



**Universidade Federal de Sergipe**

**Departamento de Física**

**Programa de Pós-Graduação em Física**

**APLICABILIDADE DE TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO EM  
DOSIMETRIA DE FEIXES ELÉTRONS DE MEGAVOLTAGEM**

**RENAN GARCIA DE PASSOS**

São Cristóvão - SE  
2015

**APLICABILIDADE DE TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO EM  
DOSIMETRIA DE FEIXES ELÉTRONS DE MEGAVOLTAGEM**

**RENAN GARCIA DE PASSOS**

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Sergipe, para obtenção do título de mestre em Física.

**ORIENTADORA:** Profa. Dra. Divanizia do Nascimento Souza

São Cristóvão - SE  
2015

## RESUMO

Com a evolução nos estudos sobre radiação notou-se a necessidade de precauções com as aplicações das radiações ionizantes, devido aos efeitos que suas partículas e ondas eletromagnéticas podem causar ao interagir com os átomos do meio com os quais interagem. A energia das radiações depositada em um ponto é chamada de dose absorvida. A dosimetria é um estudo que visa quantificar os valores de dose depositados pelas radiações, essa quantificação é de grande necessidade em aplicações médicas como a radioterapia. Neste trabalho se estudou a possibilidade de uso do transistor bipolar de junção BC856 na dosimetria de feixes elétrons, que é um tipo de radiação muito empregado em radioterapia para o tratamento de tumores superficiais. O transistor bipolar de junção é um dispositivo eletrônico com função de amplificador de corrente em circuitos elétricos; essa característica é conhecida como ganho de corrente. Alguns estudos já mostraram que esses dispositivos tem sua capacidade de amplificar corrente diminuída quando são expostos a radiações, devido a danos causados em suas estruturas. Como os transistores estudados apresentam pequenas variações no ganho de corrente entre eles, mesmo quando de um mesmo lote, foram selecionados para este trabalho apenas aqueles com ganho semelhante. Os transistores foram irradiados com feixes de elétrons gerados por um acelerador linear Clinac iX da Varian, empregando feixes com energia de 6, 9 e 12 MeV. Os valores de corrente de coletor dos transistores eram medidos antes e imediatamente após as irradiações com o auxílio de um eletrômetro, de modo a avaliar a redução no ganho de corrente dos transistores. Foi possível observar uma relação linear entre a dose e o dano causado aos transistores pela radiação. Apesar de não se recuperarem completamente dos danos causados pela radiação, os dispositivos se mostraram reutilizáveis. Nas avaliações de percentual de dose depositada pelos feixes de elétrons em diferentes profundidades de acrílico, foi possível observar uma tendência de resultados obtidos com os transistores semelhante aos dados de calibração do acelerador linear utilizado para produção dos feixes. É possível concluir dos estudos que esses transistores podem ser usados em dosimetria de feixes de elétrons de megavoltagem devido à possibilidade de relacionar o dano causado pela radiação nos dispositivos com a dose absorvida.

Palavras-chave: Dosimetria; dispositivos eletrônicos; radioterapia; elétrons.

## ABSTRACT

With the evolution in the radiation studies was noticed the precautions needed in the ionizing radiation applications due to the effects caused by this particles or waves interacting with the atoms as it pass through, the radiation energy deposited at certain point is known as absorbed dose. The dosimetry is a study that quantifies the dose values deposited by the radiations, this quantification is really necessary in medical applications as radiotherapy. In this work was studied the possibility to use the BC856 bipolar junction transistor in electron beam dosimetry, a radiation very common in superficial tumors treatment. The bipolar junction transistor is an electronic device that amplifies current in electric circuits; this characteristic is known as current gain. Some researches already indicated that this amplifier capacity is reduced when devices exposed to radiations, due to damage caused in the structures. The transistors studied presented slightly different current gain, even those from the same package, therefore was selected just the devices with similar gain. The transistors was irradiated by electron beams generated from a Varian linear accelerator Clinac iX, 6, 9 and 12 MeV beams was used in the tests. The collector current was measured before the irradiations and immediately after using an electrometer, to determinate the current gain reduction. It was possible to observe a linear relation between dose and damage caused in transistors. Even through the devices do not completely recover from the damages caused by radiation the devices apparent to be reusable. In the percentage dose deposited in different acrylic depth was possible no notice results from the transistors resembling the linear accelerator calibration data. It's possible to conclude that the transistors studied may be used in megavoltage electron beam dosimetry due to the possibility to relate the damage caused in the devices and the dose absorbed by then.

Keywords: Dosimetry; electronic devices; radiotherapy; electrons.

## Lista de Figuras

FIGURA 1: PERCENTUAL DE DOSE EM PROFUNDIDADE (PDD): A) FEIXE DE ELÉTRONS E B) FEIXE DE FÓTONS. ....	9
FIGURA 2: DEPOSIÇÃO PERCENTUAL DE DOSE EM PROFUNDIDADE DE UM FEIXE DE ELÉTRONS EM ÁGUA (PODGORSAK, 2005). ....	14
FIGURA 3: DENSIDADE DE ESTADOS DO SEMICONDUTOR INTRÍNSECO (MCKELVEY, 1966).....	18
FIGURA 4: PROBABILIDADE DE OCUPAÇÃO, DENSIDADE DE ESTADO E POPULAÇÃO DE ELÉTRONS E BURACOS NAS BANDAS DE CONDUÇÃO E VALÊNCIA, RESPECTIVAMENTE (MCKELVEY, 1966). ....	19
FIGURA 5: ESTRUTURA DO SILÍCIO DOPADO COM FÓSFORO (TIPO N) E BORO (TIPO P) (KNOLL, 1989). ....	20
FIGURA 6: PROBABILIDADE DE OCUPAÇÃO, DENSIDADE DE ESTADO E POPULAÇÃO DE ELÉTRONS E BURACOS NAS BANDAS DE CONDUÇÃO E VALÊNCIA RESPECTIVAMENTE A) SEMICONDUTOR DO TIPO N E B) SEMICONDUTOR DO TIPO P (MCKELVEY, 1966). ....	20
FIGURA 7: DEMONSTRAÇÃO DA ZONA DE DEPLEÇÃO EM UMA JUNÇÃO PN (MCKELVEY, 1966). ....	21
FIGURA 8: MODELO DE DIODO POLARIZADO DIRETAMENTE E INVERSAMENTE. ....	22
FIGURA 9: MODELO DE TRANSISTOR TIPO NPN (KITTEL, 1953). ....	23
FIGURA 10: TRANSISTOR BC856.....	26
FIGURA 11: (A) MODELO DE TRANSISTOR BC846; (B) DIMENSÕES APROXIMADAS DO TRANSISTOR, EM MILÍMETROS. ....	26
FIGURA 12: GANHO DE CORRENTE EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE COLETOR PARA DOIS GRUPOS DE TRANSISTORES COM GANHOS DISTINTOS (NXP, 2012). ....	27
FIGURA 13: ELETRÔMETRO FLIP-FLOP CONECTADO AO COMPUTADOR. ....	28
FIGURA 14: GRUPO DE TRANSISTORES ABAIXO DE 1,5 CM DE ACRÍLICO. ....	29
FIGURA 15: VALORES MÉDIOS DE CORRENTE DOS TRANSISTORES. MEDIDAS FEITAS NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE (UFS) E NO COMPLEXO HOSPITALAR MANOEL ANDRÉ (CHAMA). ....	31
FIGURA 16: CORRENTE DE COLETOR DE TRÊS TRANSISTORES ANTES DE DEPOIS DA IRRADIAÇÃO COM 250 UM EM FEIXE DE ELÉTRONS DE 9 MeV. ....	32
FIGURA 17: TRÊS TRANSISTORES SEMELHANTES (A), IRRADIADOS DE MANEIRAS DIFERENTES COM MEDIDAS DIAS (B) E SEMANAS (C) APÓS A IRRADIAÇÃO. ....	33
FIGURA 18: VARIAÇÃO NA CORRENTE DE COLETOR DE UM GRUPO DE TRANSISTORES IRRADIADOS REPETIDAMENTE. ....	34
FIGURA 19: VARIAÇÃO NA CORRENTE DE TRÊS GRUPOS DE TRANSISTORES IRRADIADOS COM DIFERENTES DOSES. ....	35
FIGURA 20: PERCENTUAL DE VARIAÇÃO NO GANHO DE UM GRUPO DE TRANSISTORES IRRADIADO CONSECUTIVAMENTE.....	36
FIGURA 21: PERCENTUAL DE VARIAÇÃO NO GANHO DE TRANSISTORES DISTINTOS IRRADIADOS.....	36
FIGURA 22: PERCENTUAL DE DOSE DO FEIXE DE 6 MeV EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE ACRÍLICO E ÁGUA PARA TRANSISTORES E CÂMARA DE IONIZAÇÃO, RESPECTIVAMENTE.....	38
FIGURA 23: PERCENTUAL DE DOSE DO FEIXE DE 9 MeV EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE ACRÍLICO E ÁGUA PARA TRANSISTORES E CÂMARA DE IONIZAÇÃO RESPECTIVAMENTE.....	39
FIGURA 24: PERCENTUAL DE DOSE DO FEIXE DE 12 MeV EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE ACRÍLICO E ÁGUA PARA TRANSISTORES E CÂMARA DE IONIZAÇÃO RESPECTIVAMENTE.....	40
FIGURA 25: CORRENTE DOS TRANSISTORES MEDIDAS NO HOSPITAL ANTES (A) E IMEDIATAMENTE DEPOIS (D) DA IRRADIAÇÃO. ....	41
FIGURA 26: CORRENTE DOS TRANSISTORES MEDIDAS NA UNIVERSIDADE ANTES (A) E DEPOIS (D) DA IRRADIAÇÃO. ....	42
FIGURA 27: CORRENTE DOS TRANSISTORES MEDIDAS NO HOSPITAL ANTES (A), IMEDIATAMENTE DEPOIS (B) E ALGUMAS SEMANAS DEPOIS DA IRRADIAÇÃO (C).....	43

## Lista de Equações

EQUAÇÃO 1: PODER DE FREAMENTO COLISIONAL. ....	13
EQUAÇÃO 2: PODER DE FREAMENTO RADIATIVO.....	13
EQUAÇÃO 3: PODER DE FREAMENTO TOTAL.....	13
EQUAÇÃO 4: ALCANCE DAS PARTÍCULAS CARREGADAS (TURNER, 2007).....	14
EQUAÇÃO 5: PROBABILIDADE DE EXCITAÇÃO TÉRMICA DE ELÉTRONS.....	17
EQUAÇÃO 6: DENSIDADE DE ESTADOS DA BANDA DE CONDUÇÃO.....	18
EQUAÇÃO 7: DENSIDADE DE ESTADOS DA BANDA DE VALÊNCIA.....	18
EQUAÇÃO 8: CORRENTES NO CIRCUITO ELÉTRICO DO TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO. ....	23
EQUAÇÃO 9: DENSIDADE DE CORRENTE NO TRANSISTOR.....	23
EQUAÇÃO 10: DENSIDADE DE CORRENTE NO TRANSISTOR EM FUNÇÃO DOS PORTADORES DE CARGA MINORITÁRIOS.....	24
EQUAÇÃO 11: CORRENTE DO EMISSOR.....	24
EQUAÇÃO 12: CORRENTE DA BASE.....	24
EQUAÇÃO 13: CORRENTE DO COLETOR.....	24
EQUAÇÃO 14: GANHO DE CORRENTE DO TRANSISTOR.....	25

## Sumário

RESUMO .....	3
ABSTRACT .....	4
1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	8
2– REVISÃO DA LITERATURA .....	10
2.1 – Equipamentos usados em radioterapia de elétrons .....	11
2.2 – Interações dos elétrons com a matéria.....	12
2.3 – Princípios de dosimetria .....	15
2.4 – Semicondutores .....	16
2.5 - Junção PN .....	21
2.6 – Transistores .....	22
2.7 - Efeitos da radiação em transistores.....	25
3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	26
6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
7 - CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	45

# APLICABILIDADE DE TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO EM DOSIMETRIA DE FEIXES ELÉTRONS DE MEGAVOLTAGEM

## 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

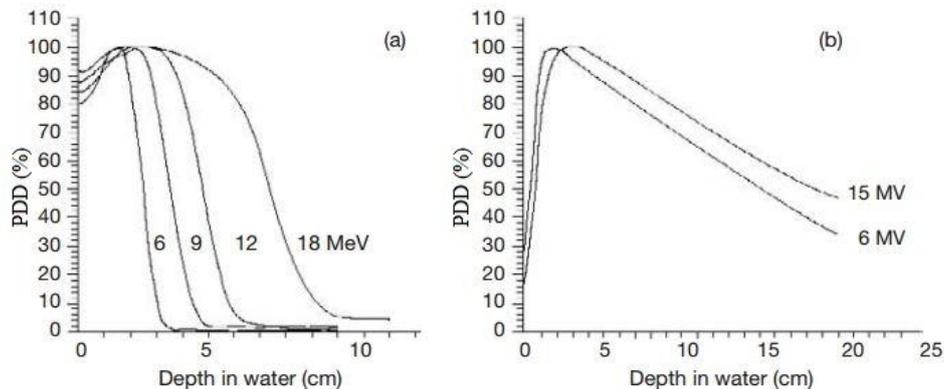
Existem vários tipos de radiação, que podem ser divididos em partículas carregadas, como os elétrons, prótons e as alfas, ou não carregadas, como os nêutrons e os fótons. Cada tipo de radiação tem suas propriedades específicas e por consequência podem ser utilizadas para fins diferentes.

A possibilidade do uso de radiação em tratamento de tumores tem sido observada desde sua descoberta, em 1895, pouco tempo após a divulgação da descoberta dos raios X por Röntgen estes foram usados no tratamento de um câncer de mama por Emil Grubbe. (FRANCISCO et al., 2005)

O foco deste trabalho são os elétrons, partículas de massa  $m = 9,1094 \times 10^{-31}$  kg, que equivale a 0,511 MeV, e carga  $e = -1,6022 \times 10^{-19}$  C (TURNER, 2007). Feixes destas partículas, quando produzidos em aceleradores lineares empregados em radioterapia, têm sido usadas em tratamento de tumores superficiais, devido a deposição de energia desses feixes no meio absorvedor ocorrer mais superficialmente que os de fótons de mesma energia.

Na Figura 1 é possível observar a distribuição percentual de dose em profundidade de água, do inglês Percentage Depth Dose (PDD), de feixes de elétrons e fótons de várias energias.

Figura 1: Percentual de dose em profundidade (PDD): a) feixe de elétrons e b) feixe de fótons.



Entre os tipos de materiais usados em dosimetria estão os dispositivos eletrônicos conhecidos como transistores, um exemplo de transistor bem conhecido é o MOSFET.

Foi observado que transistores do tipo bipolar de junção, usados em circuitos elétricos, expostos a radiação, sofrem alterações em suas características funcionais, a partir desse problema foram possíveis estudos da dependência dessas características com a dose absorvida.

Sabe-se que o dano causado por fótons nos transistores depende das características do circuito. Por exemplo, dispositivos sob a ação de corrente de pouca intensidade apresentam maior dano (PIEN et al., 2010). No estudo de Johnston (1994) foi possível observar que, após algumas horas da irradiação, o dispositivo se recuperava levemente do dano, e depois da recuperação os valores da corrente se mantinham por longo prazo.

Esse tipo de transistor já tem sido utilizado em estudos de dosimetria de fótons. Alguns dos trabalhos trazem informações sobre a sensibilidade dos dispositivos e relação da resposta com a dose em aplicações como tomografia e radioterapia para tratamento de câncer de mama (SANTOS et al., 2008; 2013; 2014).

O objetivo deste trabalho é analisar a possibilidade de usar o transistor do tipo bipolar de junção como uma alternativa na dosimetria de feixes de elétrons empregados em radioterapia.

## 2- REVISÃO DA LITERATURA

A radiação ao interagir com células é capaz de causar alterações nas moléculas de água presentes nas células, essas moléculas que interagem com a radiação tornam-se instáveis e, por consequência, produzem partículas  $H^{\bullet}$  e  $OH^{\bullet}$ , sem carga elétrica, chamadas radicais livres (GARCIA, 2002).

Os radicais livres podem se recombinar formando  $H_2O_2$ , que é altamente tóxico, além de poder danificar o material genético da célula, composto por moléculas de Ácido Desoxirribonucleico (DNA) e Ácido Ribonucleico (RNA). As moléculas de DNA e RNA são essenciais, pois carregam informações e controlam o funcionamento das células. Danos indiretos causados por radicais livres ou interações diretas da radiação com as moléculas de DNA podem levar à morte celular, caso as células não consigam se recuperar (BUSHBERG et al., 2002).

O dano causado pelas radiações ionizantes nas células é um fator utilizado na eliminação de células tumorais, essas células são originadas a partir de uma célula normal que devido a alguma mutação passa a se reproduzir de maneira descontrolada (BUSHBERG et al., 2002). Porém não só as células doentes são afetadas e é necessário sempre minimizar os danos causados às células saudáveis, de modo que estas possam se recuperar.

No caso dos cânceres tratáveis por radiação ionizante, para a completa eliminação de células tumorais é necessário uma grande quantidade de radiação, portanto o tratamento é feito com pequenas quantidades diárias (doses de radiação). A maneira como a dose é administrada aos pacientes minimiza os danos nas células saudáveis, que são menos sensíveis à radiação que as células doentes (GOITEIN, 2008).

Todo equipamento que trabalha com radiação deve ser constantemente avaliado para garantir seu bom funcionamento. Na radioterapia, assegurar a administração correta da dose planejada é essencial para o sucesso do tratamento; incorreções nessa dose podem prejudicar a saúde do paciente.

A dosimetria é uma medida de como a radiação interage com a matéria. Assim, é importante a definição de alguns conceitos e grandezas que quantificam a radiação:

- Radiação diretamente ionizante: São partículas carregadas que ionizam o meio diretamente através de interações coulombianas ou por colisões.

- Radiação indiretamente ionizante: Partículas neutras capazes de induzir a emissão de partículas carregadas dos átomos por onde passam, essas partículas carregadas são conhecidas como radiação secundária e são responsáveis pela deposição de energia no meio.

- Dose absorvida: É a energia depositada (dE) pela radiação em um determinado ponto de massa infinitesimal (dm), definida como  $D = dE / dm$ , sua unidade é o Gray (Gy) de modo que  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ . É possível ainda considerar as diferenças entre cada tipo de radiação e a sensibilidade de cada tecido na interação com um organismo.

- Kerma: O kerma é uma grandeza capaz de expressar mais precisamente a energia depositada por uma radiação, principalmente as indiretamente ionizantes, por não considerar apenas a energia em um ponto, mas também a energia fornecida às partículas secundárias. O kerma é definido como  $K = d \bar{E}_{tr} / dm$  onde  $d \bar{E}_{tr}$  é a energia média transferida para as partículas do meio, tendo como unidade o Gy.

Normalmente os fótons não depositam energia no ponto onde interagem, pois as partículas que recebem sua energia só a depositam em outro ponto, nesse caso pela definição pode-se observar que o kerma é diferente da dose absorvida. Quando a deposição de energia em outro ponto que não o de interação do fóton é compensada por outra partícula naquele ponto a dose absorvida e o kerma possuem uma relação de igualdade. Essa compensação de energia das partículas secundárias é chamada equilíbrio eletrônico.

## 2.1 – Equipamentos usados em radioterapia de elétrons

Elétrons têm sido usados em radioterapia desde os anos 1950. Nessa época esses feixos eram produzidos por aceleradores como os do tipo betatron, que é um equipamento com estrutura cíclica capaz de acelerar elétrons através de um campo elétrico, e por fontes como as de  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ . Os aceleradores lineares (linac) foram criados, com capacidade de produzir feixos com taxa de dose em torno de 10 Gy/min, substituindo os betatrons que alcançavam no máximo 1 Gy/min (PODGORSAK, 2005).

Um linac é capaz de acelerar partículas carregadas, como elétrons, pois possui uma estrutura de cavidades com micro-ondas. O campo elétrico das micro-ondas, que são ondas eletromagnéticas, é paralelo à direção do feixe e aceleram as partículas injetadas no equipamento devido a processos de ressonância (LOEW; TALMAN, 1983).

Após aceleradas, as partículas são direcionadas para a janela de saída do equipamento, nesse ponto é possível encontrar um alvo de tungstênio para produção de raios X, entretanto na radioterapia de elétrons esse alvo não é utilizado e as partículas são direcionadas ao paciente. O feixe de elétrons passa por uma folha espalhadora e por fim são colimados formando campos de radiação do tamanho necessário ao tratamento.

Os equipamentos de radioterapia trabalham com um parâmetro chamado unidade monitora (UM), esse parâmetro deve ser calibrado de modo que com um campo 10x10 cm<sup>2</sup>, a 100 cm de distancia fonte superfície, cada unidade monitora corresponda a 1 cGy no ponto de dose máxima em material tecido equivalente.

## 2.2 – Interações dos elétrons com a matéria

Os elétrons podem interagir através de colisões elásticas ou inelásticas, tanto com os núcleos quanto com os elétrons do meio, como consequência essas partículas podem excitar ou ionizar os átomos do meio.

A energia média perdida por um tipo de partícula ao longo do seu caminho em um meio é chamada poder de freamento, ou seja, esse conceito representa a capacidade de um meio de atenuar a energia das partículas incidentes. Essa quantidade é representada por  $-\frac{dE}{dx}$ , onde o sinal negativo representa a perda de energia das partículas.

Devido aos tipos de interação dos elétrons o poder de freamento deve levar em consideração a energia perdida por colisões assim como a energia perdida através de interações coulombianas, nesse tipo de interação os elétrons mudam de direção, são desacelerados e, como consequência, emitem fótons de raios X.

O poder de freamento pode ser determinado através da expressão de Bethe, logo, para elétrons pode-se escrever (KNOLL, 1989):

Equação 1: Poder de freamento colisional.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_c = \frac{2\pi e^4 NZ}{m_0 v^2} \left( \ln \frac{m_0 v^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} - (\ln 2) (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) + (1-\beta^2) + \frac{1}{8} (1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 \right)$$

Equação 2: Poder de freamento radiativo.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_r = \frac{NEZ(Z+1)e^4}{137m_0^2c^4} \left( 4\ln \frac{2E}{m_0c^2} - \frac{4}{3} \right)$$

Equação 3: Poder de freamento total.

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(\frac{dE}{dx}\right)_r$$

Onde:

e = carga do elétron;

N = densidade atômica do meio;

Z = número atômico do meio;

$m_0$  = massa de repouso do elétron;

v = velocidade dos elétrons incidentes;

E = energia dos elétrons incidentes;

I = Energia média de excitação e ionização do meio.

c = velocidade da luz;

$\beta = v/c$

Os elétrons interagem com os átomos em seu caminho, principalmente com os elétrons ligados a estes átomos devido ao campo elétrico gerado pelas partículas, essas interações resultam em alterações no caminho percorrido por essas partículas. Devido ao caminho dos elétrons não ser linear na matéria a previsão da profundidade alcançada pelas partículas torna-se complicada.

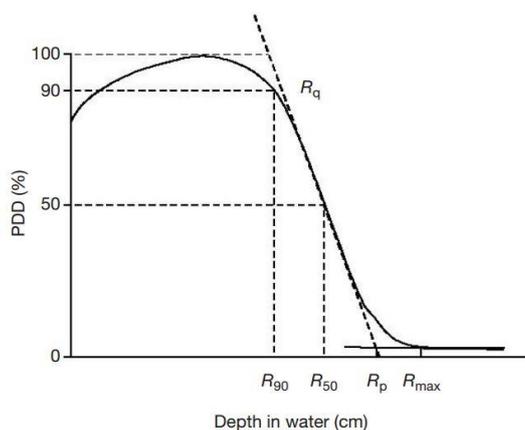
A profundidade máxima que os elétrons alcançariam em uma trajetória retilínea é conhecida como o alcance R(T) da partícula e pode ser determinada através do inverso do poder de freamento integrado de zero até a energia cinética (T) dos elétrons.

Equação 4: Alcance das partículas carregadas (TURNER, 2007).

$$R(T) = \int_0^T \left( -\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

A Figura 2 demonstra como se distribui a dose de um feixe de elétrons com relação à profundidade em água. Pode-se notar que na superfície a dose tem valor próximo a da dose máxima depositada pelo feixe, e que a dose diminui rapidamente após seu máximo. A região entre a superfície e a dose máxima no eixo central é chamada região de equilíbrio eletrônico (*buildup*), na superfície do meio irradiado o caminho dos elétrons é linear, entretanto, devido às interações com o meio essas partículas mudam de caminho causando o aumento da dose nessa área, além disso, elétrons atômicos podem ser retirados de seus átomos e receber energia suficiente para realizar outras ionizações, essas partículas secundárias são chamadas raios  $\delta$  e também contribuem para a região de *buildup*. (PODGORSAK, 2005)

Figura 2: Deposição percentual de dose em profundidade de um feixe de elétrons em água (PODGORSAK, 2005).



Além do modo como a dose é distribuída no material, é possível observar na Figura 2 o alcance máximo dos elétrons ( $R_{\max}$ ), na profundidade igual ao alcance máximo a dose se equipara à radiação de fundo. Na profundidade denominada de alcance prático ( $R_p$ ) é determinada pela interseção da reta tangente com a parte mais íngreme da curva de dose e a projeção da linha de radiação de fundo.

Na radioterapia é desejável que a maior parte da energia seja depositada na localização do tumor, logo, o padrão de distribuição de dose dos elétrons justifica sua aplicação em tumores superficiais.

Um feixe de elétrons, com energia  $E$ , apresenta 90% de sua dose em uma profundidade numericamente equivalente a, aproximadamente,  $E/4$  centímetros de água. Essa profundidade é conhecida como alcance terapêutico (PODGORSAK, 2005).

### 2.3 – Princípios de dosimetria

Os dosímetros são materiais que possuem alguma característica que é alterada quando são expostos à radiação. A partir de processos de calibração a alteração no material deve fornecer informações sobre alguma grandeza da radiação absorvida. (PODGORSAK, 2005)

Um dosímetro deve ser reprodutível, ou seja, medições realizadas sob mesmas condições devem fornecer resultados semelhantes. Os resultados devem estar sempre próximos entre si e ao valor da grandeza medida, portanto, devem ser precisos e acurados, respectivamente.

Outra característica do material é a linearidade da medida, as respostas do dosímetro devem crescer linearmente com a grandeza analisada. Um mesmo material pode apresentar comportamento linear e não linear, a depender da energia utilizada na irradiação.

Idealmente, o dosímetro deve independe da energia ou taxa de dose aplicada, caso as respostas dependam dessas quantidades é necessário que se use fatores de correção para ajuste dos valores medidos.

O dosímetro deve ser pequeno para que a medida seja o mais pontual possível e, caso sua sensibilidade à radiação varie com a posição de irradiação, deve-se sempre usá-lo na posição em que foi calibrado.

## 2.4 – Semicondutores

Os átomos são compostos por elétrons ligados a um núcleo, composto de prótons e nêutrons, pela ação do potencial coulombiano deste núcleo. Os elétrons estão distribuídos ao redor do núcleo em níveis de energia discretos, ou seja, não podem assumir níveis de energia diversos, e só podem mudar de nível recebendo ou emitindo energia bem definida. A distribuição dos elétrons no átomo obedece ao princípio de exclusão de Pauli.

Os sólidos são compostos por diversos átomos ligados uns aos outros, formando estruturas de rede. Os níveis de energia dos elétrons se combinam resultando em algo chamado banda de energia, ou seja, em um sólido os elétrons podem assumir níveis de energias em uma faixa de energia. A banda de energia mais externa dos átomos da rede é conhecida como banda de valência. O nível de energia em que o elétron está livre de sua ligação com o átomo é chamado de banda de condução.

De acordo com sua capacidade de condução elétrica, os sólidos podem ser classificados como:

- Materiais condutores: Aqueles em que a banda de condução se sobrepõe à banda de valência e nos quais os elétrons têm grande mobilidade na estrutura do sólido (KITTEL, 1953);

- Materiais Isolantes: Aqueles em que a banda de condução está bem separada da banda de valência, ou seja, seria necessária uma energia muito alta para um elétron passar para a banda de condução (KITTEL, 1953);

Materiais Semicondutores: Estes são um intermédio entre os anteriores, nos semicondutores as bandas não estão sobrepostas, mas estão próximas o suficiente para que os elétrons possam mudar de nível, inclusive por suprimento de energia térmica (MCKELVEY, 1966).

A faixa de energia entre as bandas de valência e condução é conhecida como banda de energia proibida ou *gap*. Materiais semicondutores possuem *gap* de até 3 ou 4 eV, enquanto em isolantes esse *gap* pode variar entre 4 e 12 eV (STREHLOW; COOK, 1973).

Nos condutores os elétrons têm liberdade para se moverem na banda de condução, porém, em isolantes e semicondutores é necessário que seja fornecida energia para esses elétrons mudarem de nível, processo chamado excitação. A excitação dos elétrons pode ocorrer através de energia térmica seguindo a seguinte probabilidade:

Equação 5: Probabilidade de excitação térmica de elétrons.

$$P(T) = CT^{3/2}e^{(-E_g/2kT)} \text{ (KNOLL, 1989)}$$

Onde:

C = Constante de proporcionalidade característica de cada material;

T = Temperatura absoluta;

$E_g$  = Energia do *gap*

K = Constante de Boltzmann

Dessa expressão, pode-se concluir que quanto menor o *gap* maior a probabilidade de excitação dos elétrons. Logo, para uma mesma quantidade de energia, em semicondutores é mais provável que os elétrons passem para a banda de condução do que em isolantes.

A excitação de elétrons da banda de valência para a banda de condução deixa uma carga positiva na banda de valência, chamada buraco; logo, cada excitação cria um par elétron-buraco.

Em um semicondutor puro os elétrons e buracos no material são todos originados por excitação térmica, esses são chamados semicondutores intrínsecos.

Elétrons e buracos nas bandas de condução e valência obedecem estatisticamente à função de distribuição de Fermi-Dirac ( $f_0$ ), assim como à densidade de estado da banda de condução ( $g_c$ ) e da banda de valência ( $g_v$ ) para partículas livres, descritas pelas expressões a seguir (MCKELVEY, 1966):

Equação 6: Densidade de estados da banda de condução

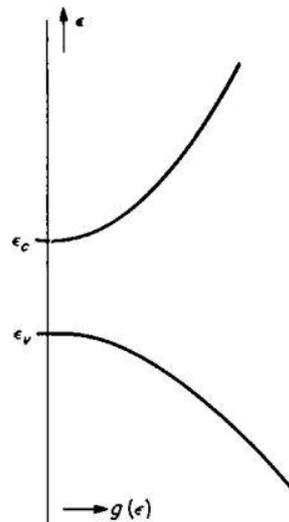
$$g_c(E)dE = \frac{8\sqrt{2\pi}}{h^3} m_n^{*3/2} \sqrt{E - E_c} dE \quad (E > E_c)$$

Equação 7: Densidade de estados da banda de valência

$$g_v(E)dE = \frac{8\sqrt{2\pi}}{h^3} m_p^{*3/2} \sqrt{E_v - E} dE \quad (E_v > E)$$

Em que  $m_n^*$  e  $m_p^*$  são as massas efetivas dos elétrons e buracos nas bandas de condução e valência, respectivamente. A Figura 3 mostra esquematicamente as densidades de estado de um semiconductor intrínseco, do caso  $m_n^* = m_p^*$ . Pode-se notar que a região entre  $E_c$  e  $E_v$  é vazia, pois representa a banda proibida.

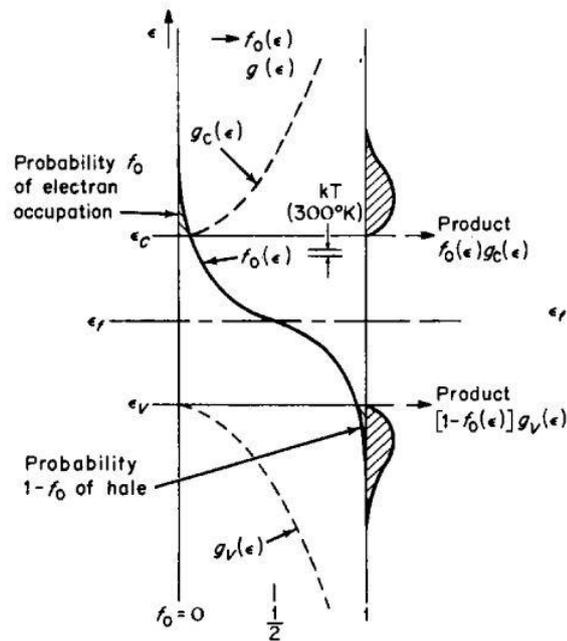
Figura 3: Densidade de estados do semiconductor intrínseco (MCKELVEY, 1966).



O produto das funções de densidade de estado com a função distribuição de Fermi-Dirac expressa a distribuição dos elétrons e buracos nas bandas. A distribuição de Fermi-Dirac é um conceito estatístico que descreve o comportamento de elétrons em metais e semicondutores (MCKELVEY, 1966). A distribuição indica a probabilidade das partículas ocuparem determinados níveis de energia.

Na Figura 4 nota-se que a ocupação de elétrons na banda de valência é igual à ocupação de buracos na banda de condução, esse fato só é possível porque o semiconductor é intrínseco, ou seja, o material não possui impurezas e os buracos são gerados apenas pela excitação térmica dos elétrons.

Figura 4: Probabilidade de ocupação, densidade de estado e população de elétrons e buracos nas bandas de condução e valência, respectivamente (MCKELVEY, 1966).

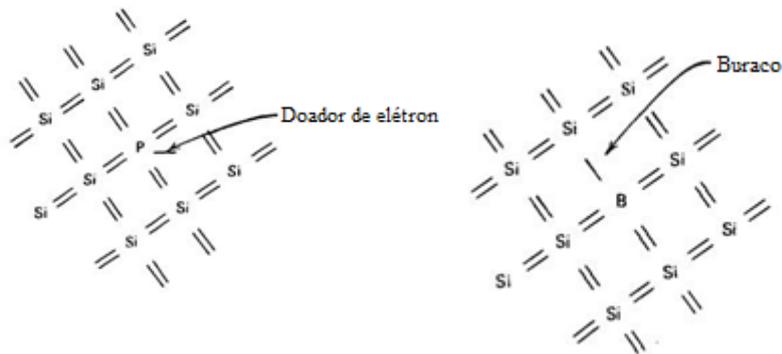


O semiconductor pode ser dopado com um elemento que não faz parte da sua estrutura cristalina natural; nesse caso o elemento inserido no material contribui com um nível de energia que não faz parte da banda de valência nem de condução, ou seja, o dopante contribui com níveis de energia permitidos dentro do *gap*.

A dopagem do semiconductor pode ser de dois tipos, N e P. No tipo N a estrutura cristalina do material, como o silício (Si) que pertence ao grupo IV da Tabela periódica, por exemplo, é dopada com átomos do grupo V, como o fósforo (P).

No grupo V os átomos têm cinco elétrons na camada de valência, quando inserido no cristal de silício quatro elétrons do fósforo formam ligações covalentes enquanto um dos elétrons é mantido apenas por forças eletrostáticas, que é fraca e pode ser quebrada facilmente. Logo, em uma dopagem do tipo N a impureza fornece elétrons, como pode ser visto na Figura 5, esses átomos são chamados impurezas doadoras.

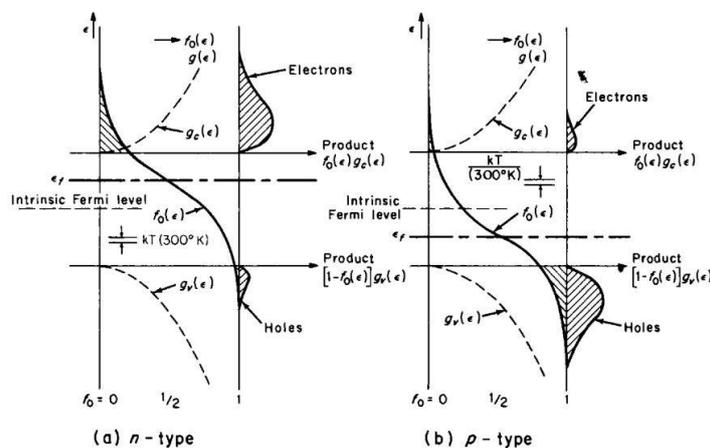
Figura 5: Estrutura do silício dopado com fósforo (tipo N) e boro (tipo P) (KNOLL, 1989).



A dopagem de tipo P funciona de maneira análoga, porém, o dopante pertence ao grupo III e fornece buracos ao semiconductor, essas impurezas são chamadas aceitadoras.

Estatisticamente, nota-se que o nível de Fermi ( $E_f$ ), abaixo do qual todos os níveis estão ocupados no zero absoluto, está próximo da banda de condução no semiconductor tipo N e da banda de valência no tipo P. A ocupação dos níveis de energia é maior nas bandas mais próximas do nível de Fermi, na Figura 6 é possível observar a maior distribuição de elétrons na banda de condução no semiconductor tipo n e o mesmo comportamento para os buracos na banda de valência no tipo p.

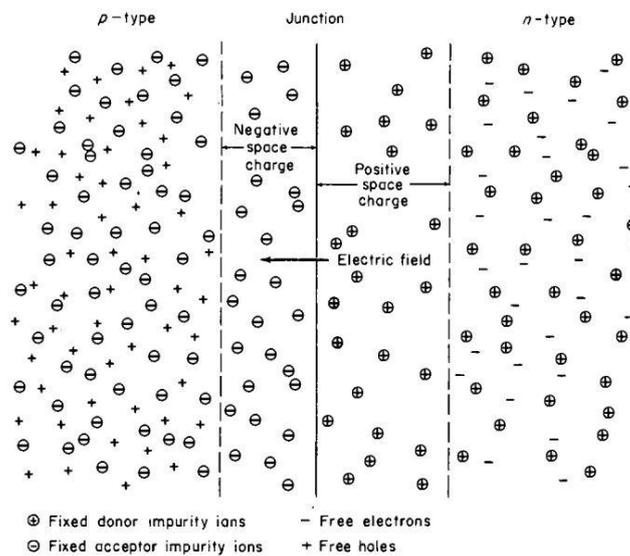
Figura 6: Probabilidade de ocupação, densidade de estado e população de elétrons e buracos nas bandas de condução e valência respectivamente a) semiconductor do tipo N e b) semiconductor do tipo P (MCKELVEY, 1966).



## 2.5 - Junção PN

Em um semiconductor a junção pn é a interseção entre uma região tipo n e uma região tipo p, na junção os elétrons e buracos de cada região se movem para o lado de potencial oposto até que esta interseção entre em equilíbrio dinâmico, ou seja, as cargas não variam mais e esta região, chamada zona de depleção, torna-se desprovida de cargas livres (Figura 7).

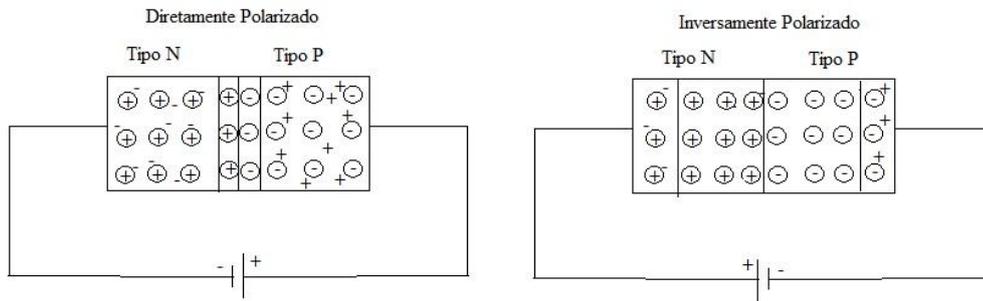
Figura 7: Demonstração da zona de depleção em uma junção pn (MCKELVEY, 1966).



Uma junção PN é o princípio do diodo. Em um circuito elétrico o tamanho da zona de depleção pode ser modificado se o circuito estiver polarizado diretamente, parte negativa do diodo conectada à parte negativa da fonte de tensão, ou inversamente.

Na polarização direta o fluxo da corrente é possível se a fonte de tensão fornecer energia suficiente para que os elétrons vençam a barreira de potencial criada na zona de depleção. Na polarização inversa os elétrons e buracos são atraídos pelos polos da fonte de tensão e a zona de depleção aumenta como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8: Modelo de diodo polarizado diretamente e inversamente.



## 2.6 – Transistores

Os transistores, descobertos por Bardeen e Brattain em 1949 (KITTEL, 1953), vieram para substituir os tubos de vácuo na função de ampliar e modular a corrente em circuitos elétricos. Diferentemente dos dispositivos anteriores, os transistores não possuem fios e são pequenos. Um transistor ocupa um volume da ordem de 1/100 do ocupado por um tubo de vácuo equivalente (SCHURE, 1976).

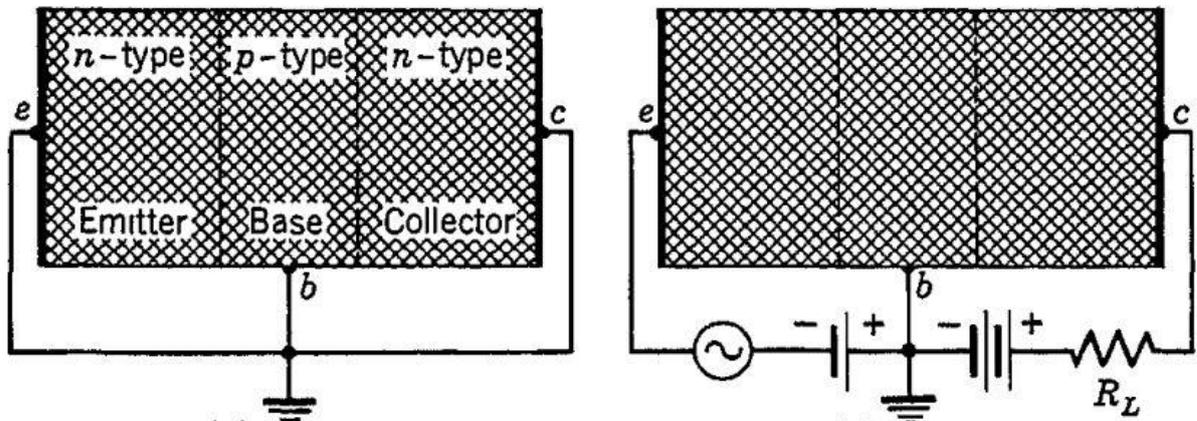
Existem três tipos de transistores, o BJT (Transistor Bipolar de Junção), o MOSFET (Transistor Metal Óxido Semicondutor de Efeito de Campo) e o JFET (Transistor de Junção de Efeito de Campo).

O BJT, que será alvo de estudo neste trabalho, é constituído de material semicondutor dopado com uma região tipo p entre duas tipo n, ou o inverso.

Como pode ser visto na Figura 9, um transistor é dividido em emissor (E), base (B) e coletor (C). A junção E-B deve ser polarizada diretamente, de modo que os elétrons do emissor fluam em direção à base, do mesmo modo a junção B-C é polarizada reversamente para garantir o fluxo dos elétrons.

Assim, como no diodo, a polarização inversa causa uma grande área de cargas positivas fixas no coletor, e conseqüentemente um campo elétrico positivo muito forte, que faz com que grande parte dos elétrons do emissor sejam atraídos; esse efeito é responsável pelo ganho de corrente ( $\beta$ ) no transistor.

Figura 9: Modelo de transistor tipo npn (KITTEL, 1953).



Para que o transistor cumpra seu papel de amplificador de corrente, o emissor deve ser dopado com muito mais portadores de carga que o coletor. A base, que possui portadores de carga diferentes, deve ser uma região menor e menos dopada que as outras para minimizar recombinações.

Do circuito apresentado na Figura 9, deve-se identificar três correntes: a corrente do emissor ( $I_E$ ), corrente da base ( $I_B$ ) e corrente do coletor ( $I_C$ ). No transistor a corrente flui de modo que:

Equação 8: Correntes no circuito elétrico do transistor bipolar de junção.

$$I_E = I_C + I_B$$

Podem-se demonstrar essas correntes considerando as densidades de corrente ( $J$ ) e as áreas ( $A$ ) do emissor, base e coletor. A densidade total de corrente depende das densidades de corrente de elétrons e buracos no material,  $J_n(x)$  e  $J_p(x)$ , respectivamente. Ou seja:

Equação 9: Densidade de corrente no transistor.

$$J = J_n(x) + J_p(x)$$

Levando em consideração que a corrente total depende diretamente dos portadores de carga minoritários em cada região, ou seja, os elétrons passando pela região p e buracos pela região n (ENDERLEIN; HORING, 1997), pode-se reescrever J como:

Equação 10: Densidade de corrente no transistor em função dos portadores de carga minoritários.

$$J = J_n(x_p) + J_p(x_n)$$

Logo, pode-se dizer que a corrente do emissor é dada por:

Equação 11: Corrente do emissor.

$$I_E = J_E \cdot A = J_n(x_p)A + J_p(x_n)A$$

Seguindo o mesmo raciocínio para a base, é possível escrever sua corrente, porém, é necessário levar em consideração que a base tem dimensões pequenas e grande parte dos elétrons que vêm do emissor vão para o coletor, logo, na base se considera apenas os elétrons recombinados ( $J_{nr}$ ), portanto:

Equação 12: Corrente da base.

$$I_B = J_B \cdot A = J_{nr}A + J_p(x_n)A$$

Como é possível relacionar as três correntes, escreve-se a corrente do coletor como a diferença entre as correntes supracitadas.

Equação 13: Corrente do coletor.

$$I_C = J_C \cdot A = J_n(x_p)A - J_{nr}A$$

Nota-se que a corrente do coletor é dada pela corrente de elétrons que saem do emissor e não se recombinam na base.

O ganho de corrente do transistor é uma relação entre a corrente inserida na base e a medida no coletor, sendo assim:

Equação 14: Ganho de corrente do transistor.

$$\frac{I_C}{I_B} = \beta$$

## 2.7 - Efeitos da radiação em transistores

As principais consequências da interação da radiação com os semicondutores são o deslocamento de átomos de suas posições e a ionização produzindo pares elétrons-buracos, inclusive nas camadas isolantes que compõem o transistor, que normalmente são compostas de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>).

Em uma rede de silício a energia das partículas carregadas, como elétrons, é capaz de deslocar algum átomo. Átomos deslocados alteram as propriedades elétricas do material e, por consequência, afetam o ganho de corrente do transistor.

Após a ionização do dióxido de silício os elétrons gerados são atraídos pelo campo elétrico positivo do transistor, deixando cargas fixas positivas que formam o que é chamado de campo parasita; esse campo interfere na mobilidade dos elétrons no transistor (SPIELER, 2005).

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O objeto de estudo desse trabalho foi o transistor bipolar de junção do tipo NPN e modelo BC846, que pode ser visto na Figura 10. Esse dispositivo possui dimensões em torno de 1 a 2 milímetros (NXP, 2012). A Figura 11 e a Tabela 1, fornecidas pelo fabricante, mostram as dimensões aproximadas e as características elétricas do BC856. Os índices 1, 2 e 3 na Figura indicam os terminais da base, do emissor e do coletor, respectivamente. Note-se que as dimensões e o ganho de corrente do transistor podem variar, devido ao processo de fabricação.

Figura 10: Transistor BC856.

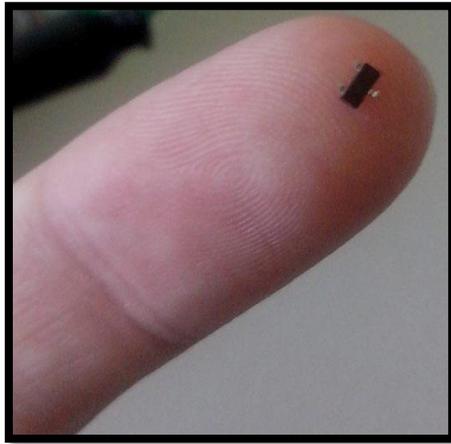


Figura 11: (A) Modelo de transistor BC846; (B) Dimensões aproximadas do transistor, em milímetros.

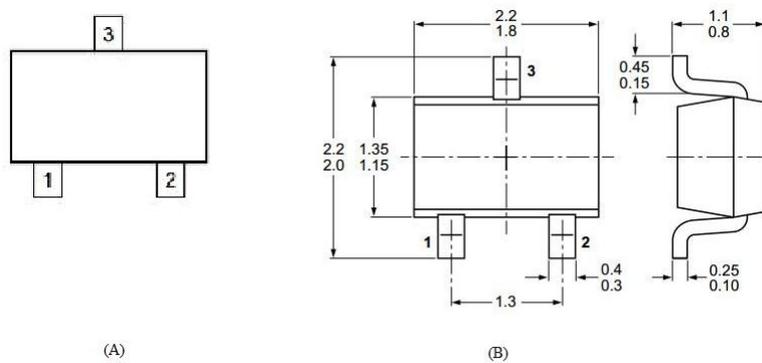


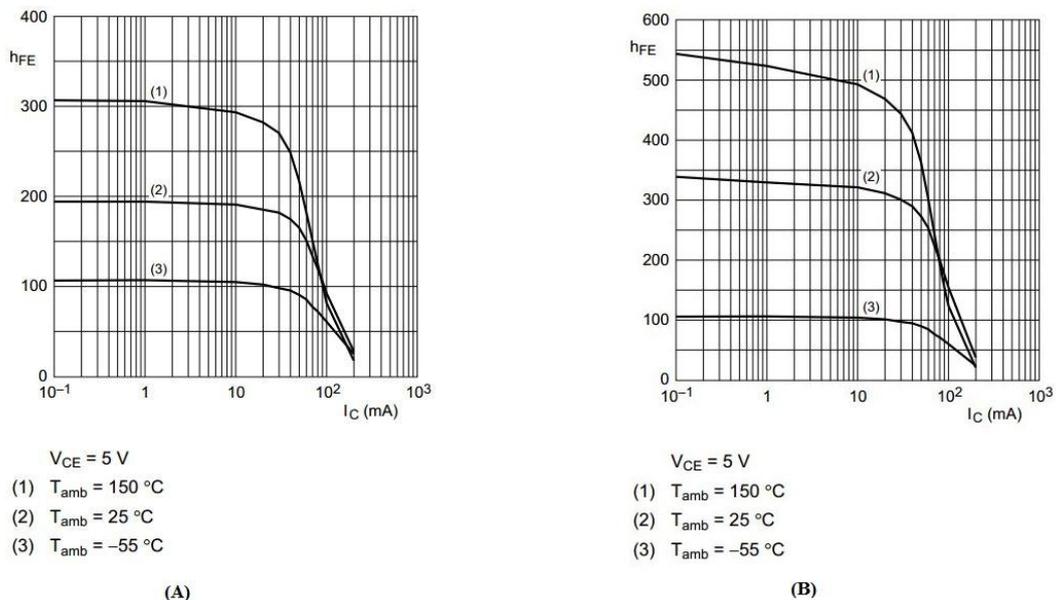
Tabela 1: Parâmetros elétricos do BC846.

Parâmetro	Valor
Tensão Coletor-Emissor máxima ( $V_{CE}$ )	65 V
Corrente no coletor máxima ( $I_C$ )	100 mA
Limites de temperatura	- 65 até 150 °C
Ganho de corrente ( $h_{FE}$ ) a 25°C	180 - 290

Nas especificações do fabricante, NXP Semiconductors Philips (NXP, 2012), é possível encontrar a dependência do ganho de corrente com a temperatura. Na

Figura 12 é possível observar essa dependência em dois grupos de transistores, cada um com uma capacidade de ganho diferente. Correntes de coletor muito baixas, como as utilizadas nesse trabalho, podem apresentar variação considerável no ganho de corrente quando usados em temperaturas distintas, portanto é necessário o controle da temperatura.

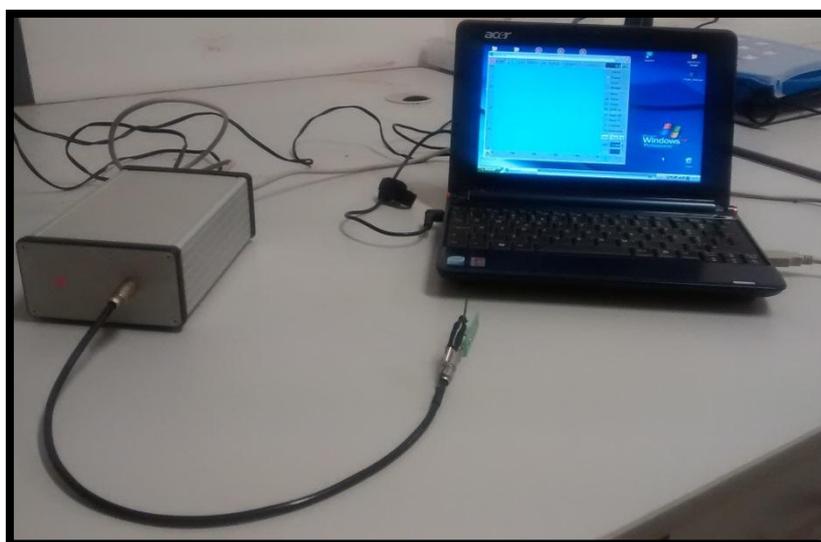
Figura 12: Ganho de corrente em função da corrente de coletor para dois grupos de transistores com ganhos distintos (NXP, 2012).



O sistema de detecção utilizado para caracterização dos transistores foi o eletrômetro Flip-Flop (Figura 13), desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Nuclear do Centro Regional de Ciências Nucleares (LIN/CRCN), patente número PI 0006352-5.

O Flip-Flop possui uma placa de circuito com três conexões para os terminais do transistor, fornece uma tensão de 5V e uma corrente de base aos transistores, as medidas registradas indicam a corrente de coletor e variam de acordo com o ganho de cada transistor. Um programa computacional chamado DoseX é usado para analisar e arquivar as medidas de corrente realizadas pelo equipamento.

Figura 13: Eletrômetro Flip-Flop conectado ao computador.



As irradiações foram feitas com feixes de elétrons de alta energia gerados por um acelerador linear, Clinac iX da Varian, o equipamento trabalha com uma grandeza chamada Unidade Monitora (UM), cada UM deve corresponder a 1 cGy no ponto de dose máxima. O acelerador empregado para as irradiações pertence ao Serviço de Radioterapia do Centro Hospitalar Manoel André (CHAMA) na cidade de Arapiraca, Alagoas.

Placas de acrílico (PMMA) foram usadas para suporte dos transistores e atenuação dos feixes. As placas tinham espessuras de 3 e 5 mm e eram combinadas para formar as espessuras desejadas, uma das placas possuía orifícios onde os transistores eram colocados para irradiação. Como exemplo a Figura 14 mostra um grupo de três transistores abaixo de 1,5 cm de acrílico formado por três placas de 0,5 cm. Note-se que

a placa de suporte dos transistores possui uma marcação que permite a identificação dos mesmos.

Figura 14: Grupo de transistores abaixo de 1,5 cm de acrílico.



Devido às diferenças intrínsecas dos transistores, o primeiro passo do trabalho foi selecionar um grupo de dispositivos semelhantes. O critério de semelhança utilizado foi o ganho de corrente medido pelo eletrômetro. Portanto, foi selecionado um conjunto de transistores cujo desvio padrão representa 0,81% do valor médio do ganho de corrente. As medições foram feitas a 25 °C.

Tendo separado dispositivos semelhantes, o procedimento experimental baseou-se em medir o ganho de corrente imediatamente antes e depois das irradiações, a fim de evitar perda do sinal. Posteriormente foram avaliados os valores de corrente apresentados, na universidade assim como no hospital onde os testes foram realizados, para comparação.

A sensibilidade dos transistores à radiação foi avaliada com um feixe de elétrons de 9 MeV, com taxa de dose de 400 unidades monitoras por minuto (UM/min), e campo

de radiação de 10x10 cm<sup>2</sup>, a uma distância fonte superfície de 100 cm. Os dispositivos foram posicionados a uma profundidade fixa de 6 mm de acrílico.

A relação entre degradação do ganho de corrente e a dose foi obtida a partir dos dados obtidos dos transistores irradiados com 250, 450 e 650 UM. Outro grupo de dispositivos foi irradiado repetidamente, de modo a avaliar o acúmulo de dose sobre eles e a possibilidade de reutilização dos mesmos.

Por fim foi realizada uma avaliação da dose depositada pelo feixe de elétrons em diferentes profundidades, usando mesma taxa de dose, tamanho de campo e distância fonte superfície indicados anteriormente, diferentes energias disponíveis no equipamento foram usadas para irradiação dos transistores. Cada energia de elétrons foi aplicada aos dispositivos com diferentes espessuras de acrílico acima dos mesmos.

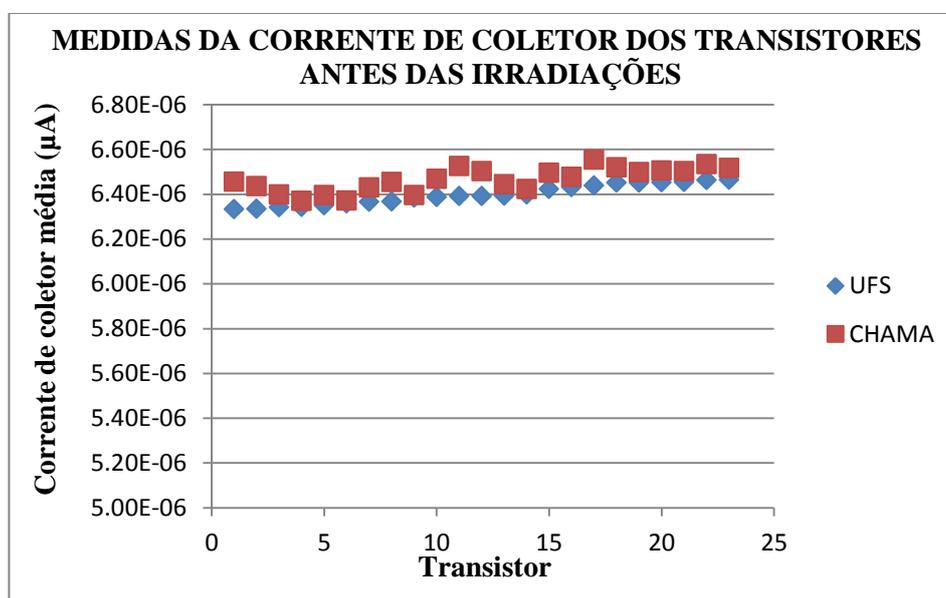
As doses em profundidade nos transistores foram comparadas com as curvas de PDD do equipamento, disponibilizados pelos físicos responsáveis pelo controle de qualidade e dosimetria do setor de radioterapia do hospital. As curvas de PDD são feitas com uma câmara de ionização (PTW modelo TN34001) e eletrômetro (PTW modelo T10010) em um *phantom* de água, para cada energia disponível no equipamento.

Como o PDD apresenta informações de dose percentual os valores de dano causado no ganho de corrente dos transistores foram tratados percentualmente, de modo que o ponto de maior dano foi considerado 100% de dose.

## 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 15 apresenta os valores de corrente de coletor ( $I_C$ ) medidos com o sistema composto pelo eletrômetro e transistores não irradiados. As medições foram realizadas na Universidade Federal de Sergipe (UFS) e no Complexo Hospitalar Manoel André (CHAMA). É possível observar que a variação entre as medidas é muito pequena, sendo de no máximo  $0,14 \mu\text{A}$ , com incertezas desprezíveis nas medidas.

Figura 15: Valores médios de corrente dos transistores. Medidas feitas na Universidade Federal de Sergipe (UFS) e no Complexo Hospitalar Manoel André (CHAMA).



Após as irradiações dos transistores em feixes de elétrons, todos os resultados obtidos revelaram diminuição na corrente de coletor dos transistores, o que consequentemente resulta em perda no ganho de corrente. A Figura 16 apresenta as correntes medidas antes e após a irradiação de um três transistores. É possível observar a redução na corrente medida após exposição a uma dose decorrente de 250 UM de um feixe de elétrons de 9 MeV. Nota-se que os dispositivos apresentam pequenas diferenças na sensibilidade devido a suas diferenças intrínsecas.

Figura 16: Corrente de coletor de três transistores antes e depois da irradiação com 250 UM em feixe de elétrons de 9 MeV.

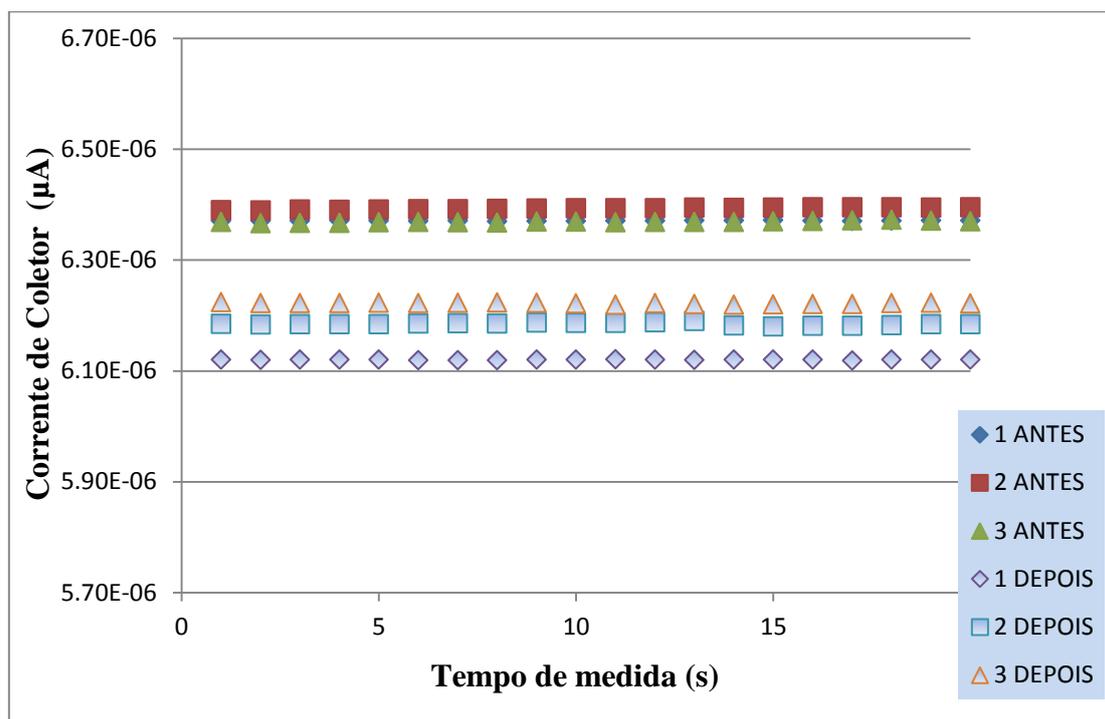


Tabela 2: Valores médios da corrente de coletor antes ( $I_{C,A}$ ) e depois ( $I_{C,D}$ ) da irradiação com 250 UM no feixe de elétrons de 9 MeV.

Transistor	$I_{C,A}$ (µA)	$I_{C,D}$ (µA)	$(I_{C,D}/ I_{C,A}) * 100$ (%)
1	6,37E-06	6,12E-06	96,07
2	6,40E-06	6,19E-06	96,72
3	6,37E-06	6,22E-06	97,64

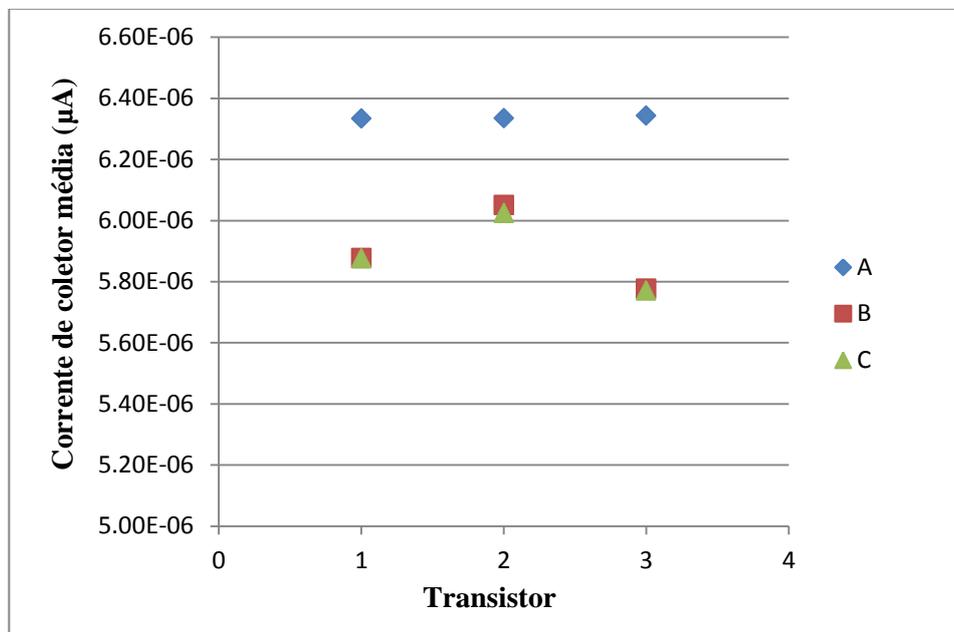
Utilizando os valores de corrente de coletor ( $I_C$ ) apresentados na Tabela 2 é possível determinar o ganho de corrente ( $\beta$ ) no transistor, pois estas duas grandezas são proporcionais ( $I_C = \beta \cdot I_B$ ).

Como a corrente da base ( $I_B$ ) é um valor constante, fornecido pelo eletrômetro, a variação na corrente de coletor é igual à variação no ganho de corrente do transistor. O ganho apresentado pelos dispositivos após a irradiação foi, em média, 96,81 %  $\pm$  0,78 % do valor medido antes da irradiação, isso significa um dano de 3,19%  $\pm$  0,78 % causado

em  $\beta$ . Essa incerteza indica a necessidade de usar sempre mais de um transistor em cada medida.

Foi possível notar nos estudos que o dano causado em  $\beta$ , observado através da redução de  $I_C$ , é conservado nos dispositivos. A figura 5 apresenta a corrente de coletor média para medições dos transistores não irradiados, representados por A na figura; dos mesmos transistores seis dias depois de irradiados; e após três semanas de irradiação. Pode-se observar que quando irradiado os transistores apresentam um novo valor de corrente e esse novo valor se mantém mesmo semanas após a irradiação.

Figura 17: Três transistores semelhantes (A), irradiados de maneiras diferentes com medidas dias (B) e semanas (C) após a irradiação.

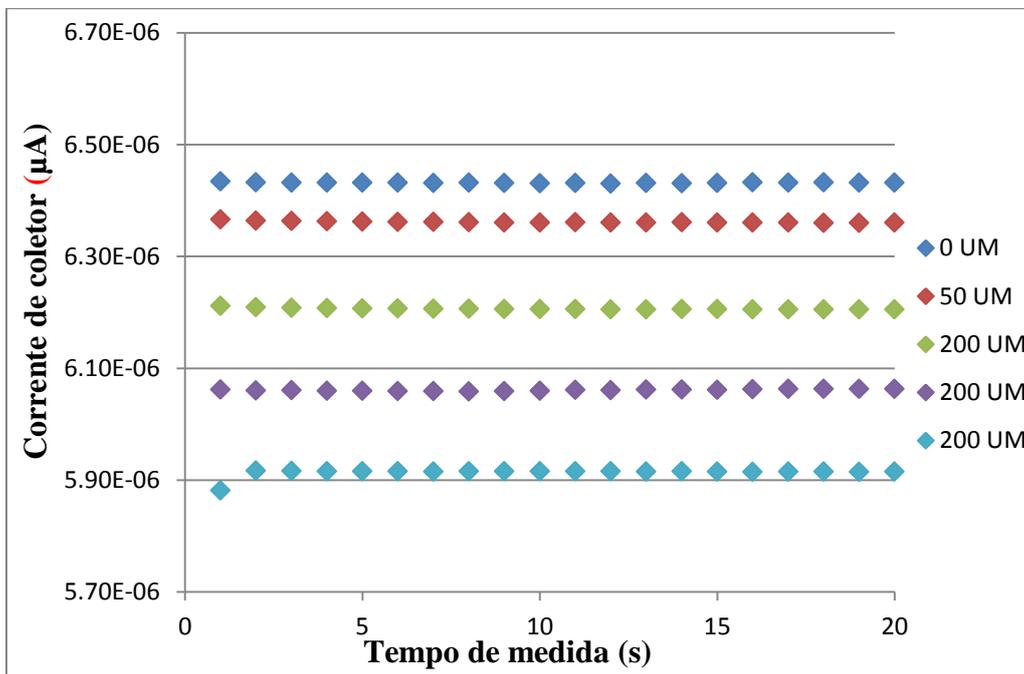


Para analisar a variação no ganho do transistor foram feitas irradiações com doses crescentes, de modo que fosse possível verificar o comportamento da resposta com a dose. Para comparação das respostas, foi feito o teste com acúmulo de dose em um grupo de transistores e outro teste com transistores sendo irradiados com doses diferentes.

O primeiro teste foi feito com um grupo de três transistores com variação relativa de 0,43% entre seus valores de ganho. Esses dispositivos foram irradiados repetidamente, e os valores de corrente podem ser apresentados na Figura 18. É possível

observar que a variação da corrente está relacionada com a magnitude da dose, pois a irradiação com 50 UM apresenta uma variação menor que as irradiadas com 200 UM. Para uma mesma quantidade de dose, a quantidade de danos foi muito semelhante entre os transistores, de modo que a reutilização dos dispositivos se mostra possível. As medidas foram feitas imediatamente após cada irradiação e pode-se observar que o dano causado pela radiação foi crescente.

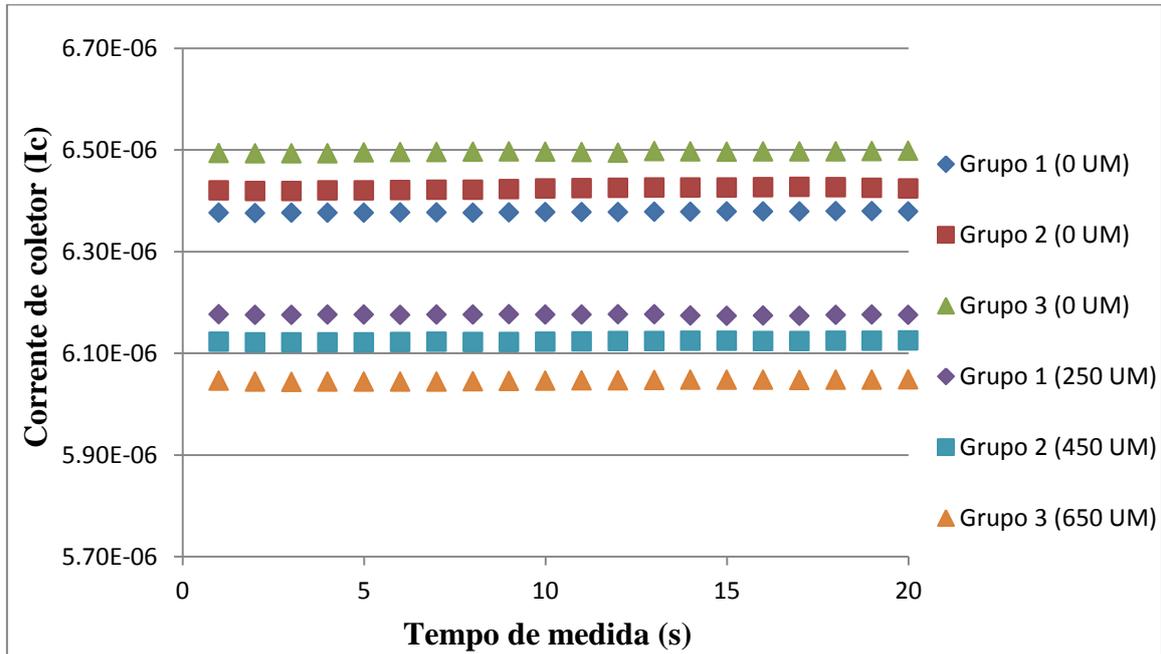
Figura 18: Variação na corrente de coletor de um grupo de transistores irradiados repetidamente.



O segundo teste foi feito com transistores diferentes, que foram irradiados com doses iguais às acumuladas nos transistores do primeiro teste. Cada grupo de dispositivos usados apresentava uma  $I_C$  inicial com diferença relativa menor que 0,5% entre eles.

Na Figura 19 é possível observar que quanto maior a dose administrada maior a variação na corrente medida dos dispositivos, esse resultado é coerente com os dados apresentados na Figura 18.

Figura 19: Variação na corrente de três grupos de transistores irradiados com diferentes doses.



Para comparar os resultados dos dois testes de dependência do ganho de corrente com a dose foi feita a análise da variação percentual dos valores medidos, Figura 20 e Figura 21, tomando as medidas anteriores às irradiações como parâmetro inicial, de forma a comparar a quantidade de dano causado ao  $\beta$  pela irradiação, percentualmente. Dos dois gráficos pode-se observar um comportamento linear da degradação dos transistores em função da dose; é possível dizer também que transistores diferentes se comportaram de maneira semelhante a dispositivos sendo irradiados repetidamente.

Figura 20: Percentual de variação no ganho de um grupo de transistores irradiado consecutivamente.

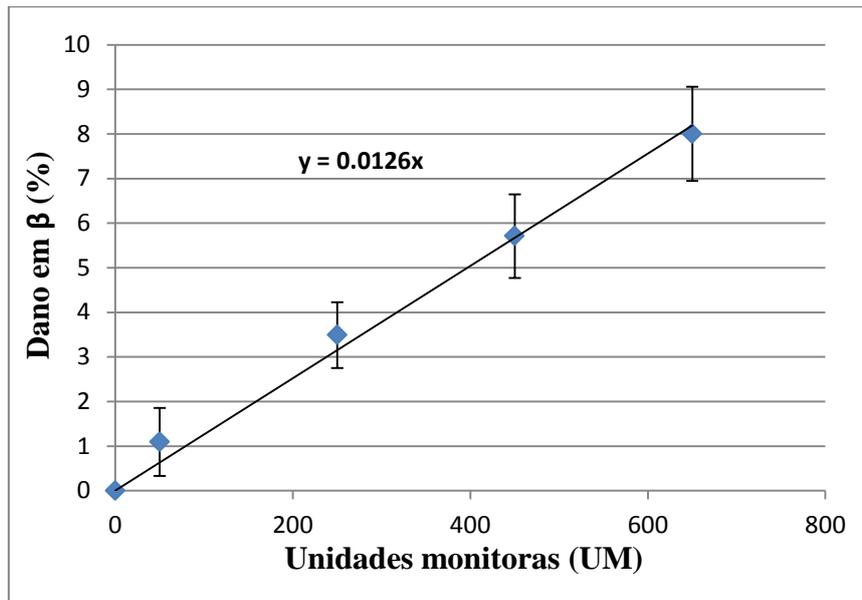


Figura 21: Percentual de variação no ganho de transistores distintos irradiados.

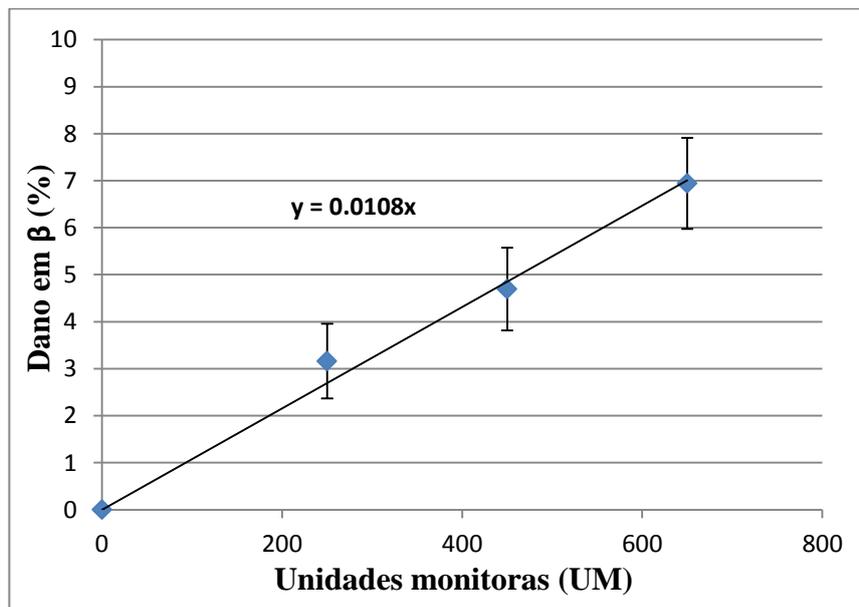


Tabela 3: Valores médios da variação no ganho de corrente de transistores irradiados.

UM	Figura 20 (%)	Figura 21 (%)	Diferença (%)
250	3,491	3,160	0,331
450	5,711	4,693	1,018
650	8,005	6,942	1,063

A linearidade apresentada em ambos os gráficos e semelhança dos coeficientes angulares das retas sugerem que é possível prever o dano causado pelos feixes de elétrons nos transistores e, por consequência, a variação no ganho de corrente pode indicar o valor de dose absorvida, essa característica indica que o material é aplicável à dosimetria.

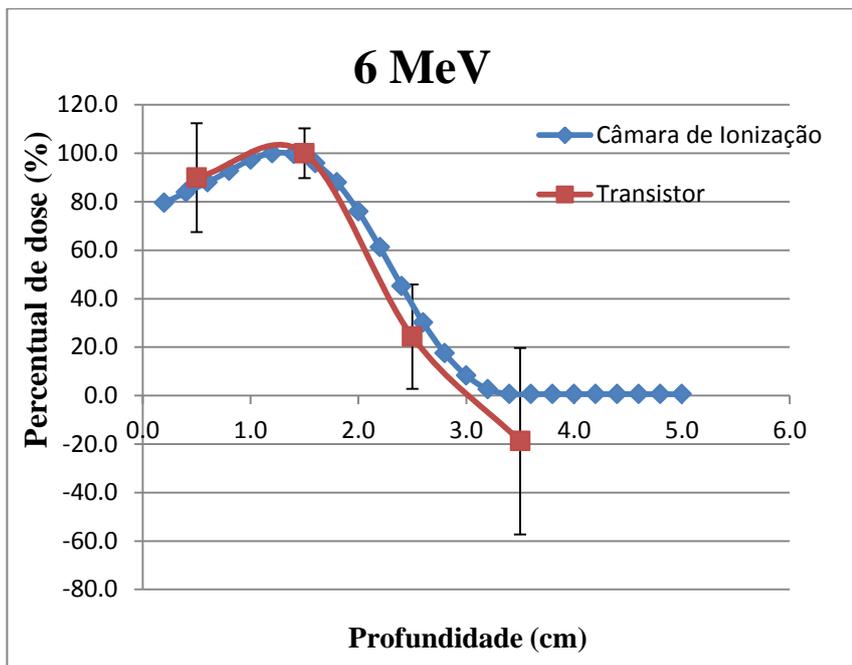
Na Tabela 3 é apresentada a variação percentual no ganho de corrente dos transistores irradiados. É possível perceber na tabela uma diferença média de  $0,8 \pm 0,44$  % entre as medições realizadas após irradiação consecutiva de um grupo de transistores (Figura 20) e após irradiação de transistores distintos (Figura 21).

Por fim, foi avaliado a deposição de dose dos feixes de elétrons em diferentes profundidades de acrílico, nesse teste grupos de transistores foram irradiados com feixe de 6, 9 e 12 MeV. Os valores de dano causado aos transistores foram normalizados de modo que o maior dano é considerado como 100%, ou seja, dose máxima.

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos com os transistores e comparados com os dados de calibração do equipamento, previamente obtidos pelos físicos médicos da instituição, utilizando um sistema dosimétricos composto por eletrômetro (PTW modelo T10010) e uma câmara de ionização (PTW modelo TN34001) em diferentes profundidades de água.

É possível observar que as medições com feixes de 6 e 9 MeV apresentaram valores negativos na parte final da curva, em decorrência do aumento na corrente medida, e pode ser devido a flutuação nos valores obtidos, possivelmente influenciados pela radiação de frenamento produzida pelo feixe. Essa radiação é composta por fótons emitidos pelos elétrons desacelerados e é responsável pela dose no fim da curva.

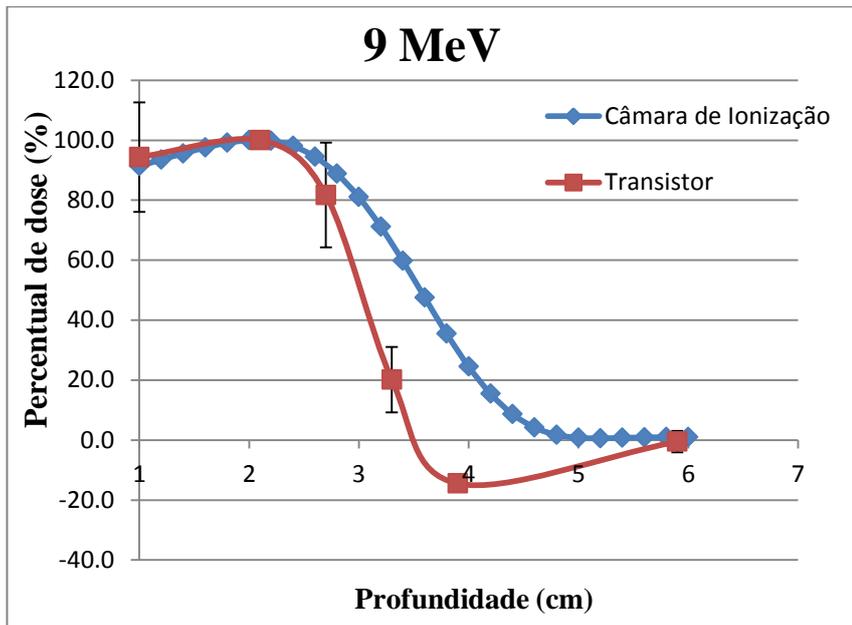
Figura 22: Percentual de dose do feixe de 6 MeV em função da profundidade deacrílico e água para transistores e câmara de ionização, respectivamente.



A curva de 9 MeV apresentou grande deslocamento para a esquerda, esse comportamento pode ter sido consequência de menor sensibilidade dos transistores usados nesse teste, considerando que o percentual de dose apresentado foi muito abaixo do esperado para aquela profundidade (Figura 23).

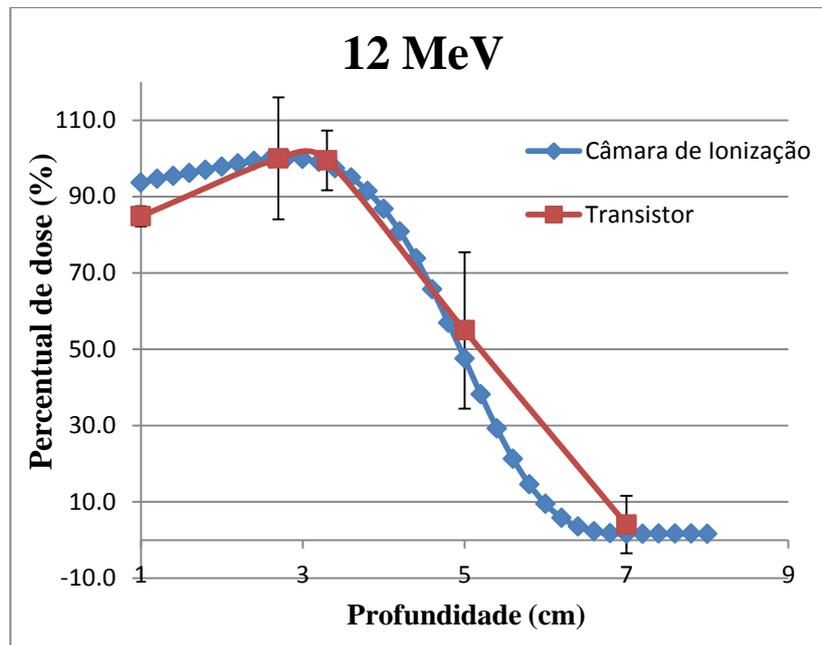
Apesar do deslocamento da parte final da curva do feixe de 9 MeV é possível observar que a parte inicial apresentou valores de percentual de dose semelhantes aos da câmara de ionização, assim como as curvas dos feixes de 6 e 12 MeV. A parte inicial da curva é de grande importância, pois é onde se encontra o alcance terapêutico.

Figura 23: Percentual de dose do feixe de 9 MeV em função da profundidade de acrílico e água para transistores e câmara de ionização respectivamente.



Com relação à Figura 24, apesar da necessidade de se avaliar o comportamento da curva dos pontos nas profundidades de 5 e 7 cm, a curva de percentual de dose obtida com resultados das exposições ao feixe de 12 MeV apresentou valores, em média, próximos aos da curva obtida pelos físicos médicos (curva de calibração). Um comportamento semelhante foi observado para os dados apresentados nos resultados das irradiações com feixes de 6 e 9 MeV.

Figura 24: Percentual de dose do feixe de 12 MeV em função da profundidade de acrílico e água para transistores e câmara de ionização respectivamente.



Muitos dos valores apresentados ainda possuem grande incerteza, isso pode ser explicado pelo fato de que os danos causados no  $\beta$  dos transistores foi baixo, sempre menor que 3%, portanto variações na sensibilidade dos transistores tornam-se significativas. É possível que o uso de mais dispositivos em cada medida diminua a incerteza dos resultados.

Com a finalidade de analisar o desvanecimento da resposta dos transistores irradiados foram analisadas, na universidade, seis dias depois das irradiações, as correntes de coletor dos dispositivos usados nos testes descritos anteriormente. Esses dados foram comparados com os obtidos no hospital.

Os valores apresentados na Figura 25 são resultado das medições feitas no hospital, antes e imediatamente após as irradiações dos transistores usados no trabalho. As leituras feitas na UFS alguns dias após os testes no hospital estão apresentadas na Figura 26.

Comparando as medições de correntes feitas no hospital e na universidade, antes e depois das irradiações, é possível observar que o dano causado é aparentemente maior se medido imediatamente após a irradiação.

Considerando que a Figura 15 mostra que os valores de corrente são semelhantes no hospital e na UFS, pode-se dizer que parte dos danos causados pela radiação nos dispositivos seja reversível, de modo que o  $\beta$  pode se aproximar do valor original algum tempo após o dano ter sido causado. Após essa aproximação do valor inicial o novo valor de corrente dos dispositivos se mantém constante. Essa característica pode reduzir a acurácia das análises realizadas dias após a irradiação, pois parte das informações relacionadas aos danos é perdida.

Figura 25: Corrente dos transistores medidas no hospital antes (A) e imediatamente depois (D) da irradiação.

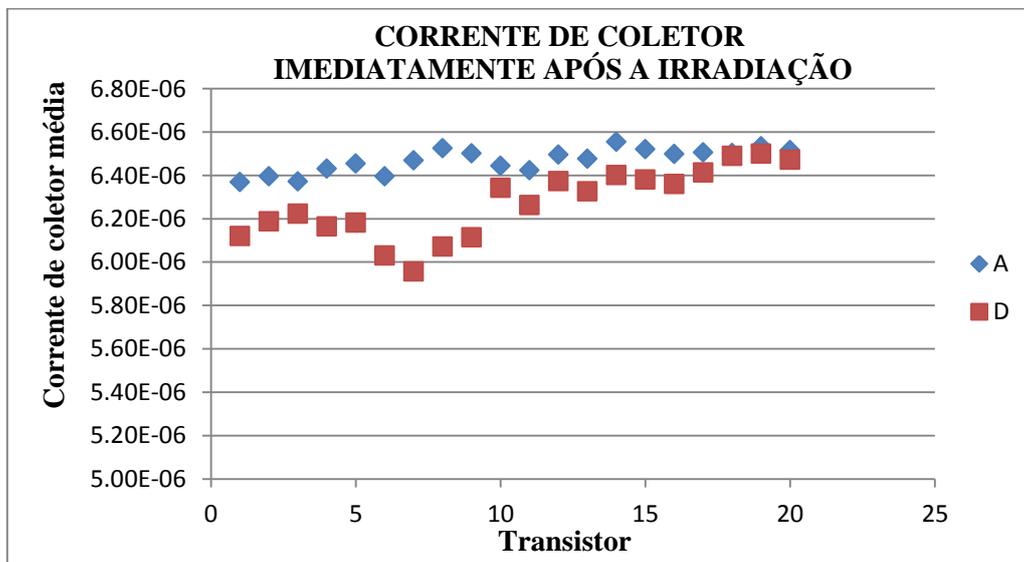
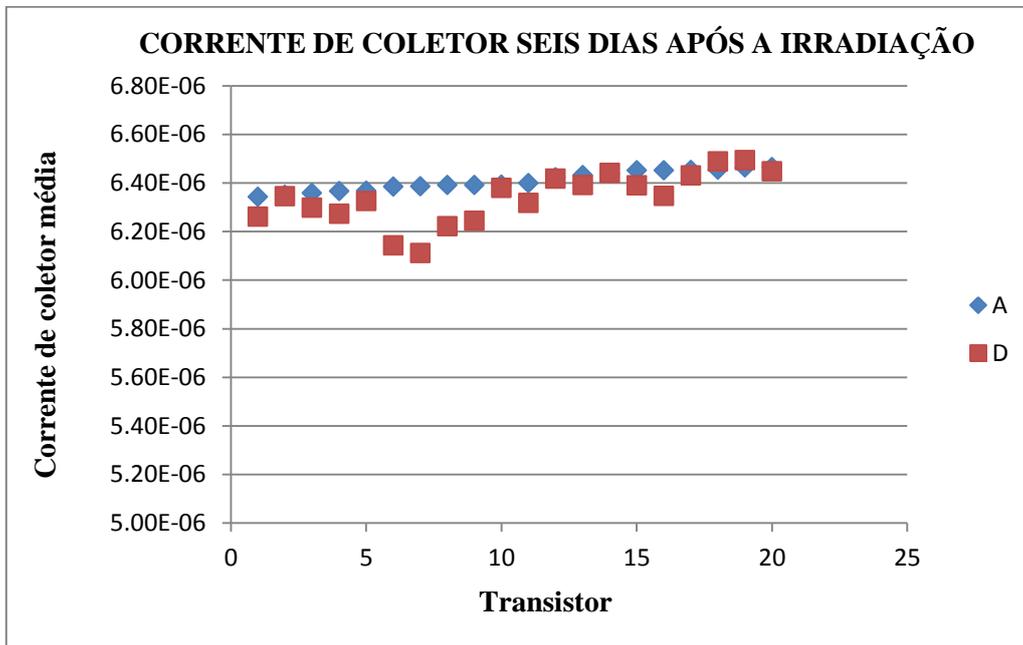


Figura 26: Corrente dos transistores medidas na universidade antes (A) e depois (D) da irradiação.

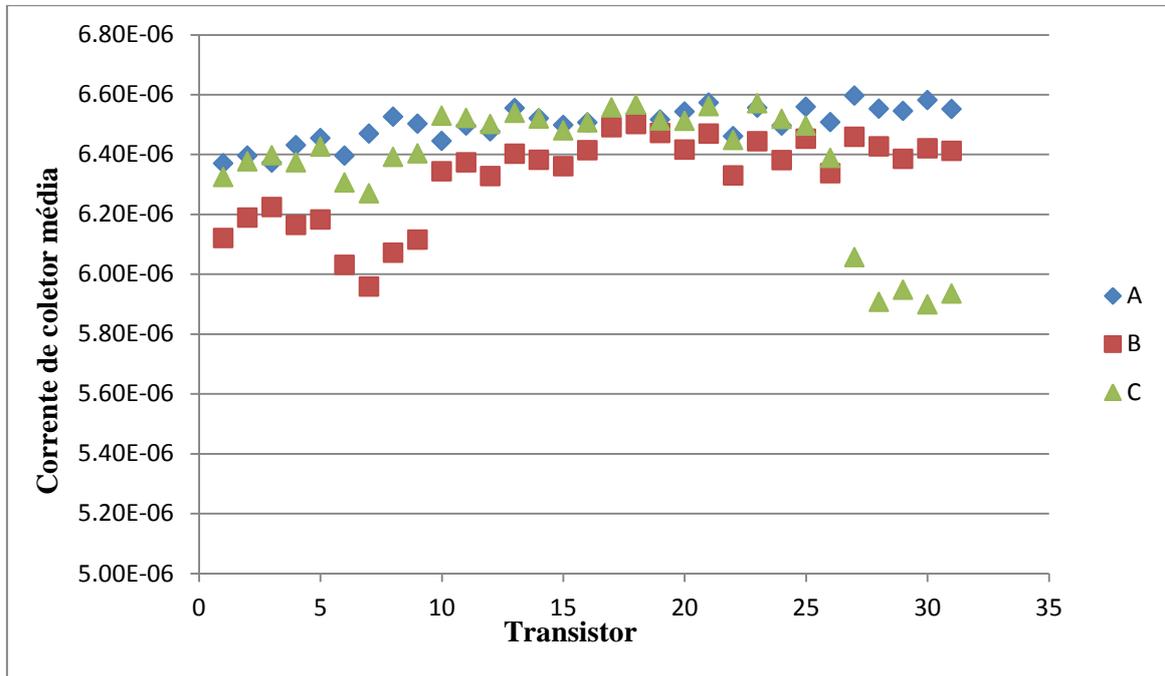


Medições, apresentadas na Figura 27, feitas no hospital algumas semanas após as irradiações mostram valores de corrente mais próximos dos valores iniciais, de maneira coerente com a análise da Figura 25 e Figura 26, entretanto, a parte final da curva apresenta valores de corrente muito inferiores aos obtidos anteriormente.

Os últimos transistores apresentados na linha C da Figura 27 foram analisados em uma sala diferente da usada para todas as medidas anteriores. É possível supor que o fato da corrente desses dispositivos se apresentar muito inferior às medidas anteriores, inclusive abaixo dos valores medidos imediatamente após as irradiações, seja devido à interferência de equipamentos presentes na sala de medida.

Durante as medições dos dispositivos 27 a 31, cujos valores de corrente estão apresentados na parte final da linha C da Figura 27, foi possível observar grande flutuação nos valores de corrente apresentados pelo eletrômetro. Essa possível interferência nos valores de corrente medidos indica a necessidade de avaliar a dependência dos resultados com as condições ambientais no momento da medição

Figura 27: Corrente dos transistores medidas no hospital antes (A), imediatamente depois (B) e algumas semanas depois da irradiação (C).



## 7 - CONCLUSÕES

Os dispositivos eletrônicos utilizados neste trabalho se mostraram promissores para dosimetria de elétrons. Os resultados obtidos indicam sensibilidade do ganho de corrente dos transistores à radiação e uma relação linear entre esta característica e a dose à qual os transistores são expostos. Essa relação mostra a possibilidade de prever a dose depositada no material com base no dano causado pela mesma.

Os resultados analisados mostram que é possível usar os mesmos transistores em irradiações consecutivas ou transistores distintos de modo que a diferença relativa entre as duas possibilidades seja pequena, da ordem de 1%, aproximadamente. Assim, foi possível observar que, apesar de não se recuperarem completamente do dano causado pela radiação, os dispositivos são reutilizáveis.

A aplicação dos transistores para avaliação de dose em profundidade apresentou resultados que seguem uma tendência de comportamento semelhante aos dados de calibração dos feixes do acelerador linear utilizado, isso indica a possível aplicação destes dispositivos em testes de dosimetria na radioterapia. Entretanto, é necessário aprimorar ainda alguns aspectos como a obtenção de uma maior quantidade de dados para que possam ser visualizadas as curvas de percentual de dose em profundidade. Além disso, o uso de uma maior quantidade de transistores em cada análise, para diminuir as incertezas das medições.

Observamos algumas limitações no uso de transistores nos procedimentos que realizamos, como a necessidade de fazer as medições de corrente imediatamente após a irradiação, devido à variação observada nos valores medidos em longo prazo se comparados com os imediatos. Embora, os procedimentos realizados com câmaras de ionização sejam também imediatos.

É necessário ainda que as medições sejam feitas sempre nos mesmos ambientes ou em condições semelhantes, pois estes dispositivos, trabalhando com correntes tão pequenas são muito sensíveis aos fatores externos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUSHBERG, J. T. et al. **The Essential Physics of Medical Imaging**. 2. ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2002.

ENDERLEIN, R.; HORING, N. J. M. **Fundamentals of Semiconductor Physics and Devices**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Ltd., 1997.

FRANCISCO, F. C. et al. Radiologia: 110 anos de história. **Revista da Imagem**, v. 27, n. 4, p. 281–286, 2005.

GARCIA, E. A. C. **Biofísica**. 1. ed. São Paulo: SARVIER, 2002.

GOITEIN, M. **Radiation Oncology: A Physicist's-Eye View**. [s.l.] Springer Science, 2008.

JOHNSTON, A. H.; SWIFT, G. M.; RAX, G. Total Dose Effects in Conventional Bipolar Transistors and Linear Integrated Circuits. v. 41, n. 6, p. 2427–2436, 1994.

KITTEL, C. **Introduction to Solid State Physics** New York John Wiley & Sons, Inc., , 1953.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. 3<sup>a</sup>. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989.

LOEW, G. A.; TALMAN, R. **Elementary Principles of Linear Accelerators**. Stanford, California: [s.n.].

MCKELVEY, J. P. **Solid State and Semiconductor Physics**. Malabar, Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, INC., 1966.

NXP. **BC846 series - Product data sheet**. Disponível em: <[http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/BC846\\_SER.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BC846_SER.pdf)>.

PIEN, C. F. et al. Effects of Total Ionizing Dose on Bipolar Junction Transistor. **American Journal of Applied Sciences**, v. 7, n. 2073, p. 807–810, 2010.

PODGORSK, E. B. **Radiation Oncology Physics : A Handbook for Teachers and Students**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005.

SANTOS, L. A. P. et al. A feasibility study of a phototransistor for the dosimetry of computerized tomography and stereotactic radiosurgery beams. **Radiation Measurements**, v. 43, n. 2-6, p. 904–907, fev. 2008.

SANTOS, L. A. P. et al. Techniques for Measuring Some Characteristics of Ionizing Radiation Beams Using Bipolar Junction Transistor as a Detector. 2013.

SANTOS, L. A. P. et al. An alternative method for using bipolar junction transistors as a radiation dosimetry detector in breast cancer treatment. **Radiation Measurements**, p. 1–5, ago. 2014.

SCHURE, A. **Basic Transistors**. 2<sup>o</sup>. ed. New Jersey: Hayden Book company, INC, 1976.

SPIELER, H. **Semiconductor Detector Systems**. New York: Oxford University Press, 2005.

STREHLOW, W. H.; COOK, E. L. Compilation of Energy Band Gap in Elemental and Binary Compound Semiconductors and Insulators. **Journal of Physical Chemistry**, v. 2, p. 163–199, 1973.

TURNER, J. E. **Atoms, Radiation, and Radiation Protection**. 3<sup>a</sup>. ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.