

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VITOR ALEXANDRE ZYTKOWSKI

**PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE UTILIZANDO FÓTONS
IONIZADOS DE ALTA ENERGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

VITOR ALEXANDRE ZYTKOWSKI

**PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE UTILIZANDO FÓTONS
IONIZADOS DE ALTA ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador (a): Professor Celso Fabricio de Melo

CURITIBA

2018

Vitor Alexandre Zytkowski

PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE UTILIZANDO FÓTONS IONIZADOS DE ALTA ENERGIA

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 22 de novembro de 2018.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.

Coordenador de Curso

Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Dr

Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Celso Fabricio de Melo Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Celso Fabricio de Melo Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Ismael Chiamenti, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Edney Milhoretto, Dr
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

A folha de aprovação assinada encontra-se na
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

RESUMO

Zytkowski, Vitor. PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE UTILIZANDO RADIAÇÃO IONIZANTE DE ALTA ENERGIA. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Elétrica com ênfase em eletrônica industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Este trabalho apresenta uma pesquisa sobre a aplicação de raios X e gama em dispositivos fotovoltaicos para a produção de energia elétrica. O trabalho é introduzido com uma breve apresentação sobre o cenário da produção de energia nuclear atualmente no mundo. O desenvolvimento teórico do trabalho traz conhecimentos sobre a quantidade de energia que uma usina nuclear produz em raios gama e demonstra por meio de cálculos o quanto de energia se poderia produzir aplicando o sistema indicado nessa pesquisa. Também é explicado o funcionamento e o método construtivo dos dispositivos fotovoltaicos e das máquinas de produção de raios X que foram utilizadas para os testes práticos onde raios X foram aplicados aos dispositivos fotovoltaicos. Por fim o trabalho apresenta os testes práticos que obtém uma resposta de tensão e corrente para cada um dos dispositivos testados e apresenta uma conclusão sobre a efetividade dos dispositivos testados em raios X para a produção de energia elétrica, escolhendo o melhor dispositivo para a aplicação e demonstrando resultados animadores.

Palavras chave: Usina Nuclear. Dispositivos Fotovoltaicos. Raios Gama. Raios X.

ABSTRACT

Zytkowski, Vitor. Electricity production utilizing ionized photons of high power. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Elétrica com ênfase em eletrônica industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

This paper presents a research about the application of X rays and gamma rays in photovoltaic devices for the production of electrical energy. The paper makes an introduction about the scenery of the production of nuclear energy through the world and follows expliciting about the expansion of the use of nuclear energy. The theoretical development of the paper bring knowledge about the quantity of energy that a nuclear plant produces in gamma rays and demonstrates, by calculations, the amount of energy that could be produced if applied the method studied in this research. It is also explained the way the photovoltaic devices and the X ray machines work and are built, those X ray machines were used in the practical tests were the X rays were applied to the photovoltaic devices. At last the paper presents the practical tests and gets the reaction of voltage and current of each of devices tested and presents a conclusion about how effective those devise are when applied with X rays, choosing the best device for the application and showing great results.

Key words: Nuclear Plant. Photovoltaic Devices. Gamma Rays. X Rays.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito fotoelétrico.....	14
Figura 2 – Célula monocristalina	14
Figura 3 – Célula policristalina	16
Figura 4 – Fotodiodo PIN	17
Figura 5 - Tubos de raio X industrial	18
Figura 6 – Controle de tubo de raios X industrial	18
Figura 7 - Tubo de raios X do equipamento Ray Tec.....	19
Figura 8 – Resposta da Célula Monocristalina	23
Figura 9 – Resposta da Célula Monocristalina Conectada em Série	28
Figura 10 – Resposta da Célula Monocristalina Conectada em Paralelo.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teste de Controle	21
Tabela 2 – Célula Monocristalina 100 kVp	21
Tabela 3 - Célula Monocristalina 120 kVp.....	22
Tabela 4 - Célula Monocristalina 150 kVp.....	22
Tabela 5 - Célula Policristalina 100 kVp.....	24
Tabela 6 - Célula Policristalina 150 kVp.....	24
Tabela 7 - Fotodiodo 100 kVp	25
Tabela 8 - Fotodiodo 150 kVp	25
Tabela 9 – Célula Monocristalina Conectada em Série 100 kVp.....	26
Tabela 10 - Célula Monocristalina Conectada em Série 120 kVp	26
Tabela 11 - Célula Monocristalina Conectada em Série 150 kVp	26
Tabela 12 - Célula Monocristalina Conectada em Paralelo 100 kVp.....	29
Tabela 13 - Célula Monocristalina Conectada em Paralelo 120 kVp.....	29
Tabela 14 - Célula Monocristalina Conectada em Paralelo 150 kVp.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
1.1	Tema	7
1.1.1	Delimitação do tema	8
1.2	Problema e premissas	8
1.3	Objetivos.....	9
1.3.1	Objetivo geral.....	9
1.3.2	Objetivos específicos	9
1.4	Justificativa	10
1.5	Procedimentos metodológicos.....	10
1.6	Estrutura do trabalho	10
2	INTRODUÇÃO TEÓRICA A FISSÃO NUCLEAR E INSPIRAÇÃO A PESQUISA.....	11
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1	Dispositivos fotovoltaicos	13
3.1.1	Introdução aos conceitos base de como funciona um dispositivo fotovoltaico.	13
3.1.2	Célula fotovoltaica de silício monocristalino.....	14
3.1.3	Célula Fotovoltaica de Silício Policristalino	16
3.1.4	Fotodiodo PIN	16
4	FONTES DE EMISSÃO DE FÓTONS DE ALTA ENERGIA	17
4.1	Máquinas de raio X	17
5	CONCLUSÃO TEÓRICA.....	20
6	TESTES EXPERIMENTAIS.....	20
6.1	Célula monocristalina.....	21
6.2	Célula policristalina	24
6.3	Fotodiodo	25
6.4	Célula monocristalina conectada em série.....	26
6.5	Célula monocristalina conectada em paralelo	29
7	CONCLUSÕES FINAIS.....	32
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

A geração de energia elétrica de maneira renovável e não poluente é uma das questões de maior interesse no atual cenário global. Conhecer novos recursos e reformular e aperfeiçoar os recursos sustentáveis já inicializados desencadeia um horizonte de possibilidades em diversas áreas do conhecimento.

A produção energética, a partir de recursos nucleares, surgiu no final do século XX, mas o interesse em produção de energia limpa só se tornou mais intenso, no mundo, pós Segunda Guerra Mundial (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2014).

Com o desenvolvimento desta técnica de produção, o número de usinas nucleares cresceu exponencialmente nas últimas décadas, tendo, hoje, um total de 441 usinas em funcionamento no mundo, sendo, dessas, 100 nos Estados Unidos, e mais 67 em construção, sendo 24 somente na China (Panorama da Energia Nuclear no Mundo, 2016). Como pode-se observar, países com grande capacidade econômica investem neste tipo de recurso, já que seu desempenho se demonstra muito produtivo.

O que é de importante destaque é de que maneira tal energia é produzida. Pode-se descrever, com ideias básicas, que uma usina nuclear se aproveita do calor emitido pelo Urânio, quando este passa por alguns processos, que num todo, é chamado de fissão nuclear. Este calor é então usado para aquecer uma caldeira com água, e o vapor gerado sob pressão faz uma turbina de geração elétrica entrar em funcionamento (UNICAMP USINA NUCLEAR).

Os núcleos das usinas termonucleares são, então, isolados através de algumas camadas de proteção, pelo fato de que o urânio enriquecido é radioativo e produz raios gama a cada fissão sofrida pelos átomos. Essa radiação é extremamente perigosa à saúde humana, porém é muito utilizada, inclusive em departamentos da medicina, como para tratamentos oncológicos, ou na indústria para a inspeção não destrutiva de peças. Todavia essas

aplicações seguem alguns cuidados, de maneira a utilizar a radiação de modo consciente.

1.1.1 Delimitação do tema

O fato de destaque apresentado é que os raios gama possuem uma alta energia se comparados com outros tipos de radiação, e esta energia parece ser somente abafada e isolada (pois atualmente ela só é vista como nociva e por essa razão, quando produzida para que não existam danos aos seres vivos, se concentram esforços para bloqueá-la). Este trabalho tem como objetivo aplicar um novo método para a produção de energia elétrica, tendo em vista um melhor aproveitamento da energia produzida no interior de uma usina nuclear, principalmente a energia da radiação gama, transformando esta energia em energia elétrica comercial. Ou seja, o enfoque deste trabalho é se utilizar de dispositivos fotovoltaicos para a conversão de raios gama e raios X (fótons de grande energia) em energia elétrica.

1.2 Problema e premissas

O problema desenvolvido nesse trabalho é que os raios X e gama não são utilizados para a produção de energia, perdendo assim uma grande fonte energética. Como já argumentado anteriormente, a necessidade de energia elétrica cresce todos os anos e esse trabalho propõe um método diferenciado para a produção de eletricidade. A suposição que é feita dentro desse trabalho é que com a utilização de dispositivos fotovoltaicos combinada com o sistema nuclear de produção de energia já existente, se possa encontrar um novo meio de produção de energia, ou simplesmente estudar o fenômeno para que outros possuam o embasamento para que essa produção de energia possa ocorrer.

Portanto, a premissa deste trabalho seria utilizar o efeito fotoelétrico presente em dispositivos fotovoltaicos (não limitados somente por células fotovoltaicas comuns) para a produção de energia elétrica.

Problemas que este trabalho tenta superar para a viabilidade de sua aplicação. O primeiro problema encontrado são as características técnicas das células fotovoltaicas em geral, que foram concebidas para produção de energia dentro de um espectro de luz próximo a luz visível, o que torna o produto

menos eficaz para fótons em outros comprimentos de onda, como é o caso do gama e dos raios X. Todavia, o principal problema a ser superado é que os fótons de alta energia (raios gama e raios X) possuem grande poder de penetração, pois o seu comprimento de onda é muito pequeno (inverso à frequência), o que faz a interação deles com os dispositivos fotovoltaicos seja baixa, desta forma sendo menos eficiente na produção de corrente elétrica.

Porém, mesmo após a apresentação de adversidades tão grandes, a pesquisa busca reafirmar os resultados da interação dos dispositivos fotovoltaicos com os fótons de alta energia.

1.3 Objetivos

O trabalho apresenta uma maneira alternativa de utilização dos dispositivos fotovoltaicos. Tais dispositivos funcionam segundo o efeito fotoelétrico, o que significa que se utiliza de ondas eletromagnéticas para a produção de energia. Portanto, em teoria, os raios gama ou os raios X poderiam ser absorvidos da mesma forma que as ondas de luz visível, que são o foco dos painéis fotovoltaicos.

Os raios gama e os raios X, como explicado na introdução, são produzidos durante as reações de fissão que ocorrem para a produção de energia em usinas nucleares. O objetivo desta pesquisa é propor a utilização de um sistema de placas fotovoltaicas na proximidade do núcleo um reator nuclear para que elas absorvam essa radiação e a transforme em energia elétrica, o que proporcionaria um melhor aproveitamento de todo o sistema nuclear de produção por um custo baixo. Para demonstrar essa ideia foram feitos testes de diversos dispositivos fotovoltaicos em exposição a raios X.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral foi fazer uso de diversos dispositivos fotovoltaicos em fontes de raios X para obter a curva de resposta de cada um.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as curvas de tensão obtida X corrente obtida.
- Identificar os melhores dispositivos para a captação de energia.
- Avaliar os resultados e obter uma resposta às perguntas feitas na pesquisa.

1.4 Justificativa

Todos os anos, a produção de energia precisa crescer devido à demanda exigida pela indústria e pela sociedade, que aumenta com o avanço da tecnologia. Portanto, trabalhos como esse possuem um intuito de aprimorar a produção de energia elétrica já existente ou aperfeiçoar a produção em novas usinas.

Esse tipo de pesquisa, ao ser desenvolvida e aplicada, ajuda com o aumento da produção de energia elétrica em espaços menores, o que diminui os danos ao meio ambiente e os gastos com os processos de construção. Outro ponto a se observar é que, caso seja confirmado o potencial deste trabalho, os custos relativos à eletricidade poderão diminuir e isso poderá surtir efeito não somente na indústria, mas também para a população, que terá menos gastos, o que aprimorará a qualidade de vida geral.

1.5 Procedimentos metodológicos

As etapas do processo foram:

1. Aquisição de diversos dispositivos fotovoltaicos disponíveis no comércio, entre eles, fotodiodo pin e células fotovoltaicas de silício.
2. Medição de resposta (tensão convertida X Corrente convertida em relação a tensão emitida) de cada dispositivo fotovoltaico ao ser exposto a radiação X. A medição da corrente e tensão dos dispositivos foi realizada via um multímetro de precisão, já para o equipamento de raios X a tensão e quantidade de fótons emitidos foi medido na escala de regulação do próprio aparelho.
3. Comparar as respostas e relatar quais os dispositivos mais indicados para a situação indicada pelo trabalho.

1.6 Estrutura do trabalho

O trabalho realizado experimental, portanto o seu foco principal é: utilizar meios experimentais para comprovar a viabilidade do projeto. Ou seja, os experimentos em laboratório, fazendo a aplicação de raios X nos dispositivos fotovoltaicos, indicarão os resultados.

Esse trabalho será dividido nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Introdução.

Capítulo 2 – Introdução teórica a fissão nuclear e inspiração a pesquisa.

Capítulo 3 – Dispositivos fotovoltaicos.

Capítulo 4 – Fontes de emissão de fótons ionizados de alta energia.

Capítulo 5 – Conclusão teórica.

Capítulo 6 – Testes experimentais.

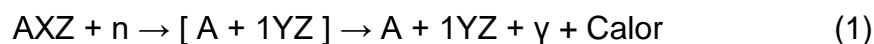
Capítulo 7 – Conclusões Finais.

2 INTRODUÇÃO TEÓRICA A FISSÃO NUCLEAR E INSPIRAÇÃO A PESQUISA

Ao longo do texto serão utilizados dois termos: “quantidade de ondas e energia de ondas” o termo quantidade de ondas se refere à quantidade de fótons emitidos e o termo energia de ondas se refere à frequência das ondas eletromagnéticas emitidas.

Reação e fissão nuclear: As usinas nucleares, em utilização atualmente, aplicam o sistema no qual a fissão, em grande parte de urânio, é utilizada para aquecer a água de uma turbina, transformando-a em vapor, e essa turbina faz girar um gerador através de seus enrolamentos, variando o fluxo magnético de modo a produzir força eletromotriz.

Na fissão átomos de *Uranio*²³⁸ e *Uranio*²³⁵ são combinados para que a reação não seja explosiva. Durante a fissão, nêutrons são inseridos para iniciar a reação, que nada mais é do que uma sequência de decaimentos atômicos que liberam nêutrons devido à absorção de outros nêutrons. Para cada nêutron absorvido um fóton gama é liberado e energia térmica que aquece a água do reator. A equação principal que representa essa reação é a Equação 1.



Essa reação demonstra um átomo de uranio (representado por AXZ) sendo atingido por um nêutron. Após essa reação o átomo de uranio se divide em 2 átomos distintos (representados por A + 1YZ) e produz um fóton gama (γ) + Calor.

Essa é a reação que representa a liberação de fótons de radiação gama.

Para se obter a quantidade de energia que a onda eletromagnética produz, foi utilizada a equação $E = h.f$ (NUSSENZVEIG “CURSO DE FÍSICA BÁSICA: ÓTICA, RELATIVIDADE E FÍSICA QUÂNTICA”) onde h é a constante de Planck ($4,135 \times 10^{-15} \text{ eV}$) e f é a frequência da onda, no caso da radiação gama (fótons gama) variam sua frequência entre 10^{19} Hz até 10^{24} Hz .

A fissão nuclear libera cerca de 200 MeV por átomo fissionado. Desses 200, cerca de 20 MeV são energia do campo magnético dos fótons de raios gama. Somente 150 MeV são aproveitados para o aquecimento da água, o resto é perdido em reações e nas ondas eletromagnéticas.

- Dados teóricos sobre radiação em usinas nucleares.

Para início da pesquisa, tomou-se a Equação 2 que relaciona a energia de uma onda eletromagnética com a sua frequência através da constante de Planck.

$$E = h . f \quad (2)$$

Como o objeto de interesse, neste caso, é estudar a energia dos fótons gama, o intervalo de frequência analisado se limita entre 10^{19} Hz à 10^{24} Hz (UDESC “ONDAS MAGNÉTICAS NO ESPAÇO LIVRE”). Logo, a energia para esses fótons varia em larga escala, porém valores encontrados em pesquisas em usinas nucleares e relatados pela UFSM (Universidade Federal de Santa Maria), são mais próximos de 5 MeV à 20 MeV, aproximadamente.

- Fazendo-se a conversão de elétron-volt para watt/fissão

Primeiramente, para se encontrar o número de fissões por hora do urânio 235 (utilizado em usinas nucleares) foi utilizado o seguinte processo lógico: A massa do urânio 235 igual a 0,235 kg/mol (sendo $1 \text{ mol} = 6,022 \times 10^{23}$ átomos). Em dados disponíveis no site da Eletrobrás (“Panorama da Energia Nuclear no Mundo”. 2016), 326.000 kg de Urânio são usados por ano na usina de Angra 1, o que corresponde em média a 37,2145 kg/h.

Logo, o número de átomos por hora que reagem, isto é, o número de fissões por hora, é de $953,641 \times 10^{23}$. Sendo 1 eV equivalente a $1,6 \times 10^{-19}$ Watts, pode-se calcular:

$$20 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19} = 32 \times 10^{-13} \text{Watt/fissão}$$

Sendo 20×10^6 a energia em eV e $1,6 \times 10^{-19}$ o fator de conversão.

Com o número de fissões por hora, conclui-se que:

- Melhor caso (20 MeV) = $305,16509 \cdot 10^{12}$ Wxh
- Pior caso (5 MeV) = $76,29127 \cdot 10^{12}$ Wxh.

Pela magnitude desses valores, pensou-se ser vantajosa a captação desta energia, mesmo em uma condição de baixa eficiência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

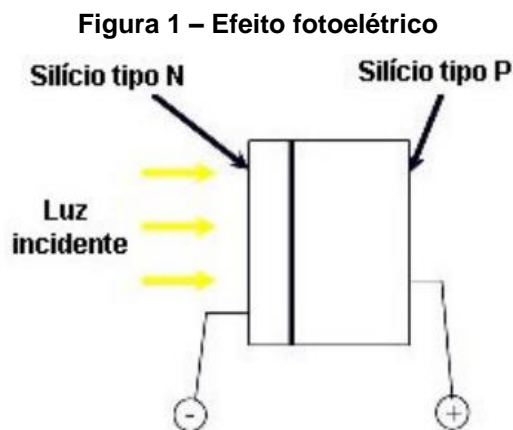
3.1 Dispositivos fotovoltaicos

3.1.1 Introdução aos conceitos base de como funciona um dispositivo fotovoltaico.

Efeito fotoelétrico: o efeito fotoelétrico consiste, basicamente, na liberação de elétrons por um material, quando este é exposto a uma onda eletromagnética. Os cientistas estavam curiosos com tal fato, mas somente Albert Einstein (1879 – 1955), com os, então recentes, conhecimentos de mecânica quântica de Max Planck (1858 – 1947), conseguiu de fato explicar o fenômeno.

Assim sendo, hoje se tem as células fotovoltaicas, que são construídas a partir de materiais semicondutores, como o silício. Tal material, quando puro, não possui elétrons livres em sua constituição. Por isso, passa por um processo de dopagem, no qual um átomo de outro material “adiciona” um elétron, ou uma lacuna, dependendo de qual componente é usado, na estrutura do silício. Desta forma, se tem um Cristal tipo N, e um tipo P.

A energia provinda dos fótons das ondas eletromagnéticas incidem sobre o cristal tipo N, fazendo com que os elétrons livres, nesta camada, sejam excitados, de modo a promover um fluxo de elétrons com sentido ao cristal tipo P, isto é, uma corrente elétrica. Este processo pode ser visualizado na figura 1 abaixo.



Fonte: SOLARFOTOVOLTAICA

Painéis fotovoltaicos: são placas comercializadas que trabalham segundo o efeito fotoelétrico que, por motivos mecânicos e estruturais, não funcionam idealmente. Para estas placas, seu funcionamento de pico se dá por volta de uma temperatura ambiente de 25°C, na qual a placa funcionaria com eficiência até 21%, dependendo da sua tecnologia. (TIPOS DE PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICOS, 2016).

Para os testes que foram realizados na parte prática do trabalho serão utilizadas células fotovoltaicas monocristalinas, policristalinas e o dispositivo fotodiodo pin. A seguir será explicado o princípio de fabricação desses materiais.

3.1.2 Célula fotovoltaica de silício monocristalino

Na Figura 2 é apresentada uma célula monocristalina.

Figura 2 – Célula monocristalina



Fonte: ALIEXPRESS

Para a fabricação das células fotovoltaicas de silício monocristalino algumas etapas são realizadas. São elas:

Preparação do silício: o silício é obtido a partir do quartzo e purificado por um processo conhecido como processo Siemens. Nesta técnica, o silício metalúrgico é primeiramente convertido em triclorosilano (HSiCl_3), obtido por destilação fracionada após reação do silício metalúrgico com ácido clorídrico (HCl). O triclorosilano obtido desta maneira é altamente puro e é utilizado em um reator CVD (Chemical Vapor Deposition) como matéria prima para se obter silício policristalino. Após a obtenção do silício policristalino, é realizada a técnica Czochralski, onde o silício é fundido e recristalizado a obtenção de silício monocristalino que será cortado na próxima etapa. (Instituto de Física Gleb Wathagin -IFGW/Unicamp)

Corte e limpeza do silício: onde uma lâmina de silício de alta pureza é cortada no tamanho desejado, sofre um ataque químico em uma temperatura entre $80\text{ }^\circ\text{C}$ a $90\text{ }^\circ\text{C}$ para reduzir a espessura das placas cortadas e para identificar falhas estruturais que podem ocorrer durante o corte, e após esse processo, uma limpeza para remover as impurezas é realizada.

Difusão de fósforo: para a formação da camada n sobre o silício tipo p, normalmente, o processo é realizado em temperaturas próximas a $900\text{ }^\circ\text{C}$ onde POCl_3 (fonte de fósforo) é borbulhado com N_2 e um fluxo extra de N_2 e O_2 é utilizado para transportar o $\text{N}_2 + \text{POCl}_3$. Após esse processo, as duas faces da célula ficam dopadas do tipo n, porém, depois da difusão, uma das faces é protegida com piche, o que permite a remoção da camada n em uma das faces, quando aplicado um ataque químico.

Difusão de alumínio e contatos metálicos: é realizada uma metalização com alumínio na face oposta a tipo n, o que aumenta a eficiência da célula ao adicionar uma barreira de potencial na face traseira. Após a evaporação (processo que causa a deposição dos metais na célula) é feito um recozimento, para obter a difusão do alumínio. Para a fabricação dos contatos metálicos se utiliza a evaporação de um filme de titânio, paládio e prata.

Deposição de camada anti-refletora: para diminuir as perdas por reflexão na superfície da célula, é depositada uma camada especial de um filme transparente, com índice de refração apropriado para diminuir a reflexão de luz visível. Na indústria é comum o uso de nitreto de silício ou outros materiais

depositados por spray químico (Instituto de Física Gleb Wathagin - IFGW/Unicamp).

3.1.3 Célula Fotovoltaica de Silício Policristalino

Figura 3 – Célula policristalina



Fonte: ALIEXPRESS

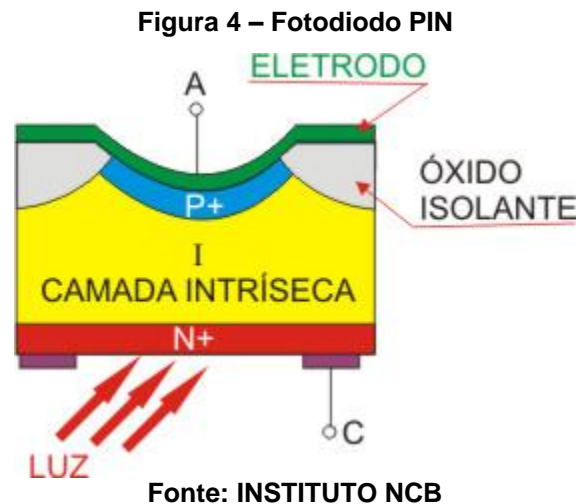
Possui um método similar de fabricação à célula monocristalina, porém o silício não passa pela técnica Czochralski para se tornar um material monocristalino, mas sim por outros processos, onde se torna um bloco policristalino que pode ser cortado para a continuação do processo de fabricação da célula.

3.1.4 Fotodiodo PIN

O fotodiodo PIN é um diodo semicondutor sensível à luz, utilizado amplamente como sensor fotoelétrico, ele foi escolhido para testes neste trabalho devido a sua resposta espectral, que é ampla e pode reagir às ondas de raios X e raios gama. Sendo utilizado em alguns casos como sensor de radiação como indicado em vários artigos.

Segundo (radioelectronics.com) o fotodiodo pin de silício é o mais indicado para ondas com o comprimento de onda muito pequeno, o que é o caso estudado neste trabalho, a imagem a seguir demonstra o modo como o fotodiodo PIN é construído. Não foram encontradas muitas informações sobre o seu processo industrial de construção, porém, em seu resultado final pode-se observar que ele se assemelha a uma célula fotovoltaica e ele trabalha da mesma maneira, quando a luz incide na junção semicondutora elétrons são

liberados causando uma diferença de potencial que pode ser utilizada. Como a finalidade deste trabalho é relatar se é possível uma produção de energia com a utilização de ondas de baixo comprimento de onda (raios X e gama) esse diodo pode se mostrar excepcional, podendo ser capaz de demonstrar o mesmo efeito de uma célula fotovoltaica no sol, todavia nas condições de estudo desse trabalho.



4 FONTES DE EMISSÃO DE FÓTONS DE ALTA ENERGIA

4.1 Máquinas de raio X

A base para o funcionamento de uma máquina de raios X é um par de eletrodos, um cátodo e um ânodo, ambos ficam dentro de um tubo de vidro a vácuo. A máquina passa corrente elétrica pelo cátodo, que é um filamento, o que o aquece. O calor cria um efeito termoionico onde os elétrons da superfície do filamento são ejetados, enquanto o ânodo positivamente carregado, que é um disco achatado feito de tungstênio, atrai os elétrons através do tubo.

A diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo é bem alta, na faixa dos quilovolts, o que faz com que os elétrons se movimentem pelo tubo com bastante velocidade. Esses elétrons se chocam com os átomos de tungstênio, ocasionando uma interação que libera um elétron da camada mais interna do átomo, o que ocasiona uma migração de um elétron de maior energia para o nível de energia mais interno. Com isso liberando a sua energia extra na forma de um fóton de raios X. (BUSHONG)

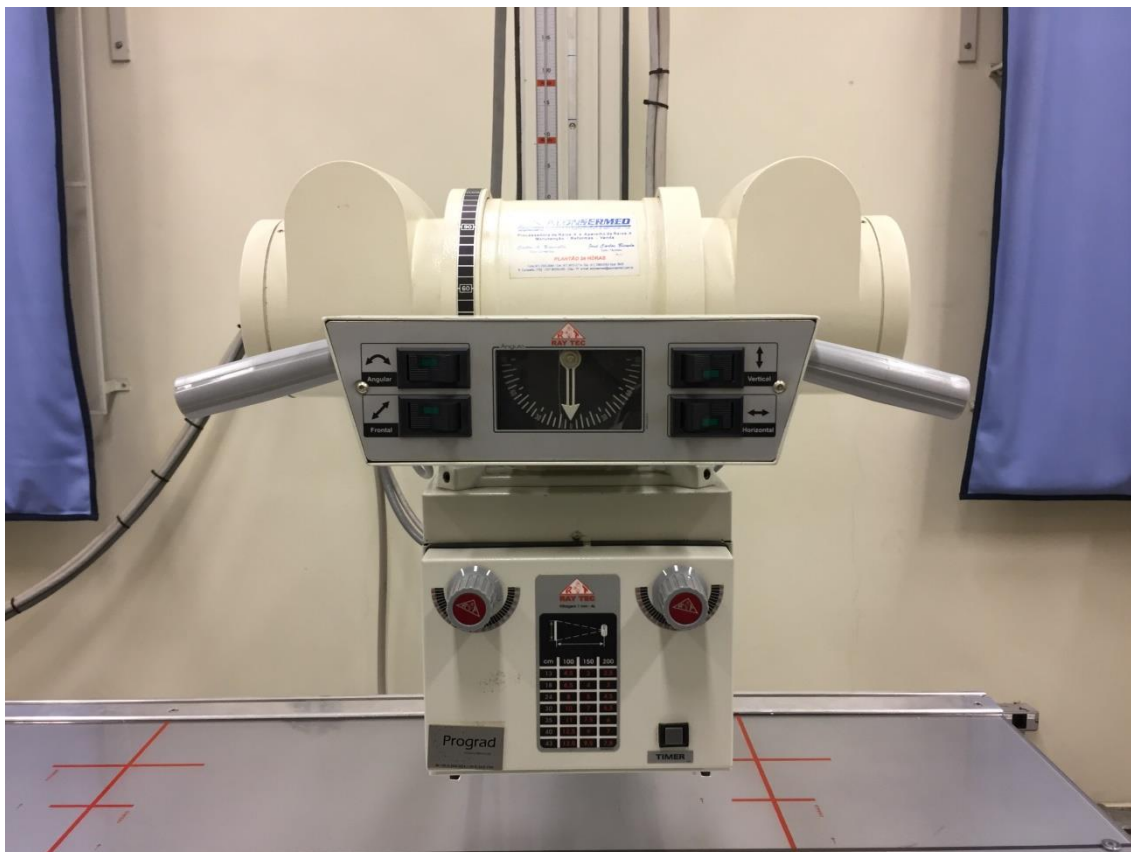
Figura 5 - Tubos de raio X industrial

Fonte: Aatoria Própria

A Figura 5 se refere ao Tubo de raios X industrial que será utilizado no experimento, ele está localizado no laboratório de radiações ionizantes da UTFPR. O tubo trabalha com uma tensão regulável até centenas de quilovolts pico. Ele também trabalha com uma corrente (que determina a quantidade de fótons de raios X que serão liberadas) variável de 0 até 5 mA. Por fim existe um controle da regulação (Figura 6), que controla o tempo de exposição das ondas, a quantidade de fótons que é emitida pelo tubo e a tensão no tubo de raios X.

Figura 6 – Controle de tubo de raios X industrial

Fonte: Aatoria Própria

Figura 7 - Tubo de raios X do equipamento Ray Tec

Fonte: Aatoria Própria

A Figura 7 se refere a segunda máquina de raios X (Ray Tec) que será utilizada no experimento. Este equipamento também está localizado no laboratório de radiações ionizantes da UTFPR. Apesar de trabalhar com o foco mais estreito aproximadamente 20x20cm, que o equipamento listado anteriormente, e poder utilizar uma corrente de até 6 A, o tempo de exposição que esta máquina de raios X trabalha é bem mais curto, variando de 8 ms até alguns segundos. Este fato dificulta muito a medição do resultado das células fotovoltaicas após a aplicação dos raios X, porém, esta máquina será utilizada para que uma amostra diferente seja obtida.

O valor de energia da onda de raios X das duas máquinas não é especificado, porém, com a utilização de tabelas, se pode delimitar a frequência de uma onda de raios X entre 10^{17} até 10^{19} Hz. Como já explicado anteriormente, para a obtenção da quantidade de energia que uma onda possui, se utiliza a equação de plank.

$$E = h \cdot f$$

$$h = 4,135 \times 10^{-15} \quad f = 10^{17} \text{ (piores cenário)}$$

$$E = 4,135 \times 10^{-15} \times 10^{17} \text{ eV}$$

$$E = 413,5 \times (1,6 \times 10^{-19}) \text{ Wxs}$$

$$E = 6,6088 \times 10^{-17} \text{ Wxs}$$

E com isso pode se afirmar que a energia varia entre $6,6088 \times 10^{-17} \text{ W}$ e $6,6088 \times 10^{-15} \text{ W}$ por onda.

5 CONCLUSÃO TEÓRICA

Com base aos dados teóricos analisados, a resposta dos dispositivos fotovoltaicos em relação aos fótons de alta energia é promissora, devido, principalmente a alta energia disponibilizada pelos fótons, que como demonstrado anteriormente, tem a capacidade de produzir muito mais energia do que os métodos atuais aplicados em usinas nucleares atualmente.

6 TESTES EXPERIMENTAIS

Para a realização dos testes experimentais, foram aplicadas nos dispositivos fotovoltaicos diversas tensões e correntes referentes ao tubo de raios X industrial. O tubo de raios X do equipamento Ray Tec foi utilizado em testes iniciais, porém com a grande interferência da rede e com a dificuldade de coleta de dados devido ao seu pequeno tempo de exposição, foi considerado que a utilização do tubo de raios X industrial seria mais proveitosa para o trabalho.

Como explicado anteriormente à tensão do tubo é diretamente proporcional à energia da onda, e a corrente do tubo é diretamente proporcional à quantidade de ondas liberadas. Para a melhor coleta de dados os dispositivos fotovoltaicos foram cobertos com uma caixa, para que a luz ambiente não causasse interferência no experimento. Todavia, uma pequena quantidade de luz ainda penetrava na caixa pela passagem de cabos, essa quantidade foi considerada como nível de referência, que se refere à situação onde o tubo de raios X ainda estava desligado.

O equipamento de medição que foi utilizado o multímetro Minipa ET-1605 específico para medição de pequenas escalas, sendo sua resolução de $0,1 \text{ mV}$ e $0,1 \mu\text{A}$.

Para o teste foram determinadas 3 tensões fixas do tubo de raios X, 100 kVp, 120 kVp e 150 kVp, enquanto a corrente do tubo foi variada em intervalos de 1mA começando de 0 até 3 mA, em alguns casos foi possível atingir a marca dos 4 mA porém não para todos os testes, o que ocorreu devido as características do tubo de raios X. A distância padrão utilizada para todos os testes foi de 65 cm e o diâmetro do tubo de raios X industrial é de 8,2 cm. A área da célula monocristalina é de 15x15 cm, da policristalina é de 8x5 cm e a do fotodiodo é de 1x1 cm. Abaixo se encontram os resultados obtidos com os testes para cada dispositivo.

Antes dos testes em raios X foi realizado um teste de controle em uma sala totalmente escura utilizando uma lâmpada incandescente de 40W como fonte de iluminação a 65cm dos dispositivos fotovoltaicos, os resultados obtidos nos dispositivos fotovoltaicos foram dispostos em forma de tabela indicando a tensão em circuito aberto e a corrente de curto circuito, abaixo das tabelas se encontram gráficos cujo eixo vertical representa a tensão obtida em mili Volts e o eixo horizontal representa a corrente obtida em micro amperes. Os resultados foram são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Teste de Controle

Dispositivo	Corrente	Tensão
Célula Monocristalina	1760 μ A	366,3 mV
Célula Policristalina	331,5 μ A	4035 mV
Fotodiodo	14,8 μ A	342,7 mV

6.1 Célula monocristalina

Tabela 2 – Célula Monocristalina 100 kVp

Tensão no tubo de 100 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	2,4 μ A	1 mV
1 mA	3,2 μ A	1,4 mV
2 mA	3,7 μ A	1,6 mV
3 mA	4,2 μ A	1,8 mV

Tabela 3 - Célula Monocristalina 120 kVp

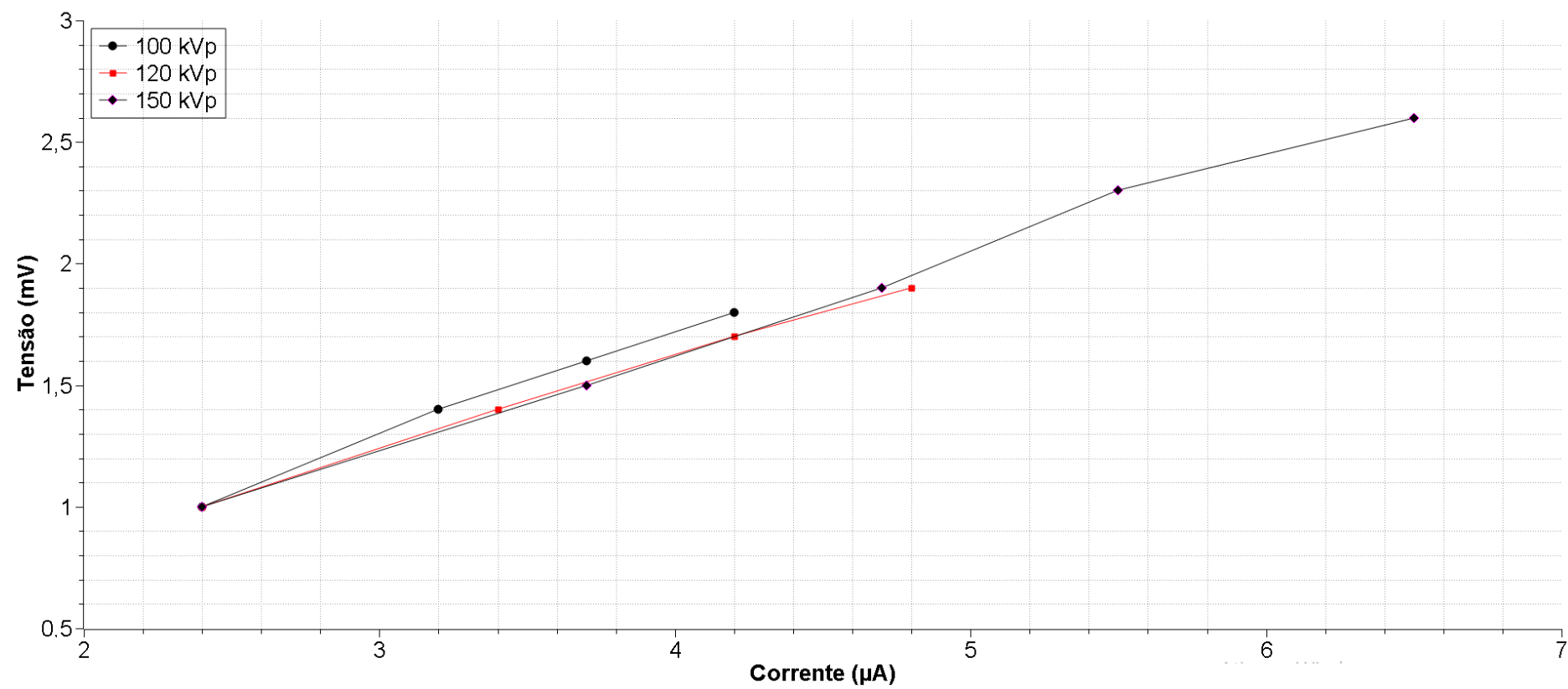
Tensão no tubo de 120 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	2,4 μ A	1 mV
1 mA	3,4 μ A	1,4 mV
2 mA	4,2 μ A	1,7 mV
3 mA	4,8 μ A	1,9 mV

Tabela 4 - Célula Monocristalina 150 kVp

Tensão no tubo de 150 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	2,4 μ A	1 mV
1 mA	3,7 μ A	1,5 mV
2 mA	4,7 μ A	1,9 mV
3 mA	5,5 μ A	2,3 mV
4 mA	6,5 μ A	2,6 mV

As tabelas 2,3 e 4 apresentam os resultados obtidos após a aplicação de raios X na célula fotovoltaica monocristalina, as tabelas apresentam um resultado promissor, indicando um crescimento de potência com o aumento da tensão e da quantidade de fótons aplicados.

Figura 8 – Resposta da Célula Monocristalina



6.2 Célula policristalina

Nos testes realizados com a célula policristalina não foi possível realizar a medição da corrente devido ao fato que seu valor era muito menor que a faixa do equipamento poderia captar, portanto somente as tensões puderam ser consideradas.

Tabela 5 - Célula Policristalina 100 kVp

Tensão no tubo de 100 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	0 μ A	22,7 mV
1 mA	0 μ A	26,8 mV
2 mA	0 μ A	30,8 mV
3 mA	0 μ A	34,2 mV
4 mA	0 μ A	37,4 mV

Tabela 6 - Célula Policristalina 150 kVp

Tensão no tubo de 150 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	0 μ A	22,7 mV
1 mA	0 μ A	35,1 mV
2 mA	0 μ A	42,7 mV
3 mA	0 μ A	49,2 mV

As tabelas 5 e 6 apresentam os resultados obtidos após a aplicação de raios X na célula fotovoltaica policristalina, as tabelas apresentam um resultado satisfatório em relação à tensão obtida, que segue a mesma lógica das tabelas 2,3 e 4, um acréscimo de potência com o aumento da tensão e da quantidade de fótons aplicados, contudo não foi possível a obtenção dos resultados de corrente devido a essa ser menor que a escala do multímetro utilizado.

6.3 Fotodiodo

Nos testes realizados com o fotodiodo não foi possível realizar a medição da corrente devido ao fato que seu valor era muito menor que a faixa do equipamento poderia captar, portanto somente as tensões puderam ser consideradas. Outro fator a ser considerado é que a característica de resposta do fotodiodo é inversamente proporcional à potência incidida sobre ele.

Tabela 7 - Fotodiodo 100 kVp

Tensão no tubo de 100 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	0 μ A	84,2 mV
1 mA	0 μ A	61,8 mV
2 mA	0 μ A	48,3 mV
3 mA	0 μ A	33 mV

Tabela 8 - Fotodiodo 150 kVp

Tensão no tubo de 150 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	0 μ A	84,2 mV
1 mA	0 μ A	46 mV
2 mA	0 μ A	17,1 mV
3 mA	0 μ A	4,7 mV

As tabelas 7 e 8 apresentam os resultados obtidos após a aplicação de raios X no fotodiodo, as tabelas apresentam um resultado satisfatório em relação a tensão obtida, que segue uma lógica inversa a dos outros dispositivos, uma diminuição de potência com o aumento da tensão e da quantidade de fótons aplicados, o que leva a conclusão que o sistema do fotodiodo tem uma relação que diminui a sua resistência com o aumento da potência aplicada sobre ele. Contudo não foi possível a obtenção dos resultados de corrente devido a essa ser menor que a escala do multímetro utilizado.

6.4 Célula monocristalina conectada em série

Após uma primeira análise dos resultados obtidos, se observou que a célula monocristalina é a mais promissora entre os dispositivos testados, devido a esse fato mais testes foram realizados primeiramente com 3 células monocristalinas conectadas em série em seguida com 2 células conectadas em paralelo.

Tabela 9 – Célula Monocristalina Conectada em Série 100 kVp

Tensão no tubo de 100 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	0,6 μ A	0,8 mV
1 mA	1,4 μ A	1,4 mV
2 mA	2,1 μ A	2 mV
3 mA	2,9 μ A	2,6 mV
4 mA	3,5 μ A	2,8 mV

Tabela 10 - Célula Monocristalina Conectada em Série 120 kVp

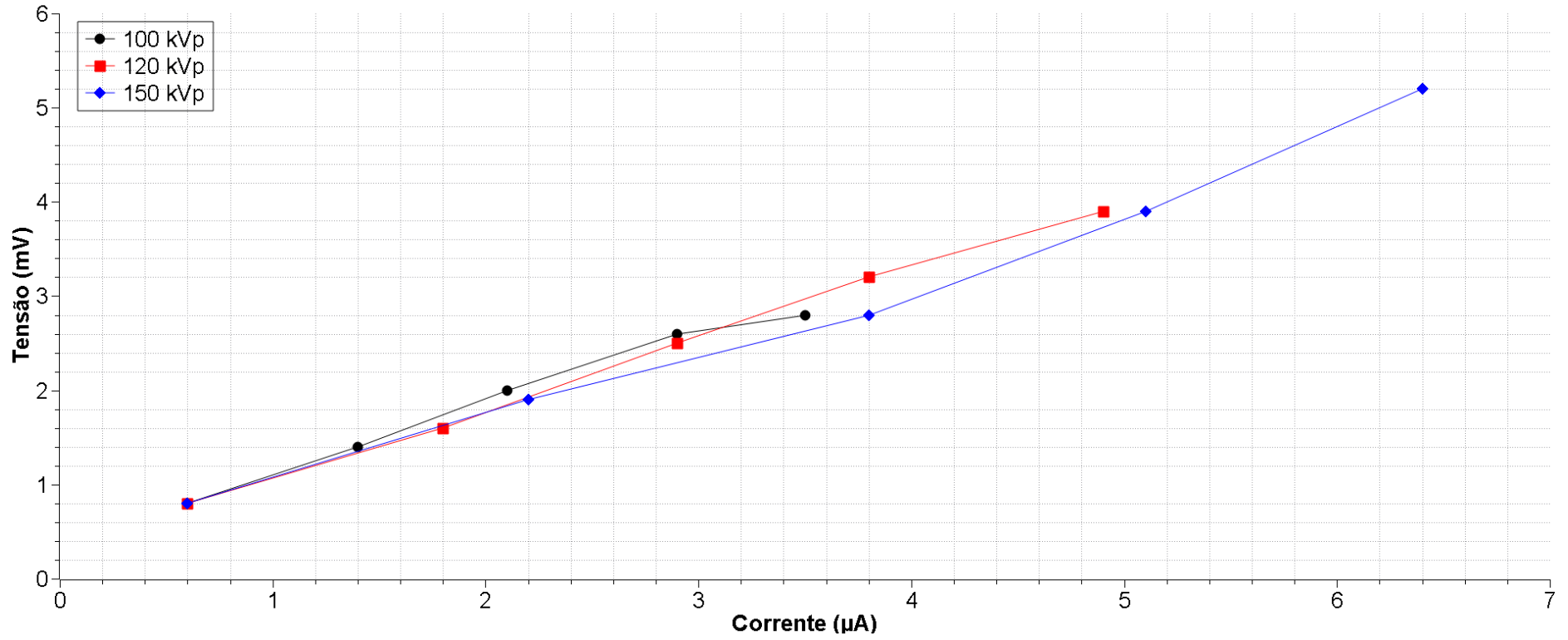
Tensão no tubo de 120 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	0,6 μ A	0,8 mV
1 mA	1,8 μ A	1,6 mV
2 mA	2,9 μ A	2,5 mV
3 mA	3,8 μ A	3,2 mV
4 mA	4,9 μ A	3,9 mV

Tabela 11 - Célula Monocristalina Conectada em Série 150 kVp

Tensão no tubo de 150 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	0,6 μ A	0,8 mV
1 mA	2,2 μ A	1,9 mV
2 mA	3,8 μ A	2,8 mV
3 mA	5,1 μ A	3,9 mV
4 mA	6,4 μ A	5,2 mV

As tabelas 9,10 e 11 apresentam os resultados obtidos após a aplicação de raios X na célula fotovoltaica monocristalina conectada em série, com as células posicionadas uma atrás da outra, assim sendo as células 2 e 3 captam a radiação que atravessa a primeira célula, as tabelas apresentam um resultado promissor, indicando um crescimento de potência com o aumento da tensão e da quantidade de fótons aplicados e apresentam um valor obtido maior que a da célula monocristalina sozinha, o que leva a crer que parte dos raios X passa diretamente pela célula monocristalina e reage com as células posicionadas em sequencia.

Figura 9 – Resposta da Célula Monocristalina Conectada em Série



6.5 Célula monocristalina conectada em paralelo

Para o sistema em paralelo foram conectadas apenas duas células devido a dificuldades mecânicas e a fragilidade das células.

Tabela 12 - Célula Monocristalina Conectada em Paralelo 100 kVp

Tensão no tubo de 100 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	1,3 μ A	0,6 mV
1 mA	2,1 μ A	0,9 mV
2 mA	2,9 μ A	1,1 mV
3 mA	3,5 μ A	1,4 mV

Tabela 13 - Célula Monocristalina Conectada em Paralelo 120 kVp

Tensão no tubo de 120 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	1,3 μ A	0,6 mV
1 mA	2,3 μ A	1 mV
2 mA	3,2 μ A	1,3 mV
3 mA	4,1 μ A	1,5 mV

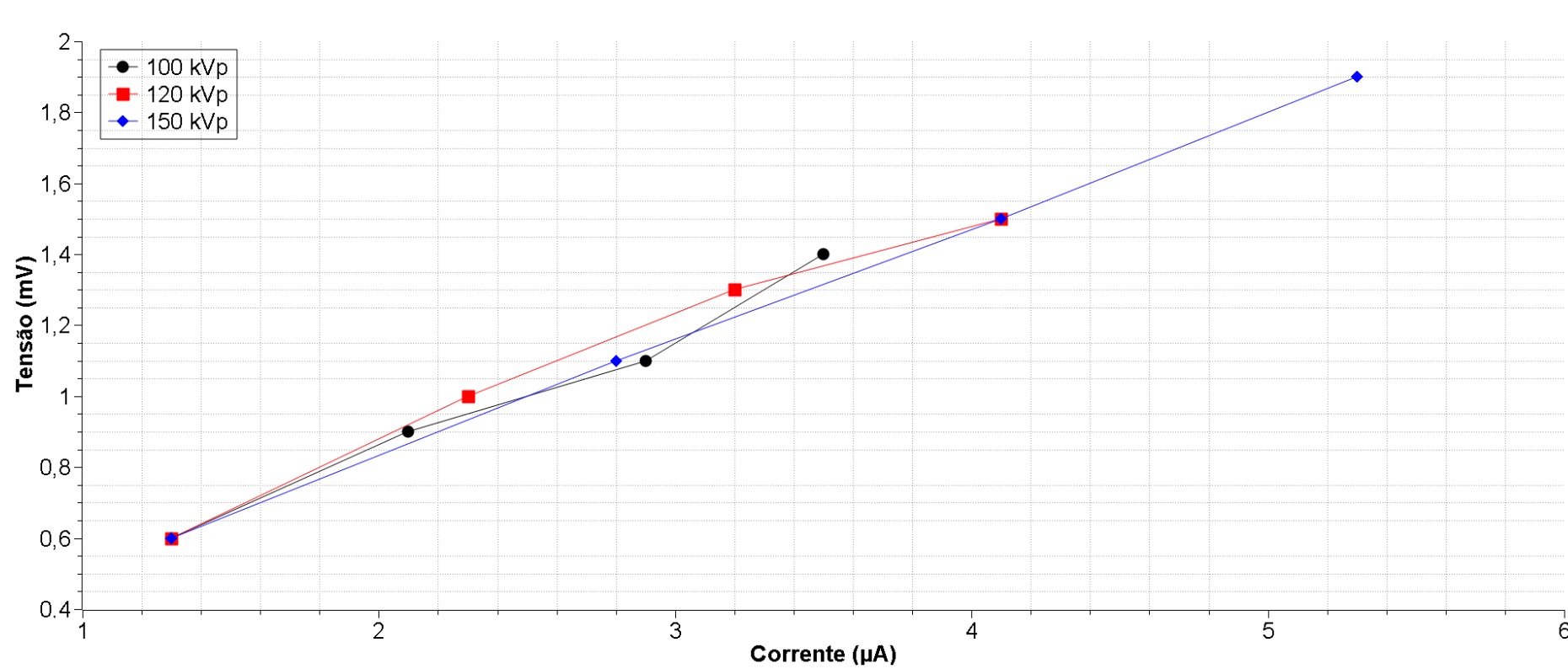
Tabela 14 - Célula Monocristalina Conectada em Paralelo 150 kVp

Tensão no tubo de 150 kVp		
Corrente no Tubo	Corrente na célula	Tensão na célula
0 mA	1,3 μ A	0,6 mV
1 mA	2,8 μ A	1,1 mV
2 mA	4,1 μ A	1,5 mV
3 mA	5,3 μ A	1,9 mV

As tabelas 12,13 e 14 apresentam os resultados obtidos após a aplicação de raios X na célula fotovoltaica monocristalina conectada em paralelo, com uma célula posicionada uma atrás da outra, assim sendo a células 2 capta a radiação que atravessa a primeira célula, as tabelas apresentam um resultado promissor, indicando um crescimento de potência com o aumento da tensão e

da quantidade de fótons aplicados e apresentam um valor obtido maior que a da célula monocristalina sozinha, o que leva a crer que parte dos raios X passa diretamente pela célula monocristalina e reage com a célula posicionada em sequencia.

Figura 10 – Resposta da Célula Monocristalina Conectada em Paralelo



7 CONCLUSÕES FINAIS

Ao observar os gráficos obtidos nos experimentos em raios X, se pode concluir que existe um aumento da potência produzida pelas células diretamente proporcional a quantidade de energia dos fótons de raios X que a estão atingindo. Também pode se observar um aumento da potência com o aumento da quantidade de fótons que atingem a célula. Portanto, em raios X, a premissa do trabalho se torna verdadeira, demonstrando que mesmo em uma célula que não é produzida para responder a ondas de raios X, existe uma resposta diretamente proporcional à energia da onda. Por fim o dispositivo que mostrou a melhor resposta foi à célula monocristalina, sendo a única que foi possível observar um resultado de corrente, ou seja, para o sistema proposto, que é o de produção de energia. Todavia a célula fotovoltaica policristalina e o fotodiodo demonstraram um ótimo desempenho como sensores, principalmente a célula policristalina, devido à facilidade em medir a sua tensão.

Para efeitos meramente qualitativos foi feita uma comparação entre a energia que a célula fotovoltaica monocristalina entregou quando exposta à uma lâmpada incandescente de 40 W e a radiação de raios X a 150 kVp, 4 mA, o que equivale a 600W. A célula fotovoltaica em quando exposta à lâmpada gerou 366,3 mV e 1760 μ A, o que é equivalente a 0,644 mW. A mesma célula exposta ao raio X gerou, já descontado o nível de referência devido a luz residual do ambiente $14,5 \times 10^{-6}$ mW. Essa simples comparação sinaliza que as células fotovoltaicas monocristalinas, devido às suas características funcionais, são muitíssimo mais eficientes para a produção de energia a partir de radiação nas proximidades da luz visível.

Todavia, com a pesquisa realizada nesse trabalho é possível afirmar que existe a possibilidade de captação de energia, via efeito fotovoltaico, dos fótons de raios X. Portanto, com o dispositivo adequado e projetado para esse propósito é possível à utilização de fótons de alta energia para a produção de energia elétrica.

Caso as células monocristalinas fossem dispostas em uma área ao redor do reator nuclear de Angra 1, e os fótons de raios gama fossem transformados em energia com a mesma eficiência que em raios X, a energia produzida seria de $1,84 \times 10^3$ Wxh no pior caso e $7,37 \times 10^3$ Wxh no melhor caso.

REFERÊNCIAS

- Bushong. “**Ciencia Radiológica 9ª ed**”.
Escola secundária padrão da língua. “Efeito fotovoltaico”. 2007. Disponível em :
<https://sites.google.com/site/ea12cap/solarfotovoltaica>.
Acesso em : 23/05/2018
- Eletrobras. “**Programa da energia nuclear**”. Edição de 2016 – disponível em
<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Espa%C3%A7odoConhecimento/ArtigoEstudos.aspx>.
Acesso em : 23/05/2018
- Portal Solar. “**Tipos de painel solar fotovoltaicos**”. 2016. Disponível em:
<http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>.
Acesso em : 23/05/2018
- World nuclear association. “**Outline History of Nuclear Energy**”. 2014.
Disponível em : <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>.
Acesso em : 23/05/2018
- Eletrobras. “**Panorama da Energia Nuclear no Mundo**”. 2016. Disponível em:
http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=SG_9CnL80wM%3d&tabid=406.
Acesso em : 23/05/2018
- Kítor, Glauber Luciano. “**Radiação Eletromagnética**”. 2010. Disponível em:
<http://www.infoescola.com/fisica/radiacao-eletromagnetica/>.
Acesso em : 23/05/2018
- Meirelles, Bernardo Radefeld. “**FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES**”.
2002. Disponível em:
https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2002/991446-relatoriofianal.pdf (ref fabricação monocristalino).
Acesso em : 23/05/2018
- Marques. Francisco das Chagas.”**Minicurso de Fabricação de Células Solares e Módulos Fotovoltaicos**”. 2014. Disponível em:
<http://www.ieibrasil.org/pdf/4inovafvminicursofrancisco.pdf>.
Acesso em : 23/05/2018
- Instituto NCB. “**Como Funcionam os Foto-diodos**”. 2010. Disponível em:
http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/4715-art1181_figura_pin
Acesso em : 23/05/2018
- Poole. Ian. “**Photodiode structures & materials**”. 2010. Disponível em:
http://www.radioelectronics.com/info/data/semicond/photo_diode/structures-materials.php
Acesso em : 23/05/2018

Unicamp. **“Usina Nuclear”**. Disponível em:
<http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/nuclear/nuclear.htm>
Acesso em: 13/10/2018

Nussenzveig, **“H. M. – Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade e Física Quântica”**; vol.4. São Paulo: Blucher 1998.
Acesso em: 13/10/2018

Udesc. **“Ondas Magnéticas no Espaço Livre”**. Disponível em:
http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/weinert/materiais/Ondas_eletr magn_ticas_Aula1.pdf
Acesso em: 13/10/2018