

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

LUIZ CARLOS GONÇALVES FILHO

**Resposta com a dose de MOSFET canal N comercial submetido a
feixes raios X filtrado**

Recife

2018

LUIZ CARLOS GONÇALVES FILHO

**Resposta com a dose de MOSFET canal N comercial submetido a
feixes raios X filtrado**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Tecnologias Energéticas e
Nucleares para obtenção do título de Mestre em
Ciências, Área de Concentração: Dosimetria e
Instrumentação Nuclear.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Pereira dos
Santos

Recife

2018

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

G635r Gonçalves Filho, Luiz Carlos.

Resposta com a dose de MOSFET canal N comercial submetido a feixes raios X filtrado. / Luiz Carlos Gonçalves Filho. - Recife: O Autor, 2018.

59 f. : il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Pereira dos Santos.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2018.

Inclui referências bibliográficas e anexos.

1. MOSFET. 2. Radiação. 3. Dosímetro. I. Santos, Luiz Antônio Pereira dos, orientador. II. Título.

UFPE

CDD 621.48 (21. ed.)

BDEN/2018-15

LUIZ CARLOS GONÇALVES FILHO

**Resposta com a dose de MOSFET canal N comercial submetido a
feixes raios X filtrado**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.

APROVADO EM: 20.02.2018

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Pereira de Brito Filho – DES/UFPE

Prof. Dr. Frederico Antônio Benezine – IPEN-CNEN/SP

Prof. Dr. Marcus Aurélio Pereira dos Santos – CRCN-NE/CNEN

AGRADECIMENTOS

Não posso agradecer a todas as pessoas que viveram essa jornada comigo, mas tentarei homenagear os mais marcantes: Prof. Luiz C. Gonçalves, Profa. Maria da S. Gonçalves, Dr. Eduardo da S. Gonçalves, Eng. Marcus Aurélio, Físico Clayton Benevides, BCC Renata Silveira, Eng. Francisco Cavalcante, Ing. Cecilia Veltran, Biol. Marcos Vidal e ao Radiólogo Gideon Lopes.

A empresa Scients pela concessão do eletrômetro e ter colaborado na técnica de polarização dos MOSFETs para tornar possível a realização deste trabalho.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear por sempre investir tão intensamente na minha formação, em especial ao Dr. Luiz A. Pereira que sempre acredita em meu potencial.

A Universidade Federal de Pernambuco, professores e funcionários pelo valioso suporte.

E a Dra. Nathália Campos por me trazer de volta a luz e ao equilíbrio.

RESUMO

O MOSFET pode operar como um detector de radiação em feixes de radioterapia, para tratamento de câncer, por exemplo. Esse dispositivo eletrônico pode atuar como um dosímetro por meio da medição da variação da tensão limiar de porta. O objetivo deste trabalho é apresentar uma forma inovadora de mensurar a resposta com a dose de MOSFET quando submetido aos feixes de raios X gerados a partir do potencial de 100 kV, o que normalmente é utilizado em radiologia diagnóstica. Basicamente, o método consiste em medir a corrente de dreno do MOSFET em função da dose de radiação depositada. Para isto, o dispositivo deve ser polarizado de forma tal que haja uma alteração substancial na corrente de dreno depois dele ter sido irradiado. Foram utilizados dois tipos de dispositivos de canal N: transistor de sinal e transistor de potência. A dose de radiação depositada nos dispositivos foi variada e as curvas de corrente elétrica em função da tensão de polarização foram plotadas. Além disso, foi feita uma análise de sensibilidade da resposta do MOSFET de potência, variando o potencial do tubo em 20%. Os resultados mostraram que ambos os tipos de dispositivos têm respostas semelhantes. Além disso, a mudança na corrente de dreno é proporcional à dose depositada. Ao contrário do MOSFET de potência, o transistor de sinal não fornece uma função linear entre a taxa de dose e sua corrente de dreno. Observou-se também que a variação no potencial do tubo do equipamento de raios X altera a corrente de dreno do MOSFET de forma proporcional.

Palavras-chave: MOSFET. Radiação. Dosímetro.

ABSTRACT

MOSFET can operate as a radiation detector mainly in high-energy photon beams, which are normally used in cancer treatments. In general, such an electronic device can work as a dosimeter from threshold voltage shift measurements. The purpose of this article is to show a new way for measuring the dose-response of MOSFETs when they are under X-ray beams generated from 100kV potential range, which is normally used in diagnostic radiology. Basically, the method consists of measuring the MOSFET drain current as a function of the radiation dose. For this the type of device, it has to be biased with a high value resistor aiming to see a substantial change in the drain current after it has been irradiated with an amount of radiation dose. Two types of N channel device were used in the experiment: a signal transistor and a power transistor. The delivered dose to the device was varied and the electrical curves were plotted. Also, a sensitivity analysis of the power MOSFET response was made, by varying the tube potential of about 20%. The results show that both types of devices have responses very similar, the shift in the electrical curve is proportional to the radiation dose. Unlike the power MOSFET, the signal transistor does not provide a linear function between the dose rate and its drain current. We also have observed that the variation in the tube potential of the X-ray equipment produces a very similar dose-response.

Keywords: MOSFET. Radiation. Dosimeter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ampola à vácuo contendo ânodo e cátodo.....	14
Figura 2 - Exemplo de espectro de raios X gerado com potencial de 100 kV.....	14
Figura 3 - Probabilidade da ocorrência dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares em função da energia inicial do fóton e número atômico do material alvo.....	15
Figura 4 - Bandas de energia para condutores, semicondutores e isolantes.....	18
Figura 5 - Corrente do diodo em função da tensão.....	19
Figura 6 - Estrutura de MOSFET canal-N.....	20
Figura 7 - Variação i_D em função de v_{DS}	21
Figura 8 - Corrente dreno em função da v_{GS} de um MOSFET.....	22
Figura 9 - Corrente de dreno em função da dose acumulada.....	24
Figura 10 - Variações de I_{GS} e I_{DS} com a dose.....	24
Figura 11 - Transistores BSS138, BUZ91 e FQP12N60, encapsulamento e esquema elétrico	25
Figura 12 - Câmara de ionização PTW W23342 número de série 1090.....	26
Figura 13 - Eletrômetro Keithley®, termômetro Hart Scientific® e barômetro Druck®.....	26
Figura 14 - Eletrômetro Sciencs®, modelo EFF 1506.....	27
Figura 15 - Arranjo para medir I_D e controlar V_{GS}	27
Figura 16 - Arranjo experimental para irradiação.....	28
Figura 17 - Cabeçote do tubo de raios X.....	28
Figura 18 - Painel de controle do equipamento de raios X.....	29
Figura 19 - Taxa de KERMA no ar em função da corrente de tubo, variando a tensão aplicada ao tubo.....	31
Figura 20 - Corrente dreno em função da V_{GS} antes de irradiar.....	32
Figura 21 - Corrente de dreno do MOSFET BSS138 em função de V_{GS} e da dose.....	33
Figura 22 - Corrente de dreno do MOSFET BUZ91 em função de V_{GS} e da dose.....	33
Figura 23 - Corrente de dreno do MOSFET FQP12N60 em função de V_{GS} e da dose.....	34
Figura 24 - Corrente de dreno do BSS138 em função do tempo variando a dK_{ar}/dt	35
Figura 25 - Corrente de dreno para o MOSFET BUZ91 em função do tempo e da taxa de KERMA no ar.....	35
Figura 26 - Corrente de dreno para o MOSFET BUZ91 em função dK_{ar}/dt	36
Figura 27 - Corrente dreno para o MOSFET FQP12N60, em função do tempo variando taxa de KERMA no ar.....	37

Figura 28 - Corrente de dreno para o MOSFET FQP12N60 em função da taxa de KERMA no ar.....	37
Figura 29 - Corrente dreno em função VGS variando dose e tensão tubo.....	38
Figura 30 - Corrente dreno do MOSFET BSS138 em função da dose, VGS= 450 mV.....	39
Figura 31 - Corrente dreno (BUZ91) em função da dose, VGS= 500 mV.....	40
Figura 32 - Corrente dreno (FQP12N60) em função da dose, VGS= 950 mV.....	40
Figura 33 - Corrente de dreno do MOSFET FQP12N60 em função da dose variando a tensão do tubo.....	42
Figura 34 - Curva calibração do barômetro DPI740 284/98.....	49
Figura 35 - Curva calibração termômetro Hart Scientific® 1529.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos MOSFETs BSS138, BUZ91 e FQP12N60.....	25
Tabela 2 - Equações das taxas KERMA no ar em função corrente tubo, para três potenciais do tubo.....	32
Tabela 3 - Corrente de dreno em função dK_{ar}/dt , BUZ91.....	36
Tabela 4 - Corrente de dreno em função dK_{ar}/dt , FQP12N60.....	38
Tabela 5 - Corrente de dreno em função da dose, BUZ91.....	41
Tabela 6 - Corrente de dreno em função da dose, FQP12N60.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 Raios X.....	13
2.2 Gerador de fótons de raios X.....	13
2.3 Interação dos raios X com a matéria.....	14
2.4 Grandezas e parâmetros dosimétricos.....	15
2.4.1 Dose absorvida.....	15
2.4.2 KERMA no ar.....	16
2.4.3 Taxa de KERMA no ar.....	16
2.5 Semicondutor.....	16
2.5.1 Material semicondutor.....	17
2.5.2 Dopagem de semicondutores.....	18
2.6 MOSFET (<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>).....	20
2.6.1 MOSFET como detector de raios X.....	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 Transistores MOSFETs.....	25
3.2 Sistemas eletrônicos.....	26
3.3 Gerador de raios X.....	28
3.4 Procedimentos de irradiação.....	29
3.4.1 Irradiação dos MOSFETs.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1 As taxas de KERMA no ar medidas e calculadas.....	31
4.2 Corrente de dreno em função de V_{GS}	32
4.2.1 Corrente de dreno em função da dose acumulada.....	39
5 CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS.....	44
ANEXO A - MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS AO PROCESSO DE MEDIÇÃO DA TAXA DE KERMA NO AR.....	47
ANEXO B - CERTIFICADO CALIBRAÇÃO DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO PTB®, MODELO W23342, SÉRIE 1090.....	51
ANEXO C - CERTIFICADO CALIBRAÇÃO DO BARÔMETRO DIGITAL DRUCK®, MODELO DPI 740, SÉRIE 284/98-02.....	56

ANEXO D - CERTIFICADO CALIBRAÇÃO DO TERMÔMETRO DIGITAL HART SCIENTIFIC®, MODELO 1529-R, SÉRIE A45647.....	58
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

Os raios X são usados desde o fim do século XIX para diagnóstico de doenças. Uma das formas usadas para medir a radiação ionizante são os transistores de efeito de campo com metal e óxido de semicondutor (MOSFET). Essa consolidada técnica consiste em medir a variação da tensão de limiar de porta do MOSFET, quando ele passa do seu modo de corte para o a saturação (HUGHES, 1988). O MOSFET tem sido usado por muitos anos como um detector de radiação, principalmente em feixes de fótons de alta energia, que são normalmente utilizados em tratamentos de câncer. Atualmente, alguns MOSFETs também estão sendo usados para medir a dose em feixes de raios X da faixa de energia de radiologia diagnóstica. Recentemente foi observado que a corrente de dreno do dispositivo sofre alteração quando a dose depositada é incrementada (YIXIN LI, 2006), e que pode haver uma correlação matemática entre os fenômenos da variação da corrente com a dose de radiação depositada (MAGALHÃES, 2010).

O presente trabalho visa desenvolver uma técnica inovadora que consiste em mensurar a variação da corrente de dreno de um transistor de efeito de campo de duas formas: a primeira pode ser denominada de modo passivo a qual consiste em verificar a variação na corrente elétrica de dreno no dispositivo após ter sido irradiado com certa dose de radiação; a segunda consiste em um processo de medição em tempo real, às vezes denominado de modo ativo por profissionais da área de dosimetria das radiações ionizantes. Outra avaliação feita nesta pesquisa consistiu em variar a energia dos fótons de raios X e verificar o quanto esse fator técnico pode afetar a resposta de MOSFETs por meio dessa nova técnica proposta.

Todos os experimentos foram feitos de forma criteriosa usando equipamentos calibrados e rastreados de forma que qualquer variação na corrente de dreno nos dispositivos possam ser atribuídos ao campo ionizante.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Raios X

Os raios X são ondas eletromagnéticas com capacidade de ionizar diretamente o meio com o qual interagem, com alto poder de penetração, sem massa de repouso e geradas na eletrosfera, o que difere de fontes radioativas, cuja radiação ionizante vem do núcleo. A energia dos fótons podem ser quantificadas pela Equação 1

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

em que h é a constante de Plank ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J/s) e f a frequência da onda (Hz).

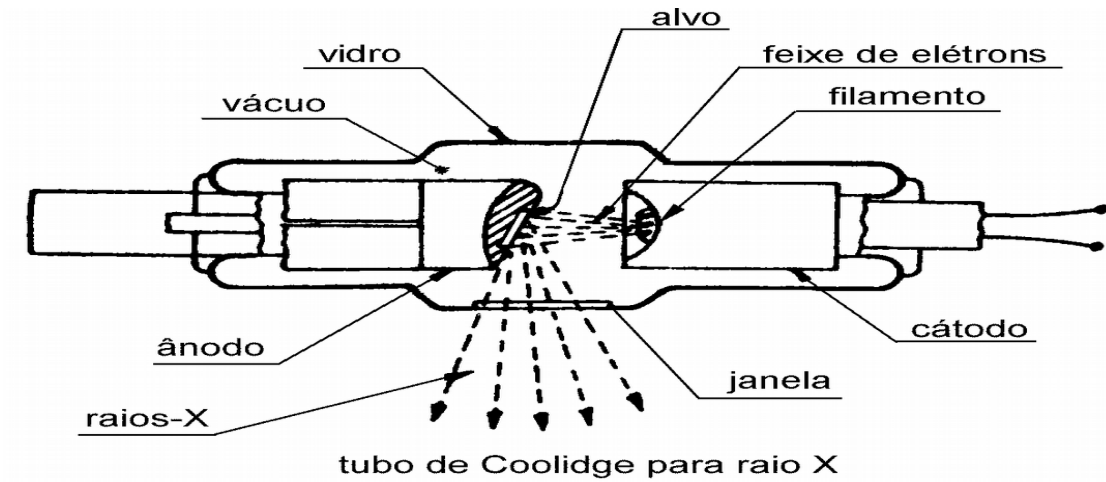
2.2 Gerador de fótons de raios X

Equipamentos geradores de raios X típicos são baseados em uma ampola à vácuo (tubo – Figura 1), com dois eletrodos (anodo e catodo), onde aplica-se uma diferença de potencial elétrica da ordem de quilovolts (kV) e tem-se assim um fluxo de elétrons no tubo, ou seja, do catodo para o anodo, este último é denominado de alvo metálico. A corrente elétrica de tubo que colide com o alvo produz o feixe de radiação pelo efeito de inúmeras colisões dos elétrons no alvo (bremsstrahlung). Para produzir um feixe de fótons de raios X de forma controlada são necessários dois parâmetros básicos: 1) O controle da tensão no tubo, que define a maior energia que os fótons podem alcançar; e 2) a corrente elétrica que passa no filamento do tubo (o catodo), a qual altera diretamente a intensidade fotônica. Assim, quando uma tensão (kV) entre cátodo e ânodo é aplicada, causa a aceleração dos elétrons do filamento em direção ao alvo, e esse processo de múltiplas colisões dos elétrons no alvo produzem um espectro contínuo de fótons como mostrado na Figura 2 (ATTIX, 2004). Da teoria clássica do eletromagnetismo, tem-se que:

$$E = V \cdot q, \quad (2)$$

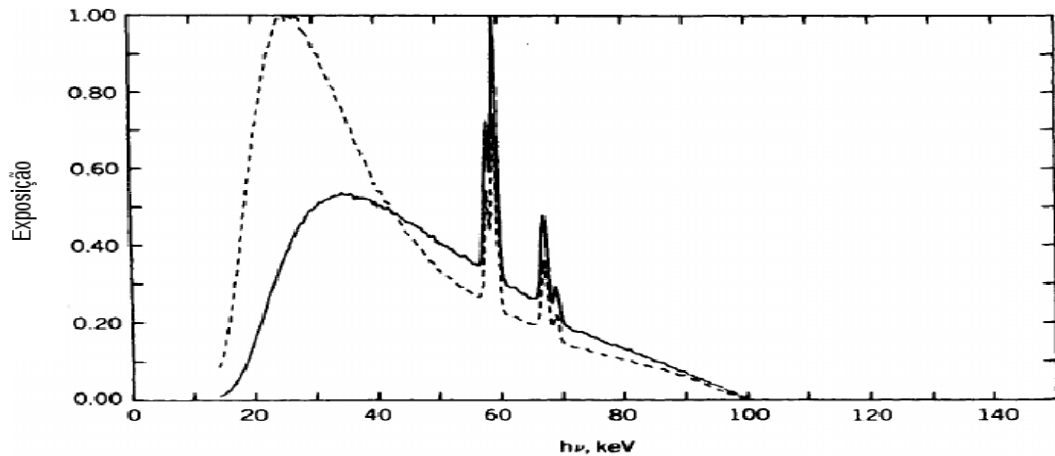
em que E é a energia (J), V diferença de potencial (V) e q é a carga do elétron ($-1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

Figura 1 - Ampola à vácuo contendo ânodo e cátodo



Fonte: bioblogandofisica.blogspot.com.br/2013/03/o-producao-do-raio-x.html, acessado em 02/03/18

Figura 2 - Exemplo de espectro de raios X gerado com potencial de 100 kV



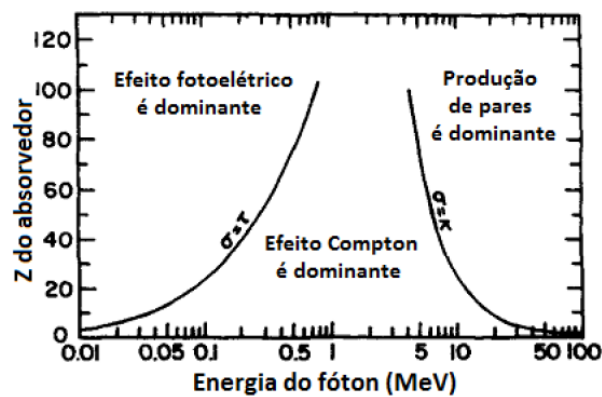
Fonte: Adaptado de Attix, 2004.

2.3 Interação dos raios X com a matéria

Quando um feixe de raios X interage com a matéria, os três principais efeitos são: fotoelétrico, quando os elétrons recebem toda energia incidente sendo excitados para fora do átomo; efeito Compton, quando fótons incidentes arrancam elétrons dos átomos, entretanto

ainda há energia para um fóton espalhado que tem uma quantidade de energia menor que a inicial; e o efeito de produção de pares, cujo fóton incidente em um núcleo do átomo, com suficiente energia gerando um pósitron e um elétron. Como esses fenômenos são probabilísticos e dependem não só do número atômico do material mas também da energia do fóton, e a Figura 3 ilustra a probabilidade de cada fenômeno (HUBBEL, 1982).

Figura 3 - Probabilidade da ocorrência dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares em função da energia inicial do fóton e número atômico do material alvo



Fonte: Adaptado de Hubbel, 1982.

Como esse trabalho é focado em MOSFETs comerciais de silício ($Z=14$) e tensão de tubo da ordem de 100 kV, a maior parte dos efeitos é esperado que sejam fotoelétrico e *Compton*, sendo o segundo predominante em relação ao primeiro.

2.4 Grandezas e parâmetros dosimétricos

As definições de algumas das grandezas usadas na radiologia que são definidas pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (ICRU – *International Commission on Radiation Units and Measurements*), são apresentadas a seguir.

2.4.1 Dose absorvida

A dose absorvida é aplicável a qualquer tipo de radiação e em qualquer meio, trata-se da relação entre a energia (J) e a massa (kg). No Sistema Internacional de unidades é mais

usado o *gray* (1 J/kg= 1 Gy) (ICRU, 2005)

$$D = \frac{dE}{dm}. \quad (3)$$

2.4.2 KERMA no ar

A grandeza KERMA no ar (*kinetic energy release in matter*) é a soma das energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas (E_{th}), liberadas por ionização em um volume de massa dm (ATTIX, 2004). Sua unidade no SI J/kg , ou *gray* (Gy)

$$K_{ar} = \frac{dE_{th}}{dm}. \quad (4)$$

A relação entre dose e KERMA no ar será igual a 1 se houver equilíbrio eletrônico e haja igualdade entre os coeficientes de transferência mássicos de energia com o de absorção mássico; isso pode se passar para energias abaixo de *MeV*.

2.4.3 Taxa de KERMA no ar

É a variação do KERMA no ar com respeito ao tempo (dK_{ar}/dt ou $\dot{K}_{ar}$), cuja unidade no SI é dada por $J.kg^{-1}.s^{-1}$. A produção de raios X será maior quanto maior for a corrente no tubo

$$\dot{K}_{ar} = \frac{dK_{ar}}{dt}. \quad (5)$$

2.5 Semicondutor

A eletrônica está presente em cada parte da nossa sociedade; um dos mais comuns dispositivos usados são os transistores de efeito de campo metal-óxido-semicondutor, o MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), construídos em uma

quantidade imensa são a base de praticamente todos os dispositivos eletrônicos existentes.

2.5.1 Material semicondutor

Em se tratando de condutividade elétrica, os materiais podem ser diferenciados de três formas básicas: condutores, semicondutores e isolantes. Os materiais semicondutores são a base para fabricação dos mais diversos dispositivos eletrônicos.

A condutividade elétrica dos materiais é explicada pela teoria quântica, desenvolvida ao longo de décadas por diversos cientistas (SANTOS, 2012). Com base na equação de Schrödinger, que apresenta soluções distintas para cada composto químico, ou seja, o cálculo dos estados energéticos eletrônicos depende do tipo de material, densidade eletrônica, etc; assim sendo os materiais onde há estados energéticos “proibidos” (semicondutores e isolantes); e materiais que praticamente não há esses estados eletrônicos proibidos (condutores). Aqueles que têm a região de estados energéticos proibidos (*gap*) podem ser classificados como isolantes, se a probabilidade de condução for muito pequena, ou semicondutores se a probabilidade de condução for bem maior que a dos isolantes e ao mesmo tempo bem menor que a dos metais, ou seja, uma faixa intermediária. A teoria quântica da condutividade ficou conhecida como teoria de bandas de energia, pelo fato das soluções da equação de Schrodinger ter esses estados eletrônicos proibidos.

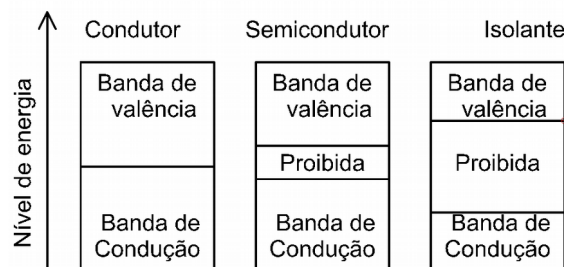
De fato, quanto menor o *gap* mais o material se aproxima de um bom condutor e quanto mais o *gap* é largo a característica de um ótimo isolante (BROWN/HOLME, 2006). O *gap* fica entre os estados eletrônicos menos ligados ao átomo (denominado de banda de condução), e os estados em que os elétrons estão mais ligados ao átomo (denominado de banda de valência) (SANTOS, 2012). O *gap* nos semicondutores tem uma energia de aproximadamente 1 eV (SZE, 2002), o que implica que com pouca energia térmica pode fazer com que os elétrons saltam da banda de valência para banda de condução.

Quando os elétrons deixam a banda de valência, há uma reorganização, o que é chamado de lacuna, com a ausência do elétron esta se comporta como portador de carga positiva. Isso aumenta o fluxo de corrente no material, as lacunas tem uma mobilidade 40% da mobilidade dos elétrons (SEDRA/SMITH, 2007). A temperatura é tão importante nos semicondutores que acima de 0 K já é percebida a mobilidade das cargas, mesmo sem que haja campo elétrico externo, conhecida como corrente de difusão. A expressão matemática que quantifica esse fenômeno segue a distribuição de Fermi (Equação 6)

$$f_e(E) = \frac{1}{e^{(E - E_F)/k \cdot T} + 1} \quad (6)$$

A Figura 4 mostra as bandas de valência e condução para isolantes, semicondutores e condutores (LUTZ, 1999); nos metais essas bandas estão sobrepostas, implicando em um livre acesso dos elétrons entre essas camadas. Já nos semimetais para que o elétron migre de uma banda a outra é necessário uma energia mínima ($E_g \approx 1$ eV) ao passo que os elétrons nos isolantes requerem uma grande quantidade de energia para ultrapassar a zona proibida. Para baixas temperaturas toda banda de valência está preenchida, contudo à temperatura ambiente algumas ligações são rompidas pela ionização térmica então elétrons são liberados.

Figura 4 - Bandas de energia para condutores, semicondutores e isolantes



Fonte: O autor.

2.5.2 Dopagem de semicondutores

O material semicondutor mais utilizado até o final do século passado foi o cristal de silício. Os semicondutores puros não são bons condutores (HALLIDAY, 2009), logo para alterar a condutividade se faz necessário dopar o material com impurezas, as quais são conhecidas como dopantes. Quando combinados semicondutores tetravalentes com elementos trivalentes ou pentavalentes, cria-se camadas na zona proibida que permitem que os elétrons fiquem nessa região. Elementos tetravalentes comuns na eletrônica são silício e germânio, já os trivalentes são alumínio, boro, gálio e índio; enquanto os pentavalentes mais comuns são fósforo e arsênio. Cada combinação determina uma característica diferente ao dispositivo. Contudo, o mais importante é que haja elétrons sobrando ou faltando de tal forma que se tenha um material semicondutor tipo *N* ou tipo *P*, respectivamente (REZENDE, 1996). A junção desses dois tipos de semicondutores (*N* e *P*), que é denominado de junção PN, é a base da

maioria dos dispositivos eletrônicos fabricados hoje em dia.

Na junção PN ocorre a distribuição de cargas móveis (elétrons e lacunas) e surge o que se denomina de região de depleção. Na prática isso resulta no que se denomina de tensão de limiar ou tensão de junção (V_{PN}) (SEDRA/SMITH, 2007). Na realidade, a junção PN consiste no diodo eletrônico, no qual a corrente elétrica só circula em um sentido, quando este é polarizado diretamente.

A corrente elétrica em função da polarização direta se comporta de acordo com a Equação 7. Já na polarização inversa, que praticamente não há fluxo de elétrons; até que a diferença de potencial seja elevado demais e um efeito avalanche aparece no dispositivo. Essa tensão é conhecida como Zenner, onde quase não há mudança na tensão do dispositivo (Figura 5).

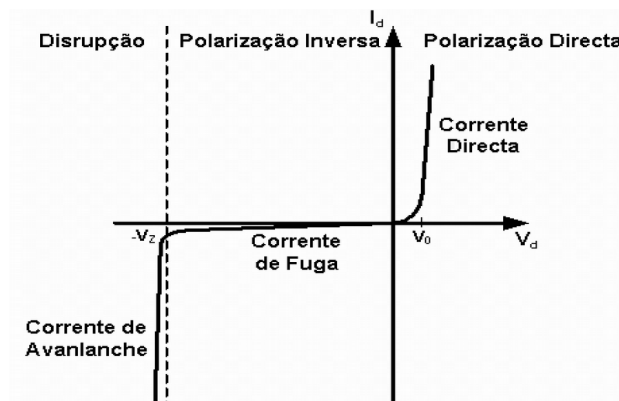
$$i_D = I_S \cdot (e^{v/n \cdot V_{TH}} - 1), \quad (7)$$

em que i_D é a corrente do diodo, I_S corrente de saturação para cada diodo que depende da temperatura, sendo diretamente proporcional à área transversal do cristal, v é a tensão direta e V_{TH} é a tensão térmica dada pela Equação 8.

$$V_{TH} = \frac{k \cdot T}{q}, \quad (8)$$

em que k é a constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T é a temperatura (K) e q é a carga do elétron ($-1,6 \cdot 10^{-19}$ C); o valor de n depende do material e da estrutura física da junção PN onde para circuitos integrados $n=1$ e para dois terminais $n=2$.

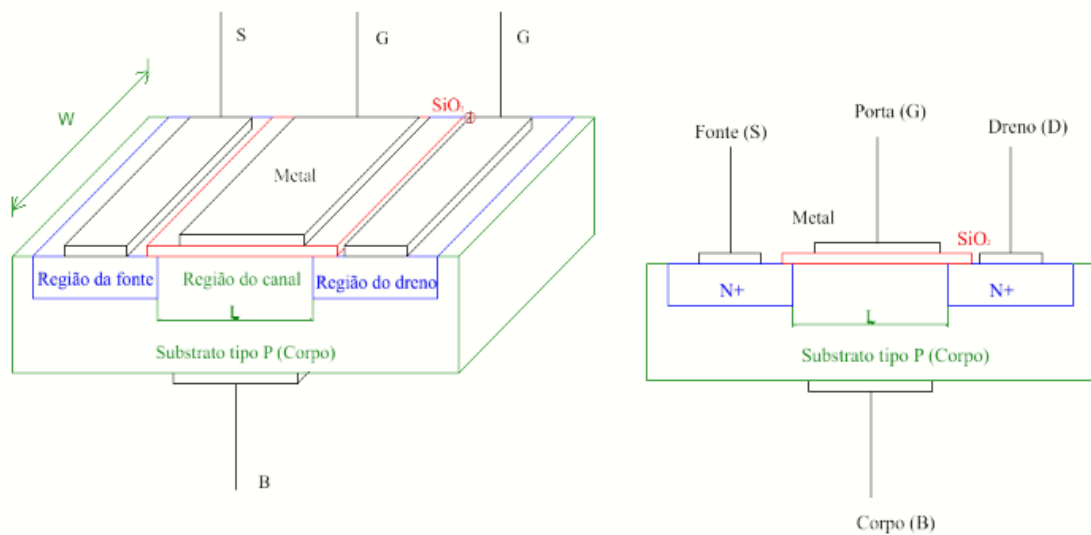
Figura 5 - Corrente do diodo em função da tensão



2.6 MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)

A Figura 6 apresenta a estrutura básica de um MOSFET de canal N. O princípio de funcionamento consiste em criar um campo elétrico entre porta, ou *gate* (G), e o corpo, ou *body* (B), de forma a atrair as poucas cargas negativas no cristal P para próximo do óxido de silício (SiO_2). Como o SiO_2 é um excelente isolante, pouquíssimos elétrons conseguem passar pela porta. O resultado é um canal de elétrons ligando os dois cristais N^+ que são altamente dopados, permitindo que a corrente elétrica flua entre fonte, ou *source* (S) e dreno (D).

Figura 6 - Estrutura de MOSFET canal-N



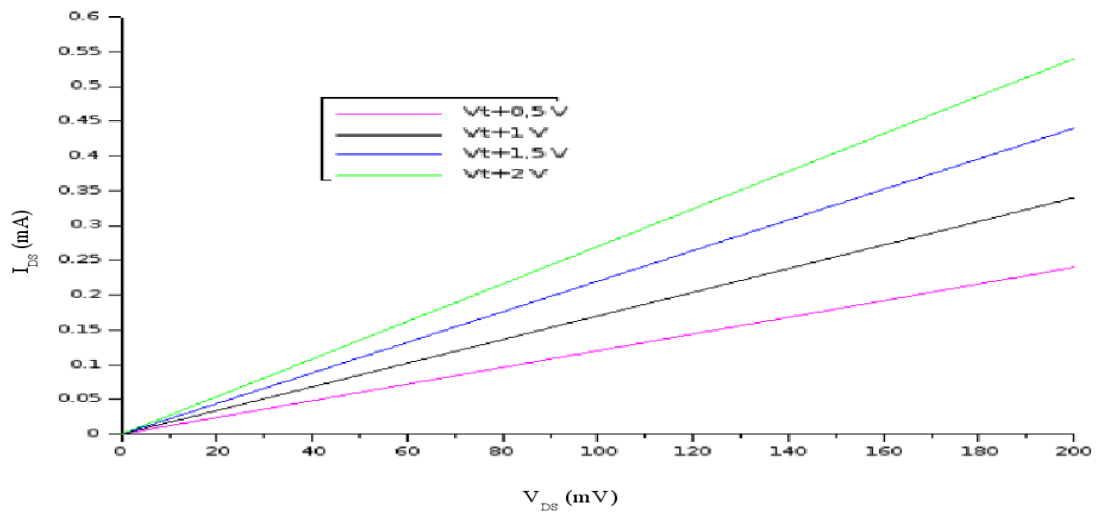
Fonte: Adaptado de Sedra/Smith, 2007.

A intensidade dessa corrente depende da largura do canal, que por sua vez depende da tensão entre porta e corpo. Quando o canal chegar ao limite então o transistor estará saturado, ou seja a corrente de dreno não mais aumentará. Se o canal não existir o MOSFET estará na região de corte. Assim a vantagem de um MOSFET é que a corrente é controlada por tensão, e isso só é possível graças a fina camada de óxido de silício. Na atualidade, um dos grandes desafios para construção de transistores menores é reduzir essa camada, de forma que a quantidade de impurezas não afete a alta resistividade (SOUZA, 2006). Quanto mais impuro for o SiO_2 mais espessa deve ser a camada afim de que não haja migração das lacunas/elétrons no isolante.

A Figura 7 mostra o comportamento da corrente de dreno que é fortemente influenciada pela tensão dreno-fonte (v_{DS}), para pequenos sinais. Assim, o transistor comporta-

se como um resistor linear cuja resistividade depende de v_{DS} .

Figura 7 - Variação i_D em função de v_{DS}



Fonte: Adaptado SEDRA/SMITH 2007.

O transistor tem duas regiões de condução: triodo e saturação. Na região de triodo o transistor funciona como um resistor linear que depende da tensão de porta-fonte (v_{GS}), que gera um campo elétrico que atrai os elétrons criando um canal entre o dreno e a fonte; permitindo que a corrente elétrica flua pelo dispositivo (i_D). Com o aumento v_{GS} a corrente de dreno chega a saturar, pois praticamente todos os elétrons existentes no substrato tipo P já foram atraídos pelo campo elétrico gerado por v_{GS} . A Figura 8 mostra a relação de i_D com respeito a v_{DS} .

A região de triodo é dada pela Equação 9 (SEDRA/SMITH, 2007)

$$i_D = \frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L} \right) \cdot \left[(v_{GS} - V_T) \cdot v_{DS} - \frac{1}{2} \cdot v_{DS}^2 \right]. \quad (9)$$

Já a região de saturação é dada pela Equação 10 (SEDRA/SIMITH, 2007)

$$i_D = \frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L} \right) \cdot (v_{GS} - V_T)^2, \quad (10)$$

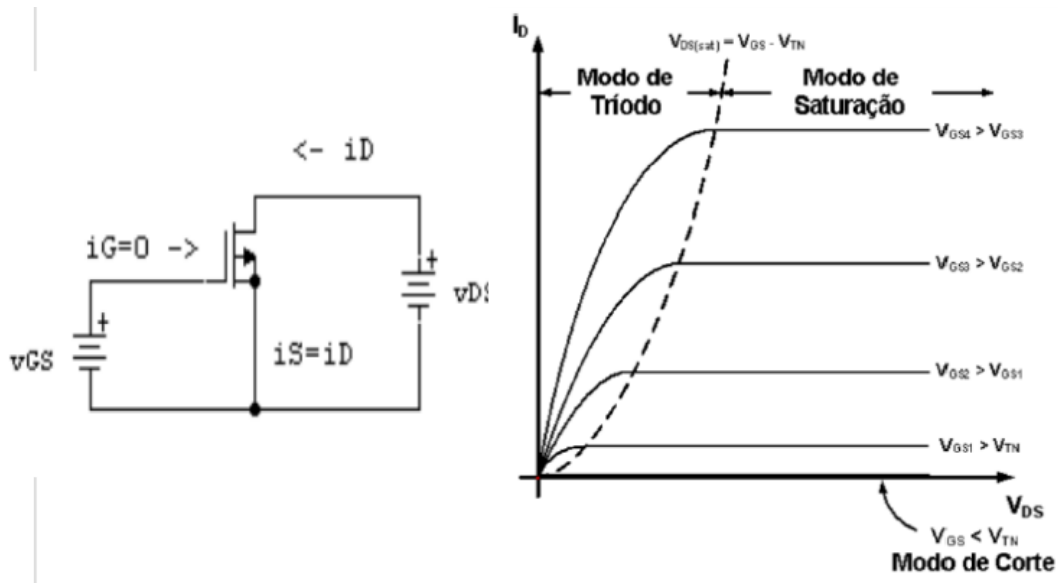
em que C_{ox} é a capacitância do SiO_2 ; μ_n é a mobilidade dos elétrons no canal; W e L são as dimensões do transistor e V_T é a tensão de limiar, que varia para cada transistor.

Para que o canal seja criado é necessário que $v_{GS} > V_T$, como $v_{GS} - v_{DS} \geq V_T$ ou $v_{DS} \leq v_{GS} -$

V_T , isso implica que se v_{DS} for pequeno implicará $v_{DS}^2 \approx 0$. Nesse caso a corrente será dada pela Equação 11 (SEDRA/SMITH, 2007).

$$I_D \approx \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot (v_{GS} - V_T) \cdot v_{DS}. \quad (11)$$

Figura 8 - Corrente dreno em função da v_{GS} de um MOSFET



Fonte: Adaptado de <http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAAAmFsAD-1.png>, acessado em 04/03/18.

Na região linear com o MOSFET trabalhando como um resistor, seu comportamento é descrito pela Equação 12 (SEDRA/SMITH, 2007)

$$r_{DS} \equiv \frac{v_{DS}}{I_D} = \left[\mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T) \right]^{-1}. \quad (12)$$

A medida que v_{GS} aumenta a tensão é determinada pela Equação 13 (SEDRA, 2007)

$$V_{VO} \equiv V_{GS} - V_T. \quad (13)$$

Na saturação, o canal está sendo estrangulado por conta de v_{DS} , já no limite entre saturação e triodo o transistor é definido pela Equação 14 (SEDRA, 2007)

$$v_{DS} = v_{GS} - V_T. \quad (14)$$

2.6.1 MOSFET como detector de raios X

A sensibilidade de um MOSFET à radiação ionizante é conhecida há mais de 30 anos na instrumentação nuclear (HUGHES, 1988). De fato, correlaciona-se a variação da tensão de porta com a dose depositada no dispositivo. Quando fótons ionizantes interagem com a estrutura cristalina do semicondutor, cargas elétricas (elétrons e lacunas) podem ser geradas, sofrendo ação do campo elétrico formado entre a porta (G) e corpo (B) do transistor; implicando em um aumento do fluxo de elétrons entre fonte (S) e dreno (D).

Uma forma de correlacionar a variação da tensão de limiar com a dose depositada no dispositivo é dada pela Equação 15 (SIEBEL, 2013).

$$\Delta V_{OUTn} = \frac{\Delta V_{out}(mV)}{98,1(mV/Gy) \cdot D_T(Gy)}, \quad (15)$$

em que ΔV_{OUTn} é a tensão normalizada; ΔV_{OUTi} é a variação da tensão de saída 98,1 mV/Gy é a sensibilidade média e D_T é a dose acumulada.

Pereira (2015) mostrou que quando MOSFETs canal-P são irradiados em dosimetria para tomografias computadorizadas no modo passivo (sem aplicar tensão na porta) a tensão de limiar varia conforme a Equação 16; já no modo ativo (aplicando tensão a porta) o fenômeno é calculado pela Equação 17.

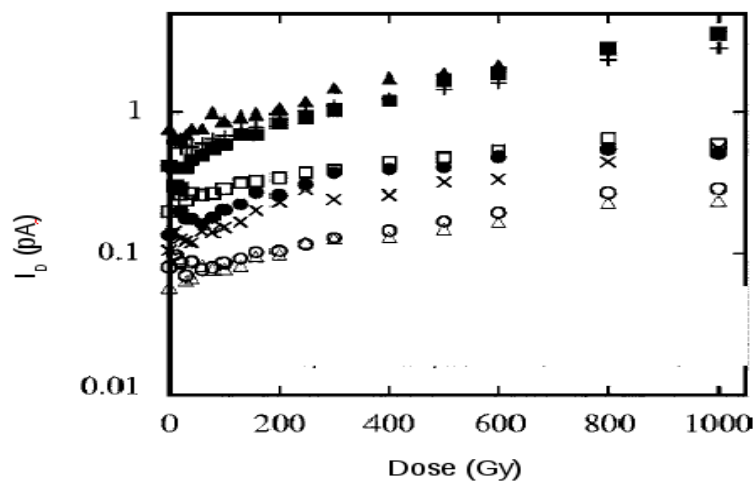
$$\Delta V_T \approx 0,0022 \cdot D^{0,4} \cdot t_{ox}^2, \quad (16)$$

$$\Delta V_T \approx 0,04 \cdot f \cdot t_{ox}^2, \quad (17)$$

em que D é a dose; t_{ox} é a espessura da camada de óxido e f é a probabilidade do elétron/lacuna escapar de uma recombinação. Assim, as Equações 15, 16 e 17 correlaciona a variação de limiar V_T com a dose depositada nos dispositivos.

A Figura 9, resultado do trabalho de Yixin Li (2006), mostra como a corrente de dreno varia com a dose depositada em um MOSFET canal-N. Nota-se que há um incremento da corrente de dreno quando o dispositivo opera no corte, embora ele não correlacione numericamente a variação da corrente de dreno com a dose.

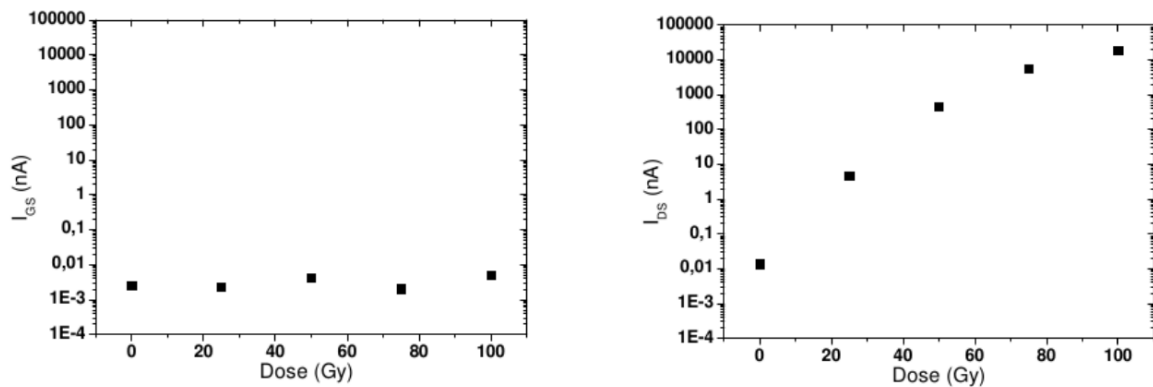
Figura 9 - Corrente de dreno em função da dose acumulada



Fonte: Adaptado de Yixin Li, 2006.

Outro resultado que correlaciona as correntes elétricas em um MOSFET com a dose de radiação, na faixa energética que se utiliza em radiodiagnóstico, é ilustrado na Figura 10. Observa-se que I_{GS} e I_{DS} variam com o incremento da dose (MAGALHÃES, 2010). Contudo verifica-se que I_{GS} praticamente não se altera, e que I_{DS} varia sensivelmente com a energia ionizante acumulada.

Figura 10 - Variações de I_{GS} e I_{DS} com a dose



Fonte: Adaptado de Magalhães, 2010.

O presente trabalho propõe um novo estudo para correlacionar dK_{ar}/dt e a dose depositada em um transistor de efeito de campo, medindo as variações da corrente de dreno.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Transistores MOSFETs

Para realizar os experimentos foram usados três transistores de diferentes tipos e aplicações, como de sinal, BSS138 da FAIRCHILD®, e os de potência, BUZ91 da SIEMENS® e FQP12N60 da FAIRCHILD®, todos canal N. As principais características dos transistores são apresentados na Tabela 1.

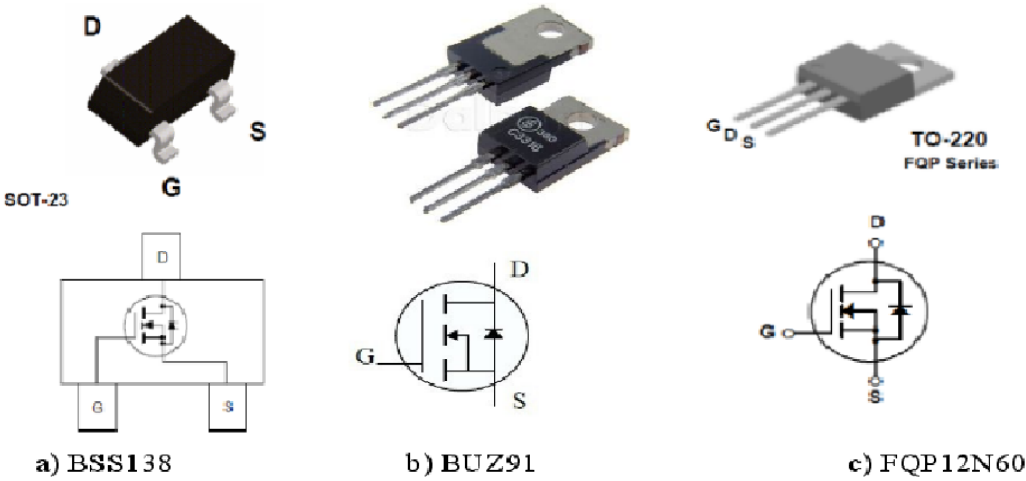
Tabela 1 - Características dos MOSFETs BSS138, BUZ91 e FQP12N60

	$R_{DS(ON)} (\Omega)$	$V_{GS} (V)$	$I_{D(MAX)} (A)$	$V_{GS(th)} (V)$
BSS138	3,5	10,0	0,36	1,3
BUZ91	0,8	20,0	8,0	3,0
FQP12N60	0,7	10,0	10,5	3,0

Fonte: Folha de dados dos fabricantes, FAIRCHILD® e SIEMENS®.

Os encapsulamentos, terminais e esquemas elétricos dos MOSFETs BSS138, BUZ91 e FQP12N60 são mostrados na Figura 11 a), b) e c) respectivamente.

Figura 11 - Transistores BSS138, BUZ91 e FQP12N60, encapsulamento e esquema elétrico



Fonte: Adaptado das Folhas de dados dos fabricante FAIRCHILD® e SIEMENS®.

3.2 Sistemas eletrônicos

Para medir a taxa de KERMA no ar, dK_{ar}/dt , produzido pelo gerador de raios X foi utilizada a câmara de ionização W23342, PTW®, número de série 1090 (Figura 12). Este equipamento é calibrado e rastreado, o que garante um processo de medição confiável, seu certificado de calibração encontra-se no Anexo B.

Figura 12 - Câmara de ionização PTW W23342 número de série 1090



Fonte: O Autor.

A câmara de ionização foi conectada ao eletrômetro Keithley® modelo 6517A que, além de fornecer a tensão de polarização, é capaz de medir corrente elétrica gerada na câmara na radiação ionizante quando submetida ao feixe de raios X. Na Figura 13 são mostrados um eletrômetro Keithley®, um termômetro Hart Scientific®, modelo 1529; e um barômetro Druck®, modelo DPI 740.

Figura 13 - Eletrômetro Keithley®, termômetro Hart Scientific® e barômetro Druck®



Fonte: O autor.

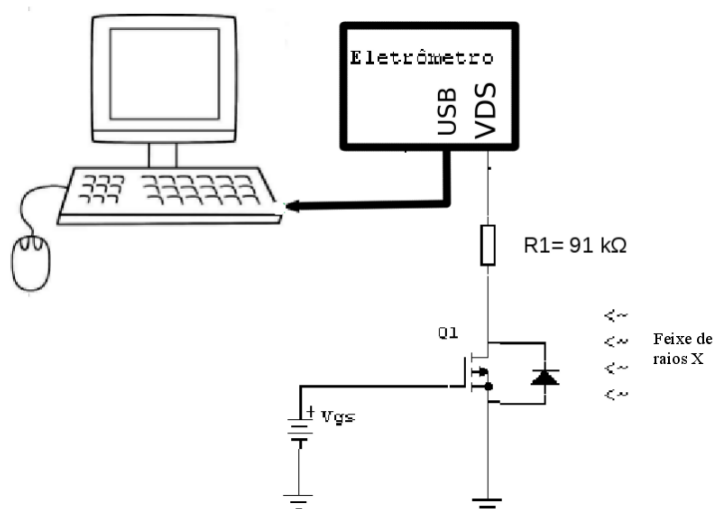
Para medir a corrente de dreno e controlar V_{GS} foi usado o eletrômetro Sciencs®, modelo EFF1506 (Figura 14). Este instrumento pode fornecer a tensão de alimentação do transistor ($+V_{DS}$), o sinal de V_{GS} e simultaneamente medir a corrente de dreno. O resistor de polarização escolhido para todos os MOSFETs foi 91 k Ω (R1), e a tensão de polarização do resistor selecionada foi de 3 V ($+V_{DS}$), pois essa tensão é suficiente para saturar a corrente de dreno. A Figura 15 mostra de forma simplificada o diagrama esquemático do processo de medição, enquanto a Figura 16 mostra o arranjo experimental desenvolvido para posicionar os transistores sempre na mesma posição garantindo mesma geometria.

Figura 14 - Eletrômetro Sciencs®, modelo EFF 1506



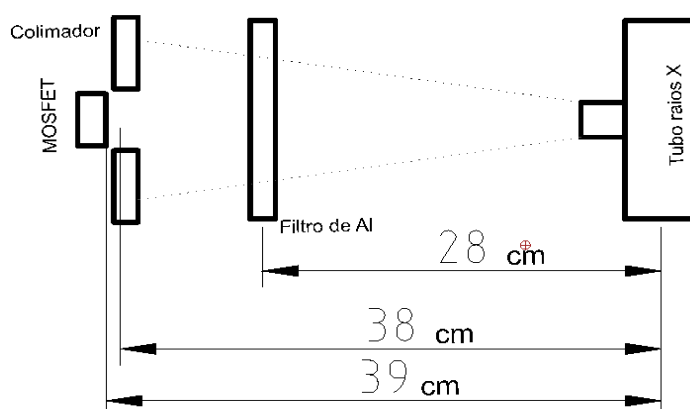
Fonte: O autor.

Figura 15 - Arranjo para medir I_D e controlar V_{GS}



Fonte: O autor.

Figura 16 - Arranjo experimental para irradiação

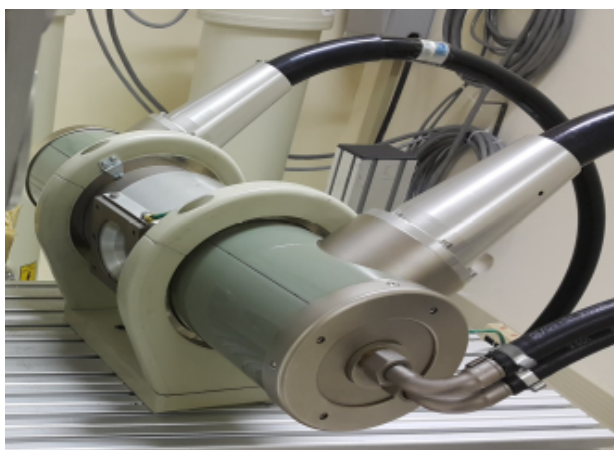


Fonte: O autor.

3.3 Gerador de raios X

Neste trabalho foi utilizado um equipamento gerador de raios X PANTAK[®] HF320. A Figura 17 mostra o tubo, com capacidade de gerar, controladamente, tensões até 320 kV. Sua exatidão é de $\pm 1\%$ e a repetitividade de $\pm 0,03\%$ (PANTAK, 2006). O gerador de raios X é dotado de controles de tensão e corrente de tubo além do tempo de irradiação por meio do painel de controle mostrado na Figura 18, o que permite simular características dos equipamentos de radiodiagnóstico.

Figura 17 - Cabeçote do tubo de raios X



Fonte: O autor.

Figura 18 - Painel de controle do equipamento de raios X



Fonte: O autor.

3.4 Procedimentos de irradiação

Durante a irradiação foi utilizado um filtro com espessura de 1 mm de alumínio para padronizar o feixe de raios X simulando um equipamento empregado no radiodiagnóstico, com a faixa de energia em torno de 100 keV ($\pm 20\%$).

3.4.1 Irradiação dos MOSFETs

O primeiro procedimento para irradiar os MOSFETs consistiu em aplicar sistematicamente valores de dose em degraus de 20 Gy, até atingir o valor máximo de 100 Gy. Imediatamente após cada dose de 20 Gy foi traçada a curva $I_D \times V_{GS}$ do transistor, com V_{GS} variando sistematicamente em degraus de 50 mV até atingir 3 V.

A segunda parte do procedimento consistiu em verificar, em tempo real e para cada tipo de MOSFET, a resposta de I_D durante a irradiação. Para isso variou-se dK_{ar}/dt em função da corrente de tubo do equipamento de raios X selecionada no seu painel de controle de 5 a 25 mA com degraus de 5 mA.

A terceira etapa do procedimento experimental consistiu em avaliar se uma mudança na energia do espectro do feixe de raios X poderia causar alguma variação na resposta do MOSFET. Isto foi feito variando o potencial de tubo em $\pm 20\%$, o que corresponde a 80 kV e 120 kV. Os procedimentos de irradiação dos MOSFETs foram feitos com amostras em

triplicata. Os transistores quando eram irradiados eram descartados, ou seja, eles jamais eram reutilizados.

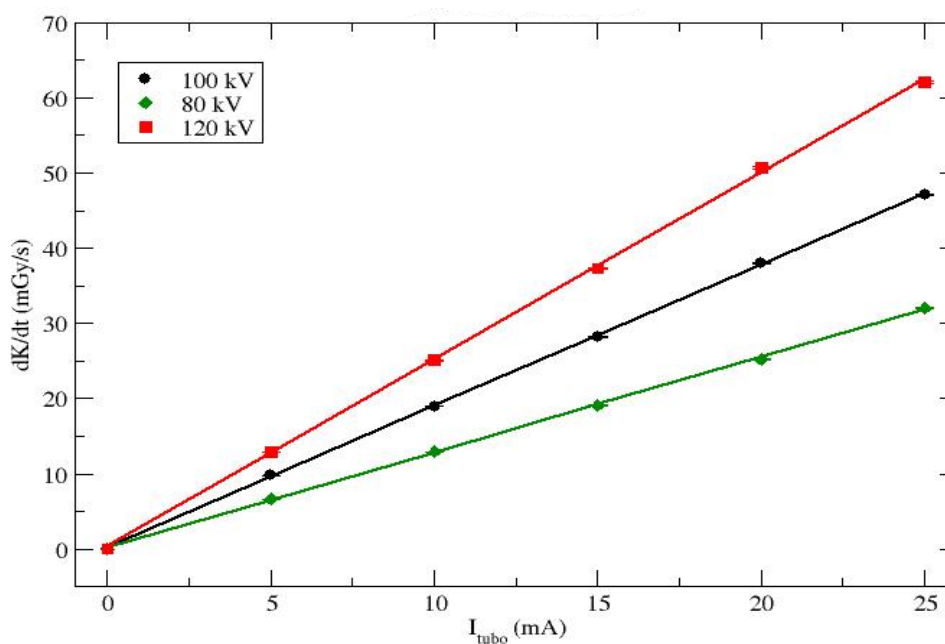
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 As taxas de KERMA no ar medidas e calculadas.

A Figura 19 apresenta as taxas de KERMA no ar variando a corrente de tubo e a tensão de tubo de 80 kV, 100 kV e 120 kV. O cálculo da incerteza dK_{ar}/dt é apresentado no Anexo A; percebe-se que a incerteza do sistema é baixa, logo o gerador de raios X é estável e confiável.

Neste esse trabalho foi considerado um feixe padronizado com uma tensão de tubo 100 kV; uma corrente de tubo 20 mA e uma filtração de 1 mm de alumínio. Outras duas dosimetrias foram realizadas para tensões de 80 e 120 kV.

Figura 19 - Taxa de KERMA no ar em função da corrente de tubo, variando a tensão aplicada ao tubo



Fonte: O autor.

A Tabela 2 apresenta as equações das taxas de KERMA no ar em função da corrente de tubo, variando o potencial elétrico aplicado ao tubo utilizando uma filtração adicional de 1 mm de alumínio.

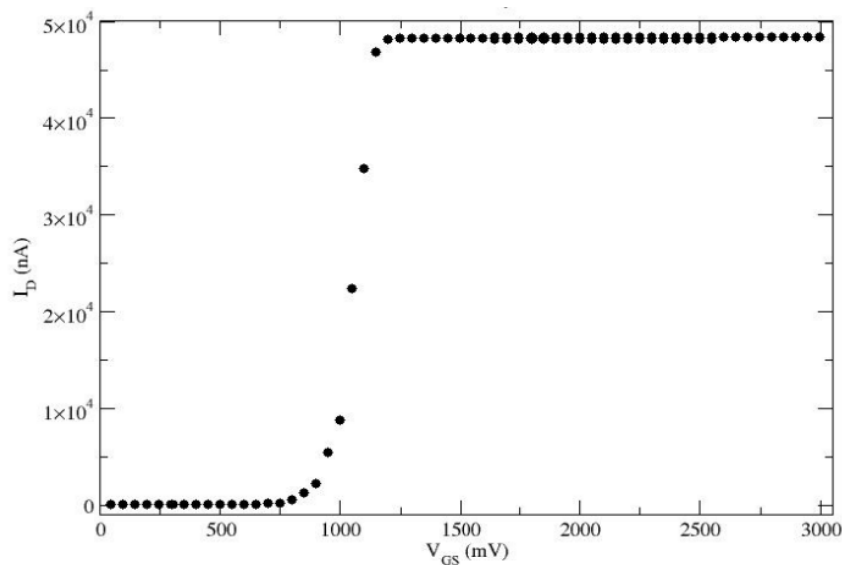
Tabela 2 - Equações das taxas KERMA no ar em função corrente tubo, para três potenciais do tubo

Potencial do tubo (kV)	dK_{ar}/dt (mGy/s)	Coefficiente de correlação (R)
80	$\dot{K}_{80\text{ kV}} = 0,12095 + 1,2681 \cdot I_{tubo}$	0,9998823
100	$\dot{K}_{100\text{ kV}} = -0,054286 + 1,6119 \cdot I_{tubo}$	0,9999567
120	$\dot{K}_{120\text{ kV}} = 0,2 + 2,492 \cdot I_{tubo}$	0,999858

Fonte: O autor.

4.2 Corrente de dreno em função de V_{GS}

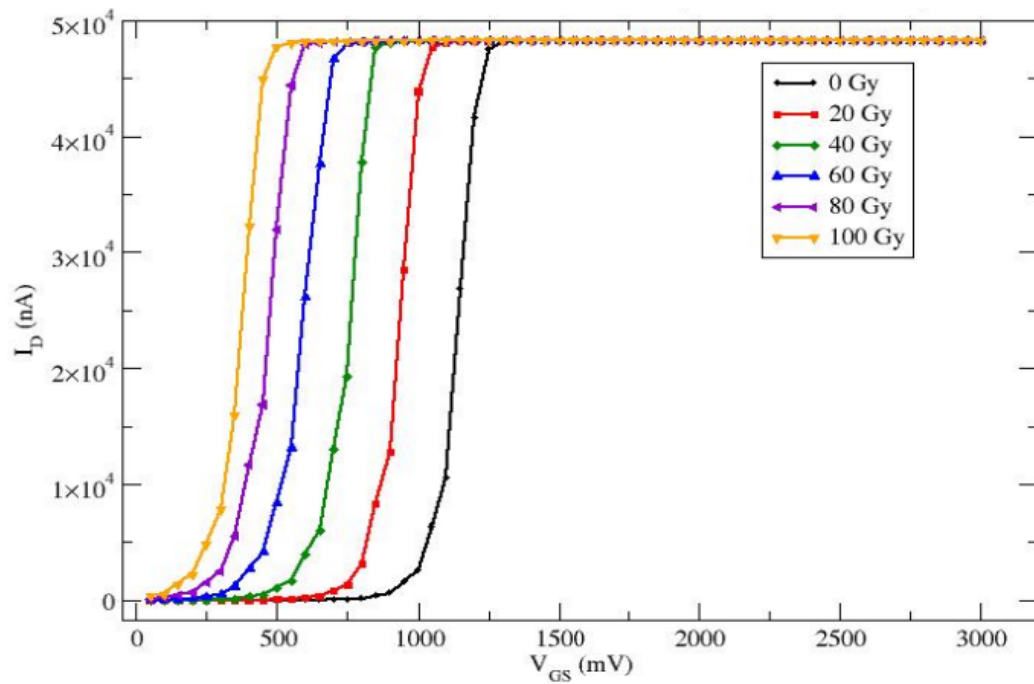
Antes de irradiar os MOSFETs foi preciso levantar a curva $I_D \times V_{GS}$ (Figura 20), para registrar o comportamento do transistor como referência. Assim seria possível observar as alterações dessas características e associá-los à dose depositada no cristal de silício.

Figura 20 - Corrente dreno em função da V_{GS} antes de irradiar

Fonte: O autor.

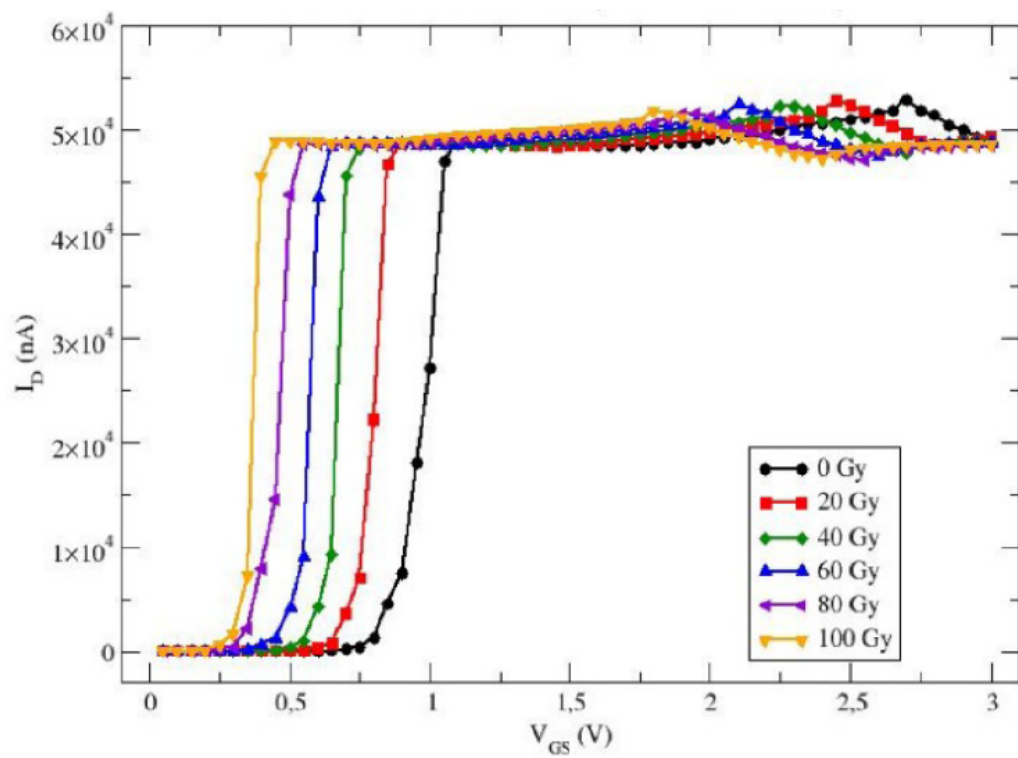
As curvas $I_D \times V_{GS}$ obtidas para cada tipo de transistor utilizado estão apresentados nas Figuras 21, 22 e 23. Pode-se observar que a curva de um transistor não irradiado ($D=0\text{Gy}$) apresenta o ponto de saturação diferente de qualquer outro. De fato, cada tipo de MOSFET tem a sua própria geometria (e.g. dimensão do canal, componente internamente conectado, etc.) e isso é determinante para o ponto de saturação, dependendo também do resistor de polarização e da tensão $+V_{DS}$.

Figura 21 - Corrente de dreno do MOSFET BSS138 em função de V_{GS} e da dose



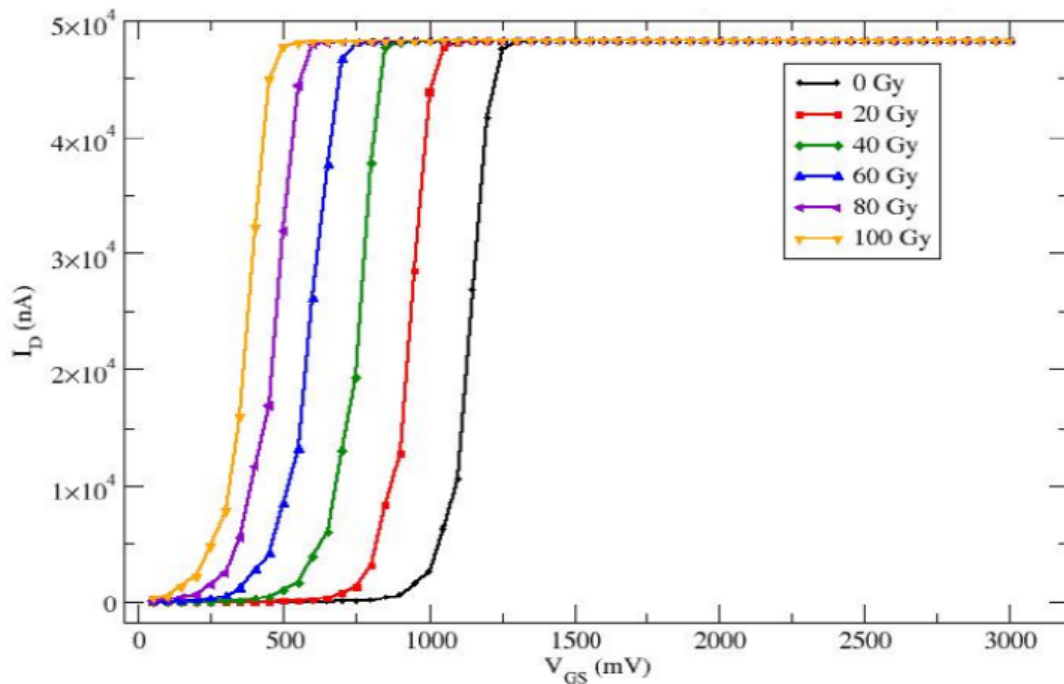
Fonte: O autor.

Figura 22 - Corrente de dreno do MOSFET BUZ91 em função de V_{GS} e da dose



Fonte: O autor.

Figura 23 - Corrente de dreno do MOSFET FQP12N60 em função de V_{GS} e da dose

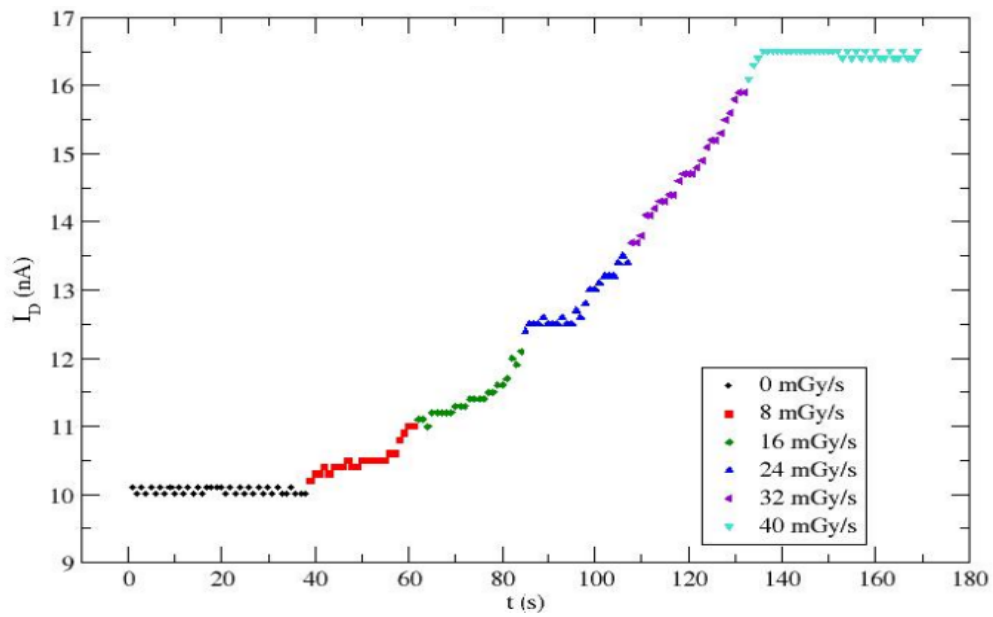


Fonte: O autor,

Esses resultados provam que à medida que um MOSFET de canal-N recebe uma certa dose de raios X a corrente de dreno aumenta sistematicamente, tanto para o transistor de sinal BSS138, quanto para os transistores de potência. Esses gráficos evidenciam que todos os tipos de transistores têm respostas bastante semelhantes, ou seja, ocorre um deslocamento na curva $I_D \times V_{GS}$ sistematicamente para esquerda. Observa-se também que o MOSFET BUZ91 tem uma espécie de assinatura, isto é, um pico suave na região de saturação que também se desloca sistematicamente para esquerda com o aumento da dose.

Foi realizado um teste em tempo real para verificar como a corrente de dreno varia em função da dK_{ar}/dt , para cada tipo de MOSFE. Assim, mediu-se a corrente de dreno ao longo do tempo variando o campo ionizante. Para este teste foi escolhido uma tensão de porta V_{GS} suficientemente baixa de forma a ter um canal estreito, para cada tipo de transistor. Assim, as tensões V_{GS} foram 450 mV, 500 mV e 950 mV para BSS138, BUZ91 e FQP12N60, respectivamente. No resultado para o BSS138, pode-se verificar que a corrente de dreno do transistor de sinal (BSS138) varia continuamente, o que leva a concluir que provavelmente devido ao encapsulamento desse dispositivo ser pequeno comparado aos demais, não há uma geração de elétrons secundários suficiente para diferenciar a variação de corrente de dreno quando dK_{ar}/dt varia. Isso pode significar que tal dispositivo não serviria como detector de radiação para mensurar dK_{ar}/dt .

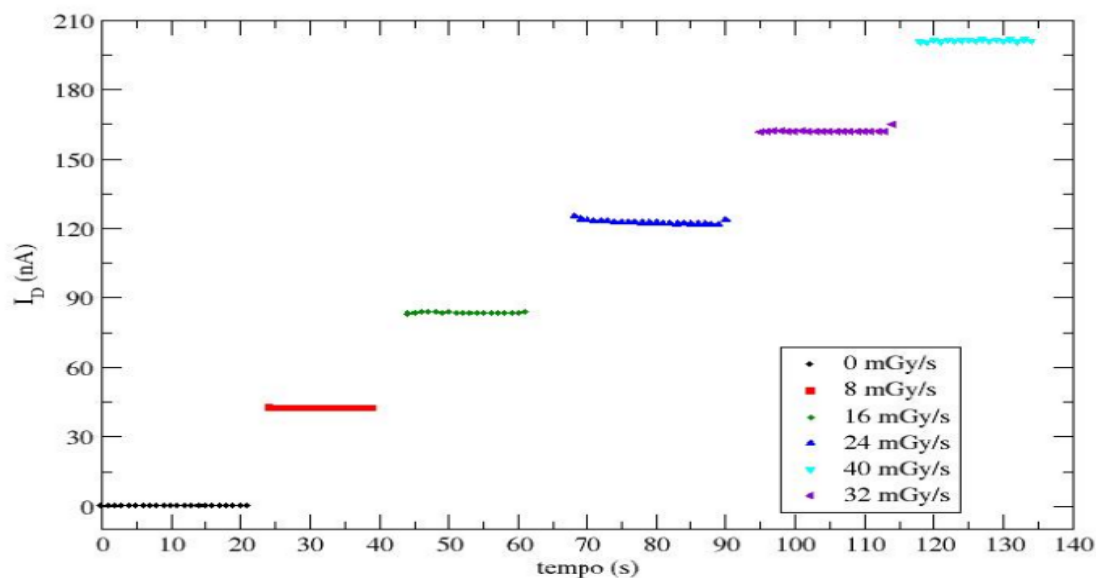
Figura 24 - Corrente de dreno do BSS138 em função do tempo variando a dK_{ar}/dt



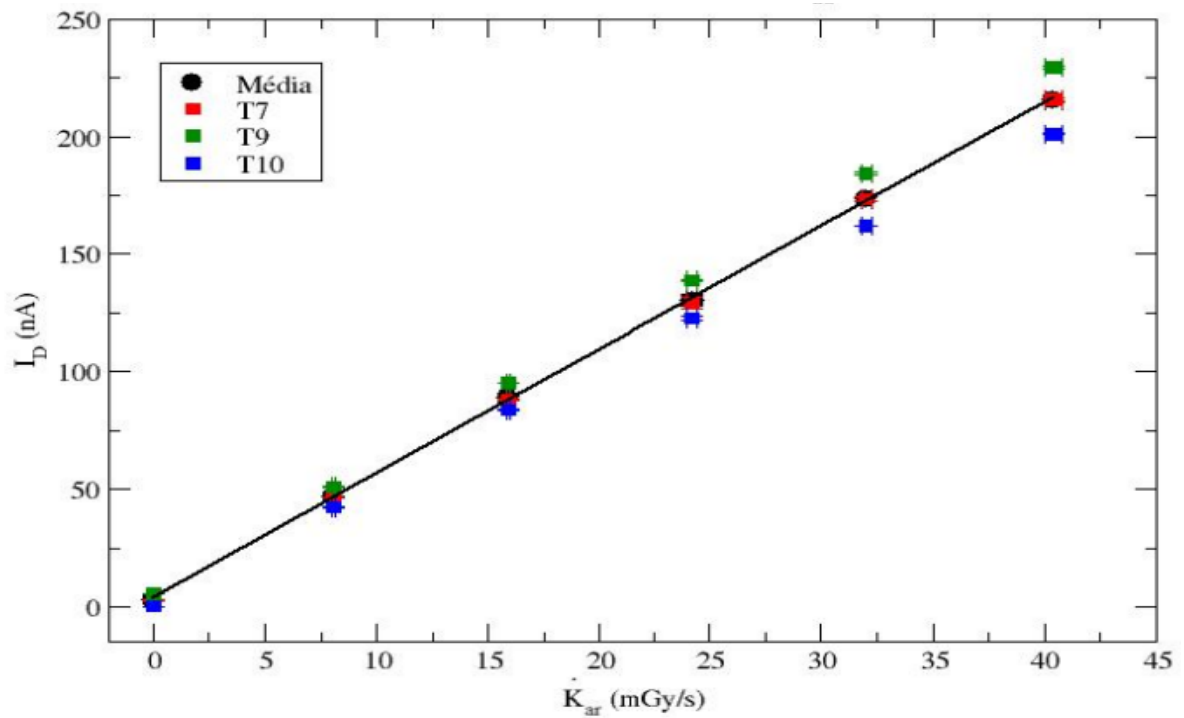
Fonte: O autor.

Em contrapartida, o transistor de potência BUZ91 apresenta valores de corrente de dreno quantizados, ou seja, para cada dK_{ar}/dt com degrau de aproximado 8 mGy/s, em um certo tempo a leitura de I_D se mantém constante (Figura 25). Ao calcular a média e desvio padrão de cada degrau da Figura 25, obtêm-se a Figura 26 e a Tabela 3.

Figura 25 - Corrente de dreno para o MOSFET BUZ91 em função do tempo e da taxa de KERMA no ar



Fonte: O autor.

Figura 26 - Corrente de dreno para o MOSFET BUZ91 em função dK_{ar}/dt 

Fonte: O autor.

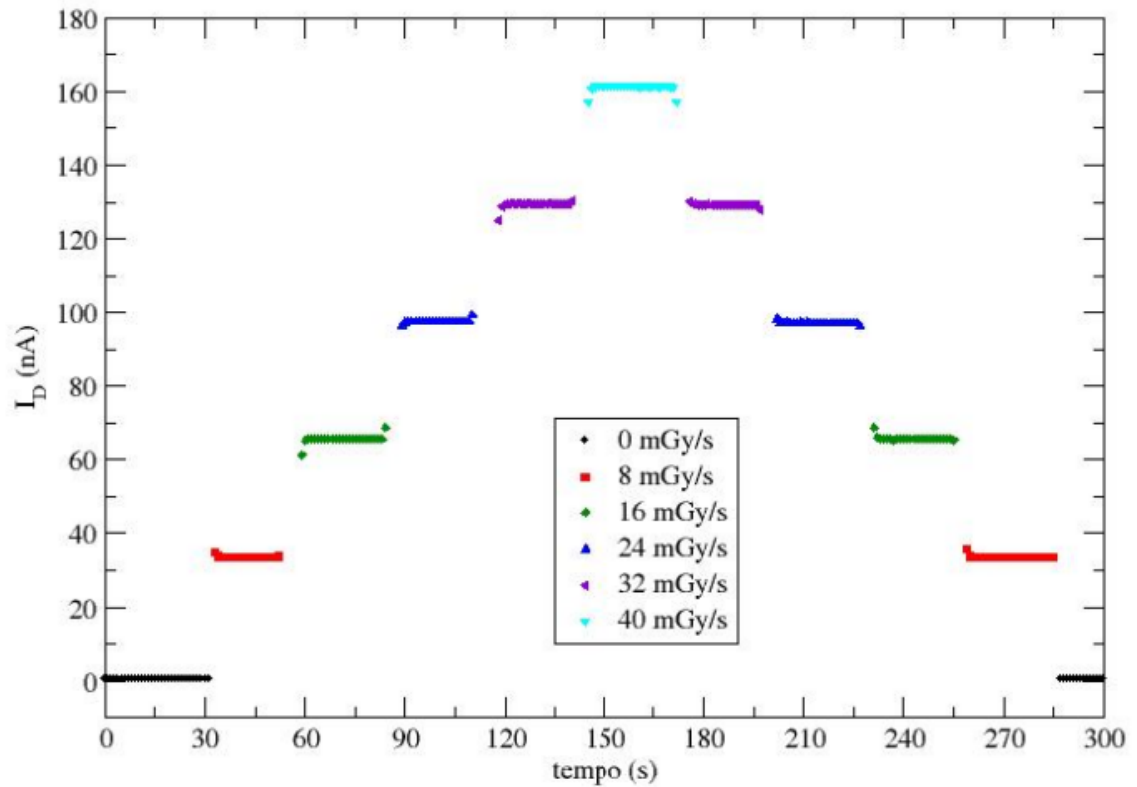
Tabela 3 - Corrente de dreno em função dK_{ar}/dt , BUZ91.

	$I_D \times dK_{ar}/dt$	R
Média	$I_{D_{média}} = 3,8597 + 5,2623 \cdot \dot{K}$	0,9999008
T8	$I_{D_{T8}} = 3,3277 + 5,2747 \cdot \dot{K}_{ar}$	0,9998997
T9	$I_{D_{T9}} = 6,1475 + 5,5387 \cdot \dot{K}_{ar}$	0,9999387
T10	$I_{D_{T10}} = 2,1039 + 4,9735 \cdot \dot{K}_{ar}$	0,9997448

Fonte: O autor.

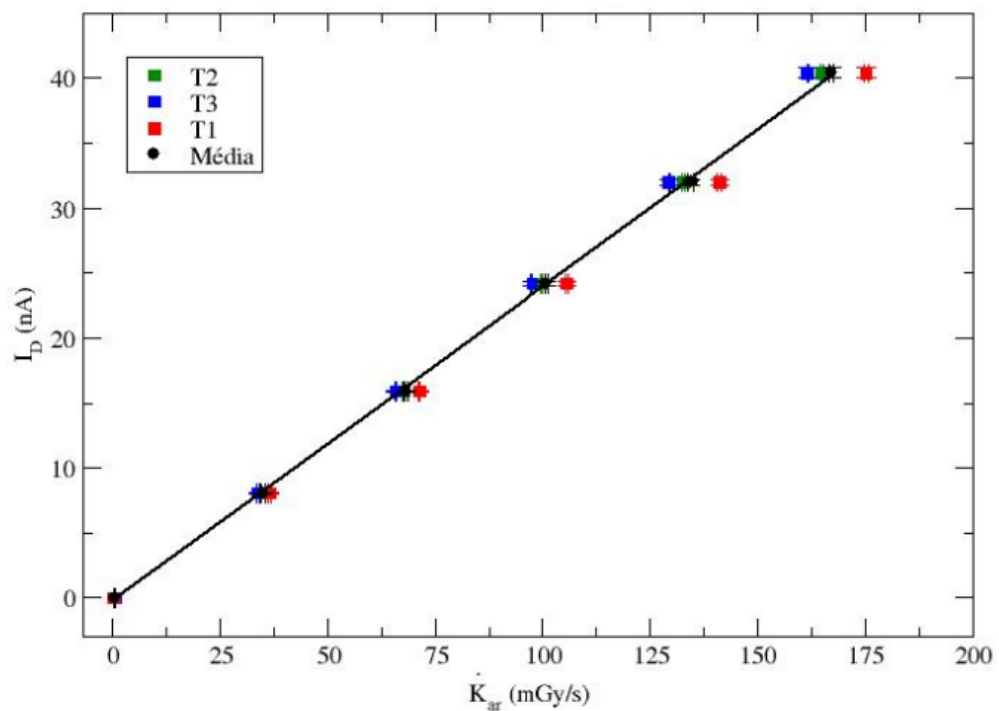
O comportamento do MOSFET FQP12N60 foi idêntico ao comportamento do transistor BUZ91 conforme Figuras 27 e 28, e a Tabela 4.

Figura 27 - Corrente dreno para o MOSFET FQP12N60, em função do tempo variando taxa de KERMA no ar



Fonte: O autor.

Figura 28 - Corrente de dreno para o MOSFET FQP12N60 em função da taxa de KERMA no ar.



Fonte: O autor.

Tabela 4 - Corrente de dreno em função dK_{ar}/dt , FQP12N60.

MOSFET	$I_D \times dK_{ar}/dt$	R
Média	$I_{D_{média}} = 1,2149 + 4,134 \cdot \dot{K}$	0,9998944
T11	$I_{D_{T11}} = 1,0497 + 4,3404 \cdot \dot{K}$	0,9998829
T12	$I_{D_{T12}} = 1,3469 + 4,0751 \cdot \dot{K}$	0,999868
T13	$I_{D_{T13}} = 1,2481 + 3,9865 \cdot \dot{K}$	0,9999171

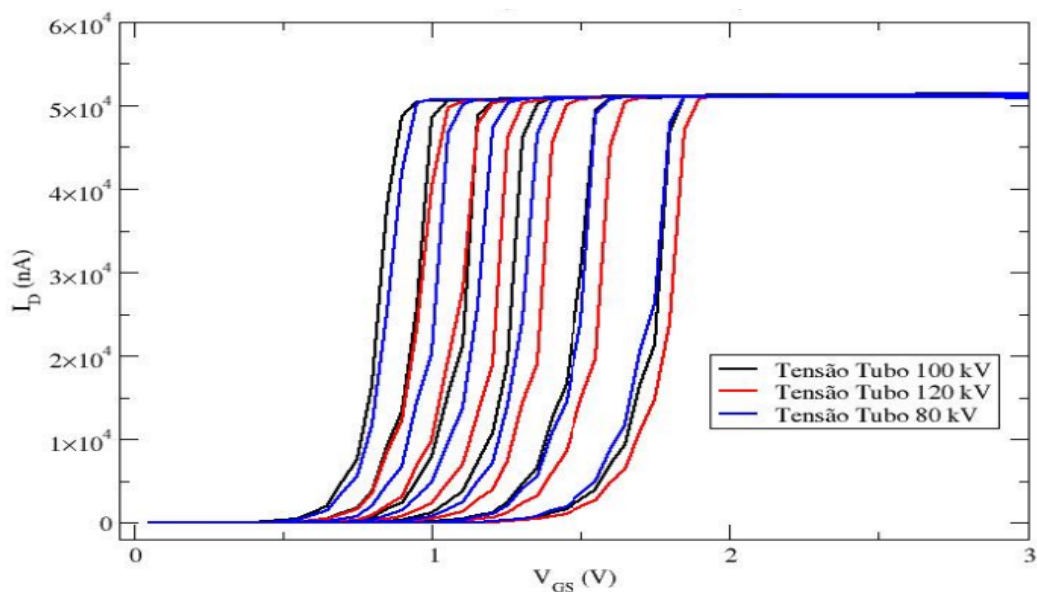
Fonte: O autor.

Observa-se que para baixas doses não há degradação do transistor pois ao decrementar a corrente de tubo não houve alteração na corrente de dreno (Figura 27), pois ao diminuir a dK_{ar}/dt gradativamente a resposta da corrente de dreno se mantém.

A Figura 28 representa o comportamento linear da corrente de dreno do MOSFET FQP12N60 com respeito a variação de dK_{ar}/dt , na Tabela 4 são mostrados as regressões lineares para cada transistor, mostrando a média com seus respectivos desvios padrão.

Tanto na Tabela 3 quanto na Tabela 4 nota-se que os coeficientes de correlação (R) são próximos de 1 o que implica em uma forte dependência da corrente de dreno com dK_{ar}/dt .

O resultado da influência da mudança do espectro do feixe de raios X, devido a variação de $\pm 20\%$ no potencial do tubo está mostrado na Figura 29. Nota-se que a corrente de dreno é proporcional ao potencial do tubo. Portanto, isso mostra que para cada tensão de tubo deve-se aplicar um fator de calibração específico.

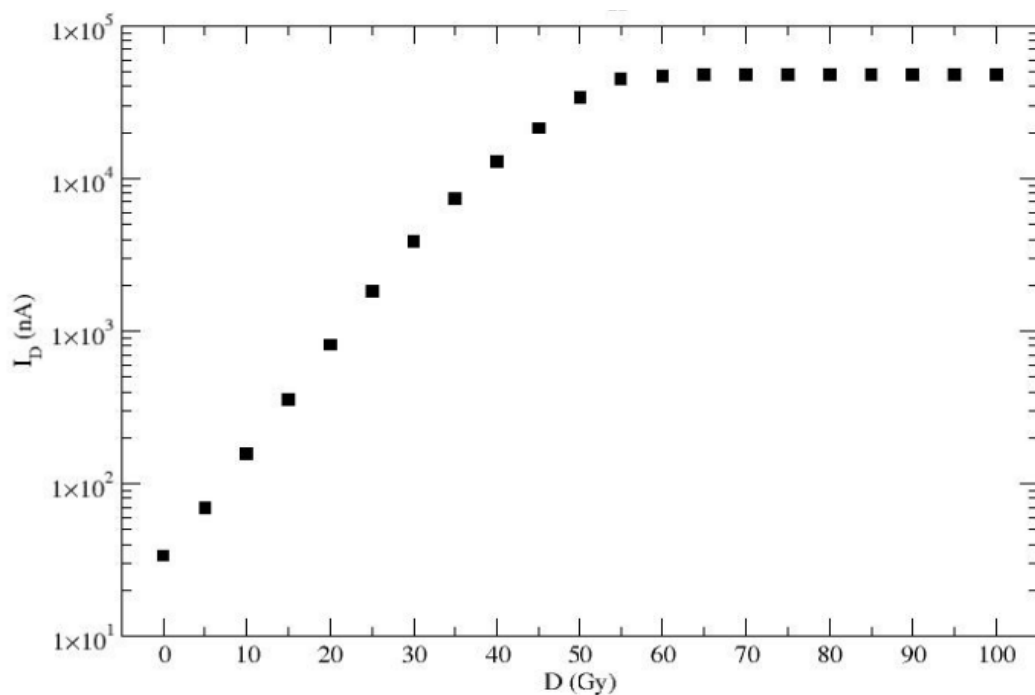
Figura 29 - Corrente dreno em função V_{GS} variando dose e tensão tubo

Fonte: O autor.

4.2.1 Corrente de dreno em função da dose acumulada

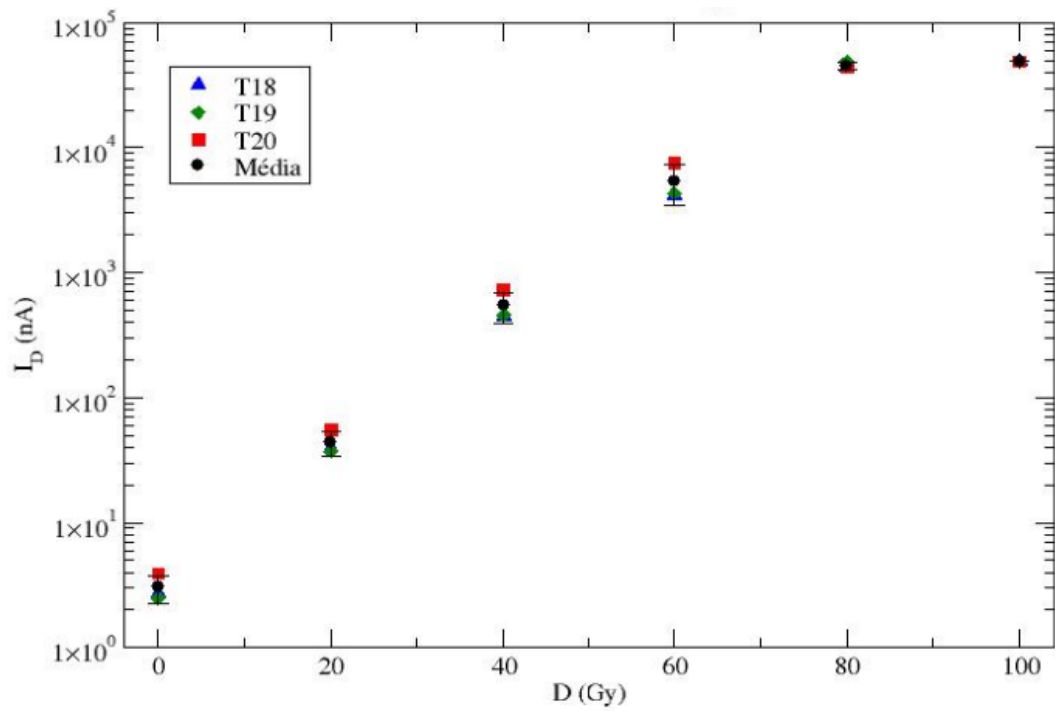
Quando um MOSFET é polarizado com V_{GS} abaixo de V_T a corrente de dreno é baixa. Contudo, ao irradiar os transistores observa-se um incremento da corrente de dreno (I_D). A camada de óxido de silício pode estar sendo degradada e as ligações covalentes sendo quebradas ($O=Si=O$) e provavelmente não conseguem recombinar as ligações químicas. Além disso, pode estar havendo formação de elétrons-lacunas no cristal de forma que são atraídos pelo campo elétrico formado por V_{GS} que incrementam a corrente de dreno à medida que a dose aumenta. Assim, os elétrons ou lacunas conseguiriam um caminho livre para circular no dispositivo implicando no aumento de I_D , mesmo para uma tensão de polarização baixa. A Figura 30 evidencia que existe uma saturação no valor da corrente de dreno em função da dose acumulada no dispositivo. Essa saturação começa a ocorrer próximo de 65 Gy para o transistor de sinal (Figura 30) e para os transistores de potência BUZ91 e FQP12N60 esse valor está próximo de 85 Gy, como mostrados nas Figuras 31 e 32 respectivamente.

Figura 30 - Corrente dreno do MOSFET BSS138 em função da dose, $V_{GS}=450$ mV



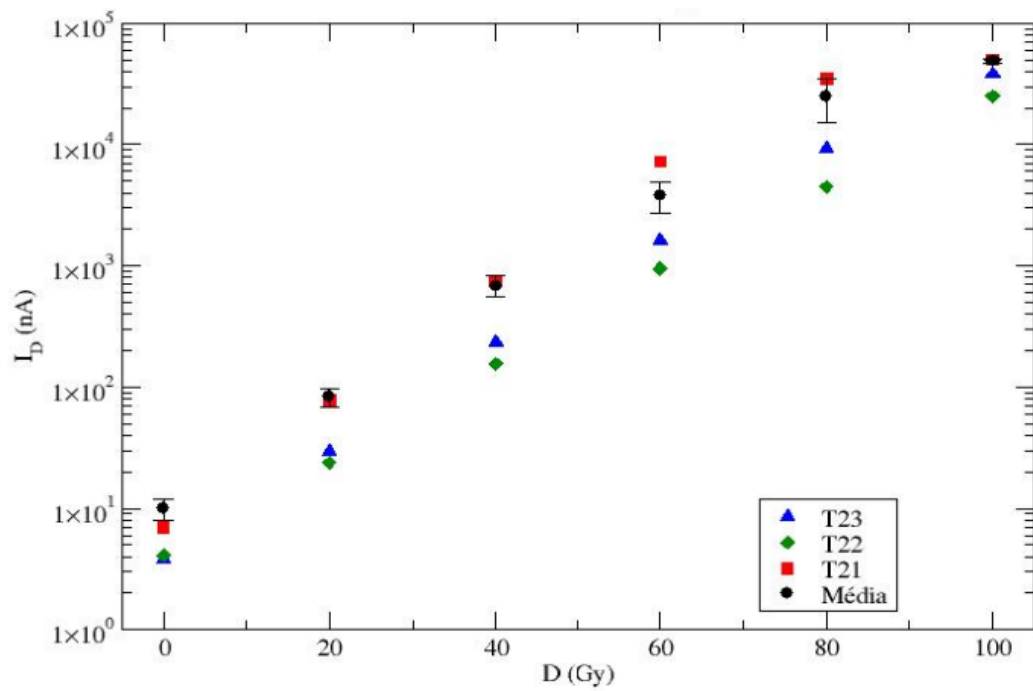
Fonte: O autor.

Figura 31 - Corrente dreno (BUZ91) em função da dose, $V_{GS}=500$ mV



Fonte: O autor.

Figura 32 - Corrente dreno (FQP12N60) em função da dose, $V_{GS}=950$ mV



Fonte: O autor.

A Tabela 5 compila as equações para cada amostra do MOSFET BUZ91, e seus respectivos coeficientes de correlação, inclusive a média das três amostras, expostos ao campo de irradiação com a corrente de dreno variando com a dose acumulada. Na Tabela 6 tem-se a compilação equivalente dos dados para o MOSFET de potência FQP12N60.

Tabela 5 - Corrente de dreno em função da dose, BUZ91

	$I_D \times D$	R
Média	$I_{D_{média}} = 3,6431 \cdot e^{0,12009 \cdot D}$	0,9989485
T18	$I_{D_{T18}} = 4,9512 \cdot e^{0,11786 \cdot D}$	0,9971828
T19	$I_{D_{T19}} = 2,8859 \cdot e^{0,12262 \cdot D}$	0,9994611
T20	$I_{D_{T20}} = 3,1591 \cdot e^{0,11997 \cdot D}$	0,999397

Fonte: O autor.

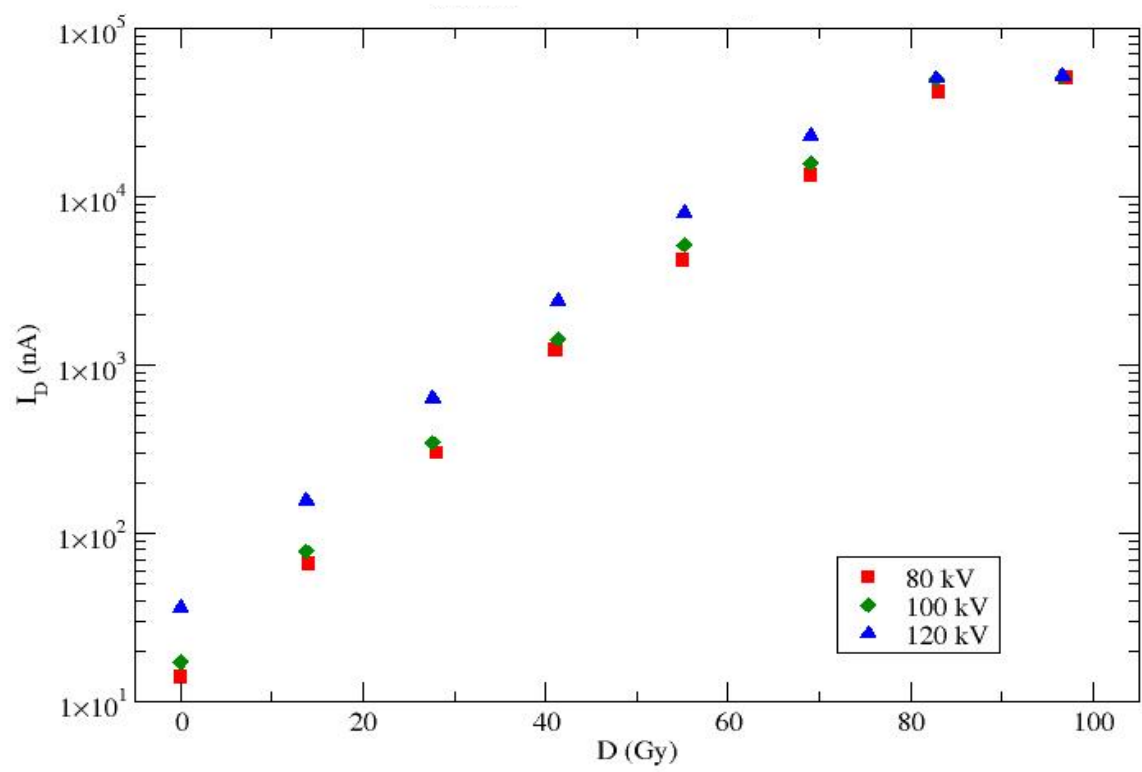
Tabela 6 - Corrente de dreno em função da dose, FQP12N60

	$I_D \times D$	R
Média	$I_{D_{média}} = 11,362 \cdot e^{0,097386 \cdot D}$	0,9990687
T21	$I_{D_{T21}} = 9,2245 \cdot e^{0,10642 \cdot D}$	0,9970571
T22	$I_{D_{T22}} = 4,2331 \cdot e^{0,088418 \cdot D}$	0,9994976
T23	$I_{D_{T23}} = 4,1435 \cdot e^{0,097917 \cdot D}$	0,9994034

Fonte: O autor.

Na Figura 33 é apresentado o resultado para o estudo da variação do potencial do tubo de raios X variando $\pm 20\%$. Pode-se observar que a corrente de dreno, I_D , para ambos MOSFET de potência, é mais baixa quando o potencial selecionado é de 80 kV. Por outro lado, o valor de I_D é mais alto se o espectro é originado de um potencial de 120 kV. Isto evidencia que no procedimento de medida tem que ser levado em conta um fator de calibração com relação ao potencial de tubo do raios X. Contudo, observa-se que há uma forte semelhança nas respostas para os valores de potencial de tubo escolhidos.

Figura 33 - Corrente de dreno do MOSFET FQP12N60 em função da dose variando a tensão do tubo



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, ao contrário do método convencional conhecido para medir a dose por meio da variação da tensão de limiar ΔV_T do dispositivo, foi apresentado um procedimento inovador de medição da dose de radiação com o MOSFET canal N, o qual consiste em analisar a variação da corrente dreno, para dois tipos de transistores: o de sinal e o de potência. Os experimentos consistiram em avaliar a resposta desses dispositivos submetidos a um feixes de raios X filtrado, com 1 mm alumínio, na faixa energética que é utilizado em radiologia diagnóstica. Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que:

- O transistor de sinal, BSS138, não apresenta uma resposta para se estimar a taxa de KERMA no ar (dK_{ar}/dt), pois sua resposta em função dessa grandeza não varia de forma quantizada.
- No entanto, é possível utilizar o MOSFET BSS138 como dosímetro no modo passivo, correlacionando a variação exponencial da corrente de dreno com o incremento da dose acumulada.
- Os MOSFETs de potência, BUZ91 e FQP12N60, apresentaram uma resposta da corrente de dreno em função da dK_{ar}/dt de forma quantizada e linear cujos coeficientes dependem do tipo de transistor e corrente de dreno inicial para uma certa tensão de polarização de porta V_{GS} .
- Para os transistores de potência a corrente de dreno pode ser medida em tempo real, o que viabilizaria o uso como dosímetros, se previamente calibrados;
- Embora de forma logarítmica, a corrente de dreno final dos transistores de potência varia monotonicamente com a dose acumulada, o que implica que estes dispositivos podem operar como dosímetros no modo passivo de leitura.
- A análise da resposta dos MOSFETs em função da variação da tensão de tubo do equipamento de raios X evidencia que há uma dependência energética, e por isso fatores de calibração devem ser obtidos.

Assim o presente trabalho evidencia que o método apresentado inova o estado da técnica no que concerne a dosimetria com MOSFET em feixes de raios X diagnósticos.

REFERÊNCIAS

ATTIX F. H. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.

Avaliação de dados de medição- Guia para a expressão de incerteza de medição, setembro de 2008.

BROWN, L. S.; HOLME, T. A. **Chemistry for Engineering students**. 2.ed. USA: Brooks/Cole, 2006.

CEMBER, H.; JOHNSON, T. E. **Introduction to Health Physics**. 4.ed. USA:McGraw-Hill, 2009.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER J. **Fundamentos de Física v.3: Eletromagnetismo**. 8. ed. São Paulo: LTC, 2009.

HUBBEL, J. H. **Photo Mass Attenuation and Energy- absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV**, Int. J. Appl. Radiat Isot. Vol. 3, 1982.

HUGHES, R. C., **Miniature radiation dosimeter for in vivo radiation measurements**, 1988.

ICRU - International Commission on Radiation Units. **Report 74**. Patient dosimetry for X rays used in medical imaging, Stockholm, Sweden, 2005.

LUTZ, G., **Semiconductor Radiation Detectors**. 1. ed. New York, USA: Springer, 1999.

MAGALHÃES, C M S. **Effect on the insulation material of a MOSFET device submitted to a standard diagnostic radiation beam**. J. Phys.: Conf. Ser. 249 012032, 2010.

NE TECHNOLOGY LIMITED, Bath Road, Beenham, Reading, Berkshire. RG7 5PR. England, 1997.

PANTAK. **Industrial x-ray unit operator's manual** – Bipolar model, with PMC1000.

Pantak Ltd. USA, 2006.

PEREIRA, L. M. **Caracterização do MOSFET MOSkin para dosimetria em tomografia computadorizada**. 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

REZENDE, S. M. **A Física de Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 1.ed. Recife: Editora da Universidade Federal de Pernambuco, 1996.

SANTOS, L.A.P. **Curso de instrumentação nuclear**, em fase de publicação 2012.

SANTOS, L.A.P. Cinthia M.S. Magalhães, C. M. S. Silva, J. O. Filho, J. A. Silva Jr., E. F. Santos, W. M. **A feasibility study of a phototransistor for the dosimetry of computerized tomography and stereotactic radiosurgery beams**. Radiation Measurements, v.43, p 904-907, 2008.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**, 5.ed. - São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

SOUZA, R.; **Fabricação e Caracterização de Óxidos de Portas MOS Ultrafinas Crescidos sobre Superfícies Planas e com Degraus empregando Processos Convencional e Pirogênico**. São Paulo, 2006. 120 p. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

SIEBEL, O. F.; **Desenvolvimento de um dosímetro in vivo a MOSFET para aplicações em radioterapia**. Orientador, Carlos Galup-Montoro ; co-orientador, Márcio Cherem Schneider. - Florianópolis, SC, 2013. 139 p. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

SILVA, M.C. et al. **Determinação da tensão aplicada a tubos de raios X através do espectro de Bremsstrahlung obtido com um fotodiodo PIN**. Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, v.16, p. 13-20, 2000.

SZE, S. M. **Semiconductor Devices – Physics and Technology**. 2 ed. USA: John Wiley & Sons, 2002.

VIM- Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, RJ : INMETRO, 2012. 94 p.

YIXIN LI, L. E. Effects of x-ray irradiation on polycrystalline silicon, thin-film trasistors. University of Michigan. 2006.

ANEXO A - MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS AO PROCESSO DE MEDIÇÃO DA TAXA DE KERMA NO AR

A seguir é apresentado a técnica usada para calcular a incertezas associadas as leituras de dK_{ar}/dt produzidas pelo PANTAK HF320 usando a instrumentação disponível no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes.

Os cálculos a seguir seguiram o Vocabulário Internacional de Metrologia, (VIM, 2012), bem como Avaliação de dados de medição- Guia para a expressão de incerteza de medição (GUM, 2008).

O calcular a incerteza da medida da dK_{ar}/dt , parte do modelo da correção da leitura da câmara de ionização.

$$\dot{K}_{ar} = k_p \cdot k_Q \cdot N_K \cdot M \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^2, \quad (18)$$

em que $\dot{K}_{ar}$ é a taxa de KERMA no ar no ponto de interesse; k_p é o coeficiente para a densidade do ar, com referência a 20 °C e 1013,25 mbar, T_0 e P_0 respectivamente; k_Q é o fator para a qualidade da radiação; N_K é o fator de calibração para converter corrente elétrica da câmara de ionização ($9,963 \cdot 10^8$ Gy/C), e M é a leitura da câmara de ionização (A). Os demais elementos são pressão lida e corrigida P , temperatura lida e corrigida T e distâncias lida d e de referência d_0 .

De posse desse modelo para se determinar a incerteza combinada é necessário determinar as derivadas parciais da função.

Derivada parcial dK_{ar}/dt com respeito a medida da corrente da câmara de ionização.

$$\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial M} = k_p \cdot k_Q \cdot N_K \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^2. \quad (19)$$

Derivada parcial dK_{ar}/dt com respeito a medida da pressão atmosférica

$$\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial P} = -k_p \cdot k_Q \cdot N_K \cdot M \cdot \frac{P_0}{P^2} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^2. \quad (20)$$

Derivada parcial dK_{ar}/dt com respeito a medida temperatura

$$\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial T} = k_P \cdot k_Q \cdot N_k \cdot M \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{1}{T_0} \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^2. \quad (21)$$

Derivada parcial dK_{ar}/dt com respeito a posição do dispositivo

$$\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial d} = -2 \cdot k_P \cdot k_Q \cdot N_k \cdot M \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \left(\frac{d_0^2}{d^3} \right). \quad (22)$$

Cálculo incerteza do tipo A, que é dada por $u_{\dot{K}_a}$, são as incertezas que provem de meios estatísticos, no caso do sistema de medição dK_{ar}/dt é dada pela Equação 23

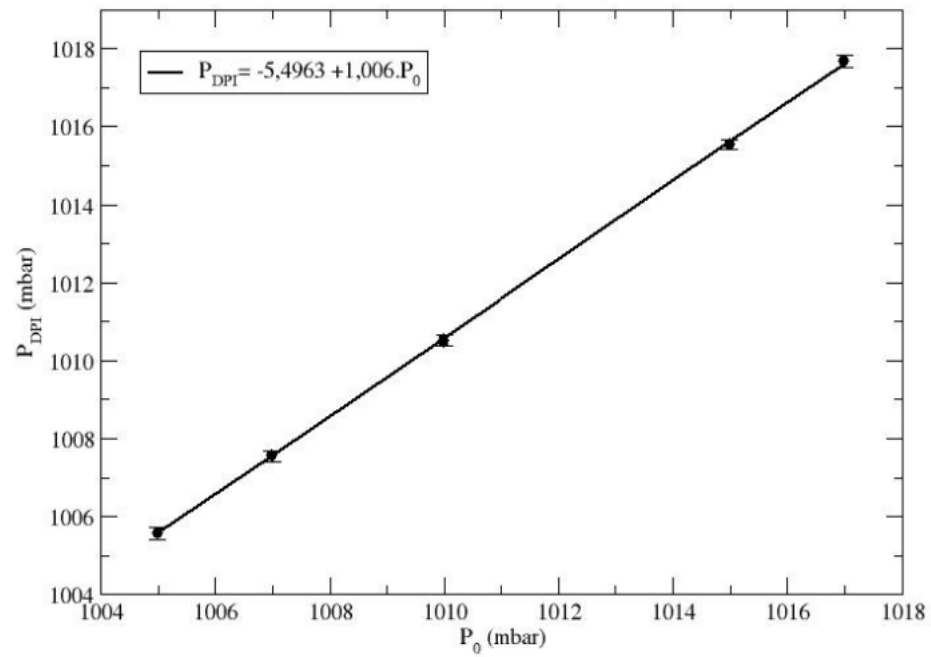
$$\mu_{\dot{K}_a}^2 = \left(\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial M} \cdot \sigma_K \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial P} \cdot \sigma_P \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial T} \cdot \sigma_T \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial d} \cdot \sigma_d \right)^2. \quad (23)$$

Incerteza do tipo B, $u_{\dot{K}_a}$; são todas as incertezas que não são adquiridas por meios estatísticos. Dada pela Equação 24

$$u_{\dot{K}_a}^2 = \left(\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial M} \cdot u_K \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial P} \cdot u_P \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial T} \cdot u_T \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{K}_a}{\partial d} \cdot u_d \right)^2. \quad (24)$$

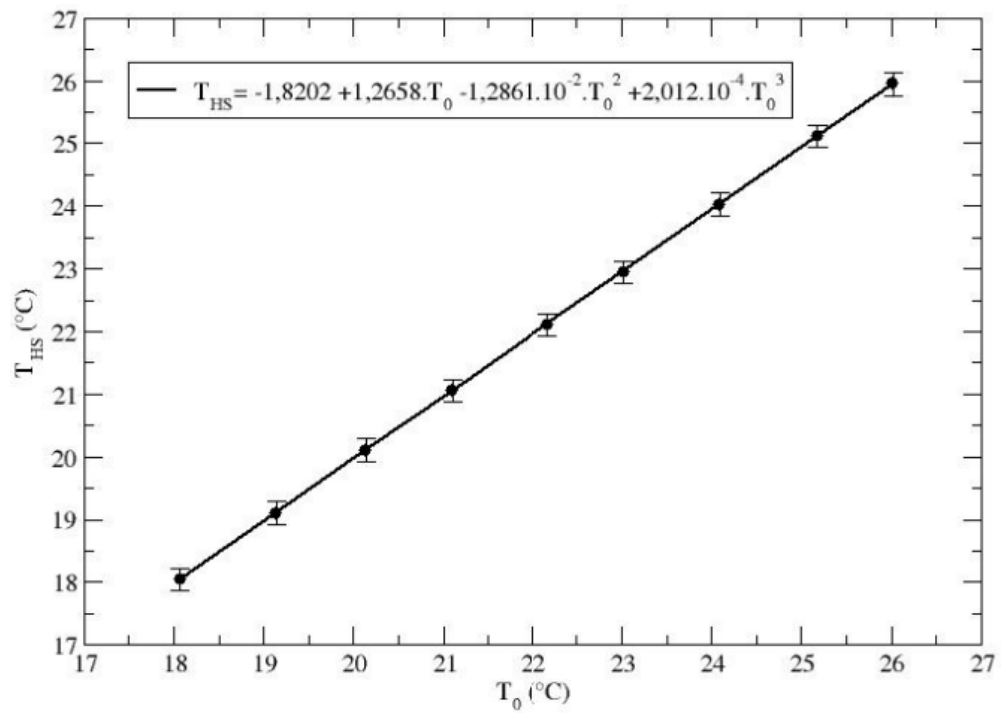
Como os certificados de calibração do barômetro e termômetro são dados em tabelas (ver Anexo C e D, respectivamente), faz-se necessário uma regressão linear para determinar os fatores das equações de 1º grau para o barômetro e de 3º grau para o termômetro como se segue nas Figuras 34 e Figura 35 respectivamente.

Figura 34 - Curva calibração do barômetro DPI740 284/98



Fonte: O autor.

Figura 35 - Curva calibração termômetro Hart Scientific® 1529



Fonte: O autor.

A incerteza combinada é dada pela expressão que se segue na Equação 25.

$$u_c(\dot{K}_a) = \sqrt{\mu_{\dot{K}}^2 + u_{\dot{K}_o}^2} \quad (25)$$

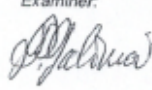
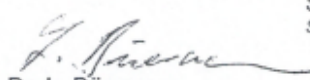
Como o grau de liberdade é dada pela Equação 26.

$$\nu = n - 1 \quad (26)$$

Como n é o número de leituras, nesse trabalho $n = 15$, o que implica em uma distribuição de *Student*, mas como ν é elevado pode-se aproximar de uma distribuição de Gauss, ou seja para uma incerteza expandida de 95%, $k = 2$. Assim a incerteza expandida é dada pela Equação 27.

$$U_{95} = k \cdot u_c(\dot{K}_{ar}) \quad (27)$$

**ANEXO B - CERTIFICADO CALIBRAÇÃO DA CÂMARA DE
IONIZAÇÃO PTB®, MODELO W23342, SÉRIE 1090**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin		
		Kopie
Kalibrierschein <i>Calibration Certificate</i>		
Gegenstand: Object:	Ionisation chamber	
Hersteller: Manufacturer:	Physikalisch-Technische Werkstätten Dr. Pychlau GmbH	
Typ: Type:	W23342	
Kennnummer: Serial No.:	1090	
Auftraggeber: Applicant:	Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN Rua Prof. Mario Wernick S/N Pampulha 30023-970 Belo Horizonte MG Brazil	
Anzahl der Seiten: Number of pages:	5	
Geschäftszeichen: Reference No.:	6.25 - 37/09K	
Kalibrierzeichen: Calibration mark:		
Datum der Kalibrierung: Date of calibration:	2009-09-01	
Im Auftrag: On behalf of PTB:	Braunschweig, 2009-09-01 Siegel Seal	Bearbeiter: Examiner:  P. Galimov
381 0081  Dr. L. Büermann		

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.
 Calibration Certificates without signature and seal are not valid. This Calibration Certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt



Seite 2 zum Kalibrierschein vom 2009-09-01, Kalibrierzeichen: 5904
Page 2 of the Calibration Certificate dated 2009-09-01, calibration mark: 5904

1. General information

1.1 Scope of the calibration

Calibration of the dosimeter in terms of air kerma.

1.2 W - value

The reference value of the air kerma as obtained by the primary standard measurement is based on $(W/e)_{\text{air}} = (33,97 \pm 0,056) \text{ V}$.

1.3 Conditions prevailing during the calibration (see also 2.1)

1.3.1 Radiation

X-radiation produced with constant potential generators.

1.3.2 Climatic conditions

temperature: 19,2°C to 19,3°C
air pressure: 1001,0 hPa to 1001,2 hPa
rel. humidity: around 50%

1.3.3 Geometrical arrangement

1.3.3.1 Direction of radiation incidence

The entrance window of the chamber perpendicular to the beam axis aligned towards the radiation source.

1.3.3.2 Reference point of the detector

Centre of the chamber entrance window.

1.3.3.3 Point of test

The reference point of the chamber was positioned in the central beam at a distance a from the focal spot.

1.3.4 Leakage current

The effect of leakage currents was eliminated by appropriate corrections.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt



Seite 3 zum Kalibrierschein vom 2009-09-01, Kalibrierzeichen: 5904

Page 3 of calibration certificate of 2009-09-01, calibration mark: 5904

2. Results of the calibration

The calibration factor is the ratio of the conventional true value of the quantity to be measured to the indication of the instrument to be tested. The value of the air kerma, K_a , to be measured in units of Grays (Gy) is obtained from the reading, M :

$$K_a = N_K \cdot M \cdot k_Q \cdot k_p$$

N_K calibration factor in terms of the air kerma,
reference conditions $T=20^\circ\text{C}$, $p=1013,25 \text{ hPa}$

k_Q correction factor for the radiation quality Q

k_p correction factor for the density of air,
reference conditions $T=20^\circ\text{C}$, $p=1013,25 \text{ hPa}$

Physikalisch-Technische Bundesanstalt



Seite 4 zum Kalibrierschein vom 2009-09-01, Kalibrierzeichen: 5904

Page 4 of calibration certificate of 2009-09-01, calibration mark: 5904

2.1 Calibration factor for the reference radiation quality and correction factors k_Q for other radiation qualities

2.1.1 Ionisation chamber W23342-1090

Q radiation quality

b additional filtration

s₁ first half value layer

a distance between source and point of test

N_K calibration factor in terms of air kerma K_a
for reference radiation quality T 70;
potential of the high voltage electrode: -300V
potential of the collector electrode: ~0V

d diameter of the radiation field at the point
of test (50% isodose)

k_Q correction factor for the radiation quality Q

K_a air kerma rate

U rel. Uncertainty of $N_K \cdot k_Q$ according to the
'Guide to the Expression of Uncertainty in
Measurement' (ISO, 1995) as derived
from the standard uncertainty by applying
a coverage factor k = 2

$$N_K = 9,963 \cdot 10^8 \text{ Gy/C}$$

Q	b* in mm	s ₁ in		a	d	K _a	k _Q	U
		mm Al	mm Cu	in cm	in cm	in mGy/s		in %
T 70	4,0 Al	2,94	0,100	30	3	3,44	1	1,08
T 100	4,5 Al	4,41	0,172	30	3	4,72	0,997	0,98

* Inherent filtration: 1 mm Be

Physikalisch-Technische Bundesanstalt



Seite 5 zum Kalibrierschein vom 2009-09-01, Kalibrierzeichen: 5904
Page 5 of the Calibration Certificate dated 2009-09-01, calibration mark: 5904

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen und Teile der Sicherheitstechnik. Die PTB gehört zum Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und – insbesondere im Rahmen des gesetzlichen und industriellen Messwesens – weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Kalibrierscheine der PTB dokumentieren die Rückführung des Kalibriergegenstandes auf nationale Normale.

Dieser Ergebnisbericht ist in Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Ergebnisberichte von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt (nähere Informationen unter <http://www.bipm.org>).



The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig and Berlin is Germany's National Metrology Institute and the supreme technical authority in the Federal Republic of Germany for metrology and certain sectors of safety engineering. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Technology. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in EN ISO/IEC 17025.

The central task of the PTB is to realize and maintain the legal units in compliance with the International System of Units (SI) and to disseminate them - in particular within the framework of legal and industrial metrology. The PTB thus is on top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by the PTB document that the calibrated object is traceable to national standards.

This certificate is consistent with the Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details, see <http://www.bipm.org>).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
GERMANY

Abbestraße 2-12
10587 Berlin
GERMANY

ANEXO C - CERTIFICADO CALIBRAÇÃO DO BARÔMETRO DIGITAL DRUCK®, MODELO DPI 740, SÉRIE 284/98-02



Visomes Comercial Metrológica Ltda.



LABORATÓRIO DE METROLOGIA VISOMES CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° LV15292-16-R0

INTERESSADO: Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste CRCN-ne

CONTRATANTE: Comissão Nacional de Energia Nuclear

Avenida Professor Luiz Freire, N200 - Cidade Universitária - Recife - CEP 50740-540 - PE

DADOS DO EQUIPAMENTO E CONDIÇÕES DA CALIBRAÇÃO

MATERIAL CALIBRADO: BARÔMETRO DIGITAL

MARCA:	DRUCK	N° CONTROLE:	23452
MODELO:	DPI 740	N° SÉRIE:	284/98-02
FAIXA DE INDICAÇÃO:	3 a 135 kPa	DATA DA CALIBRAÇÃO:	18/04/2016
FAIXA CALIBRADA:	100,5 a 102 kPa	LOCAL DA CALIBRAÇÃO:	Laboratório de Pressão
RESOLUÇÃO:	0,001 kPa	PRESSÃO ATMOSFÉRICA:	931,89 mbar
N° ORDEM DE SERVIÇO:	02304/2016	CONDIÇÃO AMBIENTAL:	20 °C ± 1 °C

PADRÕES UTILIZADOS

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	CERTIFICADO	VALIDADE	RASTREABILIDADE
PV-228-D	Controlador de Pressão	146 279-101	jul-18	SI - RBC

MÉTODO DE CALIBRAÇÃO

Calibração realizada por comparação com barômetro padrão nos sentidos de aplicação e remoção de pressão.

Para esta calibração, foi utilizada a Instrução de Trabalho ILV-705.

NOTAS E INFORMAÇÕES PERTINENTES

- 1 - A incerteza expandida de medição relatada (U) é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t, com graus de liberdade efetivos relatados (veff), corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Para k = 2, a distribuição é Normal. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- 2 - Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades - SI e aos requisitos da Norma ABNT NBR ISO/IEC 17025.
- 3 - Os Certificados de Calibração Digitais possuem uma forma de assinatura eletrônica de uma instituição reconhecida por todos como confiável e que funciona como "cartão eletrônico". Os métodos criptográficos empregados impedem que a assinatura eletrônica seja falsificada ou que os dados do documento sejam adulterados ou copiados, tornando-o absolutamente inviolável. Garante-se assim, por quem assina, que os dados de identificação do certificado são verdadeiros. Estes, quando alterados, perdem a validade. A certificação digital garante os três princípios básicos da comunicação segura em ambiente de rede de computadores: autenticidade, privacidade e inviolabilidade. Este certificado, se impresso pela Visomes, para garantir a originalidade, deve estar cancelado.
- 4 - O presente certificado refere-se exclusivamente ao material calibrado.
- 5 - É proibida a reprodução parcial deste certificado.
- 6 - Tendência = Leitura no equipamento em calibração - Valor do Padrão
- 7 - Repetibilidade = grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas expresso de forma quantitativa, em função das características de dispersão dos resultados. O valor expresso é o desvio padrão experimental dividido pela raiz do número de leituras.
- 8 - Calibração realizada nas instalações da Visomes.
- 9 - Faixa da calibração solicitada pelo cliente.



Visomes Comercial Metrológica Ltda.



LABORATÓRIO DE METROLOGIA VISOMES
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° LV15292-16-R0

RESULTADOS OBTIDOS

A) LEITURAS

CARREGAMENTO		DESCARREGAMENTO		Histerese
Valor Indicado no Instrumento kPa	Valor Indicado no Padrão kPa	Valor Indicado no Instrumento kPa	Valor Indicado no Padrão kPa	
100,552	100,4986	100,562	100,4986	0,0100
100,754	100,6987	100,756	100,6987	0,0020
101,051	100,9988	101,053	100,9988	0,0020
101,552	101,4991	101,553	101,4991	0,0010
101,773	101,6992	101,763	101,6992	0,0100
102,052	101,9993	102,052	101,9993	0,0000

B) RESULTADOS FINAIS

Indicação no Equipamento em Calibração kPa	Leitura Média no Padrão kPa	Tendência kPa	U kPa	k	Veff	Repetibilidade kPa
100,557	100,499	0,058	0,017	2,00	>1000	0,000667
100,755	100,699	0,056	0,013	2,00	>1000	0,000667
101,052	100,999	0,053	0,013	2,00	>1000	0,000667
101,553	101,499	0,054	0,012	2,00	>1000	0,000667
101,768	101,699	0,069	0,017	2,00	>1000	0,000667
102,052	101,999	0,053	0,012	2,00	>1000	0,000667

Fator de conversão de kPa para kPa: 1

RESPONSÁVEL PELA EMISSÃO


LUIZ HENRIQUE ALVES DE SOUZA
 SIGNATÁRIO AUTORIZADO

ANEXO D - CERTIFICADO CALIBRAÇÃO DO TERMÔMETRO DIGITAL HART SCIENTIFIC®, MODELO 1529-R, SÉRIE A45647



Visomes Comercial Metrologia Ltda.



LABORATÓRIO DE METROLOGIA VISOMES
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° LV15732-16-R0

INTERESSADO: COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR.

CONTRATANTE: COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR.
 AVENIDA PROFESSOR LUIZ FREIRE, N° 200 - CIDADE UNIVERSITÁRIA - RECIFE - PE - CEP: 50740-540

DADOS DO EQUIPAMENTO E CONDIÇÕES DA CALIBRAÇÃO
MATERIAL CALIBRADO: TERMÔMETRO DIGITAL

MARCA: HART SCIENTIFIC	N° CONTROLE: 037-B
MODELO: 1529-R	N° SÉRIE: A45647
TIPO DO SENSOR: Termistor	DATA DA CALIBRAÇÃO: 20/04/16
ESCALA: -50 a 150 °C	LOCAL DA CALIBRAÇÃO: Laboratório de Temperatura e Umidade
RESOLUÇÃO: 0,0001°C	CONDIÇÃO AMBIENTAL: 25 °C ± 1°C e 50 %UR ± 5 %UR
Ø E COMP. DO SENSOR: 3 mm x 5000 mm	N° ORDEM DE SERVIÇO: 02366/2016

PADRÕES UTILIZADOS

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	CERTIFICADO	VALIDADE	RASTREABILIDADE
PV-018-0	Multímetro Digital	RSC 15/1811	nov-17	SI - RSC
PV-598-0	Termorresistência PT-100	LV39246-15-R0	nov-17	SI - RSC

MÉTODO DE CALIBRAÇÃO
 Calibração realizada por comparação com um padrão em meio termostático e expressa a média das leituras efetuadas.
 Para esta calibração, foi utilizada a Instrução de Trabalho: ILV-619.

NOTAS E INFORMAÇÕES PERTINENTES

- 1 - A incerteza expandida de medição relatada (U) é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t, com graus de liberdade efetivos relatados (v_eff), corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Para k = 2, a distribuição é Normal. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- 2 - Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades - SI e aos requisitos da Norma ABNT NBR ISO/IEC 17025.
- 3 - Os certificados de Calibração digital possuem uma forma de assinatura eletrônica de uma instituição reconhecida por todos como confiável que funciona como "cartão eletrônico". Os métodos criptográficos empregados impedem que a assinatura eletrônica seja falsificada, ou que os dados do documento sejam adulterados ou copiados, tornando-o absolutamente inalterável. Garante-se assim, por quem assina, que os dados de identificação do certificado são verdadeiros. Estes quando alterados perdem a validade. A certificação digital garante os três princípios básicos da comunicação segura em ambiente de rede de computadores: autenticidade, privacidade e inalterabilidade. Este certificado, se impresso pela Visomes, para garantir a originalidade, deve estar cancelado.
- 4 - O presente certificado refere-se exclusivamente ao material calibrado.
- 5 - É proibida a reprodução parcial deste certificado.
- 6 - Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1993.
- 7 - Tendência = Média das Leituras (Equipamento em Calibração) - Valor do Padrão (Média das Leituras do Padrão de Referência)
- 8 - Valor de Referência = Média das Leituras - Tendência
- 9 - Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrologia.
- 10 - Serviço realizado nas instalações permanentes da Visomes.

R. Joaquim dos Santos, 181 - Rio Bonito - São Paulo - SP - CEP 04823-080 - F.: (11) 5662-9911

Página 1/2



Visomes Comercial Metrológica Ltda.



LABORATÓRIO DE METROLOGIA VISOMES
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° LV15732-16-R0

RESULTADOS OBTIDOS

Canal 01 – Sensor n/s : 0207-10; Modelo: 5611 <i>LABORATÓRIO</i>						
Temperatura de Referência (°C)	Média das Leituras (°C)	Tendência (°C)	U (°C)	k	veff	Profundidade de Imersão em (mm)
18,07	18,0399	-0,03	0,09	2,00	>1000	150
19,14	19,1036	-0,04	0,09	2,00	>1000	150
20,14	20,1056	-0,04	0,09	2,00	>1000	150
21,10	21,0569	-0,05	0,09	2,00	>1000	150
22,17	22,1056	-0,07	0,09	2,00	>1000	150
23,02	22,9515	-0,07	0,09	2,00	>1000	150
24,09	24,0262	-0,07	0,09	2,00	>1000	150
25,18	25,1178	-0,06	0,09	2,00	>1000	150
26,02	25,9477	-0,07	0,09	2,00	>1000	150

Canal 02 – Sensor n/s : 0207-1113; Modelo: 5611 <i>SALA COMANDO</i>						
Temperatura de Referência (°C)	Média das Leituras (°C)	Tendência (°C)	U (°C)	k	veff	Profundidade de Imersão em (mm)
18,07	18,0708	0,00	0,09	2,00	>1000	150
19,14	19,1358	-0,01	0,09	2,00	>1000	150
20,14	20,1317	-0,01	0,09	2,00	>1000	150
21,10	21,0756	-0,03	0,09	2,00	>1000	150
22,17	22,1314	-0,04	0,09	2,00	>1000	150
23,02	22,9798	-0,04	0,09	2,00	>1000	150
24,09	24,0459	-0,05	0,09	2,00	>1000	150
25,18	25,1170	-0,06	0,09	2,00	>1000	150
26,02	25,9456	-0,07	0,09	2,00	>1000	150

----- FIM DOS RESULTADOS -----

RESPONSÁVEL PELA EMISSÃO

F. Barros
FÁBIO PEREIRA BARROS
 SIGNATÁRIO AUTORIZADO