



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES

FRANCISCO ALVES CAVALCANTI

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO BASEADA EM MOSFET PARA  
MEDIÇÃO NÃO-INVASIVA DO POTENCIAL DE PICO (kVp) EM TUBOS DE  
RAIOS X**

Recife  
2022

FRANCISCO ALVES CAVALCANTI

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO BASEADA EM MOSFET PARA  
MEDIÇÃO NÃO-INVASIVA DO POTENCIAL DE PICO (kVp) EM TUBOS DE  
RAIOS X**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Aplicações de Radioisótopos na Indústria e Medicina.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio Pereira dos Santos

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Edvane Borges da Silva

Recife

2022

Catálogo na fonte:  
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

C376d Cavalcanti, Francisco Alves.  
Desenvolvimento de instrumentação baseada em MOSFET para medição não-invasiva do potencial de pico (kVp) em tubos de raios X. / Francisco Alves Cavalcanti. – 2022.  
60 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio Pereira dos Santos.  
Orientadora: Profa. Dra. Edvane Borges da Silva.  
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2022.  
Inclui referências.

1. Engenharia nuclear. 2. MOSFET. 3. Raios X. 4. kVp. I. Santos, Luiz Antonio Pereira dos (orientador). II. Silva, Edvane Borges da (orientadora). III. Título.

621.48 CDD (22. ed.)

UFPE  
BCTG/2022-236

FRANCISCO ALVES CAVALCANTI

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO BASEADA EM MOSFET PARA  
MEDIÇÃO NÃO-INVASIVA DO POTENCIAL DE PICO (KVP) EM TUBOS DE  
RAIOS X**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Aplicações de Radioisótopos na Indústria e Medicina.

Aprovado em: 11 / 05 / 2022

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Luiz Antonio Pereira dos Santos (Examinador Externo)  
Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Divanizia do Nascimento Souza (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Sergipe – UFS

---

Prof. Dr. José Guilherme Pereira Peixoto (Examinador Externo)  
Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN

---

Prof. Dr. Ramón Enrique Ramayo González (Examinador Externo)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

À vida e a todos que a ela amam ou dela fazem parte.

## **AGRADECIMENTOS**

Deixo aqui meus agradecimentos a todos os colegas e professores que participaram da minha formação acadêmica e pessoal.

Ao meu orientador favorito e amigo, Luiz Antonio Pereira dos Santos, sempre me incentivando com sua empolgação e pensamento (quase sempre) positivo.

Aos professores que participaram mais ativamente deste trabalho: Arquimedes José de Araújo Paschoal, Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira e Marcus Aurelio Pereira dos Santos. Sem suas observações, este trabalho seria um eterno rascunho.

Aos meus colegas do PROTEN, em especial a Luiz Carlos Gonçalves Filho, colega de longa data, sempre presente nos momentos alegres e de angústia desde o início de minha graduação em engenharia eletrônica na UFPE.

A todo o corpo técnico do PROTEN, desde a coordenação com o professor Vinícius Saito Monteiro de Barros até a escolaridade com Kalydja Izabel Santos Lopes da Silva, sempre dispostos a resolver problemas de matrícula e esclarecer dúvidas dos estudantes. O trabalho de vocês, principalmente durante a pandemia, merece todo o reconhecimento.

À professora Edvane Borges da Silva pelo apoio prestado.

A todos que me construíram e me conduziram até aqui: Deus, meus pais, Maria Rute Alves Cavalcanti e Diaulas Cavalcanti da Silva, meus professores e meu coeso e amado núcleo familiar composto pelas três mais lindas e compreensivas pessoas: Alana Diniz Cavalcanti, Anita Cavalcanti e a pequena Flora Cavalcanti.

## RESUMO

A medição de parâmetros de feixes de raios X aplicados ao diagnóstico médico utilizando semicondutores tem se mostrado economicamente viável, além de ser uma alternativa compacta e robusta frente aos tradicionais detectores a gás. Este trabalho apresenta uma inovadora técnica de medição não invasiva da tensão aplicada ao tubo de raios X (kVp) baseada na relação do efeito da chuva de elétrons com a espessura do encapsulamento de um MOSFET quando exposto a um feixe de radiação ionizante. A vantagem sobre as técnicas convencionais (as quais usam filtros de radiação com diferentes espessuras) reside na maior amplitude do sinal de saída em tempo real que o dispositivo pode fornecer no processo de medição do kVp. Para validação da técnica, foram efetuados diversos testes típicos de sensores sob efeito de raios X de um equipamento clínico para o radiodiagnóstico. Os resultados apontam que o MOSFET utilizado pode fornecer o valor do kVp com alta precisão, originando um pedido de patente de inovação tecnológica no INPI.

**Palavras-chave:** MOSFET; raios X; kVp.

## ABSTRACT

The measurement of parameters of X-ray beams applied to medical diagnosis using semiconductors has shown to be economically viable, in addition to being a compact and robust alternative to traditional gas detectors. This work presents an innovative technique of non-invasive measurement of the voltage applied to the X-ray tube (kVp) based on the relationship of electron rain effect with the package thickness of a MOSFET when it is exposed to an ionization radiation beam. The advantage over the conventional techniques (which uses radiation filters with different thickness) lies in the greater amplitude of the real-time output signal that the device can provide in the kVp measurement process. For validation of the technique, several typical tests of sensors under the effect of X-rays of clinical equipment for radiodiagnosis were carried out. The results show that the MOSFET used can provide the value of kVp with high precision and this led to a patent application for technological innovation at the INPI.

**Keywords:** MOSFET; X-ray; kVp.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Tubo de raios X de ânodo estático	17
Figura 2 –	Espectro de raios X para uma tensão de tubo de 150 kVp e sua estimativa para um feixe sem filtração, propagando-se no vácuo.	18
Figura 3 –	Ilustração de um espalhamento Compton	18
Figura 4 –	Ilustração da interação de fótons com elétrons e a geração da chuva eletrônica: Elétron ligado em vermelho; elétron secundário em azul; elétron terciário (verde), quaternário (amarelo).	19
Figura 5 –	Comparativo do PPV (preto), $kV_{max}$ (verde) e $kV_{med}$ (vermelho)	22
Figura 6 –	Espectros de fótons de um tubo de raios X com alvo de tungstênio, obtidos com o software SpekCalc (POLUDNIOWSKI et al, 2009).	23
Figura 7 –	Relação entre a espessura do absorvedor e os sinais dos sensores para diferentes espessuras de filtro e valores de PPV	26
Figura 8 –	Relação da Energia efetiva do feixe com o coeficiente de atenuação efetivo	27
Figura 9 –	Formação das bandas de energia da estrutura cristalina do Si puro à medida que os átomos se aproximam entre si	29
Figura 10 –	Distribuição de Fermi	31
Figura 11 –	Bandas de energia em diferentes materiais, ilustrando o nível de Fermi em cada caso.	31
Figura 12 –	Três possíveis estados da junção PN: Sem polarização, polarizada diretamente e polarizada reversamente.	33
Figura 13 –	Analogia entre: a) uma válvula de aplicação em fluidos; b) transistor controlado por corrente (TBJ); c) transistor controlado por tensão (MOSFET).	33
Figura 14 –	Aspectos construtivos de um transistor bipolar <i>npn</i>	34
Figura 15 –	Estrutura simplificada de um MOSFET planar tipo enriquecimento	35

Figura 16 –	Corte transversal de um VDMOSFET de canal p simplificado	36
Figura 17 –	Deslocamento das curvas de chaveamento de um MOSFET em função da dose acumulada: a) MOSFET polarizado; b) MOSFET sem polarização.	38
Figura 18 –	Esboço do arranjo experimental	41
Figura 19 –	Polarização do VDMOSFET para operar como sensor de raios X. a) Diagrama esquemático; b) Curva de chaveamento do VDMOSFET.	42
Figura 20 –	Arranjo experimental para medição de kVp no método convencional	45
Figura 21 –	Arranjo Experimental para medição de kVp no método proposto	46
Figura 22 –	Experimento de verificação do efeito anódico: Nove irradiações realizadas com centro do feixe em diferentes posições	47
Figura 23 –	Curva $I_D \times V_{GS}$ de dois VDMOSFETs (M1 e M2) eletricamente semelhantes.	48
Figura 24 –	Repetitividade na medição de $I_{DX}$ .	49
Figura 25 –	Variação em $I_D$ para o VDMOSFET STF2HNK60Z em função da dose acumulada.	50
Figura 26 –	a) Sensibilidade de VDMOSFETs eletricamente idênticos. b) Resposta dosimétrica.	52
Figura 27 –	Relação da sensibilidade com kVp para VDMOSFETs irradiados simultaneamente com filtrações diferentes – (a) Para irradiações a 100mAs; (b) Para irradiações a 200mAs.	53
Figura 28 –	Relação do kVp e as saídas $S_1/S_2$ dos VDMOSFETs (irradiados com diferentes filtrações) – (a) para irradiações a 100mAs; (b) para irradiações a 200mAs.	53
Figura 29 –	Gráfico $kVp \times I_{DX}$ para VDMOSFETs em dois encapsulamentos diferentes	54
Figura 30 –	Gráfico do $kVp \times S_1/S_2$ para VDMOSFETs com encapsulamentos distintos	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Transistores utilizados como sensores nas irradiações	40
Tabela 2 –	Dados elétricos dos MOSFETs de acordo com o fabricante	40
Tabela 3 –	Dosimetria ( $Gy/h$ ) do feixe de raios X do equipamento <i>Polymat 30/50 Plus</i>	49
Tabela 4 –	Efeito angular no VDMOSFET STD2HMK60Z-1	51
Tabela 5 –	Resultados da resposta do VDMOSFET em função do tamanho de campo	51
Tabela 6 –	Valores de $I_{DX}$ ( $nA$ ) obtidos a partir de irradiações do VDMOSFET STD2HMK60Z-1 em diferentes posições com relação ao centro do feixe (0,0).	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
kVp	<i>Peak Kilovoltage</i> – Tensão de pico
MOSFET	<i>Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PPV	<i>Peak Potencial Voltage</i> – Potencial de Pico Prático
TBJ	Transistor Bipolar de Junção
VDMOS	VDMOSFET
VDMOSFET	<i>Vertical Diffused MOSFET</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\nu$	Frequência
$U$	Tensão
$E$	Energia
$V_T$	Tensão térmica
$V_{th}$	Tensão de limiar
$I_D$	Corrente de dreno
$I_S$	Corrente de deriva
$V_{GS}$	Tensão porta-fonte
$h$	Constante de Planck
$V_{DS}$	Tensão de dreno
$m_e$	Massa do elétron
$\mu$	Coefficiente de atenuação
$x$	Espessura
$E_G$	Gap de energia
$k$	Constante de Boltzmann
$E_F$	Energia de Fermi
$\beta$	Ganho de corrente
$I_C$	Corrente de coletor
$I_B$	Corrente de base
$T$	Temperatura em Kelvin
$V_0$	Barreira de potencial
$A$	Ampère
$V$	Volt
$I_{DX}$	Corrente de dreno devida aos raios X
$I_{TX}$	Corrente de tubo de raios X
$\Omega$	Ohm
$f_e(E)$	Função distribuição de Fermi-Dirac
$Z$	Número atômico
$I$	Intensidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
2.1	RAIOS X	16
<b>2.1.1</b>	<b>Geração de raios X</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Interação dos raios X com a matéria</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Parâmetros do tubo de raios X</b>	<b>20</b>
2.1.3.1	Corrente de tubo de raios X ( $I_{TRX}$ )	20
2.1.3.2	Potencial de pico aplicado ao tubo de raios X – kVp	20
2.1.3.2.1	<i>Potencial de pico máximo</i>	21
2.1.3.2.2	<i>Potencial de pico médio</i>	21
2.1.3.2.3	<i>Potencial de pico prático – PPV</i>	21
2.1.3.3	Filtração da radiação	22
2.2	MEDIDORES NÃO INVASIVOS DE KVP	23
<b>2.2.1</b>	<b>Medição por espectrometria</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Métodos radiográficos</b>	<b>24</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Técnica de sensores duplos</b>	<b>24</b>
2.3	SEMICONDUCTORES	28
<b>2.3.1</b>	<b>Teoria quântica da condutividade elétrica em sólidos</b>	<b>28</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Dispositivos eletrônicos semicondutores</b>	<b>32</b>
2.3.2.1	Diodo – Junção pn	32
2.3.2.2	Transistores	33
2.3.2.2.1	<i>Transistor Bipolar de Junção – TBJ</i>	34
2.3.2.2.2	<i>MOSFET</i>	34
<b>2.3.3</b>	<b>Danos da radiação no MOSFET</b>	<b>37</b>
2.3.3.1	Danos por deslocamento	37
2.3.3.2	Danos por ionização	37
<b>2.3.4</b>	<b>Funcionamento do MOSFET como detector de radiação</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>40</b>
3.1	MATERIAIS	40
<b>3.1.1</b>	<b>VDMOSFETs</b>	<b>40</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Instrumentos de sinais elétricos: fonte e medidor</b>	<b>41</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Gerador de feixes de raios X</b>	<b>41</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Arranjo experimental</b>	<b>41</b>

3.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	42
3.2.1	Circuito de polarização do VDMOSFET	42
3.2.2	Seleção dos dispositivos VDMOSFETs	43
3.2.3	Dosimetria do feixe de raios X	43
3.2.4	Repetitividade do sinal de saída $I_{DX}$	43
3.2.5	Verificação do dano de irradiação causado ao VDMOSFET	44
3.2.6	Dependência angular do VDMOSFET	44
3.2.7	Influência da radiação espalhada na medição de $I_{DX}$ .	44
3.2.8	Resposta do VDMOSFET às variações no kVp	45
3.2.9	Determinação do kVp – Irradiação de transistores em paralelo com filtrações diferentes	45
3.2.10	Determinação do kVp – Irradiação de transistores em paralelo com encapsulamentos diferentes	46
3.2.11	Verificação do efeito anódico	46
4	<b>RESULTADOS</b>	<b>48</b>
4.1	SELEÇÃO DOS VDMOSFETS	48
4.2	DOSIMETRIA DO FEIXE DE RAIOS X	49
4.3	REPETITIVIDADE DO SINAL DE SAÍDA $I_{DX}$	49
4.4	VERIFICAÇÃO DO DANO CAUSADO AO VDMOSFET	50
4.5	DEPENDÊNCIA ANGULAR DO VDMOSFET	50
4.6	INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO ESPALHADA NA MEDIÇÃO DE $I_{DX}$	51
4.7	RESPOSTA DO VDMOSFET ÀS VARIAÇÕES NO KVP	52
4.8	DETERMINAÇÃO DO KVP – IRRADIAÇÃO DE TRANSISTORES EM PARALELO COM FILTRAÇÕES DIFERENTES	52
4.9	DETERMINAÇÃO DO KVP – IRRADIAÇÃO DE TRANSISTORES EM PARALELO COM ENCAPSULAMENTOS DIFERENTES	54
4.10	VERIFICAÇÃO DO EFEITO ANÓDICO	55
5	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar dos comprovados riscos à saúde atribuídos à exposição aos feixes de radiação ionizante, a necessidade de uso dos raios X para fins de diagnóstico médico justifica-se pelo benefício gerado. Regulamentações já foram elaboradas para estabelecer parâmetros e procedimentos que minimizem tanto quanto possível os prováveis efeitos da exposição a esse tipo de radiação. Assim, a monitoração do potencial de pico aplicado ao tubo de raios X (kVp) é fundamental, haja visto que se trata de um parâmetro relacionado tanto à qualidade da imagem obtida como a dose de radiação recebida por um paciente em procedimento de exame radiográfico.

Geralmente o processo de medição do kVp tem que ser de forma não invasiva para evitar interrupções morosas no atendimento em clínicas radiográficas e assim viabilizar o procedimento de monitoração do kVp em tempo real. Nesse sentido são os dispositivos semicondutores que possuem vantagens em relação aos detectores de radiação convencionais pelo fato de serem de estado sólido, operar com tensões baixas e, principalmente, fornecerem um forte sinal elétrico (KNOLL, 2010).

Neste trabalho é apresentado um estudo aprofundado sobre o uso do VDMOSFET para a medição de forma não invasiva do kVp correspondente à faixa de energia utilizada no radiodiagnóstico.

Utilizando a técnica da medição de kVp por sensores duplos, que é o método convencional, este trabalho vai mais além ao propor o uso do efeito de *buildup* em encapsulamentos diferentes em dispositivos eletricamente idênticos ao invés de usar o efeito da atenuação produzida por filtros de radiação com diferentes espessuras. Dessa forma, ao formarem capas de *buildup*, as diferentes espessuras do encapsulamento contribuem para a chuva de elétrons que ocorre na pastilha do semicondutor, aumentando a corrente de dreno devido à radiação incidente e conseqüentemente a sensibilidade do dispositivo.

Os resultados de exaustivas medições e testes típicos com VDMOSFETs sob feixes de raios X aplicados ao diagnóstico médico apontam que tais dispositivos eletrônicos fornecem o valor do kVp com precisão e uma inovadora técnica surge.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 RAIOS X

Os raios X podem ser definidos como ondas eletromagnéticas de energia relativamente alta se comparada à da luz visível, geralmente de  $10^4$  a  $10^5$  vezes maior para os feixes utilizados no radiodiagnóstico (CEMBER; JOHNSON, 2009).

A equação 1 evidencia que a energia do fóton,  $E$ , diretamente proporcional à sua capacidade de penetração, é igual ao produto da constante de Planck,  $h$ , pela sua frequência de propagação,  $\nu$ :

$$E = h \cdot \nu \quad (1)$$

#### 2.1.1 Geração de raios X

Os principais componentes diretamente associados à geração de raios X são: gerador de alta tensão e tubo de raios X. Este último contém dois eletrodos, cátodo e ânodo, ligados ao gerador de alta tensão associado a um sistema de controle que nos equipamentos usados no diagnóstico médico, consiste em um painel para ajustar os parâmetros do tubo de raios X: 1) Potencial de pico ( $kVp$ ); 2) Carga de trabalho ( $mAs$ ); 3) Tempo de exposição ( $ms$ ).

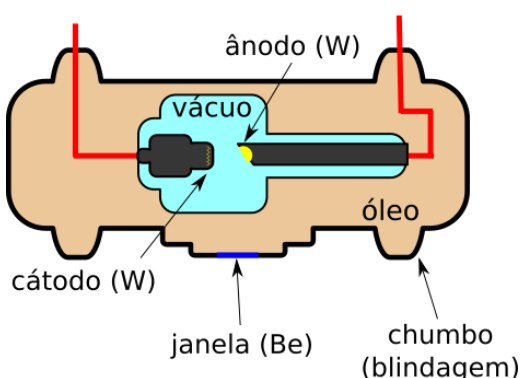
No tubo de raios X, por meio de uma diferença de potencial (da ordem de quilovolts – kV), elétrons – liberados por emissão termoiônica em um filamento de tungstênio aquecido (o cátodo) pela passagem de corrente elétrica – são acelerados de forma a colidirem com um alvo (o ânodo), composto de material com elevados ponto de fusão e densidade (geralmente tungstênio ou molibdênio) incrustado numa haste refrigerada de cobre, bom condutor elétrico e térmico (SCAFF, 2010).

No processo de múltiplas colisões dos elétrons no alvo apenas uma pequena fração da energia total ( $f_e$ ) é convertida em fótons de raios X. A equação 2 mostra que  $f_e$  depende do número atômico do alvo ( $Z$ ) e da energia dos elétrons  $E(MeV)$  (CEMBER; JOHNSON, 2009):

$$f_e = Z \cdot E \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Ao atingirem o ânodo, os elétrons ionizam os átomos do alvo ou são freados por estes, gerando os raios X, aproximadamente 1% (TURNER, 2007). O resultado maior das múltiplas colisões elétron-alvo são fótons na frequência do infravermelho, e por isso existe a necessidade de refrigeração do ânodo. A quantidade de calor produzida no ânodo é proporcional ao potencial aplicado ao tubo ( $kVp$ ), corrente de tubo ( $I_{TRX}$ ) e duração do feixe (SCAFF, 2010). A figura 1 ilustra um tubo de raios X de ânodo estático e seus principais componentes.

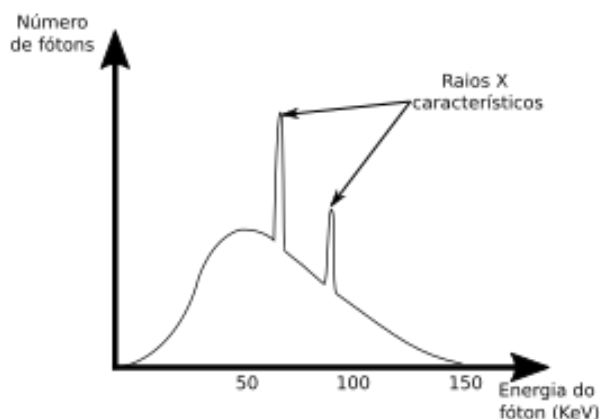
Figura 1 – Tubo de raios X de ânodo estático



Fonte: O Autor (2022)

Os raios X são gerados por dois processos distintos: por decaimento energético e por frenamento, sendo este último mais frequente e fruto do interesse deste trabalho. O processo de geração de raios X por frenamento – *Bremsstrahlung* – acontece na moderação da velocidade de elétrons no alvo. Como resultado da diferença energética entre elétron incidente e frenado, ocorre liberação de energia na forma de fótons distribuídos em várias frequências no espectro. A apresentação energeticamente contínua do espectro de raios X por frenamento diferencia-se do espectro discreto, resultado dos raios X característicos gerados pelo processo de decaimento energético, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Espectro de raios X para uma tensão de tubo de 150 kVp e sua estimativa para um feixe sem filtração, propagando-se no vácuo.



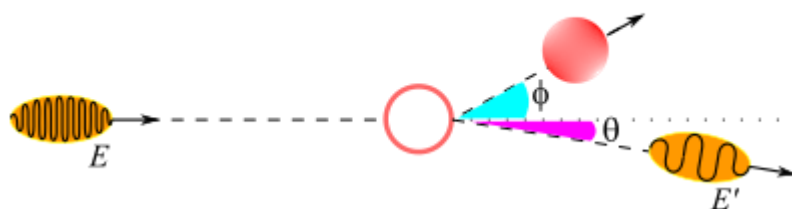
Fonte: O Autor (2022)

### 2.1.2 Interação dos raios X com a matéria

A probabilidade de ocorrência de uma interação específica da radiação com a matéria e seu consequente poder de penetração dependerá da energia da radiação e da natureza do meio absorvedor. Excitação e ionização dos átomos do absorvedor são sempre resultados dessa interação (CEMBER; JOHNSON, 2009). Como efeito, a ionização promove um rearranjo molecular na estrutura do material, degradando-o à medida que altera suas propriedades iniciais.

Considerando-se o núcleo de tamanho desprezível em relação ao raio atômico, a nuvem eletrônica é a região onde a radiação tem maior probabilidade de interação (TURNER, 2007), ou seja, é uma colisão fóton-elétron. Considerando-se os fótons cuja energia é aplicada ao radiodiagnóstico (de ~50keV a ~100keV), o mais provável resultado da interação é o espalhamento Compton (Figura 3).

Figura 3 – Ilustração de um espalhamento Compton



Fonte: O Autor (2022)

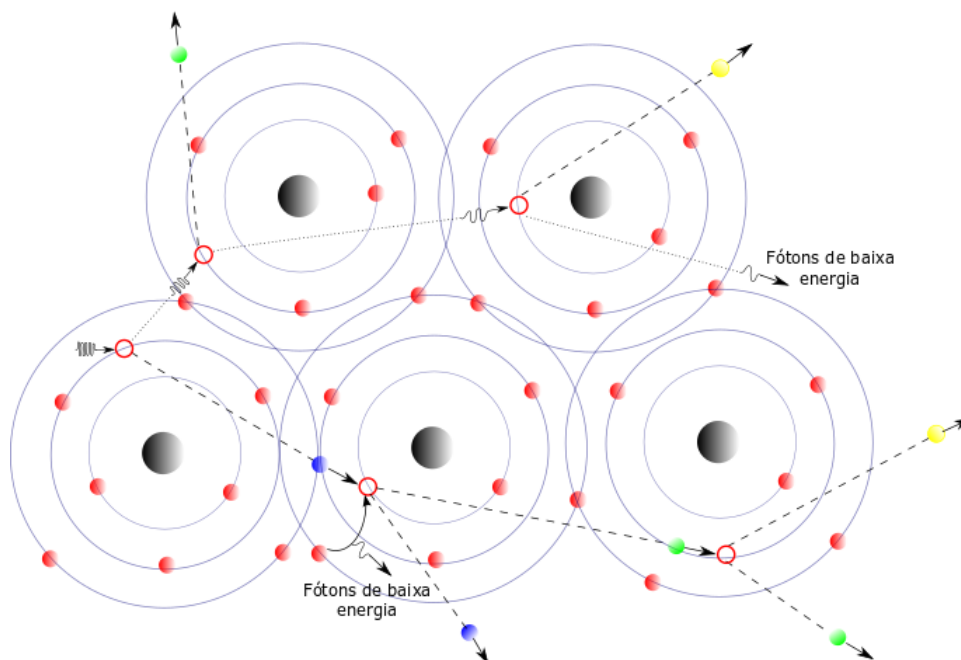
Na colisão ocorre a transferência parcial de momento linear e energia do fóton incidente ( $E$ ), que continua sua jornada pela estrutura atômica com energia ( $E'$ ) inferior

àquela antes da colisão. O elétron é espalhado com energia resultante da diferença entre fóton incidente ( $E$ ) e do fóton espalhado ( $E'$ ) menos sua energia de ligação ao átomo. Assim, obtém-se que a energia do fóton espalhado é definida pela equação 3 (KNOLL, 2010).

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (3)$$

As partículas resultantes da interação inicial, o fóton – seguindo uma trajetória mais retilínea – e o elétron – seguindo uma trajetória tortuosa (KNOLL, 2010) – poderão colidir com outros elétrons, levando a sucessivas excitações e ionizações atômicas (Figura 4). Os múltiplos elétrons ejetados recebem o nome de chuva de elétrons (LECHNER, 2018), também denominados elétrons secundários ou radiação secundária.

Figura 4 – Ilustração da interação de fótons com elétrons e a geração da chuva eletrônica: Elétron ligado em vermelho; elétron secundário em azul; elétron terciário (verde), quaternário (amarelo).



Fonte: O Autor (2022)

A chuva de elétrons contribui significativamente para a dose até uma determinada espessura que corresponde ao fator de *buildup*. Deste ponto em diante,

à medida que os fótons se propagam no material, interagindo com os átomos, observa-se a diminuição da dose (KNOLL, 2010).

A intensidade de um feixe de raios X é definida como o número de fótons por unidade de área e por unidade de tempo. Considerando, a princípio, um feixe monoenergético com intensidade  $I_0$ , é possível observar que os efeitos supracitados ocasionam uma atenuação exponencial da intensidade  $I$  do feixe em função da espessura ( $x$ ) do absorvedor a ele exposto e de um coeficiente de atenuação ( $\mu$ ) que depende do material do absorvedor e da energia da radiação (CEMBER; JOHNSON, 2009), conforme por ser visto na equação 4.

$$I=I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (4)$$

### 2.1.3 Parâmetros do tubo de raios X

#### 2.1.3.1 Corrente de tubo de raios X ( $I_{TRX}$ )

O fluxo de elétrons entre o ânodo e o cátodo consiste em uma corrente elétrica no tubo de raios X e por isso a quantidade de fótons gerados no alvo é proporcional à corrente de tubo de raios X (IAEA, 2014). Este parâmetro pode ser ajustado no painel de controle do equipamento de raios X de forma direta ou indireta (por meio de ajustes na carga de trabalho e no tempo de irradiação).

#### 2.1.3.2 Potencial de pico aplicado ao tubo de raios X – kVp

A tensão aplicada entre ânodo e cátodo em um tubo de raios X corresponde ao kVp. Embora a corrente de tubo imponha a intensidade fotônica do feixe de raios X, sabe-se que a intensidade fotônica é proporcional ao quadrado do potencial de pico (SCAFF, 2010). De fato, o espectro de energia dos fótons é determinado pelo potencial de pico e também pela filtração da radiação (IAEA, 2014; McLEAN, 2009), fatores estes que influenciam na dose à qual o paciente é exposto. A propósito, segundo Neto e Faria (2014), uma das técnicas para se estimar o kVp, de forma não invasiva, é feita por meio de medições da intensidade da radiação utilizando diferentes

espessuras da filtração da radiação. Na realidade, de acordo com as normas IEC-61676 (2009) e IEC-61267 (2005), associadas ao kVp existem outras definições, que se baseiam na forma de onda resultante do equipamento gerador de raios X, explanadas a seguir:

#### 2.1.3.2.1 *Potencial de pico máximo*

Define-se esta grandeza como o valor máximo do kVp aplicado ao tubo de raios X durante o tempo de exposição. Altos valores do kVp decorrentes de instabilidade na rede elétrica não caracterizam potenciais de pico máximo.

#### 2.1.3.2.2 *Potencial de pico médio*

É definido como a média aritmética dos valores de potenciais aplicados ao tubo de raios X durante o intervalo de exposição. Da mesma forma que no potencial de pico máximo, altos ou baixos valores decorrentes de instabilidade na rede elétrica não fazem parte do cálculo para potenciais de pico médio.

#### 2.1.3.2.3 *Potencial de pico prático – PPV*

O potencial de pico prático (PPV do inglês *Practical Peak Voltage*), foi introduzido pela norma IEC-61676 (2009) como um parâmetro elétrico fortemente relacionado ao contraste da imagem. Raios X com o mesmo PPV geram os mesmos níveis de contraste, independentemente da forma de onda aplicada aos eletrodos do tubo de raios X. Matematicamente, trata-se da média ponderada da tensão de tubo descrito na equação 5.

$$PPV = \frac{\sum_{i=0}^n w(U_i) \cdot U_i}{\sum_{i=0}^n w(U_i)} \quad (5)$$

Onde:

$U_i$   $\Rightarrow$  i-ésimo termo da sequência de medições dos valores instantâneos do kVp

$w(U_i)$   $\Rightarrow$  Função ponderada de  $U_i$  dada por:

$$w(U_i) = d \cdot U_i^4 + e \cdot U_i^3 + f \cdot U_i^2 + g \cdot U_i + h \quad (6)$$

Cujas constantes, para raios X diagnósticos, possuem os valores (IEC-61276, 2005):

$$d = 4,310644 \cdot 10^{-10}$$

$$e = -1,662009 \cdot 10^{-7}$$

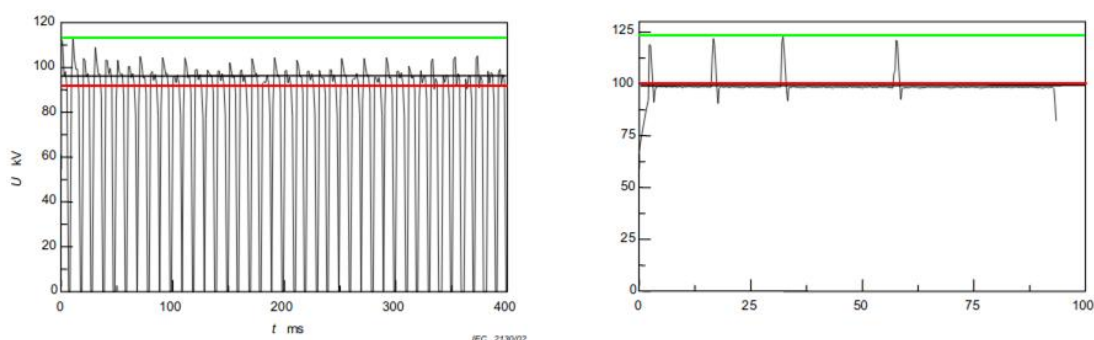
$$f = 2,308190 \cdot 10^{-5}$$

$$g = 1,030820 \cdot 10^{-5}$$

$$h = 1,747153 \cdot 10^{-2}$$

A figura 5 ilustra o comparativo entre as definições de tensões de pico máxima, média e prática:

Figura 5 – Comparativo do PPV (preto),  $kV_{max}$  (verde) e  $kV_{med}$  (vermelho)

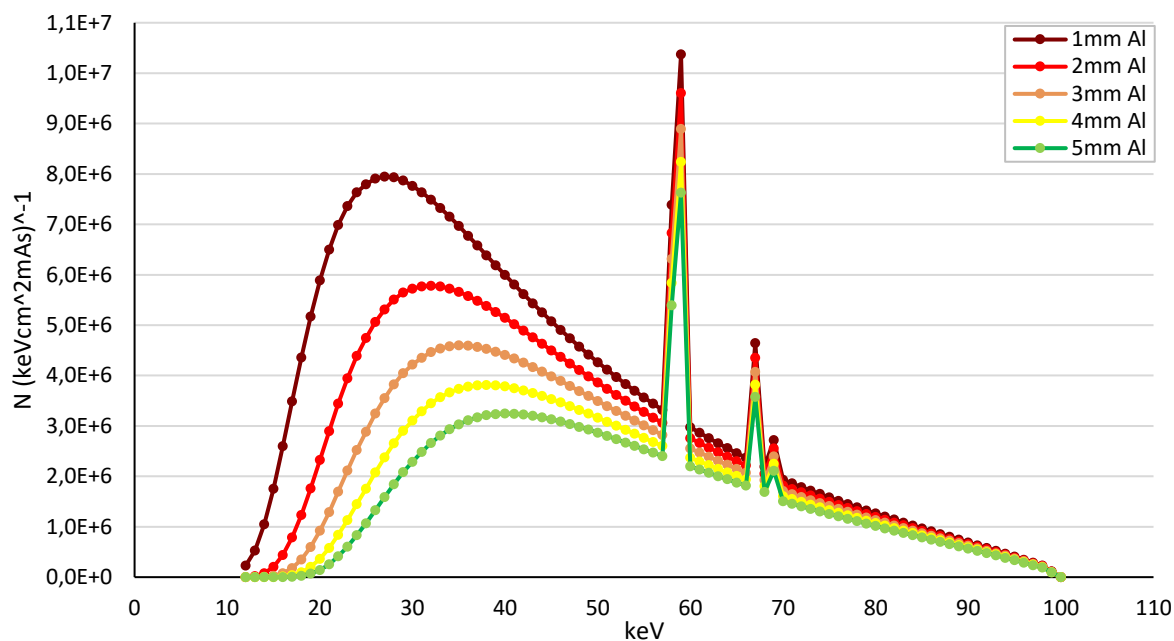


Fonte: IEC61676 (2009) – Modificado

### 2.1.3.3 Filtração da radiação

Basicamente, há dois tipos de filtração da radiação: 1) Inerente, aquela que já vem no tubo de raios X; 2) Adicional, aquela que é adicionada posteriormente. Esta última tem como objetivo modificar o espectro de raios X para tornar o feixe mais duro e assim evitar doses ao paciente provenientes dos fótons de baixa energia. A figura 6 ilustra o espectro de feixes de raios X sob diferentes valores de filtração adicional. Pode-se verificar que ocorre um deslocamento da energia média ou efetiva para valores maiores. Observando-se esta particularidade, é possível estimar o kVp de maneira não invasiva, fazendo-se uso de filtros com diferentes espessuras e do decaimento exponencial da intensidade do feixe (LINDSTRÖM, 2016).

Figura 6 – Espectros de fótons de um tubo de raios X com alvo de tungstênio, obtidos com o software SpekCalc (POLUDNIOWSKI et al, 2009).



Fonte: O Autor (2022)

Conforme será visto no próximo tópico, os espectros de raios-X e as curvas de atenuação correspondentes estão matematicamente relacionados. Por isso a atenuação do feixe pode ser medida pelo uso de distintos materiais atenuantes com diferentes espessuras. A partir desses resultados, o espectro de raios X pode ser estimado juntamente com o kVp.

## 2.2 MEDIDORES NÃO INVASIVOS DE KVP

Métodos de medição não invasiva de parâmetros dosimétricos associados aos feixes de raios X se baseiam nas suas características por observação dos efeitos da radiação com a matéria, mais precisamente, da radiação com o sensor.

Para medição do kVp, pode-se citar os métodos de medição 1) Pela relação entre Kerma (*Kinetic Energy Released per unit MAss*) e a distribuição espectral, 2) Pelo uso da transformada de Laplace, 3) Por algoritmos iterativos e 4) Usando métodos numéricos. Dentre estes, o método que faz uso da transformada de Laplace é o mais comum, pela simplicidade e pela exatidão no espectro (DELGADO, 2007).



### 2.2.1 Medição por espectrometria

Em um feixe de raios X a correlação entre a energia máxima dos fótons,  $E_{max}$ , e frequência máxima,  $\nu_{max}$ , de um espectro contínuo de raios X é dada pela equação 7.

$$E_{max} = q_e \cdot kVp = h \cdot \nu_{max} \quad (7)$$

Onde  $q_e$  é a carga elementar,  $h$  é a constante de Planck e  $kVp$  é a tensão de tubo.

Da equação 7, é possível concluir que basta medir  $E_{max}$  ou  $\nu_{max}$ , para estimar o valor do potencial aplicado ao tubo. A forma mais intuitiva é a análise do espectro. Todavia, métodos de medição por espectrometria exigem instrumentação complexa e de alto custo, experimento muito demorado e alto nível de perícia na análise (KÉPALKOTÁS, 2019).

### 2.2.2 Métodos radiográficos

Também chamados de penetrômetros (LINDSTRÖM, 2016), os equipamentos de medição por métodos radiográficos utilizavam uma cunha atenuante com vários degraus sobre um filme radiográfico para determinação do kVp. As diferentes espessuras da cunha proporcionam uma sequência de tons de cinza a ser comparada com sequências de referência e assim determinar o potencial de tubo que produziu o feixe.

Apesar de ser um método relativamente simples de medir o kVp, apresenta como desvantagens a baixa exatidão ( $\pm 10\%$ ) e a necessidade de vários filmes radiográficos. Por este motivo, tornou-se obsoleto e foi substituído por medidores mais modernos (KÉPALKOTÁS, 2019).

### 2.2.3 Técnica de sensores duplos

Na primeira metade do século XX, Silberstein (1932) contribuiu de maneira significativa para os métodos modernos de detecção de kVp quando mostrou que numa fonte de raios X, os espectros e as curvas de atenuação estão matematicamente

relacionados entre si por uma transformação de Laplace, conforme mostrado na equação 8, que trata da atenuação de feixes polienergéticos.

$$I_x = I_0 \int_0^{E_{max}} f(E)e^{-\mu(E)x} dE \rightarrow f(E)dE = g(\mu)d\mu \rightarrow I_x = I_0 \int_{\mu_0}^{\infty} g(\mu)e^{-\mu x} d\mu \quad (8)$$

Onde  $I_x$  é a intensidade do feixe após passar por um absorvedor de espessura  $x$ ,  $I_0$  é a intensidade inicial do feixe de raios X,  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear do material filtrante,  $\mu_0$  é o coeficiente de atenuação do absorvedor para a energia máxima ( $E_{max}$ ) e  $f(E)$  é a função de distribuição correspondente à fração de fótons com energia entre  $E$  e  $E+dE$ .

De acordo com a propriedade de translação da transformada de Laplace ( $\mathcal{L}$ ), tem-se a equação 9.

$$\frac{I_x}{I_0} = e^{-\mu_0 x} \cdot \mathcal{L}[g(\mu - \mu_0)] = e^{-\mu_0 x} \cdot G(x) \quad (9)$$

A depender do material absorvedor e da tensão aplicada ao tubo, pode-se escolher uma função  $G(x)$  mais apropriada para reconstrução do espectro (GREENING, 1950).

Dessa forma, a atenuação do feixe pode ser medida com um sensor e um conjunto de materiais absorvedores, a partir dos quais é possível reconstruir o espectro e conseqüentemente, a tensão aplicada ao tubo de raios X, kVp, conforme a equação 7.

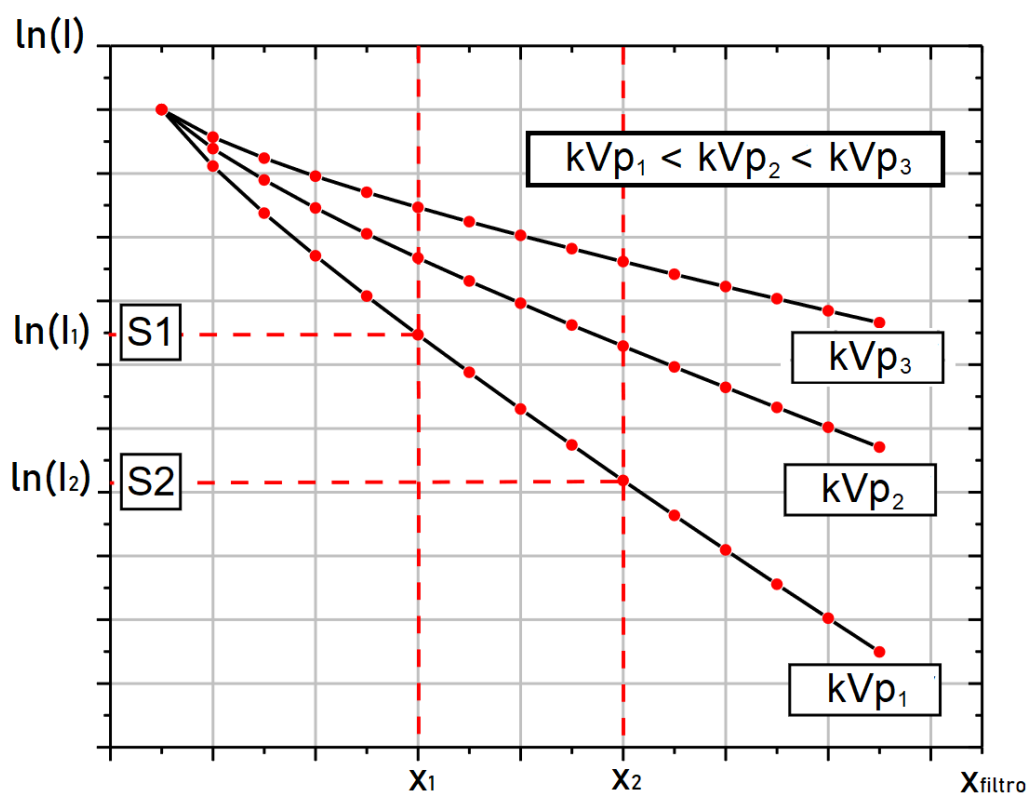
De acordo com Herrnsdorf (2020), é possível utilizar a técnica de atenuação do feixe para estimar o PPV de forma direta, sem a necessidade de reconstrução do espectro. Para isso, é utilizada a definição do coeficiente de atenuação linear efetivo,  $\mu_{eft}$ , que quando aplicada à equação 8, transforma-a na equação 10:

$$I_x = I_0 e^{-\mu_{eft} x} \quad (10)$$

Observando-se também a relação entre a intensidade do feixe e sua respectiva atenuação ao penetrar num material de espessura  $x$ , tem-se o gráfico mono-log com curvas aproximadamente lineares, apresentado na Figura 7. A partir das curvas expostas, é possível realizar a leitura das atenuações da intensidade do feixe ( $I_1$  e  $I_2$ ), que correspondem respectivamente aos sinais dos sensores  $S_1$  e  $S_2$ , para diferentes espessuras  $x_1$  e  $x_2$ . Com isso, pode-se estimar o valor de  $\mu_{eft}$  de acordo com a relação  $I_1/I_2$ , conforme exposto na equação 11.

$$\mu_{eft} = \frac{\ln(I_1) - \ln(I_2)}{(x_2 - x_1)} \quad (11)$$

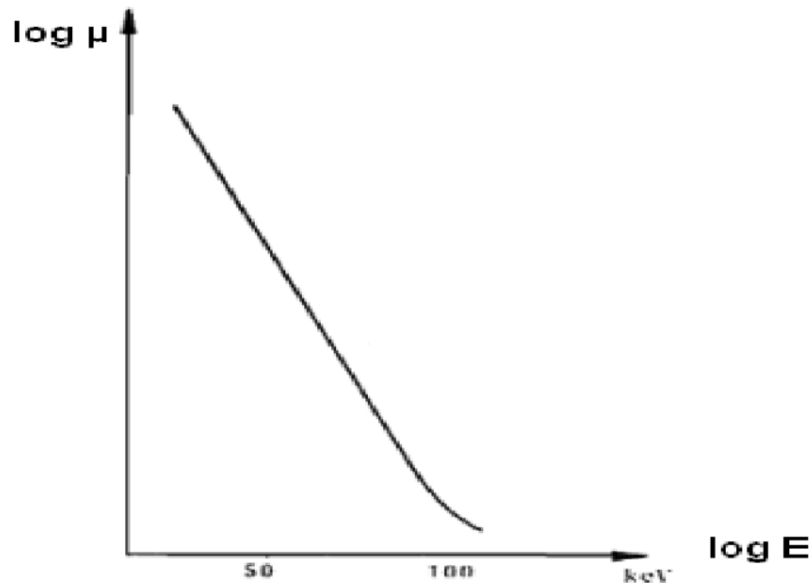
Figura 7 – Relação entre a espessura do absorvedor e os sinais dos sensores para diferentes espessuras de filtro e valores de PPV



Fonte: BÜERMANN (2019) adaptado.

O coeficiente de atenuação linear efetivo possui dependência exponencial tanto com a energia média como a energia efetiva do feixe, conforme pode-se observar no gráfico log-log ilustrado na Figura 8:

Figura 8 – Relação da Energia efetiva do feixe com o coeficiente de atenuação efetivo



Fonte: Lindström (2016)

Percebe-se uma região de linearidade para  $E_{eff} < 90 \text{ keV}$ . De acordo com Herrnsdorf (2020), isto se deve ao efeito Compton tornar-se cada vez mais provável no coeficiente de atenuação ( $\mu_{eff} = \mu_{fotoletrico} + \mu_{Compton}$ ) à medida que a energia do feixe aumenta. Para a região de linearidade da curva, pode-se correlacionar o  $\mu_{eff}$  com o PPV por meio de duas constantes  $C_1$  e  $C_2$ , conforme ilustrado na equação 12 (LINDSTRÖM, 2016).

$$\mu_{eff} = C_1(PPV)^{-C_2} \quad (12)$$

E, combinando as equações 12 e 11, obtém-se o PPV a partir da relação  $I_1/I_2$ :

$$PPV = \sqrt[c_2]{\frac{C_1(x_2 - x_1)}{\ln(I_1/I_2)}} \quad (13)$$

Assim, conforme ilustrado no gráfico da Figura 7, com apenas dois pontos da curva de atenuação, é possível obter-se o PPV a partir da equação 13. Para isto – sabendo da proporcionalidade entre a intensidade do feixe incidente ( $I_i$ ) e o sinal de

saída do sensor (S) – são necessários apenas dois sensores, cada um com seu respectivo absorvedor. Donde conclui-se que:

$$PPV = f(I_1/I_2) = f(S_1/S_2) \quad (14)$$

A equação 14 mostra que o PPV pode ser uma função da relação entre os sinais dos sensores  $S_1/S_2$ , irradiados simultaneamente. A simultaneidade na medição torna os valores estimados para a variável primária, neste caso o potencial de pico prático (PPV), menos sensível a outras variáveis como distância focal, carga de trabalho, temperatura, etc., tendo em vista que, durante uma irradiação, ambos sensores são expostos aos mesmos valores de tais variáveis.

Medições não simultâneas acarretam imprecisão significativa, uma vez que a tensão real aplicada ao tubo pode ser diferente em cada irradiação. Assim, os dispositivos de medição atuais utilizam pares de sensores cobertos por diferentes espessuras de filtro e dispostos de maneira que a irradiação em ambos seja simultânea (KÉPALKÓTAS, 2018).

Tendo em vista a atenuação do feixe no processo de filtração e a consequente redução do sinal na saída do sensor, buscou-se neste trabalho um método alternativo e inovador para detecção do feixe com o uso do fator de *buildup* na interação do feixe com a resina epóxi do próprio encapsulamento do sensor. Com isso, espera-se menor incerteza no resultado da medição, devido ao fenômeno de *buildup* ter contribuição positiva na magnitude do sinal de saída.

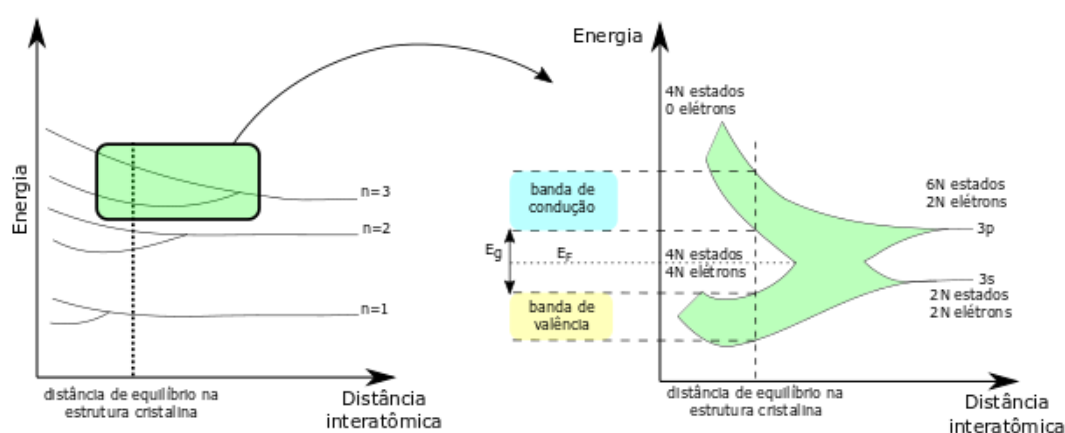
## 2.3 SEMICONDUTORES

### 2.3.1 Teoria quântica da condutividade elétrica em sólidos

A condução elétrica nos sólidos depende da maneira como seus átomos estão ligados e à forma como seus consequentes arranjos energéticos dos níveis eletrônicos são ocupados pelos elétrons.

A eletrosfera de um átomo isolado possui níveis energéticos e demais estados eletrônicos discretos. À medida que o átomo isolado se aproxima de outros, ocorre uma influência mútua entre os níveis energéticos, ocasionando o surgimento de uma série de estados eletrônicos proximamente espaçados. Devido à proximidade entre esses níveis discretos, tem-se a formação da chamada banda de energia eletrônica. A extensão dessa banda depende da separação interatômica e começa com as camadas eletrônicas mais externas (RETHWISCH; CALLISTER, 2016). A Figura 9 ilustra as bandas de energia para uma rede cristalina de silício.

Figura 9 – Formação das bandas de energia da estrutura cristalina do Si puro à medida que os átomos se aproximam entre si



Fonte: O Autor (2022)

A banda mais externa aloca os elétrons mais fracamente ligados ao átomo, com grande mobilidade interatômica e passíveis de movimentação ordenada na presença de um campo elétrico, por isso é chamada de banda de condução. A banda mais interna aloca elétrons mais ligados ao átomo e é chamada de banda de valência.

De acordo com a mecânica quântica, entre as bandas de valência e condução há o que se denomina de *gap* de energia  $E_G$ . Na visão da Química,  $E_G$  trata da energia necessária para romper a ligação covalente (NEAMEN,2010).

Para o caso dos semicondutores, o baixo *gap* energético entre as bandas permite que elétrons passem para a banda de condução ao absorverem a energia térmica, deixando uma lacuna na banda de valência com carga oposta e módulo igual à do elétron. As lacunas também contribuem para a corrente elétrica do material semiconductor, porém com uma mobilidade 2,5 vezes menor que os elétrons (SEDRA;

SMITH, 2020). O que determina a condutividade elétrica de um material é a quantidade de elétrons na banda de condução e lacunas na banda de valência.

O deslocamento de lacunas e elétrons entre as bandas de valência e condução gera – independentemente da existência de um campo elétrico – é uma pequena corrente elétrica, chamada de corrente de difusão. A probabilidade de passagem de elétrons para a banda de condução é inversamente proporcional à distância interbandas e matematicamente tratada pela distribuição de Fermi-Dirac  $f_e(E)$ , apresentada na equação 15 (RETHWISCH; CALLISTER, 2016):

$$f_e(E) = \frac{1}{(e^{(E-E_F)/kT} + 1)} \quad (15)$$

Onde:

$E \Rightarrow$  Energia do nível a ser ocupado pelo elétron

$E_F \Rightarrow$  Energia de Fermi – Energia abaixo da qual todos os estados energéticos do material estão ocupados à 0K (aproximadamente no meio do gap de energia para semicondutores puros)

$k \Rightarrow$  Constante de Boltzmann ( $k = 8,617 \cdot 10^{-5} eV/K$ )

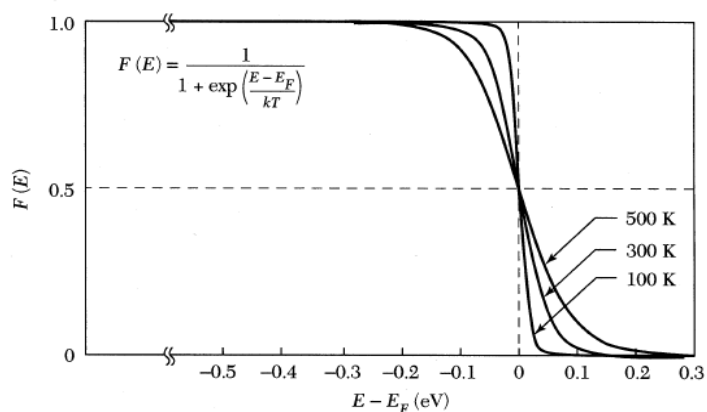
$T \Rightarrow$  Temperatura em Kelvin

Na equação 15, percebe-se uma simetria na distribuição de Fermi – ilustrada na Figura 10 – em torno do nível de Fermi. Para energias  $E$  abaixo ou acima de  $3kT$  ( $\sim 0,23$  eV) da energia de Fermi  $E_F$ , a exponencial torna-se maior que 20 ou menor que 0,05, respectivamente. Assim, pode-se fazer a aproximação da equação 15 para as equações 16 e 17:

$$f_E \cong e^{-(E-E_F)/kT} \text{ quando } (E - E_F) > 3kT \quad (16)$$

$$f_E \cong 1 - e^{-(E-E_F)/kT} \text{ quando } (E - E_F) < 3kT \quad (17)$$

Figura 10 – Distribuição de Fermi

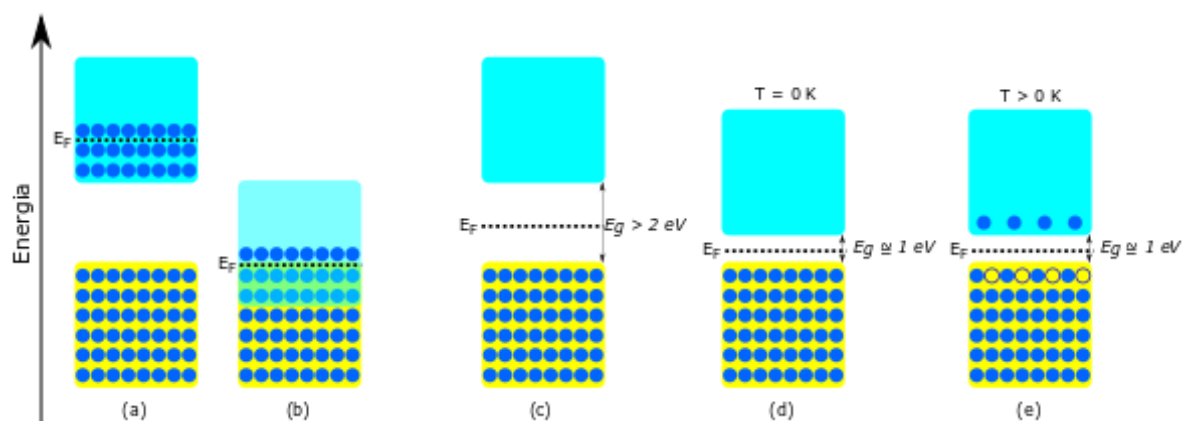


Fonte: Sze (2020)

É possível notar tanto na equação 15 quanto na Figura 11 (destacando em azul a banda de condução e em amarelo a banda de valência) que, para temperaturas iguais a 0K, os semicondutores puros se comportam como isolantes, pois não existem elétrons na banda de condução, nem há troca de portadores de carga entre as bandas de energia.

Segundo Sze (2020), é possível os condutores apresentarem sobreposição de bandas de valência e condução (Figura 11b) ou uma banda de condução parcialmente preenchida (Figura 11a). A diferença entre os materiais isolantes (Figura 11c) e semicondutores à temperatura 0K (Figura 11d) é apenas o menor valor para o *gap* de energia,  $E_G$ . Na Figura 11e é possível observar a presença de alguns poucos portadores de carga na banda de condução de materiais semicondutores para temperaturas superiores à 0K.

Figura 11 – Bandas de energia em diferentes materiais, ilustrando o nível de Fermi em cada caso.



Fonte: O autor, 2022



A posição do nível de Fermi associado ao conceito de diferença energética interbanda é capaz de evidenciar a natureza elétrica dos materiais. Nos condutores, o nível de Fermi está numa banda parcialmente preenchida (banda de condução), sendo possível mudar o estado dos elétrons, aplicando-se um campo elétrico qualquer. Nos isolantes e semicondutores, o nível de Fermi está no final de uma banda totalmente preenchida (banda de valência).

Segundo Sze (2020), enquanto que nos isolantes a energia de *gap* é grande o suficiente ( $E_G > 2 \text{ eV}$ ) para formar uma barreira de portadores, nos semicondutores a barreira é pequena ( $E_G \sim 1 \text{ eV}$ ) o bastante para que uma simples excitação térmica seja capaz de promover o fluxo interbanda.

### 2.3.2 Dispositivos eletrônicos semicondutores

#### 2.3.2.1 Diodo – Junção pn

O diodo, um dos componentes eletrônicos mais difundidos, funciona como uma de válvula de retenção de elétrons, permitindo a passagem de fluxo em apenas um sentido. Como o diodo é uma junção *pn* e é a base do funcionamento de todos os transistores, faz-se necessário o entendimento desse dispositivo eletrônico.

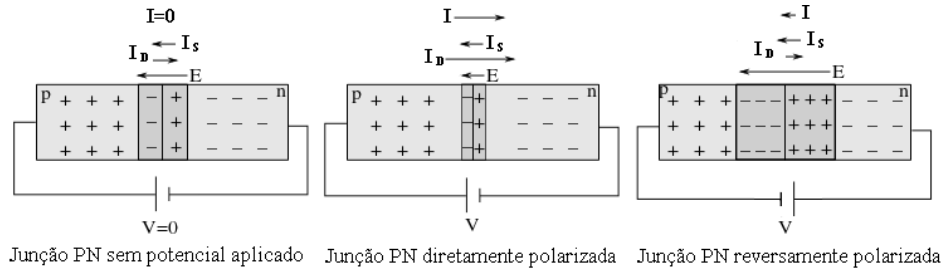
Dispondo-se uma interface de contato entre semicondutores extrínsecos, um tipo *p* e outro tipo *n*, tem-se a chamada junção *pn*. Nesta junção, inicialmente, observa-se um fenômeno de difusão de lacunas do lado *p* ao lado *n* e de elétrons do lado *n* ao lado *p* (SEDRA; SMITH, 2020). Após esse processo inicial, como as recombinações acontecem nas proximidades da junção, haverá uma zona próxima da junção depletada de elétrons livres na região *n* e de lacunas na região *p*, deixando cargas descobertas. Esta zona é chamada de região de depleção.

A passagem de portadores majoritários pela junção cria a chamada de corrente de difusão  $I_D$ , com sentido (convencional) do lado *p* para o lado *n* e inversamente proporcional à diferença de potencial resultante do descobrimento das cargas na região de depleção  $V_0$ , chamada de barreira de potencial.

É possível observar na Figura 12 que a espessura da região de depleção varia ao aplicar-se uma tensão elétrica entre os terminais PN da junção, devido a um desequilíbrio entre as correntes de deriva e difusão. Na polarização reversa, aplica-se

$V < 0$ , ocorrendo o aumento da região de depleção e, conseqüentemente,  $V_0$ . De maneira análoga, a polarização direta, ocorre ao se aplicar  $V > 0$  promovendo uma diminuição da região de depleção e  $V_0$ . Quanto menor a barreira de potencial, mais portadores de carga majoritários fluirão pela junção.

Figura 12 – Três possíveis estados da junção PN: Sem polarização, polarizada diretamente e polarizada reversamente.

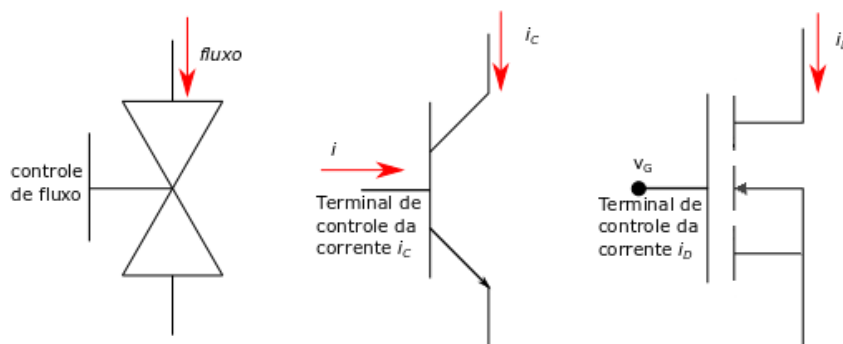


Fonte: O Autor (2022)

### 2.3.2.2 Transistores

Os transistores são dispositivos eletrônicos não lineares de três terminais, que, como pode-se observar na Figura 13, funcionam como uma “válvula de elétrons”, deixando passar a corrente elétrica entre dois terminais a depender da corrente/tensão aplicada no terceiro terminal.

Figura 13 – Analogia entre: a) uma válvula de aplicação em fluidos; b) transistor controlado por corrente (TBJ); c) transistor controlado por tensão (MOSFET).

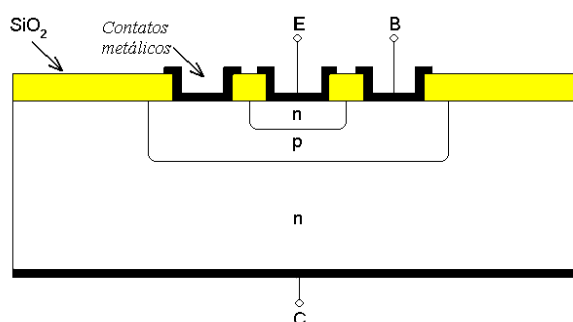


Fonte: O Autor (2022)

### 2.3.2.2.1 Transistor Bipolar de Junção – TBJ

Também chamado do acrônimo em inglês, BJT (*Bipolar Junction Transistor*), este dispositivo ilustrado na Figura 14 é composto por um cristal semiconductor (usualmente silício) com três camadas dopadas por impurezas doadoras (tipo *n*) e aceitadoras (tipo *p*), dispostas em uma das duas possíveis sequências: *pnp* ou *npn*. A camada do meio, mais fina, é chamada de base. A mais fortemente dopada de emissor; e a mais espessa de coletor.

Figura 14 – Aspectos construtivos de um transistor bipolar *npn*



Fonte: O Autor (2022)

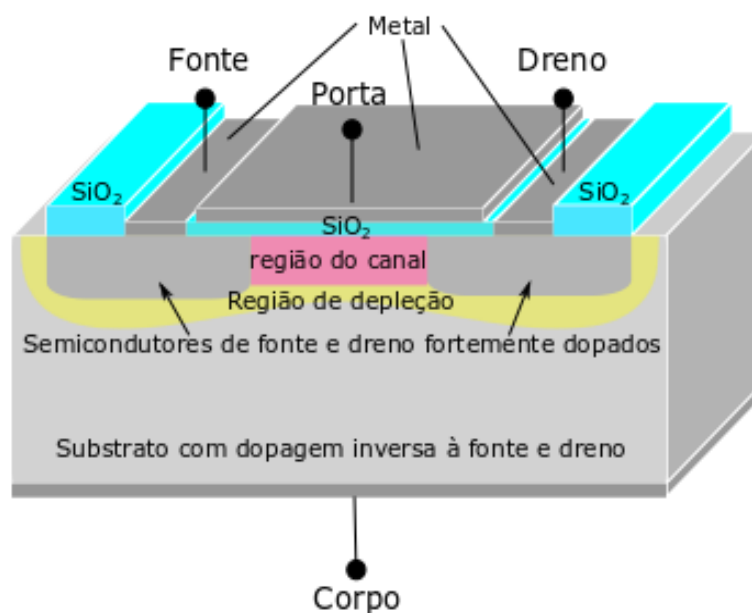
O TBJ é muito utilizado na eletrônica analógica, principalmente como dispositivo amplificador de sinais. Assim o parâmetro mais importante no TBJ é o fator de amplificação,  $\beta = I_C/I_B$ , também conhecido como ganho do transistor, onde  $I_C$  é a corrente de coletor e  $I_B$  a corrente de base.

### 2.3.2.2.2 MOSFET

O MOSFET, acrônimo para *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*, é um dispositivo semiconductor amplamente difundido na microeletrônica por possuir como características baixo consumo e tamanho reduzido em relação ao TBJ.

A Figura 15 ilustra a estrutura de um MOSFET típico com seus terminais: fonte (S), porta (G), dreno (D) e corpo (B). A porta é isolada do semiconductor por uma fina camada de  $\text{SiO}_2$  e tem a finalidade de induzir, por meio de uma tensão aplicada entre porta e fonte ( $V_{GS}$ ), a formação de um canal para condução de portadores de carga entre dreno e fonte. Este fenômeno é a base do chaveamento do MOSFET e da sua utilização na eletrônica digital.

Figura 15 – Estrutura simplificada de um MOSFET planar tipo enriquecimento



Fonte: O Autor (2022)

Existem dois tipos de MOSFETs: canal n (NMOS) – que têm o substrato tipo p – e canal p (PMOS), com substrato tipo n. Em ambos, dreno e fonte são fortemente dopados por impurezas opostas às do substrato.

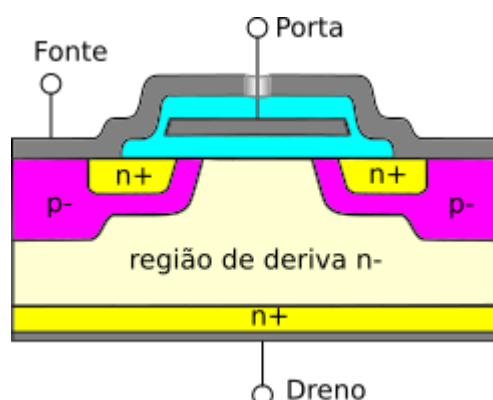
Basicamente, na região do canal é formado um capacitor de placas paralelas, com o SiO<sub>2</sub> atuando como dielétrico e as placas paralelas consistem no terminal metálico da porta e na interface Si-SiO<sub>2</sub>. A intensidade do campo elétrico criado na região Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) controla a quantidade de cargas no canal, determinando assim sua condutividade elétrica. Dessa forma, a corrente que circulará no canal dependerá da tensão entre dreno e fonte,  $V_{DS}$  (SEDRA; SMITH, 2020).

Para que se estabeleça o canal de condução, existe uma tensão mínima  $V_{GS}$ , chamada de tensão de limiar ( $V_t$ ) que varia de acordo com as características de fabricação do MOSFET. Portanto, pode-se afirmar que a condutividade do canal é proporcional à diferença de tensão ( $V_{GS} - V_t$ ). Partindo deste valor de tensão, tem-se que a corrente de dreno,  $I_D$ , será função da tensão entre dreno e fonte,  $V_{DS}$  (NEAMEN, 2010).

### 2.3.2.2.2.1 VDMOSFET

A procura por MOSFETs que suportassem aplicações de potência cada vez maiores, apresentando também baixos valores de capacitância de entrada, conduziu o design planar (exposto na Figura 15) para o ilustrado na Figura 16, com canal de maior volume e campo elétrico transversal, chamado de *vertical-diffused* MOSFET ou VDMOSFET.

Figura 16 – Corte transversal de um VDMOSFET de canal p simplificado



Fonte: O Autor (2022)

Os VDMOSFETs apresentam uma região de comportamento semelhante a um TBJ com base flutuante, localizado entre a porta e o dreno, no qual a região do corpo atua como base, a região da fonte como emissor e a região do dreno como coletor. Sob certas condições – como valores de  $I_D$  na mesma magnitude de  $V_{DS}$  – o TBJ parasítico pode ser ativado, tornando o VDMOSFET incontrolável. Para evitar este fenômeno, o terminal metálico da fonte é ligado tanto à região n+ quanto à região p-, transformando o TBJ parasítico num diodo parasítico, comumente chamado de *body diode*, evitando que o VDMOSFET seja danificado por aplicação de uma tensão reversa.

Comparando o VDMOSFET ao MOSFET convencional, tem-se que o maior volume apresentado pela região do canal do VDMOSFET permite a passagem de uma intensidade maior de corrente de dreno e por isso ele tem uma tensão de limiar maior. Embora o desenvolvimento tecnológico do VDMOSFET objetivou aumentar a densidade de corrente, e conseqüentemente a corrente de dreno (LI; JENNINGS, 2018), esta tecnologia também permite aumentar o volume sensível para interações da radiação incidente.

### 2.3.3 Danos da radiação no MOSFET

O entendimento dos efeitos da radiação nos dispositivos semicondutores permite prever o comportamento de um dispositivo específico quando exposto a um campo de radiação de interesse.

Partículas incidentes num sólido perdem energia para os átomos deste em processos de interação ionizantes – formando pares elétron-lacuna – e não ionizantes – causando o deslocamento de átomos (LEROY; RANCOITA, 2007).

#### 2.3.3.1 Danos por deslocamento

São resultado da perda de energia da radiação num processo não ionizante de interação com o átomo. O resultado é o surgimento de uma vacância em decorrência do deslocamento atômico de sua posição inicial na estrutura cristalina para uma região não ocupada na estrutura do sólido, formando-se um interstício. Dá-se o nome de par Frenkel às vacâncias e interstícios adjacentes. Danos adicionais podem surgir quando vacâncias e interstícios estão adjacentes a átomos de impurezas, formando os chamados complexos de dano-impureza (SROUR, 2003). Tais danos geram níveis intermediários entre as bandas de valência e condução dos semicondutores. Com isso, as propriedades elétricas são alteradas e à medida que a concentração de danos na estrutura aumenta devido à radiação, observa-se a degradação do dispositivo.

#### 2.3.3.2 Danos por ionização

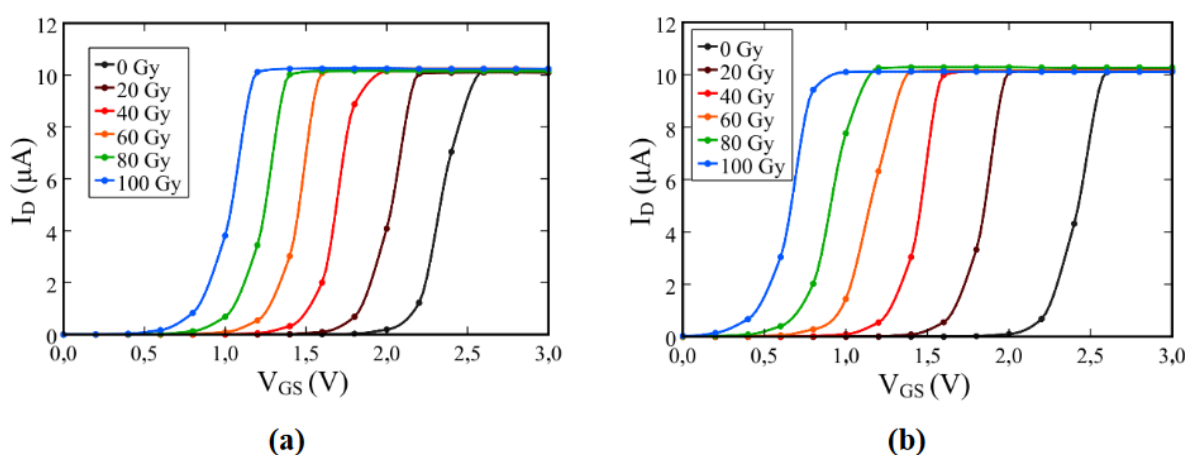
São os danos em decorrência da interação da radiação com a eletrosfera do sólido, gerando pares elétron-lacuna. Caso o sólido tenha propriedades condutivas, ocorrerá a rápida recombinação dos pares. Caso seja um isolante, a radiação promoverá o descobrimento de cargas positivas. Para a energia de feixe utilizada nos raios X diagnósticos incidindo sobre o silício, este é o dano mais observado.

Ocorrendo no óxido de silício de um MOSFET, acima da região do canal, o descobrimento de cargas gera um campo elétrico parasítico transversal que induz o alargamento do canal, alterando a corrente de dreno do transistor. Na realidade, este

efeito diminui a tensão de limiar,  $V_t$ , já que o campo elétrico parasítico se superpõe ao outro que surge na polarização do MOSFET.

Resultados experimentais (MONTE; SANTOS, 2020) e em simulações (KRISHNAMURTHY et al, 2019) evidenciam a redução de  $V_t$  à medida que a dose depositada no dispositivo aumenta, que é observada no deslocamento da curva de chaveamento  $I_D \times V_{GS}$  do dispositivo para a esquerda, conforme visto na Figura 17. Inclusive isso evidencia uma alteração maior no valor de  $V_t$  quando o MOSFET é polarizado.

Figura 17 – Deslocamento das curvas de chaveamento de um MOSFET em função da dose acumulada: a) MOSFET polarizado; b) MOSFET sem polarização.



Fonte: MONTE e SANTOS (2020)

Os danos na região semicondutora em decorrência da radiação incidente podem ser instáveis e possuir a mobilidade necessária para que, em função do tempo, possam se reordenar a partir da interação com outros pontos de defeito ou com impurezas da estrutura, reduzindo o dano geral observado. Este reordenamento recebe o nome de *annealing* (LEROY; RANCOITA, 2007). Tal processo pode ser catalisado por fatores como altas temperaturas ou altos valores de  $I_D$  aplicados ao dispositivo (PEJOVIC; PEJOVIC, 2018). O dano na região do óxido de silício é estático e também pode ser em parte anulado por tratamento térmico, por exemplo.

### 2.3.4 Funcionamento do MOSFET como detector de radiação

Por muitos anos, MOSFETs foram utilizados como detectores de radiação em feixes de fótons de alta energia. Mais recentemente, seu uso se estendeu para medição da dose em feixes de raios-X diagnóstico (GONÇALVES FILHO et al, 2018), cuja técnica é baseada na medição da corrente de dreno  $I_D$ , ao invés da variação da tensão de limiar, esta última é a técnica majoritariamente adotada.

A inovadora técnica proposta neste trabalho consiste em mensurar, em tempo real, a corrente de dreno produzida pelos efeitos da interação da radiação com o dispositivo como um todo, aqui denominada de  $I_{DX}$ , a qual se soma à corrente de dreno observada sem a incidência da radiação, chamada neste trabalho simplesmente de corrente de dreno,  $I_D$ . De fato, ao incidir um feixe de radiação ionizante sobre o MOSFET é gerada uma chuva de elétrons proveniente da interação do feixe de raios X com o encapsulamento e a pastilha semicondutora. Assim, mesmo com uma polarização  $V_{GS}$  constante, é possível observar alterações da corrente  $I_D$  quando o MOSFET é exposto a um feixe de radiação ionizante.

Pretende-se então elaborar um modelo matemático que possibilite correlacionar variações na saída do MOSFET com a tensão aplicada ao tubo de raios X de forma não invasiva.

Um MOSFET típico apresenta um volume de canal de condução cerca de pelo menos  $10^2 - 10^3$  vezes menor que um VDMOSFET, o qual permite uma intensidade de corrente elétrica muito alta quando comparado ao MOSFET convencional. Assim, o VDMOSFET é geralmente usado como transistor de potência em eletrônica analógica ou digital, podendo conduzir correntes da ordem de dezenas ou centenas de ampere.






### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 VDMOSFETs

O dispositivo VDMOSFET utilizado neste trabalho é fabricado pela STMicroelectronics® em três tipos de encapsulamentos diferentes, relacionados na Tabela 1, na qual se apresenta a espessura da camada de epóxi que deverá ser penetrada pela radiação antes de chegar à pastilha semicondutora (*chip*). A Tabela 2 apresenta as características elétricas do dispositivo, que são exatamente as mesmas para todos os tipos de encapsulamentos. O dispositivo com encapsulamento TO-92 (STQ2Hnk60ZR-AP) não foi utilizado neste trabalho pelo fato de o lado sensível aos raios X ter uma superfície curva, ou seja, a sua geometria é completamente diferente dos demais encapsulamentos.

Tabela 1 – Transistores utilizados como sensores nas irradiações

Código do transistor	Imagem (STMicroelectronics, 2018)	Encapsulamento	Espessura epóxi (STMicroelectronics, 2018)
STQ2Hnk60ZR-AP		TO-92	2,30 mm
STF2Hnk60Z		TO-220FP	1,90 mm
STD2Hnk60Z-1		IPAK (TO-251)	1,74 mm

Fonte: STMicroelectronics (2018)

Tabela 2 – Dados elétricos dos MOSFETs de acordo com o fabricante

Grandeza	Descrição	Condição do teste	Valor médio
$V_{DS}$	$V_{DS(max)}$	$I_D = 1\text{ mA}, V_{GS} = 0\text{ V}$	600 V
$I_{DSS}$	Corrente de dreno em $V_{GS} = 0$	$V_{GS} = 0, V_{DS} = 600\text{ V}$	1 $\mu\text{A}$
$I_{GSS}$	$I_{GS}$ de fuga	$V_{DS} = 0, V_{GS} = \pm 20$	$\pm 10\ \mu\text{A}$
$V_{th}$	Tensão de limiar na porta	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 50\ \mu\text{A}$	$3,75 \pm 0,75\text{ V}$
$R_{DS}$	Resistência dreno-fonte	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 1\ \mu\text{A}$	3,5 $\Omega$

Fonte: STMicroelectronics (2018)

### 3.1.2 Instrumentos de sinais elétricos: fonte e medidor

A polarização do VDMOSFET e medição da corrente de dreno foram feitas com um sistema eletrônico capaz de plotar as curvas do dispositivo, em tempo real, durante a sua irradiação. Trata-se do sistema EFF1705, Sciencs®. Este instrumento de fonte/medição é capaz de se comunicar via rádio enlace com o computador executando o software do próprio do equipamento, garantindo a segurança das pessoas envolvidas na medição.

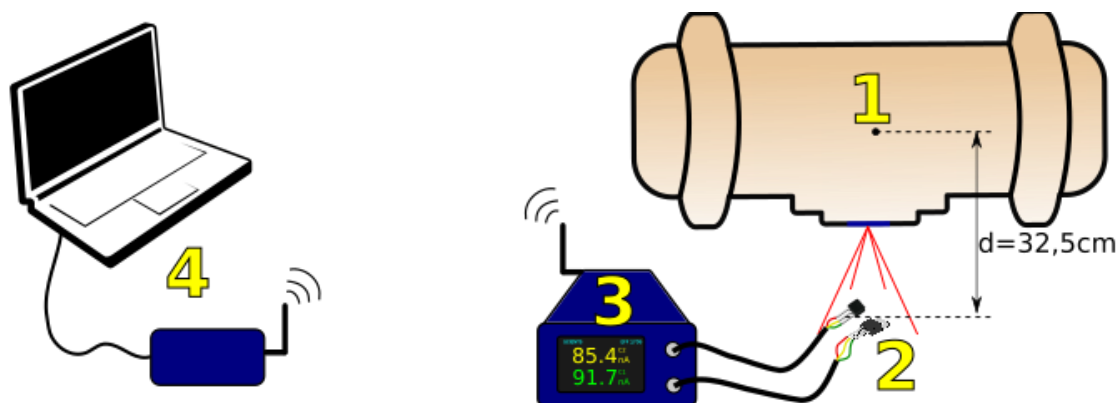
### 3.1.3 Gerador de feixes de raios X

Em todas as etapas dos experimentos utilizou-se o equipamento *Polymat 30/50 Plus*, instalado CRCN-NE/CNEN. Este equipamento fabricado pela Siemens®, consiste de uma unidade de raios X diagnósticos de uso clínico.

### 3.1.4 Arranjo experimental

A Figura 18 ilustra o arranjo experimental necessário para a proposta de medição do kVp utilizando VDMOSFETS em encapsulamentos diferentes. Cada componente do arranjo é identificado por um índice numérico como segue: 1- Equipamento de raios X; 2- VDMOSFET; 3- Sistema eletrônico de aquisição e controle e 4- Computador com receptor de rádio-enlace.

Figura 18 – Esboço do arranjo experimental



Fonte: O Autor (2022)

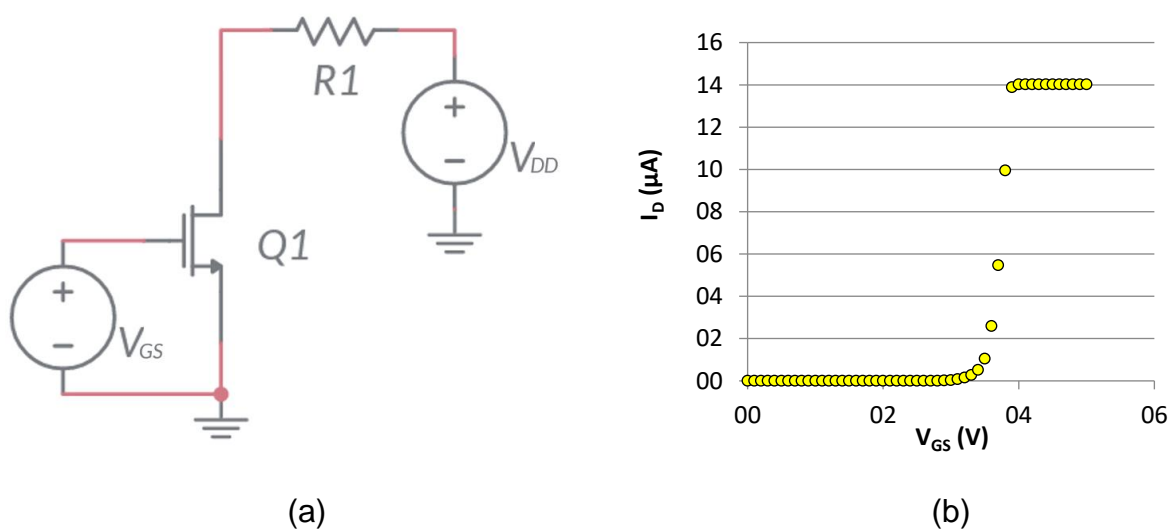
## 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Em todos os experimentos de irradiação citados a seguir, foi respeitado o tempo de 3 minutos entre as exposições, de modo a evitar sobreaquecimento no ânodo do tubo e diminuir os efeitos do *annealing* nos transistores.

### 3.2.1 Circuito de polarização do VDMOSFET

O circuito eletrônico ilustrado na Figura 19a consiste em um VDMOSFET polarizado com  $V_{DD} = 5\text{ V}$  (valor padronizado na eletrônica), e assim  $V_{GS}$  pode atingir até  $5\text{ V}$ , mais um resistor de dreno  $350\text{ k}\Omega$  para limitar a corrente de dreno em  $14\text{ }\mu\text{A}$ . Na Figura 19b tem-se a curva de chaveamento para o VDMOSFET escolhido. A partir do joelho superior da curva o dispositivo se encontra no estado elétrico de saturação (estado elétrico ligado) e por isso descarta-se os valores de  $V_{GS}$  acima de  $3,75\text{ V}$ . Na região de alta sensibilidade ( $3 < V_{GS} < 3,7$ ) o sinal  $I_{DX}$  pode apresentar instabilidade, ou seja, variar muito e também estes valores são descartados. Assim, neste trabalho, polarizou-se a porta do dispositivo com  $V_{GS} < 3\text{ V}$ , mais especificamente  $V_{GS} = 2,75\text{ V}$ .

Figura 19 – Polarização do VDMOSFET para operar como sensor de raios X. a) Diagrama esquemático; b) Curva de chaveamento do VDMOSFET.



Fonte: O Autor (2022)

### 3.2.2 Seleção dos dispositivos VDMOSFETs

Antes de iniciar as irradiações foi necessário selecionar os dispositivos com curvas de chaveamento semelhantes de forma a garantir repetitividade nas medições. Para isto foi feita uma amostragem a partir de um lote de 30 dispositivos. O processo de seleção de dispositivos semelhantes baseou-se na curva  $I_D \times V_{GS}$  gerada pelos VDMOSFETs, polarizados com  $V_{DS}=5\text{ V}$  e  $V_{GS}$  variando de 0 a 5 V em passos de 100 mV. É mais provável que dispositivos com curvas similares possuam semelhantes aspectos construtivos (espessura de porta, dopagem, áreas das junções, espessura do óxido etc.) e conseqüentemente, comportamento elétrico equivalente quando expostos à radiação.

### 3.2.3 Dosimetria do feixe de raios X

Com a finalidade de comparar os resultados do VDMOSFET com o medidor de referência, foi utilizada uma câmara de ionização 10X5-6, Radcal<sup>®</sup> para verificação da taxa de dose aplicada aos dispositivos. A dose foi obtida pelo cálculo integral da taxa de dose no tempo. Para tal procedimento, a distância foco-detector foi fixada em 32,5 cm, com a carga de trabalho variando entre os valores 50mAs, 100mAs e 200mAs e em cada qual, a tensão de tubo foi ajustada em 52kV, 63kV, 77kV, 90kV, 102kV, 117kV e 125kV.

### 3.2.4 Repetitividade do sinal de saída $I_{DX}$

Para esta etapa, foi ajustado o valor  $V_{GS} = 2,2\text{ V}$  de modo a evitar que o ponto de polarização se aproxime do joelho inferior da curva de chaveamento, sabendo que ela se desloca para a esquerda durante a irradiação, devido ao dano de ionização produzido no dispositivo (ver Figura 17). De fato, o dano de ionização está associado à medição de  $I_D$ , entretanto o foco deste trabalho baseia-se na medição da corrente de dreno em tempo real,  $I_{DX}$ , para se referir que é a corrente de dreno durante o pulso de raios X. Por isso é importante avaliar  $I_{DX}$  e sua repetitividade – concordância entre

os resultados das medições (INMETRO, 2012). Para tanto, o VDMOSFET foi submetido a uma sequência de trinta exposições de feixe não colimado (pulsos de fótons) com os seguintes parâmetros de tubo de raios X: 1) 102kVp; 2) 100mAs; 3) 1600ms.

### **3.2.5 Verificação do dano de irradiação causado ao VDMOSFET**

Para avaliar o dano de ionização causado pela irradiação nos VDMOSFETs é necessário apenas medir o valor de  $I_D$  a cada vez que o dispositivo é exposto. Assim, utilizou-se a mesma sequência de trinta exposições do item 3.2.4 para verificar o dano no dispositivo a partir da variação na corrente  $I_D$ .

### **3.2.6 Dependência angular do VDMOSFET**

Para a avaliação da sensibilidade do sinal do VDMOSFET em função do ângulo de incidência do feixe (não colimado) em relação à face do dispositivo, variou-se o ângulo de  $0^\circ$  a  $60^\circ$  em passos de  $30^\circ$ , nos sentidos horário (-) e anti-horário (+), com a distância fonte-detector  $d=32,5\text{cm}$ . Os parâmetros do equipamento de raios X foram: 1) 102kV; 2) 100mAs; 3) 1600ms.

### **3.2.7 Influência da radiação espalhada na medição de $I_{DX}$ .**

O tubo de raios X normalmente tem um filtro de radiação inerente no qual os fótons primários são espalhados com energia inferior podendo atingir o detector. Em processos de medição do kVp tais fótons espalhados produzem um sinal adicional no detector acarretando um erro sistemático. Portanto, este estudo consiste em efetuar medições de  $I_{DX}$  em função da colimação do feixe de raios X. Isto pode ser feito variando a área do campo de radiação ajustando manualmente no próprio tubo de raios X para os valores:  $196\text{cm}^2$ ,  $100\text{cm}^2$ ,  $64\text{cm}^2$ ,  $36\text{cm}^2$ ,  $16\text{cm}^2$ ,  $4\text{cm}^2$ ,  $1\text{cm}^2$ , e  $0,4\text{cm}^2$ . A distância fonte-detector foi mantida em  $32,5\text{cm}$ .

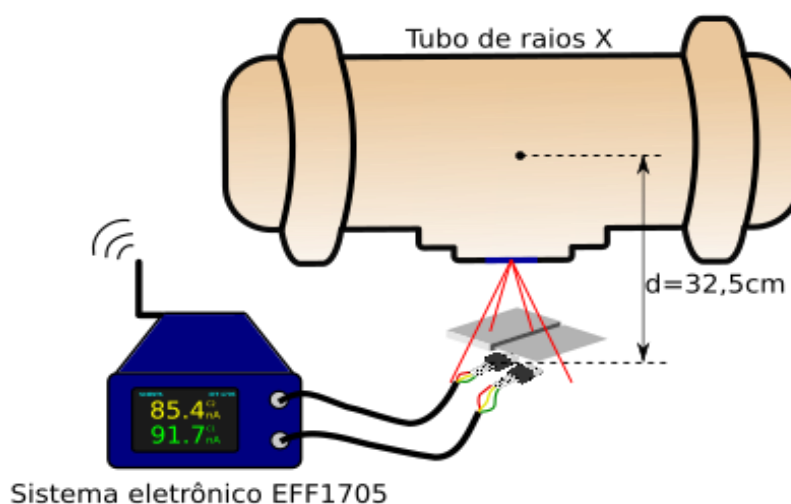
### 3.2.8 Resposta do VDMOSFET às variações no kVp

Como o propósito deste trabalho consiste em avaliar o sinal do VDMOSFET em função da tensão aplicada ao tubo de raios X, realizou-se um experimento para correlacionar  $I_{DX}$  em função dos seguintes ajustes no kVp: 52, 63, 77, 90, 102, 117 e 125. Este experimento foi realizado com distância fonte-detector constante (32,5cm) na carga de trabalho de 100mAs, sem colimação do feixe.

### 3.2.9 Determinação do kVp – Irradiação de transistores em paralelo com filtrações diferentes

Baseando-se na técnica de medição de sensores duplos exposta no item 2.2.3, buscou-se encontrar um modelo para determinação do kVp. Foram escolhidos dois VDMOSFETs sob o mesmo encapsulamento e com curvas de chaveamento praticamente idênticas. A relação do sinal de saída dos VDMOSFETs ( $S_1/S_2$ ) pôde ser correlacionada às correspondentes variações na tensão do tubo após dispositivos serem polarizados com o mesmo valor de  $V_{GS}$  e irradiados simultaneamente, conforme ilustrado na Figura 20, sem colimação, sob diferentes espessuras de filtros adicionais de mesmo material ( $x_1=1mm$  (Al) e  $x_2=2mm$  (Al)) com distância fonte-detector  $d=32,5cm$  e parâmetros de raios X: 1) 52, 63, 77, 90, 102, 117 e 125kVp; 2) 100mAs; 3) 1600ms.

Figura 20 – Arranjo experimental para medição de kVp no método convencional

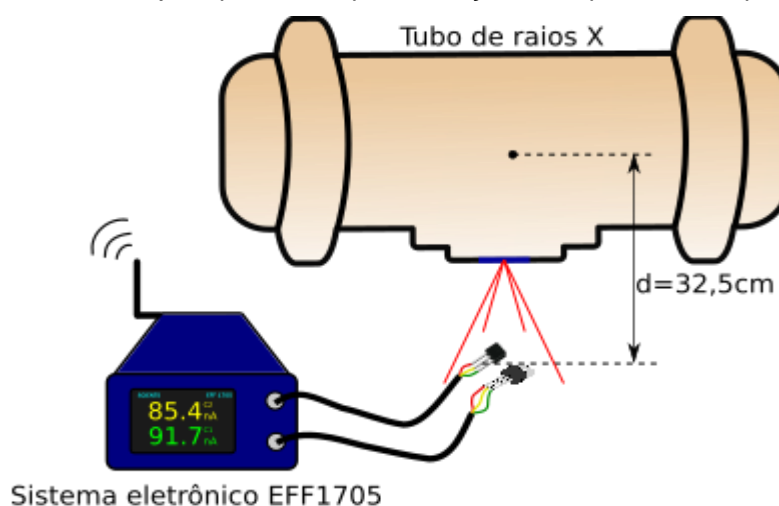


Fonte: O Autor (2022)

### 3.2.10 Determinação do kVp – Irradiação de transistores em paralelo com encapsulamentos diferentes

Sabe-se que o encapsulamento de um dispositivo eletrônico pode atuar como uma capa de *buildup*. De fato, em função de sua espessura, o encapsulamento pode contribuir para o aumento da chuva de elétrons, cuja intensidade é percebida pelo sinal de saída do VDMOSFET. Desta forma, a relação dos sinais de saída dos dispositivos igualmente polarizados e irradiados simultaneamente: STF2HMK60Z e STD2HMK60Z-1, respectivamente nos encapsulamentos TO220 e IPAK, foi correlacionada com os respectivos valores de tensão de tubo. A irradiação ocorreu, conforme ilustrado na Figura 21, sem colimação, com distância fonte-detector  $d=32,5\text{cm}$ , sob os parâmetros de raios X: 1) 52, 63, 77, 90, 102, 117 e 125 kVp; 2) 100mAs e 200mAs; 3) 1600ms.

Figura 21 – Arranjo Experimental para medição de kVp no método proposto



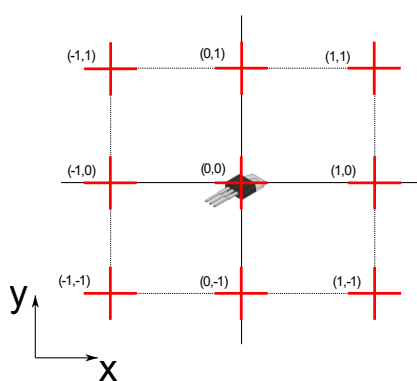
Fonte: O Autor (2022)

### 3.2.11 Verificação do efeito anódico

Devido à diferente angulação dos fótons que partem do ânodo, a intensidade do feixe de raios X que deixa o tubo de raios X não tem um perfil uniforme. Desta

forma, a fim de verificar em qual eixo do plano do campo de irradiação é produzida a variação mais significativa, realizou-se um estudo do efeito anódico. Para estudo desse fenômeno, variou-se a posição do cabeçote em  $1\text{cm}$  tanto na posição transversal ( $y$ ), quanto na longitudinal ( $x$ ) ao tubo de raios X – totalizando nove irradiações de  $102\text{kVp}$  a uma carga de trabalho de  $100\text{mAs}$ , durante  $1600\text{ms}$  – de maneira que o centro do feixe seguisse a Figura 22.

Figura 22 – Experimento de verificação do efeito anódico: Nove irradiações realizadas com centro do feixe em diferentes posições



Fonte: O autor (2022)



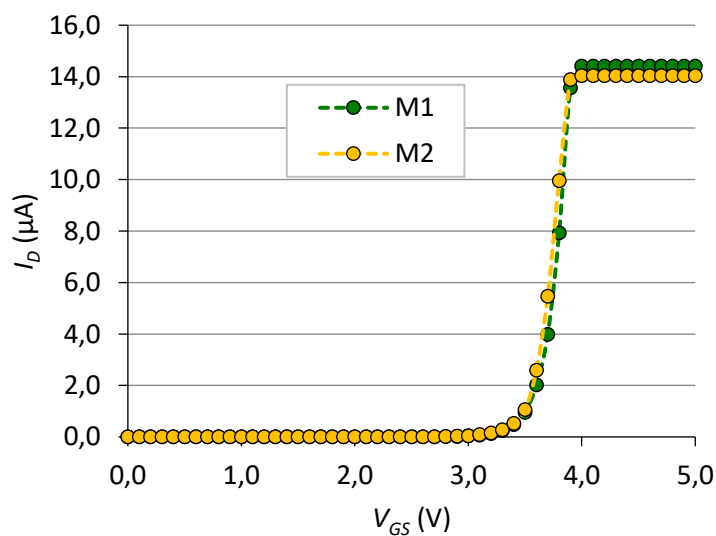
## 4 RESULTADOS

Tendo em vista que os equipamentos utilizados neste trabalho apresentam incertezas do tipo B, as quais são menores do que 0,5% de acordo com os fabricantes, e que a combinação das incertezas não é igual ao somatório de cada uma, foi utilizado a incerteza do tipo A em todos os experimentos, cujo o valor relativo foi menor que 1,5%, conforme apresentado a seguir.

### 4.1 SELEÇÃO DOS VDMOSFETS

Na escolha dos transistores, foram identificados os que apresentavam curvas de chaveamento ( $I_D \times V_{GS}$ ) semelhantes. A Figura 23 exemplifica a curva de chaveamento de dois VDMOSFETs em que se pode observar a forte semelhança entre as duas curvas, elas ficaram praticamente superpostas.

Figura 23 – Curva  $I_D \times V_{GS}$  de dois VDMOSFETs (M1 e M2) eletricamente semelhantes.



Fonte: O autor (2022)

## 4.2 DOSIMETRIA DO FEIXE DE RAIOS X

Os resultados da dosimetria do feixe de raios X gerado pelo equipamento clínico se encontra na Tabela 3. Os dados foram fornecidos pelo pessoal técnico dos Laboratórios de Instrumentação Nuclear e Física Médica do CRCN-NE, e servem para comparar a resposta do VDMOSFET com o detector padrão.

Tabela 3 – Dosimetria (Gy/h) do feixe de raios X do equipamento *Polymat 30/50 Plus*

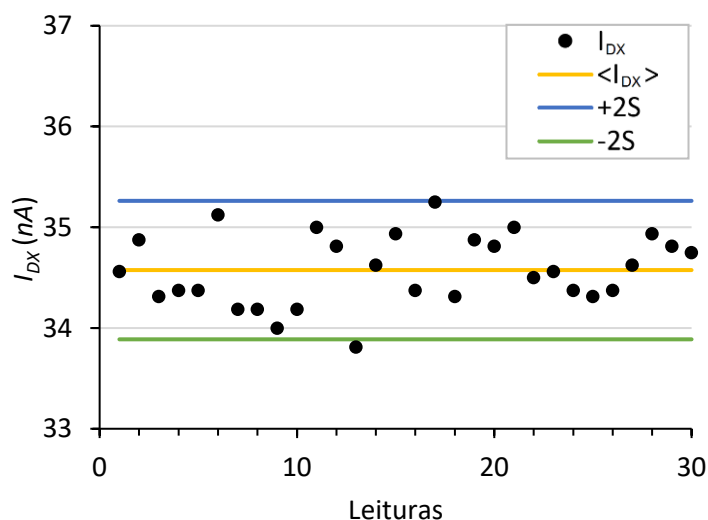
kVp	52	63	77	90	102	117	125
<b>50 mAs</b>	19,09	30,07	44,87	60,67	77,84	99,68	112,05
<b>100 mAs</b>	37,69	59,33	88,74	120,10	153,50	196,65	220,50
<b>200 mAs</b>	72,10	113,90	169,85	230,10	295,75	379,95	427,10

Fonte : O autor (2022)

## 4.3 REPETITIVIDADE DO SINAL DE SAÍDA $I_{DX}$

A Figura 24 mostra como é o comportamento do sinal do VDMOSFET ( $I_{DX}$ ) para uma sequência de 30 exposições. Observa-se que na sequência de 30 medidas, 29 valores estão dentro da faixa de incerteza da medição de duas vezes o desvio padrão ( $\pm 2S$ ) e não há qualquer tendência de comportamento crescente ou decrescente. Assim, pode-se concluir que o processo de medição de  $I_{DX}$  é repetitivo, pois a incerteza relativa é menor que 1,5%.

Figura 24 – Repetitividade na medição de  $I_{DX}$ .

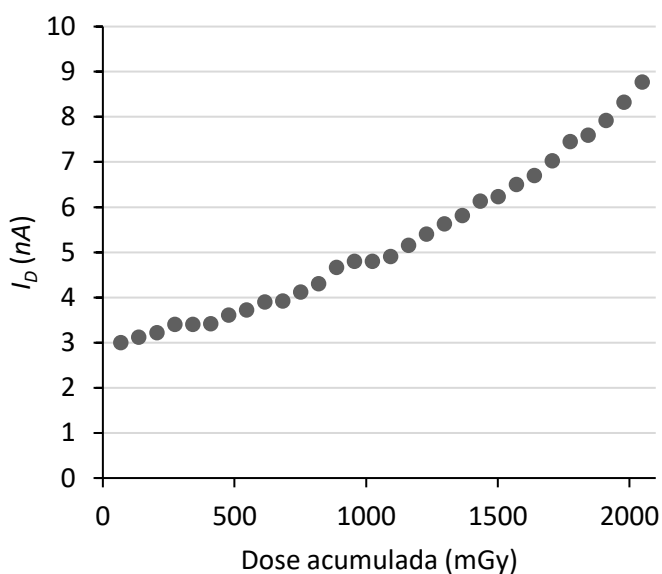


Fonte: O autor (2022)

#### 4.4 VERIFICAÇÃO DO DANO CAUSADO AO VDMOSFET

O gráfico da Figura 25 ilustra a variação da corrente de dreno  $I_D$  à medida que a dose acumulada no dispositivo aumenta a cada irradiação, que corresponde ao dano de ionização no VDMOSFET. De fato, como observado na Figura 17, o aumento de  $I_D$  provoca o deslocamento da curva  $I_D \times V_{GS}$  para a esquerda. É importante observar que apesar do dano ter contribuído para o aumento de  $I_D$ , a sensibilidade do dispositivo foi mantida constante, conforme Figura 24, mesmo após a dose acumulada de 2,1 Gy, evidenciando a possibilidade de utilização do VDMOSFET repetidas vezes para medição da tensão aplicada ao tubo de raios X. Nota-se que o dano de ionização produziu em  $I_D$  uma variação de ~200%.

Figura 25 – Variação em  $I_D$  para o VDMOSFET STF2HNK60Z em função da dose acumulada.



Fonte: O autor (2022)

#### 4.5 DEPENDÊNCIA ANGULAR DO VDMOSFET

A Tabela 4 apresenta o resultado da dependência angular do VDMOSFET utilizado neste estudo. Observa-se que para ângulos de até 30° tem-se uma variação

relativa abaixo de 1,5% nos valores de  $I_{DX}$ . Isto se deve ao fato de que há uma simetria na estrutura semicondutora do VDMOSFET. Entretanto, com relação aos  $60^\circ$ , a variação chegou a aproximadamente 5%. Isto se deve a uma pequena atenuação produzida pelo fio metálico que conecta as duas fontes no chip e o terminal externo de fonte (SANTOS, 2022).

Tabela 4 – Efeito angular no VDMOSFET STD2HNK60Z-1

<b>Inclinação do VDMOSFET</b>	<b>-60°</b>	<b>-30°</b>	<b>0°</b>	<b>+30°</b>	<b>+60°</b>
<b><math>I_{DX}</math> (nA)</b>	42,41	43,78	44,35	43,80	41,83
<b>Varição <math>I_{DX}</math> (%)</b>	-4,4	-1,3	0	-1,2	-5,7

Fonte: O autor (2022)

#### 4.6 INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO ESPALHADA NA MEDIÇÃO DE $I_{DX}$

A redução observada na magnitude do sinal de saída,  $I_{DX}$ , foi significativa para tamanhos de campo de irradiação menores que  $4\text{cm}^2$ , quando foi observado reduções maiores que 5%, conforme a Tabela 5. Pôde-se verificar o efeito do espalhamento na medição, que chegou a 27% quando o feixe foi colimado a ponto de atingir somente o encapsulamento do dispositivo (campo com área de  $0,4\text{cm}^2$ ). De fato, ao diminuir o tamanho de campo, o quantitativo dos fótons espalhados é reduzido e o resultado na detecção é percebido pela redução do sinal de saída. Dessa forma, espera-se que para se ter maior precisão na técnica proposta deve-se efetuar as medições com colimação.

Tabela 5 – Resultados da resposta do VDMOSFET em função do tamanho de campo

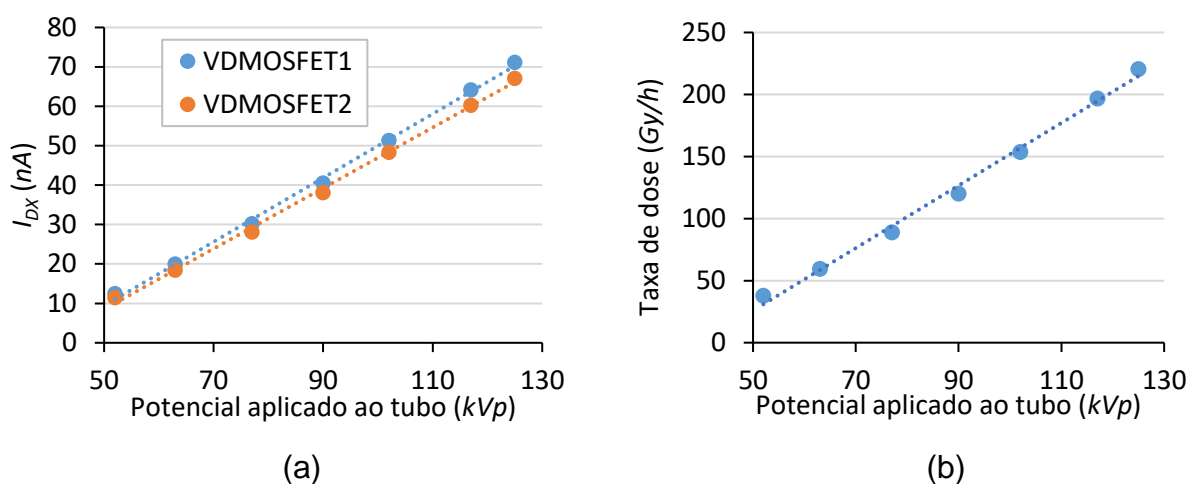
<b>Campo (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>≈200</b>	<b>100</b>	<b>64</b>	<b>36</b>	<b>16</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0,4</b>
<b><math>I_{DX}</math> (nA)</b>	44,3	43,8	43,3	42,9	42,9	41,2	40,2	32,3
<b><math>I_{DX}</math> relativo (%)</b>	-	99,0	97,9	97,0	96,9	93,1	90,8	73,0
<b>Espalhamento</b>	-	1	2,1	3,0	3,1	6,9	9,2	27,0

Fonte: O autor (2022)

#### 4.7 RESPOSTA DO VDMOSFET ÀS VARIAÇÕES NO KVP

O gráfico da Figura 26a mostra a resposta de dois VDMOSFETs idênticos e irradiados simultaneamente. Nota-se que, apesar de serem praticamente idênticos com relação às características elétricas, existe uma diferença na sensibilidade dos dispositivos. Tal diferença pode ser atribuída a diferenças micrométricas no encapsulamento que podem influenciar significativamente a interação da radiação com o VDMOSFET, ou seja, o efeito da capa de *buildup* fica evidente. Na Figura 26b, que representa graficamente a Tabela 3, observa-se que a resposta dos VDMOSFETs é semelhante à resposta do detector padrão (câmara de ionização).

Figura 26 – a) Sensibilidade de VDMOSFETs eletricamente idênticos. b) Resposta dosimétrica da câmara de ionização para 100 mAs.

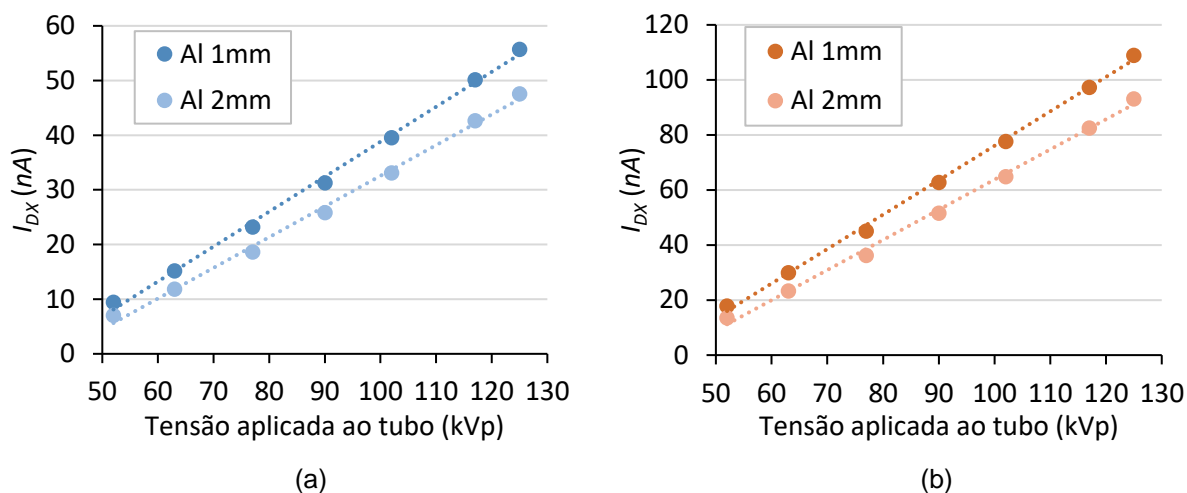


Fonte: O autor (2022)

#### 4.8 DETERMINAÇÃO DO KVP – IRRADIAÇÃO DE TRANSISTORES EM PARALELO COM FILTRAÇÕES DIFERENTES

Os gráficos da Figura 27 ilustram a resposta de dois VDMOSFETs idênticos e irradiados simultaneamente com filtrações de alumínio de espessuras  $x=1mm$  e  $x=2mm$ , cada um deles, correspondente ao método tradicional. A diferença observada nos valores no sinal de saída,  $I_{DX}$ , para as cargas de trabalho ajustadas evidenciam a proporcionalidade entre as grandezas, ou seja, os valores de  $I_{DX}$  praticamente dobraram quando a carga de trabalho foi ajustada de  $100mAs$  para  $200mAs$ .

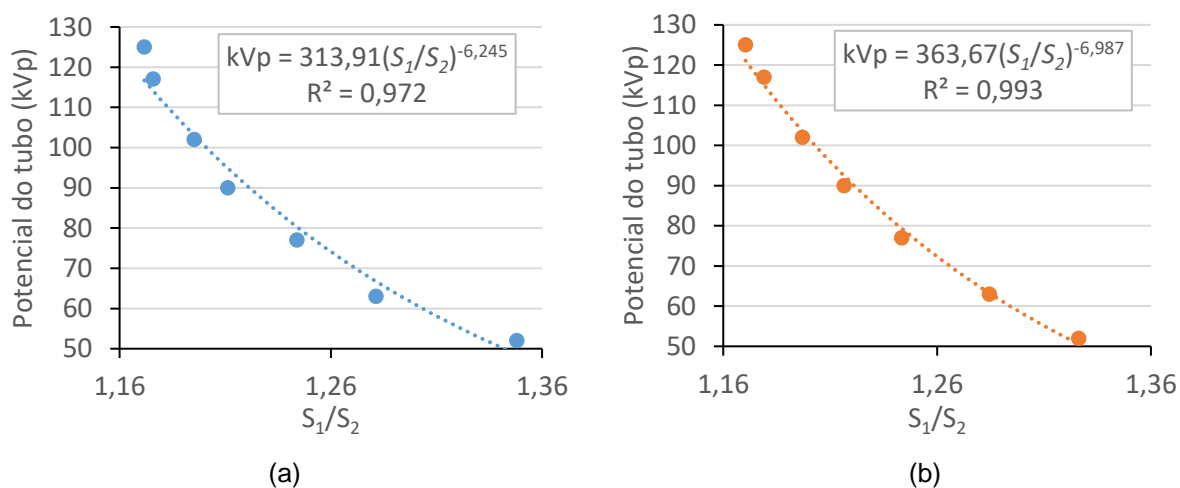
Figura 27 – Relação da sensibilidade com kVp para VDMOSFETs irradiados simultaneamente com filtrações diferentes – (a) Para irradiações a 100mAs; (b) Para irradiações a 200mAs.



Fonte: O autor (2022)

Conforme pode ser visto nos gráficos da Figura 28, os valores da relação  $S_1/S_2$  variam entre 1,17 e 1,33, de acordo com o nível de tensão aplicada ao tubo de raios X. Além disso percebe-se curvas semelhantes para valores distintos de carga de trabalho. De fato, conforme visto no item 2.2.3 (equações 13 e 14), o potencial aplicado ao tubo de raios X é obtido em função da relação  $S_1/S_2$  que segundo Lindström (2016) é uma função de potência.

Figura 28 – Relação do kVp e as saídas  $S_1/S_2$  dos VDMOSFETs (irradiados com diferentes filtrações) – (a) para irradiações a 100mAs; (b) para irradiações a 200mAs.



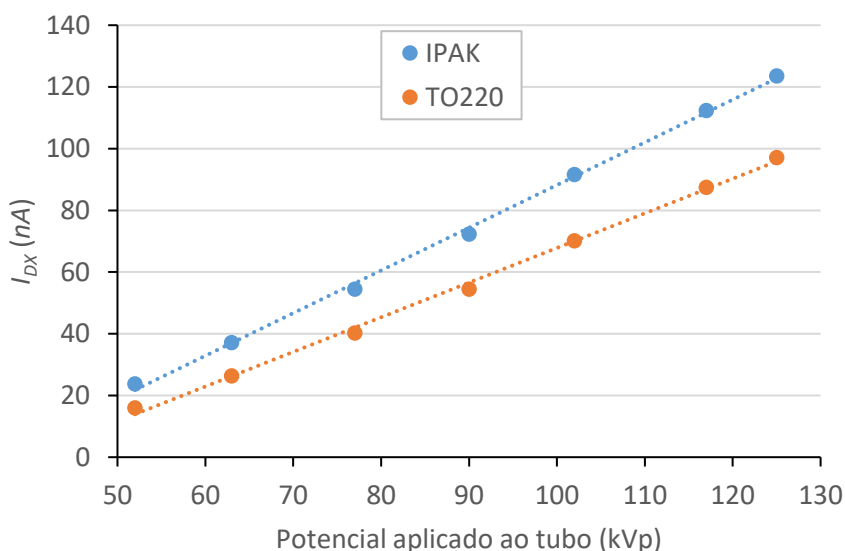
Fonte: O autor (2022)

Desta forma, pode-se dizer que as características visualizadas graficamente apontam para o uso do dispositivo como medidor de kVp (pela análise da relação  $S_1/S_2$  independentemente de  $I_{TRX}$ ).

#### 4.9 DETERMINAÇÃO DO KVP – IRRADIAÇÃO DE TRANSISTORES EM PARALELO COM ENCAPSULAMENTOS DIFERENTES

Com base nos dados obtidos, foi possível verificar a contribuição da capa de *buildup* produzida pelo encapsulamento na magnitude de  $I_{DX}$ , conforme pode-se notar no gráfico da Figura 29 que mostra as curvas obtidas por meio da irradiação de MOSFETs idênticos, porém em encapsulamentos distintos, TO-220 e IPAK.

Figura 29 – Gráfico kVp x  $I_{DX}$  para VDMOSFETs em dois encapsulamentos diferentes



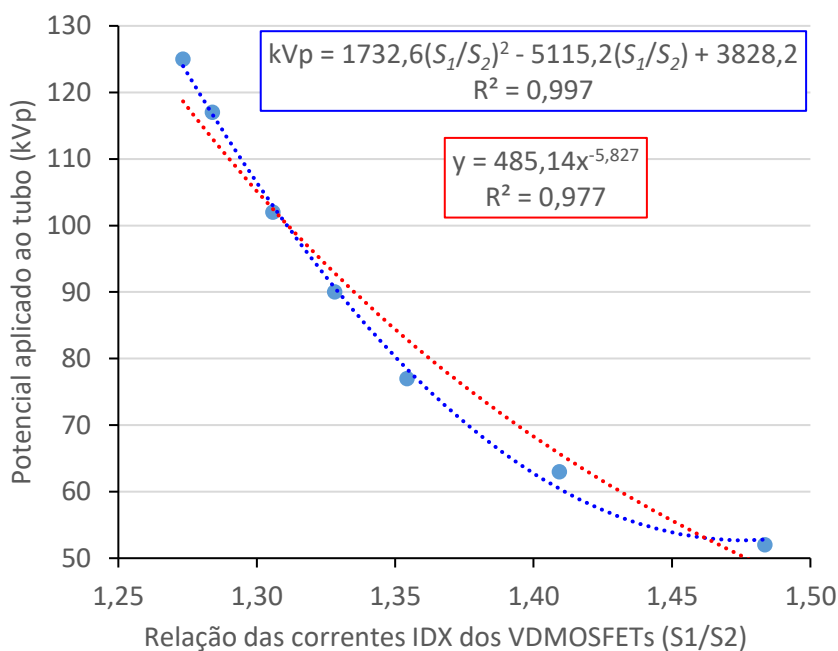
Fonte: O autor (2022)

Considerando que neste experimento a irradiação foi feita com uma carga de trabalho de  $100\text{mA}$ s, tem-se que os valores de  $I_{DX}$  foram consideravelmente maiores quando comparados aos resultados obtidos para o uso de filtração adicional (Figura 27a).

A Figura 30 ilustra o gráfico da variação da relação  $S_1/S_2$  para diferentes valores de potencial no tubo de raios X. No gráfico, os valores observados ficaram entre 1,27

e 1,48, significando uma faixa relativamente maior de valores que a observada na medição de kVp com uso da filtração em alumínio. Com uma faixa maior de valores para  $S_1/S_2$ , tem-se mais facilidade em correlacionar seus valores com o kVp aplicado.

Figura 30 – Gráfico do kVp  $\times$   $S_1/S_2$  para VDMOSFETs com encapsulamentos distintos



Fonte: O autor (2022)

#### 4.10 VERIFICAÇÃO DO EFEITO ANÓDICO

A Tabela 6 mostra que variações na posição dos dispositivos em relação ao feixe no eixo longitudinal ao tubo (x) interferem mais no sinal de saída que variações no eixo transversal ao tubo (y).

Tabela 6 – Valores de  $I_{DX}$  (nA) obtidos a partir de irradiações do VDMOSFET STD2HMK60Z-1 em diferentes posições com relação ao centro do feixe (0,0).

	<b>x = -1 cm</b>	<b>x = 0 cm</b>	<b>x = 1 cm</b>
<b>y = 1 cm</b>	46,46	45,41	44,47
<b>y = 0 cm</b>	46,52	45,31	44,38
<b>y = -1 cm</b>	46,28	44,95	43,41

Fonte: O autor (2022)



De forma a manter os valores do sinal de saída os mais próximos possíveis para sensores irradiados simultaneamente, os dados obtidos evidenciam que os VDMOSFETs devem ficar posicionados o mais próximo possível entre si e do centro do feixe, com arranjo lado a lado ao longo do eixo y.

## 5 CONCLUSÕES

Considerando que três medidas podem fornecer um valor médio de uma grandeza, desde que a incerteza relativa seja menor que 5%, a qual neste trabalho foi menor que 1,5% em trinta repetições, conclui-se que a técnica de mensuração de  $I_{DX}$  é válida, apesar do dano de ionização causado ao dispositivo.

Com relação à dependência angular do VDMOSFET, observou-se que para variações de 30° o erro pode ser desprezível (<1,5%) devido à própria simetria do dispositivo, ou seja, um erro de posicionamento angular do VDMOSFET pouco irá interferir no resultado final da medição.

Embora neste trabalho se tenha optado em procedimento de medição sem colimação, em que consiste no pior caso, pois há contribuição do espalhamento, sugere-se que as medidas sejam feitas com o feixe colimado para reduzir erros sistemáticos.

Se for utilizado o método dos duplos sensores já tecnicamente conhecido, para o caso de dois VDMOSFETs praticamente idênticos, o qual é inovador, verifica-se que há correlação entre  $I_{DX}$  e o valor do kVp, tornando a mensuração viável.

Vale salientar, observando-se os resultados do efeito anódico, que os dispositivos devem ser alinhados transversalmente ao tubo de raios X para minimizar tal tipo de erro sistemático.

Conforme os resultados finais, a técnica de medição do kVp com base no uso de VDMOSFETs com encapsulamentos diferentes sem necessidade de filtros de radiação também é válida, mostrando-se inclusive superior à técnica convencional, pois a faixa de valores da relação S1/S2 foi maior. Isto confere mais uma inovação tecnológica no procedimento de medição do kVp utilizando VDMOSFETs de forma não invasiva em tubos de raios X aplicados ao radiodiagnóstico.

## REFERÊNCIAS

- BÜERMANN, L. **Non-Invasive X-ray Multimeters used in Diagnostic Radiology**. Physikalisch-Technische Bundesanstalt. National Metrology Institute. International Symposium on Standards, Applications and Quality Assurance in Medical Radiation Dosimetry. Vienna, Austria, 2019.
- CEMBER, H.; JOHNSON, T. E. **Introduction to Health Physics**. 4.ed. USA : McGraw-Hill, 2009.
- DELGADO, V., Determination of x-ray spectra from attenuation data by imposing a priori positiveness and bounded support: Theory and experimental validation, Medical Physics n. 34, p. 994-1006, 2007.
- GONÇALVES FILHO, L. C.; MONTE, D. S., BARROS, F. R.; SANTOS, L. A. P., **Radiation Dose Response of n-Channel MOSFET Submitted to Filtered X-Ray Photon Beam**, IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 65, n. 9, p. 2607-2610, 2018.
- GRAY, P.R.; HURST, P.J.; LEWIS, S.H.; MEYER, R.G., **Analysis And Design Of Analog Integrated Circuits**, 5 ed. USA: John Wiley & Sons, 2009.
- GREENING, J.R., **The Determination of X-Ray Wavelength Distributions from Absorption Data**, Proceedings of the Physical Society, Section A 63, 1227, 1950.
- HERRNSDORF, L.; ANDERSSON, M.; GUNNARSSON, M.; MATTSSON, S., Optimization of energy and directional response of a small  $4\pi$  silicon dosimeter for quality control of CT/CBCT-units – A 3D CAD, Monte-Carlo, AM approach, Applied Radiation and Isotopes v. 158, 2020.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. Technical Report Series No. 784. Dosimetry in diagnostic radiology: An international code of practice. Vienna, Austria, 2007.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. Diagnostic Radiology Physics: a handbook for teachers and students. IAEA, Vienna, 2014.
- IEC - International Electrotechnical Commission. International Standard IEC 61676. Medical Electrical Equipment – Dosimetric instruments used for non-invasive measurements of X-ray tube voltage in diagnostic radiology. (Committee Draft), 1.1 ed. Geneva, Switzerland, 2009.
- IEC - International Electrotechnical Commission. International Standard IEC 61267. Medical Diagnostic X Ray Equipment – Radiation conditions for use in determination of characteristics. (Committee Draft), 2 ed. Geneva, Switzerland, 2005.
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados**. Duque de Caxias , Rio de Janeiro, INMETRO, 2012.

KÉPALKOTÁS, O. – Physical foundations of non-invasive X-ray tube voltage measurement, **Book for Physicists**, fev. 2019. Disponível em <http://oftankonyv.reak.bme.hu/tiki-index.php?page=Physical+foundations+of+non-invasive+X-ray+tube+voltage+measurement&structure=Book+for+Physicists>  
[age=Physical+foundations+of+non-invasive+X-ray+tube+voltage+measurement&structure=Book+for+Physicists](http://oftankonyv.reak.bme.hu/tiki-index.php?page=Physical+foundations+of+non-invasive+X-ray+tube+voltage+measurement&structure=Book+for+Physicists). Acesso em junho 2021.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. 4. ed. USA: John Wiley & Sons, 2010.

Krishnamurthy, S.; Kannan, R.; Hussin, F.A.; Yahya, E.A., **Investigation of SEGR Effects on Power VDMOSFET for Various Heavy Ion Radiation**. International Conference in Electrical Electronic and Computer Engineering, 2019.

LINDSTRÖM, J. The non-invasive X-ray Multimeter – Principles, Advantages, Drawbacks and Uncertainties. 4.ed. Stockolm: Karolinska Universitetjukhuset, 2016.

LECHNER, A., **Particle Interactions with Matter**, CERN Yellow Reports: School Proceedings, v. 5, 2018.

LEROY, C.; RANCOITA, P.G., Particle Interaction and Displacement Damage in Silicon Devices Operated in Radiation Environments. Reports on Progress in Physics, v. 70, p. 493, 2007.

LI, F.; JENNINGS, M., Main Differences in Processing Si and SiC Devices. Disruptive Wide Bandgap Semiconductors, Related Technologies, and Their Applications, 1.ed. Intechopen, 2018.

LUTZ, G., Semiconductor Radiation Detectors – Device Physics. 3 ed. Berlin: Springer-Verlag, 2007.

MCLEAN, D., X-ray spectra and beam qualities, Joint ICTP-IAEA Advanced school on Dosimetry in Diagnostic Radiology, Trieste, 2009.

MONTE, D. S.; SANTOS L. A. P., A Method for Measuring Ionizing Radiation Dose by Analyzing Hybrid- $\Pi$  parameters of Transistors. IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2020.

NEAMEN, D. A., Microelectronics: **Circuit Analysis And Design**, 4 ed. USA: McGraw-Hill, 2010.

NETO, A. T. B.; FARIA, L.O., Construction and calibration of a multipurpose instrument to simultaneously measure dose, voltage and half-value layer in X-ray emission equipment. Radiation Measurements, v. 71, p. 178-182, 2014.

NAKAYAMA, Y.; KERA, S.; UENO, N. Photoelectron Spectroscopy On Single Crystals Of Organic Semiconductors: Experimental Electronic Band Structure For Optoelectronic Properties, Journal of Materials Chemistry C, 2020.

PEJOVIC, M.M.; PEJOVIC, S.M. **VDMOSFET as a prospective dosimeter for radiotherapy**. Applied Radiation and Isotopes, v. 132, p. 1-5, 2018.

POLUDNIOWSKY, G.G.; LANDRY, G.; DEBLOIS, F.; EVANS, P.M.; VERHAEGEN, F. **SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode x-ray tubes**. Phys. Med. Biol. 54 N433, 2009.

RETHWISCH, D.G.; CALLISTER, W.D. *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. 9.ed. LTC, 2016.

SANTOS, L.A.P. An Overview on Bipolar Junction Transistor as a Sensor for X-ray Beams Used in Medical Diagnosis. *Sensors*, v. 22-1923, 2022.

SCAFF, L.A.M. *Física na Radioterapia: A Base Analógica de Uma Era Digital*. São Paulo: Editora Projeto Saber, 2010.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic Circuits**, 8 ed. New York: Oxford university press, 2020.

SILBERSTEIN, L., **Determination of the Spectral Composition of X-ray Radiation from Filtration Data**, Journal of Optical Society of America, v. 22, p. 265-280, 1932.

SPIELER, H., **Semiconductor detector systems**, 1 ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SROUR, J.R.; MARSHALL, C. J.; MARSHALL, P. W., **Review of Displacement Effects in Silicon Devices**, IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 50, n. 3, 2003.

STMICROELECTRONICS. STD2HMK60Z, STD2HMK60Z-1, STF2HMK60Z, STQ2HMK60ZR-AP Datasheet - DS3646 - N-channel 600 V, 3.5  $\Omega$  typ., 2 A SuperMESH™ Power MOSFETs in DPAK, IPAK, TO-220FP and TO-92 packages. 6 rev, 2018.

SZE, S. M. **Semiconductor Devices – Physics and Technology**. 4 ed. USA: John Wiley & Sons, 2020.

TURNER, J. E. - **Atoms, Radiation And Radiation Protection**. 3.ed. Germany: Wiley-VCH, 2007.