

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CARACTERIZAÇÃO DE FOTOTRANSISTOR NPN PARA  
ESPECTROMETRIA DE RAIOS-X DIAGNÓSTICO**

PABLO VIEIRA REGO

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO ANTÔNIO FILHO

CO-ORIENTADOR: DR. LUIZ ANTÔNIO PEREIRA DOS SANTOS

RECIFE - PERNAMBUCO - BRASIL  
SETEMBRO - 2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**CARACTERIZAÇÃO DE FOTOTRANSISTOR NPN PARA  
ESPECTROMETRIA DE RAIOS-X DIAGNÓSTICO**

PABLO VIEIRA REGO

**CARACTERIZAÇÃO DE FOTOTRANSISTOR NPN PARA  
ESPECTROMETRIA DE RAIOS-X DIAGNÓSTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação.

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO ANTÔNIO FILHO

CO-ORIENTADOR: DR. LUIZ ANTÔNIO PEREIRA DOS SANTOS

RECIFE - PERNAMBUCO - BRASIL

SETEMBRO - 2007

**R343c**

**Rego, Pablo Vieira.**

Caracterização de fototransistor NPN para espectrometria de raios-X diagnóstico / Pablo Vieira Rego . - Recife: O Autor, 2007.  
Xi, 82 folhas, il : gráfs., figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.  
CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2007.

Inclui bibliografia e Apêndices.

1.Energia Nuclear. 2.Fototransistor. 3.deteccção de raios-X  
4.Espectro de energia. I. Título.

**UFPE**

**612.01448**

**CDD (22. ed.)**

**BCTG/2008-122**



**CARACTERIZAÇÃO DE FOTOTRANSISTORES NPN PARA  
ESPECTROMETRIA DE RAIOS-X DIAGNÓSTICO**

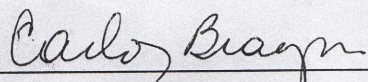
**Pablo Vieira Rego**

**APROVADO EM: 28.09.2007**

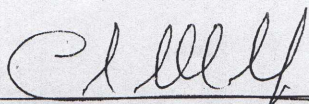
**ORIENTADOR: Prof. Dr. João Antonio Filho**

**CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Antonio Pereira dos Santos**

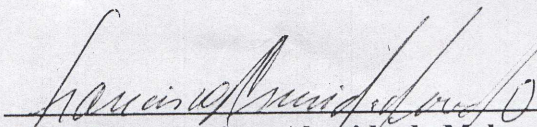
**COMISSÃO EXAMINADORA:**



**Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE**

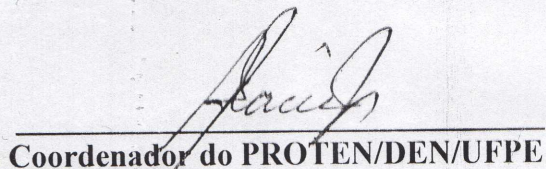


**Prof. Dr. Clovis Abrahão Hazin – CRCN/CNEN-PE**



**Prof. Dr. Francisco Almeida de Melo – DF/UNICAP**

**Visto e permitida a impressão**



**Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE**



## DEDICATÓRIA

À minha mãe.

# Agradecimentos

Ao meu Bom Jesus, que me deu forças nos momentos de fraqueza e inspiração nos momentos de introspecção.

Imensamente agradeço à minha mãe, por todo o apoio que sempre me deu em meus estudos, e por todo o esforço que ela dedicou em modificar todos os seus sonhos e planos de vida por minha causa. A ela dedico todos os méritos.

Aos meus amigos e orientadores João Antônio Filho e Luiz Antônio Pereira dos Santos, pelas muitas horas de atenção, cuidado e amizade e por todo esforço dedicado no acompanhamento e realização desde trabalho.

Ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, pela formação e oportunidade de elaboração desta dissertação.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear, através do Laboratório de Metrologia do Centro Regional de Ciências Nucleares, por compartilhar suas instalações e em especial a Fábio e Paulo, pelo apoio e pelas horas me acompanhando na utilização dos aparelhos de raios-X e a todos que, de uma forma ou outra contribuíram com este trabalho.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento do projeto, pois seria praticamente impossível realizá-lo sem a bolsa.

Aos professores que compuseram a banca examinadora Dr. Carlos Alberto Brayner, Dr. Clóvis Abrahão Hazin e Dr. Francisco Melo.

Aos professores, funcionários e a todos os colegas do Departamento de Energia Nuclear, pela atenção, ajuda, amizade e excelente convívio ao longo de minhas atividades no departamento.

Recife, Brasil  
28 de Setembro de 2007

Pablo Vieira Rego



# Sumário

<b>Lista de Tabelas</b>	<b>iii</b>	
<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>	
<b>Resumo</b>	<b>x</b>	
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>2</b>
2.1	Conceito de Espectrometria de Radiações Ionizantes . . . . .	2
2.1.1	Espectro de energias de raios-X . . . . .	2
2.2	Raios-X . . . . .	2
2.2.1	Produção de raios-X . . . . .	2
2.2.2	Qualidades e filtros de raios-X . . . . .	4
2.3	Detecção de radiação . . . . .	6
2.3.1	Modelo elétrico de um detector de radiação . . . . .	7
2.4	Detectores de materiais semicondutores de Silício . . . . .	7
2.4.1	Junções PN e fotodiodos . . . . .	7
2.4.2	Transistores e Fototransistores Bipolares de Junção . . . . .	8
2.4.2.1	Transistor como detector de radiação X e gama . . . . .	10
2.4.3	Corrente de fuga num dispositivo semiconductor . . . . .	10
2.5	Espectrometria X e gama . . . . .	11
2.5.1	Espectrometria com detectores de Germânio Hiperpuro (HPGe) e Ge(Li) . . . . .	11
2.5.2	Espectrometria X com CdTe e CdZnTe . . . . .	11
2.5.3	Espectrometria X com fotodiodos . . . . .	12
2.6	Estado da arte de medição de raios-X com fototransistores bipolares de junção . . . . .	12
2.6.1	Fototransistor quando exposto a feixe de raios-X . . . . .	12
2.6.2	Deconvolução de dose de raios-X diagnósticos . . . . .	13
2.7	Outras aplicações de fototransistores . . . . .	13
2.7.1	Detecção de partículas ionizantes . . . . .	13
2.7.2	Medição do tempo de exposição de raios-X . . . . .	14
2.7.3	Medição de intensidade luminosa . . . . .	14
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>15</b>
3.1	Material utilizado . . . . .	16
3.1.1	Detector . . . . .	16

3.1.2	Unidade geradora de raios-X . . . . .	18
3.1.3	Sistemas eletrônicos . . . . .	18
3.1.4	Câmara de ionização . . . . .	18
3.1.5	Programas computacionais . . . . .	19
3.2	Irradiação do fototransistor. . . . .	19
3.3	Variações paramétricas dos dispositivos . . . . .	22
3.4	Análises estatísticas das medições . . . . .	23
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>24</b>
4.1	Comportamento das correntes do fototransistor com a radiação para configuração sem filtração adicional . . . . .	24
4.2	Comportamento das correntes do fototransistor com a radiação para sistema com filtração adicional de 2,5 mm Al. . . . .	30
4.3	Distribuição das intensidades de radiação em função da energia máxima do feixe de raios-X	32
4.4	Comparações com o HPGe . . . . .	34
4.5	Variação de parâmetros do fototransistor . . . . .	40
4.6	Análise estatística dos dados . . . . .	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>48</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE A - Programa para controle dos equipamentos da Keythley</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE B - Espectros de energia</b>	<b>57</b>
B.1	Distribuições de energia para corrente de tubo de 10 mA sem filtração adicional . . . . .	57
B.2	Distribuições de energia para corrente de tubo de 15 mA sem filtração adicional . . . . .	62
B.3	Distribuições de energia para corrente de tubo de 20 mA sem filtração adicional . . . . .	67
B.4	Distribuições de energia para corrente de tubo de 10 mA, filtração adicional de 2,5 mm Al	70
	<b>APÊNDICE C - Taxas de dose do Pantak HF 320</b>	<b>76</b>
C.1	Taxas de dose para o Pantak HF 320, sem filtração adicional . . . . .	76
C.2	Taxas de dose para o Pantak HF 320, com filtração adicional de 2,5 mm Al . . . . .	77
C.3	Taxas de dose para o Pantak HF 320, com filtração adicional de 0,25 mm Cu . . . . .	78
	<b>APÊNDICE D - Complementação das medições de <math>I_C \times I_B</math></b>	<b>80</b>
D.1	Irradiações sem filtração adicional . . . . .	80
D.2	Irradiações com filtração adicional . . . . .	82

# Lista de Tabelas

1	Energia média dos fótons de raios-X de feixes leves em função do potencial elétrico aplicado no tubo e de filtros adicionais (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1998). Os valores onde aparecem hífen não foram disponibilizados pelos autores. . . . .	6
2	Energia média dos fótons de raios-X de feixes pesados em função do potencial elétrico aplicado no tubo e de filtros adicionais (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1998). Os valores onde aparecem hífen não foram disponibilizados pelos autores. . . . .	6
3	Doses absorvidas pelos fototransistores durante as irradiações para o sistema sem filtração adicional e com filtração adicional de 2,5 mm Al. . . . .	19
4	Tensões ( $kV$ ) de geração dos raios-X para irradiação dos fototransistores para cada corrente e filtração aplicados. F.I. denota <i>filtração inerente</i> . . . . .	20
5	Valores das correntes de corte $I_{B0}$ , corrente de coletor correspondente ao corte e variação dessa corrente de coletor, obtidos a partir de dados presentes nas Figuras 75 e 23. . . . .	33
6	Fatores de conversão para o L14G1, em relação ao HPGe, para tensões máximas aplicadas no tubo de raios-X de 90 kV, 100 kV e 120 kV, sem filtração adicional. . . . .	39
7	Fatores de conversão para o L14G1, em relação ao HPGe, para tensões máximas aplicadas no tubo de raios-X de 70 kV, 80 kV e 120 kV, com filtração adicional de 2,5 mm Al. . . . .	40
8	Valores de corrente de coletor em função de algumas tensões entre coletor e emissor, nos tempos T1, T2 e T3. . . . .	42
9	Evolução temporal da degradação da curva de IC x VCE do fototransistor L14G1 para tensão de coletor de 3V. . . . .	42
10	Valores de corrente de coletor em função de algumas correntes de base na região até 500 pA, nos tempos T1, T2 e T3. . . . .	43
11	Evolução temporal da degradação da curva de $h_{fe}$ para correntes menores que 500 pA do fototransistor L14G1 . . . . .	44
12	Valores de corrente de coletor em função de algumas correntes de base na região entre 0,050 nA até 5 nA, nos tempos T1, T2 e T3. . . . .	45
13	Evolução temporal da degradação da curva de hfe para correntes entre 500 pA e 5 nA do fototransistor L14G1. . . . .	45
14	Correntes de coletor e suas variações, medidas para um feixe (de referência) de raios-X de tensão aplicada de 120 kV e corrente de tubo de 12,19 mA, para $I_B = 500$ pA em cinco intervalos de referência. . . . .	46

15	Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da corrente de tubo e da tensão de tubo, para sistema sem filtração adicional. . . . .	76
16	Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da corrente de tubo e da tensão de tubo, para sistema com filtração adicional de 2,5 mm Al. . . . .	77
17	Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da corrente de tubo e da tensão de tubo, para sistema com filtração adicional de 0,25 mm Cu. . . . .	78

# Lista de Figuras

1	Tubo de raios-X de anodo estacionário. . . . .	3
2	Espectro de energias para o Pantak HF320, corrente de tubo de 1 mA, energia máxima do feixe de 120 keV e filtração adicional de 2,5 mm Al (SANTOS, 2005). . . . .	4
3	Modelo básico de um detector de radiação. . . . .	7
4	Estrutura planar do transistor bipolar de junção. E, B e C representam os terminais. . .	9
5	Diagrama esquemático do transistor NPN com as correntes no sentido convencional. . .	9
6	Espectro de $^{60}\text{Co}$ mostrando resoluções e razões de resolução para o HPGe e o NaI(Tl) (DETONG, 2007). . . . .	11
7	Diagrama esquemático do procedimento de medição da corrente de coletor $I_C$ . . . . .	16
8	Blindagem do fototransistor na posição de irradiação. Legenda: 1 - Cabo PTFE conectado à saída da blindagem; 2 - Blindagem metálica; 3 - Suporte para o detector; 4 - Abertura por onde a radiação incide. . . . .	17
9	Fototransistor L14G1. . . . .	17
10	Módulo de controle do Pantak HF320 externo à sala de irradiações. . . . .	18
11	Sistema de aquisição de dados utilizado durante a irradiação dos fototransistores. Legenda: 1 - Computador; 2 - Cabo USB para o Keithley 2400; 3 - Cabo USB para o Keithley 6430; 4 - Keithley 2400, utilizado como medidor de corrente; 5 - Keithley 6430, utilizado como fonte de corrente; 6 - Ligação do cabo PTFE do medidor de corrente para o fototransistor; 7 - Ligação do cabo PTFE da fonte de corrente para o fototransistor; 8 - Fototransistor; 9 - Feixe de raios-X após colimador; 10 - Colimador tipo "pirulito"; 11 - feixe de raios-X após sair da fonte; 12 - Saída da fonte de raios-X; 13 - Pantak HF 320, que é a fonte de raios-X; 14 - suporte para acoplar o fototransistor, em cima de uma mesa de apoio. . . . .	21
12	Esquema elétrico da medição da corrente de coletor do fototransistor em função da corrente de base durante a irradiação do fototransistor, indicando os caminhos normais de corrente. . . . .	21
13	Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 10 mA. Sem filtração adicional. . . . .	24
14	Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 15 mA. Sem filtração adicional. . . . .	25
15	Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 20 mA. Sem filtração adicional. . . . .	25

16	Curva para o fototransistor L14G1 da corrente de corte em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo de 10 mA. Sem filtração adicional. . . . .	26
17	Curva para o fototransistor L14G1 da corrente de corte em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo de 15 mA. Sem filtração adicional. . . . .	27
18	Curva para o fototransistor L14G1 da corrente de corte em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo de 20 mA. Sem filtração adicional. . . . .	27
19	Resposta para o fototransistor L14G1 da corrente de coletor em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo fixa em 10 mA, Sem filtração adicional.	28
20	Resposta para o fototransistor L14G1 da corrente de coletor em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo fixa em 15 mA, Sem filtração adicional.	29
21	Resposta para o fototransistor L14G1 da corrente de coletor em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo fixa em 20 mA, Sem filtração adicional.	29
22	Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 10 mA. Filtração adicional de 2,5 mm Al. . . . .	30
23	Curva para o fototransistor L14G1 da corrente de corte em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo de 10 mA. Filtração adicional de 2,5 mm Al. . . . .	31
24	Resposta para o fototransistor L14G1 da corrente de coletor em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo fixa em 10 mA, Filtração adicional de 2,5 mm Al. . . . .	32
25	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 130 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Filtração adicional de 2,5 mm Al. . . . .	34
26	Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 90 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Sem filtração adicional. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005). . . . .	35
27	Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 100 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Sem filtração adicional. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005). . . . .	36
28	Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 120 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Sem filtração adicional. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005). . . . .	36
29	Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 70 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Filtração adicional de 2,5 mm Al. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005). . . . .	37
30	Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 80 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Filtração adicional de 2,5 mm Al. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005). . . . .	38
31	Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 120 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Filtração adicional de 2,5 mm Al. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005). . . . .	39
32	Curvas de caracterização de escuro para o fototransistor L14G1 da resposta da corrente de coletor em função da tensão entre emissor e coletor. T1 é o momento antes das irradiações, T2 é o momento entre e T3 é o momento após. . . . .	41



33	Curvas de caracterização de escuro para o fototransistor L14G1 da resposta da corrente de coletor em função da tensão entre emissor e coletor. T1 é o momento antes das irradiações, T2 é o momento entre e T3 é o momento após. As curvas mostram o $h_{fe}$ máximo para 500 $pA$ na base. . . . .	43
34	Curvas de caracterização de escuro para o fototransistor L14G1 da resposta da corrente de coletor em função da tensão entre emissor e coletor. T1 é o momento antes das irradiações, T2 é o momento entre e T3 é o momento após. As curvas mostram o $h_{fe}$ máximo para 5 $nA$ na base . . . . .	44
35	Curvas de referência da resposta do fototransistor da corrente de coletor em função da corrente de base. REF1 é a primeira medição e REF5 é a última. . . . .	46
36	Página de abertura dos módulos do <i>Fototrans.</i> . . . . .	54
37	Módulo de configurações do <i>Fototrans.</i> . . . . .	55
38	Módulo de espectrometria do <i>Fototrans.</i> . . . . .	56
39	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 80 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	57
40	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 90 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	58
41	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 100 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	58
42	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 110 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	59
43	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 120 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	59
44	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 130 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	60
45	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 140 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	60
46	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 150 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	61
47	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 160 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	61
48	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 80 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	62

49	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 90 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	63
50	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 100 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	63
51	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 110 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	64
52	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 120 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	64
53	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 130 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	65
54	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 140 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	65
55	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 150 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	66
56	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 80 kV e 20 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	67
57	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 100 kV e 20 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	68
58	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 120 kV e 20 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	68
59	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 160 kV e 20 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	69
60	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 60 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	70
61	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 70 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	71
62	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 80 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	71
63	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 90 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	72

64	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 100 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	72
65	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 110 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	73
66	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 120 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	73
67	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 140 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	74
68	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 150 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	74
69	Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 160 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional. . . . .	75
70	Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da tensão aplicada no tubo, para correntes de tubo de 1mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA, 20 mA e 25 mA, para sistema sem filtração adicional. . . . .	77
71	Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da tensão aplicada no tubo, para correntes de tubo de 5 mA, 10 mA, 15 mA, 20 mA e 25 mA, para sistema com filtração adicional de 2,5 mm Al. . . . .	78
72	Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da tensão aplicada no tubo, para correntes de tubo de 1mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA, 20 mA e 25 mA, para sistema com filtração adicional de 0,25 mm Cu. . . . .	79
73	Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 10 mA. Sem filtração adicional. . . . .	80
74	Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 10 mA. Sem filtração adicional. . . . .	81
75	Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 10 mA. Filtração adicional de 2,5 mm Al. . . . .	82

# CARACTERIZAÇÃO DE FOTOTRANSISTOR NPN PARA ESPECTROMETRIA DE RAIOS-X DIAGNÓSTICO

PABLO VIEIRA REGO

Orientador: Prof. Dr. João Antônio Filho

Co-orientador: Dr. Luiz Antônio Pereira dos Santos

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo inicial a respeito da utilização de fototransistores bipolares de junção como dispositivo de medição de energias de fótons de raios-X na faixa de diagnóstico. O fototransistor é analisado a partir da resposta da corrente de coletor em função da corrente de base durante a irradiação do dispositivo com fótons de raios-X. O mecanismo de detecção baseia-se no fato de que diferentes energias de fótons interagem com o fototransistor a partir de diferentes ganhos de corrente de coletor. A resposta da corrente de coletor em função da corrente de base durante a irradiação serve como dado de entrada para calcular a distribuição de energias detectada pelo fototransistor, a partir de um algoritmo que se baseia nesse mecanismo de detecção. Curvas de degradação também são utilizadas nessa análise, no intuito de mostrar aspectos variacionais dos parâmetros do fototransistor como semiconductor. Ainda são mostradas curvas de conformidade, em que para uma mesma configuração, as leituras das medições devem ser repetidas ou apresentarem flutuações mínimas. Como resultado do método, algumas curvas de distribuição de energia de raios-X para filtração com alumínio e sem filtração adicional foram obtidas. Essas distribuições obtidas se aproximaram razoavelmente de espectros de energia obtidos para o germânio hiperpuro, o que demonstra a aplicabilidade do método, embora o fototransistor apresente não-linearidades não compensadas na medição, o que contribuiu com o breve distanciamento dos espectros de energia obtidos com o germânio.

**Palavras-chave:** Fototransistor, Detecção de raios-X, Espectro de energia.

# CHARACTERIZATION OF NPN-PHOTOTRANSISTOR FOR X-RAY DIAGNOSTIC SPECTROMETRY

PABLO VIEIRA REGO

Advisor: Prof. Dr. João Antônio Filho

Coadvisor: Dr. Luiz Antônio Pereira dos Santos

## ABSTRACT

This work presents a initial study respect to the use of junction bipolar phot transistor as a device for diagnostic X-ray photons device measurement. The phot transistor is analyzed through the response of the collector current as function of base current, while the device is irradiated with X-ray photons. The detection mechanism considers the fact that different photons energies interacts over semiconductor with different collector gains, so the collector current as function of the base current during irradiation is an input data for calculating the energy distribution detected by the device, using an algorithm which is based in this detection mechanism. Degradation curves also are shown in this analysis, in order to show variational aspects of this detector as a semiconductor structure. Moreover are shown conformity curves, of the same X-ray response to the collector current in function of the base current, in which, for a same setup, the measurements should be the same or present minimal distortions. As a result of this method, some X-ray energy distribution curves for the aluminium as addictional filtration and the just innerent filtration X-Ray setup were obtained. The energy distribution curves obtained with the phot transistor method fit close energy spectra obtained with hyperpure germanium, which proves the applicability of the method, despite of the non-compensated phot transistor non-linearities contributed for a small divergence regarding the curves obtained with germanium.

**Keywords:** Phot transistor, X-ray detection, Energy spectrum.

# 1 INTRODUÇÃO

Na medicina e na indústria encontram-se os dois grandes focos de aplicação dos raios-X. Em medicina diagnóstica, os raios-X podem ser aplicados para o diagnóstico de doenças e lesões; em medicina terapêutica, no tratamento de células tumorais, podem ser utilizados, por exemplo, nos casos onde a cirurgia é inviável. Na indústria, os raios-X são aplicados principalmente no controle de qualidade de materiais, como papel, gesso, concreto, fuselagem de veículos, na detecção de trincas e da fadiga do material. Na medicina e na indústria, suas aplicações dependem da energia dos fótons incidentes, cuja distribuição está associada à qualidade do feixe.

Poder medir a distribuição de energia de um feixe de raios-X é importante para se manter conformidade das características desse feixe com as normas estabelecidas para cada tipo de aplicação. Para avaliar a distribuição de energias do feixe de radiação, várias são as técnicas utilizadas fazendo uso de sensores, tais como filmes, detectores a gás e detectores semicondutores.

Uma técnica para medição e avaliação do espectro de energias de raios-X, utilizada como referência por laboratórios primários, é a que tem o germânio com alto grau de pureza (HPGe ou Germânio hiperpuro) como sensor, resfriado à temperatura de nitrogênio líquido (NOGUEIRA et al., 2004) durante sua operação. Também existem detectores semicondutores que operam em temperatura ambiente, como as técnicas que utilizam CdZnTe e CdTe (EISEN et al., 2004) e fotodiodos (EISEN et al., 1990). Fototransistores bipolares de junção ainda não são utilizados comercialmente para esse tipo de medição, embora já sejam empregados na detecção de partículas ionizantes (BATIGNANI et al., 2004a, 2004b; HARA et al., 2006), na detecção de luz (SUN et al., 2005), na avaliação da dose absorvida (SANTOS et al., 2002, 2005, 2006), na medição do tempo de exposição de raios-X (SANTOS; RIZZI, 2003), na monitoração de radiação (DHOLE; BHORASKAR, 1994) e várias outras aplicações.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o espectro de energia de fótons produzidos por aparelhos de raios-X operando na faixa de radiodiagnóstico, utilizando o fototransistor bipolar de junção em razão de suas características elétricas e, pelo fato de ter operação em temperatura ambiente, robustez, baixo custo, é um dispositivo comercial e tem ganho de sensibilidade em relação aos fotodiodos.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Conceito de Espectrometria de Radiações Ionizantes

#### 2.1.1 Espectro de energias de raios-X

O *Espectro de energias* é uma curva que relaciona a intensidade de radiação com a energia do feixe. Essa intensidade usualmente é expressa em termos da contagem do número de fótons sobre uma área do feixe de raios-X ou é expressa em termos da fluência de fótons sobre uma área do feixe. A energia do feixe usualmente é expressa em termos da energia do fóton, energia equivalente, energia de pico ou energia média, em unidades de keV, ou em termos de unidade de canal, em que cada canal de energia está associado a uma faixa de energias (GRANDEZAS... , 2002).

Neste trabalho, os espectros de energia serão apresentados a partir da relação entre uma corrente elétrica diferencial (que está relacionada com a quantidade de fótons do feixe que incidem no detector, por razões que serão explicadas ao longo do texto) e a energia máxima do feixe equivalente de raios-X que é consequência do potencial aplicado no tubo de raios-X, para cada qualidade (ANKERHOLD, 2006).

### 2.2 Raios-X

#### 2.2.1 Produção de raios-X

Uma unidade geradora de raios-X é composta de três partes:

1. Sistema de controle: são os dispositivos que comandam o sistema de produção de raios-X. Compõem-se por:
  - (a) Controle de tempo;
  - (b) Controle de corrente (mA);
  - (c) Controle de tensão (kVp);
  - (d) Controle da taxa de fluência (mA.s);
  - (e) Controle de movimentos;
2. Tubo de raios-X: é o componente responsável pela produção da radiação. Os raios-X são gerados a partir da colisão dos elétrons de alta velocidade (alta energia cinética) com um alvo material de alta densidade, por exemplo, o tungstênio ( $Z = 74$ ), platina ( $Z = 78$ ), molibdênio, entre outros. A Figura 1 mostra o esquema de um tubo de raios-X típico. Um filamento é aquecido para que elétrons sejam liberados pelo efeito termoiônico e depois acelerados por um potencial elétrico da ordem de milhares de

volts aplicado entre o catodo (o filamento) e o anodo (o alvo). A superfície do alvo deve fazer um ângulo tal em relação a elétrons incidentes de forma a definir a direção do feixe de raios-X, que varia normalmente de  $6^\circ$  a  $20^\circ$ . O processo de colisão dos elétrons com o alvo produz vários fótons de comprimentos de onda diferentes, o que constitui o espectro do feixe. Uma parte da radiação liberada nesse processo ocorre na forma de raios-X, e é chamada de radiação de frenamento (Bremmstrahlung) (KNOLL, 1989).

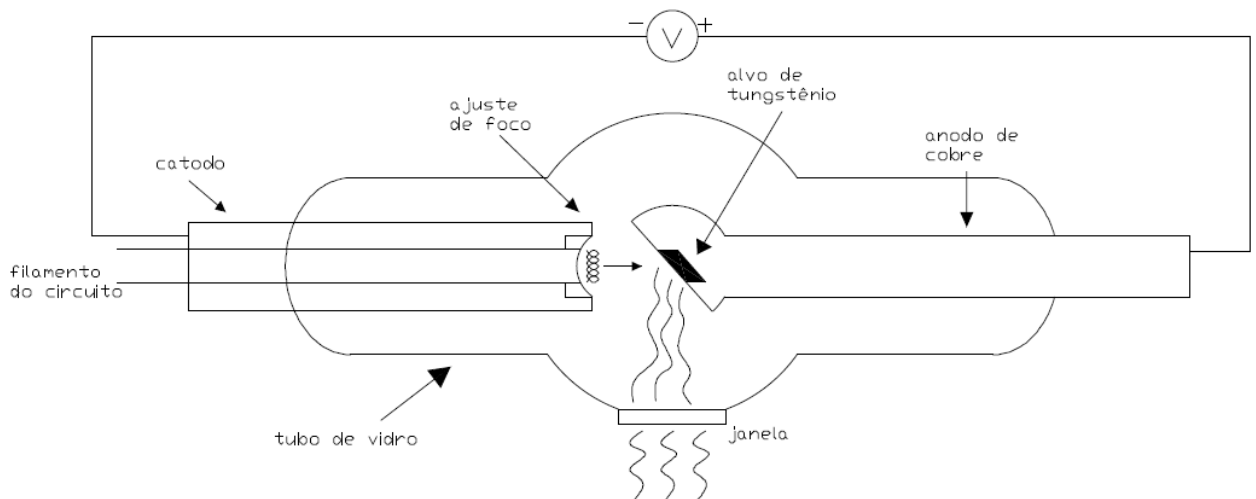


Figura 1: Tubo de raios-X de anodo estacionário.

A Figura 2 mostra um espectro de energias de raios-X, e apresenta a resposta da intensidade relativa dos fótons que incidem sobre um detector de germânio hiperpuro, em função da energia desses fótons. Nota-se a presença de uma componente contínua, resultante do Bremmstrahlung, e uma componente discreta, que depende do núcleo-alvo e é chamada de Raios-X Característicos.

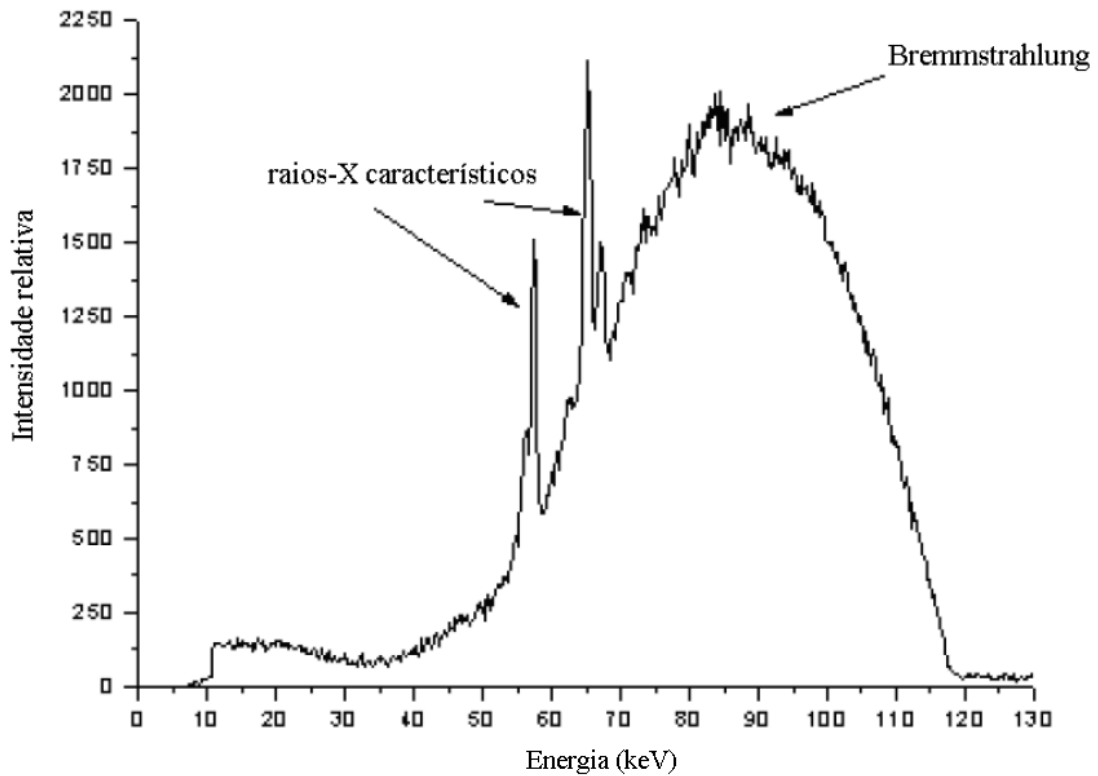


Figura 2: Espectro de energias para o Pantak HF320, corrente de tubo de 1 mA, energia máxima do feixe de 120 keV e filtração adicional de 2,5 mm Al (SANTOS, 2005).

### 2.2.2 Qualidades e filtros de raios-X

Qualidade de raios-X é um termo que se refere à energia efetiva de um feixe de raios-X (espectro estreito ou largo). Para feixes utilizados em radioterapia (40 a 60 keV), de baixa e média energia, é usualmente expressa em termos da camada semi-redutora (CSR). Para efeitos de proteção radiológica, pode ser expressa em termos da energia equivalente (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1994). A energia equivalente pode ser definida de duas formas: (a) A energia do feixe monoenergético de raios-X cuja camada semi-redutora (para o Cu ou Al) é a mesma para a radiação em questão; (b) A energia do feixe monoenergético de raios-X para o qual o coeficiente da curva de atenuação (usualmente Cu ou Al) é o mesmo que o coeficiente inicial da curva de atenuação da radiação em questão.

Para estabelecer características, aspectos e propriedades de equipamentos que são associados ou que produzem feixes de raios-X como saída, para fins de investigação médica ou física, a International Electrotechnical Commission (IEC) publicou a norma 61267 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2005), que serve como um guia para caracterização desses equipamentos. Na determinação das características de absorvedores que ficam atrás de um paciente que é exposto diretamente ao feixe de raios-X, essa norma indica a série de qualidades *Radiation Qualities in Radiation Beams emerging from the X-Ray Tube Assembly* (RQR).

Na qualidade RQR da IEC 61267, considera-se:

1. Alvo emissor do tubo de raios-X de Tungstênio;

2. Tensão do tubo;
3. A filtração total consistindo de:
  - Uma qualidade equivalente à configuração de 2,5 *mm* Al para uma tensão aplicada de 75 *kV*;
  - Uma filtração adicional para cada tensão aplicada;
4. A camada semi-redutora;
5. O coeficiente de homogeneidade<sup>1</sup>.

O feixe de raios-X utilizado em radiodiagnóstico e terapia de pacientes precisa ter certas características para produzir uma boa imagem e para reduzir a exposição do paciente. Em geral, os feixes produzidos têm um espectro largo e os fótons de baixa energia apenas contribuem para a dose absorvida pelo paciente, pois não servirão para geração da imagem. Por isso é importante filtrar os fótons de baixa energia (LAPP; ANDREWS, 1972; MIYAJIM et al., 2002).

A International Commission on Radiological Protection (ICRP) é uma comissão reconhecida internacionalmente, que desde 1959 publica periodicamente normas sobre efeitos da radiação, doses e exposição, proteção em medicina e proteção radiológica. Em sua publicação 80 (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1998) recomenda utilizar filtros de 0,5 *mm* de alumínio quando o tubo opera abaixo de 50 *kV* (e.g. em mamografia). Entre 50 *kV* e 70 *kV* (e.g. em radiografia dental), a filtração deve ser equivalente a 1,5 *mm* de alumínio. Acima de 70 *kV*, a filtração deve ser equivalente a 2,5 *mm* de alumínio.

Considera-se em espectrometria radiodiagnóstica duas qualidades de radiação: as leves, que são as que simulam os feixes que incidem na pele de um paciente num exame radiológico; e as pesadas, que simulam feixes que atravessam o paciente no exame (SOUZA et al., 1996; SEELENTAG et al., 1979; SEELENTAG; PANZER, 1979).

As Tabelas 1 e 2 apresentam qualidades de raios-X utilizadas pelo laboratório primário alemão Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), para calibração de equipamentos radiológicos.

---

<sup>1</sup>O coeficiente de homogeneidade é definido como sendo a razão entre a primeira e a segunda camadas semi-redutoras (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1998).

Tabela 1: Energia média dos fótons de raios-X de feixes leves em função do potencial elétrico aplicado no tubo e de filtros adicionais (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1998). Os valores onde aparecem hífen não foram disponibilizados pelos autores.

Tensão aplicada no tubo (kV)	Filtração inerente do tubo (mm Be)	Filtração total (mm Al)	CSR (mm)		$E_{med}(keV)$
			Al	Cu	
30	7	2,5	1,046	0,031	-
40	7	2,5	1,42	0,045	-
50	7	2,5	1,82	0,059	32,0
70	7	2,5	2,45	0,081	39,2
90	7	2,5	3,10	0,112	46,0
100	7	2,5	3,6	0,126	49,0
120	7	2,5	4,3	0,165	54,3
150	7	2,5	5,4	0,231	64,6

Tabela 2: Energia média dos fótons de raios-X de feixes pesados em função do potencial elétrico aplicado no tubo e de filtros adicionais (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1998). Os valores onde aparecem hífen não foram disponibilizados pelos autores.

Tensão aplicada no tubo (kV)	Filtração inerente do tubo (mm Be)	Filtração total (mm Al)	CSR (mm)		$E_{med}(keV)$
			Al	Cu	
40	7	6,5	2,15	0,07	-
50	7	12,5	3,40	0,123	38,8
60	7	18,5	5,00	0,207	45,6
70	7	23,5	6,20	0,289	51,8
80	7	29,5	7,80	0,403	57,9
90	7	32,5	9,00	0,501	62,9
100	7	36,5	-	0,609	67,5
120	7	42,5	-	0,839	76,3
150	7	50,0	-	1,245	100,0

## 2.3 Detecção de radiação

A radiação só é perceptível por sistemas especiais, que contêm em seu interior sensores de radiação. As interações entre os diferentes tipos de radiação e a matéria fornecem vários mecanismos para medição da intensidade de radiação emitida por uma fonte e absorvida por um meio, assim como a identificação da energia do feixe e da fonte de radiação (MARTIN, 2000).

O requisito básico de qualquer instrumento desse tipo é que a radiação interaja o detector de tal modo que a magnitude da resposta do instrumento seja proporcional ao efeito da radiação ou à propriedade da radiação que esteja sendo medida. Por exemplo, detectores que utilizam câmaras de ionização, contadores proporcionais ou contadores Geiger utilizam gases como sensor e sua detecção se baseia na medição de cargas ou correntes elétricas resultantes da ionização do gás no seu interior pelas partículas ionizantes que incidem dentro do seu volume sensível. Cintiladores como o NaI(Tl) utilizam um mate-

rial semiconductor dopado como sensor, e a detecção de radiação se baseia na contagem de pulsos de luz gerados pela interação da radiação com o volume sensível do detector. Outros efeitos podem ser utilizados para a detecção de radiação (TAUHATA, 2003).

### 2.3.1 Modelo elétrico de um detector de radiação

Um detector de radiação pode ser modelado como sendo uma fonte de corrente com uma resistência dinâmica em paralelo  $R_i$  e uma capacitância inerente  $C_i$  também em paralelo, como mostrado na Figura 3. Em geral,  $R_i$  tem um valor muito alto e  $C_i$  tem um valor muito baixo, mas é o produto  $R_i \times C_i$  quem vai determinar o tempo de resposta do detector.

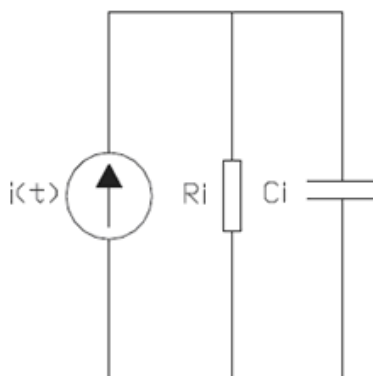


Figura 3: Modelo básico de um detector de radiação.

## 2.4 Detectores de materiais semicondutores de Silício

Um detector desse tipo de semiconductor age como uma câmara de ionização em estado sólido. A partícula ionizante interage com átomos em um volume sensível do semiconductor e produz pares de elétrons-buracos por ionização. A coleta desses pares de cargas pelo circuito externo produz o pulso elétrico de saída necessário para produzir o par de íons (LAPP; ANDREWS, 1972; CEMBER, 1996). Em contraste com as energias de ionização de pares de íons, relativamente altas para os detectores gasosos, na faixa de 30 a 35 eV, uma energia média de poucos eV é requerida para produzir efeito de ionização em um detector semiconductor, por exemplo, de 3,5 eV para o silício.

Na realidade, os materiais semicondutores de silício são utilizados como detectores na forma de dispositivos eletrônicos, por exemplo, diodos e transistores. Tais dispositivos são formados pela dopagem de impurezas em materiais semicondutores puros. Um material com impurezas pode ser chamado do tipo N ou P, conforme seja a impureza geradora de excesso de cargas negativas ou positivas, respectivamente (REGO et al., 2006).

### 2.4.1 Junções PN e fotodiodos

O diodo é um dispositivo eletrônico constituído por duas regiões justapostas dopadas com impurezas de natureza diferente. Quando o diodo é posto com o lado P da junção sob potencial maior que o do lado N (alimentação no sentido direto), a corrente elétrica flui facilmente, mas no sentido inverso a corrente é extremamente pequena.



O comportamento elétrico de um diodo pode ser descrito pela equação 1, em que  $I_0$  é chamada de corrente de saturação reversa, e representa a corrente quando uma tensão no sentido reverso é aplicada nos terminais do diodo. Na equação,  $V$  é o potencial aplicado nos terminais do diodo,  $k_B$  é a constante de Boltzmann e  $T$  é a temperatura absoluta do meio (LANDSHOFF et al., 1997; RESENDE, 1996, pp. 185).

$$I = I_0 (e^{-eV/k_B T} - 1) \quad (1)$$

No caso de detectores semicondutores baseados em junções, a incidência de luz gera portadores de cargas, os quais excitam a região da junção. Essa excitação eleva o nível de uma população de elétrons presentes na camada de condução, ocasionando a criação de buracos na camada de valência. Quando isso ocorre, diz-se que uma população de pares elétron-buraco foi criada no semicondutor, que darão origem a um incremento de corrente elétrica de condução no dispositivo. Fotodiodos são diodos construídos especialmente para serem utilizados como sensores de luz, e eventualmente são utilizados como detectores de radiação ionizante.

Nas junções PN, a camada de depleção possui propriedades muito atrativas como um meio de detecção de radiação. O campo da junção faz com que elétrons criados na junção ou próximos dela sejam arrastados para o lado P e buracos para o lado N, criando uma corrente de condução que será função da quantidade de pares elétron-buraco criados, ou seja, será função da energia e intensidade de radiação. A aplicação de uma tensão induzida nos terminais da junção pode ocasionar o aparecimento de um efeito avalanche, que tornará a corrente de condução muito mais intensa (KNOLL, 1989, pp. 355). Esse efeito é um dos efeitos responsáveis pela grande eficiência de detecção de radiação do fotodiodo.

## 2.4.2 Transistores e Fototransistores Bipolares de Junção

Transistores Bipolares de Junção (TBJ) são dispositivos eletrônicos compostos de três regiões com dopagens diferentes, com dopagens tipo N, P e N (chamado NPN) ou P, N e P (chamado PNP). Cada região recebe uma denominação de acordo com seu papel de condução (emissor, base e coletor). O emissor em geral é uma região mais dopada que o coletor. Neste trabalho, o termo fototransistor estará sempre referenciando o TBJ quando utilizado como detector de radiação (excluindo-se outros tipos de fototransistores). Alguns fototransistores são montados com encapsulamento luminescente, para aumentar ainda mais o efeito de conversão de fótons em pares elétron-buraco (ATTIA, 1999).

Os fenômenos que ocorrem nas junções de um transistor têm descrição à luz da eletrodinâmica quântica (LANDSHOFF et al., 1997); contudo, para simplificar o entendimento uma descrição simplificada é dada a seguir.

Funcionamento do transistor:

Na operação convencional do transistor NPN em regime linear, ou seja, com a junção base-emissor polarizada diretamente e a junção base-coletor polarizada inversamente, há um fluxo de elétrons emitidos pelo emissor que produz uma modificação no potencial do dispositivo, de modo que parte considerável dos elétrons emitidos consegue ser coletada

pelo coletor (RESENDE, 1996). Contudo, quanto maior a polarização na junção base-emissor, i.e., quanto maior a corrente de base, maior será o fluxo de elétrons coletados pelo coletor. As relações entre as correntes de base, coletor e emissor são dadas por:

$$I_C = \beta I_B \quad (2)$$

$$I_E = I_C + I_B = (\beta + 1)I_B \quad (3)$$

em que  $\beta$  é chamado de ganho de corrente do transistor e é uma grandeza adimensional.

Hoje em dia, as tecnologias de fabricação de transistores permitem obter ganhos de corrente que variam entre 50 e 500, normalmente.

A Figura 4 mostra a estrutura em camadas do transistor NPN e a Figura 5 mostra um diagrama esquemático que relaciona as correntes no sentido convencional de operação na região linear do transistor.

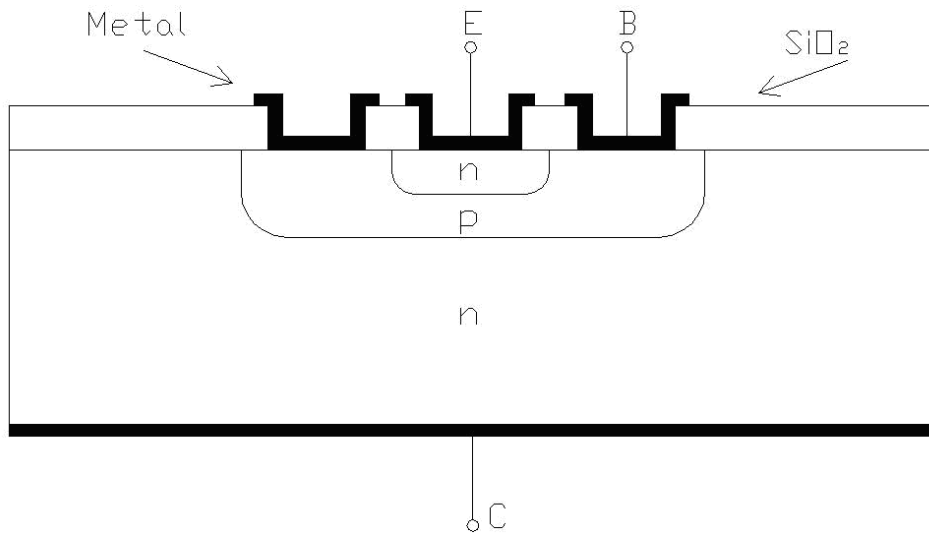


Figura 4: Estrutura planar do transistor bipolar de junção. E, B e C representam os terminais.

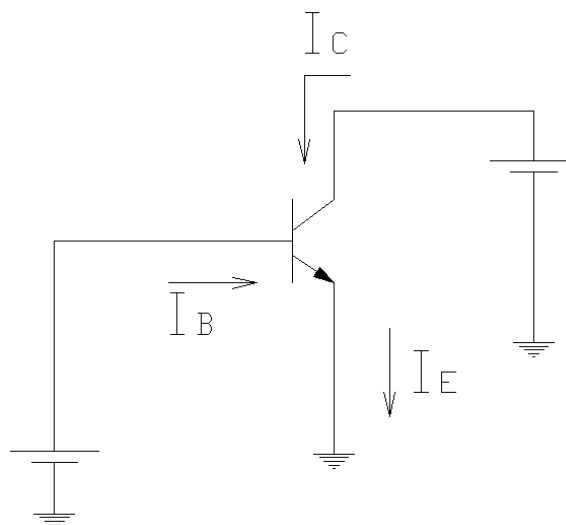


Figura 5: Diagrama esquemático do transistor NPN com as correntes no sentido convencional.

### 2.4.2.1 Transistor como detector de radiação X e gama

Aqui entenda-se que o sensor de radiação é o fototransistor construído com o encapsulamento e com os terminais de condução de corrente; o detector é o conjunto composto do fototransistor (o sensor), junto com os componentes da medição como eletrômetro, blindagem e colimador.

Existem três contribuições fundamentais quando um feixe de raios-X incide no fototransistor. Uma parte da fotocorrente vem do efeito de interação da radiação com o encapsulamento, em que elétrons são arrancados dele e entram no semicondutor do fototransistor, constituindo a radiação ionizante (secundária) que irá ionizar o cristal semicondutor da mesma forma que a radiação primária ioniza o próprio encapsulamento. Uma outra contribuição da corrente é o efeito de geração de pares elétron-buraco no volume sensível<sup>2</sup> do fototransistor, i.e., na camada de depleção da junção base-emissor e na camada de depleção da junção base coletor e na área dopada da matriz semicondutora. Finalmente, pode ocorrer a incidência de luz sobre a junção resultante da eventual luminescência do próprio encapsulamento.

Quando radiação X incide no fototransistor, pares elétrons-buracos são gerados em virtude dessa interação e uma fotocorrente flui na base, dando origem a uma corrente no emissor e no coletor. Para determinadas faixas de corrente, valem as equações 2 e 3. No entanto, a fotocorrente gerada como resultado da interação dos raios-X com o semicondutor é da ordem de alguns pico-ampère e efeitos não-lineares podem aparecer na relação entre  $I_C$  e  $I_B$ , devido ao fato de que, com uma corrente tão baixa, efeitos de recombinação de portadores podem aparecer com uma intensidade da ordem da corrente de condução.

Em suma, o princípio básico da detecção com o fototransistor baseia-se no fato de que os fótons de raios-X interagem (a) com o material semicondutor, gerando pares elétron-buraco; e (b) com o encapsulamento do fototransistor, gerando elétrons (arrancando da superfície do encapsulamento), que irão produzir radiação secundária. O fluxo total desses portadores dará origem a uma corrente de portadores no dispositivo chamada de fotocorrente de raios-X. Essa fotocorrente gerada está relacionada com a energia média do feixe, i.e., com a energia média dos fótons que incidem sobre o dispositivo (MONEDA et al., 1971).

### 2.4.3 Corrente de fuga num dispositivo semicondutor

Quando dispositivos semicondutores estão sob temperatura ambiente, eles produzem uma corrente elétrica de intensidade muito pequena. Esse efeito é resultado da promoção de elétrons de certos estados energéticos abaixo da banda de condução para a própria banda de condução. De fato, segundo a Teoria de Bandas, quanto maior a população de elétrons na banda de condução, maior será a condutividade do material e, conseqüentemente, maior a corrente circulando no dispositivo, ou seja, maior a corrente de fuga (MONEDA et al., 1971).

---

<sup>2</sup>O volume sensível do transistor é o todo o volume semicondutor do dispositivo; para fins de detecção de radiação, a camada de depleção da junção emissor-base e a camada de depleção da junção coletor-base são as regiões que possuem melhor sensibilidade no que concerne à absorção da energia de fótons e conseqüente geração de pares elétron-buraco.

## 2.5 Espectrometria X e gama

### 2.5.1 Espectrometria com detectores de Germânio Hiperpuro (HPGe) e Ge(Li)

Os detectores de Ge(Li) revolucionaram a espectroscopia gama e X; inicialmente foram largamente utilizados para espectroscopia gama, mas foram rapidamente substituídos, principalmente pela suas dificuldades operacionais, exigindo que fossem mantidos em temperatura de nitrogênio líquido ( $77\text{ K}$ ) mesmo quando não estivessem sendo utilizados, para evitar a migração do lítio da matriz de Ge. Os substitutos preferidos foram os detectores de germânio de alta pureza<sup>3</sup>, que só necessitam de refrigeração a  $77\text{ K}$  durante a operação (NOGUEIRA et al., 2004).

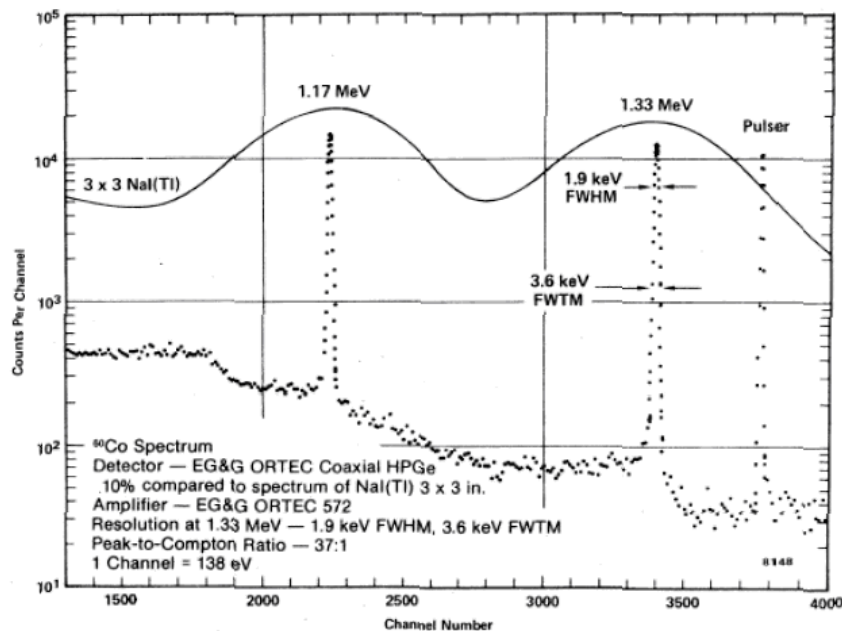


Figura 6: Espectro de  $^{60}\text{Co}$  mostrando resoluções e razões de resolução para o HPGe e o NaI(Tl) (DETONG, 2007).

Com o HPGe foi possível a determinação de níveis de energia e de transições de estados para vários elementos. Para o NaI(Tl), por exemplo, a resolução típica obtida para a linha gama de energia  $0,661\text{ MeV}$  do  $^{137}\text{Cs}$  é de 7%. A utilização do germânio em espectrometria proporcionou a obtenção de resoluções muito melhores. A Figura 6 ilustra o contraste entre esses detectores. Observe que existe um fator bastante significativo na melhora do FWHM<sup>4</sup> para o Germânio Hiperpuro (DETONG, 2007).

### 2.5.2 Espectrometria X com CdTe e CdZnTe

Detectores de Telureto de Cádmio e Telureto de Cádmio e Zinco combinam pesos atômicos relativamente altos e uma banda mais larga que os detectores de Germânio para serem operados em temperatura ambiente. Possuem probabilidade de absorção fotoelétrica para

<sup>3</sup>Hyper Pure Germanium

<sup>4</sup>Full-width at Half Maximum.

energias baixas e médias (até algumas centenas de  $keV$ ) de 4 a 5 vezes maior que os detectores de Germânio e 100 vezes maior que o silício. Apesar de possuírem uma eficiência de detecção bem melhor do que o Ge e o Si, possuem uma resolução bastante pobre comparada à desses materiais. Podem operar em até  $30^\circ C$  para o *modo de pulso*<sup>5</sup> e até  $70^\circ C$  para o *modo de corrente*<sup>6</sup> (MCGREGOR et al., 1998).

O maior problema do CdTe é que ele pode ser polarizado pela captura de elétrons em regiões do detector, e isso pode reduzir a eficiência. No CdZnTe, essa limitação se reduz bastante.

### 2.5.3 Espectrometria X com fotodiodos

Neste tipo de espectrometria, são utilizados fotodiodos como detectores de radiação. Os fotodiodos podem operar em dois modos: modo de contagem de pulso, que utiliza uma polarização reversa; e um modo de corrente (ou fotovoltaico).

Vantagens na utilização de fotodiodos como detectores são:

- Pequenos volumes de detector são necessários para medir baixas taxas de dose;
- Fotodiodos são normalmente insensíveis a variações nas condições ambientais quando utilizados em modo de contagem de pulso;
- Baixas tensões de operação (5 – 30 V);
- Alta eficiência.

## 2.6 Estado da arte de medição de raios-X com fototransistores bipolares de junção

### 2.6.1 Fototransistor quando exposto a feixe de raios-X

Quando se submete um fototransistor a feixes de radiação ionizante, ocorre perda de sensibilidade de detecção de radiação (SANTOS et al., 2002). Essa perda é função da dose no dispositivo. Para feixes de raios-X diagnóstico, a dose pode não ser significativa (poucos  $mGy$ ), e o dispositivo poderá ter uma vida útil maior do que quando submetido a feixes de radioterapia.

Um feixe de raios-X com energia  $E_M$  gera uma fotocorrente  $I_{BR}$ , que funcionará de modo equivalente a uma corrente de base  $I_B$  na operação em região linear de um transistor. O índice  $BR$  faz alusão a que essa fotocorrente gerada no dispositivo é uma corrente de base produzida pelo efeito resultante da interação com a radiação ionizante. Assim, a corrente total no coletor será:

$$I_{CT} = I_C + I_{CR} = \beta(I_B + I_{BR}) \quad (4)$$

---

<sup>5</sup>No *modo de pulso*, a carga gerada na interação entre os fótons e o substrato semiconductor é transformada em um pulso de tensão, que é contado se estiver acima de uma linha de referência de ruídos do instrumento; esse pulso é proporcional à energia depositada pelo detector (EISEN et al., 1990).

<sup>6</sup>No *modo de corrente*, a taxa de energia absorvida pelo substrato semiconductor é convertida em corrente; no entanto, para baixas taxas de dose, da ordem de alguns  $\mu Gy/h$ , a corrente produzida é muito menor que a corrente de escuro inerente do diodo, sendo melhor utilizar o modo de pulso para medição de espectros de energia de feixes com baixas taxas de dose (EISEN et al., 1990).

Nesse trabalho, os autores verificam que após a irradiação, os fototransistores apresentam um crescimento nas curvas de escuro de  $I \times V$ . Por exemplo, para o fototransistor BPW78, uma dose absorvida de 100 Gy provoca o aumento da corrente de escuro de coletor por um fator de 3.

## 2.6.2 Deconvolução de dose de raios-X diagnósticos

Há poucas referências sobre a utilização de fototransistores na medição de raios-X. Santos et al (2002, 2005, 2006) propõem um método experimental para separar as contribuições de dose de Raios-X diagnósticos com a utilização de fototransistores NPN de Silício como detector de radiação.

Neste método, os autores alteram a polarização da base do transistor, de forma que o ponto de operação<sup>7</sup> do dispositivo é alterado e é possível obter-se o ganho como função da energia do fóton que incide no dispositivo. Assim, é possível calcular a dose a partir da discretização da resposta do fototransistor no domínio da energia. A partir de comparações com métodos usuais de medição de dose (câmara de ionização), mostrou-se que é possível calcular a contribuição de dose por energia na faixa de 40 a 140 keV, que corresponde à faixa de diagnóstico, através do controle da polarização da base.

A utilização de fototransistores em dosimetria de raios-X permite separar a contribuição em dose de cada degrau de energia, e isso é chamado de *deconvolução de dose*. Este estudo ainda mostra que a sensibilidade do fototransistor sofre uma variação de acordo com a dose absorvida. Observa-se, também, que o incremento da polarização da base provoca um deslocamento para cima das curvas de resposta (corrente de coletor em função da tensão aplicada na base durante irradiação), o que implica que o decréscimo dessa polarização fará aparecer um ponto de corte a partir do qual somente fótons de mais alta energia (que um certo limite de interação entre esses fótons com o fototransistor) serão medidos. Para medir a resposta de fótons de mais baixa energia, utiliza-se uma corrente de polarização da base mais alta que o valor utilizado na leitura anterior.

## 2.7 Outras aplicações de fototransistores

### 2.7.1 Detecção de partículas ionizantes

Batignani et al. (2004a, 2004b) analisam a utilização de fototransistores NPN como detectores de partículas ionizantes, baseado em suas propriedades intrínsecas de amplificação da carga gerada pela luz visível, por raios-X mole e partículas carregadas. A idéia básica é modificar fototransistores padrão, usualmente fabricados em substratos de silício de baixa resistividade, adaptando-os para substratos com alta resistividade para a absorção das partículas penetrantes no dispositivo.

A detecção da radiação ionizante que penetra no dispositivo, como fótons de raios-X e partículas carregadas de alta energia, é baseada na produção de pares elétron-buracos na região de depleção do coletor.

---

<sup>7</sup>O *Ponto de operação* é a região da reta de carga  $I_C \times V_{CE}$  em que um transistor/ fototransistor pode ser considerado linear.



Vê-se que esse método possui várias vantagens. Primeiro, um grande ganho pode ser obtido em um pequeno volume de detector, logo um simples sistema eletrônico é suficiente para realizar a leitura das medições. Como as camadas litográficas no processo de fabricação do fototransistor são feitas em um lado da matriz semicondutora, uma estrutura de pixels pode ser facilmente obtida. Além disso, a dissipação de potência pode ser muito baixa. Finalmente, o detector pode ser construído tão fino quanto se queira, guardadas as devidas limitações impostas pela barreira de energia da camada de depleção do coletor. A maior limitação desse dispositivo parece ser a largura de banda, abaixo de  $100\text{ kHz}$ , no processo de detecção.

Hara et al. (2006) também estudaram o processo de detecção de fótons por fototransistores e obtiveram características semelhantes aos outros artigos citados.

### 2.7.2 Medição do tempo de exposição de raios-X

Santos e Rizzi (2003) propõem um método de medição do tempo de exposição que um paciente se submete numa radiografia. Esse tempo é um dos parâmetros a ser monitorado pelos órgãos reguladores na saúde pública.

O princípio de medição do tempo de exposição em radiografias está baseado nas características de resposta do fototransistor a feixes de raios-X diagnósticos. Além disso, sendo o fototransistor por si um amplificador de corrente, foi possível acoplar o mesmo em portas lógicas, em que foi possível a elaboração de um sistema eletrônico simples para realizar as medições. Em síntese, a incidência de raios-X provoca o surgimento de um pulso retangular na saída da porta lógica, em que sua duração é igual ao tempo a que foi exposto o paciente.

### 2.7.3 Medição de intensidade luminosa

Sun et al. (2005) fazem uma caracterização do fototransistor bipolar de junção como detector de luz visível, mostrando curvas de sensibilidade (corrente de coletor / potência de luz incidente) em função do comprimento de onda, em função da tensão de polarização e em função da temperatura e curvas de fotocorrente medida em função da potência incidente para várias configurações. Os autores obtiveram sucesso na medição de energias do espectro visível com o fototransistor.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Na determinação do espectro de raios-X, foi desenvolvido um método de análise da resposta do fototransistor a partir do efeito de difusão de portadores de emissor para coletor, resultante de sua polarização. Usando a equação 4, verifica-se que, se a polarização for tal que  $I_B + I_{BR} = 0$ , ou seja,  $I_B = -I_{BR}$ , tem-se que  $I_C = 0$ , ou seja, a polarização  $I_B$  estará suprimindo o efeito produzido pela radiação no fototransistor.

Logo, existe uma corrente de base  $I_{B1}$  que provoca a supressão do sinal provocado pelo feixe de raios-X. Contudo, um feixe de raios-X com energia máxima  $E_{M2}$  maior que  $E_{M1}$  e de mesma fluência fará o dispositivo conduzir novamente, mas uma nova corrente de base pode ser determinada para suprimir a fotocorrente gerada por esse novo feixe. Essa nova contribuição da corrente total no dispositivo é causada pelos fótons cuja energia estão no intervalo entre  $E_{M2}$  e  $E_{M1}$ . Logo, a diferença de contribuições de corrente para os dois feixes está relacionada com a quantidade de fótons cujas energias estão no intervalo entre  $E_{M2}$  e  $E_{M1}$ .

Esse método desenvolvido baseia-se na medição da corrente de coletor em função da corrente de base do fototransistor, através do seguinte procedimento (Figura 7):

1. Aplica-se uma polarização  $V_{CE}$  constante no coletor, com o valor de 3 V;
2. Aplica-se uma corrente de base  $I_B$  que varia em degraus de 5 em 5 pA ou de 10 em 10 pA, partindo de  $-800$  pA até  $+500$  pA. Em cada valor ajustado da corrente de base, mede-se o valor da corrente de coletor  $I_C$ ;
3. Repete-se o passo 2 para cada tensão de tubo de raios-X;
4. Escolhem-se outros valores de corrente de tubo (os valores escolhidos serão mostrados na Tabela 4), para se efetuar as leituras visando verificar se há efeito da taxa de fluência.

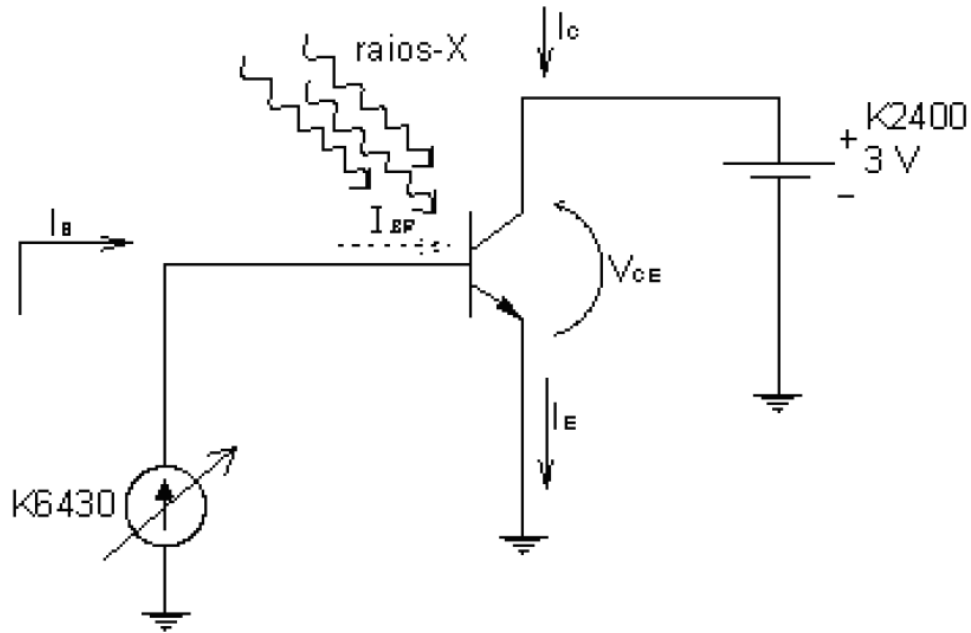


Figura 7: Diagrama esquemático do procedimento de medição da corrente de coletor  $I_C$ .

## 3.1 Material utilizado

### 3.1.1 Detector

O fototransistor L14G1 foi o detector utilizado durante as medições. Ele é um dispositivo hermeticamente fechado, com um ângulo de detecção estreito.

Os fototransistores foram envoltos pela blindagem de um conector metálico, com os terminais ligados ao conector por contato interno e a saída deixada opaca por fita isolante. Essa blindagem tem como objetivo eliminar a radiação espalhada, servir de blindagem de interferência eletromagnética e colimar mais o feixe incidente. A Figura 8 mostra a blindagem utilizada na configuração das medições, com o fototransistor acoplado dentro dela (o fototransistor não se encontra visível na figura). A Figura 9 mostra um fototransistor desse tipo.



Figura 8: Blindagem do fototransistor na posição de irradiação.  
Legenda: 1 - Cabo PTFE conectado à saída da blindagem; 2 - Blindagem metálica; 3 - Suporte para o detector; 4 - Abertura por onde a radiação incide.

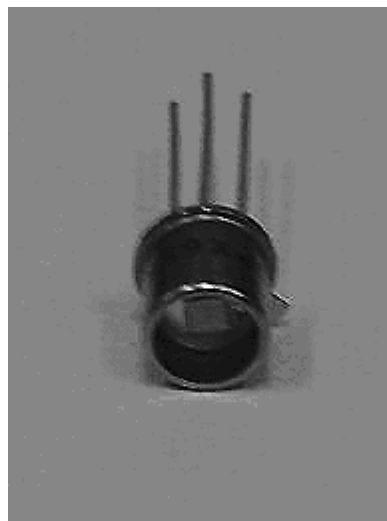


Figura 9: Fototransistor L14G1.

### 3.1.2 Unidade geradora de raios-X

O equipamento usado na irradiação dos fototransistores foi um aparelho de raios-X Pantak modelo HF320, que opera em tensões de 0 a 320 kV (em potencial constante) e correntes de 0 a 25 mA. Na Figura 10 é mostrado o módulo de controle do Pantak HF 320.

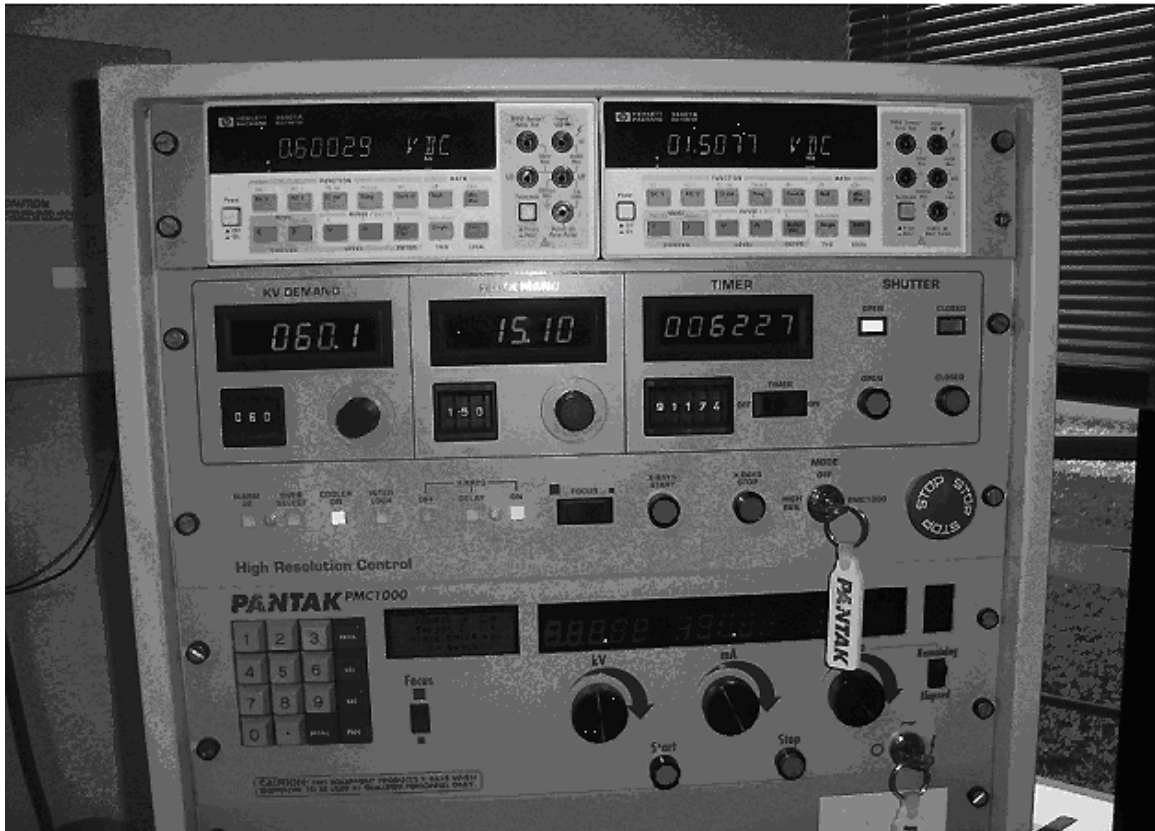


Figura 10: Módulo de controle do Pantak HF320 externo à sala de irradiações.

### 3.1.3 Sistemas eletrônicos

Os equipamentos utilizados na medição de correntes e como fonte de corrente e tensão foram:

- Fonte de corrente modelo 6430, da *Keithley*, utilizado como fonte de corrente (KEITHLEY, 2007b);
- Medidor de corrente modelo 2400, da *Keithley*, utilizado como fonte de tensão e medidor de correntes de coletor (KEITHLEY, 2007a);
- Termômetro *Fluke*.

### 3.1.4 Câmara de ionização

A câmara de ionização empregada foi uma câmara cilíndrica tipo Farmer fabricada pela Nuclear Enterprises, modelo 2571, número de série 2194. Esta câmara foi previamente calibrada no Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN).

Essa câmara de ionização foi utilizada para caracterizar as taxas de dose do Pantak 320, de modo que para qualquer configuração de tensão e corrente de tubo que fosse utilizada para irradiar os fototransistores, o valor dessa taxa de dose estivesse disponível. De mão do tempo de exposição para cada configuração, foi possível calcular as doses a que foram expostos os detectores. A Tabela 3 mostra os valores totais de dose absorvida ( $Gy$ ), para a irradiação com filtro de  $2,5\text{ mmAl}$  e para a irradiação sem filtração adicional.

As taxas de dose do Pantak HF 320 para geometrias sem filtro (F.I.<sup>8</sup>), com filtro de  $2,5\text{ mm Al}$  e com filtro de  $0,25\text{ mm Cu}$  (nesta filtração foram feitas medições de *conformidade estatística*<sup>9</sup>, como descrito no item 3.4), estão presentes no Apêndice C.

Tabela 3: Doses absorvidas pelos fototransistores durante as irradiações para o sistema sem filtração adicional e com filtração adicional de  $2,5\text{ mm Al}$ .

Filtração	F.I.	F.I.+ $2,5\text{ mm Al}$
$I_{tubo}(mA)$	Dose absorvida (Gy)	
10	18,08	8,23
15	27,22	8,39
20	36,40	-

### 3.1.5 Programas computacionais

Para automatizar as leituras, foi desenvolvido um programa computacional, chamado de *Fototrans*, que executa rotinas de controle sobre os equipamentos de medição da Keithley no que concerne à leitura de dados, visualização de gráficos em tempo real e leitura e armazenamento das medições em arquivos de banco de dados. Possui dois módulos de configurações e quatro módulos de medições. Os módulos de medições executam as atividades de *Espectrômetro*, *Caracterização  $I_C \times V_{CE}$  sem controle da corrente de base*, *Caracterização  $I_C \times V_{CE}$  com controle da corrente de base*, e *Caracterização de  $I_C \times I_B$  em escuro*. Detalhes do funcionamento do programa estão no apêndice A.

Um outro programa computacional, *FototransIMv2*, foi desenvolvido para visualização de imagens de tempo de execução projetado para facilitar as análises dos gráficos dos bancos de dados do programa *Fototrans*. Este *software* apresenta os gráficos, em seqüência, relativos aos bancos de dados gerados pelo programa *Fototrans*.

## 3.2 Irradiação do fototransistor.

O fototransistor foi posicionado a 1 m do ponto focal do tubo de raios-X e alinhado para estar no centro do seu feixe através de dois lasers que se cruzavam nesse centro. As medições foram realizadas: (a) sem filtros adicionais; e (b) com filtro adicional de  $2,5\text{ mm Al}$ , referente à norma IEC-RQR 61267 (INTERNATIONAL ELECTROTECHCNICAL COMMISSION, 2005). As tensões de tubo variaram desde a tensão de escuro ( $0\text{ kV}$ ) a  $200\text{ kV}$  e as correntes de tubo variaram de 0 a  $20\text{ mA}$ , conforme indicado na Tabela 4. O equipamento Keithley 6430 funcionou como fonte de corrente para polarizar o

<sup>8</sup>F.I. denota *filtração inerente*.

<sup>9</sup>Medições utilizando condições de referência ou com alta taxa de reprodutibilidade para investigar se não há flutuações estatísticas nas medições do experimento em questão.

fototransistor com  $I_B$ . Para medir a corrente de saída no coletor do fototransistor utilizouse o Keithley 2400.

A Tabela 4 mostra os valores de tensão aplicadas no tubo de raios-X para o qual os fototransistores foram irradiados. A primeira coluna mostra a corrente no tubo de raios-X e as colunas seguintes mostram as tensões aplicadas (em  $kV$ ) para cada geometria de filtração utilizada, i.e., para irradiação apenas com filtração inerente (FI) e para irradiação com filtração adicional.

O procedimento de medição consistiu de injetar corrente na base IB do fototransistor e medir a corrente de coletor IC, com a corrente IB variando de  $-800\text{ pA}$  até  $500\text{ pA}$ , com degraus de  $10\text{ pA}$  e duração  $1\text{ s}$ . Para cada configuração de tensão e corrente de tubo, uma curva de corrente de coletor em função da corrente de base era medida pelo sistema, para esses valores de base. Fixada uma determinada corrente de tubo (e.g.  $10\text{ mA}$ ), essas curvas de  $I_C \times I_B$  eram medidas para todas as tensões de cada grupo de tensão (e.g. 40, 50, ..., 160, para o sistema sem filtração adicional). Após o acionamento da fonte de raios-X (através do console do Pantak HF 320), o seu cronômetro era automaticamente acionado e, manualmente, a rotina de medição do *Fototrans*.

Tabela 4: Tensões ( $kV$ ) de geração dos raios-X para irradiação dos fototransistores para cada corrente e filtração aplicados. F.I. denota *filtração inerente*.

Corrente no tubo (mA)	Tensões aplicadas (kV)	
	F.I.	F.I.+2,5 mm Al
10	40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160
15	40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150	1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160, 180, 200
20	60, 80, 100, 120	-

Antes que os ciclos começassem e no intervalo entre os ciclos, os fototransistores eram caracterizados, de modo a se ter um acompanhamento da variação dos parâmetros de medição quando os detectores não estavam sendo irradiados. Essas caracterizações foram realizadas conforme a descrição no item 3.3.

A Figura 11 ilustra o procedimento de medições da etapa de irradiação. E a Figura 12 ilustra o processo de irradiação do fototransistor durante o procedimento de medição.

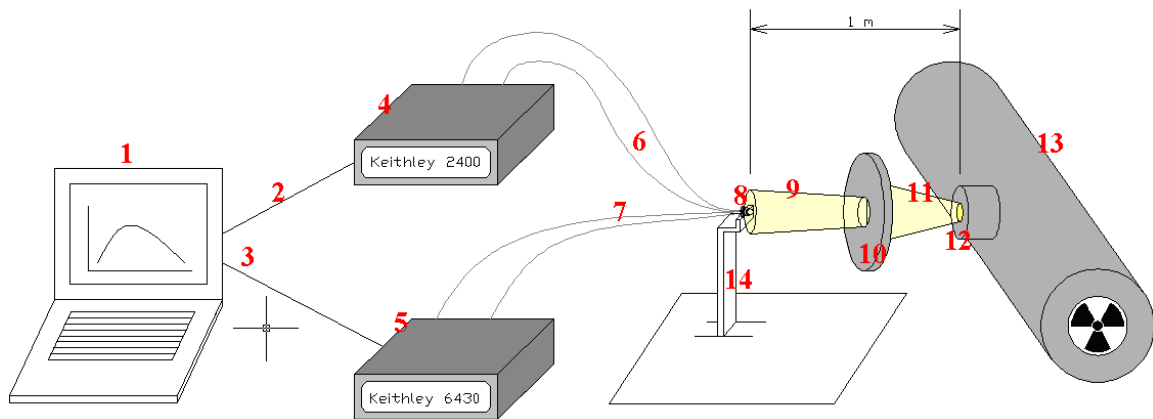


Figura 11: Sistema de aquisição de dados utilizado durante a irradiação dos fototransistores. Legenda: 1 - Computador; 2 - Cabo USB para o Keithley 2400; 3 - Cabo USB para o Keithley 6430; 4 - Keithley 2400, utilizado como medidor de corrente; 5 - Keithley 6430, utilizado como fonte de corrente; 6 - Ligação do cabo PTFE do medidor de corrente para o fototransistor; 7 - Ligação do cabo PTFE da fonte de corrente para o fototransistor; 8 - Fototransistor; 9 - Feixe de raios-X após colimador; 10 - Colimador tipo "pirulito"; 11 - feixe de raios-X após sair da fonte; 12 - Saída da fonte de raios-X; 13 - Pantak HF 320, que é a fonte de raios-X; 14 - suporte para acoplar o fototransistor, em cima de uma mesa de apoio.

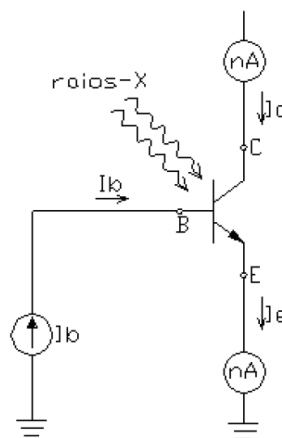


Figura 12: Esquema elétrico da medição da corrente de coletor do fototransistor em função da corrente de base durante a irradiação do fototransistor, indicando os caminhos normais de corrente.

De uma forma simples, podemos descrever o algoritmo de obtenção da distribuição de fótons através dos seguintes passos:

1. Configuração inicial da fonte de raios-X, aquecimento do tubo de raios-X, alinhamento do feixe, alinhamento do detector;
2. Ajuste da corrente de tubo;
3. Ajuste da tensão de tubo;
4. Medição da curva  $I_C \times I_B$  ( $I_B$  variava de  $-800 \text{ pA}$  até  $500 \text{ pA}$ , com degraus de  $10 \text{ pA}$  e duração de  $1 \text{ s}$ );



5. Novo ajuste na tensão de tubo e medições subseqüentes da curva  $I_C \times I_B$ ;
6. Quando todas as curvas tiverem sido obtidas para as tensões de tubo do ciclo, essas curvas serão traçadas em um único gráfico e é determinada a curva de corrente de corte  $I_{B0}$  em função da tensão  $kV$ ;
7. Escolhe-se cada uma das curvas de  $I_C \times I_B$ . Lembrando que para cada tensão de tubo existe uma corrente de corte  $I_{B0}$ , para cada corrente  $I_{B0}$ , procura-se o valor correspondente de  $I_C$  na curva de  $I_C \times I_B$  escolhida. Esse valor de  $I_C$  representa a contribuição dessa tensão de tubo na corrente de coletor.
8. Mapeia-se o valor da tensão de tubo para essa corrente  $I_C$  e se obtém a curva  $I_C \times kV$ .
9. Finalmente, diferencia-se a curva obtida no item anterior, através de diferenciações sucessivas.

### 3.3 Variações paramétricas dos dispositivos

Para caracterizar alterações nos parâmetros semicondutores do fototransistor como detector de raios-X, três tipos de experiências podem ser realizadas. O primeiro tipo consiste em medir a relação entre a corrente de coletor  $I_C$  em função da tensão  $V_{CE}$  entre coletor e emissor. Nesta etapa, uma tensão de 0 a 10 V foi posta no coletor com o emissor aterrado, e medido o valor da corrente de coletor para passos de tensão  $V_{CE}$  de frações de volt. Entre cada medição o fototransistor foi irradiado, de modo que a dose pôde ser contabilizada e a curva do ciclo seguinte (considerando os vários momentos de medição da curva, em que entre eles houve irradiação do fototransistor) representava a variação de parâmetros de medição em relação à curva anterior (ou seja, em relação ao estado de dose anterior do dispositivo).

O outro tipo de experiência é a medição do  $h_{fe}^{10}$  de escuro para o fototransistor, durante os intervalos de irradiação deles. Ou seja, com a fonte de raios-X desligada, foi medido o valor da corrente de coletor em função da corrente de base, sendo esta variando de 0  $\mu A$  até 5  $nA$ . Da mesma forma que a caracterização anterior (das curvas de  $I_C \times V_{CE}$ ), as curvas obtidas nos intervalos de não-irradiação eram comparadas; a variação dessas curvas (considerando, por exemplo, um desvio médio) serviu para avaliar a variação dos parâmetros do dispositivo causados pela irradiação.

Finalmente, há mais uma forma de avaliar a consistência dos parâmetros de medição do fototransistor. Durante os ciclos de irradiação, um feixe de referência foi escolhido para a energia máxima do feixe de 120  $keV$ , com taxa de dose nominal de 1  $mGy/s$ . Esta experiência consiste em medir a curva de  $I_C \times I_B$  para a qualidade de radiação do feixe padrão algumas vezes durante os ciclos de irradiação do fototransistor. Mais uma vez, a variação nessas curvas é um indicador da variação das características de medição do dispositivo.

---

<sup>10</sup>O  $h_{fe}$  é uma outra forma de se referir ao ganho da corrente de coletor em relação à corrente de base, i.e.,  $h_{fe} = \beta$ .

### 3.4 Análises estatísticas das medições

Foi realizada uma análise estatística com o intuito de verificar a conformidade e a repetitividade dos resultados das medições no quesito que diz respeito à degradação do fototransistor devido à irradiação. Nesta análise, um feixe de referência foi escolhido para irradiar o fototransistor, e se mediu durante essa irradiação, em seqüência, a curva de  $I_C \times I_B$  cinco vezes. O feixe de referência escolhido foi o feixe que tinha energia máxima de  $120 \text{ keV}$ , corrente de tubo de  $12,19 \text{ mA}$  e que dava taxa de dose de  $1,0 \text{ mGy/s}$  utilizando filtração de  $0,25 \text{ mmCu}$ .

O ponto de degradação máxima (ponto em que as curvas variaram mais) foi escolhido como sendo o fator de representação do desvio estatístico. Para realizar a análise estatística, foi utilizado um feixe de referência para dar a informação do erro estatístico médio das medições.

Para minimizar o efeito da degradação do fototransistor, um fator de correção baseado nas variações paramétricas foi aplicado nesse desvio, calculado a partir da variação máxima das cinco curvas. Por exemplo, se as curvas do feixe de referência tiveram um desvio máximo de  $5\%$ , mas os fototransistores sofreram uma degradação de  $8\%$  no processo de medição dessas curvas, o desvio estatístico real foi de  $5\% \times (100 - 8)\% = 4,6\%$ .

Cada curva de referência foi medida numa faixa de corrente de base de  $-500 \text{ pA}$  a  $500 \text{ pA}$ , com degraus de  $10 \text{ pA}$  entre cada medição, que durava  $1 \text{ s}$ . O fator de correção a ser calculado é o fator que provoca uma degradação na resposta do fototransistor equivalente ao intervalo dessa irradiação no feixe de referência (que foi de  $100 \text{ s}$ ). Considerando que o intervalo para reativar o sistema de medição e salvar a leitura anterior não ultrapassa  $10 \text{ s}$ , o tempo estimado de degradação é de  $110 \text{ s}$  e esse será o atraso para efeito de correção do desvio estatístico. Ou seja, a dose responsável por essa degradação (lembrando que o feixe de referência possui taxa de dose de  $1,0 \text{ mGy/s}$ ) é de  $110 \text{ mGy}$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Comportamento das correntes do fototransistor com a radiação para configuração sem filtração adicional

As Figuras 13-15 mostram algumas curvas com a resposta do fototransistor L14G1 para irradiação com tensão aplicada no intervalo de 40 kV a 160 kV, com correntes de tubo de 10 mA, 15 mA e 20 mA, respectivamente, em termos da corrente de coletor, em função da corrente de base. No Apêndice D encontram-se as curvas de  $I_C \times I_B$  com todas as medições realizadas (com as demais tensões de tubo).

A corrente de polarização de base variou de  $-500 \text{ pA}$  até  $500 \text{ pA}$  com passos de  $10 \text{ pA}$ . Foi observado na Figura 13 (corrente de tubo de 10 mA), para tensões abaixo de 160 kV, que essa resposta (da corrente de coletor) é próxima de zero para correntes de base abaixo de  $-15 \text{ pA}$ ; e através das Figuras 14 e 15, que a resposta para correntes de tubo de 15 mA e 20 mA é próxima de zero para correntes de base abaixo de  $-65 \text{ pA}$  e  $-155 \text{ pA}$ , respectivamente.

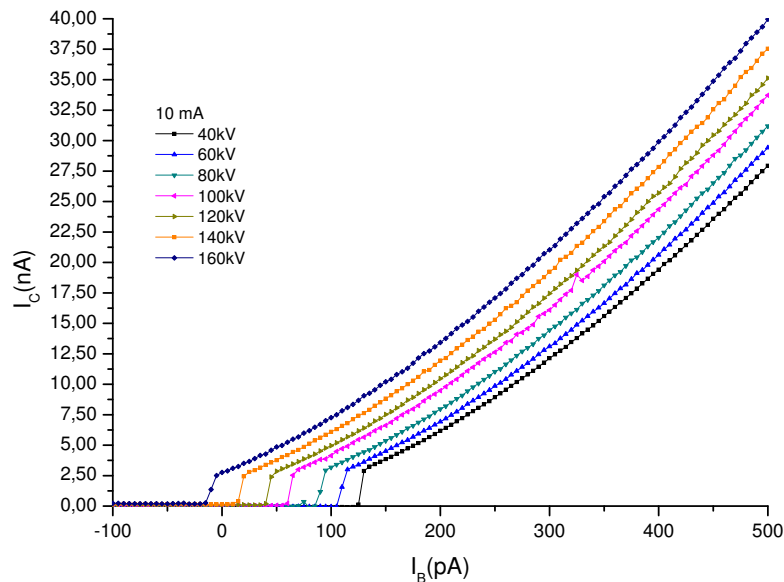


Figura 13: Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 10 mA. Sem filtração adicional.

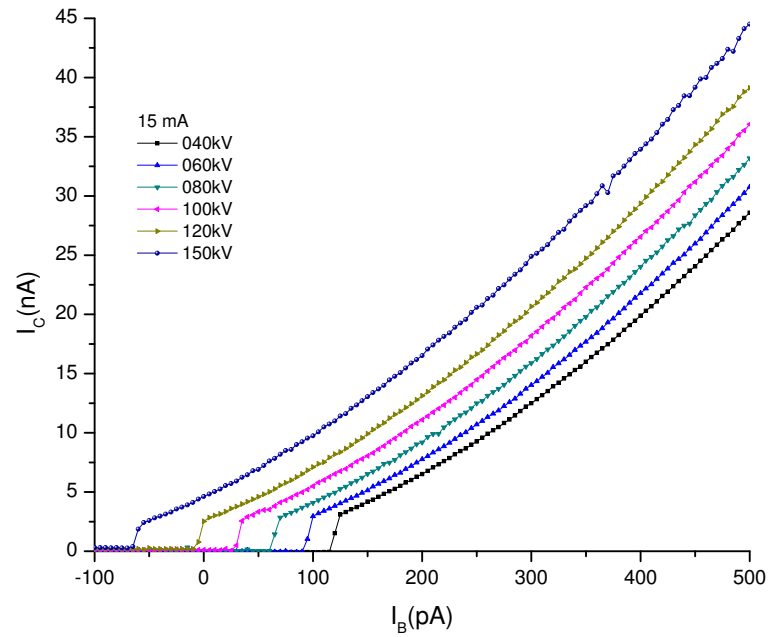


Figura 14: Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 15 mA. Sem filtração adicional.

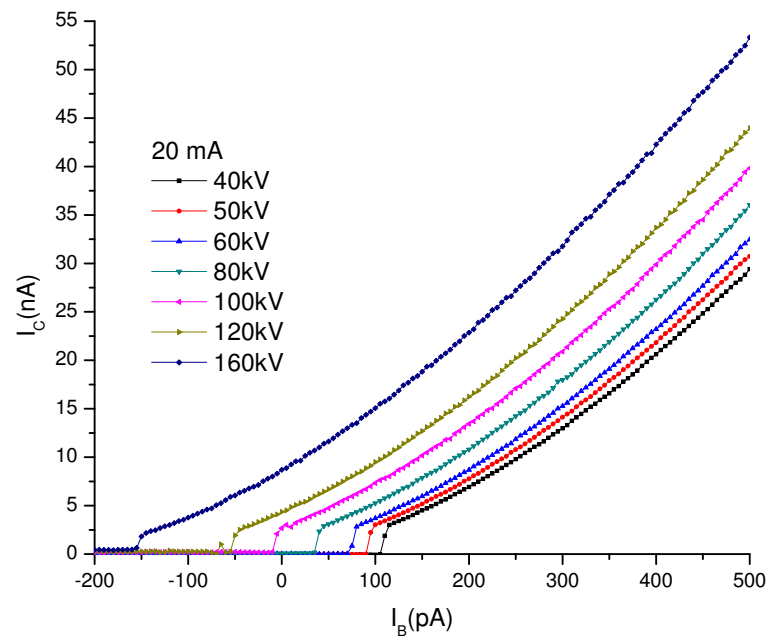


Figura 15: Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 20 mA. Sem filtração adicional.

Pode-se ainda notar que, para cada tensão de tubo, existe uma corrente de base mínima abaixo da qual nenhuma resposta à radiação é observável. Como exemplo, em  $120\text{ kV}$ , para  $10\text{ mA}$  de corrente de tubo, tem-se que para  $I_B < +40\text{ pA}$ , o efeito da irradiação é anulado. Diz-se que o fototransistor está cortado. Para  $I_B = +40\text{ pA}$ , ainda resulta  $I_C = 0$ , o que significa, pela equação 4, que  $I_{BR} = -40\text{ pA}$ . Dessa forma, variando a polarização de base do fototransistor, pode-se determinar cada corrente  $I_{BR}$  para cada tensão de tubo.

Além disso, observa-se um deslocamento das curvas para a esquerda (onde a corrente de base é mais negativa), à medida em que a corrente do tubo cresce. De fato, o aumento da fluência de fótons produz mais fotocorrente no fototransistor e para haver o bloqueio dessa fotocorrente, mais corrente de polarização de base tem que ser aplicada no sentido reverso. Prosseguindo no exemplo, para  $120\text{ kV}$ , as correntes de corte para correntes de tubo de  $15\text{ mA}$  e  $20\text{ mA}$  são de  $-10\text{ pA}$  e  $-55\text{ pA}$ , respectivamente. Ou seja, um incremento de  $5\text{ mA}$  na corrente de tubo provocou um decremento médio de  $45\text{ pA}$  na corrente de coletor para essa configuração de tensão de tubo e geometria.

As Figuras de 16 a 18 mostram gráficos da corrente de corte  $I_{B0}$ <sup>11</sup> em função da tensão aplicada no tubo, para correntes de tubo de  $10\text{ mA}$ ,  $15\text{ mA}$  e  $20\text{ mA}$ , respectivamente. Essas correntes de corte foram obtidas a partir das curvas de  $I_C \times I_B$  (Figuras de 13 a 15), em que cada valor de corte da corrente de coletor foi relacionado com seu valor de tensão de tubo correspondente. Pode-se observar o comportamento decrescente dessa corrente de corte para o aumento da tensão de tubo.

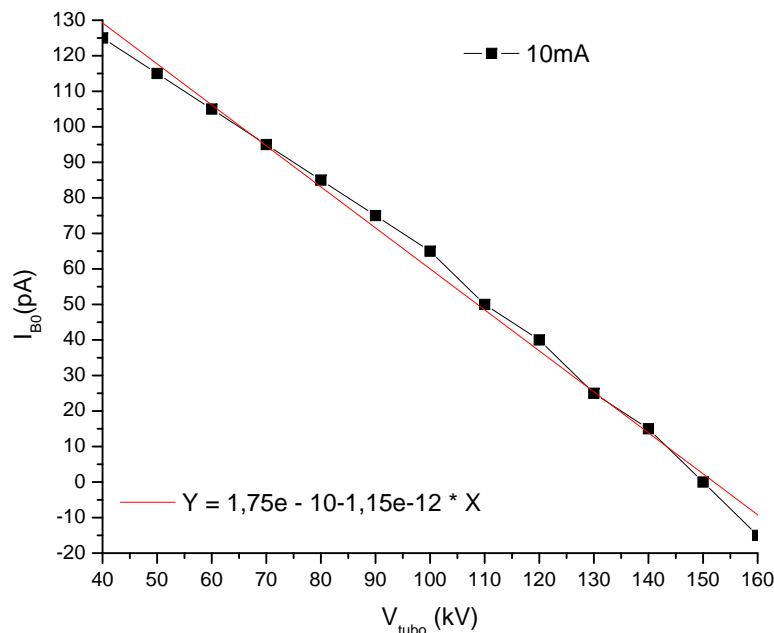


Figura 16: Curva para o fototransistor L14G1 da corrente de corte em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo de  $10\text{ mA}$ . Sem filtração adicional.

<sup>11</sup>Define-se a corrente  $I_{B0}$  como sendo o valor da corrente  $I_{BR}$  que anula a corrente de coletor  $I_C$ .

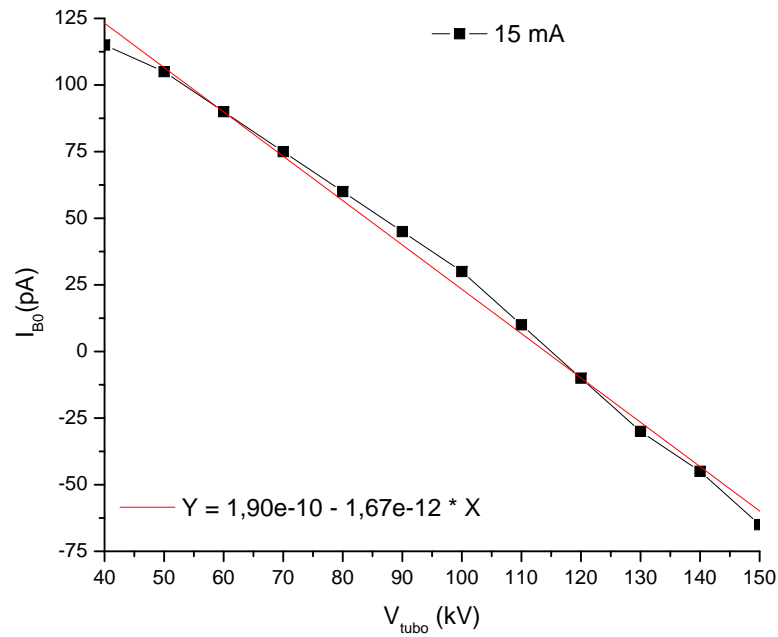


Figura 17: Curva para o fototransistor L14G1 da corrente de corte em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo de 15 mA. Sem filtração adicional.

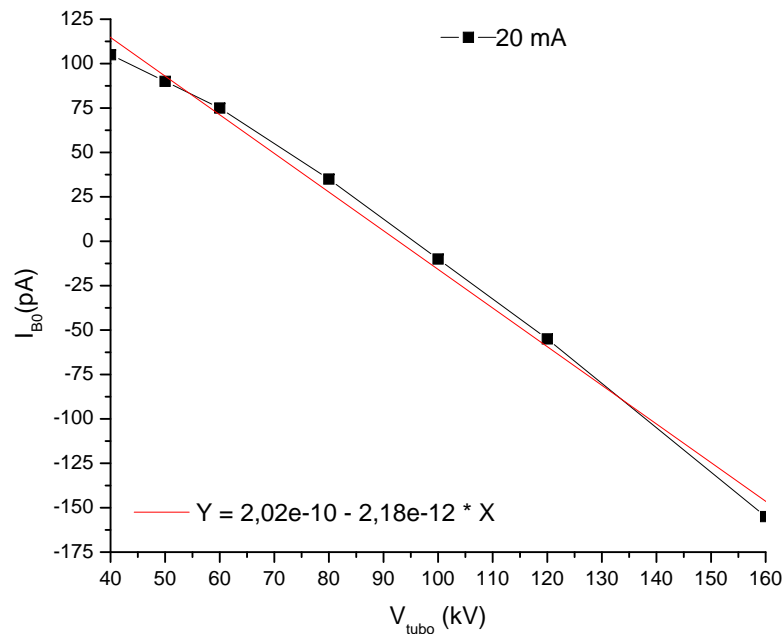


Figura 18: Curva para o fototransistor L14G1 da corrente de corte em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo de 20 mA. Sem filtração adicional.

Os gráficos das Figuras de 16 a 18 foram utilizados para determinar o comportamento da corrente de corte do fototransistor, e portanto da fotocorrente  $I_{BR}$ . Contudo uma

observação mais clara da interação dos raios-X com o detector pode ser vista num gráfico de corrente de coletor em função da tensão aplicada  $I_C \times kV$ , como pode ser verificado nas Figuras de 19 a 21, para correntes de tubo de 10 mA, 15 mA e 20 mA, respectivamente. Nesses gráficos, obtidos a partir da polarização de base variando entre 150 pA e 500 pA, observa-se que  $I_C$  cresce quase que linearmente com o aumento da tensão aplicada no tubo.

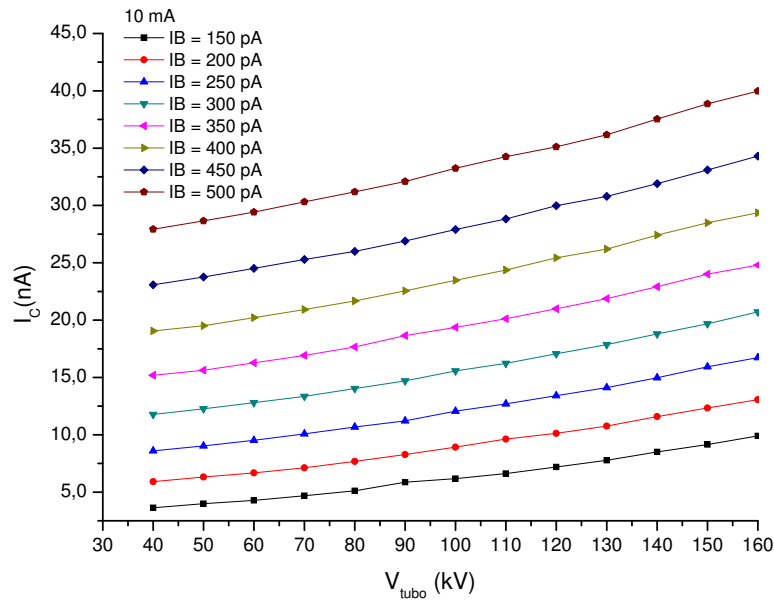


Figura 19: Resposta para o fototransistor L14G1 da corrente de coletor em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo fixa em 10 mA, Sem filtração adicional.

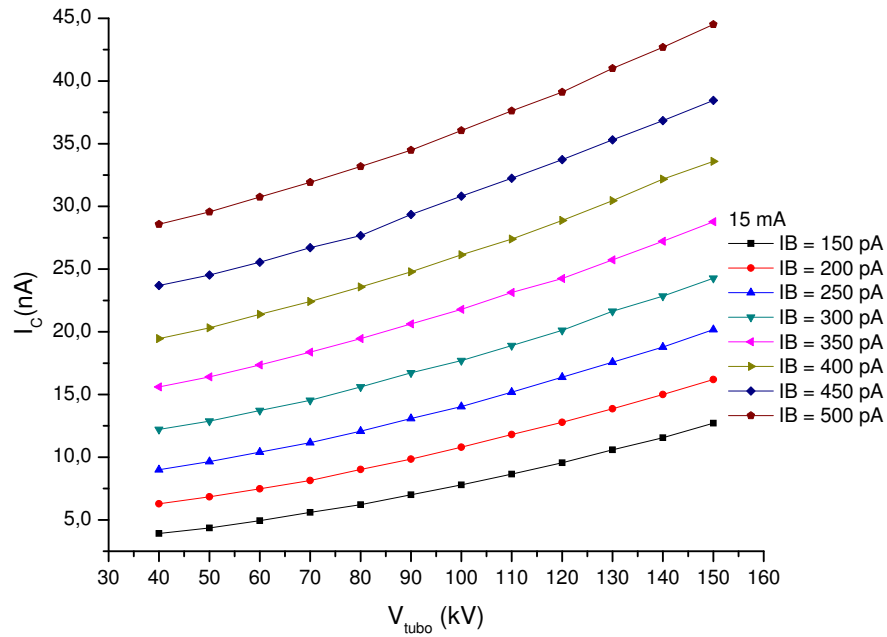


Figura 20: Resposta para o fototransistor L14G1 da corrente de coletor em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo fixa em 15 mA, Sem filtração adicional.

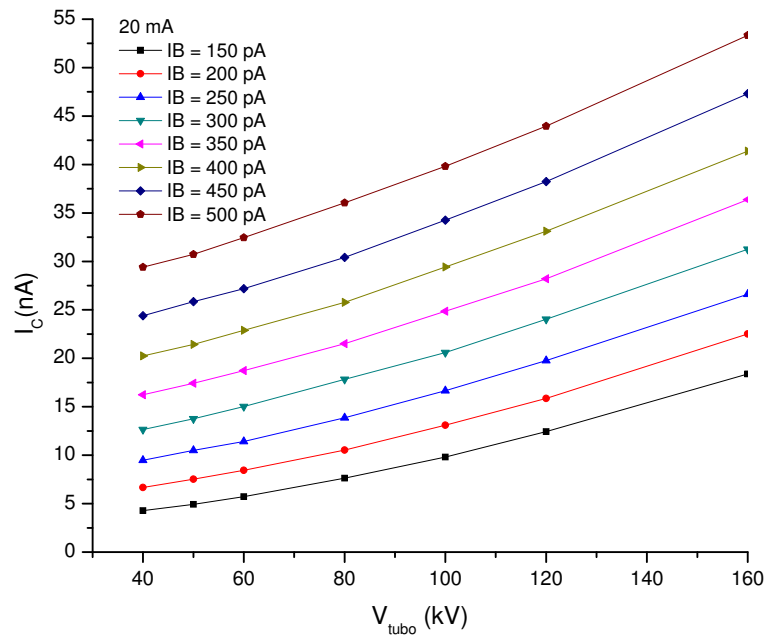


Figura 21: Resposta para o fototransistor L14G1 da corrente de coletor em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo fixa em 20 mA, Sem filtração adicional.



As distribuições equivalentes de energia resultantes dessa configuração estão mostradas no Apêndice B, iniciando na Figura 39 e finalizando na Figura 59.

## 4.2 Comportamento das correntes do fototransistor com a radiação para sistema com filtração adicional de 2,5 mm Al.

O gráfico da Figura 22 mostra algumas curvas de  $I_C \times I_B$ , variando  $I_B$  numa faixa de  $-750 \text{ pA}$  a  $500 \text{ pA}$ , com degraus de  $10 \text{ pA}$ , para tensões de tubo entre  $40 \text{ kV}$  e  $160 \text{ kV}$  com corrente de tubo de  $10 \text{ mA}$ , para irradiação com filtração adicional de  $2,5 \text{ mmAl}$ . No Apêndice D encontram-se as curvas de  $I_C \times I_B$  com todas as medições realizadas (com as demais tensões de tubo medidas).

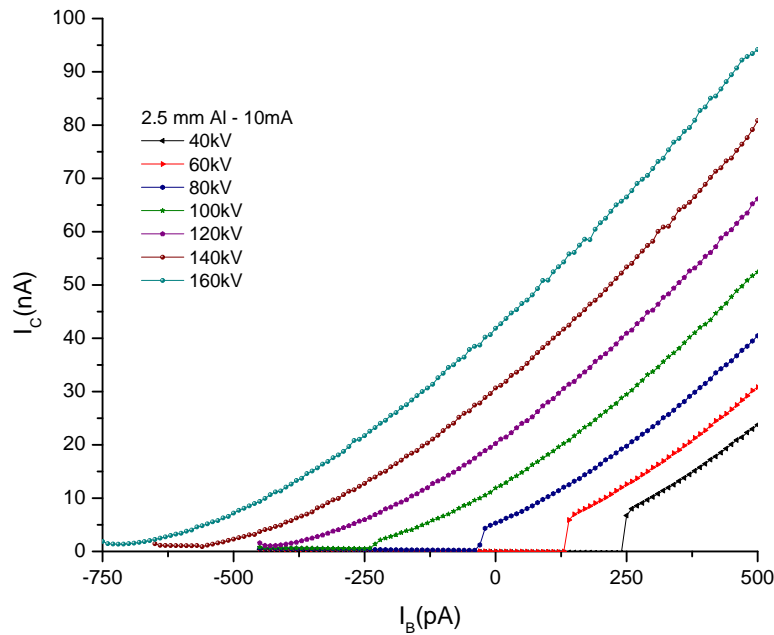


Figura 22: Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre  $40 \text{ kV}$  e  $160 \text{ kV}$  e corrente de tubo fixa em  $10 \text{ mA}$ . Filtração adicional de  $2,5 \text{ mm Al}$ .

A Figura 23 mostra a curva da corrente de corte para essa configuração de corrente de tubo e filtração adicional. Observe que essas curvas apresentam um comportamento semelhante às obtidas para feixes de raios-X sem filtração adicional.

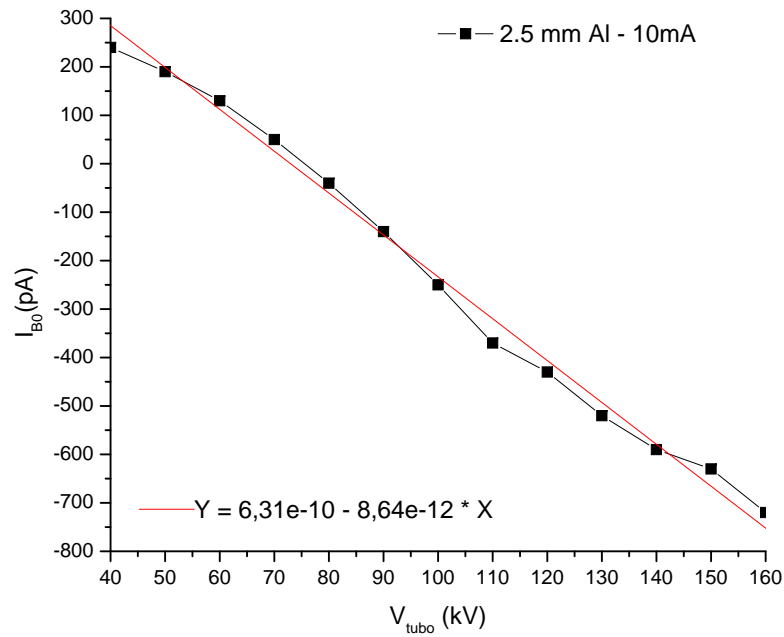


Figura 23: Curva para o fototransistor L14G1 da corrente de corte em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo de 10 mA. Filtração adicional de 2,5 mm Al..

A Figura 24 mostra a corrente de coletor em função da tensão aplicada, parametrizada pela corrente de base  $I_B$ . Observa-se que, para  $I_B = 500 \text{ pA}$ , obtém-se uma resposta praticamente linear de  $I_C \times kV$  a partir de uma tensão próxima de 50 kV.

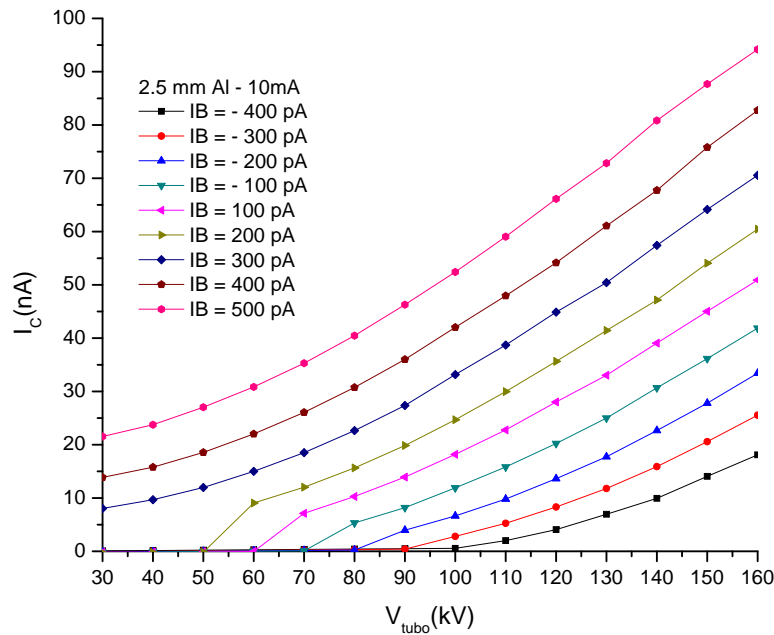


Figura 24: Resposta para o fototransistor L14G1 da corrente de coletor em função da tensão aplicada no tubo de raios-X para uma corrente de tubo fixa em 10 mA, Filtração adicional de 2,5 mm Al..

As distribuições equivalentes de energia resultantes dessa configuração estão mostradas no Apêndice B, iniciando na Figura 60 e finalizando na Figura 69.

### 4.3 Distribuição das intensidades de radiação em função da energia máxima do feixe de raios-X

A distribuição da intensidade de radiação em função da energia máxima dos fótons do feixe de raios-X é obtida utilizando-se as curvas da corrente de corte (Figuras 17 - 18) para determinar o valor da corrente de coletor que corresponde à distribuição integral de energias (equivalente ao espectro de energias integral). Para cada corrente de corte, existe uma corrente de coletor diferente de zero a ser medida na tensão de tubo (equivalente à energia máxima do feixe) a que se deseja obter o espectro, como explicado na metodologia. Essa corrente de coletor é relacionada com a energia máxima do feixe aplicado (porque ela provoca o limite de condução no fototransistor).

Isto é, como cada corrente de corte bloqueia a fotocorrente de coletor gerada por cada fóton com energia em uma determinada faixa, para um valor fixo e discreto de energia máxima de feixe, a variação dessa corrente de base provoca o aparecimento de uma fotocorrente que estará relacionada com a parcela dos fótons que não contribuíram com a formação da fotocorrente (ou seja, fótons de energia maior que o valor de energia que está relacionado com a corrente de corte atual). Assim, fixando-se corrente e tensão de tubo, mapeia-se o valor de cada corrente de base (agora não mais de corte, mas uma corrente injetada na base para suprimir o efeito dos fótons de mais baixa energia)

presente na curva de corte, para o seu correspondente valor de corrente de coletor para aquela tensão aplicada. Diferenciando-se essa curva obtida de  $I_C \times E(keV)$ , obtém-se a curva de  $\Delta\hat{I}_C \times E(keV)$ , que representa a distribuição de energias máximas do feixe de raios-X na configuração dada.

Como exemplo, seja a configuração de 10 mA de corrente de tubo e 130 keV de energia máxima do feixe, para o sistema com filtração adicional de 2,5 mmAl (Figura 75, no Apêndice D). Pretende-se determinar a distribuição de energias do feixe equivalente para essa configuração. A partir da curva da Figura 75, de  $I_C \times I_B$ , obtém-se a curva de corte da Figura 23, de  $I_{B0} \times kV$ . Para vários valores da curva de corte (adotou-se tomar apenas os pontos medidos de  $I_B$ ), procura-se o valor correspondente de  $I_C$  na curva  $I_C \times I_B$ . Na Figura 25 é apresentada a distribuição de energias do feixe, obtida a partir dos dados presentes na Tabela 5, onde se encontram esses valores calculados. Nessa Tabela, observe que a coluna  $\Delta\hat{I}_C(nA)$  é calculada pela diferença entre os valores sucessivos da coluna  $\hat{I}_C(nA)$ .

Tabela 5: Valores das correntes de corte  $I_{B0}$ , corrente de coletor correspondente ao corte e variação dessa corrente de coletor, obtidos a partir de dados presentes nas Figuras 75 e 23.

Tensão (kV)	$I_{B0}(pA)$	$\hat{I}_C(nA)$	$\Delta\hat{I}_C(nA)$
0	280	49,63	-
10	290	50,42	-0,79
20	285	49,63	0,79
30	270	48,47	1,16
40	240	45,83	2,64
50	190	41,44	4,39
60	130	35,61	5,82
70	50	29,03	6,58
80	-40	22,10	6,93
90	-140	15,36	6,74
100	-250	9,24	6,13
110	-370	4,07	5,17
120	-430	2,26	1,81
130	-520	1,00	1,26

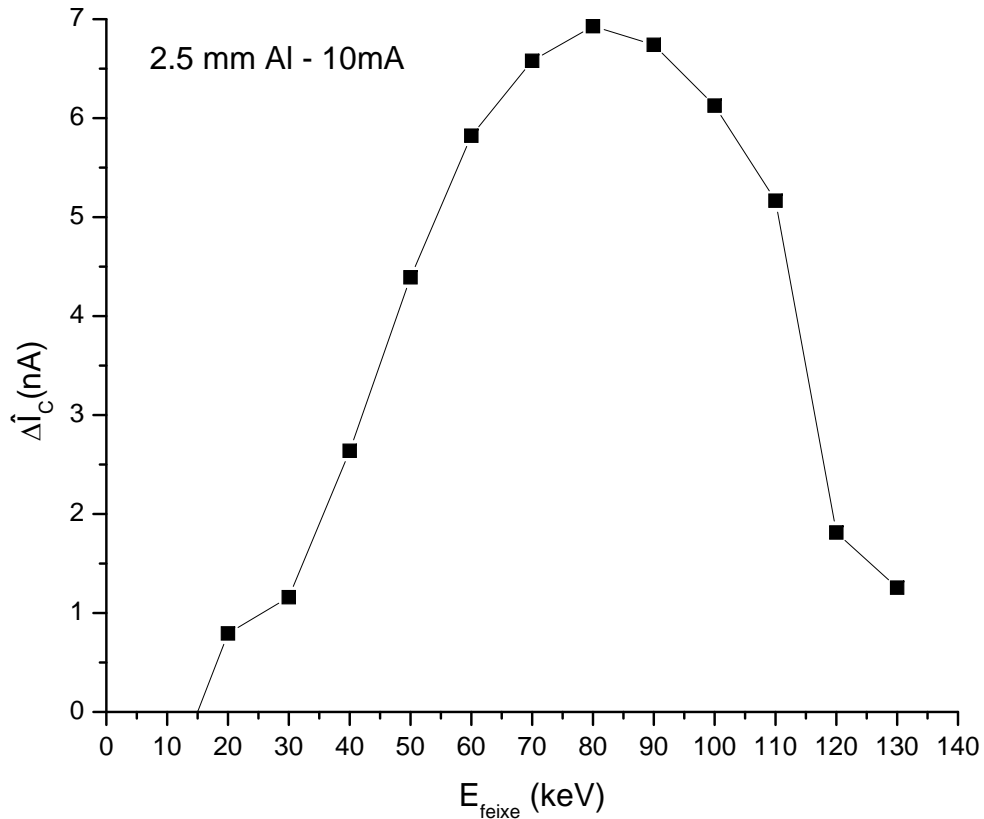


Figura 25: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 130 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Filtração adicional de 2,5 mm Al..

O mesmo procedimento foi utilizado para calcular as distribuições de energia para os demais valores de corrente e tensão de tubo. Esses gráficos estão mostrados no Apêndice B. As figuras 39 até 47 mostram as distribuições de energias para sistema sem filtração adicional e 10 mA de corrente de tubo. As figuras 48 a 55 mostram as distribuições de energia para sistema sem filtração adicional, e corrente de tubo de 15 mA. As figuras 56 a 59 mostram as distribuições de energia para sistema sem filtração adicional e corrente de tubo de 20 mA. E as figuras 60 até 69 mostram os espectros para a qualidade com filtração adicional de 2,5 mm Al, e corrente de tubo de 10 mA.

#### 4.4 Comparações com o HPGe

As Figuras 26-28 mostram distribuições de energias para energia máxima do feixe de 90 keV, 100 keV e 120 keV, respectivamente, para intensidades relativas, normalizadas no pico máximo, sem filtração adicional, para medições com o L14G1 e com o Germânio Hiperpuro. As Figuras 29-31 mostram distribuições de energias para o HPGe e o L14G1 para energias máximas de feixe, respectivamente, de 70 keV, 80 keV e 120 keV para filtração adicional de 2,5 mmAl. As Tabelas 6 e 7 mostram os valores de conversão para

a eficiência relativa entre as medições utilizando o HPGe e o L14G1. Percebe-se que o fototransistor possui uma melhor sensibilidade de detecção da radiação para fótons com energia equivalente acima de 70 V.

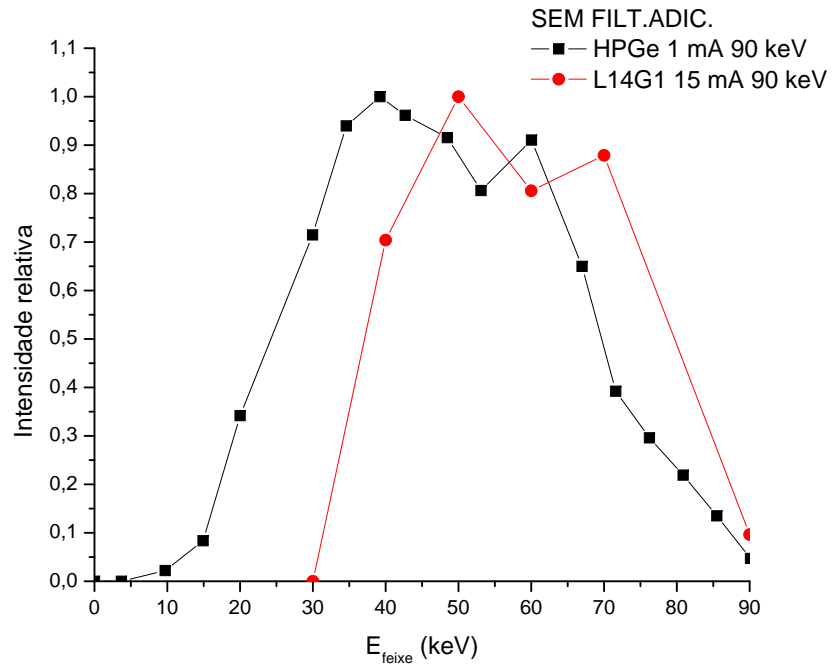


Figura 26: Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 90 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Sem filtração adicional. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005).

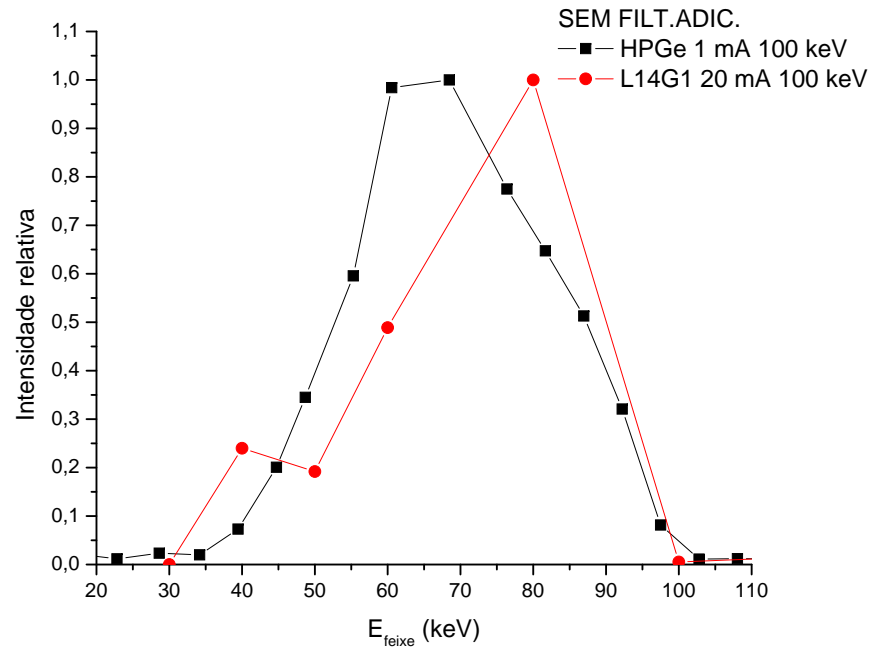


Figura 27: Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 100 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Sem filtração adicional. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005).

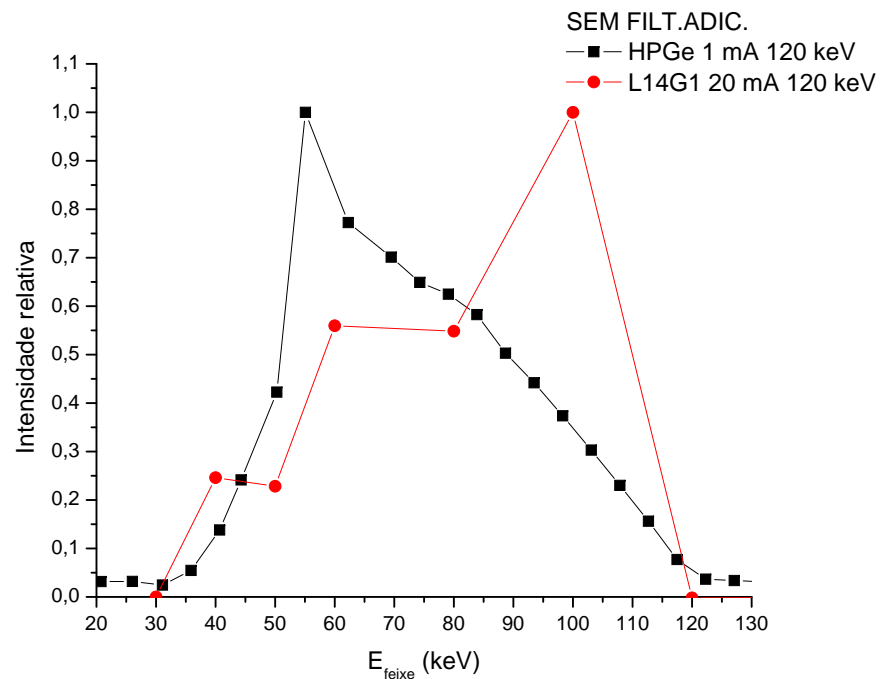


Figura 28: Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 120 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Sem filtração adicional. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005).

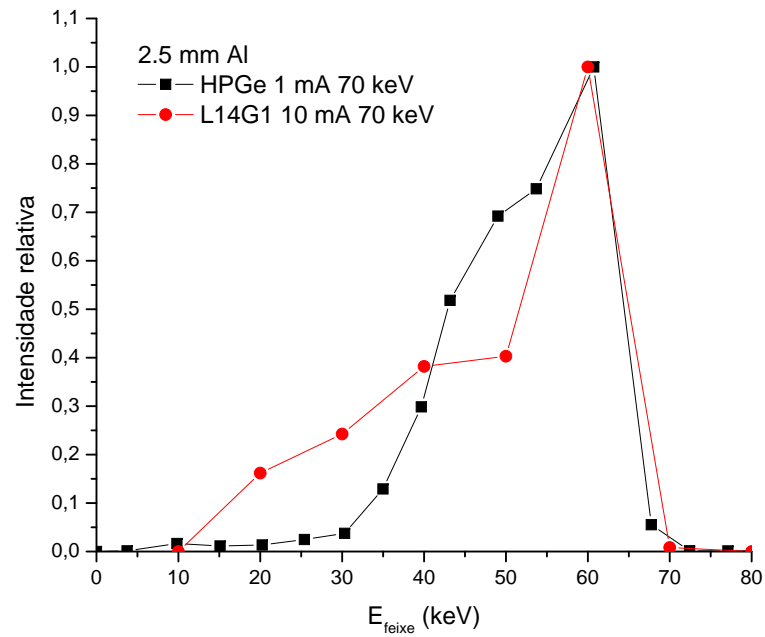


Figura 29: Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 70 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Filtração adicional de 2,5 mm Al. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005).



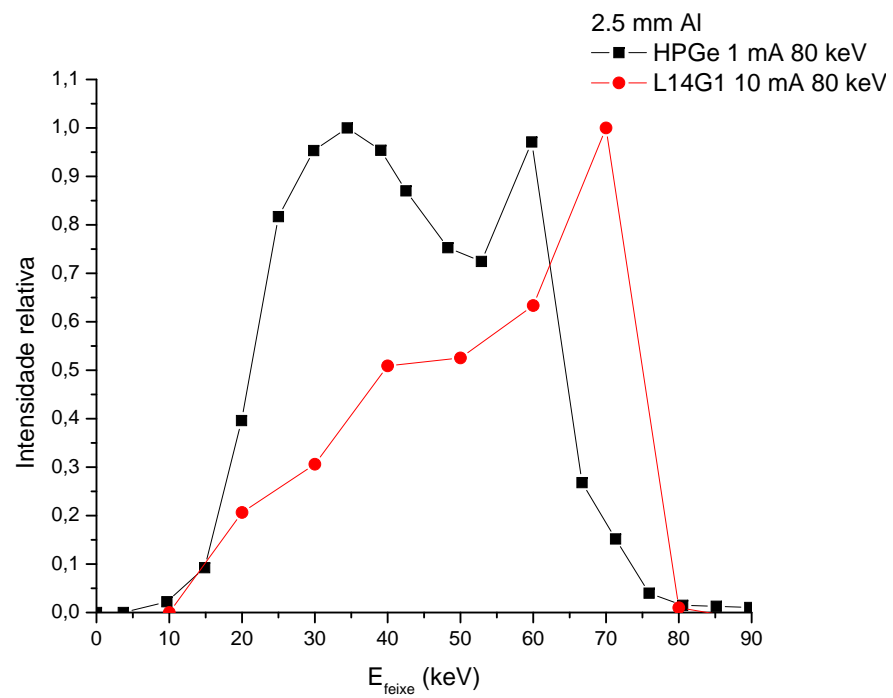


Figura 30: Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 80 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Filtração adicional de 2,5 mm Al. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005).

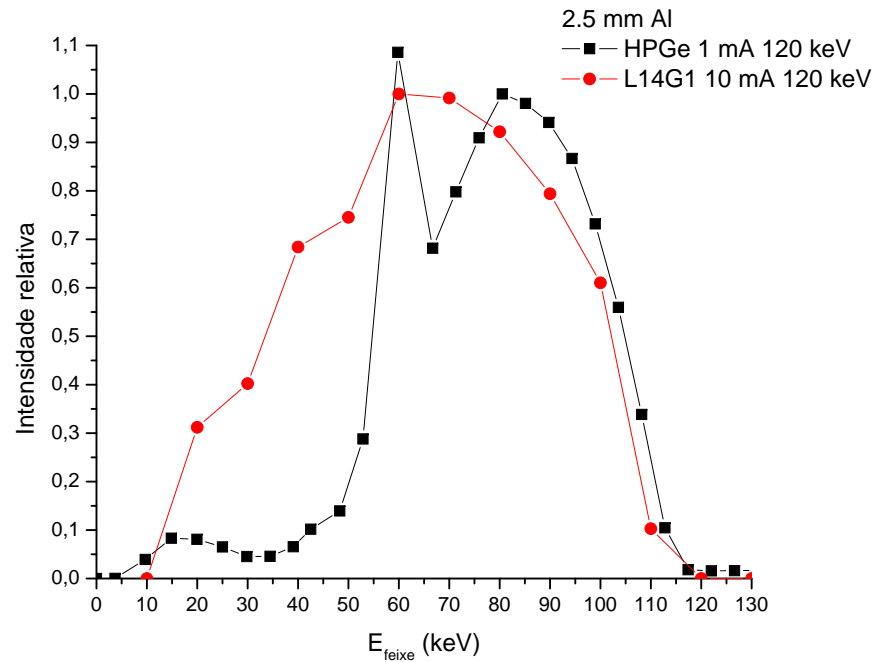


Figura 31: Distribuição de energias do feixe de raios-X para fluência normalizada com energia máxima do feixe incidente de 120 keV. Medições utilizando o L14G1 e o Germânio Hiperpuro. Filtração adicional de 2,5 mm Al. Medições do HPGe realizadas por Santos (2005).

Tabela 6: Fatores de conversão para o L14G1, em relação ao HPGe, para tensões máximas aplicadas no tubo de raios-X de 90 kV, 100 kV e 120 kV, sem filtração adicional.

Tensão (kV)	Intensid. rel. (HPGe/L14G1)		
	90 kV	100 kV	120 kV
40	1,408	0,305	0,51
50	0,879	1,798	1,813
60	1,129	1,218	1,509
70	0,548	-	-
80	-	0,775	1,124
90	0,512	-	-
100	-	9,114	0,348
120	-	-	n/a

Tabela 7: Fatores de conversão para o L14G1, em relação ao HPGe, para tensões máximas aplicadas no tubo de raios-X de 70 kV, 80 kV e 120 kV, com filtração adicional de 2,5 mm Al.

Tensão (kV)	Intensidade relativa (HPGe/L14G1)		
	90 kV	100 kV	120 kV
30	0,152	3,121	0,113
40	0,837	1,829	0,110
50	1,746	1,413	0,262
60	0,974	1,499	1,074
70	3,546	0,185	0,0771
80	-	n/a	1,073
90	-	-	1,180
100	-	-	1,136
110	-	-	2,392
120	-	-	n/a

## 4.5 Variação de parâmetros do fototransistor

As medições utilizando o filtro de 2,5 mm Al foram realizadas primeiro com a corrente de tubo de 15 mA e depois com a corrente de tubo de 10 mA. A degradação do fototransistor causada por essa irradiação foi medida e as curvas seguintes (Figuras 34-32) mostram como é a variação do comportamento do sensor com essa dose. Três momentos foram considerados para fazer o levantamento das características do fototransistor: antes das medições (T1); no intervalo entre as medições (T2); e ao final das medições (T3). Através da medição das taxas de dose do Pantak HF320, foi possível estimar as doses totais sobre os fototransistores em cada ciclo de medições. Como pode ser observado na tabela 3, na configuração que utiliza 2,5 mm Al como filtração adicional, para o ciclo de 15 mA, a dose absorvida foi de 8,39 Gy, enquanto que a dose total absorvida no ciclo de 10 mA foi de 3,23 Gy.

Agora observe o gráfico de  $I_C \times V_{CE}$  na Figura 32. Tomando-se como base para análise de variação de parâmetros os pontos de medição onde  $V_{CE} = 3 V$ , observam-se os seguintes valores de correntes de coletor medidas (tempos T1, T2 e T3): 126 nA, 110 nA e 93 nA. Durante a irradiação com corrente de 15 mA no tubo (que corresponde ao intervalo entre T1 e T2, ou seja, que houve leituras de 126 nA e 110 nA, respectivamente), houve uma variação de aproximadamente -12,6 %.

Como durante esse período o fototransistor foi submetido a 8,39 Gy, pode-se dizer que a sensibilidade do fototransistor teve uma variação de -1,51 %/ Gy. Durante a irradiação com 10 mA no tubo (irradiação entre os instantes T2 e T3, ou seja, com leituras, respectivamente, de 110 nA e 93 nA), houve uma variação de aproximadamente -15,5 %. Da mesma forma, nesse período o fototransistor foi submetido a 3,23 Gy logo, pode-se dizer que sua sensibilidade sofreu uma variação de -4,80 %/Gy. A Tabela 8 lista alguns valores desse gráfico. Observe a perda de sensibilidade que o fototransistor sofre à medida em que é irradiado. A Tabela 9 resume esses valores. Observe que no intervalo de T1 a T3, o dispositivo sofreu uma degradação de -2,26 % por Gray absorvido. Note também que o fototransistor sofreu uma perda menor com a irradiação com 15 mA do que

com a irradiação com 10 mA.

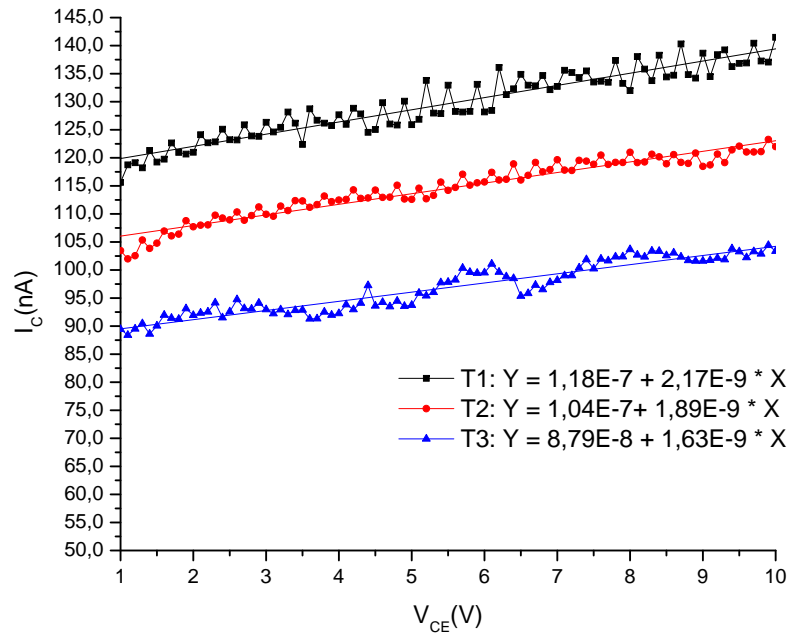


Figura 32: Curvas de caracterização de escuro para o fototransistor L14G1 da resposta da corrente de coletor em função da tensão entre emissor e coletor. T1 é o momento antes das irradiações, T2 é o momento entre e T3 é o momento após.

Tabela 8: Valores de corrente de coletor em função de algumas tensões entre coletor e emissor, nos tempos T1, T2 e T3.

$V_{CE}$	$I_C(nA)$		
	T1	T2	T3
1,0	115,616	103,464	89,434
1,5	119,241	104,789	90,054
2,0	120,992	107,714	91,939
2,5	123,218	108,940	92,573
3,0	126,329	109,942	92,956
3,5	122,388	112,313	92,878
4,0	127,667	112,471	92,957
4,5	125,045	114,241	93,606
5,0	125,912	112,594	93,743
5,5	132,955	114,204	97,855
6,0	128,183	115,698	99,528
6,5	134,883	116,051	95,355
7,0	132,723	119,658	98,173
7,5	133,506	118,846	100,231
8,0	131,985	120,990	103,668
8,5	134,417	118,938	102,590
9,0	138,655	118,475	101,606
9,5	136,844	122,074	103,287
10,0	141,485	121,999	103,368

Tabela 9: Evolução temporal da degradação da curva de IC x VCE do fototransistor L14G1 para tensão de coletor de 3V.

Instante	$I_C(nA)$	Var.percent. (%)	Var.percent./gray [%/Gy]
T1	126	-	
T2	110	-12,6%	-1,51
T3	93	-15,5%	-4,80
T3-T1	-	-26,2%	-2,26

As Figuras 33 e 34 mostram a variação da relação entre a corrente de coletor de escuro em função da corrente de base ( $h_{fe}$ ) para os três intervalos acima, em duas regiões de corrente.

A Figura 33 mostra a curva do  $h_{fe}$  para correntes de base até 500 pA. Observe que a degradação do dispositivo ainda não é perceptível com a dose, visto que as correntes são bastante próximas, e essa variação aparente nas medições induz que as correntes sofrem o efeito de alguma capacitância parasita do fototransistor. Alguns valores desse gráfico podem ser visualizados na 10. A Tabela 11 mostra a evolução dessa degradação nos instantes T1, T2 e T3, tomando como base de análise o valor  $I_B = 500 pA$ .

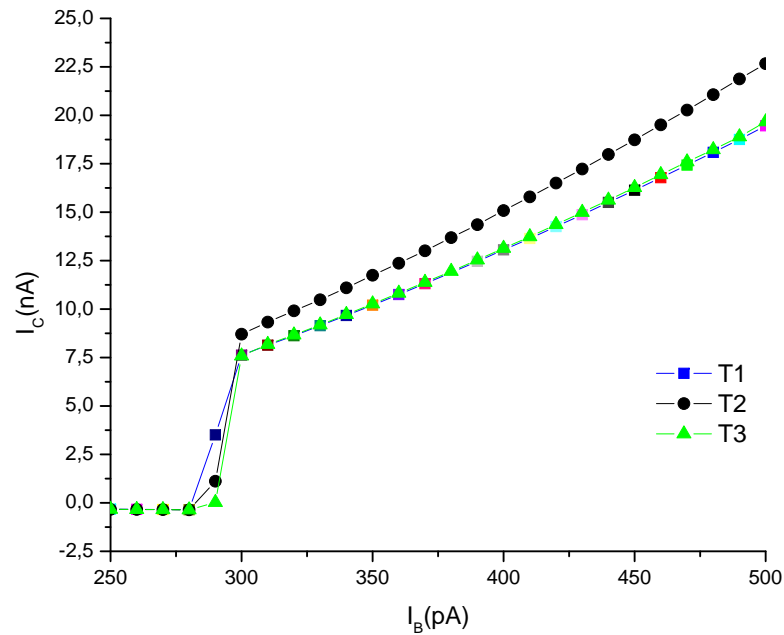


Figura 33: Curvas de caracterização de escuro para o fototransistor L14G1 da resposta da corrente de coletor em função da tensão entre emissor e coletor. T1 é o momento antes das irradiações, T2 é o momento entre e T3 é o momento após. As curvas mostram o  $h_{fe}$  máximo para 500  $pA$  na base.

Tabela 10: Valores de corrente de coletor em função de algumas correntes de base na região até 500  $pA$ , nos tempos T1, T2 e T3.

$I_B(pA)$	$I_C(nA)$		
	T1	T2	T3
-100,0	-0,155	-0,162	-0,161
-50,0	-0,165	-0,179	-0,170
0,0	-0,188	-0,196	-0,195
50,0	-0,206	-0,214	-0,209
100,0	-0,235	-0,241	-0,228
150,0	-0,253	-0,262	-0,261
200,0	-0,296	-0,300	-0,297
250,0	-0,327	-0,336	-0,330
300,0	7,623	8,706	7,582
350,0	10,202	11,745	10,268
400,0	13,054	15,083	13,137
450,0	16,135	18,731	16,275
500,0	19,458	22,665	19,663

Tabela 11: Evolução temporal da degradação da curva de  $h_{fe}$  para correntes menores que 500  $\mu A$  do fototransistor L14G1

Instante	$I_C(nA)$	Var.percent. (%)	Var.percent./gray [%/Gy]
T1	19,458	-	
T2	22,665	16,48 %	1,96
T3	19,663	13,25 %	-4,10
T3-T1	-	1,05 %	0,09

A Figura 34 mostra a curva do  $h_{fe}$  para correntes de base até 5  $nA$ , e a Tabela 12 apresenta alguns valores significativos desse gráfico. Pode-se observar que o efeito da dose já aparece, de modo que o acúmulo de dose também provoca uma perda de sensibilidade nessa região de corrente. A Tabela 13 mostra a evolução dessa degradação nos instantes T1, T2 e T3, tomando como base de análise o valor  $I_B = 5 nA$ .

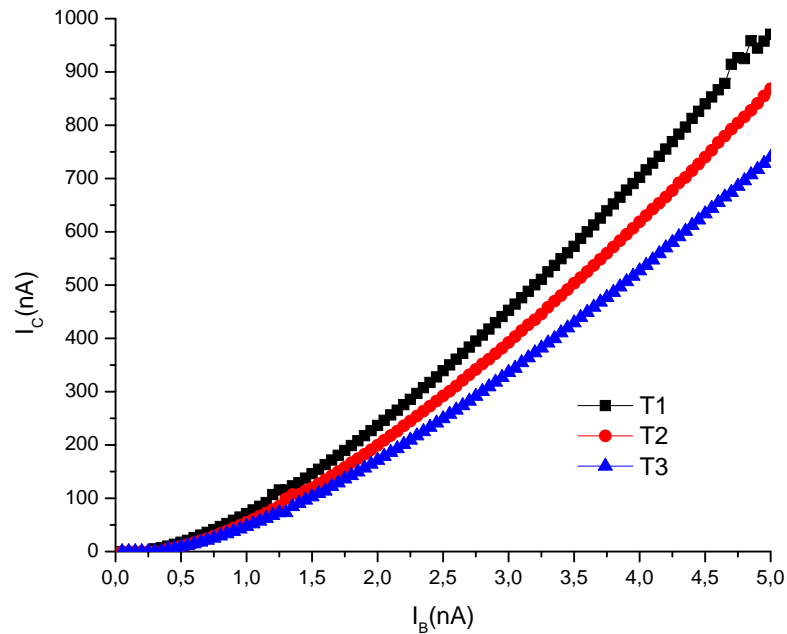


Figura 34: Curvas de caracterização de escuro para o fototransistor L14G1 da resposta da corrente de coletor em função da tensão entre emissor e coletor. T1 é o momento antes das irradiações, T2 é o momento entre e T3 é o momento após. As curvas mostram o  $h_{fe}$  máximo para 5  $nA$  na base

Tabela 12: Valores de corrente de coletor em função de algumas correntes de base na região entre 0,050 nA até 5 nA, nos tempos T1, T2 e T3.

$I_B(pA)$	$I_C(nA)$		
	T1	T2	T3
0,050	-0,186	-0,175	-0,171
0,350	7,112	-7,000	0,000
0,650	30,918	20,420	17,732
0,950	64,678	49,079	42,314
1,250	115,498	85,282	72,963
1,550	154,477	126,930	109,025
1,850	208,006	174,211	149,433
2,150	265,281	225,784	193,079
2,450	327,637	282,379	241,248
2,750	395,022	341,668	291,439
3,050	464,321	403,345	343,875
3,300	524,811	458,291	391,344
3,600	599,995	525,441	448,744
3,900	678,276	595,180	506,523
4,200	755,388	665,187	569,936
4,500	840,065	739,967	633,612
4,800	925,070	815,677	695,778
5,000	970,844	868,322	739,547

Tabela 13: Evolução temporal da degradação da curva de hfe para correntes entre 500 pA e 5 nA do fototransistor L14G1.

Instante	$I_C(nA)$	Var.percent. (%)	Var.percent./gray [%/Gy]
T1	970,84	-	
T2	868,32	-10,56 %	-1,26
T3	739,55	-14,83 %	-4,59
T3-T1	-	-23,82 %	-2,05

## 4.6 Análise estatística dos dados

Também foi realizada uma análise estatística para determinar a consistência dos dados. Essa análise foi feita utilizando-se a filtração adicional de 0,25 mm Cu e com um feixe tomado como referência, que foi escolhido como sendo o de tensão aplicada no tubo de 120 kV e corrente de tubo de 12,19 mA, como explicado na Metodologia.

Cinco medições do feixe de referência foram tomadas da resposta da corrente de coletor em função da corrente de base, com esta variando de  $-500 pA$  a  $500 pA$ . A Figura 35 mostra essas medições. A Tabela 14 mostra os valores das correntes de coletor medidas para a corrente de base de  $500 pA$ . Observe a corrente medida varia desde 7,706 nA na primeira medição (na figura, REF1) a 7,446 nA (na figura, REF5), na quinta medição. Isso representa um desvio de 0,260 nA, ou seja, 3,37 % em relação ao valor original.



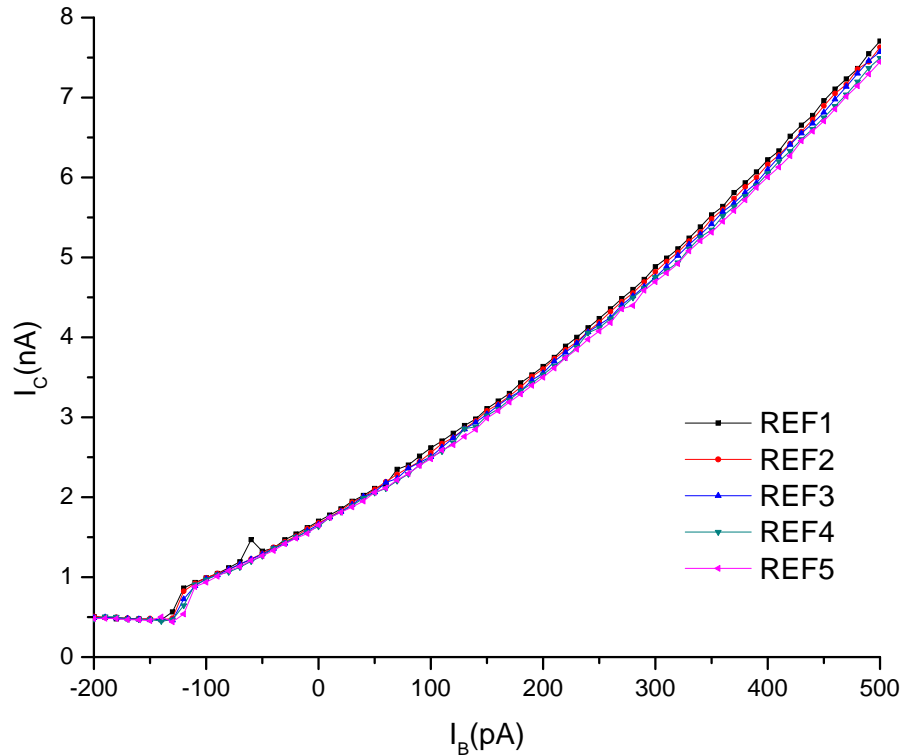


Figura 35: Curvas de referência da resposta do fototransistor da corrente de coletor em função da corrente de base. REF1 é a primeira medição e REF5 é a última.

Tabela 14: Correntes de coletor e suas variações, medidas para um feixe (de referência) de raios-X de tensão aplicada de 120 kV e corrente de tubo de 12,19 mA, para  $I_B = 500 \text{ pA}$  em cinco intervalos de referência.

REF	$I_C$ (nA)	Var. percent. (%)
1	7,706	-
2	7,629	1,00
3	7,571	0,76
4	7,494	1,02
5	7,446	0,64
1-5	-	3,37

No Apêndice D podem-se observar taxas de dose de várias configurações de tensão aplicada e corrente de tubo para filtração adicional de 0,25 mm Cu. Na tensão aplicada de 120 kV, para  $I_{tubo} = 10 \text{ mA}$ , tem-se que a taxa de dose é aproximadamente 0,824 mGy/s, e para  $I_{tubo} = 15 \text{ mA}$ , tem-se uma taxa de dose aproximadamente de 1,240 mGy/s. Fazendo uma interpolação linear para a corrente do feixe de referência, obtém-se uma taxa de dose realmente de 1,006 mGy/s, muito próximo do previsto na Metodologia (seção 3.4). Como cada medição do feixe de referência durava 100s, pode-se dizer que a dose absorvida por medição de feixe de referência era de 100 mGy. Tendo sido irradiado cinco vezes, sua dose absorvida foi de 500 mGy, e portanto o desvio máximo que o fototransistor

sofreu durante as cinco medições de referência, por Gray, foi de  $(3,37\%)/(500\text{ mGy}) = 6,74\%/Gy$ .

Tomando como base que um exame radiológico precise de  $10\text{mGy}$  para ser executado, e que se considera que  $5\%$  de degradação já é relevante, o detector variará de  $(6,74\%/Gy) \times (0,01\text{ Gy}) = 0,0674\%$  por exame, e portanto terá de ser recalibrado após  $5\%/0,0674\% = 74$  exames.

## 5 CONCLUSÕES

- As curvas de distribuição de energia do fototransistor indicam uma tendência favorável ao uso do mesmo na espectrometria de raios-X em energias na faixa de diagnóstico, em temperatura ambiente, desde que seja feita um estudo de dependência energética para determinar fatores de correção das não-linearidades de medição do fototransistor;
- À medida que o fototransistor é irradiado, ele sofre uma degradação que provoca variação nos seus parâmetros de semiconductor, demonstrando uma perda de sensibilidade nas medições; correções devem ser aplicadas baseadas na dose absorvida, de modo a minimizar essas variações;
- A resposta da corrente de coletor em função da corrente de base do fototransistor possui um comportamento ascendente para fluências aplicadas ascendentes;
- A forma das curvas de distribuição de energia assemelha-se ao formato das curvas obtidas utilizando-se o detector HPGe;
- O fototransistor responde melhor à radiação com feixes com energia máxima acima de  $70 \text{ keV}$ , que é, em média, a tensão aplicada, nas curvas de corrente de corte, que apresentam resposta de corrente de coletor mais próxima de zero (reduzindo o desvio paramétrico do feixe de referência);
- O erro estimado para uma corrente de base alta foi de  $6,74 \text{ \%}/Gy$ , que representa uma substituição do detector a cada 74 exames radiológicos que precisem de  $10 \text{ mGy}$  por procedimento. Isso é uma desvantagem do ponto de vista de manutenibilidade, mas muito pouco relevante do ponto de vista de custo.
- O algoritmo de cálculo das distribuições de energias pode ser melhorado com a otimização dos programas de medição.

# Referências Bibliográficas

ANKERHOLD, U. X-reference radiation qualities produced with tube voltages above 300 kV for the calibration and testing of dosimeters. **Radiation Protection Dosimetry**, Oxford University Press, v. 123, n. 2, p. pp. 137–142, 2006.

ATTIA, J. O. Transistor circuits. In: **ATTIA, J. O., Electronics and Circuit Analysis Using Matlab, 1 ed., cap. 12**. USA: CRC Press LLC, 1999.

BATIGNANI, G.; ANGELINI, C.; BISOGNI, M.; BOSCARDIN, M.; BETTARINI, S.; BONDIOLI, M.; BOSISIO, L.; BUCCI, F.; CALDERINI, G.; CARPINELLI, M.; CIACCHI, M.; BETTA, G. D.; DITTONGO, S.; FORTI, F.; GIORGI, M.; GREGORI, P.; HAN, D. J.; MANFREDI, P. F.; MANGHISONI, M.; MARCHIORI, G.; NERI, N.; NOVELLI, M.; PAOLONI, E.; PIEMONTE, C.; RACHEVSKAIA, I.; RAMA, M.; RATTI, L.; RE, V.; RIZZO, G.; RONCHIN, S.; ROSSO, V.; SIMI, G.; SPEZIALI, V.; STEFANINI, A.; ZORZI, N. A study for the detection of ionizing particles with phototransistors on thick high-resistivity silicon substrates. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, n. 530, p. 98–104, 2004. Elsevier B.V. 2004.

BATIGNANI, G.; BISOGNIA, M. G.; BOSCARDIN, M.; BOSISIO, L.; BETTA, G. D.; GUERRA, A. D.; DITTONGO, S.; FORTI, F.; GIORGI, M.; HAN, D.; LINSALATA, S.; MARCHIORI, G.; PIEMONTE, C.; RACHEVSKAIA, I.; RONCHIN, S. High-gain phototransistors on high-resistivity silicon substrate. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**. Oxford University Press, v. 111, n. 1, p. 105–110, 2004.

CEMBER, H. **Introduction to Health Physics**. 3. ed. USA: MacGraw-Hill Medical, 1996. ISBN: 0071054618.

DETONG, J. High resolution gamma-ray spectroscopy. **Dept. of Physics. University of Guelph**, 2007. Disponível em: <[http://www.physics.uoguelph.ca/detong/phys3510/phys3510\\_4500/highres.pdf/](http://www.physics.uoguelph.ca/detong/phys3510/phys3510_4500/highres.pdf/)>. Acesso em: 01 maio 2007.

DHOLE, S. D.; BHORASKAR, V. N. Use of phototransistor as a radiation monitor. In: Radiation Protection Dosimetry (Ed.). **Proceedings of the 4th International Conference**. USA, 1994.

EISEN, Y.; OLSHER, R.; BRAKE, R.; LITTLEJOHN, G.; MEDDLES, A. A portable x-ray spectrometer/ dosimeter based on a silicon diode. **Radiation Protection Dosimetry, Nuclear Technology Publishing**, v. 32, n. 2, p. 105–112, 1990.

EISEN, Y.; SHOR, A.; MARDOR, I. CdTe and cdznte x-ray and gamma-ray detectors for imaging systems. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 51, n. 3, Jun 2004.

GRANDEZAS e Unidades para Radiação Ionizante: Recomendações e definições. Designado pelo INMETRO IRD/CNEN/MCT. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<http://www.unifra.br/professores/marcel/Grandezas%20e%20Unidades%20para%20RI.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2007.

HARA, K.; MOCHIZUKI, A.; MUNAKATA, T.; NAKAMURA, Y.; NAKAMURA, K.; INOUE, K.; IKEGAMI, Y.; KOHRIKI, T.; TERADA, S.; UNNO, Y. Performance of irradiated n-on-p silicon microstrip sensors. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Elsevier B.V.**, v. 565, p. 538–542, 2006.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Calibration of Dosimeters Used in Radiotherapy. Technical Report Series n. 374.** Viena, 1994. ISSN 0074-1914.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **ICRP 80: Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals.** [S.l.], 1998.

INTERNATIONAL ELETROTECHCNICAL COMMISSION. **IEC 61267: Equipement de diagnostic medical à rayonnement X - Conditions de rayonnement pour utilisation dans la détermination des caractéristiques.** [S.l.], 2005.

KEITHLEY. **Model 2400 General-Purpose SourceMeter Measurements up to 200V and 200W Power Output.** [S.l.], 2007. Disponível em: <<http://www.keithley.com/products/opto/highspeedlaserdriver/?mn=2400>>. Acesso em: 30 maio 2007.

KEITHLEY. **Model 6430 Sub-Femtoamp Remote SourceMeter.** [S.l.], 2007. Disponível em: <<http://www.keithley.com/products/currentvoltage/?mn=6430>>. Acesso em: 30 maio 2007.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurements.** 2. ed. USA: John Wiley Sons, 1989.

LANDSHOFF, P.; METHERELL, A.; REES, W. G. **Essential Quantum Physics.** 1. ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 1997. ISBN 0 521 62011 2.

LAPP, R. E.; ANDREWS, H. L. **Nuclear Radiation Physics.** 4. ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1972.

MARTIN, J. E. **Physics for Radiation Protection.** 1. ed. New York, USA: Wiley-Interscience, 2000.

MCGREGOR, D. S.; HE, Z.; SEIFERT, H. A.; ROJESKI, R. A.; WEHE, D. K. Cdznite semiconductor parallel strip fritsch grid radiation detectors. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 45, n. 3, Jun 1998.

MIYAJIM, S.; IMAGAWA, K.; MATSUMOTO, M. An alignment method for mammographic x-ray spectroscopy under clinical conditions. **The British Journal of Radiology**, n. 75, 2002.

- MONEDA, F. H. de L.; CHENETTE, F. H.; VAN DER ZIEL, A. Noise in phototransistors. **IEEE Transactions on Electronic Devices**, v. 18, n. 6, Jun 1971.
- NOGUEIRA, M. S.; MOTA, H.; CAMPOS, L. L. (hp)ge measurement of spectra for diagnostic x-ray beams. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 111, n. 1, p. 105–110, 2004.
- REGO, P. V.; SANTOS, L. A. P. dos; FILHO, J. A. Collector-current calculation for a diagnostic x-ray irradiated phototransistor. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, 2006. Submetido.
- RESENDE, S. M. **A Física de Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 1. ed. Recife, Brasil: Editora da Universidade Federal de Pernambuco, 1996.
- SANTOS, L. A. P. dos. **Medições de Espectros de Energias para o Pantak HF320, corrente de tubo de 1 mA para setup sem filtração adicional, com filtração adicional de 2,5 mm Al e com filtração adicional de 0,25 mm Cu, com o germânio hiperpuro**. Centro Regional de Ciências Nucleares. Recife, Brasil, 2005.
- SANTOS, L. A. P. dos; BARROS, F. R.; FILHO, J. A. Precise dose evaluation using a commercial phototransistor as a radiation detector. **Radiation Protection Dosimetry, Oxford University Press**, Maio 2006.
- SANTOS, L. A. P. dos; RIZZI, C. A. Cronômetro do tempo de exposição em radiodiagnóstico utilizando fototransistores como detector de radiação. In: METROLOGIA 2003 - METROLOGIA PARA A VIDA. **Anais**. Recife, Pernambuco - BRASIL, 2003.
- SANTOS, L. A. P. dos; SILVA JÚNIOR, E. F. S.; FILHO, J. A. An electronic method to estimate dose deconvolution in the diagnostic x-ray range. In: 2005 INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE - INAC 2005. **Anais**. São Paulo, Brasil, 2005. ISBN: 85-99141-01-5.
- SANTOS, L. A. P. dos; SILVA JÚNIOR, E. F. S.; VILELA, E. Filtered x-ray beam dosimetry from 10<sup>3</sup> to 10<sup>2</sup> Gy dose range by using phototransistors. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 101, n. 1-4, p. 145–148, 2002.
- SEELENAG, W. W.; PANZER, W. Stripping of x-ray bremsstrahlung spectra up to 300kVp on a desk type computer. **IEEE Physical Medical Biology**, v. 24, n. 4, p. 767–780, 1979.
- SEELENAG, W. W.; PANZER, W.; DREXLER, G.; PLATZL, L.; SANTNER, F. **A Catalogue of Spectra used for the Calibration of Dosimeters**. Munchen, Alemanha: Institut fur Strahlenschutz, 1979. (GSF Report S-560).
- SOUZA, K. C.; LOPES, R. T.; CAMPOS, C. A. A. L. Espectros e qualidades de raios-x para uso em radiodiagnóstico e calibração de equipamentos. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 1996.

SUN, C. M.; HAN, D. J.; SHENG, L. Y.; ZHANG, X. R.; ZHANG, H. J. Punch through float-zone silicon phototransistors with high linearity and sensitivity. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 547, n. 2-3, p. 437–449, 2005.

TAUHATA, L. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 5. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Instituto de Radioproteção e Dosimetria/ Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2003.

# APÊNDICE A - Programa para controle dos equipamentos da Keythley

O *Fototrans* é um sistema desenvolvido para executar rotinas de controle sobre os equipamentos de medição da Keithley no que concerne a leitura de dados, visualização de gráficos em tempo real e leitura e armazenamento de dados de medições em arquivos de um banco de dados *Paradox7*, de fototransistores durante a irradiação ou no escuro. Possui dois módulos de configurações e quatro módulos de medições. Os módulos de medições executam as atividades de *Espectrômetro*, *Caracterização  $I_C \times V_{CE}$  com controle da corrente de base*, *Caracterização  $I_C \times V_{CE}$  sem controle da corrente de base*, e *caracterização de  $I_C \times I_B$  em escuro*.

O *Fototrans* é configurado para trabalhar com os seguintes equipamentos: Keithley 2400 e Keithley 6430. Uma atualização do programa para permitir a leitura da temperatura em tempo real com o controle de multímetros Fluke está agendada conforme necessidades futuras do projetista.

A Figura 36 mostra a página de abertura dos módulos do *Fototrans*. Daqui é possível escolher entre os quatro módulos para efetuar as medições com o fototransistor durante a irradiação. Na seção Conexão dos dispositivos, o usuário opta por acionar os métodos relacionados com a ativação dos módulos de controle pela porta USB dos equipamentos.



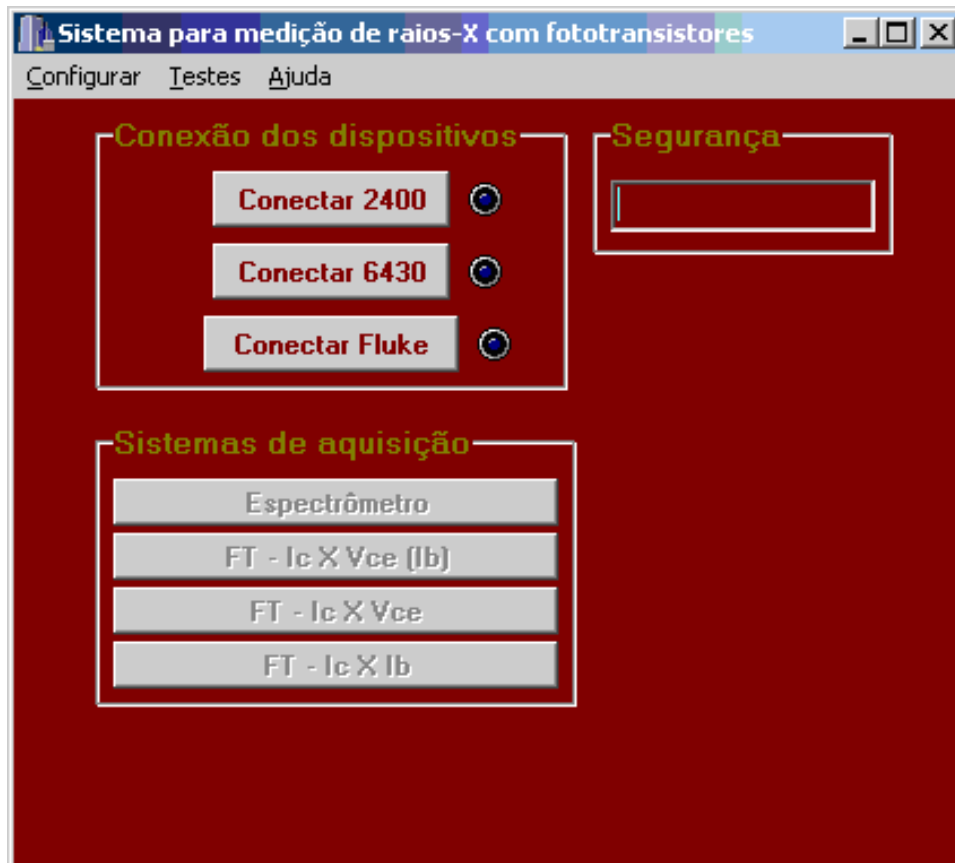


Figura 36: Página de abertura dos módulos do *Fototrans*.

Para o funcionamento correto do programa, o usuário deverá conectar pelo menos os dois equipamentos da Keithley por portas USB e configurar o programa com os valores da COM de cada um. Como ambos não possuem saída USB, é fundamental a utilização de conversores RS-232 para USB na saída de ambos. O usuário deverá identificar também para qual porta USB cada equipamento está configurado no sistema operacional. Para o Windows XP, o procedimento é o seguinte:

- Ir em Menu Start → Hardware → Device Manager → Serial Ports e visualizar os itens ativos. Ligar o primeiro equipamento em alguma porta USB disponível e ligar o equipamento. Digamos, o Keithley 2400. Depois de 2 minutos, ir em Menu Start → Hardware → Device Manager → Serial Ports e visualizar o item que foi adicionado após a ativação da USB e guardar o valor da porta para o qual o Keithley 2400 foi configurado.
- Repetir o procedimento para o Keithley 6430.

- Com o programa em funcionamento, ir no menu Configurar→Portas e abrirá uma nova tela, de configurações (veja a Figura 37). Em cada seção de equipamento, deverá ser configurado no mínimo a porta (primeira lista de opções em cada seção) COM para o qual a USB configurou o respectivo equipamento.
- É recomendável deixar as duas seções de Configurações de medição no padrão, que permite alta precisão nas medições.

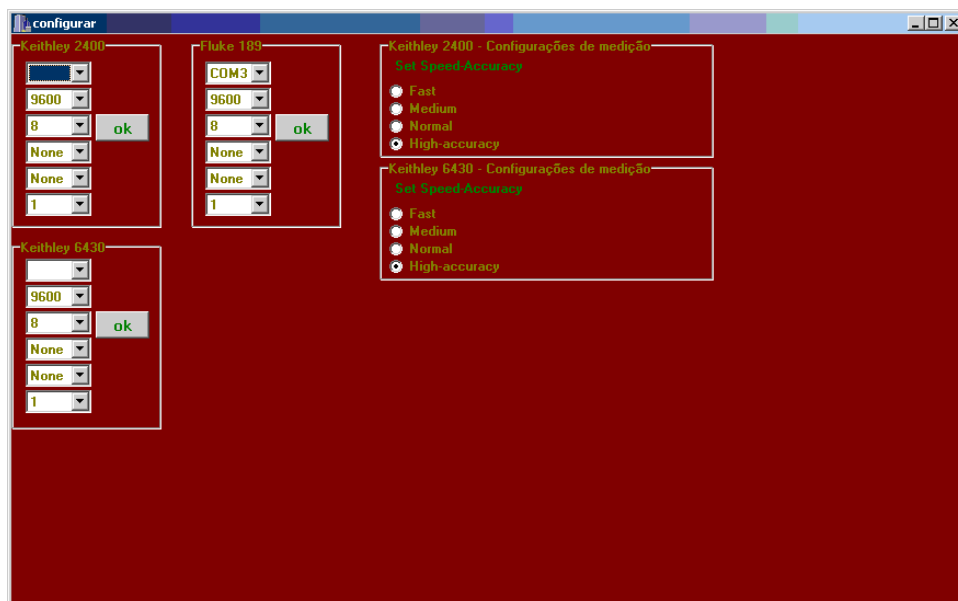


Figura 37: Módulo de configurações do *Fototrans*.

O módulo Espectrômetro é mostrado na Figura 38. Os campos editáveis são auto-explicativos. Os botões I, R, F, S e A significam, respectivamente: Iniciar medição, Reiniciar configurações, Forçar fechamento do programa, Salvar aquisição atual, Abrir aquisição. Para variar a precisão dos Keithley ao mesmo tempo é só clicar com o botão direito no item em vermelho HIGH e optar por uma das várias configurações de precisão dos equipamentos. Os demais módulos são muito parecidos com esse, de modo que não são necessárias mais explicações.

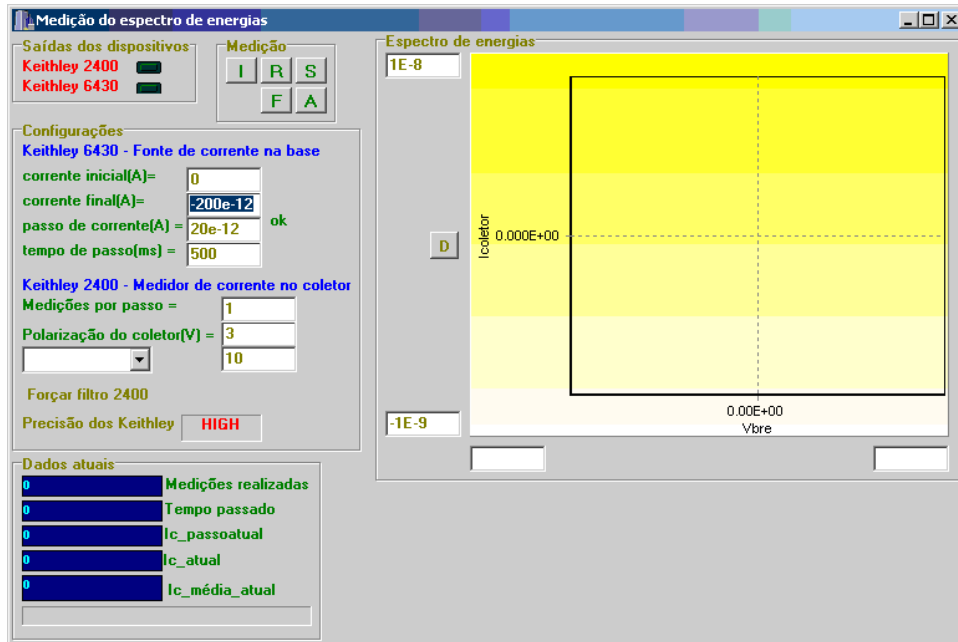


Figura 38: Módulo de espectrometria do *Fototrans*.

## APÊNDICE B - Espectros de energia

### B.1 Distribuições de energia para corrente de tubo de 10 mA sem filtração adicional

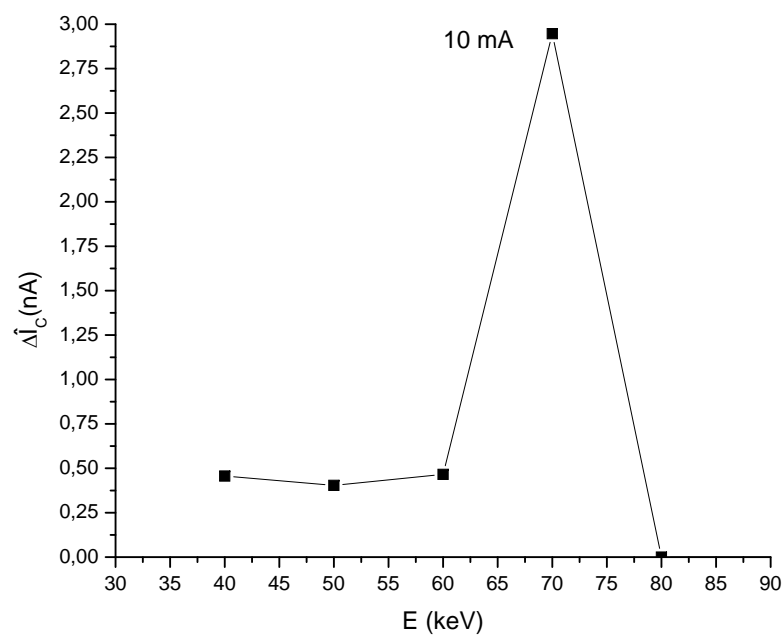


Figura 39: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 80 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

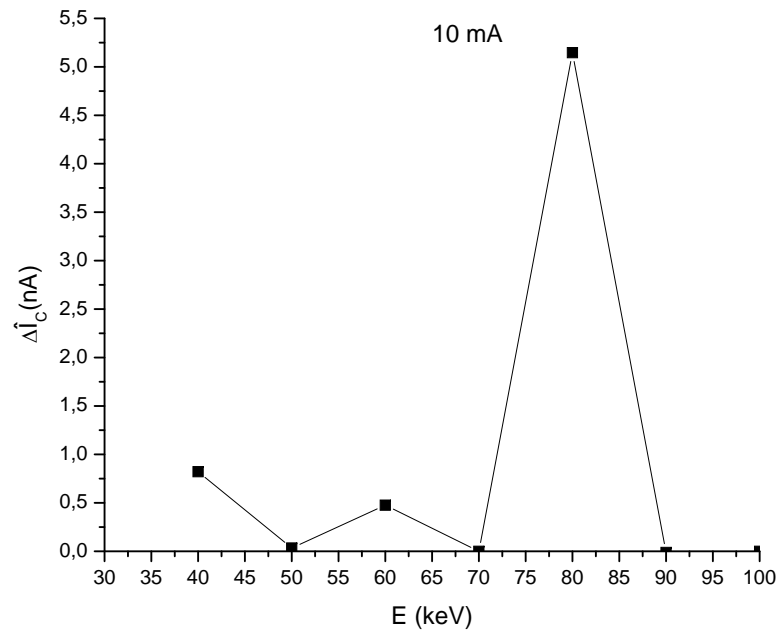


Figura 40: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 90 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

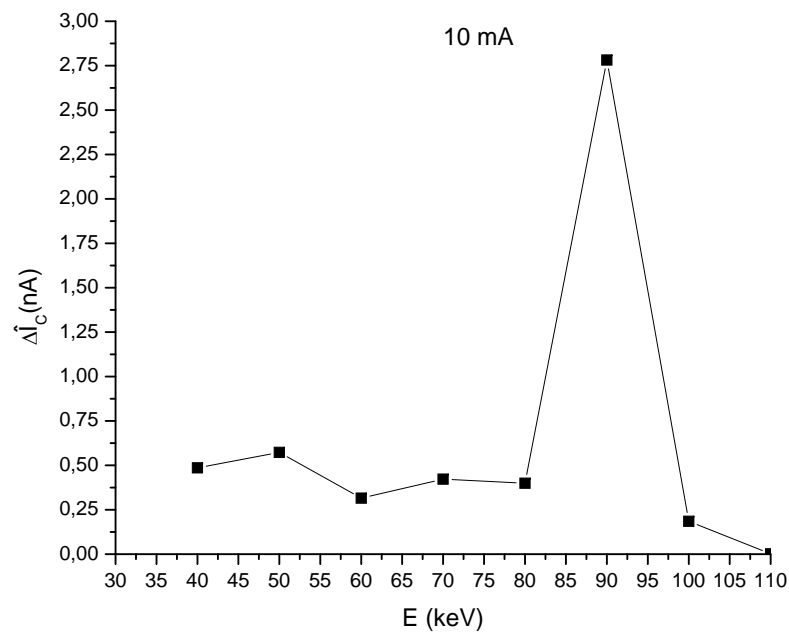


Figura 41: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 100 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

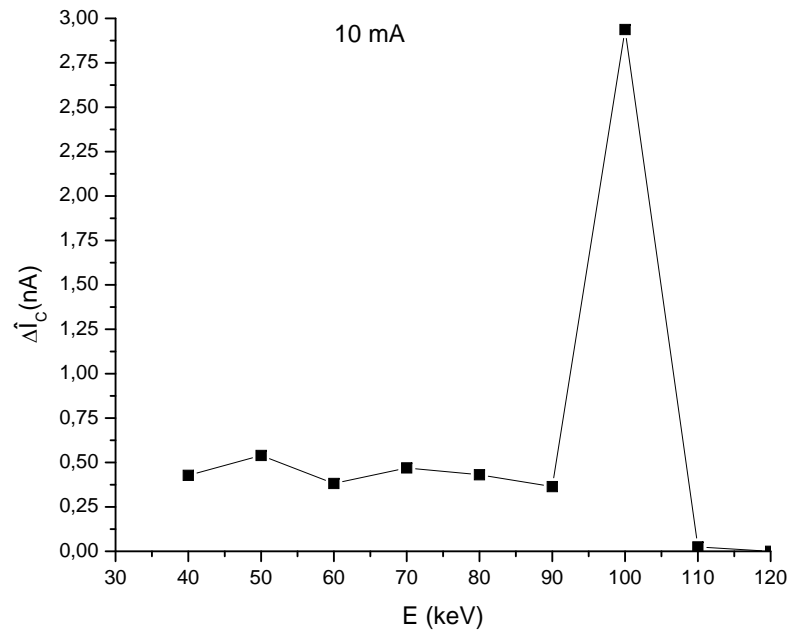


Figura 42: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 110 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

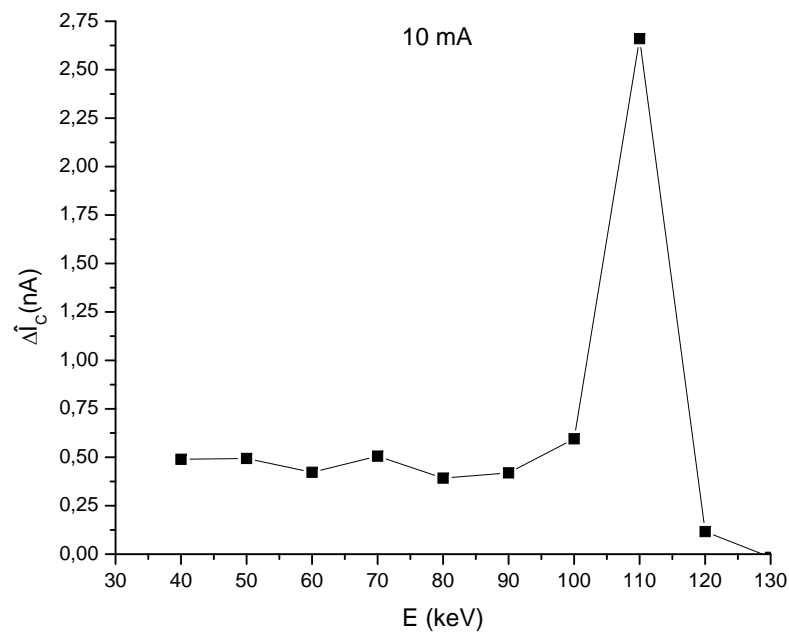


Figura 43: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 120 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

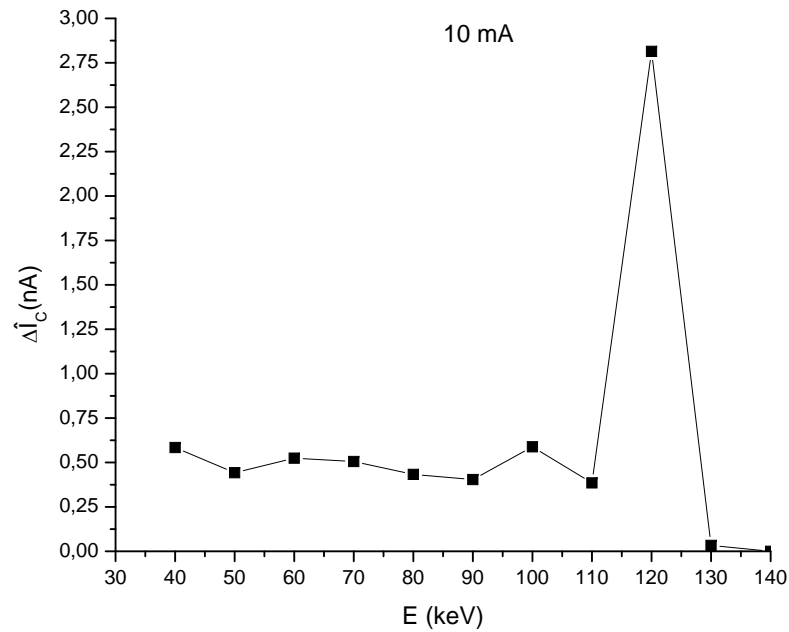


Figura 44: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 130 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

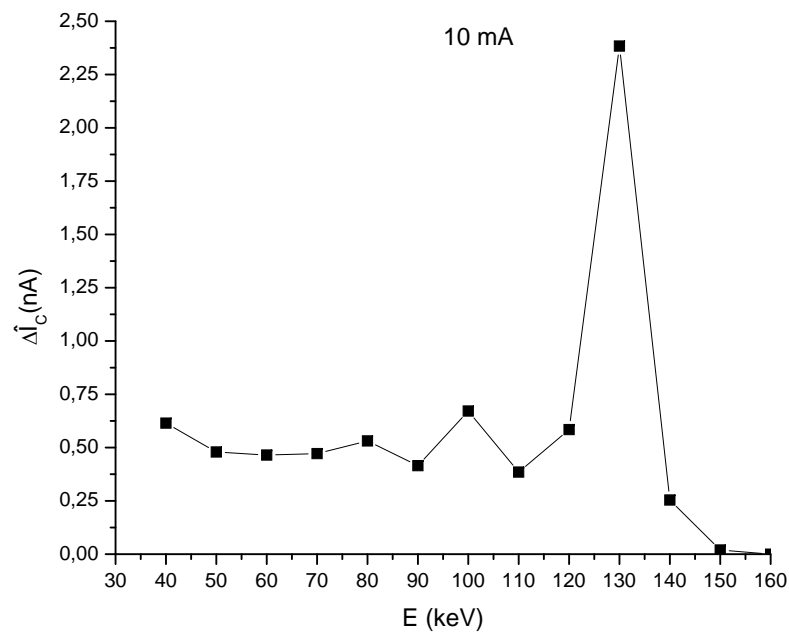


Figura 45: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 140 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

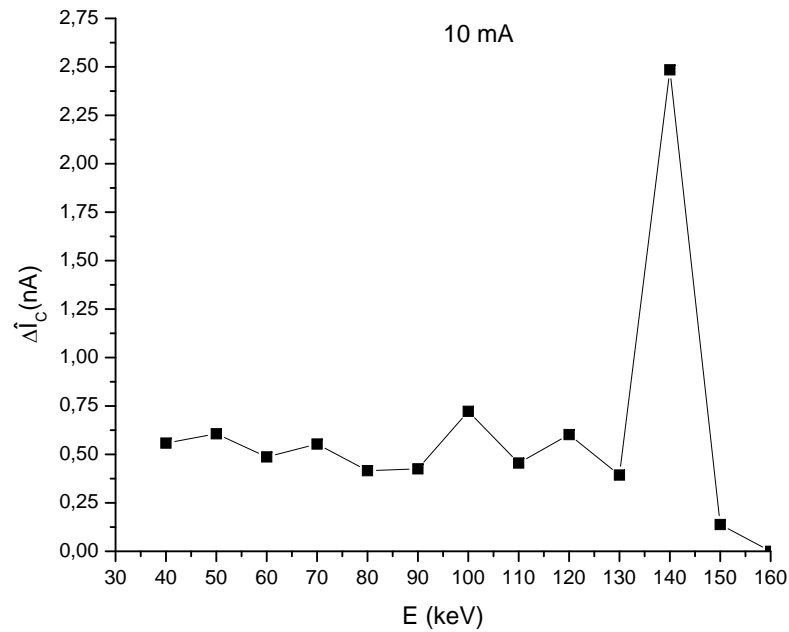


Figura 46: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 150 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

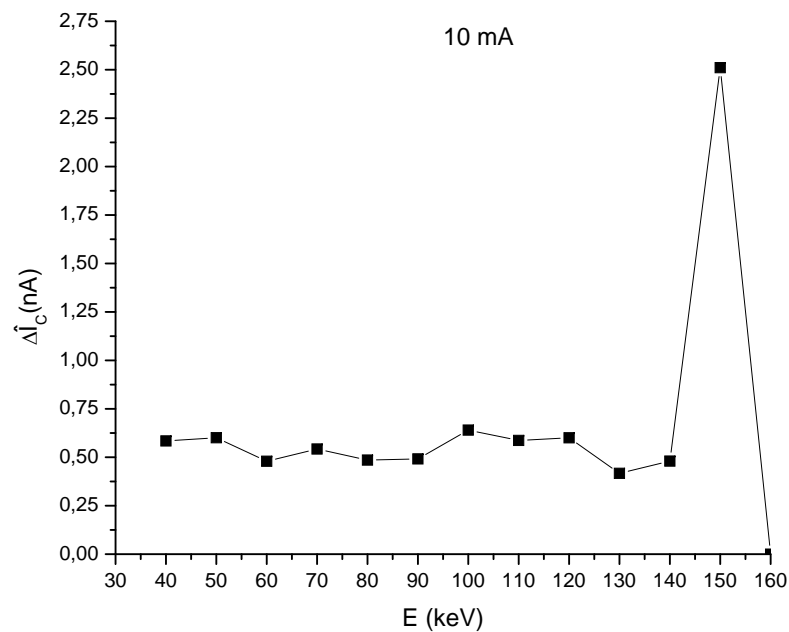


Figura 47: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 160 kV e 10 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..



## B.2 Distribuições de energia para corrente de tubo de 15 mA sem filtração adicional

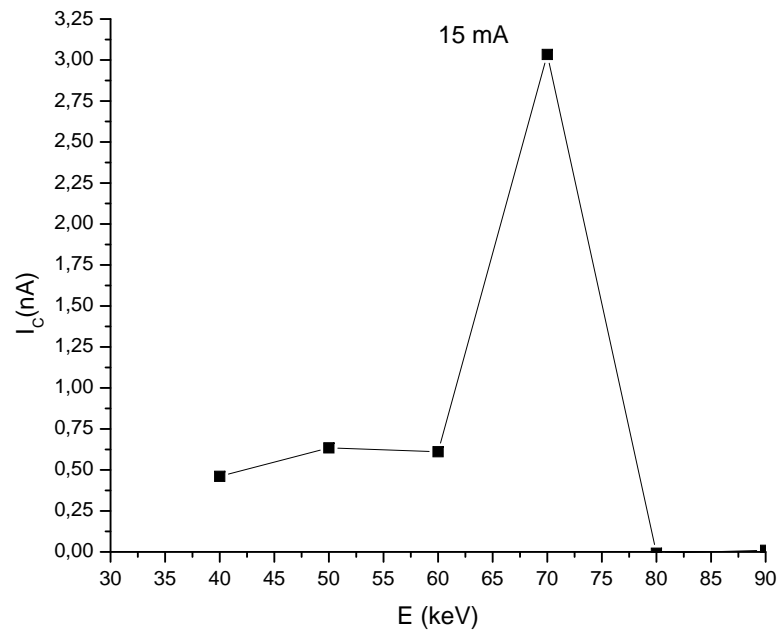


Figura 48: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 80 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

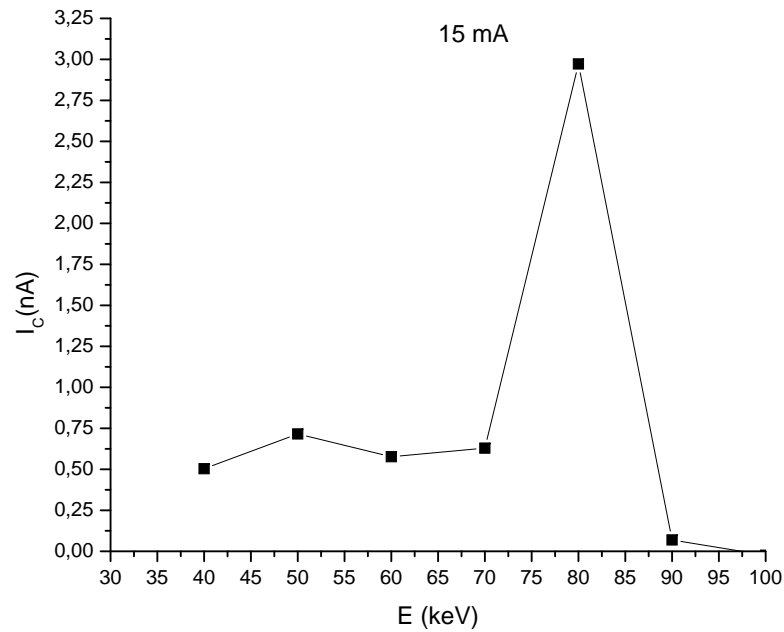


Figura 49: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 90 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

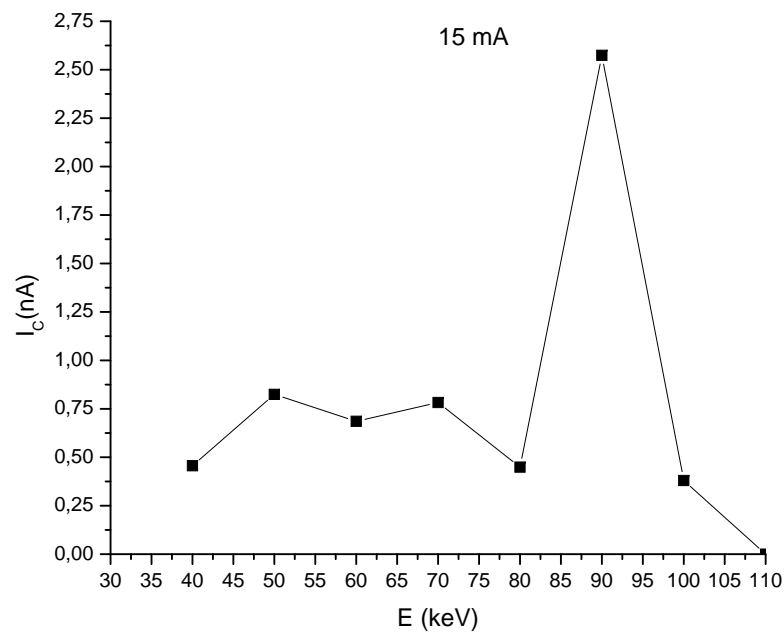


Figura 50: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 100 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

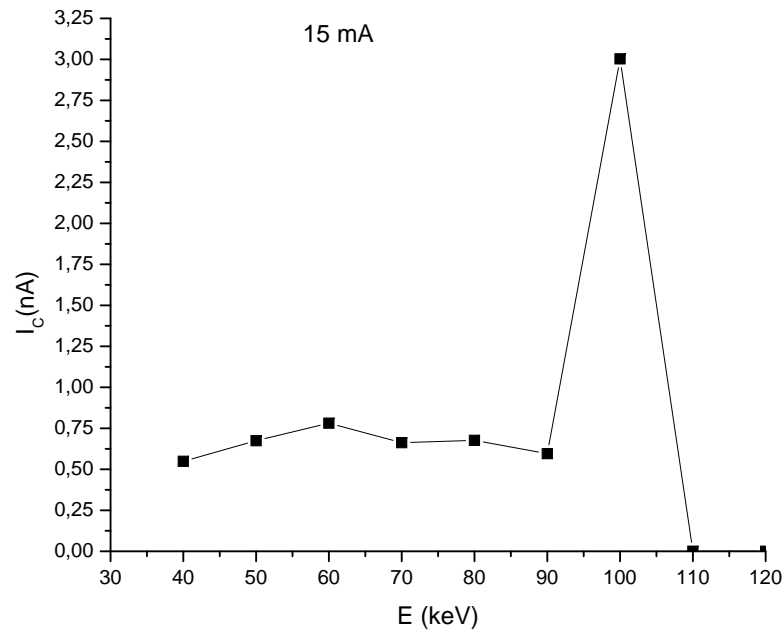


Figura 51: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 110 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

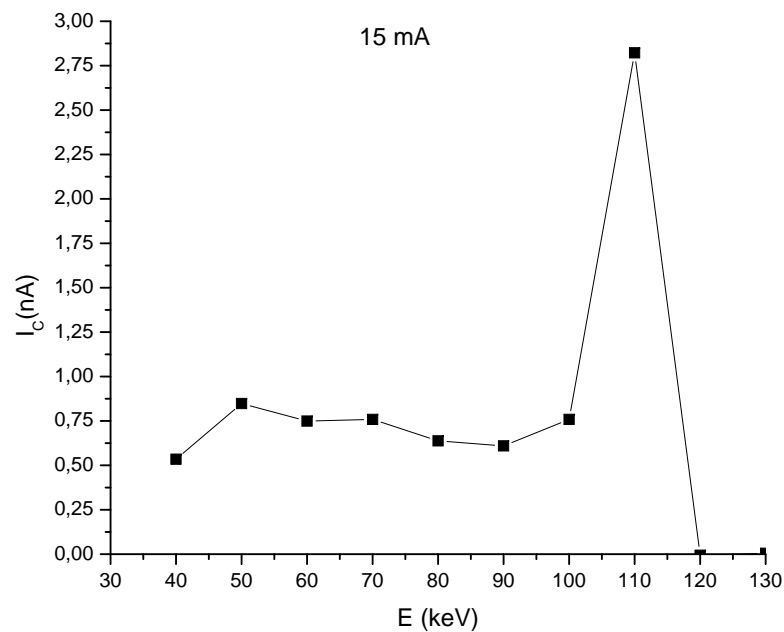


Figura 52: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 120 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

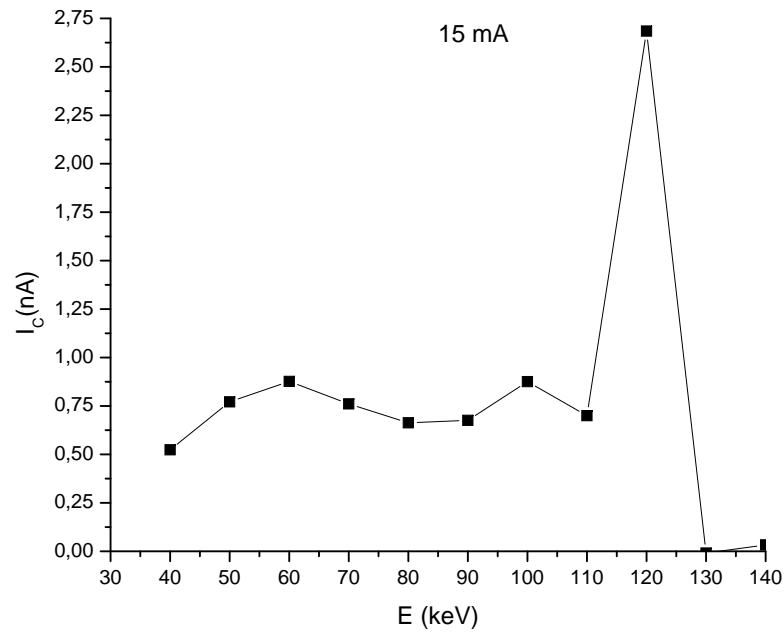


Figura 53: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 130 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

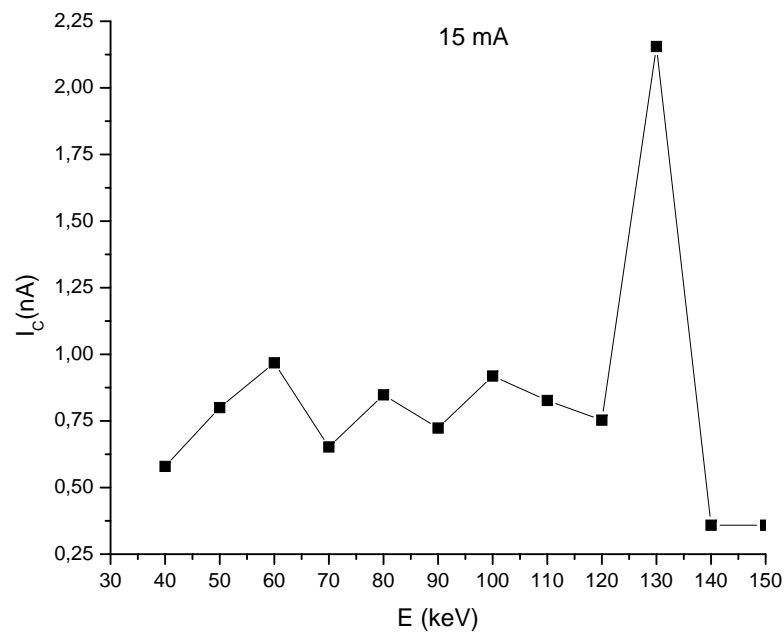


Figura 54: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 140 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

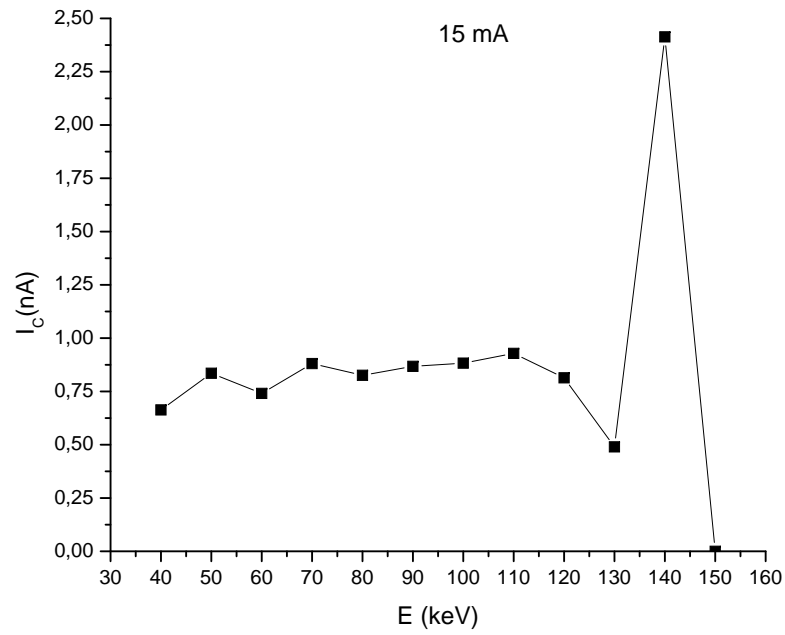


Figura 55: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 150 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

### B.3 Distribuições de energia para corrente de tubo de 20 mA sem filtração adicional

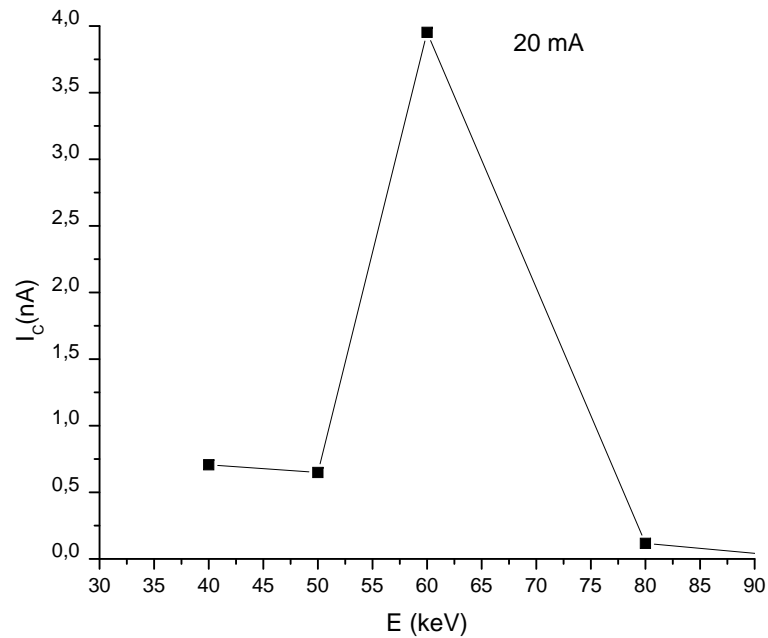


Figura 56: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 80 kV e 20 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

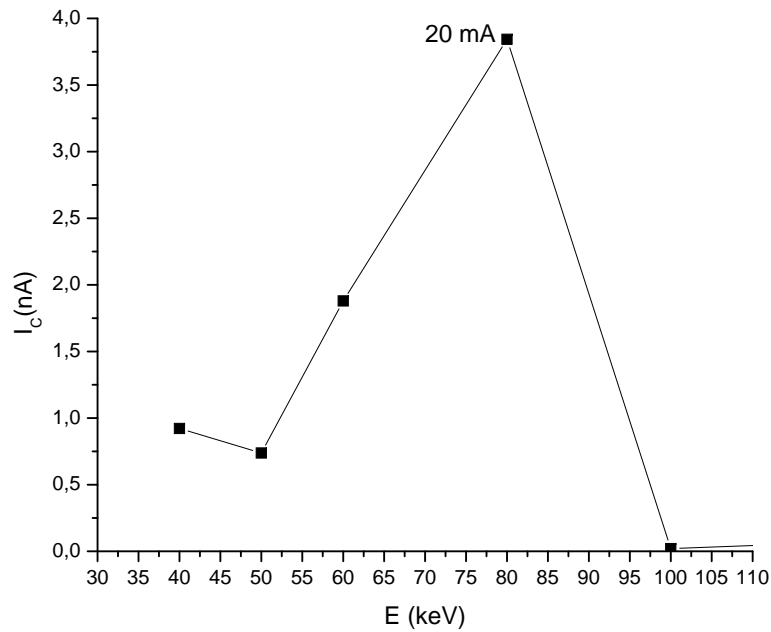


Figura 57: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 100 kV e 20 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

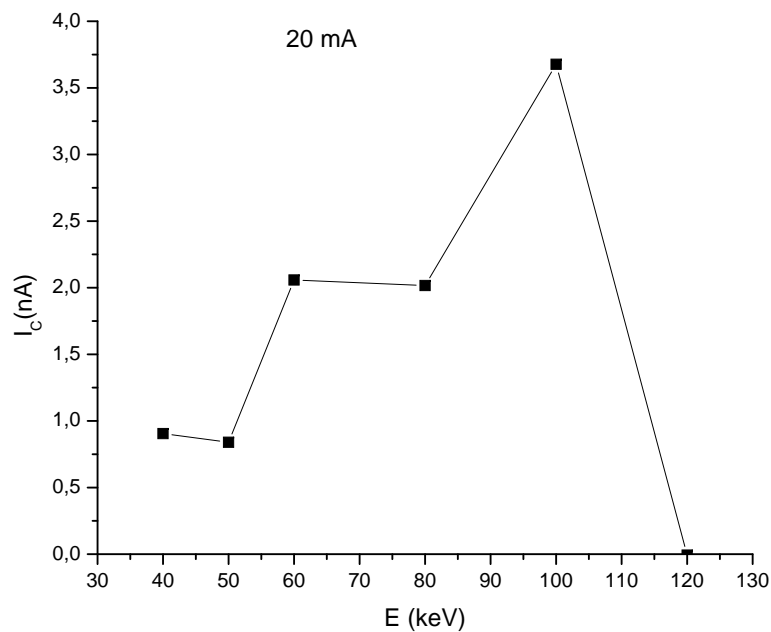


Figura 58: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 120 kV e 20 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

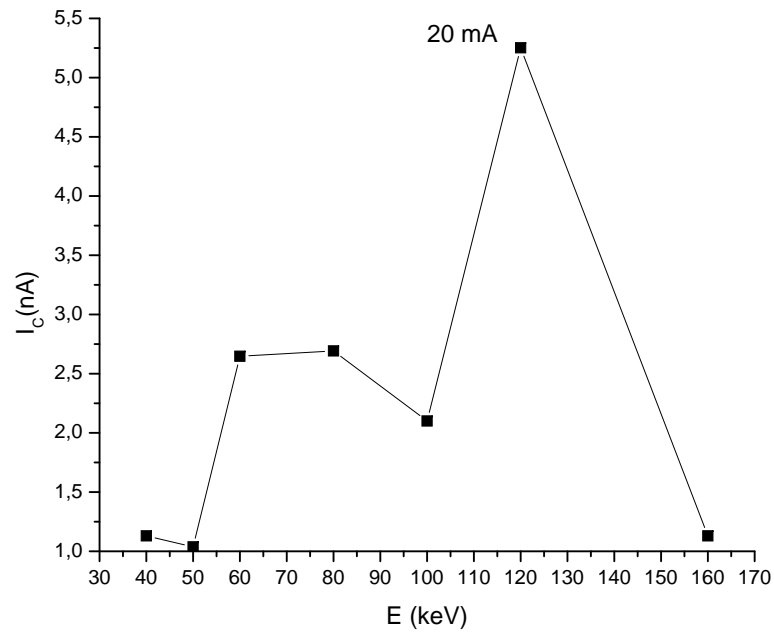


Figura 59: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 160 kV e 20 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..



## B.4 Distribuições de energia para corrente de tubo de 10 mA, filtração adicional de 2,5 mm Al

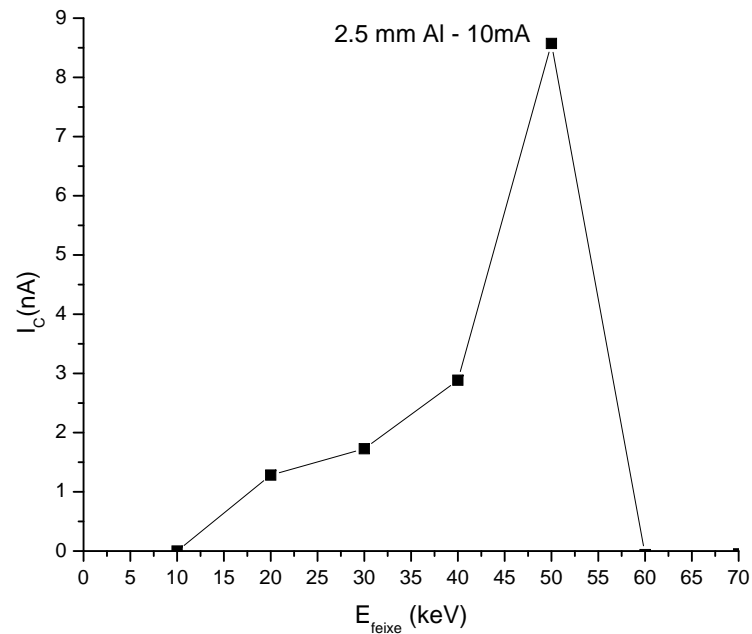


Figura 60: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 60 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

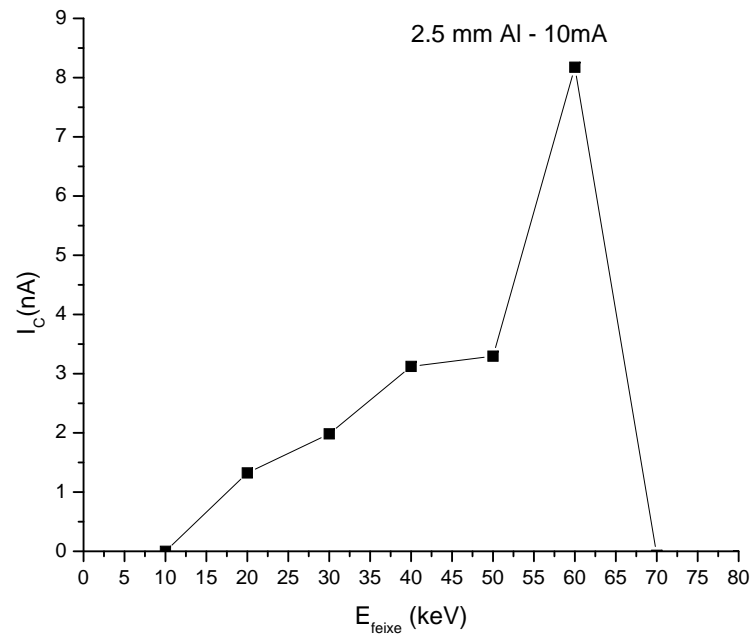


Figura 61: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 70 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

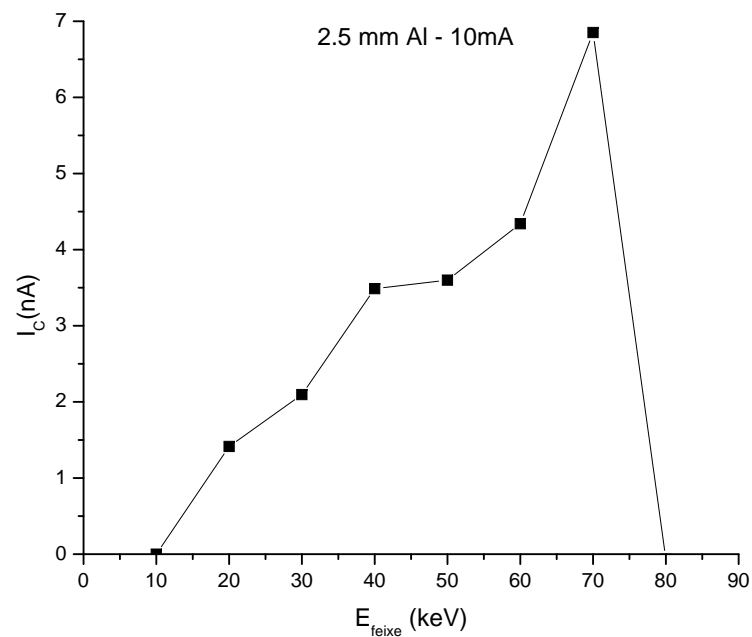


Figura 62: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 80 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

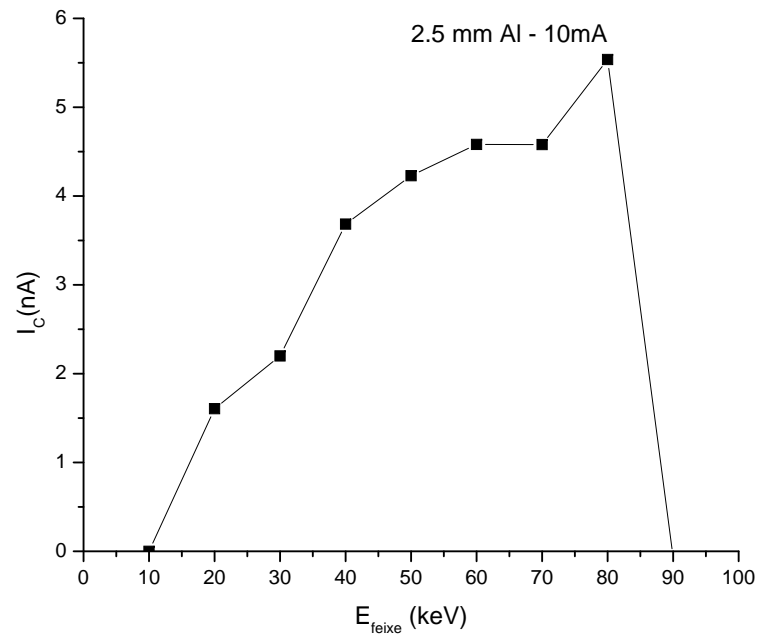


Figura 63: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 90 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

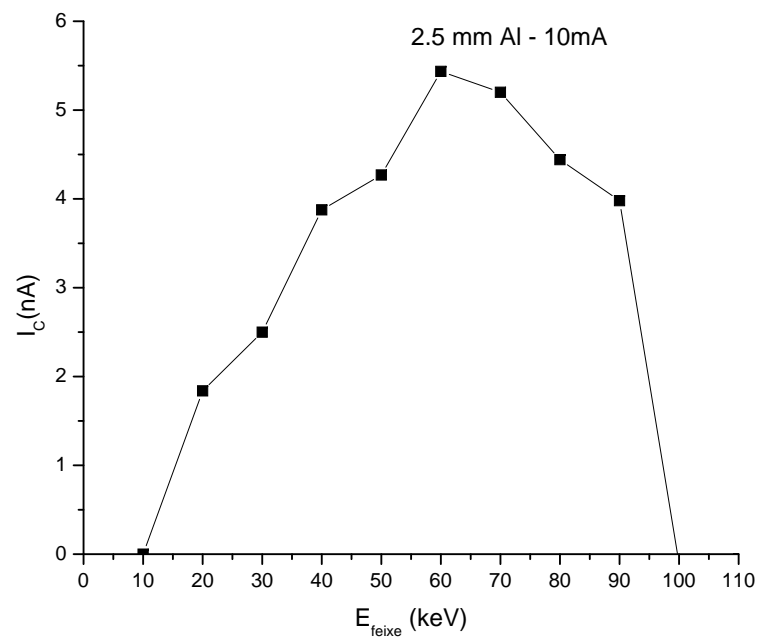


Figura 64: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 100 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

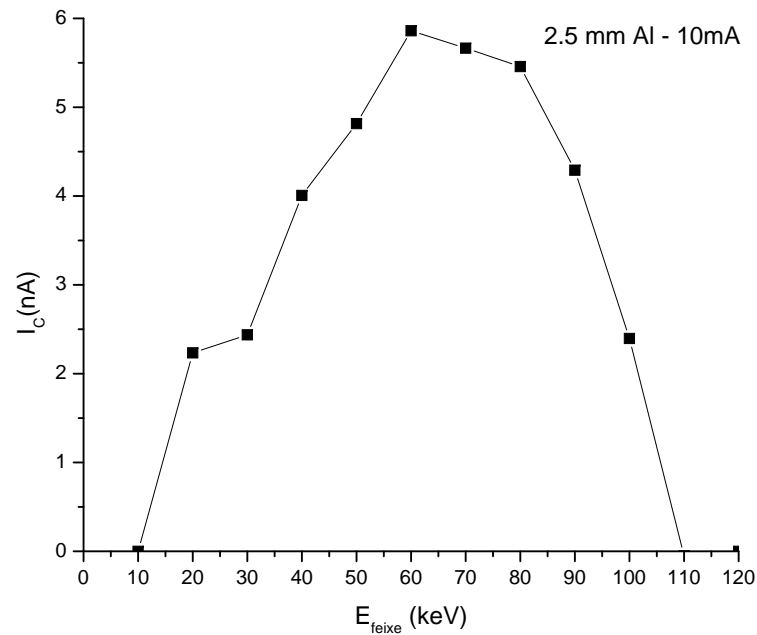


Figura 65: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 110 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

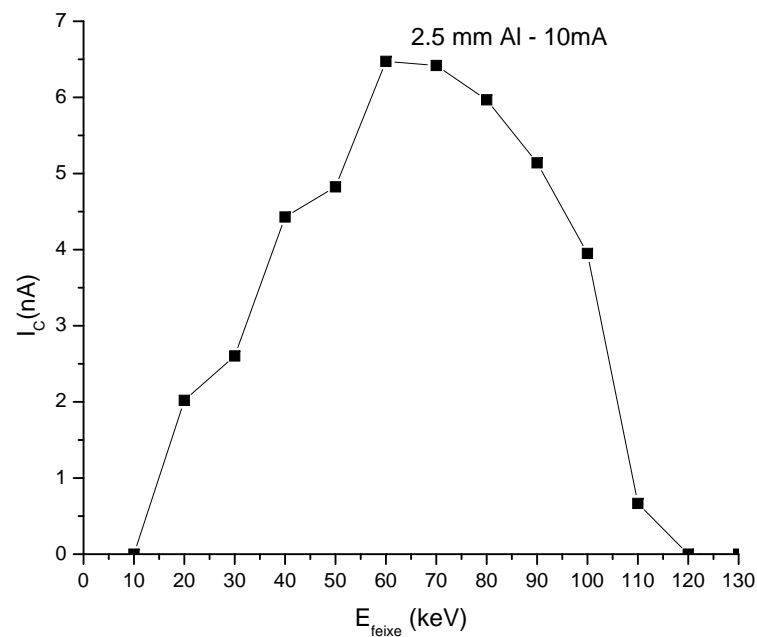


Figura 66: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 120 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

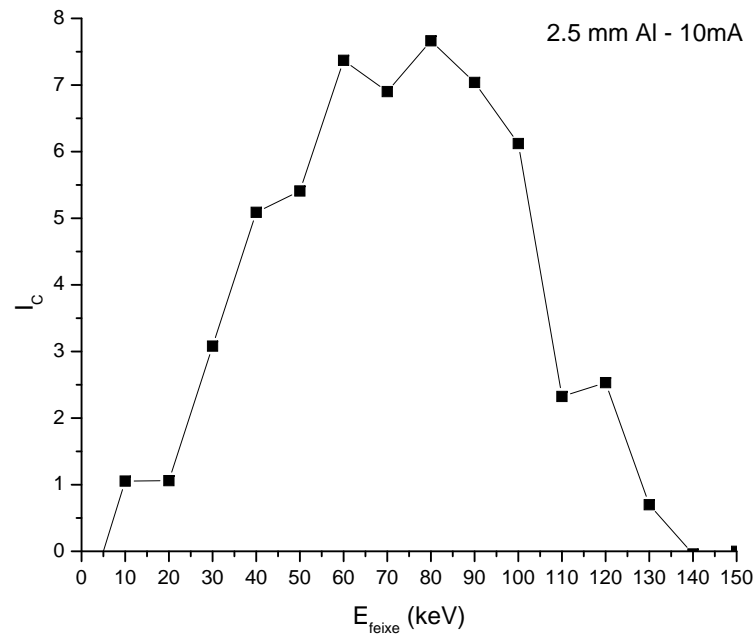


Figura 67: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 140 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

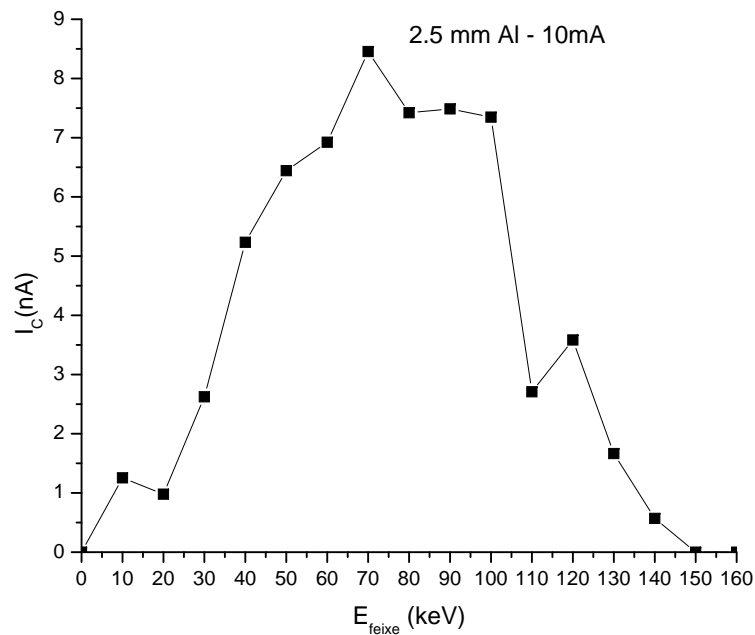


Figura 68: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 150 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

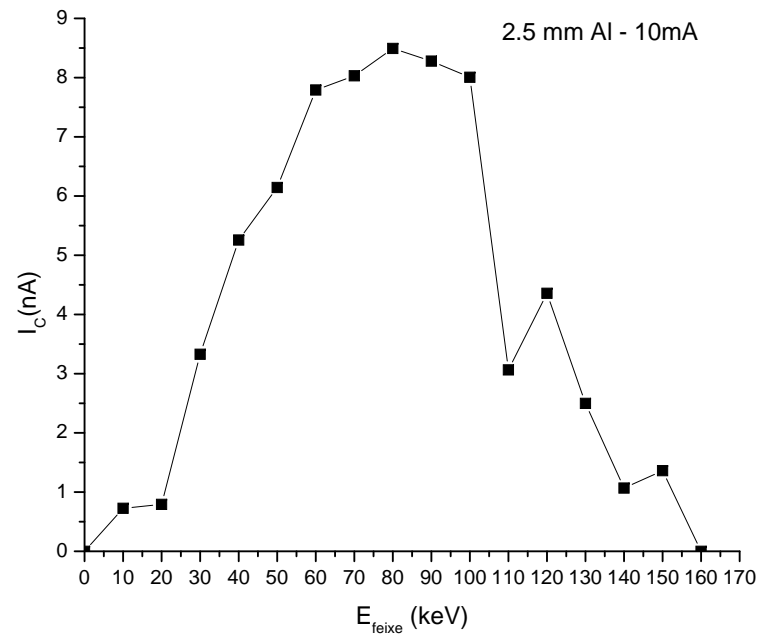


Figura 69: Distribuição de energias de raios-X do Pantak HF320 configurado em 160 kV e 15 mA, medido pelo fototransistor L14G1 à distância de 1 m do foco da fonte de raios-X. Sem filtração adicional..

# APÊNDICE C - Taxas de dose do Pantak HF 320

## C.1 Taxas de dose para o Pantak HF 320, sem filtração adicional

Tabela 15: Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da corrente de tubo e da tensão de tubo, para sistema sem filtração adicional.

$I_{tubo}$ Tensão (kV)	Taxa de dose (mGy/s)					
	1	5	10	15	20	25
40	0,262	1,328	2,739	4,183	5,681	7,183
50	0,351	1,784	3,639	5,534	7,454	9,438
60	0,433	2,190	4,433	6,706	9,053	11,420
70	0,501	2,880	5,133	7,757	10,417	13,113
80	0,557	2,859	5,741	8,653	11,571	14,602
90	0,607	3,133	6,277	9,442	12,655	15,884
100	0,646	3,366	6,740	10,131	13,543	17,004
110	0,678	3,563	7,149	10,730	14,326	17,956
120	0,702	3,735	7,502	11,249	15,014	16,801
130	0,729	3,895	7,830	11,758	15,637	19,560
140	0,748	4,025	8,082	12,157	16,199	-
150	0,764	4,144	8,345	12,545	16,705	-
160	0,781	4,254	8,580	12,898	17,188	-

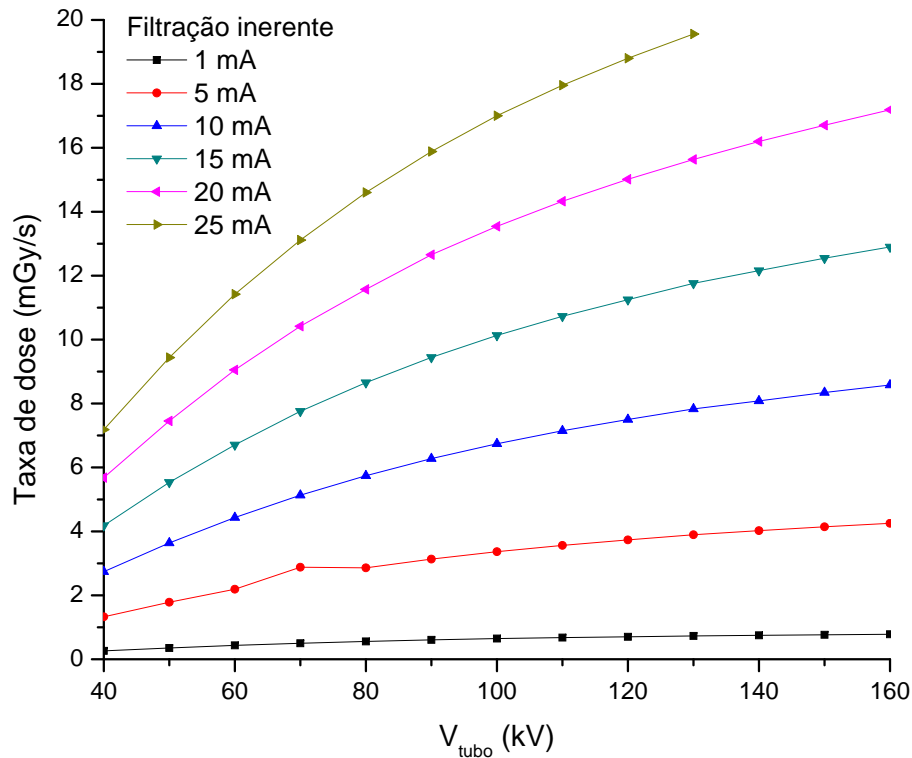


Figura 70: Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da tensão aplicada no tubo, para correntes de tubo de 1mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA, 20 mA e 25 mA, para sistema sem filtração adicional.

## C.2 Taxas de dose para o Pantak HF 320, com filtração adicional de 2,5 mm Al

Tabela 16: Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da corrente de tubo e da tensão de tubo, para sistema com filtração adicional de 2,5 mm Al.

$I_{\text{tubo}}$	Taxa de dose (mGy/s)				
	5	10	15	20	25
Tensão (kV)					
70	0,291	0,587	0,884	1,184	1,482
80	0,388	0,783	1,176	1,573	1,967
90	0,483	0,978	1,468	1,963	2,454
100	0,587	1,184	1,780	2,382	2,980
110	0,696	1,403	2,110	2,820	3,528
120	0,808	1,632	2,455	3,110	3,898
130	0,928	1,873	2,818	3,765	4,709
140	1,052	2,125	3,197	4,271	-
150	1,181	2,384	3,585	4,793	-
160	1,311	2,651	3,991	5,336	-



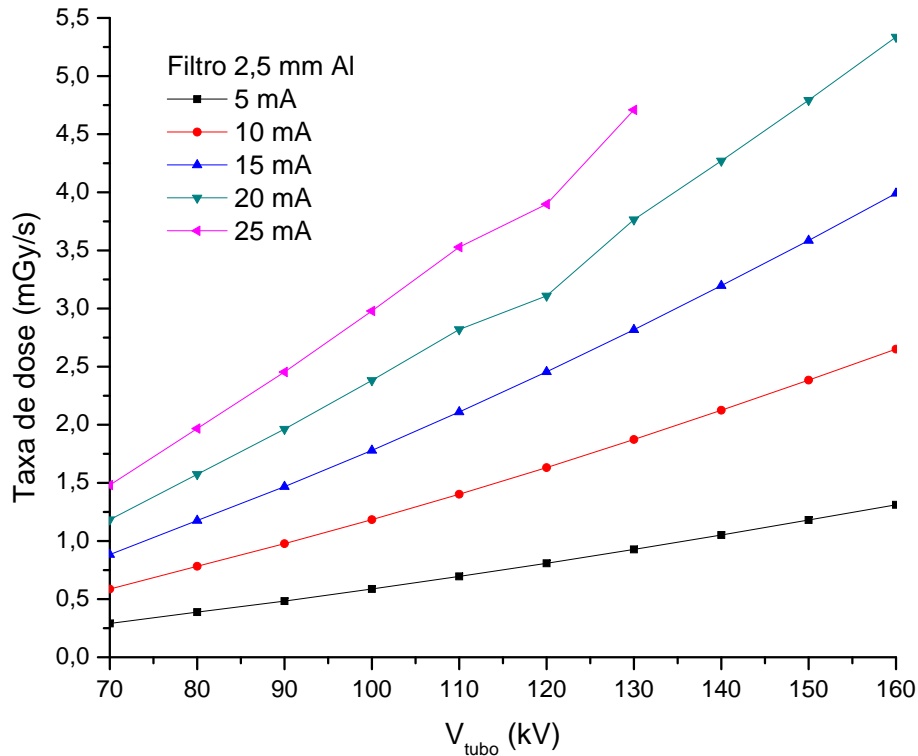


Figura 71: Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da tensão aplicada no tubo, para correntes de tubo de 5 mA, 10 mA, 15 mA, 20 mA e 25 mA, para sistema com filtração adicional de 2,5 mm Al.

### C.3 Taxas de dose para o Pantak HF 320, com filtração adicional de 0,25 mm Cu

Tabela 17: Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da corrente de tubo e da tensão de tubo, para sistema com filtração adicional de 0,25 mm Cu.

$I_{tubo}$	Taxa de dose (mGy/s)					
	1	5	10	15	20	25
Tensão (kV)						
70	-	0,0921	0,1858	0,2796	0,3746	0,4698
80	0,0268	0,1379	0,2784	0,4189	0,5606	0,7025
90	0,0319	0,1941	0,3909	0,5876	0,7865	0,9845
100	0,0486	0,2560	0,5168	0,7781	1,0416	1,3033
110	0,0613	0,3282	0,6631	0,9956	1,3318	1,6659
120	0,0767	0,4077	0,8241	1,2399	1,7782	2,0732
130	0,0919	0,4943	1,0004	1,5044	2,0093	2,5131
140	0,1081	0,5880	1,1894	1,7891	2,3902	-
150	0,1257	0,6852	1,3919	2,0926	2,7929	-
160	0,1446	0,7929	1,6068	2,4119	3,2191	-

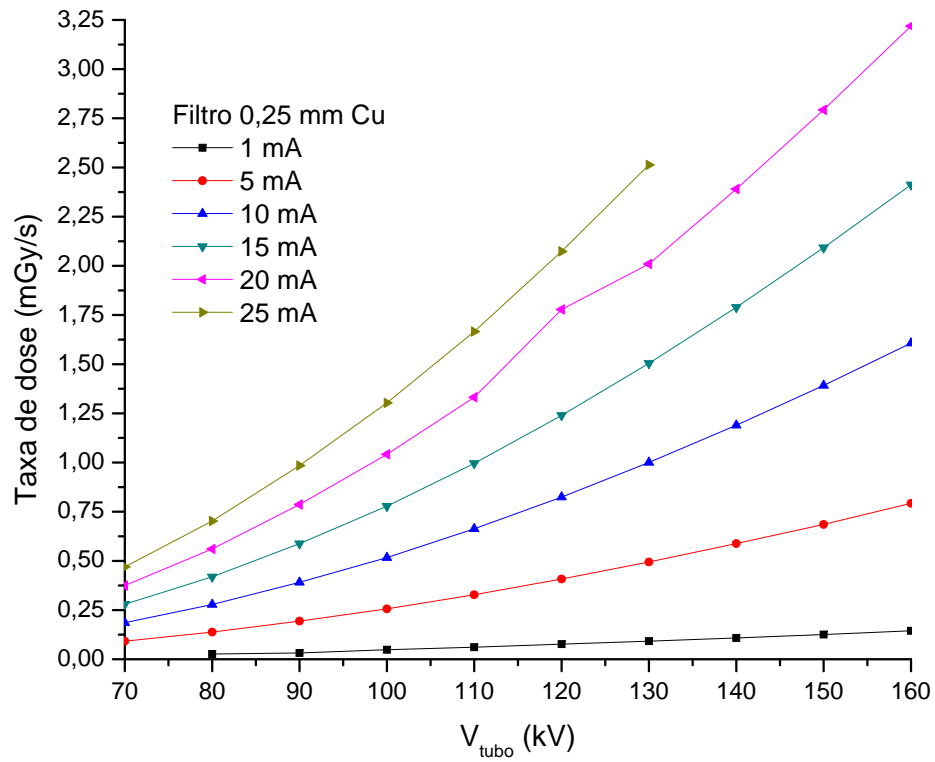


Figura 72: Taxas de dose (mGy/s) para o Pantak HF 320 em função da tensão aplicada no tubo, para correntes de tubo de 1 mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA, 20 mA e 25 mA, para sistema com filtração adicional de 0,25 mm Cu.

# APÊNDICE D - Complementação das medições de $I_C \times I_B$

## D.1 Irradiações sem filtração adicional

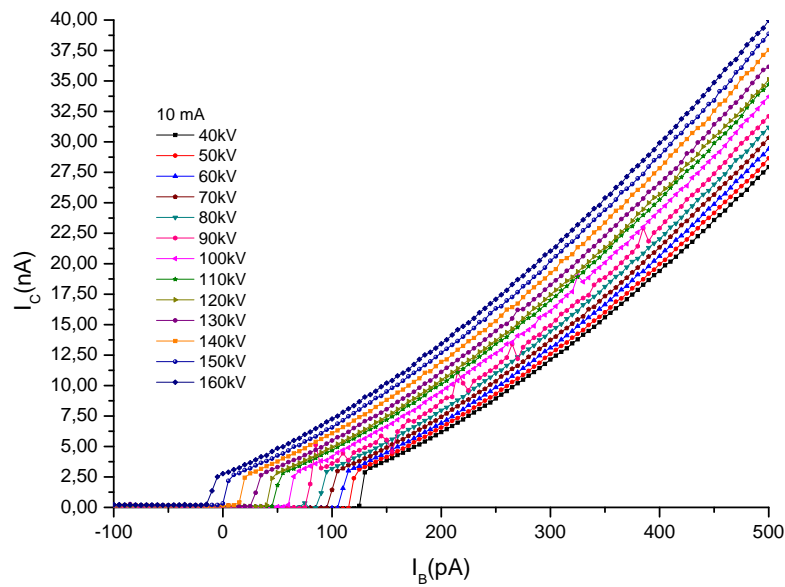


Figura 73: Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 10 mA. Sem filtração adicional..

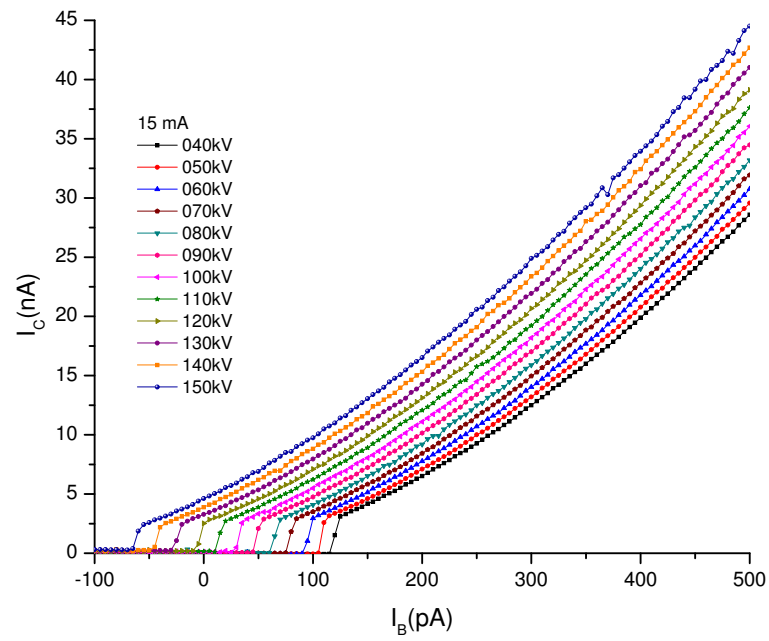


Figura 74: Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 10 mA. Sem filtração adicional..

## D.2 Irradiações com filtração adicional

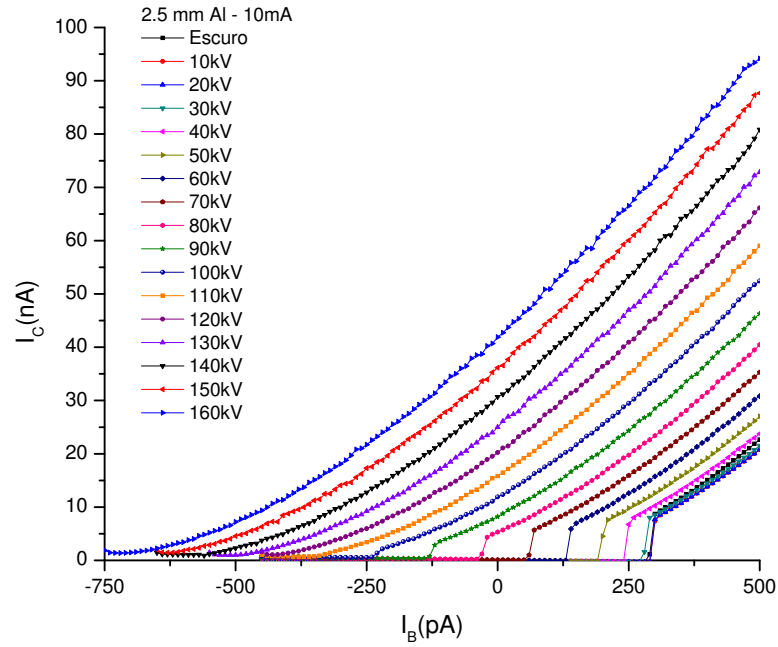


Figura 75: Curva da corrente de coletor em função da corrente de base para o fototransistor L14G1 quando o mesmo é irradiado com uma tensão de tubo entre 40 kV e 160 kV e corrente de tubo fixa em 10 mA. Filtração adicional de 2,5 mm Al.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)