

Dissertação de Mestrado

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM AMPLIFICADOR PARA ESPECTROMETRIA GAMA

Airton José Porto

Dissertação de Mestrado

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE
AMPLIFICADOR PARA ESPECTROMETRIA
GAMA.**

Por

Airton José Porto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área: Ciências das radiações.

Orientador: Dr. Arno Heeren de Oliveira

Belo Horizonte, Julho de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

Porto, Airton José.

Projeto e construção de Amplificador para espectrometria gama. Airton José Porto

Orientador Dr. Arno Heeren de Oliveira - Belo Horizonte, 2011.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares) – PCTN / CCTN da Universidade Federal de Minas Gerais.

Quando fizeres algo nobre e belo e ninguém notar, não fique triste. Pois o sol toda manhã faz um lindo espetáculo e, no entanto, a maioria da platéia ainda dorme...

John Lennon

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre do meu lado em todos os momentos.

Agradeço a minha esposa, Lúcia Porto, pelo incentivo, aos meus filhos Tadeu e Emília, os quais me inspiraram e só me trazem alegria, felicidade, gratidão todos os dias.

Agradeço aos meus pais Maria Cruz Porto (nhânâ) e Érico Domingos Porto pelo muito que me ensinaram e pela formação do meu caráter.

Agradeço aos meus irmãos, Piedade, José Geraldo, Ducarmo, Luiz, Wilson, Rita Magna e Jorge que sempre torcem pelo meu crescimento profissional.

Agradeço aos mestres Dora e Tarcísio pela paciência, dedicação e o muito que me ensinaram.

Agradeço aos meus Colegas Francisco, Rubens, Antônio, Israel Leandro e Marcos Leporate pela troca de conhecimentos e incentivo.

Agradeço aos meus amigos do mestrado, na figura da turma ingressante no 2º semestre de 2009, pelas trocas de experiências.

Agradeço a instituição UFMG por me acolher nestes dois anos, me ensinando valores impagáveis e insubstituíveis os quais certamente utilizarei o resto da minha vida.

Em especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Arno Heeren de Oliveira, pela paciência, inteligência e verdadeira orientação que foram de extrema importância para que eu realizasse este trabalho de mestrado.

O TEXAS INSTRUMENTS pelo envio de dez amostras do amplificador de instrumentação de precisão de oito pinos INA 114, que está sendo utilizado no meu projeto.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um amplificador de custo reduzido para ser acoplado a um detector de iodeto de sódio para espectrometria gama. O projeto consiste de um amplificador - montado em placa de circuito impresso e blindagem de alumínio - com as seguintes características: alimentação com fonte simétrica de ± 12 V; filtro NOTCH para eliminar os sinais de ruídos de 60 Hz; conectores tipo BNC para entrada e medição dos sinais gerados pela radiação; ajuste do ganho de tensão e correção da tensão de *offset* através de potenciômetro externo nas entradas não inversoras do amplificador operacional. De maneira a testar a eficiência do amplificador, foram feitos testes de ganho de tensão e ajustes de *offset* mediante simulação no programa PROTEUS, e determinada a resposta de frequência em função do ganho de tensão utilizando um gerador de funções e um osciloscópio. Foi realizado o cálculo da incerteza utilizando três medições de tensão contínua na entrada e saída do dispositivo em questão, em uma faixa de 0,8V a 2V com multímetro digital. Por fim, para fins de validação do projeto, foi comparado o funcionamento do amplificador desenvolvido com um modelo comercializado, o amplificador 2012 da CANBERRA. Os testes foram realizados com as fontes de radiação de césio-137, amerício-241, bário-133 e o európio-152 utilizando um detector de iodeto de sódio (NaI(Tl)). Os resultados mostraram que o amplificador desenvolvido poderá ser utilizado em outros tipos de detectores como os proporcionais e a gás. Constatou-se, ainda, que os espectros obtidos com o amplificador mostraram-se resultados melhores que aqueles obtidos com o amplificador comercial.

Palavras chave: Amplificador de Instrumentação; detector de iodeto de sódio; espectrometria gama.

ABSTRACT

In this work we developed a low cost amplifier to be coupled to a sodium iodine detector for gamma spectrometry. The project consists of an amplifier - mounted on the printed circuit board and aluminum armor- with the following characteristics: power source with symmetric ± 12 V; NOTCH filter to eliminate noise signals of 60 Hz; BNC connectors for input and measurement of signals generated by radiation; setting voltage gain and offset correction voltage via external potentiometer in the non inverting input of operational amplifier. In order to test the efficiency of the amplifier, tests were made voltage gain and offset adjustments by PROTEUS simulation program, and determined the frequency response as a function of voltage gain using a function generator and an oscilloscope. Was calculated using three measurements of the uncertainty of the input voltage and output device in question, with a range of 0.8 V to 2 V with digital multimeter. Finally, for validation of the project, compared the operation of the amplifier designed with a model marketed, the amplifier CANBERRA of 2012. The tests were performed with the radiation sources of cesium-137, americium-241, barium-133 and europium-152 using a sodium iodide detector (NaI (TI)). The results showed that the amplifier can be used in developing other types of detectors such as proportional and gas. It was found, and also that the spectra obtained with the amplifier is shown better results than those obtained with the amplifier business.

Keywords: Instrumentation amplifier, sodium iodine detector, gamma spectrometry.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1: DETECTORES DE RADIAÇÃO.	3
FIGURA 2-2 REGIÕES DE OPERAÇÃO DOS DETECTORES Á GÁS	5
FIGURA 2-3 CÂMARA DE IONIZAÇÃO.	6
FIGURA 2-4 CONTADOR GEIGER-MULLER	7
FIGURA 2-5 ABSORÇÃO DE UM FÓTON DE ENERGIA.	8
FIGURA 2-6 TUBO FOTOMULTIPLICADOR (PM)	10
FIGURA 2-7 COEFICIENTES DE ABSORÇÃO PARA NaI EM FUNÇÃO DA ENERGIA DO FÓTON.....	11
FIGURA 2-8 REFINAMENTO DO SEMICONDUTOR	13
FIGURA 2-9 NÍVEIS DE ENERGIA DE UM ÁTOMO	13
FIGURA 2-10 BANDAS DE ENERGIA	14
FIGURA 2-11 CRISTAL TIPO N	15
FIGURA 2-12 CRISTAL TIPO P	16
FIGURA 2-13 JUNÇÃO PN EM ESTADO DE EQUILÍBRIO	17
FIGURA 2-14 JUNÇÃO PN POLARIZADA REVERSAMENTE.....	18
FIGURA 2-15 DIGRAMA DE BLOCOS DO AOP.....	19
FIGURA 3-1 DIAGRAMA DE BLOCOS DO MODELO 2012.	21
FIGURA 3-2 DIAGRAMA FUNCIONAL DO INA 114	22
FIGURA 3-3 PINAGEM E ENCAPSULAMENTO DIP DE 8 PINOS.....	23
FIGURA 3-4 PINAGEM E ENCAPSULAMENTO SOL DE 16 PINOS.....	24
FIGURA 3-5 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO.	24

FIGURA 3-6 DIAGRAMA ELÉTRICO DO DETECTOR DE RADIAÇÃO.....	27
FIGURA 3-7 PARÂMETROS Y.....	28
FIGURA 3-8 FILTRO NOTCH.	30
FIGURA 3-9 RESPOSTA DE FREQUÊNCIA DO FILTRO NOTCH (MATLAB).....	31
FIGURA 4-1 DIAGRAMA ELÉTRICO PARA SIMULAÇÃO DO AMPLIFICADOR.	32
FIGURA 4-2 FORMAS DE ONDA DE TENSÃO DO AMPLIFICADOR.	33
FIGURA 4-3 - GANHO DO AMPLIFICADOR.	33
FIGURA 4-4 RESPOSTA DE FREQUÊNCIA DO AMPLIFICADOR.	34
FIGURA 4-5 GRÁFICO DO GANHO DE TENSÃO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DO AMPLIFICADOR.	35
FIGURA 4-6 MONTAGEM PARA O ENSAIO DO AMPLIFICADOR.	37
FIGURA 4-7 GRÁFICO DE V_o VERSUS V_i DO PRIMEIRO ENSAIO.	37
FIGURA 4-8 GRÁFICO DE V_o VERSUS V_i DO SEGUNDO ENSAIO.	38
FIGURA 4-9 GRÁFICO DE V_o VERSUS V_i DO TERCEIRO ENSAIO.....	38
FIGURA 4-10 EXPERIMENTO UTILIZANDO O AMPLIFICADOR DA CANBERRA.....	40
FIGURA 4-11 EXPERIMENTO UTILIZANDO O AMPLIFICADOR DESENVOLVIDO.	41
FIGURA 4-12 ESPECTROMETRIA DO AMERÍCIO-241 E CÉSIO-137 UTILIZANDO O AMPLIFICADOR CANBERRA.....	43
FIGURA 4-13 ESPECTROMETRIA DO AMERÍCIO-241 E DO CÉSIO-137 UTILIZANDO O AMPLIFICADOR PROJETADO.	43
FIGURA 4-14 ESPECTROMETRIA DO BÁRIO-133 AMPLIFICADOR DA CANBERRA.....	44
FIGURA 4-15 ESPECTROMETRIA DO BÁRIO-133 AMPLIFICADOR PROJETADO.	44
FIGURA 4-16 ESPECTROMETRIA DO EURÓPIO-152 AMPLIFICADOR CANBERRA.	45
FIGURA 4-17 ESPECTROMETRIA DO EURÓPIO-152 AMPLIFICADOR PROJETADO.....	45
FIGURA 4-18 RADIAÇÕES EMITIDAS PELA FONTE DE CÉSIO-137 UTILIZANDO DETECTOR DE IODETO DE SÓDIO.....	46
FIGURA 4-19 RADIAÇÕES EMITIDAS PELA FONTE DE AMERÍCIO-241 UTILIZANDO O DETECTOR DE IODETO DE SÓDIO.	47

LISTA DE SIGLAS

CMRR	Razão de Rejeição de Modo comum
DRIFT	Sensibilidade á Temperatura
OFFSET	Deslocamento
DB	Decibel
DIP	<i>Dual In Line Package</i>
SOL	<i>Small Out Line Package</i>
NOTCH	Filtro Rejeita Frequência
NAI	Iodeto de Sódio
Gy	gray
Sv	sievert
IAEA	<i>Internacional Atomic Energy Agency</i>
AI	Amplificador de Instrumentação
GM	Geiger-Müller

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE SIGLAS	X
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 DETECTORES DE RADIAÇÃO	3
2.2 DETECTORES A GÁS	3
2.2.1 Regiões de operações para detectores a gás.....	3
2.2.2 Câmara de Ionização	5
2.2.3 Contador proporcional.....	6
2.2.4 Contador Geiger-Muller	6
2.3 CINTILADORES	8
2.4 DETECTORES DE ESTADO SÓLIDO.....	11
2.4.1 Processo de purificação do semicondutor	12
2.4.2 Níveis de Energia do Átomo.....	13
2.4.3 Bandas de Energia.....	14
2.4.4 Materiais Extrínsecos Tipos P e N	15
2.4.5 Detector Semicondutor.....	16
2.5 ESTUDO DO AMPLIFICADOR.....	18
2.5.1 As três faixas de frequências do amplificador	18
2.5.2 Diagrama de blocos do Amplificador Operacional.....	19

2.5.3	Características ideais de um AOP.....	19
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS		20
3.1	ESTUDO DO AMPLIFICADOR	20
3.2	AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO (AI)	21
3.3	AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO INA 114	22
3.3.1	As principais aplicações do INA 114 como amplificador são:	22
3.3.2	As características elétricas do AI INA 114 são:.....	23
3.3.3	Encapsulamento e Pinagem do INA 114	23
3.4	CÁLCULO DO GANHO DO AMPLIFICADOR	24
3.5	ELETRÔNICA ASSOCIADA AO DETECTOR NA DETECÇÃO DA RADIAÇÃO.....	27
3.6	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO FILTRO NOTCH	28
3.6.1	Parâmetros Y.....	28
3.6.2	Função de transferência	30
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS		32
4.1	SIMULAÇÃO DO CIRCUITO.....	32
4.2	TESTE DO GANHO DO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO	33
4.3	RESPOSTA DE FREQUÊNCIA DO AMPLIFICADOR.....	33
4.4	CÁLCULO DA INCERTEZA DO GANHO DO AMPLIFICADOR	35
4.5	CALCULO DA INCERTEZA.....	39
4.6	MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA O DETECTOR DE IODETO DE SÓDIO.....	40
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES		48
REFERÊNCIAS.....		50
ANEXO A.....		55
ANEXO B.....		57

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

O amplificador CANBERRA 2004 construído com componentes eletrônicos discretos como o transistor de efeito de campo (Jfet) 2N543 o transistor bipolar 2N3906, representa um dos últimos avanços tecnológicos de pré-amplificadores para a utilização com detectores de iodeto de sódio, semicondutores à temperatura ambiente, em particular o de silício do tipo barreira de superfície. O pré-amplificador é o dispositivo responsável pela conversão da carga de ionização estabelecida durante a interação da radiação, gerando um sinal de pulso em degrau como saída, sendo a amplitude proporcional à carga acumulada. O pulso decai exponencialmente com uma constante de tempo de 50 microssegundos (nominal) e este período de tempo é utilizado para separar os eventos sucessivos em aplicações de alta contagem (CANBERRA, 2004).

Os cintiladores utilizados para espectrometria gama possuem a propriedade de fornecer uma quantidade de luz proporcional a energia dissipada pelos raios gama (γ) incidentes, sendo que a função de transferência luz-corrente da fotomultiplicadora é linear. Assim se obtém pulsos de saída cuja amplitude é proporcional a energia perdida pelos fótons no cintilador. Com uma fonte monoenergética diante de um espectrômetro a cintilação, observa-se que os pulsos obtidos não possuem a mesma amplitude, pois eles são produzidos por diferentes tipos de interações, (PRICE, 1958; CROUTHAMEL, 1960; BIRKS, 1964; MAFRA, 1970, O'KELLEY, 1970; TANARRO SANZ, 1970).

A motivação do presente trabalho é o projeto e construção de um amplificador de custo reduzido para uso em espectrometria gama utilizando o detector de iodeto de sódio. As fontes radioativas do amerício-241, céσιο-137, bário-133 e európio-152, foram utilizadas para verificação da resposta do amplificador desenvolvido. O funcionamento do amplificador é comparado ao amplificador da CANBERRA mediante a montagem dos dois experimentos no laboratório do CCTN da UFMG. O amplificador foi desenvolvido aproveitando as características elétricas ideais do amplificador de instrumentação INA-114 da TEXAS INSTRUMENTS. É acoplada a entrada não inversora do primeiro amplificador um divisor de tensão para zerar o nível de tensão contínua, ou seja,

ajuste da tensão de *offset*, e o sinal gerado pelo detector é acoplado à outra entrada inversora. E ajuste de ganho direto de tensão do amplificador é feito por um resistor variável R_G .

Um filtro NOTCH, foi acoplado à saída do amplificador para eliminar ruídos gerados na frequência de 60 Hz, sendo que, alterando os valores do resistor (R) ou do capacitor (C), determina-se o sinal de frequência a ser rejeitado.

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, sendo este primeiro a introdução.

No Capítulo 2 foi realizada uma revisão sobre a espectrometria gama, os tipos de detectores e os dispositivos da literatura.

No Capítulo 3 é apresentado a metodologia e os materiais utilizados para construção do amplificador.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados com o amplificador desenvolvido e comparado seu funcionamento com o amplificador modelo 2012 da CANBERRA.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e proposições para trabalho futuros.

Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Detectores de Radiação

Os detectores de radiação são classificados segundo o sensor utilizado para converter a energia de radiação em um sinal elétrico que possa ser medido. A Figura 2-1 mostra um fluxograma com um resumo dos diversos tipos de detectores de radiação.

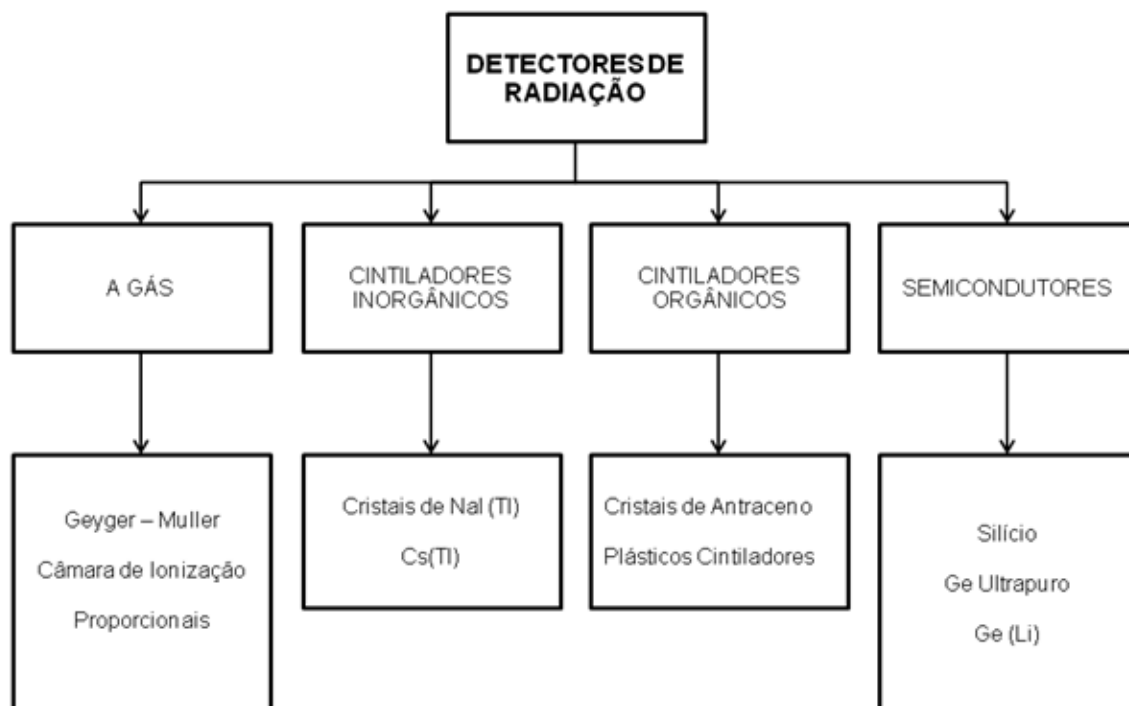


Figura 2-1: Detectores de radiação.

2.2 Detectores a Gás

Nos detectores a gás a interação das radiações com o volume sensível do detector pode provocar excitação e ionização dos seus átomos. Na ionização, são formados pares elétrons íon que dependem de características dos gases utilizados e da radiação ionizante.

2.2.1 Regiões de operações para detectores a gás

A Figura 2-2 apresenta as diferenças entre os vários tipos de contadores a gás, operando no modo de pulso. A amplitude do pulso gerado no volume sensível

do detector está relacionada com a tensão aplicada e com o campo elétrico. Para valores muito baixos de tensão o campo elétrico é insuficiente para acelerar os elétrons, o que caracteriza a região de recombinação. Com o aumento da tensão, os elétrons são acelerados para a região de saturação, modo normal de operação para Câmara de Ionização. Elevando-se ainda mais o nível de tensão os elétrons entram na região de multiplicação provocando um aumento na amplitude do pulso. Em seguida a multiplicação do gás será linear, e a carga recolhida será proporcional ao número de pares de íons criados pela radiação incidente no interior do contador. Esta região de proporcionalidade representa o modo de operação dos Contadores Proporcionais. Um aumento maior da tensão aplicada pode introduzir efeitos não lineares, o mais importante deles está relacionado com os íons positivos, que também são criados em cada processo de ionização secundária. Os elétrons livres são coletados rapidamente, em contrapartida os íons positivos se movem mais lentamente, portanto, para cada pulso gerado no interior do contador, uma nuvem de íons positivos se desloca em direção, ao catodo. Se a concentração destes íons é alta, o número de cargas criadas pode alterar significativamente a forma do campo elétrico, efeitos não lineares são observados, mas a multiplicação de carga é ainda dependente da intensidade do campo elétrico. Estes efeitos marcam o início da região da proporcionalidade limitada, mas a amplitude do pulso é ainda proporcional ao número de pares de íons inicialmente criados, mas não de forma linear. Se a tensão aplicada é suficientemente alta, a carga resultante criada pelos íons positivos podem se tornar completamente dominante na geração do pulso. Nestas condições o efeito avalanche ocorre até que um número suficiente de íons positivos seja criado, reduzindo assim o campo elétrico. O processo é então auto-limitado e terminará quando o mesmo número total de íons positivos seja formado independentemente do número de pares de íons inicial criados pela radiação incidente e, cada pulso de saída do detector é de mesma amplitude, independente da radiação incidente no detector. Esta é a região de operação do detector de Geiger-Muller (KNOLL, 1989).

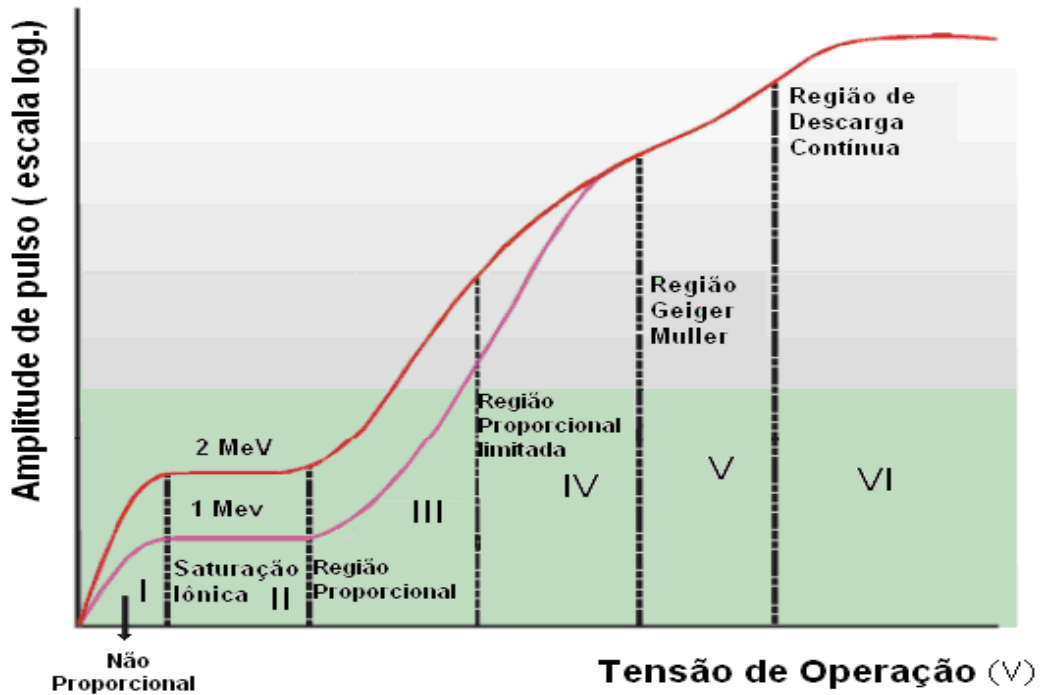


Figura 2-2 Regiões de Operação dos Detectores á Gás

Fonte: KNOLL, 1989. adapt.

2.2.2 Câmara de Ionização

A câmara de ionização opera na região II do gráfico da Figura 2-2, consiste normalmente de um cilindro preenchido, com um gás inerte. Uma haste metálica (ânodo) no centro do cilindro é mantida com carga positiva, enquanto a parede que contém o gás é negativa (Cátodo). A Figura 2-3 mostra que no instante em que a radiação atinge o interior do cilindro, ela interage com os átomos do gás, arrancando elétrons (energia da radiação maior que a energia de ligação), que se dirigem para o ânodo devido ao campo elétrico aplicado, sendo a corrente elétrica gerada no interior do detector proporcional ao número de pares de íons produzidos pela radiação incidente.

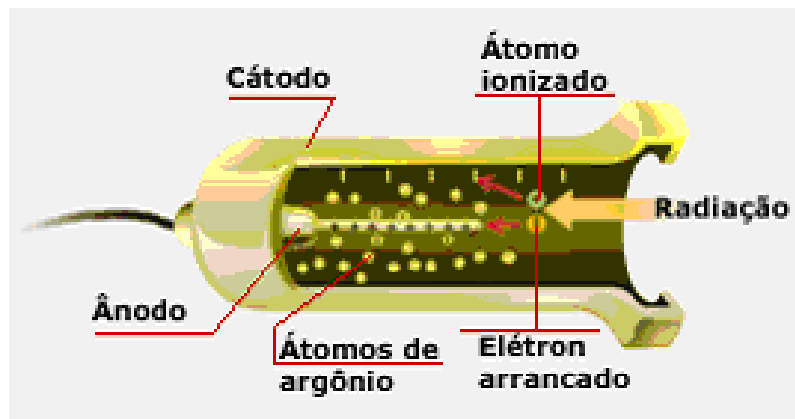


Figura 2-3 Câmara de Ionização.

Fonte: CARDOZO, 2011

2.2.3 Contador proporcional

Os contadores proporcionais operam na Região III do gráfico da Figura 2-2. Após a interação da radiação ionizante no volume gasoso, ocorre a aceleração dos íons produzidos que ionizam outras moléculas de gás não atingidas pela radiação, por isto, ocorre uma multiplicação do número de pares de íons originais por um fator constante (M). A quantidade de carga produzida, portanto, é multiplicada por M que por sua vez gera um pulso cuja altura é proporcional à energia da radiação incidente. Em um contador proporcional o fator multiplicação varia entre 10^3 a 10^5 (LILLEY, 2001).

2.2.4 Contador Geiger-Muller

Os Contadores Geiger-Muller (GM) operam na Região V do gráfico da Figura 2-2, sendo muito utilizado, desde 1928, para avaliar níveis de radiação ambiente. Possuem alta sensibilidade e projeto eletrônico simplificado e robusto, são portáteis e de fácil manipulação. São utilizados na detecção de diferentes tipos de radiação, mas não permitem a discriminação do tipo de radiação e nem da energia, o que torna sua aplicação bastante limitada (DAROS, 2011). Geralmente os GM são utilizados para detecção de radiação beta (β) e gama (γ). O aumento do campo elétrico provoca avalanches que passam a gerar novas avalanches, criando uma reação em cadeia (descarga Geiger), Esta descarga termina devido a acúmulo de

íons positivos no anodo. A Figura 2-4 apresenta o detector GM e seu esquema de funcionamento. Além desse modelo, encontram-se no mercado sistemas de detecção GM de vários tamanhos.

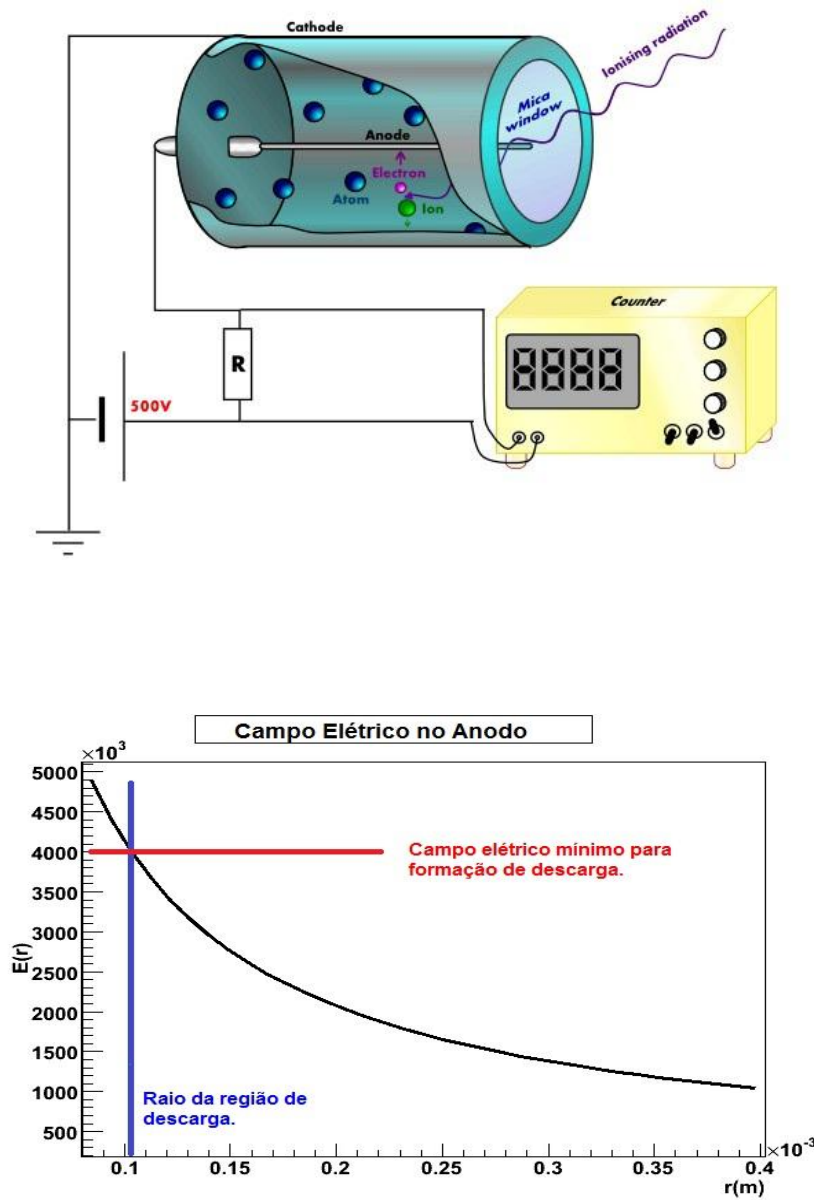


Figura 2-4 Contador Geiger-Muller

Fonte: TOMEI, 2009

2.3 Cintiladores

O cintilador mais comumente usado para detecção da energia de fótons é o cristal de iodeto de sódio contendo traços de tálio, NaI(Tl) (BLANC,COMMANY , TEYSSIER,1969)

O iodeto de sódio é um material que pode se apresentar na forma cristalina e que ao absorver radiações ionizantes emite fótons de cintilação. A Figura 2-5 apresenta um esquema do processo de absorção de um fóton de energia ($E > 10$ keV) e do aparecimento de fótons de cintilação.

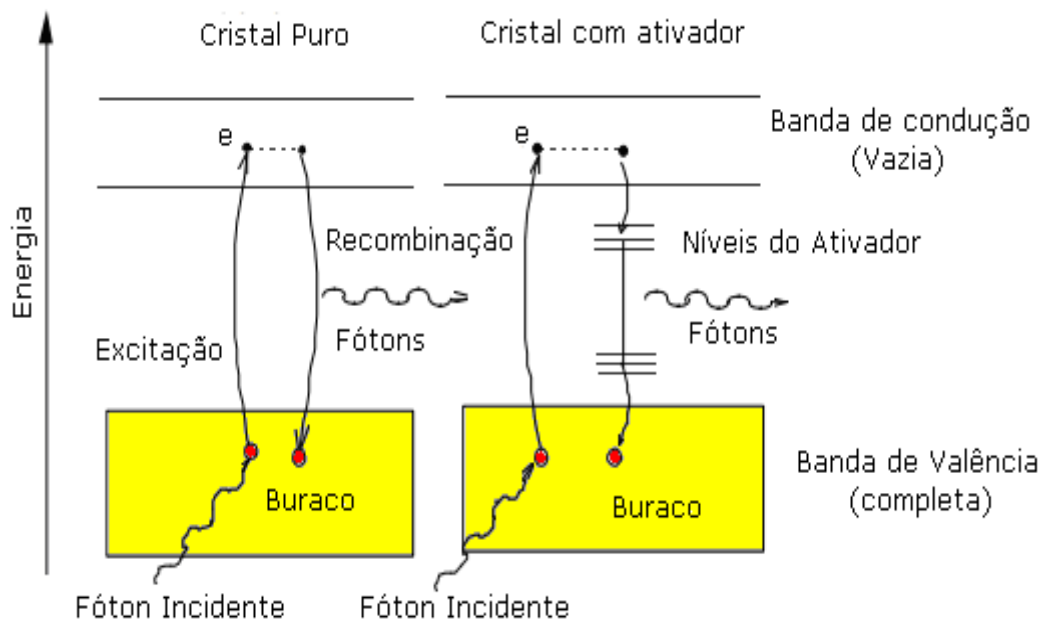


Figura 2-5 Absorção de um Fóton de Energia.
Fonte: PERALTA, 2011 adapt.

Num cristal puro, a energia da radiação incidente absorvida é cedida aos elétrons da banda de valência, sendo estes excitados para a banda de condução. Quando os elétrons da banda de condução se desexcitam perdem energia pela emissão de um fóton. Este fóton tem uma energia que é igual à energia perdida pelo elétron quando transitou da banda de condução para a banda de valência. Por esse motivo, pode ser absorvido por um elétron da banda de valência, que passará para banda de condução. O resultado deste processo é condicionado que o cristal seja opaco à sua radiação de cintilação e que a quantidade de luz emergente seja pequena. Para contornar esta situação utiliza-se pequenas quantidades de um

material, chamado ativador (no caso do NaI é usado tálio) cujo papel é o de criar níveis de energia ligeiramente acima da banda de valência e ligeiramente abaixo da banda de condução. Normalmente estes níveis de energia encontram-se vazios, mas quando um elétron é excitado na banda de condução, pode desexcitar-se em um dos níveis abaixo da banda de condução e em seguida o elétron pode desexcitar-se para os níveis acima da banda de valência emitindo fótons de cintilação e finalmente regressando à banda de valência. Como o fóton de cintilação não possui energia suficiente para fazer a transição de um elétron da banda de valência para a de condução, ele não é absorvido neste processo. Como o cristal é transparente para estes fótons, os mesmos conseguem atravessá-lo chegando ao fotomultiplicador. No caso do NAI (TI) o comprimento de onda dos fótons emitidos situa-se numa banda com o máximo nos 410 nm.

O tubo fotomultiplicador (PM) está representado na Figura 2-6. O fóton de cintilação é absorvido pelo fotocátodo do tubo, que é constituído por um material fotossensível depositado no interior da ampola de vidro. Do fotocátodo são liberados elétrons por efeito fotoelétrico. Por ação de um campo elétrico estes fotoelétrons são focalizados numa placa metálica do primeiro dínodo. Os dínodos são eletrodos metálicos colocados a potenciais cada vez mais positivos através de resistores em série com a fonte de alta tensão. Como o primeiro dínodo é mais positivo em relação ao fotocátodo, os elétrons são atraídos e ao se chocarem na placa metálica irão liberar outros elétrons, que por sua vez são atraídos para o segundo dínodo e assim sucessivamente, até serem coletados pelo anodo. Em cada estágio existe uma amplificação da corrente elétrica. A utilização de vários dínodos (em geral de 10 a 12) permite obter ganhos da ordem de 10^6 a 10^8 . Na saída do tubo fotomultiplicador o sinal de corrente é convertido em sinal de tensão através do uso de um resistor da ordem de valor elevado da ordem de um Megaohm ($\sim 1M\Omega$).

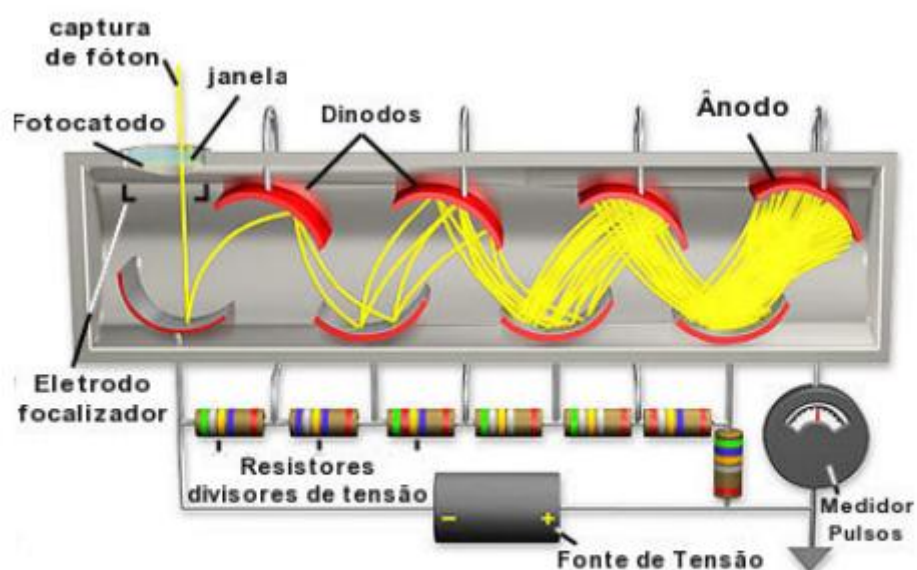


Figura 2-6 Tubo Fotomultiplicador (PM)
Fonte: PERALTA, 2011

No cristal de NaI(Tl), o efeito fotoelétrico é predominante para raios gama com energia menores que 260 keV e o efeito Compton para energias entre 260 keV e 6,9 MeV. A produção de par predomina sobre os outros dois efeitos para raios gama com energias maiores que 6,9 MeV (ATTIX , ROESCH, 1968). A Figura 2-7 mostra a variação dos coeficientes de absorção devido aos três efeitos em função da energia do fóton.

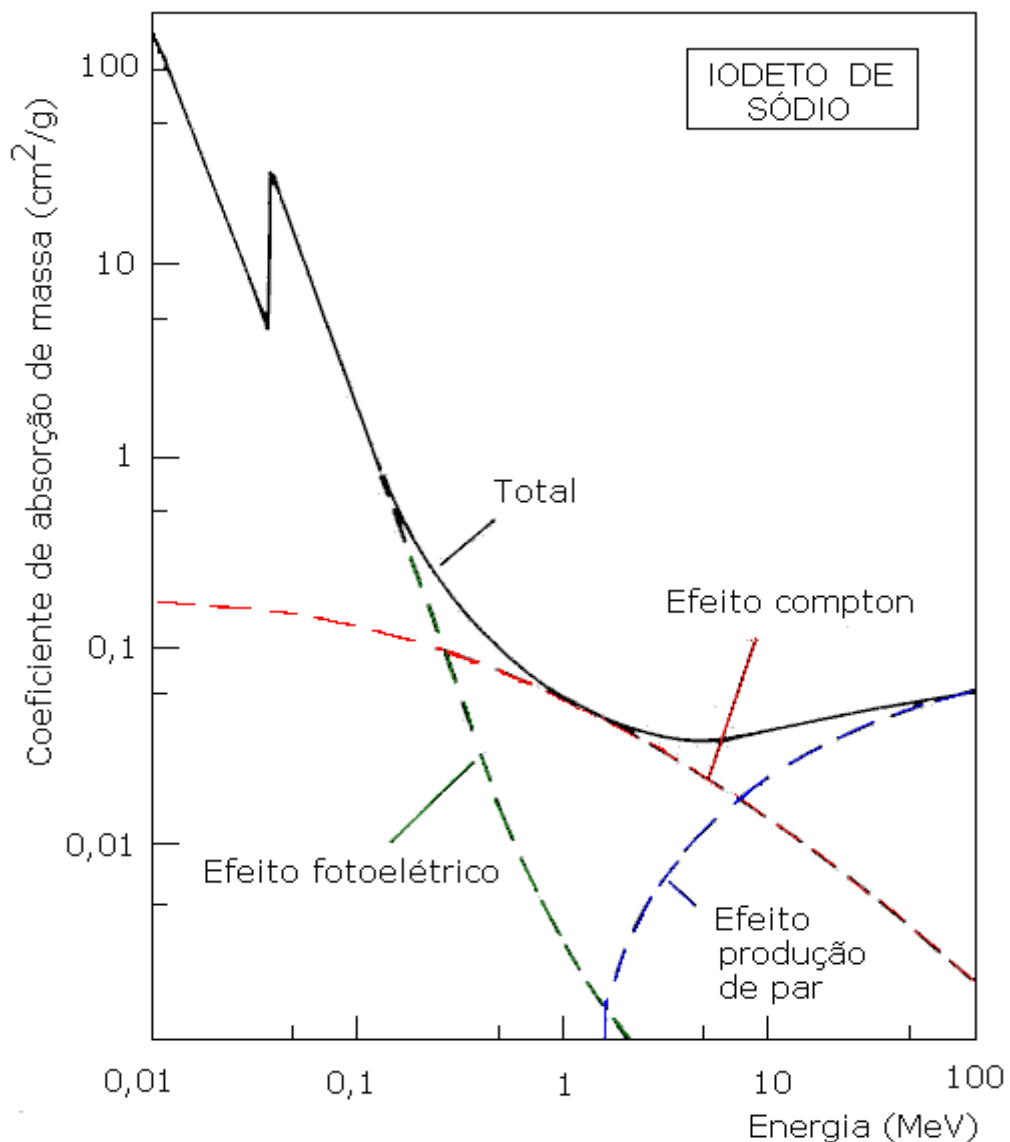


Figura 2-7 Coeficientes de absorção para NaI em função da energia do fóton
Fonte: ATTIX & ROESCH, 1968.

2.4 Detectores de Estado Sólido

Este tipo de detector tem a característica de um semiconductor, ou seja, são bons condutores a baixas temperaturas e vão se tornando maus condutores com a elevação da temperatura. Segundo (MALVINO, 1987) em temperaturas de zero absoluto, os elétrons não podem se mover dentro do cristal. Todos os elétrons de valência estão fortemente presos pelos átomos de silício porque eles fazem parte das ligações covalentes entre os átomos. Detectores semicondutores têm sido

usados em aplicações de física de alta energia na forma de detectores de pixel, microstrip , pois são populares devido à sua energia , resolução espacial e excelente tempo de resposta. Estes detectores são fabricados principalmente de silício, tradicionalmente de alta resistividade de cristal único, entretanto o arseneto de gálio(GaAs) podera ser no futuro uma outra alternativa (SMITH,96; CHMILL,94; CHMILL,93; e BEAUMONT,90). Estruturas similares foram propostas em diamante, sendo outra possível alternativa para detectores no futuro(BAUER,96). Após a primeira implementação de uma tecnologia planar em 1980 (KEMMER,80), os semicondutores se tornaram rapidamente detectores de alto desempenho. Recentes progressos na microtecnologia permitiram produzir em larga escala de confiança de detectores de projetos sofisticados, a um custo aceitável e com um tempo de resposta menor que 5 ns. Estes detectores permitem uma instalação relativamente simples.

2.4.1 Processo de purificação do semicondutor

Os primeiros passos para a fabricação do semicondutor é a obtenção do semicondutor com nível de pureza desejado. Níveis de impurezas da ordem de 1µg/g são requeridos para muitas fabricações de semicondutores. As matérias primas são submetidas às reações químicas e a processo de refinamento de zonas para formar um cristal poli cristalino com nível de pureza desejado. A Figura 2-8 mostra o aparato de refinamento que consiste de um barco de grafite ou quartzo para a contaminação mínima, um recipiente de quartzo, e um conjunto de bobinas de indução de RF (radiofrequência), onde as bobinas se movimentam ao longo do comprimento (BOYLESTAD, 1994).

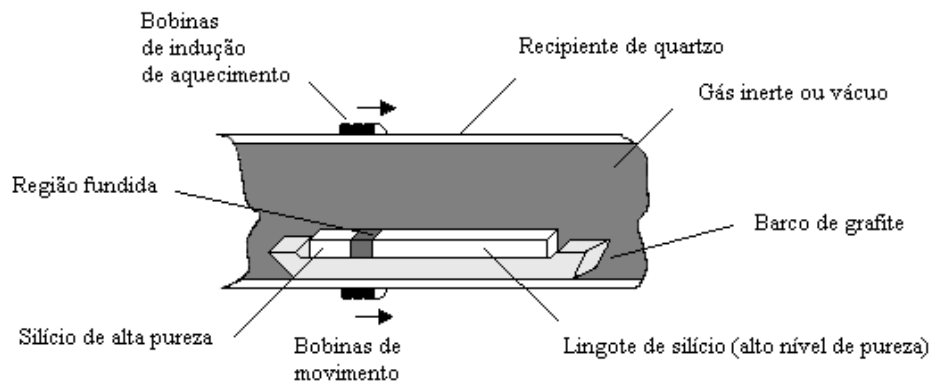


Figura 2-8 Refinamento do Semicondutor

Fonte: BOYLESTAD, 1994.

Quando o sinal de radiofrequência é aplicado à bobina induzirá uma corrente no lingote do semicondutor, a amplitude da corrente é elevada até um aquecimento suficiente para fundir aquela região do material semicondutor, com isso as impurezas ficarão em um estado mais líquido que o semicondutor, com isso as bobinas de indução são movimentadas para a direita, com isso as impurezas mais fluídas seguirão este caminho.

2.4.2 Níveis de Energia do Átomo

Na estrutura atômica isolada existem níveis de energia discretos (individuais) associados com cada elétron em órbita conforme Figura 2-9, onde cada material terá de fato seu próprio conjunto de níveis de energia.



Figura 2-9 Níveis de Energia de um Átomo
Fonte: BOYLESTAD, 2002.

suficiente para deixar a banda de valência se tornando livres ao atravessar o gap de energia (E_g) e entrar na banda de condução. Para o silício este gap é de 1,1 eV, enquanto que para o germânio é de 0,67 eV à temperatura ambiente. O menor gap para o germânio é responsável pelo número crescente de portadores criados naquele material, quando comparado ao silício à temperatura ambiente (BOYLESTAD, 1994).

As equações (1) e (2) mostram a variação do gap de energia com a temperatura absoluta (T) em Kelvin (K) para o silício e o germânio respectivamente (MILLMAN, 1981).

$$E_{\text{gap}}(T) = 1,2 - 3,6 \cdot 10^{-4} T \quad (1)$$

$$E_{\text{gap}}(T) = 0,785 - 2,23 \cdot 10^{-4} T \quad (2)$$

2.4.4 Materiais Extrínsecos Tipos P e N

Para formação do material tipo N é adicionado ao semiconductor puro um material pentavalente como: o antimônio, o arsênio ou o fósforo. A Figura 2-11 mostra criação de elétrons livres na estrutura do material semiconductor.

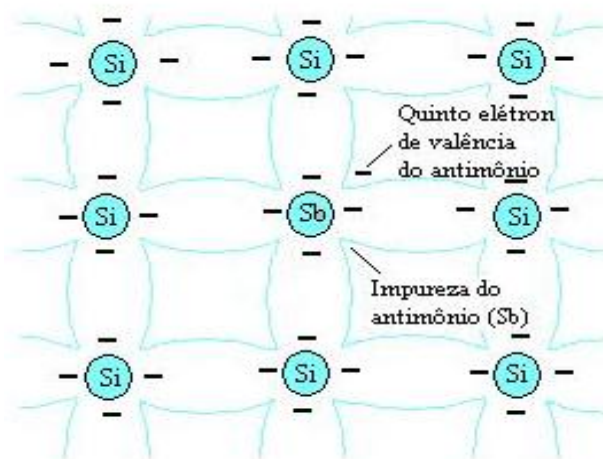


Figura 2-11 Cristal tipo N
Fonte: BOYLESTAD, 2002 adapt.

Para obtenção do cristal tipo P é adicionado ao semiconductor puro uma impureza trivalente. Os elementos geralmente utilizados são o gálio, o boro e o índio. Figura 2-12 é mostrada a criação das lacunas em um material semiconductor.

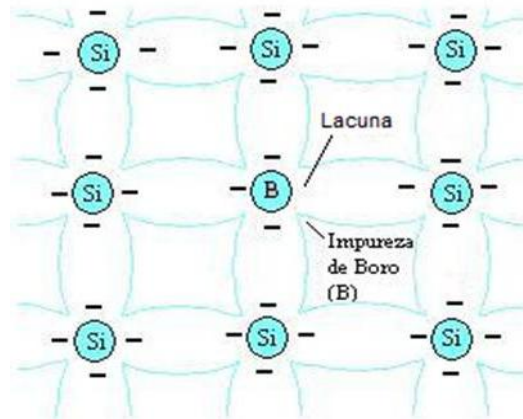


Figura 2-12 Cristal tipo P
Fonte: BOYLESTAD, 2002.

2.4.5 Detector Semiconductor

Os principais detectores semicondutores são os de junção PN e os intrínsecos, sendo que estes são geralmente feitos de germânio e os outros de silício (LIILEY, 2004). Os detectores de junção PN são constituídos por dois cristais semicondutores, sendo a estrutura tipo N dopada com impureza pentavalente e a estrutura tipo P com impureza trivalente. A estrutura tipo N apresenta um átomo doador de elétrons e por isso terá um nível de energia discreto próximo a banda de condução. Já a estrutura tipo P apresenta um átomo receptor de elétrons e conseqüentemente terá um nível de energia discreto próximo à banda de valência. Devido à repulsão mútua dos elétrons livres da estrutura N, alguns se difundem através da junção. Quando um elétron sai da região N a sua saída cria um átomo carregado positivamente (íon positivo) e ao penetrar na região P ele preencherá uma lacuna dando origem a um átomo carregado negativamente (íon negativo). À medida que número de íons aumenta a região próxima à junção está totalmente deplecionada de elétrons livres e lacunas. Esta região é denominada como camada de depleção (MALVINO, 1997). A intensidade da camada de depleção aumenta com cada elétron que atravessa a junção até que se atinja o equilíbrio. Neste ponto a

repulsão interna da camada de depleção interrompe a difusão dos elétrons livres como representado na Figura 2-13. Devido a este excesso de carga, próximo a região de depleção forma-se a zona do detector sensível a radiação incidente.

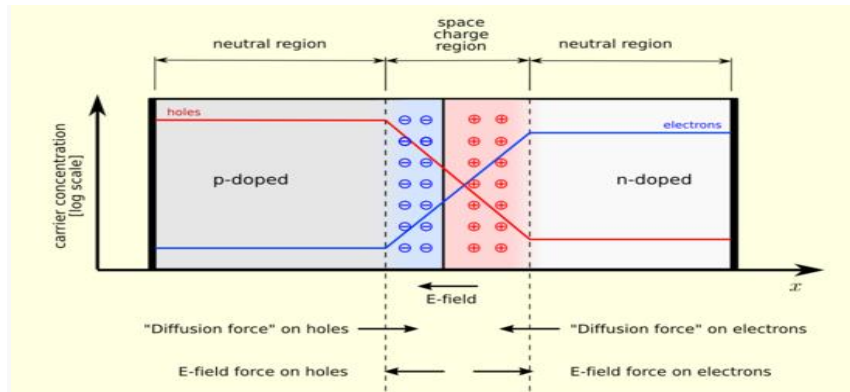


Figura 2-13 Junção PN em estado de equilíbrio

Fonte: (http://en.wikipedia.org/wiki/PN_junction)

Quando uma partícula ionizante penetra no detector produz pares elétron-lacunas ao longo da sua faixa, o número é proporcional à perda de energia. Um campo elétrico aplicado externamente separa os pares antes que eles se recombinam; elétrons para o ânodo, as lacunas para o catodo, a carga é coletada pelos eletrodos (coleta de carga). A carga recolhida produz um pulso de corrente no eletrodo, cuja integral é igual à carga total gerada pela partícula incidente, ou seja, é uma medida da energia depositada. Polarizando-se a junção PN reversamente conforme a Figura 2-14 a camada de depleção aumenta de acordo com a tensão externa aplicada. Quando se incide a radiação os elétrons livres criados irão se movimentar da estrutura de P para o tipo N produzindo uma corrente que é proporcional ao nível de radiação e aumentará com o acréscimo da tensão reversa aplicada.

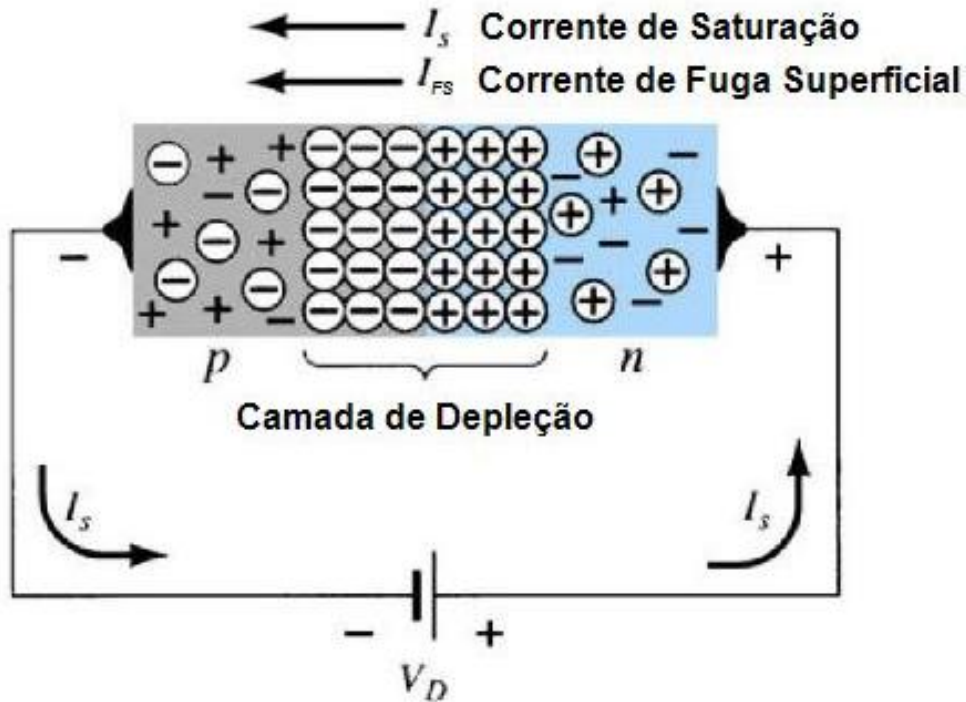


Figura 2-14 Junção PN Polarizada Reversamente
Fonte: BOYLESTAD, 2002. Adapt.

2.5 Estudo do Amplificador

2.5.1 As três faixas de frequências do amplificador

O ganho do amplificador é quase constante sobre uma larga faixa de frequência chamada faixas de frequências médias (midband). Nessa faixa de frequência, todas as capacitâncias (acoplamento, desvio e capacitâncias internas dos transistores) têm efeito desprezível e podem ser ignoradas no cálculo do ganho. Em altas frequências, no final do espectro, o ganho cai devido às capacitâncias internas e em baixas frequências, as capacitâncias de acoplamento e desvio funcionam como curto-circuito perfeitos e provocam a queda do ganho (SEDRA; SMITH, 2007)

2.5.2 Diagrama de blocos do Amplificador Operacional

A Figura 2-15, apresenta o diagrama de blocos de um amplificador operacional (AOP) básico, o primeiro estágio é um amplificador diferencial. Sua função é fornecer uma tensão CC diferencial amplificada e responsável direto pela resistência de entrada, corrente de polarização e pela razão de rejeição de modo comum (CMRR) do amplificador o segundo estágio é chamado de estágio deslocador e amplificador intermediário, cuja função é proporcionar maior ganho de sinal, bem como ajustar em um referencial “zero” o nível de tensão CC proveniente do estágio anterior. Este ajuste é importante para não alterar o referencial de saída do AOP, principalmente quando em operações em CA. O terceiro estágio é o acionador de saída. Este estágio proporciona uma baixa impedância de saída, suficiente para alimentar a carga típica especificada para o AOP, com alta impedância de entrada, normalmente, utiliza-se uma configuração tipo seguidor de tensão (JÚNIOR, 2003).

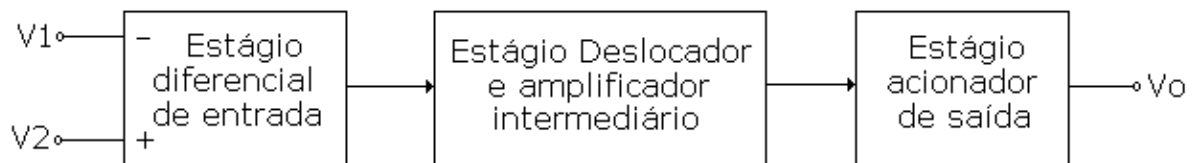


Figura 2-15 Diagrama de blocos do AOP
Fonte: JÚNIOR, 2003.

2.5.3 Características ideais de um AOP

- Resistência de entrada infinita;
- Resistência de saída nula;
- Ganho de tensão infinito;
- Resposta de frequência infinita (CC a infinitos Hertz);
- Insensibilidade à temperatura (DRIFT nulo);

Capítulo 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Estudo do amplificador

Foi realizado um estudo de operação do amplificador modelo 2012 fabricado pela CANBERRA (CANBERRA, 2004). Este modelo de amplificador é versátil permite a espectroscopia de alto desempenho, capaz de ser utilizado com uma variedade de detectores. Possui constante de tempo que variam de $0,5\mu\text{s}$ e $2\mu\text{s}$ para uso com detectores de NaI(Tl), proporcional a gás, barreira de superfície de silício, Ge(Li) e de germânio hiperpuro. A seleção do detector a ser utilizado no amplificador é feita no interior da unidade. De desempenho considerado excelente, pois não requer o ajustamento da taxa de contagem, porque possui um restaurador simétrico que compensa automaticamente para uma ampla gama de taxas de contagem.

A faixa de ganho, estabilidade de temperatura e especificações de não linearidade permitem que o amplificador modelo 2012 seja usado em muitas aplicações que exigem longos tempos de contagem. O diagrama de Blocos da Figura 3-1 mostra o modelo 2012 sendo usado com quatro tipos diferentes de detectores, cada um utilizando o modelo de 2012 como o elemento amplificador. Cada uma das saídas do amplificador é dirigida para uma placa de 1024 canais de memória do MCA por um mixer / roteador. O detector de Ge(Li) e os detectores a gás utilizam uma constante de tempo de $2\mu\text{s}$ em formação constante, enquanto o detector de barreira de superfície usa $0,5\mu\text{s}$. Para o detector iodeto de sódio acoplado ao pré-amplificador modelo 2012 é utilizada a saída unipolar para a ocorrência de tempo de um evento de gama de cada detector. As duas saídas de tempo SCA são traduzidas por um TAC em um espectro de pulso proporcional à diferença de tempo entre os sinais de saída.

Baseado neste sistema foi desenvolvido um amplificador de baixo custo para ser usado com o detector de iodeto de sódio para espectrometria gama que substitui o amplificador e o pré-amplificador do diagrama de blocos apresentado no diagrama da Figura 3-1.

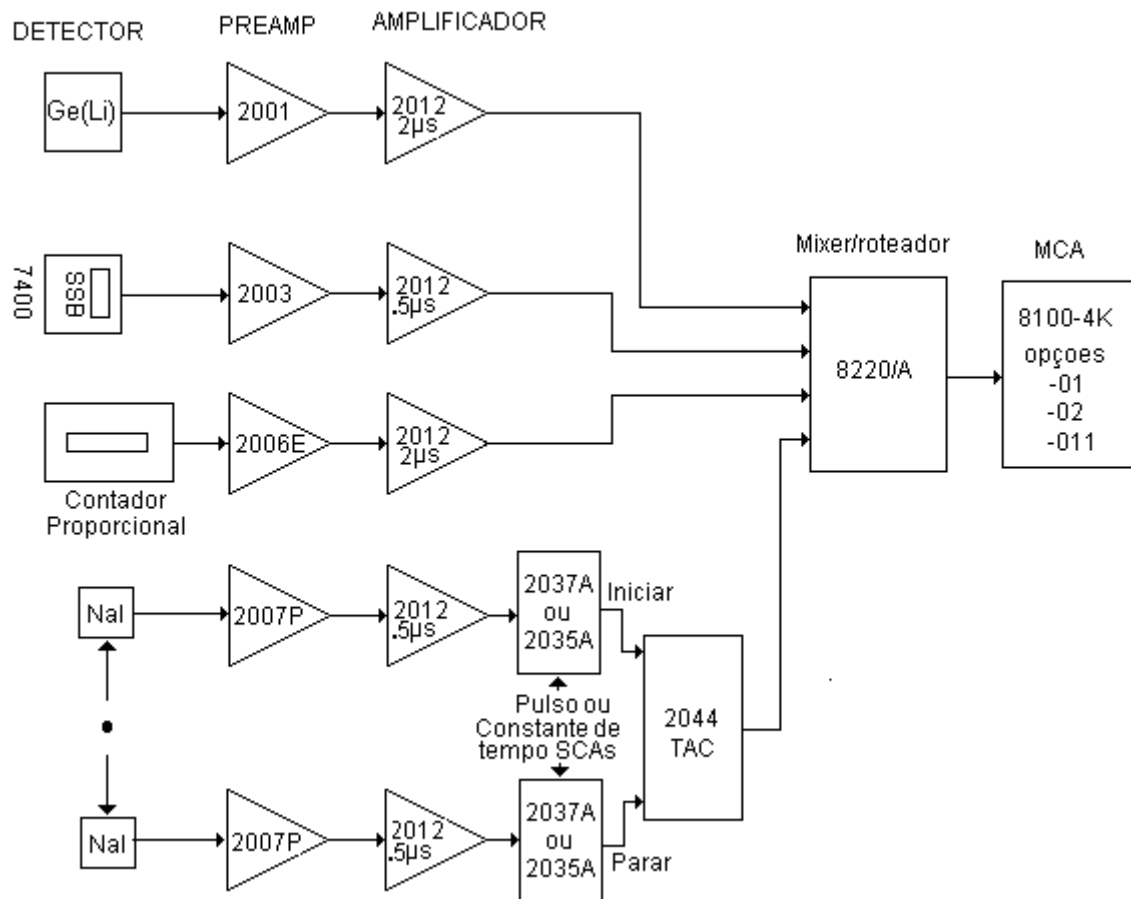


Figura 3-1 Diagrama de blocos do modelo 2012.
Fonte: CANBERRA, 2011.

3.2 Amplificador de instrumentação (AI)

Os amplificadores de instrumentação são amplificadores especiais, projetados com o objetivo de se obter algumas características de um amplificador especial. Essas características são:

- Resistência de entrada extremamente alta;
- Resistência de saída menor que a dos amplificadores operacionais comuns;
- Ganho de tensão em malha aberta muito superior ao dos amplificadores operacionais comuns;
- Tensão de OFFSET de entrada muito baixa;
- DRIFT extremamente baixo;

3.3 Amplificador de Instrumentação INA 114

O amplificador de instrumentação utilizado neste projeto foi o INA 114 da TEXAS INSTRUMENTS, cujo diagrama eletrônico é apresentado na Figura 3-2. Este AI apresenta um baixo custo, boa precisão, com proteção contra sobre tensões em suas entradas, com três amplificadores internos, possui alta impedância de entrada em função dos estágios não inversores em sua entrada. Permite o controle do ganho de tensão através de um resistor externo R_G .

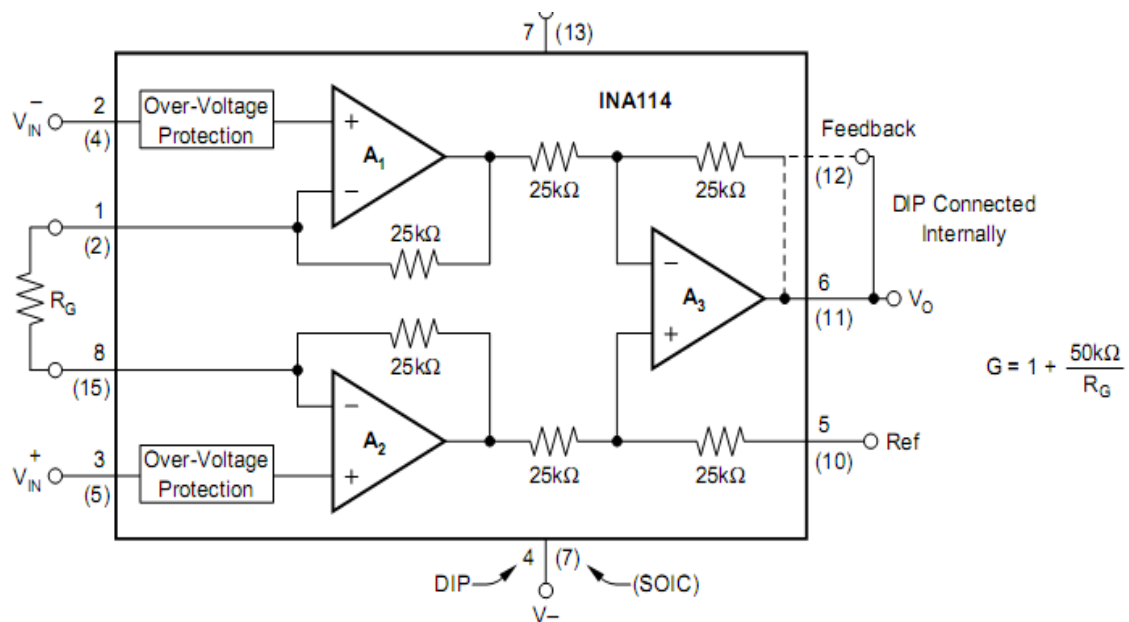


Figura 3-2 Diagrama funcional do INA 114
Fonte: TEXAS INSTRUMENTS, 2010.

3.3.1 As principais aplicações do INA 114 como amplificador são:

- em ponte de Wheatstone;
- em sinais de termopares;
- em sinais de Termistores;
- em instrumentação médica e
- na aquisição de dados;

3.3.2 As características elétricas do AI INA 114 são:

- Tensão de OFFSET menor que $50\mu\text{V}$;
- DRIFT menor que $0,25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$;
- CMRR maior 115 dB;
- Proteção contra sobretensão de entrada de $\pm 40\text{V}$;
- Corrente quiescente menor que 3mA;
- Encapsulamento para 8 e 16 pinos;

3.3.3 Encapsulamento e Pinagem do INA 114

O amplificador INA 114 é apresentado em duas formas de encapsulamento, o DIP de 8 pinos conforme Figura 3-3 e o SOL de 16 pinos conforme Figura 3-4, neste projeto foi utilizado o encapsulamento de 8 pinos, sendo a função de cada pino:

- Pino 1 Ajuste do Ganho.
- Pino 2 Entrada Inversora.
- Pino 3 Entrada não Inversora.
- Pino 4 Alimentação Negativa.
- Pino 5 aterramento.
- Pino 6 Saída.
- Pino 7 Alimentação Positiva.
- Pino 8 Ajuste do Ganho

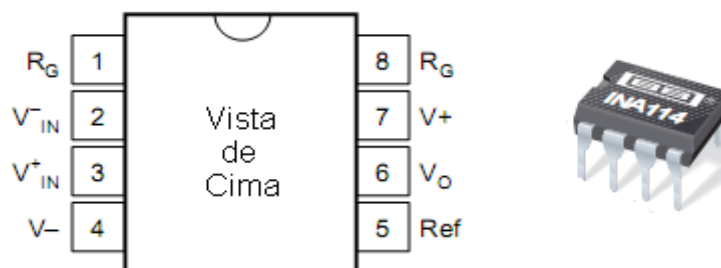


Figura 3-3 Pinagem e encapsulamento DIP de 8 pinos.

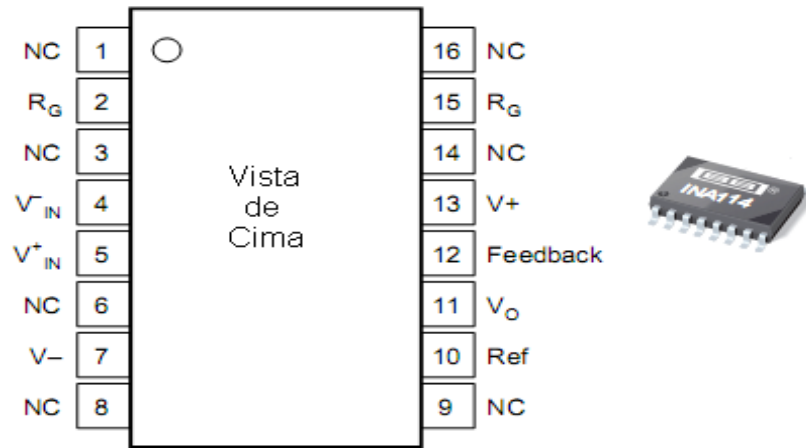


Figura 3-4 Pinagem e encapsulamento SOL de 16 pinos.

3.4 Cálculo do Ganho do Amplificador

A Figura 3-5 mostra o digrama elétrico de um amplificador de instrumentação, os a amplificadores 1 e 2 estão na configuração não inversora com realimentação negativa o que proporciona uma alta impedância de entrada e o amplificador 3 funciona como um subtrator e o controle do ganho são feito através do resistor R_G .

Para a dedução da expressão de V_o em função de V_{in1} , V_{in2} , R_G e R os amplificadores operacionais são considerados ideais, ou seja, sendo sua corrente de polarização de entrada igual a zero

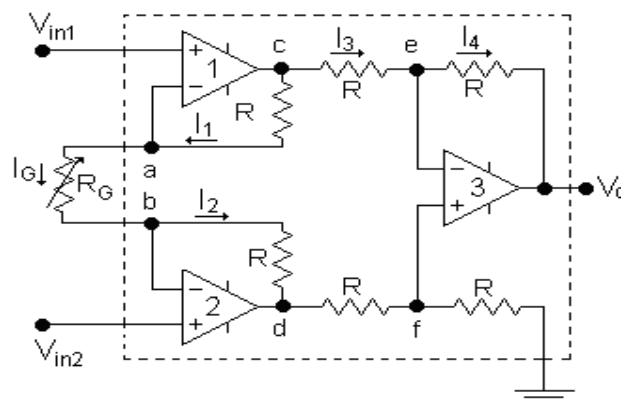


Figura 3-5 Amplificador de Instrumentação.

No ponto “a” do diagrama da Figura 3-5 tem-se a igualdade:

$$I_1 = I_G$$

O que equivale a:

$$\frac{V_c - V_a}{R} = \frac{V_a - V_b}{R_G}$$

Como $V_a = V_{in1}$ e $V_b = V_{in2}$ obtém-se:

$$\frac{V_c - V_{in1}}{R} = \frac{V_{in1} - V_{in2}}{R_G}$$

Logo:

$$V_c = V_{in1} + \frac{V_{in1} \cdot R}{R_G} - \frac{V_{in2} \cdot R}{R_G} \quad (3)$$

No ponto “b” do diagrama da Figura 3-5 tem-se a igualdade:

$$I_G = I_2$$

O que equivale a:

$$\frac{V_a - V_b}{R_G} = \frac{V_b - V_d}{R}$$

Como $V_a = V_{in1}$ e $V_b = V_{in2}$ obtém-se:

$$\frac{V_{in1} - V_{in2}}{R_G} = \frac{V_{in2} - V_d}{R}$$

Logo:

$$V_d = V_{in2} + \frac{V_{in2} \cdot R}{R_G} - \frac{V_{in1} \cdot R}{R_G} \quad (4)$$

Aplicando o teorema do divisor de tensão no ponto f obtém-se:

$$V_f = \frac{V_d \cdot R}{R + R}$$

$$V_f = \frac{V_d}{2} \quad (5)$$

No ponto “e” do diagrama da Figura 3-5 tem-se a igualdade:

$$I_3 = I_4$$

O que equivale a:

$$\frac{V_c - V_e}{R} = \frac{V_e - V_o}{R}$$

$$V_o = 2V_e - V_c$$

Como $V_e = V_f$ obtém-se:

$$V_o = 2V_f - V_c$$

$$V_o = V_d - V_c \quad (6)$$

$$V_o = V_{in2} + \frac{V_{in2} \cdot R}{R_G} - \frac{V_{in1} \cdot R}{R_G} - \left(\frac{V_{in1} \cdot R}{R_G} - \frac{V_{in2} \cdot R}{R_G} \right)$$

$$V_o = V_{in2} \left(1 + \frac{2R}{R_G} \right) - V_{in1} \left(1 + \frac{2R}{R_G} \right)$$

$$V_o = (V_{in2} - V_{in1}) \left(1 + \frac{2R}{R_G} \right) \quad (7)$$

A tensão de saída V_o depende da diferença entre as tensões da entrada não inversora do amplificador um e a tensão da entrada não inversora do amplificador 2 e o ganho do amplificador é controlado pelo resistor R_G . A TABELA 1 mostra a variação do ganho de tensão do INA 114 em função de R_G .

TABELA 1
Controle do ganho do amplificador INA 114

Ganho desejado	RG (Ω)	Resistor de precisão 1% (Ω)
1	∞	∞
2	50K	49,9K
5	12,5K	12,4K
10	5,556K	5,62K
20	2,632K	2,61K
50	1,02K	1,02K
100	505,1	511
200	251,3	249
500	100,2	100
1000	50,05	49,9
2000	25,01	24,9
5000	10	10
10000	5,001	4,99

3.5 Eletrônica Associada ao Detector na detecção da Radiação

A Figura 3-6 apresenta o circuito, onde a tensão de saída esta relacionada com as diferenças entre os sinais de entrada V_{in1} e V_{in2} , a entrada V_{in1} é para o ajuste de zero, ou seja, a tensão de offset, em seguida o sinal de radiação é aplicado na entrada V_{in2} do AOP 2, amplificado, passa pelo filtro NOTCH de 60 Hz e é aplicado ao dispositivo de medição.

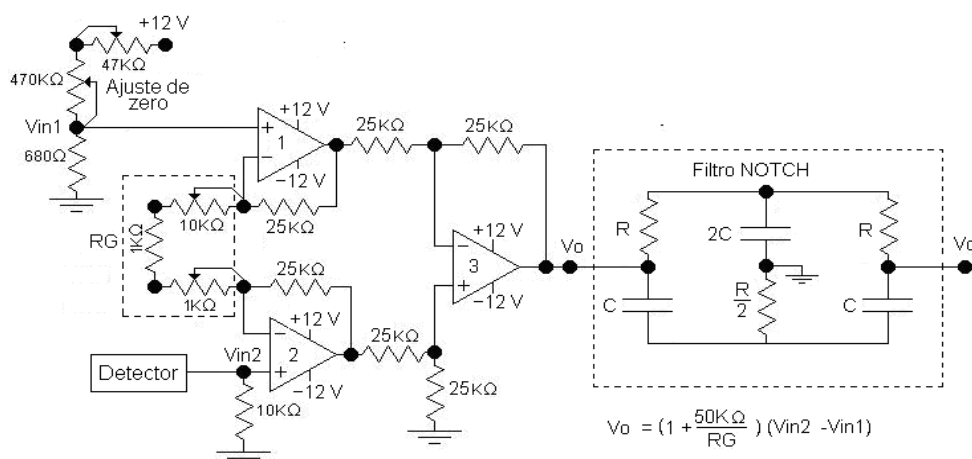


Figura 3-6 Diagrama elétrico do detector de radiação.

A tensão de saída V_o do amplificador de instrumentação INA 114 é dada pela equação (8).

$$V_o = \left(1 + \frac{50K\Omega}{R_G} \right) (V_{in2} - V_{in1}) \quad (8)$$

Para eliminar o ruído de 60Hz foi utilizado o filtro NOTCH ,que está na saída (V_o) do amplificador operacional três. Esta frequência de corte é calculada pela equação (9).

$$F_l = \frac{1}{2\pi RC} \quad (9)$$

Para $R = 120K\Omega$ e $C = 22nF$ a tensão de saída V_o será igual a zero para a frequência de 60,3 Hz.

3.6 Função de transferência do filtro NOTCH

A função de transferência do filtro NOTCH, foi desenvolvida utilizando os parâmetros Y dos quadripolos. (ALEXANDER; SADIKU, 2003)

3.6.1 Parâmetros Y

Aplicando-se o teorema de Norton a rede linear de duas portas, tem-se o circuito equivalente mostrado na Figura 3-7(MALVINO, 1997). Cada porta é formada por uma admitância (Y) em paralelo a uma fonte de corrente (I).

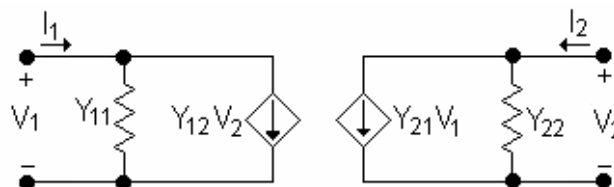


Figura 3-7 Parâmetros Y.

As equações obtidas segundo as leis de Kirchhoff para este modelo são as equações (10) e (11):

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \quad (10)$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \quad (11)$$

Onde:

$Y \rightarrow$ admitância(S)

$V \rightarrow$ tensão(V)

$I \rightarrow$ corrente(A)

Considerando $V_1 = 0V$ obtém-se que:

$$Y_{12} = \frac{I_1}{V_2}$$

$$Y_{22} = \frac{I_2}{V_2}$$

Considerando $V_2 = 0V$ obtém-se que:

$$Y_{11} = \frac{I_1}{V_1}$$

$$Y_{21} = \frac{I_2}{V_1}$$

Para $I_2 = 0V$ o ganho direto de tensão (A_V) é dado pela equação (12).

$$A_V = -\frac{Y_{21}}{Y_{22}} \quad (12)$$

3.6.2 Função de transferência

O filtro NOTCH, foi redesenhado o seu circuito equivalente com duas redes de três terminais da Figura 3-8. Devido a sua forma é chamada de uma rede T. Utilizando a transformada de LAPLACE e o teorema da superposição (EDMINISTER, 2003) obtém-se a equação (13).

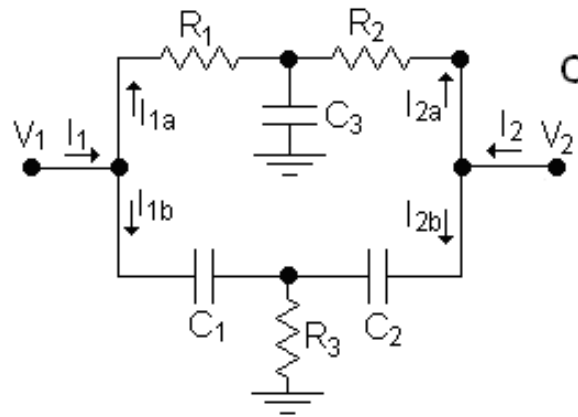


Figura 3-8 Filtro NOTCH.

Onde

$$R_1 = R_2 = R$$

$$R_3 = \frac{R_1}{2}$$

$$C_1 = C_2 = C$$

$$C_3 = 2C_1$$

$$Y_{21a} = -\frac{1}{2R(1 + sCR)}$$

$$Y_{22a} = \frac{1 + 2sCR}{2R(1 + sCR)}$$

$$Y_{21b} = \frac{(sC)^2 R}{2(1 + sCR)}$$

$$Y_{22b} = \frac{sC(2 + sCR)}{2(1 + sCR)}$$

$$Y_{21} = Y_{21a} + Y_{21b}$$

$$Y_{22} = Y_{22a} + Y_{22b}$$

$$Y_{21} = -\frac{1+(sCR)^2}{2R(1+sCR)}$$

$$Y_{22} = \frac{1+4sCR+(sCR)^2}{2R(1+sCR)}$$

Como:

$$A_V = -\frac{Y_{21}}{Y_{22}}$$

Portanto:

$$A_V = \frac{1 + (sCR)^2}{1 + 4sCR + (sCR)^2} \quad (13)$$

Em seguida foi levantada a curva de resposta em frequência da equação (13) do filtro NOTCH, através da simulação no programa Matlab, e apresentada na Figura 3-9.

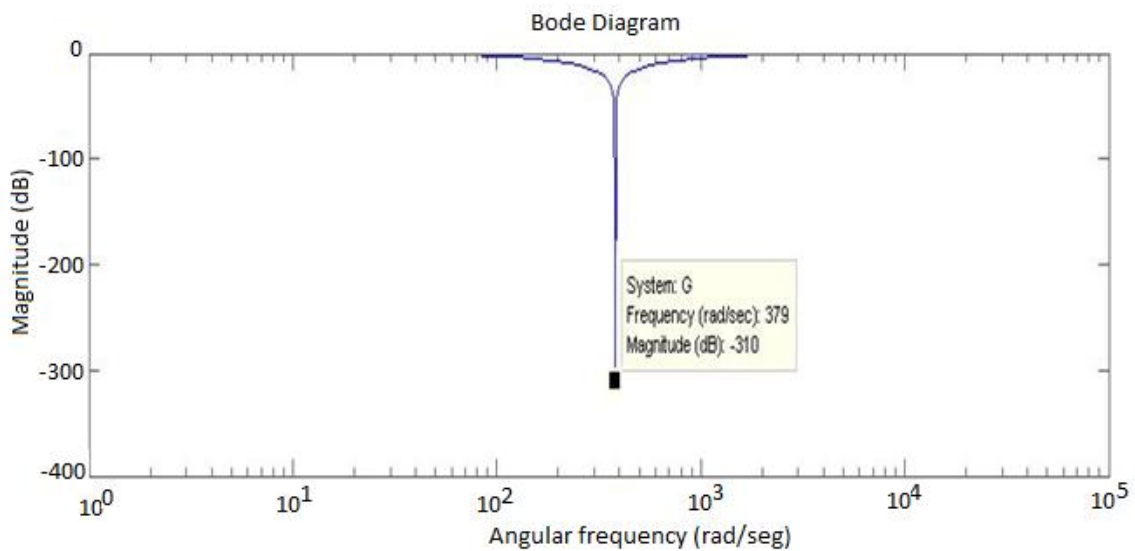


Figura 3-9 Resposta de frequência do filtro NOTCH (MATLAB).

Capítulo 4 - RESULTADOS

4.1 Simulação do circuito

A simulação foi realizada utilizando o programa PROTEUS. A Figura 4-1 apresenta o circuito no qual foi aplicado na entrada do amplificador uma tensão senoidal de 0,5V de pico e frequência de 1kHz no ponto A, o ganho do amplificador foi ajustado através de RV2 e RV3 em 10 e foram medidos os sinais de tensão na saída do amplificador no ponto B e após o filtro NOTCH no ponto C como apresentado na tela do osciloscópio da Figura 4-2.

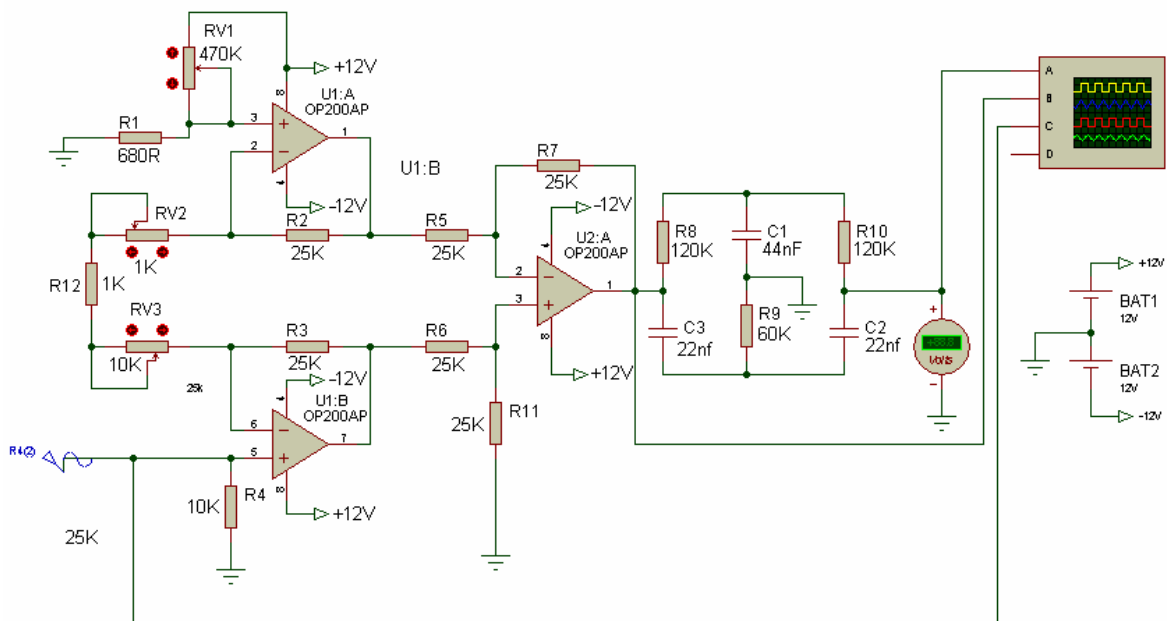


Figura 4-1 Diagrama elétrico para simulação do amplificador.

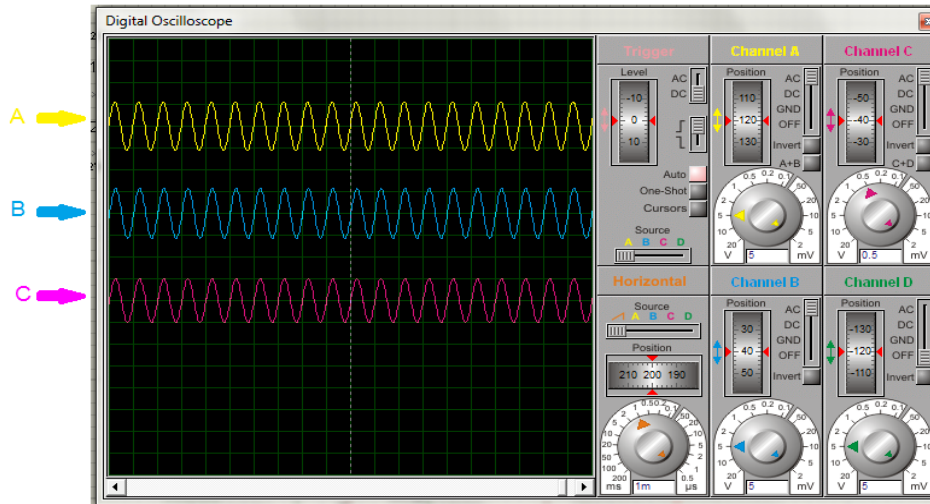


Figura 4-2 Formas de onda de tensão do amplificador.

4.2 Teste do ganho do Amplificador de Instrumentação

Para o teste do ganho do amplificador foi utilizado um gerador de funções e aplicado um sinal de entrada de forma senoidal no valor de $V_i = 105 \text{ sen}\omega t$ (mV) e verificado na saída $V_o = 1,13 \text{ sen}\omega t$ (V) conforme Figura 4-3.

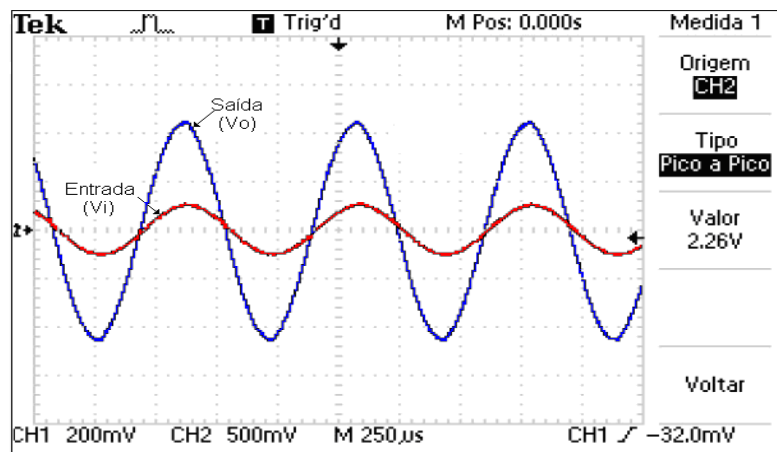


Figura 4-3 - Ganho do amplificador.

4.3 Resposta de frequência do amplificador

Para estudo da resposta de frequência do amplificador foi aplicado em sua entrada um sinal de tensão alternado senoidal de 500mV de pico e frequência de 5kHz com o ganho direto de tensão ajustado em 10 conforme Figura 4-4.

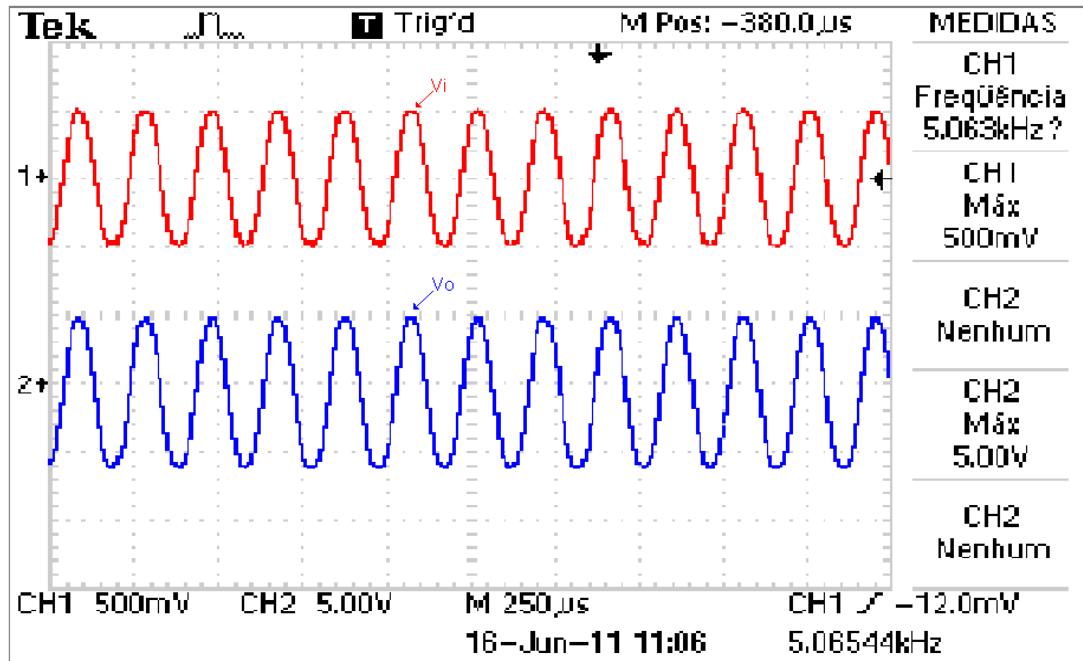


Figura 4-4 Resposta de frequência do amplificador.

Mantendo o ganho de tensão constante, variando a frequência do sinal de entrada de 4,85 Hz a 100 kHz foi determinada a tensão de saída V_o , apresentado na TABELA 2 e Figura 4-5.

TABELA 2
Tensão de saída em função da frequência

Frequência (Hz)	Tensão de Saída (V)	Frequência (Hz)	Tensão de Saída (V)
4,85	3,6	250	3,8
5	3,4	500	4,6
20	1,0	1000	5,0
40	0,6	5000	5,0
60	0,2	10000	5,0
80	1,0	20000	4,6
100	1,6	50000	2,4
180	3,2	100000	0,4
208	3,6		

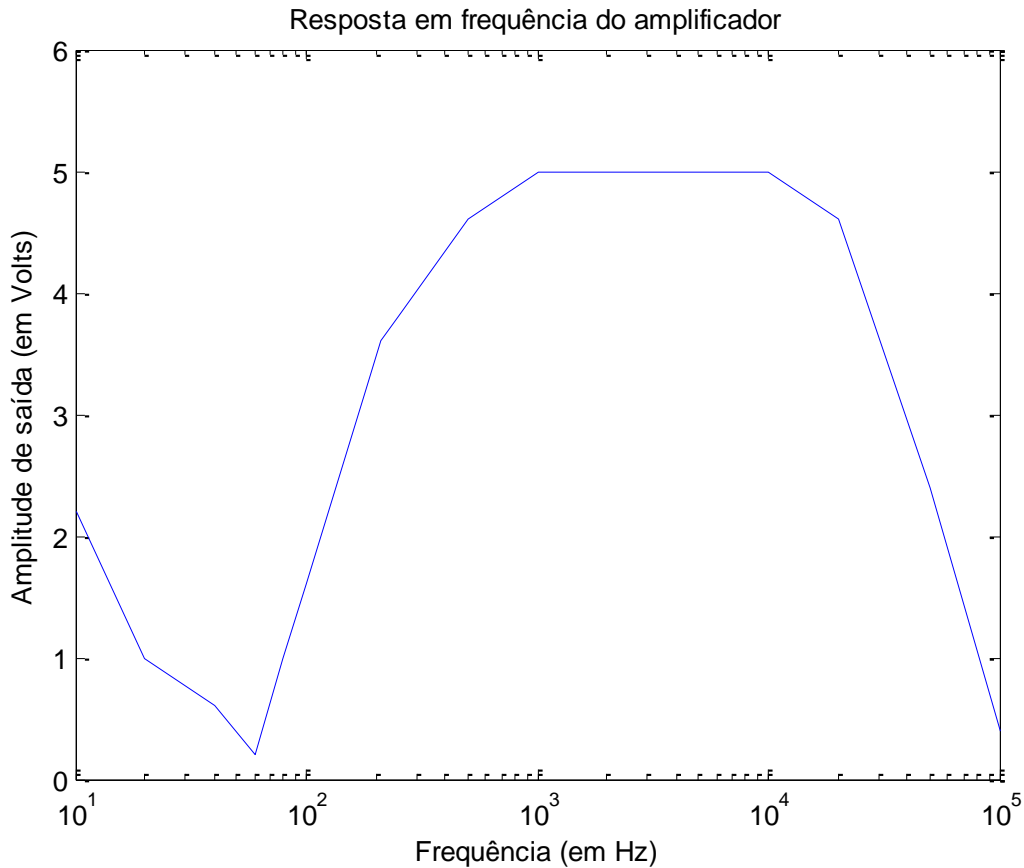


Figura 4-5 Gráfico do ganho de tensão em função da frequência do amplificador.

4.4 Cálculo da incerteza do ganho do amplificador

A determinação da incerteza foi realizada utilizando um multímetro digital, Minipa modelo ET-2009 conforme dados do fabricante constante no Anexo A. Foi aplicado um sinal de entrada DC variando entre 0,8V e 2,0V. O amplificador foi alimentado com uma fonte simétrica de $\pm 12V$, conforme Figura 4-6, e foram realizadas três medições por pontos da faixa e os gráficos foram representados nas Figura 4-7, Figura 4-8 e Figura 4-9. A partir desses dados foram calculados os valores do desvio padrão e da incerteza.

Um processo de medida tem sempre por objetivo determinar o valor médio verdadeiro, $\overline{V_m}$ de uma grandeza, cujo valor verdadeiro é V_v . Acontece que, em geral, o valor verdadeiro nos é desconhecido, e para se obter o valor médio verdadeiro, são necessárias infinitas medidas.

Dessa forma, para um conjunto de medidas, $\{V_1, V_2, V_3, \dots, V_n\}$, o valor médio verdadeiro é dado pela equação (14).

$$\bar{V}_m = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \right) \quad (14)$$

Como em geral V_m é um valor inacessível, usam-se estimativas: a média dada pela equação (15).

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (15)$$

O valor do desvio padrão é definido através da equação (16).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - m)^2} \quad (16)$$

E do desvio padrão da média conforme a equação (17).

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{(n-1)n} \sum_{i=1}^n (X_i - m)^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

Sendo u (medidor) a incerteza nominal do voltímetro, Segundo ensaio LACC – Laboratório de calibração do CETEL, conforme anexo A. Para a faixa da escala DC utilizada.

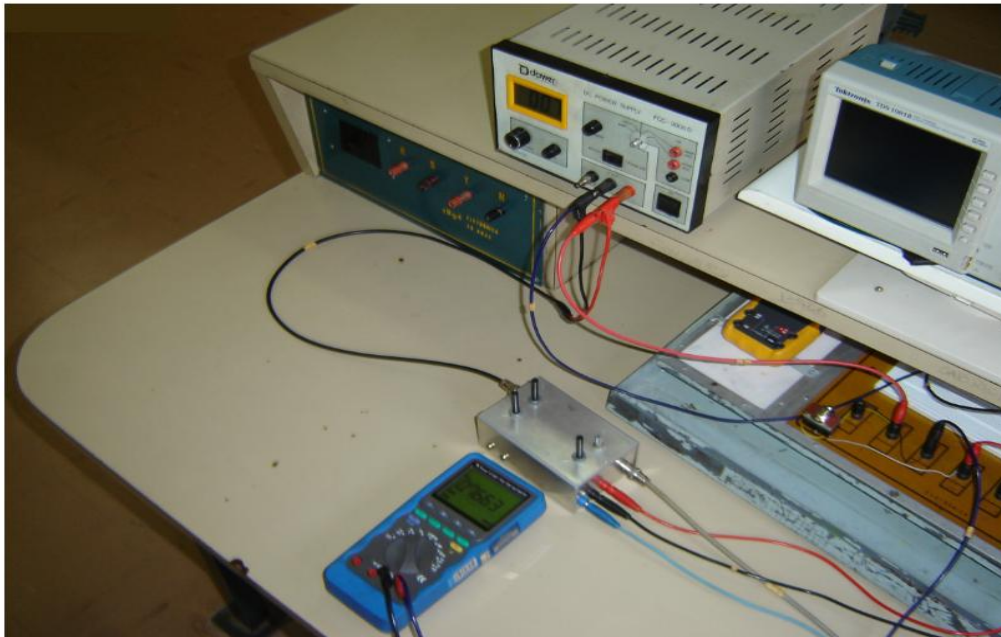


Figura 4-6 Montagem para o ensaio do amplificador.

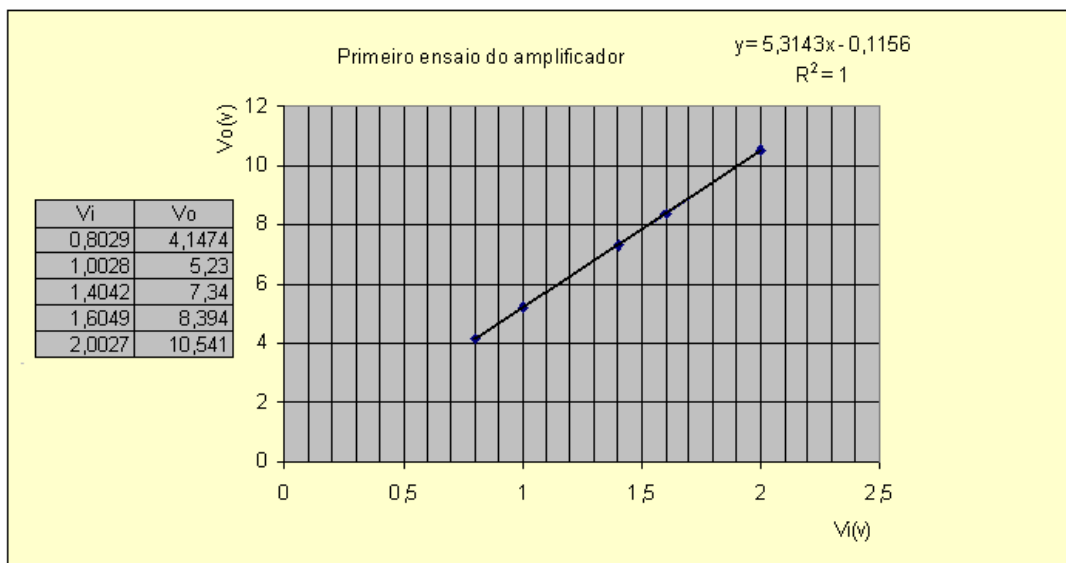


Figura 4-7 Gráfico de V_o versus V_i do primeiro ensaio.

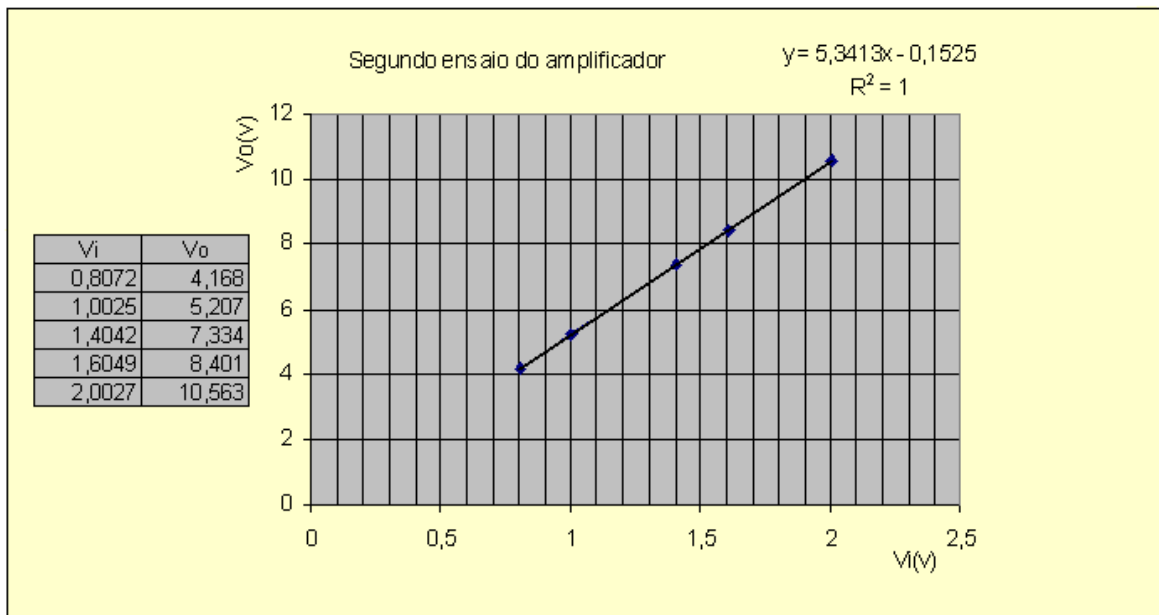


Figura 4-8 Gráfico de V_o versus V_i do segundo ensaio.

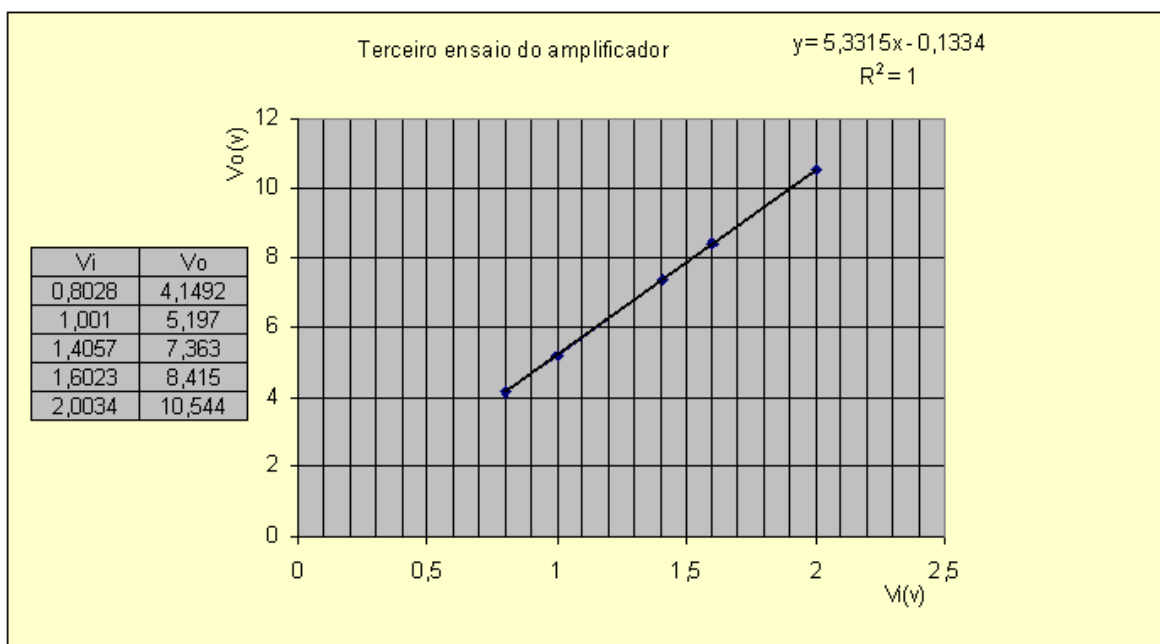


Figura 4-9 Gráfico de V_o versus V_i do terceiro ensaio.

4.5 Cálculo da incerteza

Sendo a incerteza nominal do voltímetro representada por u para a faixa da escala DC e σ o desvio padrão o erro padrão (U) é calculado pela equação (18).

$$U = \sqrt{u^2 + \sigma^2} \quad (18)$$

O cálculo da incerteza do sinal de entrada U (V_i) apresentado na TABELA 3, onde o erro do sinal de entrada teve uma variação de 0,045% a 0,25 %, esta variação se deve a dificuldade em estabilizar o sinal de entrada.

TABELA 3
Incerteza do sinal de entrada.

Vi(v)			$\bar{V}_i(v)$	σ	u (medidor)	U (Vi)
1	2	3				
0,8029	0,8072	0,8028	0,8043	0,002512	$2 \cdot 10^{-5}$	0,002512
1,0028	1,0025	1,001	1,0021	0,000964	$2 \cdot 10^{-4}$	0,000985
1,4042	1,4042	1,4057	1,4047	0,000866	$2 \cdot 10^{-4}$	0,000889
1,6049	1,6049	1,6023	1,6040	0,001501	$2 \cdot 10^{-4}$	0,001514
2,0027	2,0027	2,0034	2,0029	0,000404	$2 \cdot 10^{-4}$	0,000451

O cálculo da incerteza do sinal de saída U (V_o) é apresentado na TABELA 4, onde o erro do sinal de saída teve uma variação de 1,07% a 1,20%. Esta variação se deve à estabilidade do sinal de saída, tolerância dos componentes, características do amplificador de instrumentação e ruídos.

TABELA 4
Incerteza do sinal de saída.

Vo(v)			$\bar{V}_o(v)$	σ	u(medidor)	U (Vo)
1	2	3				
4,1474	4,168	4,1492	4,154867	0,011409	$2 \cdot 10^{-4}$	0,011411
5,23	5,207	5,197	5,211333	0,016921	$1 \cdot 10^{-3}$	0,016951
7,34	7,334	7,363	7,345667	0,015308	$1 \cdot 10^{-3}$	0,015341
8,394	8,401	8,415	8,403333	0,010693	$1 \cdot 10^{-3}$	0,010739
10,541	10,563	10,544	10,54933	0,011930	$1 \cdot 10^{-3}$	0,011972

4.6 Montagem experimental para o detector de iodeto de sódio

A montagem do experimento para detecção dos sinais de espectrometria gama inicialmente foi realizada utilizando o amplificador da CANBERRA e em seguida o amplificador desenvolvido no projeto conforme Figura 4-10 e Figura 4-11 respectivamente. Nestas figuras encontram-se identificados os principais componentes da montagem experimental, sendo:

1. Detector de radiação de Iodeto de sódio.
2. Fonte radioativa.
3. Sistema para aquisição de dados.
4. Amplificador de tensão.
5. Fonte de alimentação do amplificador

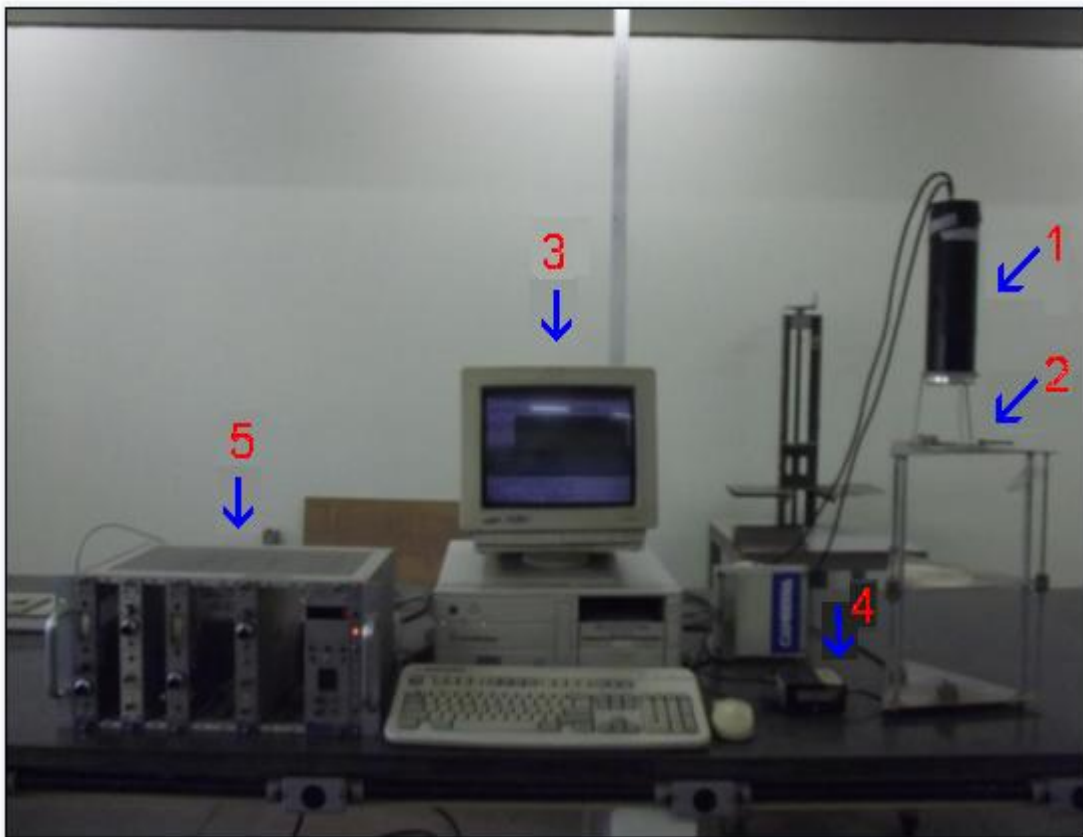


Figura 4-10 Experimento utilizando o amplificador da CANBERRA.

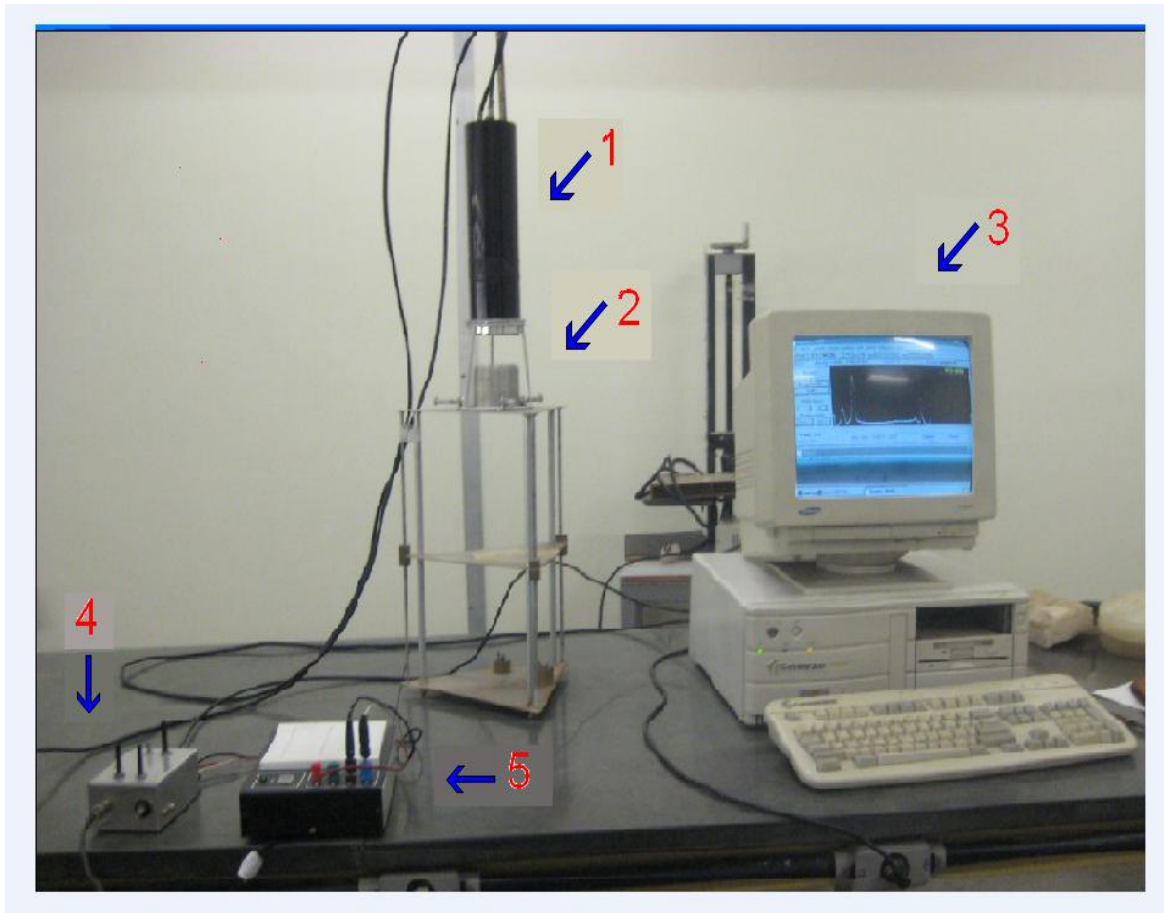


Figura 4-11 Experimento utilizando o amplificador desenvolvido.

Os testes foram realizados no laboratório do CCTN da UFMG. A espectrometria gama foi realizada utilizando as fontes radioativas do césio-137, Amerício-241, Bário-133 e Európio-152. A TABELA 5 mostra a energia dos fótons e o percentual de ocorrência desses fótons em relação ao número de decaimentos (ERNEST, 2011).

TABELA 5
Características das fontes de testes.

Fonte	Fótons gama	
	Energia (keV)	Ocorrência (%)
Amerício-241	26,34	2,40
	59,54	35,94
Césio-137	661,66	85,12
Bário -133	53,16	2,20
	79,61	2,63
	81,00	34,06
	276,40	7,16
	302,85	18,34
	356,02	62,05
	383,85	8,94
Európio -152	121,78	28,59
	244,70	7,58
	344,28	26,54
	411,12	2,23
	443,97	2,82
	778,90	12,94
	867,38	4,25
	964,08	14,61
	1085,87	10,21
	1112,07	13,64
1408,01	20,01	

Inicialmente foram utilizadas as fontes radioativas de amerício-241 e de césio-137, cujos espectros apresentados pelo amplificador da CANBERRA e o amplificador desenvolvido estão representado na Figura 4-13 e Figura 4-13 respectivamente. Onde Os dois primeiros picos de energia são emitidos pela fonte

de amerício-241, (26,34keV e 59,54keV) e o terceiro corresponde à energia emitida pela fonte de céσιο-137 (661,7 keV) apresentados na TABELA 5.

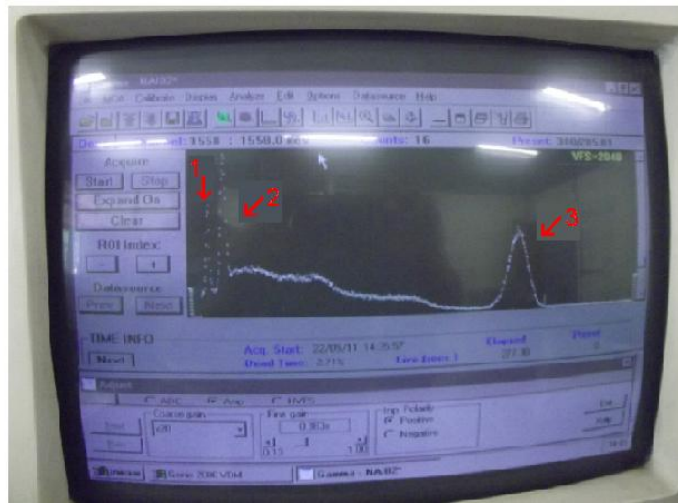


Figura 4-12 Espectrometria do amerício-241 e céσιο-137 utilizando o amplificador CANBERRA.

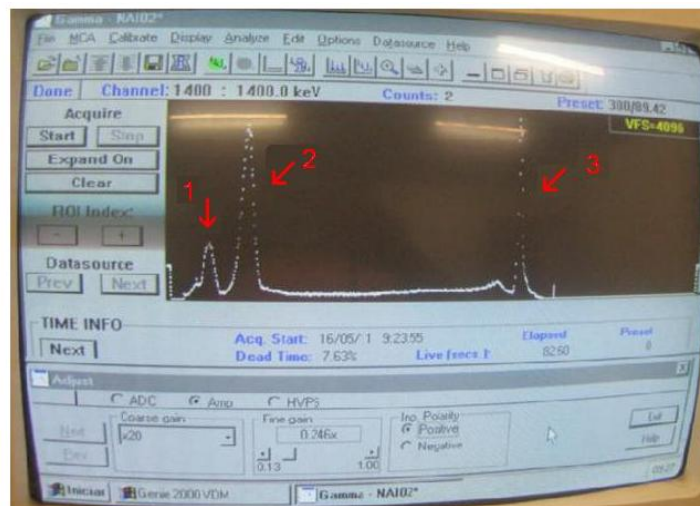


Figura 4-13 Espectrometria do amerício-241 e do céσιο-137 utilizando o amplificador projetado.

Em seguida foi utilizada a fonte de bário, cujo espectro de energia está apresentado na TABELA 5. Foram detectados os picos de 81,0 keV, 276,40 keV, 302,85 keV, 356,02 keV e 383,5 pelo amplificador da CANBERRA conforme Figura 4-14, já o amplificador desenvolvido detectou os cinco picos de energia detectados pelo amplificador da CANBERRA, porém com melhor resolução e nível de tensão

Capítulo 4 – Resultados

DC conforme Figura 4-15. Os dois picos de menor energia não foram detectados devido a sua baixa abundância isotópica.

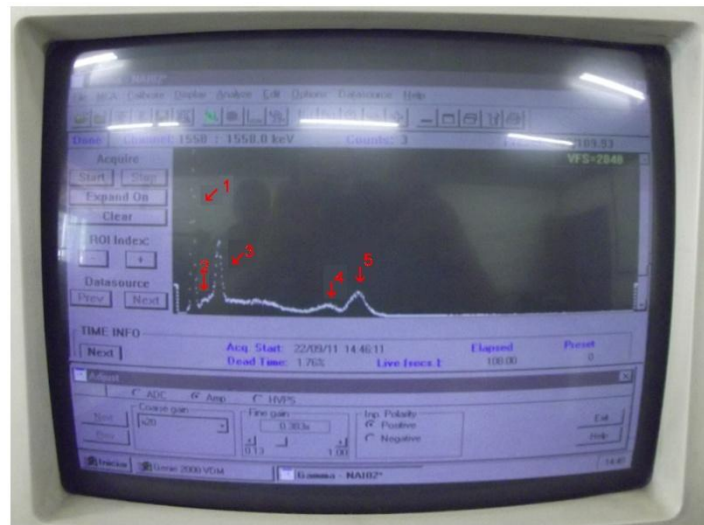


Figura 4-14 Espectrometria do bário-133 amplificador da CANBERRA.

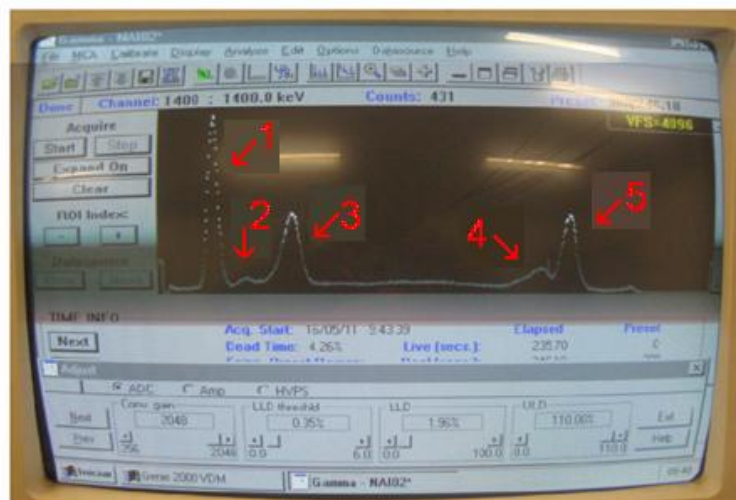


Figura 4-15 Espectrometria do bário-133 amplificador projetado.

Finalmente foi utilizada a fonte de európio, cujo espectro de energia está TABELA 5. Foram detectados os picos de energia de 121,78 keV, 244,7 keV, 344,7keV, 411,1keV, 444,0 keV, 778.9 keV conforme Figura 4-16, já o amplificador projetado além dos seis picos detectados pelo amplificador da CANBERRA, o pico de energia de 867,4 keV conforme Figura 4-17, ou seja, dos onze picos apresentados na TABELA 5, sete o foram detectados, os picos com energia do fóton

Capítulo 4 – Resultados

acima 964 keV não foram detectados, devido a seu baixo comprimento de onda, que está limitada pela resposta de frequência do amplificador INA 114.

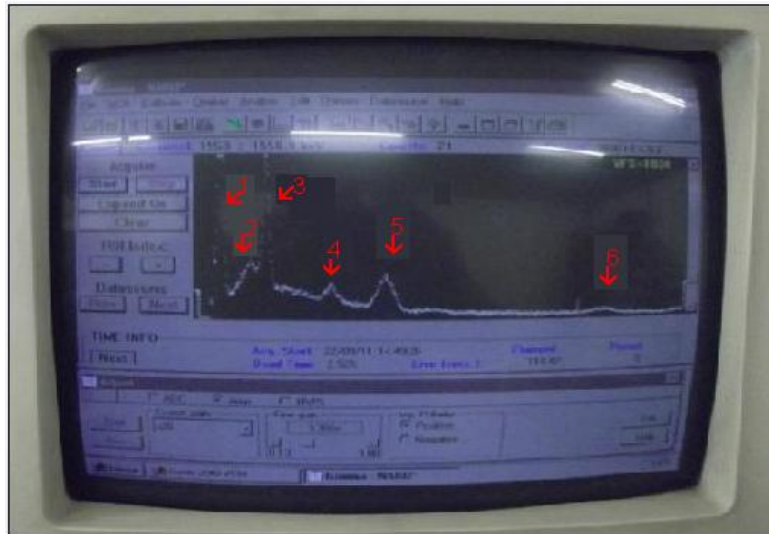


Figura 4-16 Espectrometria do európio-152 amplificador CANBERRA.

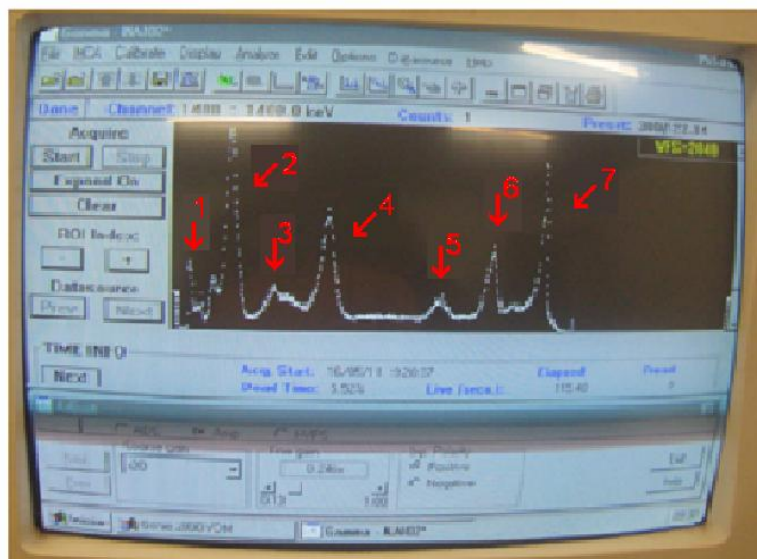


Figura 4-17 Espectrometria do európio-152 amplificador projetado.

Na Figura 4-18 mostra na tela do osciloscópio o sinal gerado pela fonte radioativa de césio-137 no detector de iodeto de sódio ligado a entrada do amplificador projetado.

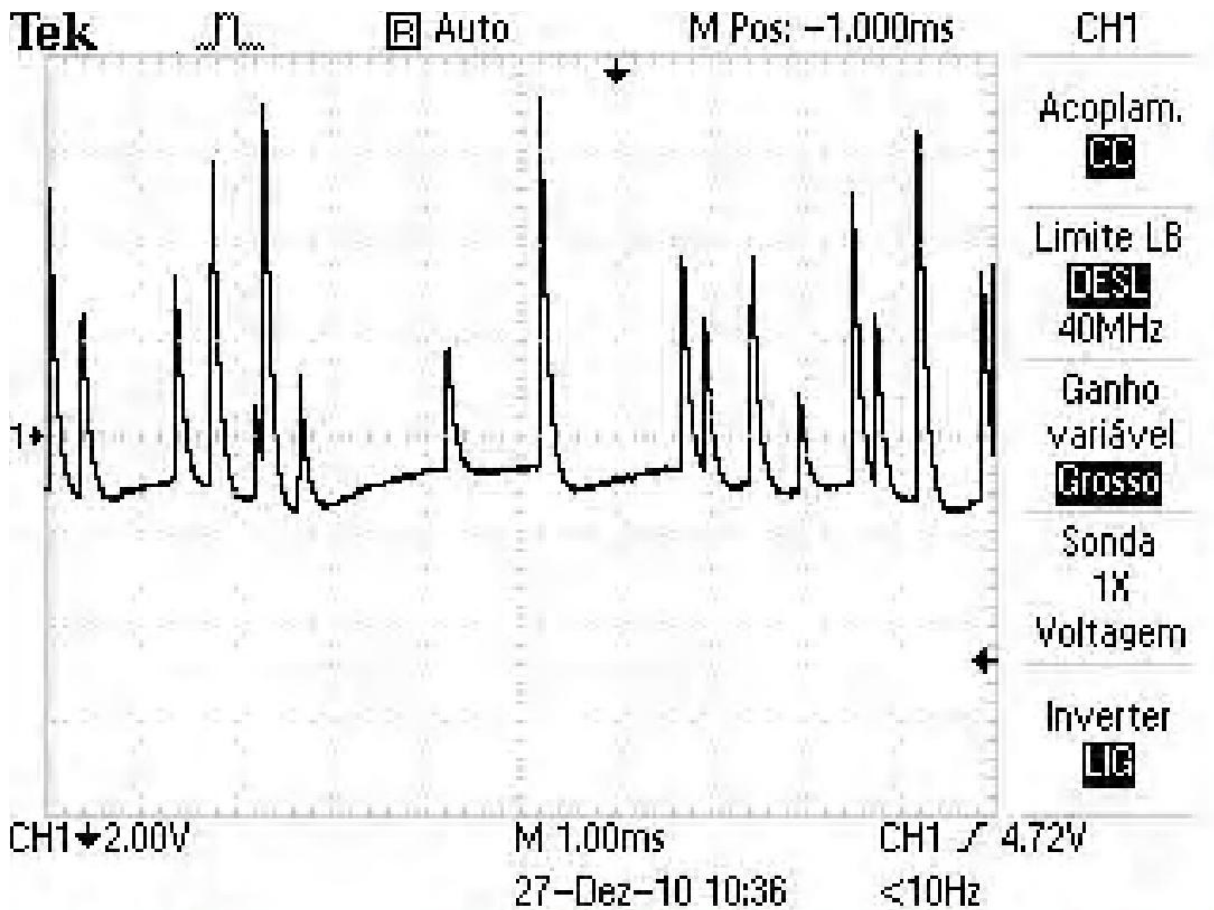


Figura 4-18 Radiações emitidas pela fonte de Césio-137 utilizando detector de Iodeto de Sódio.

Em seguida foi realizado o mesmo experimento utilizando a fonte de amerício - 241, apresentado na Figura 4-19.

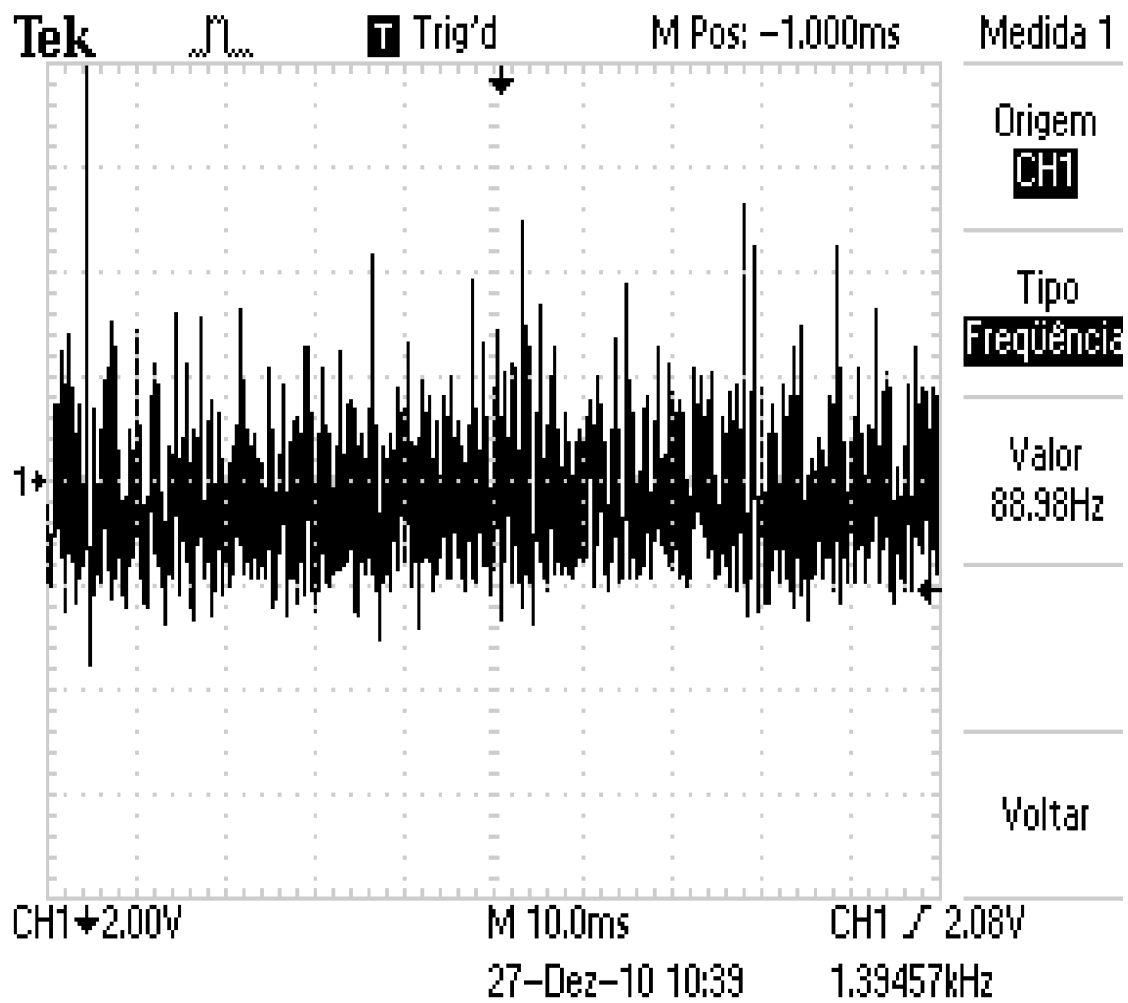


Figura 4-19 Radiações emitidas pela fonte de amerício-241 utilizando o detector de iodeto de sódio.

Capítulo 5 - **CONCLUSÕES**

Nesse trabalho foi realizado um estudo sobre os tipos de detectores de radiação e sua forma de funcionamento visando ao desenvolvimento de um amplificador de custo reduzido (anexo B) para ser utilizado em espectrometria gama. O amplificador foi desenvolvido a partir de um circuito integrado INA114, que se mostrou eficiente para ser utilizado na espectrometria gama para energias na faixa dos 26,34 keV e 860 keV. Nos experimentos realizados as energias das fontes radioativas variaram entre 26,34 keV até 1408 keV, conforme TABELA 5.

Nos testes de incerteza realizados no amplificador projetado, foi verificado que o erro do sinal de saída variou entre 1,07% a 1,2%. Isto devido principalmente as variações da tensão da fonte, a tolerância nos parâmetros dos componentes utilizados e o tempo necessário para estabilizar o sinal de saída.

O filtro NOTCH mostrou-se eficiente na retirada do sinal de ruído da frequência de para a qual foi projetado, ou seja, 60Hz, como foi verificado no desenvolvimento de sua função de transferência, usando a transformada de LAPLACE e o levantamento da sua curva de ganho de tensão em função da frequência no programa MATLAB.

A espectrometria gama realizada com a fonte de amerício-241 e césio-137, utilizando os amplificadores projetados e da CANBERRA, mostrou que ambos detectaram os mesmos fótons de energia, porém o amplificador desenvolvido apresentou uma melhor resolução e menor nível de tensão DC. Para a fonte radioativa de bário-133, além das características citadas acima o amplificador projetado apresentou uma melhor resolução em relação ao segundo pico de energia (79,61 keV) comparado ao amplificador da CANBERRA, sendo que os dois sistemas não detectaram os picos de 53,2 keV e 79,7 keV devido a sua baixa ocorrência. Finalmente com a fonte de Európio-152 foram detectados sete fótons de energia pelo amplificador projetado e seis picos pelo amplificador da CANBERRA. O que se pode concluir que o amplificador desenvolvido foi bem compatível comparado ao amplificador da CANBERRA. Os picos de energia com valores acima de 867,32 keV não foram detectados devido à limitação de resposta em frequência do amplificador utilizado no projeto.

Trabalhos Futuros

Desenvolver uma fonte de alta tensão, a partir da tensão de alimentação do amplificador operacional, para ser utilizada na alimentação do detector e acoplá-la ao amplificador. Pesquisar amplificadores de instrumentação que trabalhem com maior resposta de frequência de maneira a identificar picos de fótons de maior energia. Testar o amplificador desenvolvido com outros tipos de detectores como a junção PN do transistor de encapsulamento TO-3 (BRAGA, 2010) e fotodiodos comerciais como o BPW-34, SFH-206, SFH-205, de Fabricação Siemens e o fotodiodo S2551 da Hamamtsu, que são fotodiodos do tipo PIN, com alta sensibilidade e com uma corrente escura que varia de 5 a 15 nA (SILVA; KHOURY e JÚNIOR,2010).

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentos de circuitos elétricos*. Porto Alegre: Bookman, 2003. 858p.

ATTIX, F. H., ROESCH, W. C. *Radiation Dosimetry.V.1*, 2.ed. New York, Academic Press, 1968. 405p.

BAUER C. et al., Recent results from the RD42 Diamond Detector Collaboration, Second International Symposium on development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Hiroshima 1995, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res, 64-74. 1996.

BEAUMONT S.P. et al., GaAs Detectors, Proceedings, Large Hadron Collider Workshop, Aachen , CERN report 90-10, (ECFA 90-133), v.3, 1990. 244p.

BIRKS.J.B. *The Theory and Practice of Scintillation Counting*. London, Pergamon Press, 1964. 662p.

BLANC, D.; COMMANAY, L.; TEYSSIER, J. L. *La detection des particules por Scintillation. Onde Électrique*, v.1, n.8, p.508-509. 1969.

BOYLESTAD, R.; NASHELSY L. *Dispositivo Eletrônico e Teoria de Circuitos*, 5.ed. Rio de Janeiro, Prentice-Hall , 1994. 860p.

BOYLESTAD, R.; NASHELSY L. *Electronic Devices and Circuit Theory*, 8.ed. New Jersey, Prentice Hall, 2002. 926p.

BRAGA, N. C., *Detectando e Medindo a Radiação*. Disponível em:<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/meio-ambiente-e-saude/1385-ma020.html>>. Acesso em: 10 de ago. 2010.

CANBERRA, *Spectroscopy Amplifier Model 2012 Operator's Manual*. Disponível:<<https://wiki.brown.edu/confluence/download/attachments/29406/2012+Manual.pdf?version=1&modificationDate=1291821433000>>. Acesso em: 17 de abr. 2011

Referências

CARDOZO, W. T. *O perigo pode estar ali na esquina*. Disponível em:<<http://revistaescola.abril.com.br/ensino-medio/perigo-pode-estar-ali-esquina-427470.shtml>>. Acesso em: <17 de abr. 2011>

CHMILL,V.B. *et al. An exploration of GaAs structures for solid state detectors*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A326, p.310-312. 1993.

CHMILL,V. B. *et al. Exploration of GaAs structures with junction for coordinate sensitive detectors*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A340, p. 328-340. 1994.

CROUTHAMEL,C.E. *Applied Gamma-Ray Spectrometry*. London, Pergamon Press, 1960. 443p.

DAROS, K. A. C. Universidade Federal de São Paulo *Detetores de Radiação Ionizante*. Disponível em: <www.higieneocupacional.com.br/img/detetores-daros-pdf>. Acesso em: 23 de fev. 2011.

DESPRES M., MOREL J., MALET G. “*Etudes du Spectre du P-239,mesures des energies et des intensités absolutes des raies, gamma*” Note technique LMRI 79/63 – 1980.

EDMINISTER, J. A. *Circuitos Elétricos – 2.ed.* São Paulo:Bookman, 2003. 478p.

ERNEST O. *Lawrence Berkeley National Laboratory - Information about isotopes, Berkeley*. Disponível em: < <http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm> >. Acesso em 17 de out. 2011.

JÚNIOR, A. P. *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos*, 6.ed., Bookman, 2003. 304p.

KEMMER J., *Fabrication of low noise silicon radiation detectors by the planar process*, Nucl. Instrum. Meth. 169, 1980. 499p.

KNOLL G. F. *Radiation Detection and Measurement*, 2.ed. Jonh Wiley & Sons,New York, Chichester, Brisbane, Toronto , Singapore, 1989. 754p.

Referências

LILLEY, J.; *Nuclear Physics Principles and applications*, Inglaterra, Jonh Wiley & Sons, Ltda, 2001. 393p.

MAFRA, O.Y. *Manual Experimental de Técnicas e Medidas Nucleares*. São Paulo, IEA, 1970. 141 p. (Informações IEA n° 17)

MALVINO, A. P. *Eletrônica I*, 4.ed., São Paulo: Makron-Books, 1997. 558p.

MILLMAN, J., HALKIAS, C. *Eletrônica - Dispositivos e Circuitos*, V.1, Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1981. 412p.

Model 2004 Semiconductor Detector Preamplifier. Disponível em: <<http://www.canberra.com/pdf/Products/Model-2004-SS.pdf>>. Acesso em: 17 de abr. 2011

O'KELLEY, G.D. *Detection and Measurement of Nuclear Radiation*. Oak Ridge, USAEC, 1970. 138p.

Página Web realizada pela Wikipedia, que define p-n junction; Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/PN_junction>. Acessado em: 18 de abr. de 2011.

PERALTA, L. *Projeto radiação ambiente*. Disponível em: <www.lip.pt/~luis/>. Acesso em: 11 de set. 2011.

PRICE, W.J. *Nuclear Radiation Detection*. New York, McGraw Hill. 1958. 382p.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microeletrônica*, 5.ed. São Paulo: Makron Books, 2007. 864p.

SMITH, K. M. GaAs detector status, Second International Symposium on Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Hiroshima 1995, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A383, 1996. 75p.

SILVA, I. J. O. ; KHOURY H J. ; JÚNIOR, E. F. S. *Universidade Federal de Pernambuco - Espectrometria de Radiação Gama Utilizando fotodiodos Comerciais*. Disponível

Referências

em:<<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/efnne/xvii/programa/res0201.pdf>>.

Acesso: em 16 de maio 2010

TANARRO S. A. *Instrumentación Nuclear Radiation*. Madrid, J.E.N. 1970. 565p.

TEXAS INSTRUMENTS, *Amplificador de instrumentação* - Disponível em:

<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/N/A/1/INA114.shtml>.

Acesso: em 14 de Nov. 2010.

TOMEI, T.O. *Detectores de Partículas*,IFT-UNESP,março,2009 Disponível

em:<[http://www.sprace.org.br/Twiki/pub//Main/CursoParticulas/Detectores de Particulas I.pdf](http://www.sprace.org.br/Twiki/pub//Main/CursoParticulas/Detectores_de_Particulas_I.pdf)>. Acesso em: 16 de abr. 2011.

ANEXOS

ANEXO A



LACC - Laboratório de Calibração do CETEL

Certificado de Calibração

Nº 259/11 - A



Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0372

Número do Registro de Inspeção: 109/11
Data de recebimento: 15/6/2011
Data da calibração: 15/6/2011

Objeto da medição: Multímetro Digital
Número do objeto: NI83739
Fabricante: Minipa
Modelo: ET-2907
Número de série: ET209700036

Cliente: Fundação de Apoio à Educação e Desenvolvimento Tecnológico de MG
Endereço: Rua Alpes, nº 533 - Bairro Nova Suíça
Cidade: Belo Horizonte Estado: MG

Características do Objeto de Medição:

Tensão AC, Tensão DC, Corrente DC e Resistência.

Condições Ambientais do Laboratório

Temperatura: 23 °C ± 2 °C

Umidade: 55% ± 15 %

Procedimento de Calibração Utilizado

A calibração do objeto da medição acima relacionado foi realizada com instrumentos de calibração com resultados rastreados à padrões de Laboratórios acreditados à RBC (Rede Brasileira de Calibração) ou a Organismos Internacionais reconhecidos pelo INMETRO, e conforme Instruções de Trabalho: IT-01, IT-04, IT-05, IT-06, IT-20 e IT-23.

Foram realizadas 3 (três) medições por ponto da faixa e os resultados apresentados em tabelas que relacionam o valor padrão ao valor médio indicado pelo objeto de medição e, a partir da diferença entre estes valores, o erro apresentado.

A incerteza informada foi obtida através da composição da variância das medições com a incerteza do(s) equipamento(s) de calibração envolvidos no processo em conjunto com as variáveis do tipo "B". Considerou-se intervalo para um nível de confiança de aproximadamente 95%, com o fator de abrangência (k) determinado por ponto de medição e apresentado na tabela de resultados.

Belo Horizonte, 21 de junho de 2011

Executor Técnico: Roberto Carlos Pereira

Silmara Rodrigues Tabelini
Signatária Autorizada

1) Os resultados apresentados neste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

2) A reprodução deste certificado deverá ser total, não sendo permitido emendas ou cópias de trechos isolados.

LACC - Rua Sto. Agostinho, 1717 - Horto - BH - MG - CEP.: 31035-480 Fone: 31 34825644 Fax: 31 34825587 - Email: calib-cetel@fiemg.com.br
Sistema de Qualidade Certificado de Calibração - Cgcre - Cgcr 0372



LACC - Laboratório de Calibração do CETEL

Certificado de Calibração

Nº 259/11 - A

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0372

Resistência

Faixa	Valor do Padrão	Média das Medições	Erro	± Incerteza da Medição	Unidade	(k) Fator Abrang.
5	1,000000	1,000	0,000	0,019	k ohm	2,00
	5,000000	4,998	-0,002	0,030	k ohm	2,00
50	9,000000	8,998	-0,002	0,001	k ohm	2,00

Tensão DC

Faixa	Valor do Padrão	Média das Medições	Erro	± Incerteza da Medição	Unidade	(k) Fator Abrang.
50	20,0000	19,988	-0,012	0,002	mV	2,00
	66,0000	65,97	-0,03	0,01	mV	2,00
500	110,0000	109,94	-0,06	0,01	mV	2,00
	154,0000	153,91	-0,09	0,01	mV	2,00
500	200,0000	199,88	-0,12	0,02	mV	2,21
5	2,000000	1,9981	-0,0019	0,0002	V	2,43
50	6,000000	5,995	-0,005	0,001	V	2,00
	10,000000	9,991	-0,009	0,001	V	2,00
	16,000000	15,985	-0,015	0,002	V	2,43

Tensão AC (60Hz)

Faixa	Valor do Padrão	Média das Medições	Erro	± Incerteza da Medição	Unidade	(k) Fator Abrang.
500	20,000	20,13	0,13	0,03	mV	2,00
	66,000	66,02	0,02	0,07	mV	2,00
	110,000	109,98	-0,02	0,11	mV	2,00
500	154,000	153,92	-0,08	0,14	mV	2,00
	200,000	199,86	-0,14	0,18	mV	2,00
5	2,000000	1,9995	-0,0005	0,0018	V	2,00
50	6,00000	6,005	0,005	0,006	V	2,00
	10,00000	9,997	-0,003	0,009	V	2,00
	16,00000	15,993	-0,007	0,014	V	2,00

Corrente DC

Faixa	Valor do Padrão	Média das Medições	Erro	± Incerteza da Medição	Unidade	(k) Fator Abrang.
5	2,000000	1,996	-0,004	0,030	mA	2,00
50	10,00000	9,992	-0,008	0,002	mA	2,52
	18,00000	17,991	-0,009	0,002	mA	2,37

Padrão(ões) utilizado(s):

Calibrador Multifunção FLUKE 5520-A

Nº de série: 7815007

Certificado de Calibração N° 103151-101

Validade da Calibração: 22/06/2011

Calibrado por: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.

ANEXO B

Material/Componente	Tipo	Unidade	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
Amplificador de instrumentação	INA 114	Un	01	43,22	43,22
Borne para pino Banana	Borne	Un	03	4,80	14,40
Caixa de alumínio (5x10x13)Cm	Retangular	Un	01	12,00	12,00
Capacitor 22nF/63V	Polyester	Un	04	0,50	2,00
Chave três terminais	Alavanca	Un	01	3,15	3,15
Conector Fêmea	BNC	Un	03	5,40	16,20
Placa Fenolite 10X10 cm Face Simples	Fenolite	Un	01	14,00	14,00
Potenciômetro Carvão 1K	Linear 16 mm	Un	01	2,80	2,80
Potenciômetro Carvão 10K	Linear 16 mm	Un	01	2,80	2,80
Potenciômetro Carvão 47K	Linear 23 mm	Un	01	14,80	14,80
Potenciômetro Carvão 470K	Linear 23 mm	Un	01	14,80	14,80
Resistor 680R /0,125W	Filme Carbono	Un	01	0,25	0,25
Resistor 1K /0, 125 w	Filme Carbono	Un	01	0,25	0,25
Resistor 10K /0, 125 w	Filme Carbono	Un	01	0,25	0,25
Resistor 120K /0, 125 w	Filme Carbono	UN	04	0,25	1,00
Total					141,92