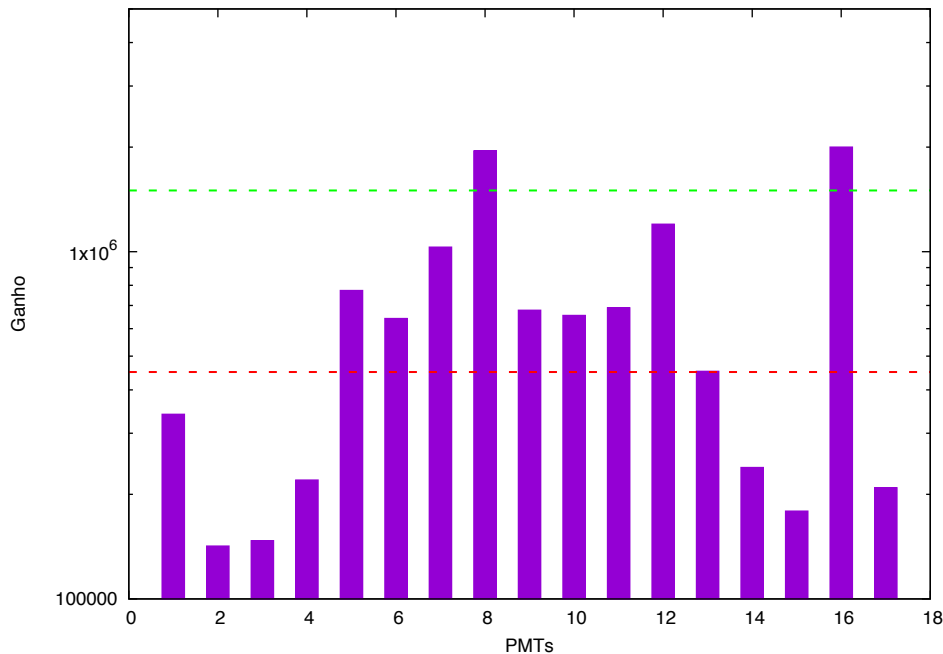


Figura 5.17: Ganhos de todos os PMTs testados com uma tensão aplicada de -1640 V

Cerca de metade dos fotomultiplicadores estudados está dentro dos limites estabelecidos pela datasheet do modelo S083020F, enquanto que a outra metade está abaixo dos valores esperados. Com estes resultados é correto concluir que o PMT estudado não é o mesmo que o modelo apresentado na datasheet mas um do mesmo género. Como foi descrito no Capítulo 3, a análise detalhada da estrutura mecânica dos PMTs usados nas câmaras gama GE XR/T, feito em [10], indicou que os dínodos não têm exactamente a mesma configuração que o modelo S083020 e a rede utilizada para direccionar os fotoelectrões emitidos pelo fotocátodo também não é exactamente a mesma. Apesar de não ser o mesmo modelo, pode-se assumir que se trata de uma variação deste, talvez um modelo feito apenas para as câmaras da GE Healthcare.

Por fim, e em jeito de conclusão, os testes e a análise de dados providenciados neste capítulo permitiram estabelecer um procedimento de fácil execução e com uma boa precisão na avaliação do ganho dos fotomultiplicadores, e das suas respectivas placas pré-amplificadoras, da câmara gama XR utilizada no Serviço de Medicina Nuclear dos Hospitais da Universidade de Coimbra. Foi ainda cumprido o objetivo de determinar o ganho absoluto dos fotomultiplicadores estudados, fazendo assim com que a caracterização destes seja muito mais completa.

Conclusão

No final desta dissertação verifica-se que os objetivos propostos foram alcançados. Foi desenvolvido um sistema que permite a avaliação dos ganhos relativos dos fotomultiplicadores e das suas respetivas placas pré-amplificadoras, com o intuito de facilitar e otimizar a manutenção das câmaras gama do Serviço de Medicina Nuclear dos Hospitais da Universidade de Coimbra. O método desenvolvido foi testado com 17 fotomultiplicadores, alguns dos quais identificados previamente como operacionais mas inutilizáveis (em termos do ganho) na câmara, outros sem qualquer informação sobre a sua performance. Com este trabalho foi possível estabelecer um limite mínimo de ganho para os ditos fotomultiplicadores e assim definir um parâmetro de qualidade na sua utilização.

Foi ainda feita a medição do ganho absoluto de um dos fotomultiplicadores através da observação do espectro de fotoeletrão único e da calibração do sistema de aquisição em termos da carga relativa à entrada do sistema. Isto, em conjunto com os valores de ganhos relativos de todos os 17 fotomultiplicadores testados, permitiu determinar o ganho absoluto destes e compará-los com as especificações fornecidas pelo fabricante. Este método permite ainda avaliar o grau de deterioração do ganho dos fotomultiplicadores tanto dos utilizados na câmara durante o serviço desta como dos fotomultiplicadores armazenados para fins de manutenção das câmaras. O método também se aplica para avaliação dos fotomultiplicadores adquiridos e considerados novos.

É de notar, que o sistema desenvolvido permite testar os fotomultiplicadores fora da câmara gama, num setup simples, o que representa uma mais valia para a eficiência do serviço de manutenção das câmaras gama em termos de tempo e outros recursos despendidos.

Como preparação para a construção deste sistema, foi ainda feito um estudo detalhado das câmaras gama e dos seus fotomultiplicadores, desde as suas arquiteturas, ao seu funcionamento e principais características, com especial foco na variação destas em resposta a outros fatores que influenciam estes sistemas.

Como desenvolvimento futuro, a avaliação de outras características dos fotomultiplicadores também pode ser implementado no sistema, tais como a linearidade da resposta, a uniformidade do fotocátodo e, eventualmente, a eficiência quântica deste. Para a avaliação da uniformidade, o método mais concreto e simples envolveria uma estrutura que movesse o LED ao longo de toda a área do fotocátodo de modo a obter sinais iguais em todos os pontos e assim permitir a comparação destes [12]. Em termos de linearidade existem vários métodos estabelecidos para a sua medição, alguns utilizam dois fotomultiplicadores lado a lado enquanto que outros utilizam dois LEDs em simultâneo [8] [12]. Independentemente dos métodos escolhidos, estas seriam algumas adições ao sistema que o tornariam ainda mais completo.

Bibliografia

- [1] J. Beringer (and Particle Data Group). Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 86:010001, Jul 2012.
- [2] Nelson Faria Pinto Simões. Ativação e Degradação da Resposta de um Instrumento de CdTe em Condições de Voo para um Telescópio Espacial de Raios Gama. *Tese de mestrado em Engenharia Física - Universidade de Coimbra*, 10 2015.
- [3] Hal O. Anger. Scintillation camera. *Review of Scientific Instruments*, 29(1):27–33, 1958.
- [4] V. N. Solovov, V. A. Belov, D. Yu Akimov, H. M. Araujo, E. J. Barnes, A. A. Burenkov, V. Chepel, A. Currie, L. DeViveiros, B. Edwards, C. Ghag, A. Hollingsworth, M. Horn, G. E. Kalmus, A. S. Kobayakin, A. G. Kovalenko, V. N. Lebedenko, A. Lindote, M. I. Lopes, R. Luescher, P. Majewski, A. S. J. Murphy, F. Neves, S. M. Paling, J. Pinto da Cunha, R. Preece, J. J. Quenby, L. Reichhart, P. R. Scovell, C. Silva, N. J. T. Smith, P. F. Smith, V. N. Stekhanov, T. J. Sumner, C. Thorne, and R. J. Walker. Position reconstruction in a dual phase xenon scintillation detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 59(6):3286–3293, 12 2012.
- [5] National Electrical Manufacturers Association Washington. *NEMA Standards Publication NU 1-2007: Performance Measurements of Gamma Cameras*. National Electrical Manufacturers Association, 2007.
- [6] Vitaly Chepel. Slides apresentados na cadeira de *Imagiologia e Instrumentação Médica* lecionada no Departamento de Física da Universidade de Coimbra. 09 2013.
- [7] Hamamatsu Photonics K.K. Photomultiplier tubes - basics and applications 3ª edição. Sep 2007.
- [8] Philips Photonics. Photomultiplier tubes - principles and applications. 1994.
- [9] GE Medical Systems. Genie acq for ib ac/xc/xr system service manual - direction 2403805-100. 1, 2004.
- [10] Fun with photomultiplier tubes. acedido pela última vez a 05 de setembro de 2017 em https://mitxela.com/projects/photomultiplier_tubes. 062016.
- [11] João Pedro Rodrigues. Desenvolvimento do sistema de leitura e aquisição para uma câmara de anger utilizando fotomultiplicadores de silício. *Tese de mestrado em Engenharia Física - Universidade de Coimbra*, 10 2013.

- [12] Jingkai Xia, Qian Sen, W Wang, Zhe Ning, Yaping Cheng, Zhonggang Wang, X Li, Mingfan Qi, Y Heng, S Liu, and X Lei. A performance evaluation system for photomultiplier tubes - *Journal of Instrumentation*. 10:P03023–P03023, 03 2015.

Anexo A

Datasheets e Circuitos Relevantes



MIRION
TECHNOLOGIES

Model 2005 Scintillation Preamplifier

Features

- Low noise design: less than 10^{-15} coulombs rms
- High charge rate capacity (up to $9 \mu\text{C/s}$) for high count rate applications
- FET input, diode protected
- Fast risetime: less than 15 ns

Description

The CANBERRA Model 2005 is a charge sensitive preamplifier which collects the charge output from scintillation/photo-multiplier detectors for presentation to a pulse shaping main amplifier. For the typical application with input from the decoupled anode signal from a photomultiplier tube base, the preamplifier generates a positive polarity energy pulse output.

Functionally the unit operates as an integrator utilizing an operational type configuration by which the potential difference across the feedback capacitor is directly proportional to the charge accumulated from the detector input. The integrator is followed by a pole/zero cancellation circuit for optimum overload performance, and a differentiator to provide the $50 \mu\text{s}$ tail pulse. In addition, a buffer stage allows the Model 2005 to drive a long cable length without pulse degradation.

Charge conversion gains of nominally 4.5 or 22.7 millivolts per picocoulomb may be selected by a jumper plug on the printed circuit board inside the unit. Power for the unit is usually supplied from the associated main amplifier through the 3 m (10 ft) power cable provided with the preamp.

Specifications

INPUTS

- DETECTOR INPUT – Accepts charge pulse from scintillation/photomultiplier detector.
- TEST INPUT – Charge coupled to preamp input at 33 pC/V ; $Z_{in} = 93 \Omega$.

OUTPUTS

- ENERGY OUTPUT – Inverted tail pulse; rise time as in Table 1; $50 \mu\text{s}$ fall time constant, up to $\pm 10 \text{ V}$; $Z_{out} = 93 \Omega$; direct coupled.

PERFORMANCE

- INTEGRAL NONLINEARITY – $< \pm 0.02\%$ for up to $\pm 10 \text{ V}$ output.
- GAIN DRIFT – $< \pm 0.01\%$ per $^{\circ}\text{C}$ ($\pm 100 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$).
- NOISE OUTPUT PERFORMANCE – See Table 1.
- CHARGE SENSITIVITY – 4.5 mV/pC or 22.7 mV/pC , internally selected.
- HIGH CHARGE RATE CAPABILITY – Up to $9 \mu\text{C/s}$.





Model 2022 Spectroscopy Amplifier

Features

- Six front panel selectable shaping time constants
- Noise $\leq 4.0 \mu\text{V}$ RMS referred to input, gain ≥ 100 and $2 \mu\text{s}$ shaping
- Drift $\leq \pm 10 \mu\text{V}$ $\text{dc}/^\circ\text{C}$
- Active baseline restorer for optimum performance

Description

The Model 2022 Spectroscopy Amplifier offers excellent resolution performance in a low cost, single width NIM module. CANBERRA's well known filter shaping provides improved pulse symmetry, minimum sensitivity of output amplitude to variations in detector rise time, and maximum signal to noise ratio. Unipolar shaping is achieved with one differentiator and two active filter integrators. The differentiator is placed early in the amplifier to insure good overload recovery. The integrators are placed late to minimize noise contribution from the gain stages. The amplifier offers six front panel selectable pulse shaping time constants: 0.5, 1, 2, 4, 8 and $12 \mu\text{s}$.

The Model 2022 employs CANBERRA's unique baseline restorer for optimum performance with high resolution detector systems. The gated baseline restorer automatically adjusts the restoration rate and threshold optimizing performance to the incoming count rate and system noise level.

Simultaneous unipolar and bipolar outputs are available at both front and rear panel BNC connectors. The unipolar signal is used for spectral analysis. The bipolar output can be used for counting, timing, or gating.

The Model 2022 solid dc stability and low noise to provide a high performance spectroscopy amplifier in a single width NIM module.



Specifications

INPUTS

- INPUT – Accepts positive or negative pulses from an associated preamplifier; amplitude: $\pm 10 \text{ V}$ divided by the selected gain for linear response; $\pm 12 \text{ V}$ maximum; rise time: less than SHAPING time constant; decay time constant; $40 \mu\text{s}$ to ∞ for 0.5, 1, 2, 4 and $8 \mu\text{s}$ shaping time constants, $100 \mu\text{s}$ to ∞ for $12 \mu\text{s}$ shaping time constant; $Z_{in} \approx 1 \text{ k}\Omega$; front and rear panel BNC connectors.

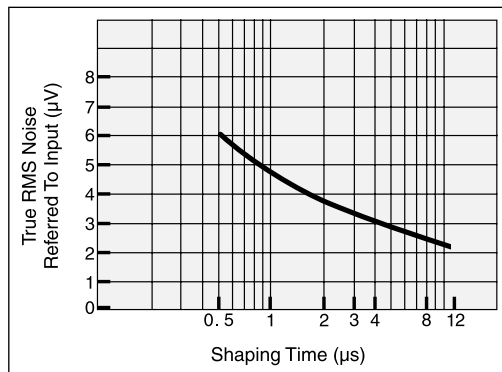


Figure 1
Typical Unipolar Output True RMS Noise (referred to input for gain of 100) vs. Shaping Time Constant

OUTPUTS

- UNIPOLAR OUTPUT – Provides positive linear active-filtered near-Gaussian shaped pulses; amplitude linear to $+10 \text{ V}$, 12 V max.; dc restored; output dc level factory calibrated to $0 \pm 5 \text{ mV}$, front panel $Z_{out} < 1 \Omega$ or $\approx 93 \Omega$, internally selectable; rear panel $Z_{out} \approx 93 \Omega$; short circuit protected; front and rear panel BNC connectors.

Figura A.3: Datasheet do Multi-canal PGT 8000

MCA8000 Specifications

ADC

- 8.12 μ s successive approximation ADC (14-bit resolution)
- Discriminators (PC adjusted): upper (0 to 105% of full scale) and lower
- (<1% to 105% of full scale) in 0.41% increments • Zero adjustment in increments of 0.41% (PC adjusted) • Maximum throughput: 70,000 cps

Spectrum memory

- MCA 8001: 250, 500, 1000 channels
- MCA 8002: 250, 500, 1000, 2000 channels
- MCA 8004: 250, 500, 1000, 2000, 4000 channels
- MCA 8008: 250, 1000, 2000, 4000, 8000 channels
- MCA 8016: 250, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 channels
- maximum counts per channel: $2^{31}-1$ (i.e., 2.1E9)

Digital Stabilizer

- Internal ADC zero and gain stabilization • PC controlled time constants
- Balanced channel and ROI centroid Modes • Gain: - 12.5% of range
- Zero: - 1.25% of range

Multichannel Scaling

- Input Rate: 5 MHz
- Dwell Time: 10 ms to 2.1E7 seconds
- Dead-time: 3 μ s between passes and 3 μ s between channels • Signal sources: internal SCA, any ROI, external input

Counting presets

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| • Real time | • Live time |
| • Integral of all ROIs | • Integral of selected ROIs |
| • Gross ROI statistics | • Net ROI statistics |
| • Total system counts | • Total SCA counts |

Linearity

- Differential non-linearity: < - 1% over top 99% of range
- Integral non-linearity: < - 0.05% over top 99% of range

Battery backup for

- Spectrum
- Setup parameters
- Clock memory

Computer Control

- Ethernet 10/100 base-T
- RS-232 baud rates: 2400, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 • Max. number units connected to PC: 8

Front panel indicators

- LEDs for: Acquire, Event, Serial Com, AUX I/O in-use, power • 3-color LED array for dead-time

Rear panel controls and connectors

- Power switch
- 2.5mm power jack
- Fuse housing
- 9-pin D male RS-232 connector
- 26-pin D female connector for ROI output
- 9-pin D auxiliary I/O connector
- Ethernet interface connector (RJ-45)
- ADC input (BNC) 0-10V unipolar or bipolar pulse • ADC gate input (BNC) (coin. / anti-coin. / off) CMOS/TTL • Pile-up reject input (BNC) CMOS/TTL
- SCA output CMOS/TTL
- ADC busy out (BNC) CMOS/TTL

Weight

- 4.06lb (1.85kg)

Dimensions

- 10.4in. (26.4cm) wide
- 12.3in. (31.2cm) deep
- 2.75in. (7.0cm) tall

Power requirements

- 10-18 VDC, 9.6 watts, external
- 12V universal AC supply provided

Software

- 32-bit QuantumMCA compatible with • Windows 95/98/NT

Accessories

- QuantumGold software for quantitative analysis • High-purity germanium detectors
- Selection of cables

Doc. Ctr. No. MCA80000313000mlk

Distribuito in Italia da :



<http://www.activeradsys.it>

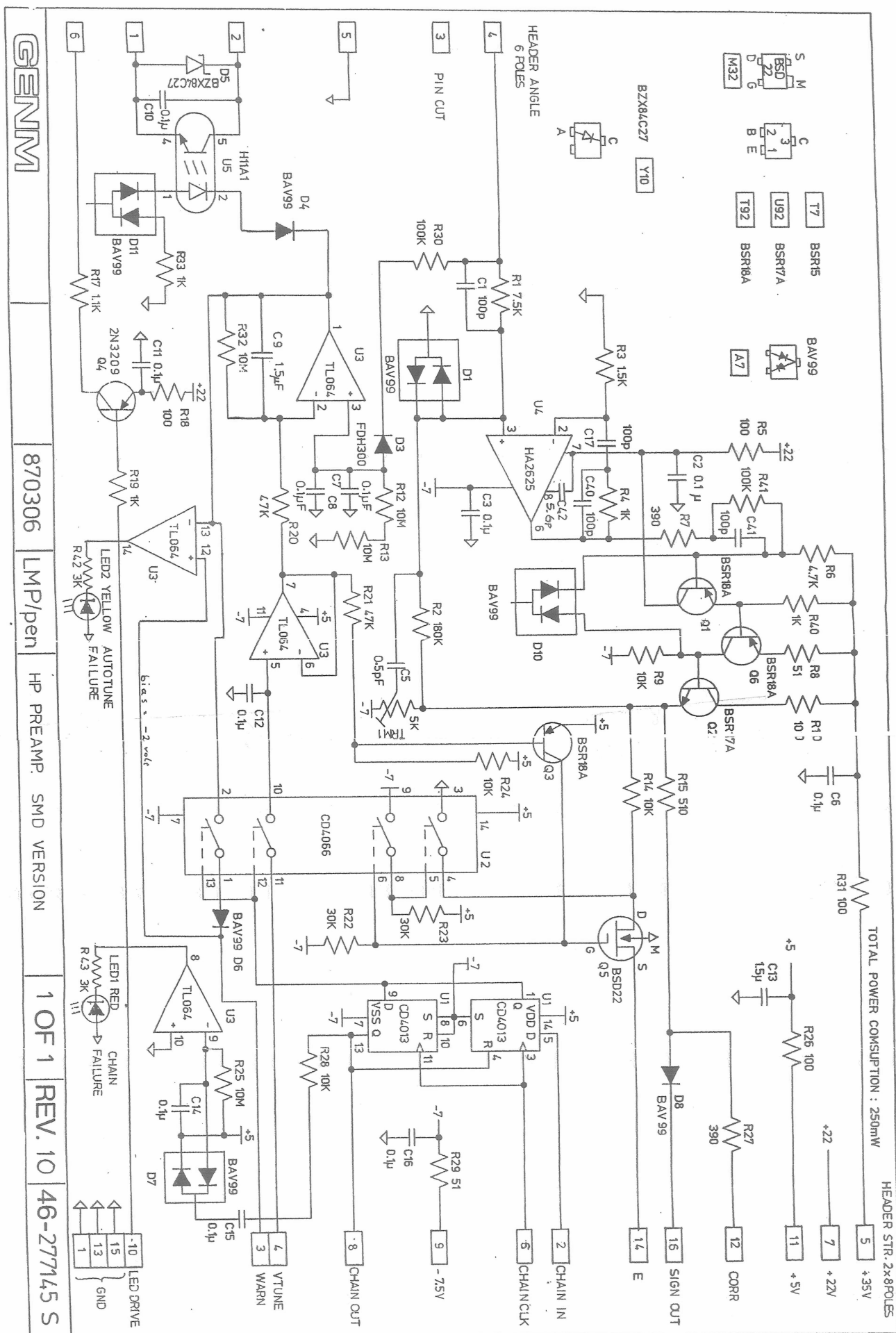
E-mail: info@activeradsys.it

Via della Lirica n.7 48124 Ravenna

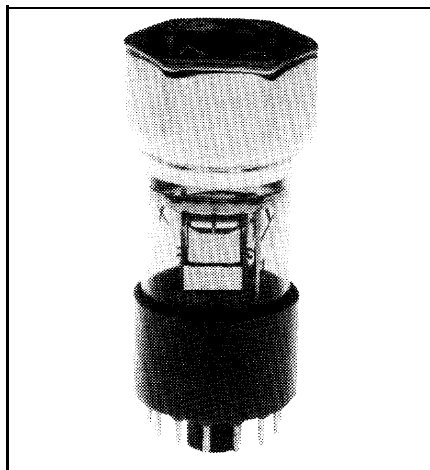
Tel: +39 0544 408071 Fax: +39 0544 276014



Figura A.4: Circuito da Placa Pré-amplificadora



S83020F, S83020FM1, S83020FM2 Photomultipliers



60-mm Hexagonal 10-Stage, Head-On PMTs

BURLE S83020F, -M1, and -M2 are 60-millimeter hexagonal, 10-stage photomultiplier tubes. Each employs a potassium-cesium-antimonide (bialkali) photocathode and a “teacup” first dynode followed by a hybrid box-and-grid/circular-cage dynode structure. The first dynode is similar in appearance to a truncated paraboloid. Interposed between the photocathode and the first dynode is a washer-like electrode that serves to focus the photoelectron stream. This structure affords increased efficiency in collecting photoelectrons from all regions of the useful photocathode with resulting improvements in pulse height resolution capability.

These tubes were designed primarily for application to medical diagnostic systems of the Anger camera type. However, they are expected to be useful also in general scintillation-counting applications and in the detection and measurement of low-level light events in the blue region of the spectrum.

S83020F has a permanently-attached base; S83020FM1 a temporary base; and S83020FM2 flying leads with no base. In cases where prospective production volume justifies the necessary tooling expense, BURLE is prepared to provide devices with permanently-attached Voltage Divider Networks as defined by customer specification.

General Data

Faceplate:

Material	Schott B270 Glass or Equivalent
Cross-section	Plano-Plano
Thickness	3.18 ± 0.38 mm
Index of refraction @ 436 nm	1.523

Photocathode:

Type	Semi-transparent K-Cs-Sb (Bialkali)
Spectral response..	See Figure 1
Wavelength of maximum response	370 nm

Dynodes:

Number..	10
----------------	----

Secondary-emitting surface:

Dynode no.1	Alkali-Antimonide
Dynodes no. 2-8	Beryllium-oxide
Dynodes no. 9-10	Proprietary material

Structure

Weight (Approximate)

Socket

Absolute Maximum Ratings¹

Limiting Values

DC Supply Voltage:

Between anode and cathode	1700	v
Between anode and dynode no. 10	300	V
Between adjacent dynodes	300	V
Between dynode no.1 and cathode	600	V

Average Anode Current:

Averaged over any 30 second interval	0.1	mA
--	-----	----

Temperature:

Storage	-40 to + 70	°C
Operation	See Note 2	

Test Parameters and Limits

In order to insure that BURLE Photomultipliers consistently meet exacting performance standards, each device is subjected to a series of tests that verify that its operating parameters conform to normal expectations for the tube type. Although the conditions under which these tests are performed may or may not duplicate operating conditions in particular applications, long experience has shown that a tube satisfying the criteria indicated below can be expected to perform satisfactorily in a variety of applications.

Power supply voltage (E = 1100 Volts unless otherwise noted) is applied to the tube's electrodes via a Voltage Divider Network (VDN) in accordance with the distribution listed in Table 1. Ambient temperature is approximately 22 degrees C.

Test Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
Cathode Responsivity ³	8.6	10.0	-	uA/inc.lm
Anode Responsivity ⁴	0.35	0.95	1.55	A/inc.lm
Anode Dark Current ⁵	-	1.0	10.0	nA
Pulse Height (⁵⁷ Co) ⁶	40	210	360	mV
Pulse Ht. Resl'n(⁶⁰ Co) ⁶	-	9.1	9.7	%
Count Rate Stability ⁷	-3	-	+3	%

Typical Performance Characteristics

The following information is provided in order that customers may predict the typical performance of a tube of this type in an application where TEST PARAMETER data may not be directly relevant. This material has been derived from TEST PARAMETER values and from special evaluations conducted in BURLE's Application Engineering Laboratory. This information is supplied for guidance only and is not intended to supersede the limiting ranges given in the TEST PARAMETER section.

Unless otherwise indicated, the power supply voltage (E) is applied to the tube's electrodes via a Voltage Divider Network (VDN) in accordance with the distribution listed in Table 1.

Parameter	Typ.	Units
Cathode Responsivity @ 370 nm	103	mA/W
Cathode Quantum Efficiency @ 370 nm	34.5	%
Multiplier Gain @ 1100 V ⁸	95000	-
Gain Exponent ⁹	6.65	-
Gain versus E	See Figure 2	
Anode Dark Current versus E ¹⁰	See Figure 3	
Anode Current Linearity ¹¹	See Figure 4	
Cathode Current Linearity versus Temp	See Figure 5	
Anode Responsivity Temp. Coefficient	See Figure 6	
Anode Dark Current versus Temperature ¹⁰	See Figure 7	
Peak-to-Valley Ratio ¹²	3.2	-
Sensitivity to External Magnetic Fields ¹³	21	%
Anode Pulse: ¹⁴		
Rise Time	xxx	ns
Fall Time	xxx	ns
FWHM	xxx	ns
Transit Time	xxx	ns
Transit Time Spread ¹⁵	xxx	ns

- In accordance with the Absolute maximum rating system as defined by the Electronic Industries Association Standard RS-239A, formulated by the JEDEC Electron Tube Council.
- In general, these types can be operated successfully over the temperature range specified for Storage. However, the user should be aware that performance may be affected by operating temperature changes. See, for example, **Figures 5, 6, and 7**; which show the effect of temperature on effective Cathode Current Linearity, Anode Responsivity, and Anode Dark Current, respectively.
- Under the following conditions: Light from a tungsten filament lamp operated at a color temperature of 2856 K is transmitted to the cathode through a blue filter (Corning C. S. No. 5-58, polished to 1/2 stock thickness). The value of flux on the filter is 0.1 millilumen and 300 volts is applied between cathode and all other electrodes connected as anode.
Cathode Responsivity = Cathode Current/Incident Flux
- Under the following conditions: Light from a tungsten filament lamp operated at a color temperature of 2856 K is transmitted to the cathode through a blue filter (Corning C. S. No. 5-58, polished to 1/2 stock thickness). The value of flux on the filter is 10 microlumens and test voltage (E) is 1100 volts.
Anode Responsivity = Anode Current/Incident Flux
- Anode dark current is measured at an ambient temperature of 22 degrees C. The test is conducted without special pre-conditioning in the dark, although care is taken to avoid excessive exposure to room lighting prior to test. Using conditions as described in Note 4, applied voltage is adjusted to obtain an anode current of 15 micro-amperes, after which light is extinguished and dark current measured. For a typical tube, Gain is approximately 150,000 under these conditions.
- Power supply voltage during this test is 1100 volts. The test is conducted with a gamma-ray source of sufficient intensity to produce between 5K and 15K counts per second from the device under test when positioned on the back side of the scintillator and along its principle axis. The scintillator is an encapsulated 2" long x 2" diameter NaI(Tl) crystal identified as BURLE No. 2004 or equivalent. The faceplate end of the scintillator is coupled to the faceplate of the photomultiplier by a coupling fluid such as mineral oil or equivalent. The anode of the photomultiplier is connected to a shunt RC network whose time constant is 10 +/- 2 microseconds and to the the input of a charge-sensitive preamplifier, Nuclear Data Model 520 or equivalent. A multi-channel analyzer (MCA) characterizes scintillation events in terms of an amplitude histogram as illustrated in **Figure 10**, on which are defined Pulse Height and Pulse Height Resolution. Pulse height is given in millivolts developed across a hypothetical load consisting of a capacitance of 100 picofarads shunted by a resistance of 100 kilohms.
- A light emitting diode (LED) is employed as a light source. The LED is driven by a suitable pulse generator so as to produce an anode pulse equivalent in amplitude and shape to that due to ⁵⁷Cobalt excitation of BURLE Scintillator No. 2004 or equivalent. Following operation for at least 10 seconds at a LED pulse rate of 4000 Hertz, pulse height is measured and recorded as PH_i. The LED pulse rate is changed to 40000 Hertz and the pulse height is immediately measured and recorded as PH_i. Count Rate Stability is defined as follows:
CRS = 100 x (PH_i - PH₁)/PH₁

Note - This test is conducted on a periodic sampling basis.

8. Gain (Current Amplification) is defined as:
 $\text{Gain} = \text{Anode Responsivity} / \text{Cathode Responsivity}$
9. The relationship between multiplier gain and power supply voltage (E) may be expressed as follows:
 $\text{Gain} = C \times E^a$
 where C = a constant and a = the gain exponent
10. In contrast to the case of Anode Dark Current specified under **Test Parameters and Limits**, data for this curve is taken following a minimum of 12 hours preconditioning in complete darkness. This avoids excitation of spurious dark current by ambient room lighting.
11. The photocathode is illuminated by a square light pulse of approximately 500 nanosecond duration. Introduction of successive values of optical attenuation into the input light path allows determination of the peak pulse anode current at which space charge effects cause deterioration of the normally linear light-in/current-out function. In designing a voltage divider network, precautions must be taken to maintain the appropriate voltage distribution in the presence of high average and/or high peak anode current values. This subject is treated in the BURLE Photomultiplier Handbook (TP-136) under the section titled "Photomultiplier Applications -Applied Voltage Considerations". Also in this section is a discussion on extending the linear operating range to higher levels of peak pulse anode current, using a so-called Tapered Divider. As a general rule of thumb, one may anticipate that careful choice of the "tapering" function should roughly double the peak pulse anode current at which linearity degrades to a given level.
12. The tube under test is exposed to a very low level of illumination such that photoelectrons are produced with temporal separation at a rate of approximately 10,000 per second. Power supply voltage is adjusted to obtain a gain of approximately one million. A multi-channel analyzer (MCA) characterizes single-electron signal events in terms of an amplitude histogram or spectrum as illustrated in **Figure 11**, on which is defined Peak-to-Valley Ratio. Also shown is the spectrum due to noise events in complete darkness, the contribution of which is included in the Peak-to-Valley value reported.
13. A magnetic field of 0.7 Gauss (approximating the earth's magnetic field), with flux lines perpendicular to the long axis of the unshielded tube under test, is rotated about the tube's axis in increments of 30 degrees. Using an appropriate light stimulus, the anode signal from the tube is recorded at each magnetic field orientation. Magnetic sensitivity is defined as follows:
 $\text{MFS} = (\text{Max. Signal} - \text{Min. Signal}) / (\text{Mean Signal})$
 The effect of the magnetic environment in which a tube is operated is greatly reduced by suitable magnetic shielding. For example, a 0.004" thick close-fitting magnetic shield of high permeability material, covering all glass surfaces other than the faceplate, will typically reduce the MFS value by approximately one order of magnitude.
14. The photocathode is fully illuminated by a delta-function light pulse of approximately 1 nanosecond duration and of intensity sufficient to create an anode current pulse of approximately x milliamperes (peak value). Power supply voltage during the test is xxxx volts. Rise and Fall Times, the FWHM value, and Transit Time are as defined on **Figure 12**. For estimating the effect of power supply voltage on these parameters, the following empirical relationship may be used:
 $\text{Parameter Value} = C \times E^b$
 where C = a constant and $b = -0.5$ to -0.7
15. The photocathode is fully illuminated by a delta-function light pulse of approximately 1 nanosecond duration. Power supply voltage during the test is xxxx volts. Transit Time Spread is defined as the full-width-half-maximum of the distribution of Transit Times about the mean Transit Time, observed over a period of time encompassing a series of illumination events. This parameter is sensitive to the number of photoelectrons created during each event, increasing in value as the photoelectron count decreases. The value given applies to approximately xxx photoelectrons.

Table 1

Voltage to be Provided by Divider	
Between	8.33% of Supply Voltage (E) Multiplied By:
Cathode and Focus Electrode	1.8
Focus Electrode and Dynode No.1	0.2
Dynode No.1 and Dynode No.2	1.0
Dynode No.2 and Dynode No.3	1.0
Dynode No.3 and Dynode No.4	1.0
Dynode No.4 and Dynode No.5	1.0
Dynode No.5 and Dynode No.6	1.0
Dynode No.6 and Dynode No.7	1.0
Dynode No.7 and Dynode No.8	1.0
Dynode No.8 and Dynode No.9	1.0
Dynode No.9 and Dynode No.10	1.0
Dynode No.10 and Anode	1.0
Cathode and Anode	12.0

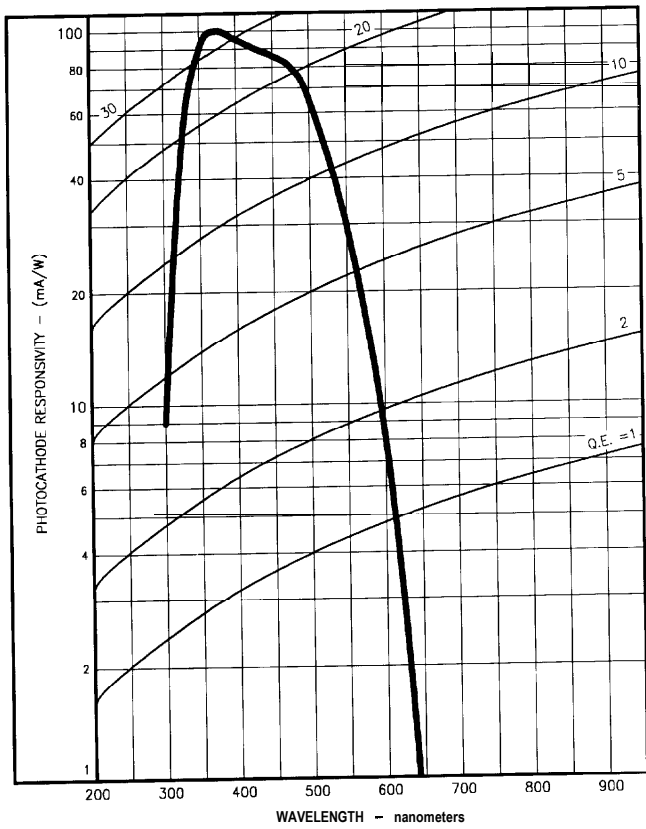


Figure 1 - Typical Photocathode Spectral Response Characteristic

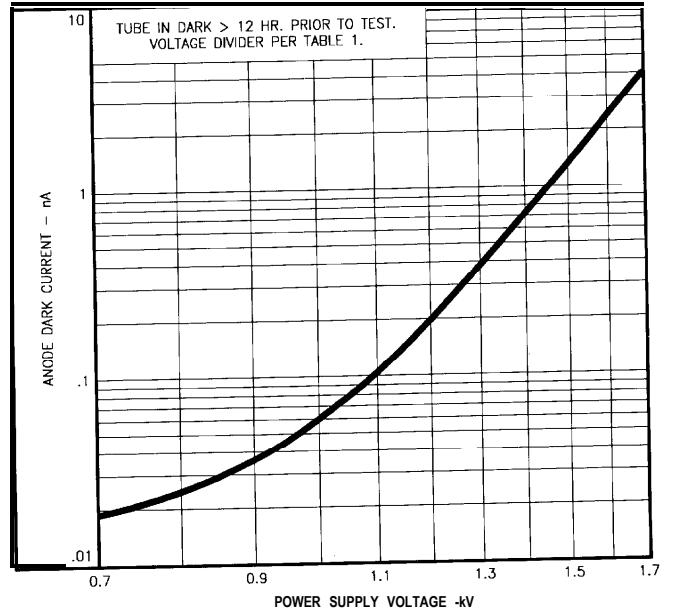


Figure 3 - Typical Anode Dark Current Characteristic

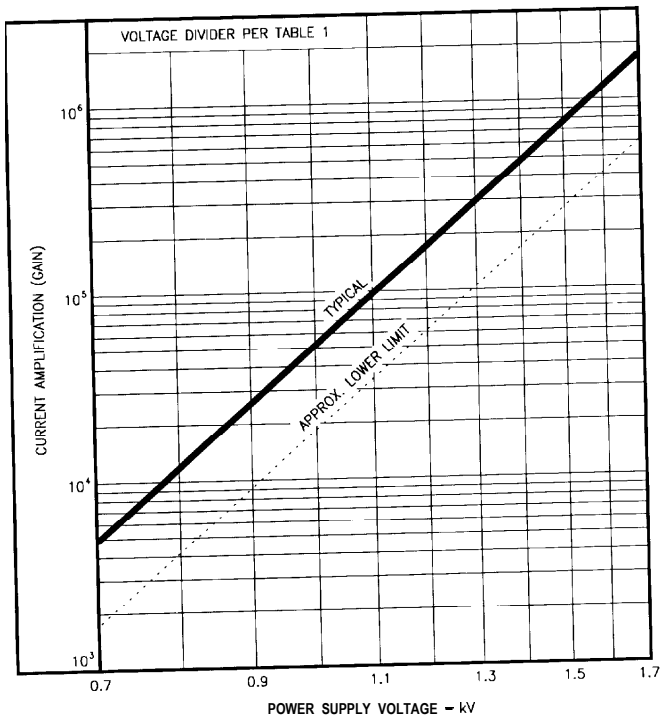


Figure 2 - Typical Current Amplification Characteristic

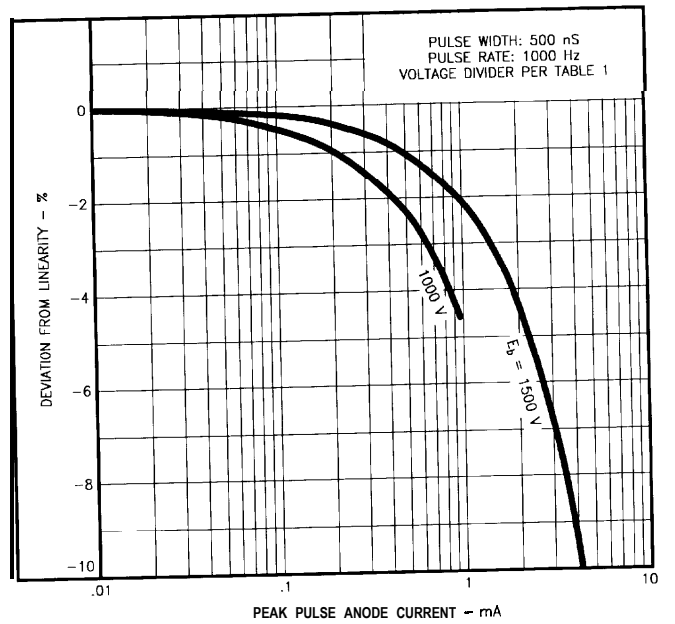


Figure 4 - Typical Anode Current Linearity Characteristics

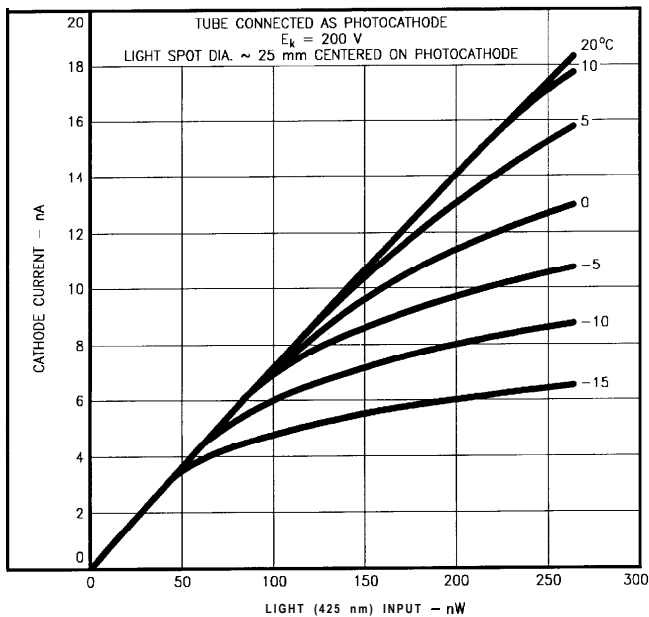


Figure 5 - Typical Cathode Current Linearity Characteristic Showing Effect of Operating Temperature

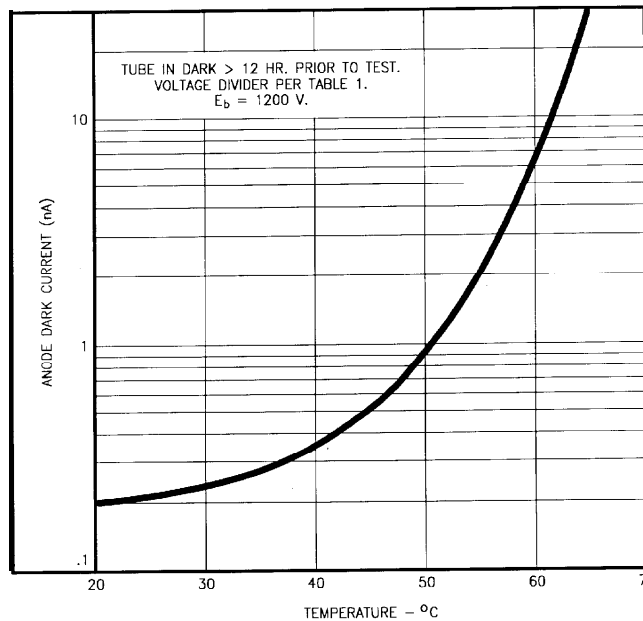


Figure 7 - Typical Effect of Operating Temperature on Anode Dark Current

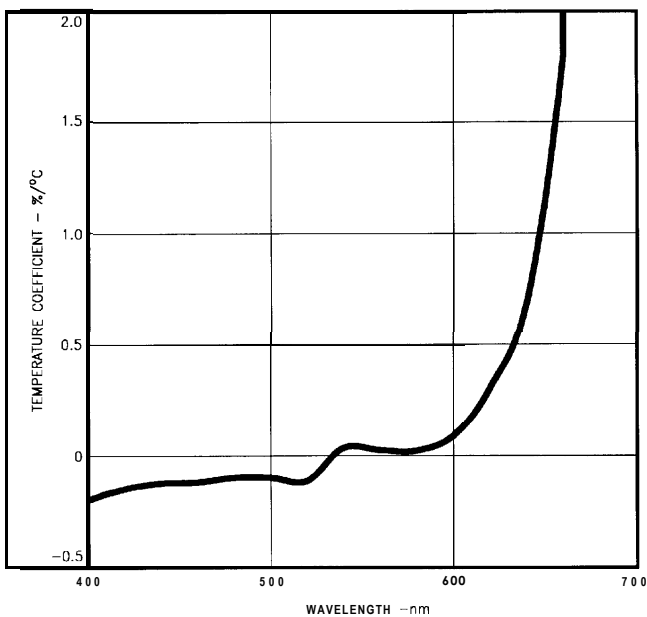
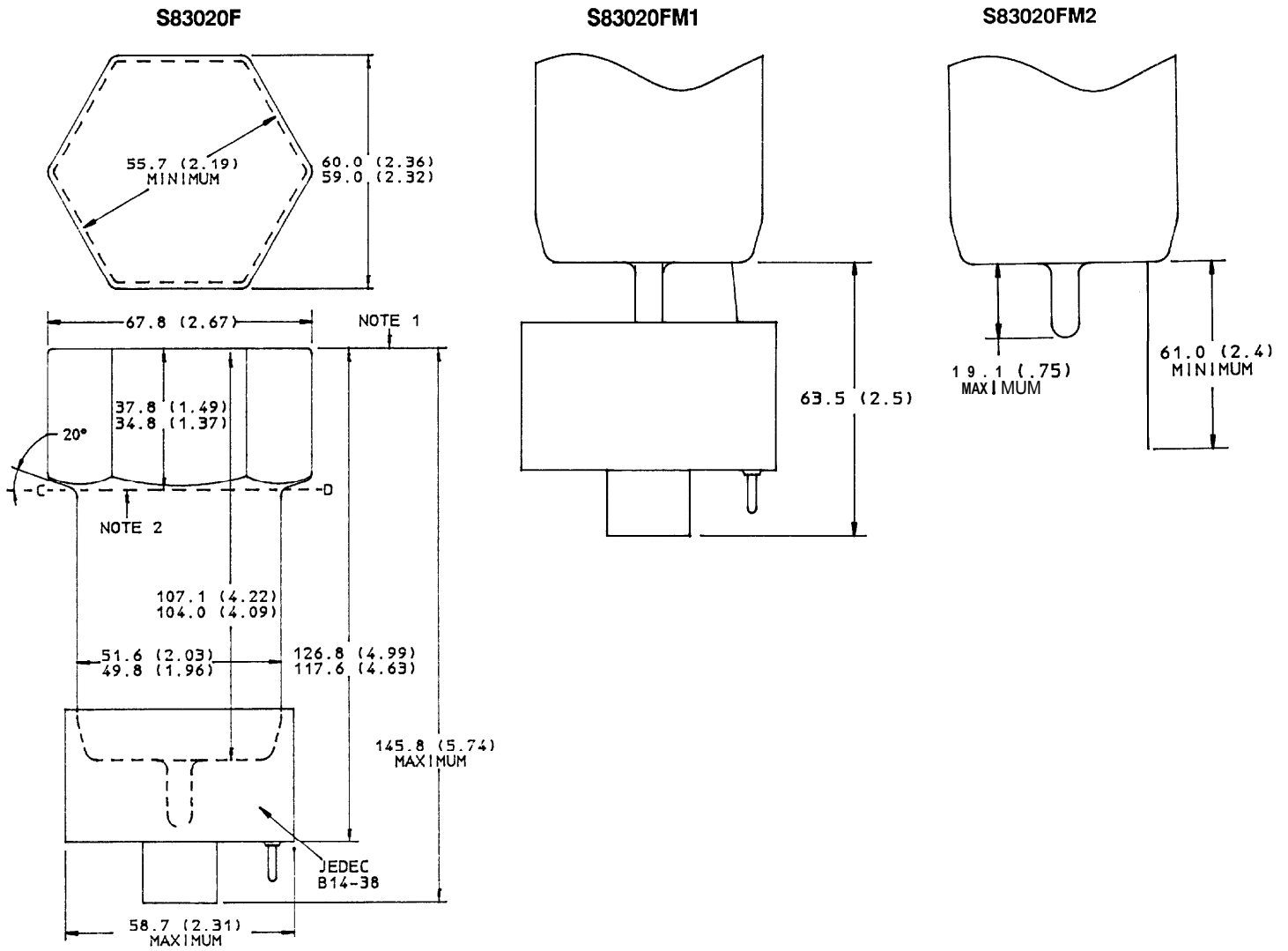


Figure 6 - Typical Anode Responsivity Temperature Characteristic

Warning - Personal Safety Hazards
 Electrical Shock - Operatin voltages applied to this device present a shock hazard.



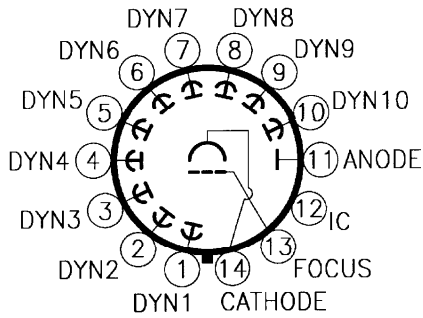
Dimensions are in millimeters unless otherwise stated. Dimension in parentheses are in inches and are derived from the basic inch dimensions. (One inch = 25.4 mm).

Note 1 - Deviation from flatness not to exceed 0.25 mm (0.01 inch) from peak to valley.

Note 2 - The C-D reference line is defined by the points where a 57.2 mm (2.25 in) wide "U" gauge, held parallel to the faceplate, contacts the bulb/neck transition.

Figure 8 - Dimensional Outlines

S83020F, S83020FM1

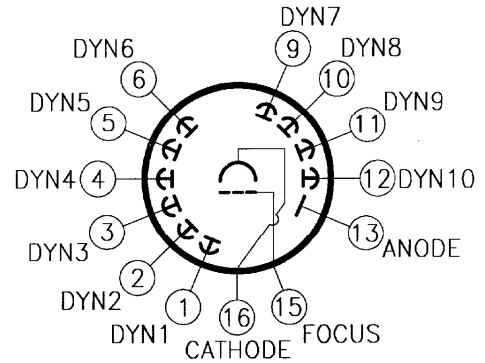


IC – INTERNAL CONNECTION, DO NOT USE

Bottom View

- Pin 1: Dynode No.1
- Pin 2: Dynode No.2
- Pin 3: Dynode No.3
- Pin 4: Dynode No.4
- Pin 5: Dynode No.5
- Pin 6: Dynode No.6
- Pin 7: Dynode No.7
- Pin 8: Dynode No.8
- Pin 9: Dynode No.9
- Pin 10: Dynode No.10
- Pin 11: Anode
- Pin 12: Internal Connection, Do Not Use
- Pin 13: Focusing Electrode
- Pin 14: Photocathode
- Base Pin Connections

S83020FM2, S83020FM1 (base removed)

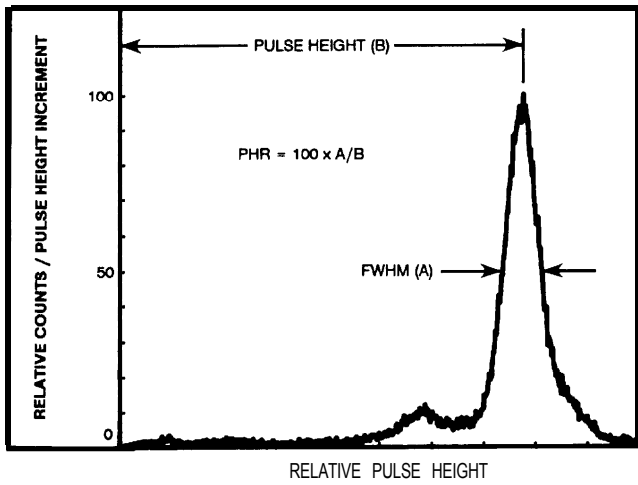


STEM LEADS 7, 8, & 14 ARE CLIPPED SHORT
CATHODE LEAD IDENTIFIED BY DOT ON STEM GLASS

Bottom View

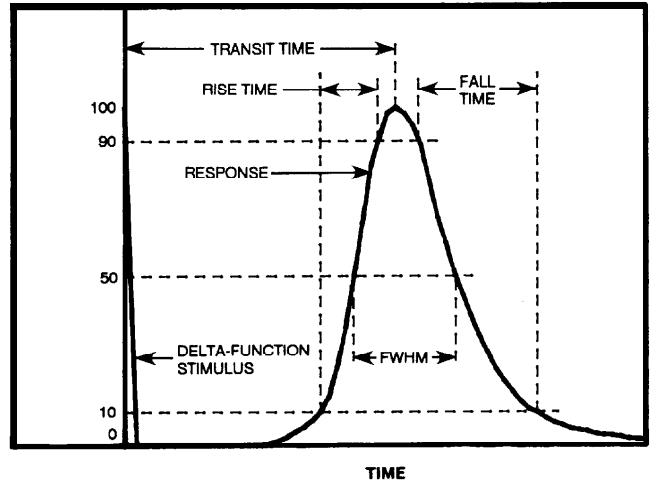
- Lead 1: Dynode No.1
- Lead 2: Dynode No.2
- Lead 3: Dynode No.3
- Lead 4: Dynode No.4
- Lead 5: Dynode No.5
- Lead 6: Dynode No.6
- Lead 7: Clipped Short
- Lead 8: Clipped Short
- Lead 9: Dynode No.7
- Lead 10: Dynode No.8
- Lead 11: Dynode No.9
- Lead 12: Dynode No.10
- Lead 13: Anode
- Lead 14: Clipped Short
- Lead 15: Focusing Electrode
- Lead 16: Photocathode
- Stem Lead Connections

Figure 9 - Base Pin and Stem Lead Connections



LS-8936

Figure 10 - Definitions, Pulse Height and Pulse Height Resolution



LS-8937

Figure 12 - Definitions, Anode Pulse Timing Parameters

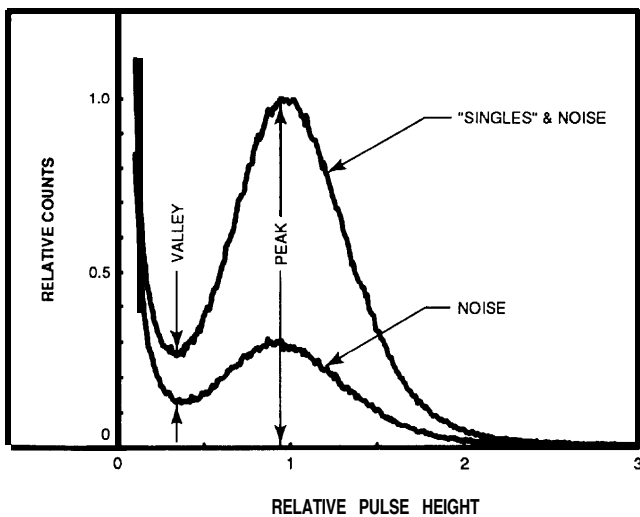


Figure 11 - Definition, Peak-to-Valley Ratio, Single Photoelectron Pulse Height Distribution

For additional information call 1-800-366-2875. In Europe call 44-93-276-5666.

All specifications subject to change without notice. Information furnished by BURLE INDUSTRIES, INC. is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility or liability is assumed by BURLE for its use, nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or other rights of BURLE INDUSTRIES, INC.

Copyright 1990 by BURLE TECHNOLOGIES, INC. All Rights Reserved.
 BURLE® and BURLE INDUSTRIES, INC.® are registered trademarks of BURLE TECHNOLOGIES, INC. Marca(s) Registrada(s).

BURLE INDUSTRIES, INC., Tube Products Division
 1000 New Holland Ave., Lancaster, PA 17601-5688 U.S.A.

Printed In U.S.A / 1-91
 S83020F