



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE BALSAS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

TRABALHO DE CONTEXTUALIZAÇÃO E INTEGRALIZAÇÃO CURRICULAR II

**RADIAÇÃO NUCLEAR: GAMAGRAFIA APLICADA AO CONTROLE DE
QUALIDADE DE INDÚSTRIAS EM PEÇAS METÁLICAS**

Discente: Luis Fernando dos Reis Souza

e-mail: lfr.souza@discente.ufma.br

Orientador: Alyson Bruno Fonseca Neves

e-mail: alyson.bruno@ufma.br

Balsas

2025

LUIS FERNANDO DOS REIS SOUZA

**RADIAÇÃO NUCLEAR: GAMAGRAFIA APLICADA AO CONTROLE DE
QUALIDADE DE INDÚSTRIAS EM PEÇAS METÁLICAS**

Trabalho de Contextualização e Integralização Curricular II apresentado ao Curso Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Alyson Bruno Fonseca Neves

Balsas

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

dos Reis Souza, Luis Fernando.

RADIAÇÃO NUCLEAR : gAMAGRAFIA APLICADA AO CONTROLE DE
QUALIDADE DE INDÚSTRIAS EM PEÇAS METÁLICAS / Luis Fernando
dos Reis Souza. - 2025.

52 p.

Orientador(a): Prof. Dr. Alyson Bruno Fonseca Neves.

Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do
Maranhão, Balsas, 2025.

1. Radiação Nuclear. 2. Gamagrafia Industrial. 3.
Controle de Qualidade. I. Fonseca Neves, Prof. Dr. Alyson
Bruno. II. Título.

LUIS FERNANDO DOS REIS SOUZA

**RADIAÇÃO NUCLEAR: GAMAGRAFIA APLICADA AO CONTROLE DE
QUALIDADE DE INDÚSTRIAS EM PEÇAS METÁLICAS**

Aprovado em: 31 / 03 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alyson Bruno Fonseca Neves (Orientador)

Doutor em Física
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Edson Nunes Costa Paura

Doutor em Física
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Ivanilson Sousa da Costa

Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, pela força, sabedoria, saúde e persistência concedidas ao longo desta jornada para poder ter concluído esse trabalho com êxito. Aos meus pais, José Ribeiro de Souza Junior e Marilene dos Reis Souza e irmãos, pelo apoio incondicional, pelo incentivo nos momentos mais difíceis e compreensão durante todos os momentos dessa caminhada. Ao meu orientador Prof. Dr. Alyson Bruno Fonseca Neves pela orientação, dedicação e ensinamentos passados, sendo cruciais para realização do trabalho. A Universidade Federal do Maranhão (UFMA) pela convivência e conhecimentos adquiridos até aqui, que contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal. E, por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho. Meu sincero agradecimento.

RESUMO

Este trabalho aborda uma revisão de literatura sobre a aplicação da radiação nuclear na técnica de gamagrafia industrial, com foco no controle de qualidade de peças metálicas. A gamagrafia é o processo de liberação da radiação através do átomo instável, emitindo raios ionizantes que atravessam peças metálicas. Na indústria, a técnica é empregada no controle de qualidade, onde é possível utilizar a característica penetrante da radiação em inspecionar materiais. Considerando esta problematização, o objetivo é desmistificar o emprego da radiação nuclear, destacando suas vantagens e contribuições para o desenvolvimento tecnológico e a segurança industrial. O documento está organizado, inicialmente, com uma contextualização sobre a gamagrafia. Em seguida, apresentamos os fundamentos teóricos da física da radiação, história, decaimentos nucleares e os tipos de radiação. Por fim, introduzir a aplicação da técnica da radiação aplicada à indústria, quais fontes usar, quais os métodos e instrumentos, permitindo a identificação de falhas internas sem danificar os materiais irradiados.

Palavras-chave: radiação nuclear; gamagrafia industrial; controle de qualidade;

ABSTRACT

This paper presents a literature review on the application of nuclear radiation in the industrial gammagraphy technique, focusing on the quality control of metal parts. Gammagraphy is the process of releasing radiation through an unstable atom, emitting ionizing rays that pass through metal parts. In industry, the technique is used in quality control, where it is possible to use the penetrating characteristic of radiation to inspect materials. Considering this problematization, the objective is to demystify the use of nuclear radiation, highlighting its advantages and contributions to technological development and industrial safety. The document is initially organized with a contextualization of gammagraphy. Then, we present the theoretical foundations of radiation physics, history, nuclear decays and types of radiation. Finally, we introduce the application of the radiation technique applied to industry, which sources to use, which methods and instruments, allowing the identification of internal faults without damaging the irradiated materials.

Keywords: nuclear radiation; industrial gammagraphy; quality control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gamagrafia em peças de avião.....	11
Figura 2. Tubo de Crookes a vácuo.....	15
Figura 3. - Composição do átomo.....	17
Figura 4. Decaimento de um átomo instável.....	19
Figura 5. Tipos de radiação.....	21
Figura 6. Alguns elementos radioativos naturais.....	21
Figura 7. Poder de penetração das radiações.....	23
Figura 8. Radiodiagnóstico de diferentes tireóides, utilizando o Iodo-131.....	25
Figura 9. Utilização do aparelho de radioterapia popularmente conhecido como “Bomba de Cobalto”	27
Figura 10. Demonstração de como seria o filme revelado da folha de uma planta que absorveu traçadores radioativos.....	28
Figura 11. Batata irradiada para conservação do alimento.....	29
Figura 12. Demonstração e impressão do processo da gamagrafia.....	31
Figura 13. Componentes do irradiador de gamagrafia.....	33
Figura 14. Irradiador de gamagrafia industrial	34
Figura 15. Cápsula de fonte radioativa do irradiador	35
Figura 16. Medições de tensões aplicadas em função de diferentes espessuras de diferentes materiais.....	36
Figura 17. Radioisótopo sob diferentes	36
Figura 18. Filme de gamagrafia da inspeção de tubo.....	42

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E NOMENCLATURA

MPT – Teste de Partículas Magnéticas.....	13
DNA - Ácido Desoxirribonucleico.....	24
AIEA - Agência Internacional de Energia Atômica.....	24
CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear.....	30
CMEIA - Comitê Misto de Especialistas em Irradiação de Alimentos.....	30
FAO - Food Agriculture Organization.....	30
OMS - Organização Mundial de Saúde Após.....	30
Bq - Becquerel, unidade de medida para poder-se qualificar a atividade de uma fonte radioativa.....	34
Ci - Curie, Outra unidade conhecida usada para a mesma equivalência.....	34
SI - Sistema Internacional de Unidades.....	34
NDT - Ensaios Não Destrutivos	36

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	11
CAPÍTULO 2: FÍSICA DA RADIAÇÃO NUCLEAR.....	17
2.1 História Da Radioatividade.....	17
2.2 Introdução A Radioatividade.....	19
2.3 Decaimento Nuclear.....	21
2.4 Fontes Radioativas.....	22
2.5 Interação Da Radiação Com A Matéria.....	25
2.6 Cuidados Sobre Radiação Ionizante.....	26
CAPÍTULO 3: RADIAÇÃO NA INDÚSTRIA.....	27
3.1 Aplicações Na Medicina.....	28
3.2 Aplicações Da Radiação Na Agricultura.....	31
3.2 Radiação No Campo Dos Alimentos.....	32
CAPÍTULO 4: GAMAGRAFIA INDUSTRIAL.....	34
4.1 Irradiadores De Gamagrafia Industrial.....	36
4.2 Fontes radioativas utilizada.....	39
4.3 A Técnica da Gamagrafia e seu Papel no Controle de Qualidade.....	43
4.4 Desmistificando a Radiação e a Importância da Educação Científica.....	45
5. CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	49

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Inicialmente o tema da Energia Nuclear esteve fortemente associada ao desenvolvimento de armas e tragédias catastróficas, tal qual que, quando se fala da temática “radiação nuclear” muitas vezes, é vista com maus olhos ou com certo preconceito, receio ou até mesmo medo dos seus efeitos e riscos que traz, não levando em consideração seus inúmeros benefícios e avanços na sociedade como na medicina e na indústria [1].

Nesse contexto, aplicações envolvendo a radiação ionizante são realizadas em diversas áreas, constituindo-se de forma fundamental para o desenvolvimento, e possibilitando a segurança, conforto e qualidade no controle de processos através da praticidades nos procedimentos. Entretanto, devido aos riscos nocivos da prática da radiação ionizante, muitas pessoas ainda temem os seus efeitos quando se fala do tema radiação.

Porém, tais informações benéficas dessa radiação e como ela pode ser utilizada de forma a favorecer a sociedade não são tão expostas e propagadas pela mídia, visto que é um tema muito associado a armamentos destrutivos que utilizam essa tecnologia, bem como, acidentes e tragédias que já aconteceram durante a história da humanidade relacionados com a radiação [4].

Podemos citar, por exemplo, a usina nuclear de Chernobyl, situada hoje na Ucrânia onde houve a explosão de um dos reatores por super aquecimento, as bombas lançadas nas cidades de Hiroshima e Nagasaki no Japão durante a segunda guerra mundial [1], ou na cidade de Fukushima em 2011, onde teve a explosão dos reatores, causada pelo terremoto seguido de um tsunami. No Brasil, podemos citar um acidente nuclear que ocorreu na cidade de Goiânia com o composto químico cézio-137, ocasionado pelo manuseio incorreto do lixo nuclear. Todas essas tragédias foram ocasionadas, direta ou indiretamente, por falhas humanas ou por eventos naturais imprevisíveis [2].

Esses episódios contribuíram para alimentar o medo coletivo em torno da radiação ionizante, frequentemente associada a riscos e destruição. No entanto, apesar da imagem negativa que pode ter sido construída ao longo do tempo, esse fenômeno físico possui grande potencial e vem sendo cada vez mais explorado em áreas essenciais. Quando utilizada de forma segura e controlada, a radiação ionizante pode trazer inúmeros benefícios, especialmente na medicina, onde se destaca na radioterapia para o tratamento de câncer, na

agricultura, promovendo a conservação de alimentos e no controle de pragas, entre outras aplicações [6].

Ainda no campo da saúde, destaca-se a atuação da enfermagem radiológica, uma especialidade voltada ao cuidado de pacientes submetidos a procedimentos diagnósticos e terapêuticos nos Serviços de Radiologia e Diagnóstico por Imagem (SRDI). Essa área tem sido fundamental para garantir a segurança e a eficácia na aplicação das radiações ionizantes, mostrando como a tecnologia pode ser integrada de forma ética e responsável na prática clínica [34].

Nas indústrias, por exemplo, a radiação ionizante desempenha um papel crucial por meio da técnica da gamagrafia. Este processo é utilizado nas empresas metalúrgicas para o controle de qualidade de materiais metálicos, empregando raios ionizantes para testar e inspecionar a integridade estrutural de componentes e equipamentos metálicos. Esta técnica de ensaios não-destrutivos usa fontes radioativas para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos, para evitar falhas na estrutura de engenharia [2].

Para compreender melhor as diversas aplicações atuais da radiação ionizante, é importante revisitar sua origem e o desenvolvimento da tecnologia ao longo do tempo. A radioatividade — termo que se refere à capacidade de certos elementos emitirem radiações espontaneamente — começou a ser explorada cientificamente no final do século XIX. A descoberta dos raios X, em 1895, pelo físico alemão Wilhelm C. Röntgen, marcou um ponto de partida decisivo. Trabalhando em sua sala escura com tubos de Crookes, Röntgen percebeu a existência de um tipo de radiação invisível capaz de atravessar materiais. A partir de então, diversos cientistas passaram a investigar fenômenos semelhantes, como Antoine H. Becquerel, que estudou a fosforescência dos elementos químicos; Ernest Rutherford, com importantes contribuições sobre o decaimento nuclear; o casal Pierre e Marie Curie, que descobriram os elementos polônio e rádio; e Paul U. Villard, responsável por identificar a radiação eletromagnética gamma [4].

Com todas as descobertas e as recentes pesquisas envolvendo a radioatividade, foi possível estabelecer o desenvolvimento do conhecimento acerca do atual estágio da radiação, o que permitiu a criação de tecnologias aplicáveis de forma segura e eficiente na sociedade [3]. Esses avanços contribuíram para ampliar as possibilidades de uso da radiação ionizante em diversos setores, demonstrando seu valor como ferramenta tecnológica que, quando utilizada com responsabilidade, traz benefícios significativos para o bem-estar coletivo.

Possibilitou também o conhecimento da gamagrafia, que é um exemplo de tecnologia

desenvolvida através da radiação, que pode ser usada na indústria de fabricação de peças metálicas analisando e verificando a sua integridade, resistência e densidade do material, sendo bastante utilizada nos setores aeronáutico e automobilístico [6]. Essa técnica da gamagrafia é um processo que utiliza as características penetrantes da radiação para poder analisar o interior das peças metálicas e materiais quando se torna inviável o contato visual, semelhante como os raios X usados para observar o interior do corpo humano.

Além das características apresentadas acima, essa técnica permite trazer maior controle de qualidade para o metal, durabilidade e confiança no processo de fabricação, cujo objetivo é constatar a presença ou ausência de descontinuidade no material metálico, identificando qualquer possibilidade de rachaduras, fissuras, inconsistência ou falta de homogeneidades entre os átomos do material, tornando viável a rejeição ou reciclagem de algum tipo de metal defeituoso [5].

Esse processo é amplamente utilizado na indústria para a inspeção de soldas, metais fundidos e forjados, além de dutos de transporte de gás e líquidos. No setor aeronáutico, a gamagrafia é fundamental para a manutenção de componentes que sofrem alta pressão externa durante o voo, como asas, turbinas de um avião ou hélices e rotores de helicópteros. Essa técnica permite identificar sinais de fadiga estrutural, ou seja, o enfraquecimento causado por esforços repetitivos nessas partes metálicas [6].

Portanto, a gamagrafia se torna essencial para garantir a eficiência e segurança das aeronaves, inspecionando a integridade das soldas por meio das impressões de radiação gama em filmes fotográficos. A detecção de falhas estruturais é crucial, pois qualquer comprometimento em regiões sujeitas a altos momentos mecânicos – como as asas de um avião – pode gerar um efeito catastrófico.

Para entender por que essas regiões são tão críticas, é importante considerar o conceito de momento de uma força. Ele mede a tendência de um corpo girar em torno de um eixo devido à aplicação de uma força, sendo diretamente proporcional à distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação. Matematicamente, o momento é representado pela seguinte fórmula:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F},$$

onde $\vec{r}$ é a distância de aplicação da força ao eixo de rotação e $\vec{F}$ representa a força atuante em um determinado ponto do corpo. No exemplo citado, as cargas aerodinâmicas correspondem às forças atuantes na parte estrutural do avião ou, mais especificamente, na asa. Se houver uma falha estrutural na asa, especialmente em pontos críticos de sustentação, o

desequilíbrio dos momentos pode comprometer a estabilidade da aeronave, levando a tensões excessivas e, em casos extremos, à ruptura da estrutura. Dessa forma, a gamagrafia desempenha um papel essencial na prevenção de acidentes, garantindo a resistência e segurança das aeronaves e protegendo vidas [26].

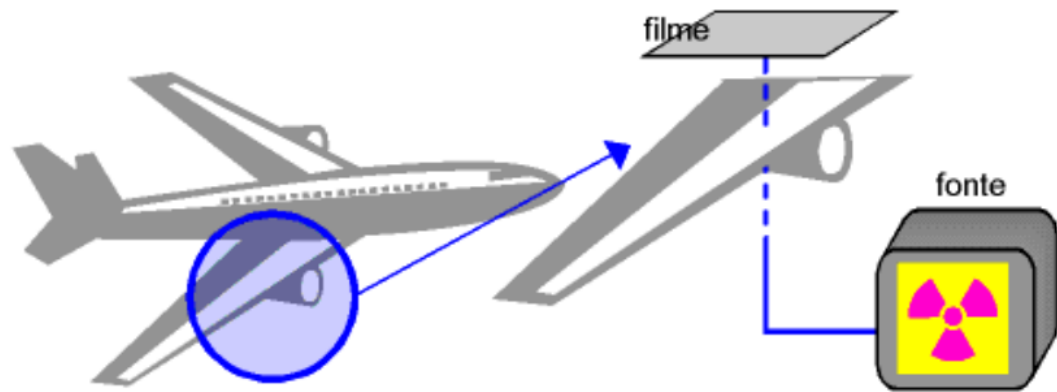


Figura 1. Gamagrafia em peças de avião.

FONTE: [6, p. 12].

A gamagrafia possui uma gama de vantagens, e, dentre elas, está a possibilidade da emissão da documentação do teste logo após aplicado no material, permitindo o registro completo da continuidade do material e integridade em filmes de registro. Isto a diferencia de outras técnicas que não permitem esse tipo de registro, como o teste de resistência à tração e o de MPT – Teste de Partículas Magnéticas¹. Nesse tipo de inspeção MPT, onde o princípio se baseia nas distorções nas linhas de campo magnético de um material ferromagnético por alguma descontinuidade. Se aplica partículas de ferro ou tinta magnética em uma peça metálica fundida magnetizada, que se amontoam nos lugares onde existem os defeitos de fissuras, rachaduras e descontinuidades visíveis. O teste de resistência à tração é outro método bastante popular, que mede a capacidade da peça fundida de resistir determinada tensão, informando sobre características mecânicas do material submetido a ensaio [15].

Porém, nenhum desses outros métodos têm o potencial de registrar o teste em forma de impressão em filmes fotográficos, dando uma vantagem ao método da gamagrafia, com a possibilidade de analisar a integridade física do material de forma minuciosa, verificando os

¹O ensaio por Partículas Magnéticas baseia-se na inserção de um campo magnético no material a ser inspecionado, e detecta descontinuidades e defeitos superficiais e subsuperficiais a partir do acúmulo das partículas nos locais com defeitos, em que são criados desvios deste campo magnético [15].

detalhes como falhas de descontinuidade e fissuras na liga metálica, para a melhor conclusão do teste.

Portanto, a motivação para esta pesquisa é explorar a técnica da gamagrafia e seus benefícios aos processos de segurança e ensaios de peças metálicas [5]. Desembaraçar essa problemática da existência de apenas riscos, perigos e temores da cabeça das pessoas. A princípio, trata-se de uma tarefa complexa, considerando que essa temática ainda carrega o estigma da fabricação de armamentos perigosos e de grandes acidentes, como os já mencionados.

Contudo, ao longo dos anos, especialmente desde a descoberta da radiação no final do século XIX — iniciada por Henri Becquerel e posteriormente aprofundada por Marie Curie e outros cientistas — houve um avanço significativo no entendimento do fenômeno radioativo. Esse progresso permitiu a aplicação segura e controlada da radiação em diferentes setores, como o industrial, viabilizando o desenvolvimento de tecnologias como a gamagrafia [4].

Sendo assim, garantiu-se maior segurança nos processos de controle de qualidade através da gamagrafia, trazendo inúmeras vantagens, como a possibilidade de detecção de corrosão dos materiais metálicos, analisando se há desgaste, alguma ferrugem que não seja visível e que possa futuramente corromper a estrutura do material, trazendo eficiência na inspeção.

Dessa forma, percebemos como é essencial o conhecimento da aplicação da radiação nuclear e, conseqüentemente, a técnica da gamagrafia para o controle de qualidade, o que contribui para uma melhor eficiência, garantia e aperfeiçoamento da produção dos materiais para os diversos ramos da indústria como, por exemplo, na área aeronáutica [6].

Este trabalho de conclusão de curso aborda uma revisão sobre o estudo da gamagrafia, em específico, conhecer e analisar o processo de controle de qualidade na indústria. Neste aspecto, buscamos: entender os conceitos que envolvem a radiação nuclear, mostrando suas vantagens e potencial para o desenvolvimento da humanidade; compreender e demonstrar a estrutura física dos átomos instáveis por consequência emitindo radiação; analisar o processo da técnica da gamagrafia no controle de qualidade de peças metálicas nas indústrias; melhorar a compreensão e desmistificando a mente das pessoas sobre o tema.

A metodologia empregada na execução deste trabalho de contextualização e integralização curricular corresponde a uma pesquisa descritiva/exploratória, no qual foi realizado, inicialmente, um levantamento bibliográfico em livros, artigos científicos e sites de internet, relacionados ao tema, abordando as interações fundamentais da natureza e os

processos de emissão da radiação para entendimento da gamagrafia. Em outros trabalhos, estudamos a aplicação da técnica da gamagrafia em peças metálicas, bem como em outras áreas da tecnologia da radiação nuclear, mostrando de forma enfática e prática o que será necessário para a aplicação da gamagrafia na indústria.

CAPÍTULO 2: FÍSICA DA RADIAÇÃO NUCLEAR

2.1 História Da Radioatividade

A radioatividade, que é descrita como uma emissão de energia oriunda do núcleo de átomos instáveis, é uma área de estudo da física que ainda há de encontrar muitas descobertas para o desenvolvimento da sociedade. No entanto, já com o conhecimento que temos hoje é possível observar vastas aplicações dessa técnica em diversos setores da indústria.

Porém essa tecnologia da radioatividade, termo que significa atividade de emitir raios, a primeiro momento, foi direcionada na descoberta de novos elementos radioativos, a partir de 1895 pelo físico alemão Wilhelm C. Röntgen enquanto trabalhava em sua sala escura com os tubos de Crookes, que era constituído por um tubo (ampola) de vidro contendo em suas extremidades cátodo e ânodo com duas placas metálicas cada uma ligada a uma polaridade [4].

Onde se aplica uma alta fonte de tensão elétrica ou diferença de potencial, quando a diferença de potencial é elevada o suficiente ocorre a condução de corrente elétrica que sai do cátodo e ultrapassa o vidro onde se observa uma luz esverdeada, que são chamados de raios catódicos. Röntgen durante seu experimento aplicou uma diferença de potencial para produzir os raios catódicos no tubo e o cobriu com um papel escuro para não haver luminosidade.

Percebeu na sala que, uma tela fluorescente de platinocianeto de bário que estava a mais de um metro de distância do tubo brilhava, então concluiu que essa luz emitida pela tela era excitada pelos raios invisíveis vindo do tubo de crookes [24]. A partir daí, se deu conta da descoberta até então inovadora, chamou esses raios invisíveis de raios X por serem desconhecidos, apresentando um relatório para a Sociedade Físico-Médica de Wurzburg descrevendo a descoberta, chegando a ganhar um Prêmio Nobel de Física em 1901 [4].

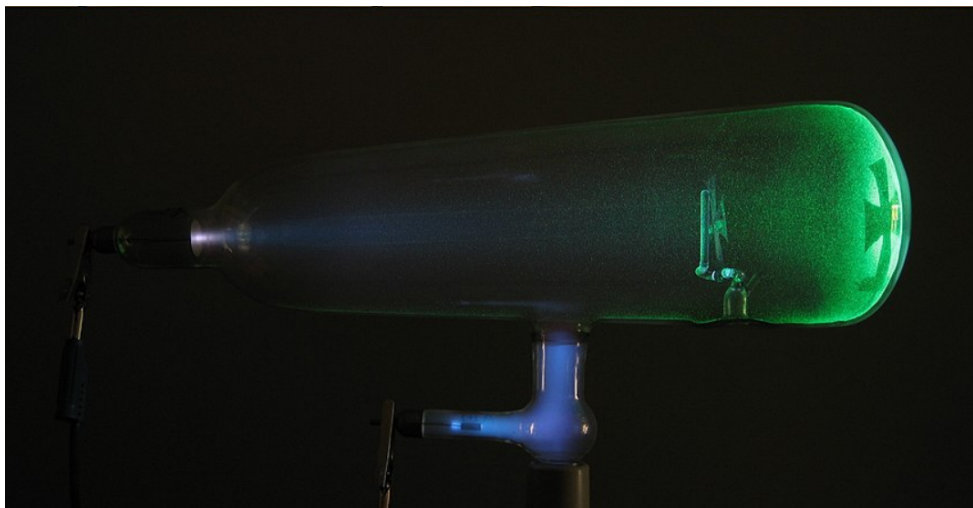


Figura 2. Tubo de Crookes a vácuo

FONTE: [14, p. 3].

Com a descoberta de Röntgen, o físico Antoine H. Becquerel, que estudava sobre fosforescência, se interessou e começou a pesquisar se substâncias fosforescentes ou fluorescentes emitiam raios-X, onde não obteve êxito. Em seguida, acrescentou o urânio no experimento e concluiu que, a razão da radiação penetrante acontecer era por causa da própria composição do elemento químico. Com isso, essa radiação posteriormente ganhou o nome de radioatividade pela grande cientista polonesa, Marie Curie [4].

A partir daí, outros cientistas se voltaram para esse tema, como os físicos neozelandês Ernest Rutherford e o francês Pierre Curie (posteriormente esposo de Maria Curie), que simultaneamente descobriram dois tipos de emissão de elementos radioativos, chamadas de partículas alfa e beta. Do mesmo modo, Paul U. Villard identificou outra forma de radiação eletromagnética que esses elementos também emitem, denominando-os de raios gama [24].

Em 1903, Rutherford formulou o seu modelo atômico, propondo a ideia de um núcleo para os átomos. Citou que os tipos de emissões que aconteciam era por causa da instabilidade de alguns núcleos atômicos muito energéticos, por tal razão esses elementos emitiam esses tipos de radiação. O estudo ficou conhecido como decaimento nuclear, evento que transformava o núcleo atômico de um elemento original em um novo núcleo ao decair [4].

Então, Marie Sklodowska Curie, muito conhecida por ser a primeira mulher a ganhar o Prêmio Nobel, e seu marido Pierre Curie, grande físico da época, começaram a investigar de onde vinha a radiação que Becquerel observou no composto de urânio [3]. Em suas pesquisas, constataram que a energia radioativa era uma propriedade intrínseca do elemento de urânio,

determinando que a intensidade da radiação não dependia da combinação dos elementos químicos, mas sim de acordo com a quantidade de urânio presente do composto.

Dando continuidade na pesquisa das propriedades do urânio, o casal Curie observou que o urânio não era o único elemento que apresentava essas características radioativas, ao decorrer das pesquisas analisaram que os sais de tório também apresentavam as mesmas características, capazes portanto de emitir radiação [3]. O casal Curie e Becquerel foram agraciados com um Nobel de Física em 1903 pelas suas pesquisas e grandes avanços no estudo da radioatividade. O casal Curie juntos ainda foram adiante, descobriram outros elementos que emitem radiação.

A pechblenda foi um minério anunciado por eles, com características bem mais radioativas que o próprio urânio, isso significa dizer que o minério além de conter urânio em sua composição apresentava outros elementos com características radioativas. Conseguiram então isolar da pechblenda um metal que até então não continha na tabela periódica, deram o nome de polônio em homenagem à terra natal de Marie [4].

No final do ano de 1898, conseguiram descobrir um novo elemento radioativo isolando da pechblenda, o rádio. Em 1906, Pierre morreu em um acidente sendo atropelado por um veículo, porém Marie não desiste das pesquisas dando continuidade nos estudos com a pechblenda, após 4 anos de pesquisas consegue definir a massa atômica do rádio e outras características. Ganhando em 1911 seu segundo Nobel em química, agora sozinha, sendo a primeira mulher a ganhar um prêmio Nobel, e em duas áreas diferentes [24].

Então a partir de 1895, com os primeiros estudos de Röntgen em sua sala escura pesquisando a condutividade dos gases tendo o primeiro contato com o que chamamos hoje de raios X, e todas as contribuições que tivemos dos trabalhos de vários cientistas, alguns até sacrificaram sua saúde para a construção do estudo da radioatividade ajudaram no acúmulo de muitos conhecimentos a respeito desse tema.

2.2 Introdução A Radioatividade

A radioatividade é um fenômeno natural que se refere à emissão de energia em forma de partículas ou ondas eletromagnéticas provenientes de núcleos atômicos instáveis. Esses núcleos, geralmente presentes em átomos com mais de 82 prótons, possuem excesso de energia e, para alcançar a estabilidade, liberam essa energia em forma de radiação. Essa propriedade é fundamental em diversas aplicações tecnológicas, como na técnica industrial da

gamagrafia, que se utiliza desses raios radioativos para realizar inspeções estruturais e garantir a integridade de materiais metálicos [8].

Para entender melhor esse processo, é importante lembrar que toda matéria é composta por átomos — estruturas formadas por prótons (cargas positivas), nêutrons (sem carga) e elétrons (cargas negativas). Todos os objetos e seres vivos que conhecemos, desde um grão de areia até grandes astros como planetas e constelações, são constituídos por átomos. Quando agrupados, eles formam moléculas, que por sua vez se combinam para originar compostos e sistemas mais complexos, sendo assim a base de toda a matéria existente [9].

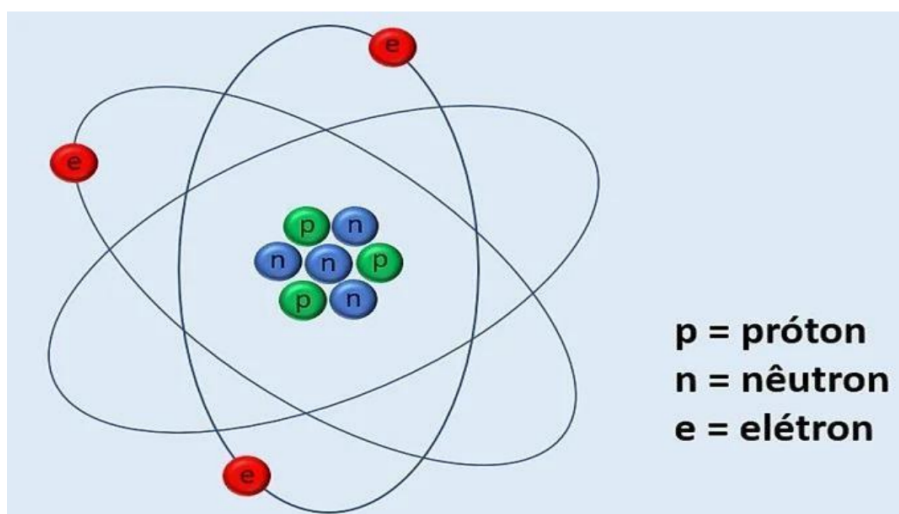


Figura 3. - Composição do átomo.

FONTE: [17, p. 24].

Na Figura 3, podemos observar uma representação do átomo, com o núcleo ao centro é composto por partículas conhecidas por prótons e nêutrons (bolinhas azul e verde), e a eletrosfera sendo orbitado pelos elétrons (vermelho). Porém, a quantidade de cada partícula varia de acordo com o elemento e a formação de um elemento químico se dá pela junção de vários átomos com o mesmo número atômico que nada mais é do que a quantidade de prótons dentro do núcleo atômico [17].

Quando um átomo contém um número igual ou acima de 84 prótons no seu núcleo o átomo é considerado instável por ser um átomo muito grande e pesado, emitindo radiações de forma espontânea [12]. Essa instabilidade acontece pela grande quantidade de prótons e nêutrons na sua estrutura, tentando se arranjar de alguma maneira, seja emitindo radiação por partículas ou raios eletromagnéticos para ficar em equilíbrio até alcançar a estabilidade. Nessa tentativa de rearranjo em sua estrutura, os átomos irradiam luz, ou seja, emitem radiação [9].

2.3 Decaimento Nuclear

O núcleo com excesso de energia busca a estabilidade na sua estrutura emitindo radiação, levando ao processo de decaimento nuclear ou desintegração do núcleo, termo oriundo do estudo da força nuclear fraca, umas das quatro forças fundamentais da natureza que ocorre em apenas distâncias atômicas. Essa força está relacionada à interação entre partículas subatômicas, como os quarks, que, de acordo com os modelos atuais da física, são consideradas componentes fundamentais das partículas que formam o núcleo atômico [8].

Neste processo, pode acontecer uma emissão de energia do núcleo quando muito instável, onde os átomos de um determinado elemento químico original se transformam em outro elemento [9]. Este fenômeno ficou conhecido pelo físico Ernest Rutherford em 1903 como decaimento nuclear, onde os átomos de um determinado elemento químico se transformam em outro devido a interação das partículas subatômicas dentro do núcleo [4].

Além disso, a força nuclear fraca desempenha um papel fundamental nos processos de fissão e fusão nuclear, que são responsáveis pela geração de energia em diferentes contextos. A fissão nuclear, utilizada em usinas nucleares, ocorre quando um núcleo pesado se divide em núcleos menores, liberando uma grande quantidade de energia. Já a fusão nuclear, que ocorre no interior do Sol e de outras estrelas, envolve a união de núcleos leves para formar núcleos mais pesados, liberando ainda mais energia do que a fissão.

Embora a força nuclear fraca seja essencial para transformações nucleares, ela não é a mais forte dentre as outras interações conhecidas na natureza. A força nuclear forte é a mais intensa, por manter os prótons e nêutrons unidos. A força nuclear fraca, por sua vez, está associada ao decaimento nuclear, processo no qual um núcleo instável emite radiação para se reorganizar e alcançar maior estabilidade [9].

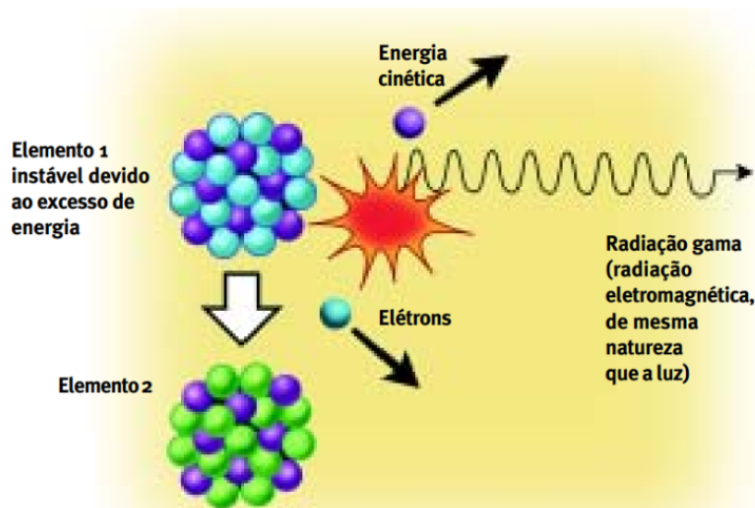


Figura 4. Decaimento de um átomo instável.

Fonte: [18, p. 38].

Existem 92 elementos naturais até então conhecidos, sendo que cada elemento possui quantidades diferentes de nêutrons na sua estrutura, alguns com os núcleos atômicos com a mesma quantidade de prótons mas com diferentes números de nêutrons são chamados de isótopos do mesmo elemento. Tomamos como exemplo o polônio que é um isótopo radioativo ou radioisótopo, que como mencionado foi descoberto por Pierre e Marie Curie em 1898, em homenagem ao país natal de Marie, o elemento foi chamado de polônio [4].

Com 84 prótons em seu núcleo, o polônio é o radioisótopo com o menor número de prótons considerado instável. Durante o processo de decaimento radioativo, esse átomo libera radiação para reduzir seu excesso de energia e alcançar a estabilidade. Isso ocorre porque sua estrutura atômica possui energia demais para permanecer em equilíbrio. Como ilustrado na Figura 4, o elemento 1 representa um átomo instável, enquanto o elemento 2 mostra o mesmo átomo após a emissão de radiação, agora em estado estável.

2.4 Fontes Radioativas

Esse tipo de emissão de radiação ocorre graças à atuação de uma das forças fundamentais da natureza: a força fraca². Essa força, embora menos intensa que a força forte³

² Força nuclear fraca é responsável pelos processos de decaimento radioativo, em que núcleos atômicos instáveis decaem ou se desintegram e emitem partículas, emitindo radiação.

³ Força nuclear forte é responsável por manter unidos os prótons e dos nêutrons no interior dos núcleos atômicos, apesar da repulsão elétrica entre os prótons, mantendo a ligação dos quarks no interior do núcleo [35].

(responsável por manter o núcleo coeso), desempenha um papel essencial nos processos de transformação nuclear. É por meio da ação da força fraca que ocorrem certos tipos de decaimento, que permitem que o núcleo instável se reestruture e atinja um estado mais estável. A partir dessas interações, formam-se três tipos principais de radiação, sendo 2 (duas) radiações de partículas e 1 (uma) radiação eletromagnética, que são emitidas durante a estabilização de núcleos radioativos, como detalhado a seguir [9] e na Figura 5 ilustrando o processo de decaimento:

- Radiação α : Nesse tipo de radiação, acontece a liberação de dois prótons e de dois nêutrons do núcleo do átomo.
- Radiação β : Nesta distinta forma de estabilidade do átomo, a radiação acontece de duas formas, a beta positiva e beta negativa, a radiação beta positiva acontece quando há um excesso de prótons, transformando um próton em um nêutron e liberando um pósitron que é a antipartícula do elétron. A radiação beta negativa ocorre quando há um excesso de nêutrons, transformando um nêutron em um próton e liberando um elétron:

Além das radiações mencionadas acima, ainda existe uma energia considerável no núcleo do átomo após as suas emissões, emitindo uma radiação na forma de ondas eletromagnéticas.

- Radiação γ : É um tipo de energia eletromagnética que possui a forma mais nociva de radiação, apresentando um alto poder de interação com a matéria, com ondas de mais altíssimas frequências dentro do espectro eletromagnético até então conhecidas, possuindo as mesmas características da luz [10].

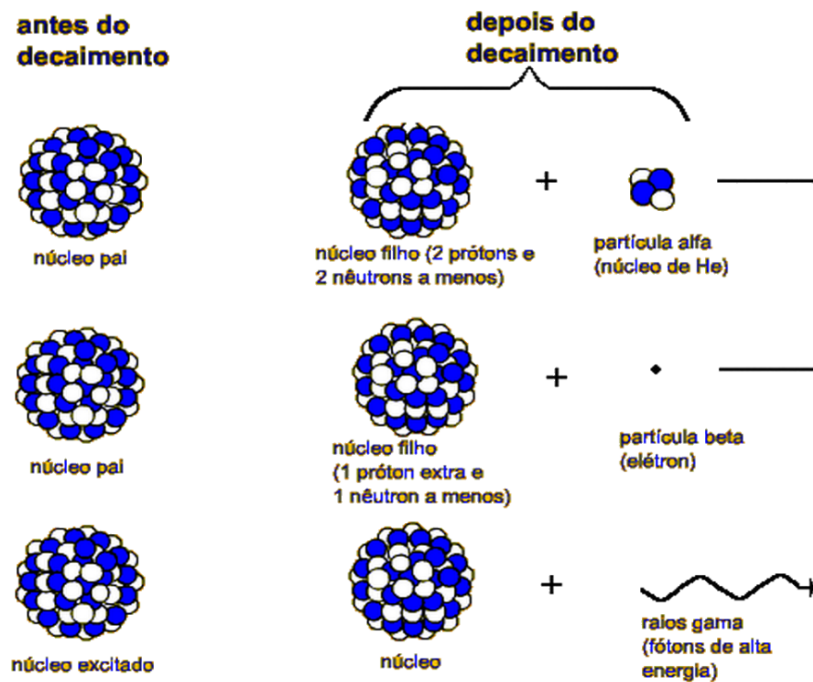


Figura 5. Tipos de radiação.

Fonte: [19].

Consideramos agora, de forma análoga, um balão completamente cheio de ar prestes a estourar, a única forma para ele não estourar é esvaziando um pouco do ar, liberando a pressão no seu interior. De modo semelhante, um átomo com um núcleo altamente energético precisa liberar parte dessa energia para alcançar a estabilidade. Essa liberação ocorre por meio da emissão de radiação, um processo natural que permite ao núcleo se equilibrar.

Diversos elementos na natureza possuem núcleos instáveis e, consequentemente, emitem radiação como forma de se estabilizar. Urânio que é normalmente utilizado nas usinas nucleares, ou até mesmo o cobalto-60 um elemento artificial que é o isótopo do cobalto, muito utilizado na indústria de metais para controle de qualidade. Deposto na tabela abaixo alguns elementos naturais que são radioativos e os locais onde geralmente são encontrados.

ELEMENTO	NÚMERO ATÔMICO	SÍMBOLO	ONDE É ENCONTRADO	APLICAÇÕES
Urânio	92	U	Minérios, ou em rochas fosfáticas	Reatores nucleares para gerar energia elétrica
Polônio	84	Po	Minérios de urânio	Fonte termoeleétrica em sondas e satélites
Rádio	88	Ra	Minérios de tório e urânio	Tratamento de câncer
Tório	90	Th	Nos minerais de monazita	Usado como componente de ligas aumentando a resistência ao calor
Plutônio	94	Pu	Minérios de urânio	Armas nucleares
Radônio	86	Rn	Águas minerais, termais e subterrâneas	Tratamento contra o câncer

Figura 6. Alguns elementos radioativos naturais

Fonte: [17, p. 35].

2.5 Interação Da Radiação Com A Matéria

Compreender como esses elementos emitem radiação para alcançar a estabilidade nos leva a entender também como essa radiação interage com a matéria. A física por trás dessa interação é fundamental para explicar os princípios que regem a aplicação da radiação em processos industriais e tecnológicos. A probabilidade de ocorrer uma interação entre a radiação emitida e um determinado material depende de vários fatores intrínsecos, tanto das propriedades do material quanto das características do tipo de radiação incidente.

Esses fatores incluem a velocidade, a massa e a carga das partículas que compõem a radiação, além do número atômico e da densidade do material irradiado. Dependendo dessas propriedades físicas e químicas, a radiação pode atravessar a matéria sem sofrer modificações, não ocorrendo interação perceptível. Por outro lado, pode haver interação, onde a radiação é absorvida e transfere sua energia para o material, ou ainda pode ocorrer espalhamento, mudando sua direção sem necessariamente perder energia.

Essa energia, que é resultante da interação da radiação eletromagnética com a matéria, é frequentemente tratada como fótons, que são partículas elementares de luz. Quando ocorre essa interação, os fótons podem transferir sua energia para as partículas do material irradiado, provocando diversos efeitos físicos. [26]. Os principais tipos de interações entre fótons e a matéria são [20]:

- Efeito Fotoelétrico, onde o fóton é absorvido pelo átomo e libera um elétron para o meio material, e como consequência disso o elétron liberado perde energia com a colisão e pela emissão de radiação;
- Efeito Compton, este efeito trata do espalhamento de um fóton quando colide com um elétron do material, acontece uma transferência de energia do fóton para o elétron, porém ainda resta um pouco de energia no fóton, que faz com que ele seja espalhado em outra direção e o elétron é ejetado do seu átomo perdendo energia pela colisão;
- Formação de Pares elétron-pósitron, nesse tipo de interação com a matéria o fóton é absorvido pelo átomo e a sua energia é transformada em massa de repouso, ou seja, essa energia se transforma em um par de partículas elétron/pósitron, que por sua vez perdem energia por colisão, um fato interessante é que o pósitron formado colide com outro elétron nisso os dois são aniquilados e forma um fóton novamente.

2.6 Cuidados Sobre Radiação Ionizante

As fontes radioativas ionizantes são em sua grande maioria penetrantes no corpo do indivíduo que está sendo sujeito a radiação. Dos tipos de radiação que vimos até agora a forma mais nociva a saúde humana, são os raios gama que requer extremo cuidado ao manusear esse tipo de radiação, pois se manuseada de forma errada ao atingir o corpo humano pode ocorrer modificações estruturais nos átomos que os compõe. Como os átomos podem ser modificados, automaticamente vai interferir no funcionamento das células, alterando as ligações químicas.

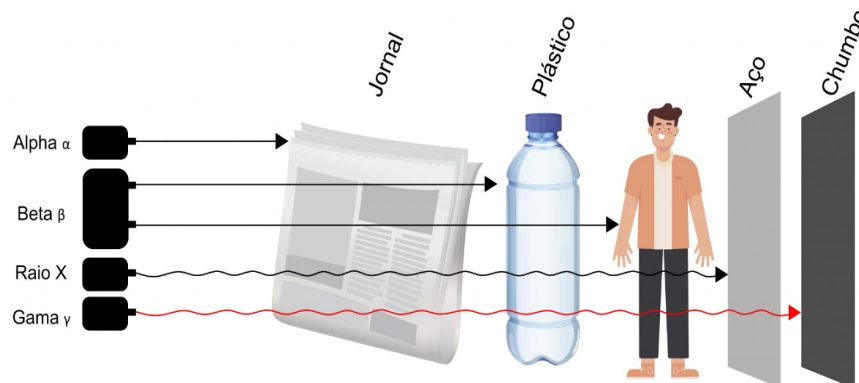


Figura 7. Poder de penetração das radiações

Fonte: [21].

As radiações alpha e beta ainda são muito grandes para conseguirem interagir com os átomos do corpo humano e gerar mutações como podemos analisar na Figura 7. Porém, os raios gama, como tem natureza magnética, se comportam de forma diferente na interação com a matéria, provocando consequências biológicas no organismo por todo o corpo [21]. Por emitirem altas doses de radiação no corpo do indivíduo irradiado, essas alterações biológicas podem ser irreversíveis impossibilitando a vida, pois o principal alvo dos efeitos da radiação é o Ácido Desoxirribonucleico (DNA), provocando mutações genéticas.

Essas fontes radioativas estão na classificação 5 das categorias elaboradas pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), de menos a mais radioativa, a categoria 5 são as fontes menos nocivas, já a categoria 1 são as fontes que contém um maior poder de penetração e mais nocivas. No processo da radiografia onde se utiliza a gamagrafia está classificado na categoria 2, sendo altamente nociva caso não seja utilizado de maneira segura. As fontes usadas na gamagrafia se não forem manuseadas de forma correta e tendo uma exposição a radiação prolongada pode ocasionar em alterações permanentes podendo levar a morte.

Por tal motivo os países membros da AIEA não estão medindo esforços para melhorar a segurança no controle das fontes radioativas visando manter práticas seguras evitando ao máximo acidentes envolvendo radioatividade. No entanto, tem sido difícil evitar os acidentes, que causam prejuízos pessoais, assim como econômicos e prejuízos sociais na família e das pessoas envolvidas [22].

CAPÍTULO 3: RADIAÇÃO NA INDÚSTRIA

A utilização dos raios ionizantes nas indústrias vem sendo fundamental para o desenvolvimento dos processos em diversos setores e áreas onde essa técnica é demandada, através das propriedades não destrutivas dos raios ionizantes, é possível utilizar as característica penetrante da radiação com a finalidade por exemplo, de inspecionar materiais lacrado [11].

No entanto, é pouco conhecido os inúmeros benefícios da radiação pela população, visto que o medo do desconhecido pode muitas vezes acabar dificultando o avanço e a

aceitação de novas tecnologias. O sensacionalismo dos meios midiáticos em apenas propagar más notícias a respeito do tema ajudam a causar essa má reputação da radiação. Esse cenário é agravado pelo desconhecimento da radiação, o que leva a comportamentos equivocados alimentados pela falta de conhecimento científico ou pela desinformação sobre o tema [17].

Quando propagadas as notícias a respeito desse tema pouco se traz embasamento científico, muitas das vezes são apenas informações soltas com a estampa “radiação” com símbolos de alta periculosidade, criando um certo bloqueio na cabeça das pessoas, principalmente naquelas que têm pouca escolaridade [1].

No entanto, a cada dia que se passa são desenvolvidas novas técnicas nucleares na indústria de diversas áreas que nos possibilita realizar os mesmo processos de formas diferentes e até tarefas que éramos incapazes de realizar por falta de tecnologia apropriada, hoje podemos realizá-las e de forma até mais eficaz através dessa técnica. Na medicina a radioatividade revolucionou as práticas da saúde possibilitando salvar várias vidas, na indústria contribuiu em setores como aeronáutico e automobilístico, assim como na área da agricultura [6].

3.1 Aplicações Na Medicina

As características dos radioisótopos de emitir radiação permite usá-los em várias aplicações, pois a radiação emitida por uma fonte radioativa pode ser absorvida por certos materiais ou atravessá-los. Em organismos vivos, suas células podem ser destruídas pela absorção da radiação, que a depender da aplicação pode ser usada como benefício eliminando pragas ou organismos indesejáveis em determinado local.

Na área da medicina, como já mencionado, são usados vários tipos de radioisótopos como o iodo-131, cézio-137 e cobalto-60, aplicados tanto em diagnósticos quanto em tratamentos. O iodo-131 por exemplo, um isótopo que emite radiação beta e gama, é utilizado para o exame de tireóide. Onde o paciente tem que ingerir o composto do iodo sendo ele radioativo ou não, mas isso não faz diferença pois não influencia no comportamento do elemento e nem causa dano ao paciente, visto que o iodo-131 tem uma meia-vida de 8 dias, isso significa que ele decai em 8 dias, ou seja, se transforma em outro elemento e não prejudica a saúde do paciente, os dias de decaimento é tempo suficiente para a composto ser

O eliminado do organismos [6]. aplicados tanto em diagnósticos quanto em tratamentos elemento é ingerido pelo paciente porque a glândula tireóide absorve o composto,

logo após um aparelho detector é posto na região do pescoço onde fica localizado a tireóide [14]. Então é diagnosticado se o iodo-131 foi absorvido em pouca ou muita quantidade pelo órgão desejado em comparação com o normal, as imagens dos diagnósticos são em preto e branco ou muitas vezes coloridas com ênfase na tireóide conforme mostrado na Figura 8. Um fator interessante é que esse tipo de exame pode ser feito em outros órgãos como fígado e pulmão [6].

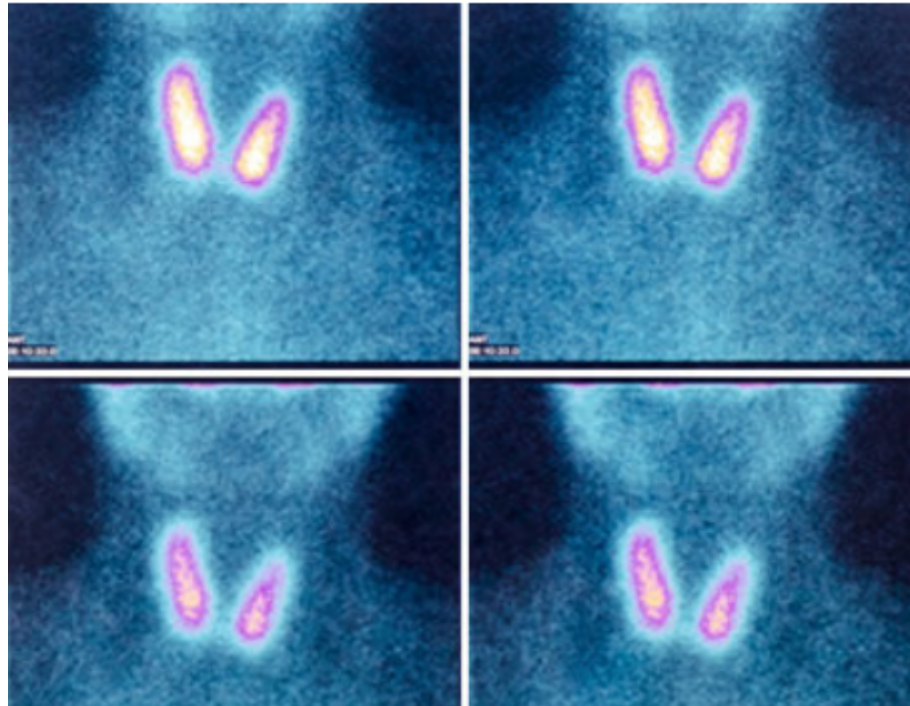


Figura 8. Radiodiagnóstico de diferentes tireóides, utilizando o Iodo-131.

FONTE: [23].

Além do exame de radiodiagnóstico com iodo, também utiliza-se diversos outros compostos como o tecnécio-99, usado no exame de cintilografia que é semelhante ao exame de tireóide, porém esse mapeia outros órgãos possibilitando a observação cintilografica renal, óssea, cerebral e pulmonar por exemplo [23].

O iodo dentre os outros tipos de radioisótopos é um dos mais utilizados no meio medicinal, pois apresenta condições ideais tanto em diagnósticos como em tratamentos, tendo como características meia vida curta, tendo eliminação rápida do organismo e baixa energia da radiação gama [9]. Esse elemento também é usado na radioterapia para tratamento de câncer, mas com uma dose maior para destruir o tumor, a radioterapia primeiramente teve a aplicação do composto rádio descoberto pelo casal Curie, logo depois foi adotado outros compostos, visto que alguns outros radioisótopos apresentaram melhor resultado, dentre eles

está o Iodo-131, o Césio-137 e o Cobalto-60 que são bastante eficientes para destruir células de tumores visto que são mais sensíveis do que as células saudáveis [6].

Na radioterapia que é um tratamento para matar células cancerígenas utiliza-se a “Bomba de Cobalto” como tratamento, um aparelho que usa o cobalto-60 como fonte radioativa, onde o elemento é isolado, encapsulado e revestido com chumbo e aço impossibilitando a passagem da radiação, sendo extremamente seguro. O cobalto dentre os outros elementos é o mais usado atualmente, fora os motivos técnicos, por apresentar ser o mais eficiente do que o césio-137 que era mais comumente usado [9].

Quando o aparelho de radioterapia é acionado, a fonte radioativa que está dentro do cabeçote de proteção é afastada até a frente de um orifício que viabiliza a passagem do feixe de radiação para entrar em contato com a região que precisa ser irradiada para tratamento. Logo depois da aplicação a fonte radioativa volta para a posição inicial no cabeçote de proteção, que inclusive é perfeitamente isolado com chumbo e aço evitando qualquer risco tanto para quem está manuseando quanto para o paciente submetido à terapia [6].

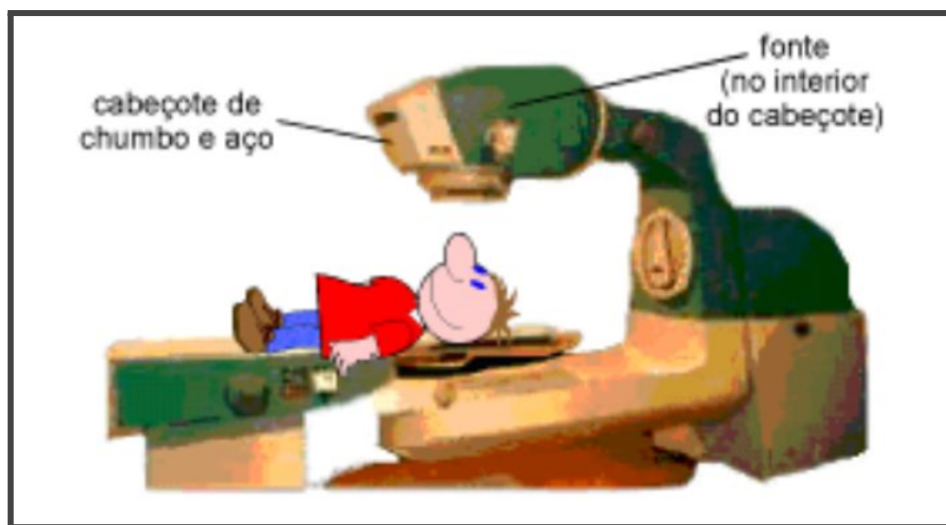


Figura 9.Utilização do aparelho de radioterapia popularmente conhecido como “Bomba de Cobalto”.

FONTE: [6, p. 7].

Quando a pessoa está sendo submetida a aplicação da fonte radioativa pelo aparelho como mostrado na Figura 9, a região no qual está o tumor está sendo irradiada para destruir as células cancerígenas visto que elas estão mais sensíveis por isso são destruídas, porém quando se falar irradiar, não significa dizer que a pessoa está contaminada de radiação, apenas dizer que aquela região está exposta a radiação [6]. Nós estamos constantemente sendo irradiados

pelos raios solares, porém não significa dizer que estamos contaminados, da mesma forma são as pessoas que são submetidas a esse tipo de tratamento por meio desse aparelho.

3.2 Aplicações Da Radiação Na Agricultura

Na agricultura o uso da tecnologia da radiação nuclear é muito interessante, visto que através dela é possível por exemplo acompanhar como está indo o crescimento das plantas monitorando seu metabolismo, verificando que tipo de nutrientes as plantas estão precisando para crescer melhor, analisando o que está sendo absorvido pelas raízes. Esse monitoramento é feito por meio de traçadores radioativos, são radioisótopos utilizados em pequenas quantidades para o acompanhamento de radiações emitidas por eles, que podem ser detectadas dependendo de sua energia [17].

Os radioisótopos emitem radiação, que pode ser alfa, beta, ou gama e dependendo do tipo de emissão pode atravessar determinados materiais, e o radioisótopo que emite essa radiação pode ser acompanhado ou traçado através de mapas do local, com equipamentos como os detectores de radiação [9].

Quando uma determinada planta absorve um traçador radioativo é possível emitir uma espécie de radiografia da sua estrutura, pois o aparelho identifica e localiza os radioisótopos absorvidos pela planta tornando visível a radiografia da folha em um filme revelado. Para esse processo é necessário apenas colocar o filme sobre a região da planta que absorveu os radioisótopos e deixar durante alguns dias e logo após revelar a imagem no filme [6].

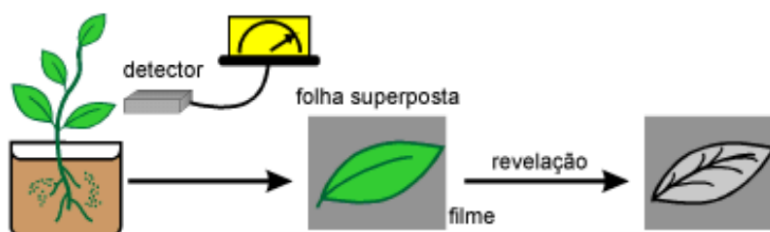


Figura 10. Demonstração de como seria o filme revelado da folha de uma planta que absorveu traçadores radioativos.

FONTE:[6, p. 9].

Na agricultura, a técnica dos traçadores radioativos é amplamente utilizada para o estudo e controle de pragas nas lavouras. Ao absorverem plantas que contêm radioisótopos, os insetos passam a ser “marcados”, tornando-se emissores de radiação detectável. Com o uso de detectores de radiação, é possível monitorar o trajeto desses insetos, permitindo, por exemplo, identificar quais plantas são mais atacadas por lagartas, localizar com precisão a posição de um formigueiro ou determinar quais flores são mais visitadas por abelhas durante a polinização [6].

Além de acompanhar os deslocamentos dos insetos, essa técnica possibilita a identificação dos predadores naturais que se alimentam das pragas. Isso permite adotar métodos de controle biológico, utilizando esses predadores para eliminar as pragas de forma eficiente, reduzindo a necessidade de aplicação de inseticidas e herbicidas. Como resultado, há menor impacto ambiental, preservando a fertilidade do solo e evitando problemas ecológicos futuros [25].

No processo de eliminação de pragas outra forma bastante interessante além de traçadores radioativos, seria a esterilização dos insetos machos da respectiva espécie indesejada na cultivar de plantio por meio da radiação gama, deixando os machos inférteis. Depois de esterilizados seriam soltos no ambiente para competir com machos férteis. Ao acasalarem sem gerar descendentes, a taxa de reprodução da praga diminuiria progressivamente até sua eliminação. Trata-se de uma solução sustentável, que evita o uso de agrotóxicos e outros produtos químicos prejudiciais ao meio ambiente e à produção agrícola [6].

3.2 Radiação No Campo Dos Alimentos

No campo dos alimentos, a radiação vem como uma forma de solução para a mesa dos consumidores, tendo como aplicação a irradiação dos alimentos, que fundamenta-se expondo os alimentos empacotados e a granel como batata, cebola, alho e feijão, podendo até ser aplicada em carnes.

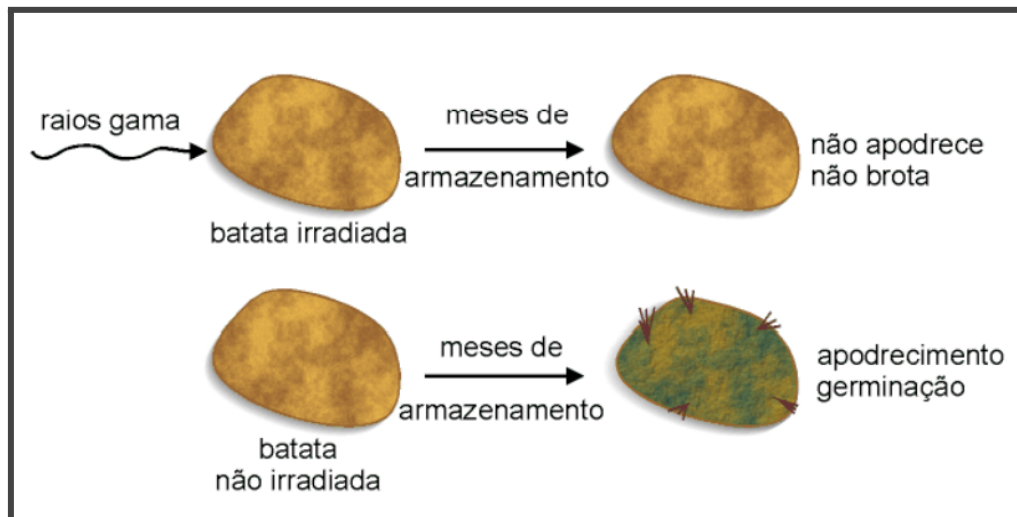


Figura 11. Batata irradiada para conservação do alimento.

FONTE: [6, p. 11].

A irradiação dos alimentos tem como finalidade acabar com os microrganismos, fungos e bactérias que podem estar presentes e ajudar a preservar por mais tempo evitando perdas por deterioração e aumentando a segurança. A batata por exemplo quando irradiada pode ser preservada por vários meses, impedindo que estrague por apodrecimento assim também como retardando o processo de germinação, pois isso pode afetar na má qualidade do alimento, influenciando de forma negativa economicamente os produtores.

A aplicação dessa técnica ajuda bastante no transporte de frutas sensíveis como o morango que tem o processo de maturação muito rápido, conservando por mais tempo. Essa técnica aplicada a alimentos inicialmente pode gerar um pouco de estranheza das pessoas na técnica da aplicação da radiação nos alimentos, mas isso é devido a associação errônea da radiação a efeitos nocivos à saúde [27].

O processo físico da irradiação como tratamento para conservação de alimentos é baseada na transmissão da energia ionizante, que por sua vez pode ser transmitida por partículas ou ondas eletromagnéticas que possam ser capazes de retirar os elétrons da camada de valências do átomo, alterando a estrutura molecular para impedir a divisão das células dos organismos orgânicos, sem causar nenhum tipo de contaminação toxicológica por radioatividade.

Na indústria alimentícia as fontes radioativas que podem ser utilizadas para o processo de irradiação são o Cobalto 60 e Césio 137, autorizadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). O que assegura as indústrias a utilizarem esse tipo de técnica e quais fontes usar como tratamento para conservação de alimento são os vários estudos e pesquisas que devido a grande resistência de vários países para comercializar produtos irradiados foram desenvolvidos para poder validar a comercialização, avaliados pelo Comitê Misto de Especialistas em Irradiação de Alimentos (CMEIA) que foi solicitados por alguns órgãos como o Food Agriculture Organization (FAO), a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e a Organização Mundial de Saúde (OMS). Após a análise das pesquisas, o comitê determinou que a irradiação de alimentos não apresenta riscos toxicológicos, microbiológicos e nutricionais, contanto que seja respeitado das normas estabelecidas pelo comitê [28].

CAPÍTULO 4: GAMAGRAFIA INDUSTRIAL

É nesse processo de liberação da radiação através do átomo instável que emite raios ionizantes que está fundamentado o princípio da gamagrafia. Essa técnica utiliza especificamente os raios gama e raios X transmitidos via ondas eletromagnéticas, gerando um feixe de radiação que atravessa uma substância sofrendo atenuação da intensidade para poder gerar a impressão em filme fotográfico para verificação. A aplicação dessa técnica é feita para o controle de qualidade de metais e é gerenciado com bastante segurança, visto que os raios gama emitidos pelos radioisótopos são nocivos à saúde humana causando modificações nas moléculas pela retirada de alguns elétrons dos átomos [8].

O controle de qualidade possibilita o desenvolvimento do nível de qualidade dos materiais metalúrgicos trazendo mais garantia e eficiência. De acordo com o nível de avanço da produção dos materiais, os produtos se tornaram de mais grosseiros para materiais mais finos e eficientes, com isso se faz necessário o uso de novas técnicas de controle de qualidade para garantir a qualidade e segurança evitando futuros acidentes.

Do mesmo modo trazendo mais economia e agilidade com o processo de verificação, analisando uma parte defeituosa ou mal acabada tem-se a possibilidade de reciclagem de alguns itens, evitando dessa forma a perda por completo de muitas matérias, trazendo mais vantagens econômicas [11].

Durante o processo da gamagrafia industrial, como sendo umas das formas mais utilizadas dentre as aplicações nucleares e mais eficiente, é emitido uma fonte radioativa que pode ser raios gama ou raios X, os principais usados nesse processo. A escolha entre uma dessas duas fontes vai depender da variedade dos objetos e das condições a que vai ser submetido o ensaio. O material é submetido a fonte radioativa com o intuito de encontrar algum defeito ou falta de homogeneidade no metal. Devido às suas propriedades de penetração, a radiação é aplicada sobre o material com o objetivo de analisar seu interior. Nesse processo, os raios eletromagnéticos interagem com os átomos do metal testado, permitindo a detecção de falhas ou imperfeições internas.

Com isso, na aplicação da fonte radioativa exposta ao material, parte dessa radiação é absorvida pelas regiões mais densas ou espessas, enquanto outra parte atravessa o objeto. A radiação que consegue atravessar o material atinge um filme radiográfico posicionado do lado oposto da peça, formando a impressão de uma imagem em um filme radiográfico que revela a estrutura interna da peça. Essa variação na absorção da radiação permite a possibilidade de inspeção [6].

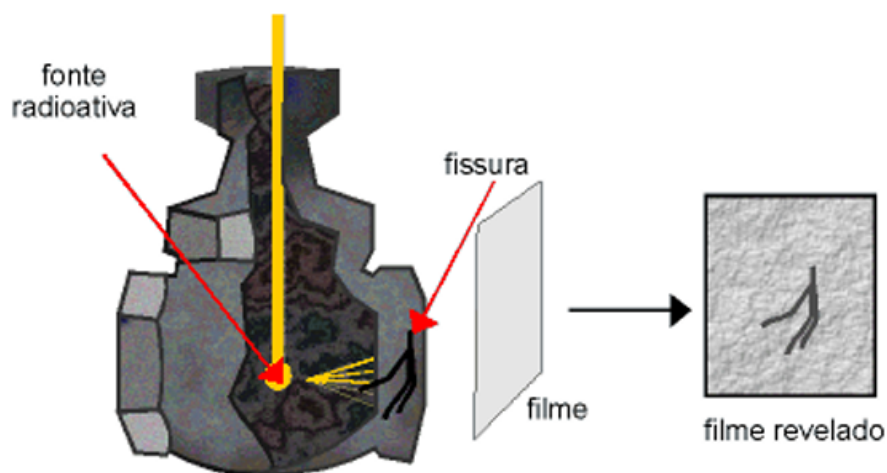


Figura 12. Demonstração e impressão do processo da gamagrafia.

FONTE: [6, p. 12].

Na Figura 12, podemos observar a fonte radioativa sendo aplicada na válvula de metal, revelando a imagem no filme para uma posterior verificação. Na análise do filme revelado é possível observar os defeitos pelas misturas e impurezas do material analisado que resulta na impressão, submetido a diferentes graus de escurecimento sendo possível observar diferentes densidades ópticas [22].

4.1 Irradiadores De Gamagrafia Industrial

Nesse processo de emissão por uma fonte radioativa destinada à impressão do material, se utiliza o equipamento irradiador, uma ferramenta robusta que é projetada para poder atender aos requisitos e condições de segurança estabelecidos por uma legislação internacional e pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Resolução CNEN N° 145, de 20 de março de 2013, que dispõe sobre os requisitos de segurança e proteção radiológica necessários para o funcionamento das instalações de radiografia industrial, de acordo com resolução específica sobre licenciamento de instalações radiativas.

O art. 39 da Resolução CNEN N° 145 estabelece:

Para os equipamentos de radiografia gama e acessórios devem ser verificados os seguintes itens, de acordo com a NORMA ABNT NBR 8670, de 11/1984, que estabelece os requisitos e condições necessárias para equipamentos destinados à radiografia gama.

Ratificando, o irradiador de gamagrafia e todos os acessórios auxiliares que o acompanham precisam ter a certificação de vistoria emitido por uma instituição reconhecida pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) [30].

As inspeções por gamagrafia são conduzidas com o uso de irradiador, o equipamento completo está ilustrado na Figura 14, é composto por três componentes principais, entre os quais estão as blindagens, que precisam ser normalmente constituídas de chumbo ou urânio exaurido apropriado de acordo com a fonte [22].

A fonte radioativa é o segundo componente que compõe o irradiador que normalmente possuem pequenas dimensões, na forma cilíndrica com 2 mm no seu diâmetro por 4 mm de altura geralmente. Composto também do dispositivo para expor a radiação ao material, contendo um tubo guia flexível, um cabo teleflex e um mecanismo para acionar a fonte, podendo incluir um indicador de posição da fonte radioativa [31].

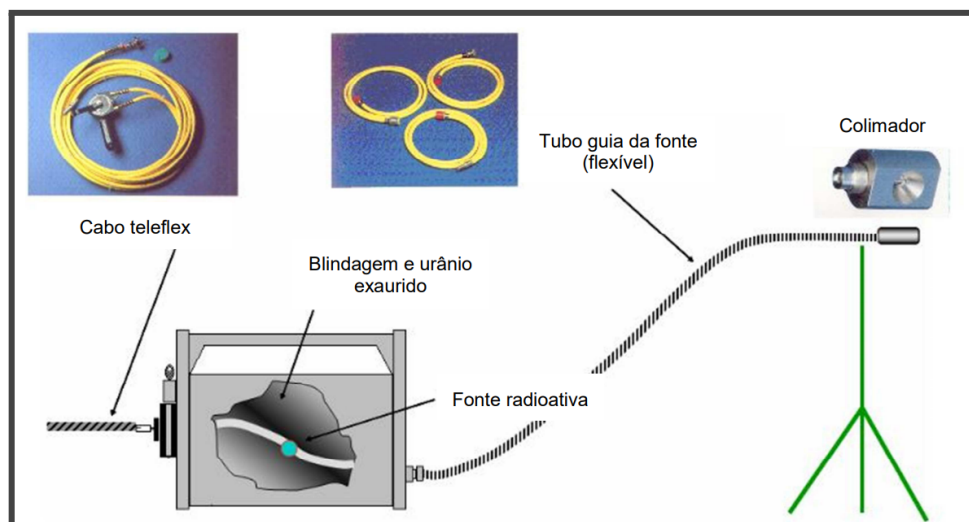


Figura 13. Componentes do irradiador de gamagrafia.

FONTE:[31, p. 20].

Os irradiadores contém na sua estrutura um dispositivo para ser realizado o acionamento manual da exposição da fonte, possibilitando ao operador o trabalho/manuseio com uma distância segura sem ter uma exposição direta ao feixe de radiação da fonte [31]. Também tendo a possibilidade de usar o colimador, que tem a função de concentrar o feixe de energia radioativa em uma direção específica.

Dessa forma, utilizando o com o colimador o uso do irradiador no modo panorâmico é inviabilizado. Esse método panorâmico consiste em posicionar a fonte de gamagrafia dentro da tubulação e os filmes ficam posicionados externamente, ao redor da solda. Com apenas uma exposição, os raios gama são emitidos em várias direções ao mesmo tempo, permitindo registrar toda a extensão da solda em uma única imagem [11].

A fonte radioativa que fica selada dentro do porta fonte é constituída por um aço inoxidável, com articulações flexíveis e possui um engate para conexão com o tubo guia, permitindo a exposição da energia. Quando não está conectado, conta com um mecanismo de travamento que mantém o engate fechado, garantindo maior segurança [22].

Na parte posterior do irradiador é conectado um cabo de comando por onde é feito a ativação de maneira manual da fonte e na parte frontal como é visto na Figura 13, o tubo guia é conectado do interior do irradiador até a peça que vai ser submetida a ensaio [22].

Tanto o irradiador exemplificado quanto qualquer outro irradiador de gamagrafia, seguem as diretrizes da norma ISO 3999-1 certificadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que classifica os aparelhos de emissão de radiação em três categorias,

conforme a forma como a fonte de radiação é posicionada durante o ensaio. Na categoria I, a fonte permanece fixa dentro do irradiador e o feixe de radiação é liberado apenas com a abertura de um comutador (peça anteriormente mencionada). Já na categoria II, a fonte é colocada para fora do irradiador por meio do tubo guia até o terminal de emissão da fonte, podendo esse deslocamento ser realizado de forma mecânica ou elétrica [30]. Por fim, a categoria X engloba os irradiadores utilizados em gamagrafia submarina e os do tipo *crawler*, que são utilizados para inspeções em ambientes específicos, principalmente na indústria de petróleo, gás e infraestrutura, analisando oleodutos e estruturas metálicas no fundo do mar [32].



Figura 14. Irradiador de gamagrafia industrial .

FONTE:[22, p. 8].

Na gamagrafia industrial existem diferentes tipos e tamanhos de fontes, de acordo com a aplicação designada a ela. Tendo critérios estabelecidos pela norma ISO 2919 (1990), com o intuito de padronizar e garantir a eficiência da fonte de acordo com as condições submetidas. A unidade de medida para poder-se qualificar a atividade de uma fonte radioativa é o becquerel (Bq) equivalente a 1 desintegração nuclear por segundo, estabelecido pelo Sistema Internacional de Unidades (SI). Outra unidade conhecida usada para a mesma equivalência é o Curie (Ci), que era mais utilizado antes da adoção do (SI) [32].

Quando afirmamos que uma fonte possui uma atividade de 1 Curie isto quer dizer que ela está decaindo em ritmo de 37 bilhões de desintegrações por segundo. Entretanto, isto não indica ao técnico a quantidade de radiação necessária para se obter uma boa gamagrafia. Considerando-se as energias envolvidas em cada desintegração obtém-se a dose que pode ser expressa em "roentgen" [5]. Essa unidade é utilizada na prática de gamagrafia e em proteção

radiológica.

Durante a inspeção da gamagrafia a maioria das fontes radioativas apresentam-se em formas metálicas, sendo organizadas em pequenos discos encapsulados com aço inoxidável e bem selados [22]. Pode-se observar na Figura 15 o esquema de como é estruturada uma fonte de Irídio-192 para ser posto dentro de um irradiador para a aplicação da gamagrafia [31].

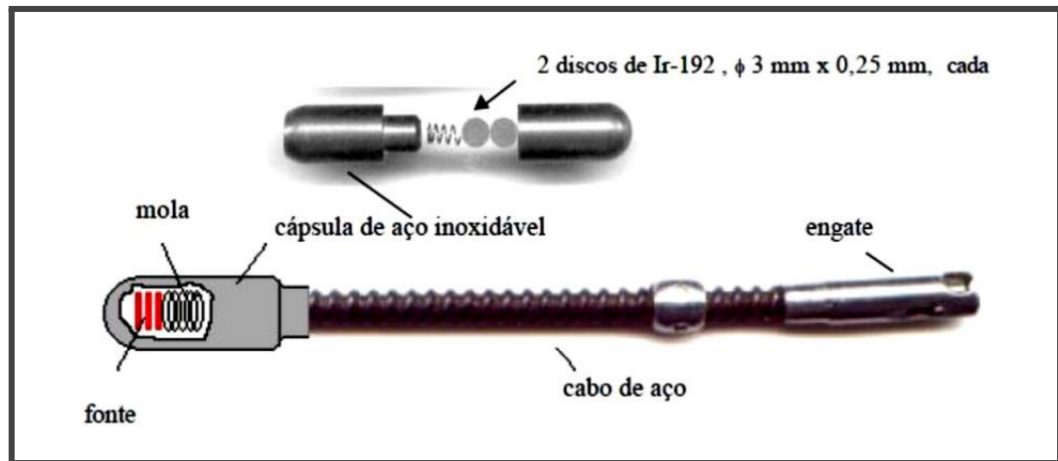


Figura 15. Cápsula de fonte radioativa do irradiador .

FONTE:[22, p. 9].

4.2 Fontes radioativas utilizada

Os tipos de elementos e o processo a ser usado se é raios X ou raios gama como fonte de energia variam com a finalidade da gamagrafia, de acordo com a densidade do material, espessura do material desde finas folhas de alumínio chegando até a cerca de 20 cm de aço ou mais de um metro de concreto armado, tempo para o trabalho, tempo de exposição, geometria do material, acesso ao material a ser radiografado, se o objeto pode ir até a fonte radiográfica ou se a fonte tem que ir ao material e além disso vantagens econômicas [5]. Deve-se considerar todos esses fatos para escolher o processo e o tipo de elemento a ser utilizado, dentre os mais utilizados estão o Irídio-192, Selênio-7, Cobalto-60 , pois fornecem um alto grau de radiação [29].

Após a verificação da espessura e geometria da peça ou do material ao qual vai ser submetido o ensaio, é definido qual a energia radioativa que vai ser utilizada e sua intensidade, ou no caso dos raios X, qual a tensão da máquina irradiadora para poder se fazer a verificação.

Um fator importante a se frisar é que os raios X não precisam de uma fonte radioativa para funcionar. Diferente dos raios gama, que são emitidos a partir do decaimento de elementos radioativos, os raios X são gerados de forma artificial quando elétrons de alta energia colidem com um alvo metálico dentro de um tubo de raios X [22]. Na Figura 16, é verificado a aplicação de raios X em diferentes materiais para analisar qual o comportamento em diferentes espessuras.

Tensão(kV)	Alumínio	Aço	Bronze
50	1,2 a 2,5 cm		
140	2,5 a 7,6 cm	2,0 a 2,5 cm	1,2 a 2,5 cm
200	7,6 a 12,5 cm	2,5 a 7,6 cm	2,0 a 3,0 cm
260		5,0 a 9,0 cm	2,5 a 5,0 cm
300		5,0 a 12,5 cm	5,0 a 10,0 cm
1000		10,1 a 20,3 cm	7,6 a 12,5 cm
2000		12,5 a 25,0 cm	
20000			

Figura 16. Medições de tensões aplicadas em função de diferentes espessuras de diferentes materiais.

FONTE: [05, p. 4].

Como os raios gama emitidos pelos radioisótopos possuem propriedades físicas semelhantes às dos raios X, como, por exemplo, a forma de propagação, é possível estabelecer uma comparação entre os dois métodos de inspeção. Ambos os processos são amplamente utilizados em Ensaios Não Destrutivos (NDT) para avaliar a integridade de materiais e estruturas, especialmente na detecção de falhas internas. No entanto, há diferenças importantes entre eles, como a forma de geração da radiação, a energia dos raios emitidos e as condições de aplicação, como já mencionada [5]. Essas distinções podem ser analisadas de maneira mais detalhada por meio da Figura 17, comparando suas energias equivalentes sob diferentes elementos radioativos.

Isótopo	Energia dos raios gama	Equivalência com raio-X
COBALTO-60	1.17 MeV 1.33 MeV	2.000 kV
IRÍDIO-192	0,3 até 0,6 MeV	400 kV
TÚLIO-170	0.084 MeV	100 kV

Figura 17. Comparação dos níveis de energia dos radioisótopos em relação a equivalência de energia dos raio X.

FONTE: [05, p. 4].

Um fator importante para determinar na escolha do elemento radioativo e qual processo utilizar (raios gama ou raios X) é a sua meia-vida radioativa. A meia-vida radioativa é o tempo necessário para que metade dos átomos de uma amostra de um elemento radioativo se desintegre espontaneamente ou decaia, transformando-se em outro elemento por meio da emissão de radiação [9]. Após uma meia-vida de uma radioisótopo, resta 50% da amostra original; após duas meias-vidas, sobra 25%, e assim por diante [29].

De acordo com a tabela 2, o composto Cobalto-60 contém uma meia vida de 5,3 anos. Significa dizer que é uma fonte que pode ser utilizada por um bom tempo no equipamento irradiador ou no reator sem ter a preocupação de fazer muitas reposições do composto. O Irídio-192 radioisótopo também bastante utilizado, tem uma meia-vida de 75 dias, sendo mais frequente e a reposição, dependendo do tipo de atividades, pode ser feito entre 2 a 3 vezes por ano para não prolongar o tempo de exposição pelo decaimento radioativo. O Túlio-170 contém o processo de reposição muito semelhante ao Irídio-192, devido o tempo de meia-vida ser de 127 dias [5].

Com o longo tempo da utilização desses elementos, as fontes vão perdendo sua eficácia fazendo com que seja necessário a reposição do combustível dos equipamentos de irradiação e reatores para que as fontes sejam restituídas, por isso a importância de manter algumas fontes de reposição reserva para substituição principalmente os isótopos de meia-vida curta [11].

Para poder fazer a escolha de qual método utilizar para ser feito a gamagrafia, entre os raios X e os raios gama é preciso fazer uma análise mais minuciosa apresentando algumas vantagens e desvantagens de um método frente ao outro para saber de acordo com a situação e

o material qual será o mais eficiente [29].

Sendo assim, tanto as máquinas de raio X como as fontes radioativas utilizadas no método dos raios gama apresentam um certo problema com proteção radiológica. As máquinas de raio X apresentam esse problema de proteção apenas durante o uso, ao emitir o feixe de energia, enquanto as fontes radioativas emitem radiação constantemente, sendo necessário uma blindagem para armazenar a fonte durante o uso e até mesmo quando não estiver sendo usada [11].

Para a aplicação da radiografia industrial a fonte radioativa não tem necessidade da utilização de energia elétrica, o que permite a realização de gamagrafias mesmo em locais onde não há disponibilidade de eletricidade. Já as máquinas de raios X precisam de uma diferença de potencial alta para poder acelerar os elétrons lançados contra os átomos para sofrerem frenagem e com essa frenagem emitirem energia [5]. Essas máquinas conseguem produzir radiação com maior intensidade do que as fontes radioativas, reduzindo o tempo de exposição necessário para inspecionar os materiais. No entanto, algumas fontes radioativas apresentam alta atividade, o que pode minimizar essa diferença de desempenho entre os dois métodos.

Do ponto de vista da manutenção, os radioisótopos oferecem uma vantagem em relação às máquinas de raios X. Pois as fontes radioativas não geram custos como por exemplo, a substituição de tubos de raios X, ou transformadores de alta tensão e outros componentes que necessitam de manutenção para o funcionamento das máquinas. O fato das máquinas de raios X serem bem complexas é um ponto negativo, frente a simplicidade dos radioisótopos que só precisam de uma blindagem de chumbo capaz de armazenar a fonte e também possui uma pequena proporção, facilitando a logística em alguns casos com mais flexibilidade em locais de difícil acesso [5].

Pelo seu pequeno tamanho a fonte radioativa pode ser transportada até os materiais que deseja se submeter a ensaio, isso ajuda muito com materiais ou peças muito grandes como por exemplo dutos de transporte de líquidos. Já a máquina de raios X não, pelas suas dimensões exigem em muitos casos que os materiais sejam levados até seu encontro para serem submetidos ao ensaio.

Em relação a aspectos econômicos, o investimento inicial para as fontes radioativas junto com todo o aparato dos equipamentos auxiliares, como blindagens e irradiadores tendem a ter um custo mais inferior em relação aos aparelhos de raios X. No entanto, para cada caso é necessário uma análise para saber qual método aplicar, pois não necessariamente o mais

barato garante que a solução escolhida atenderá adequadamente às exigências e condições específicas da aplicação [29].

A propagação e democratização acerca da radiação nuclear é fundamental, uma vez que pode ajudar a desmistificar os mitos e temores que rodeiam essa temática [17]. Dessa forma, apresenta-se a técnica da gamagrafia industrial e aplicações dessa tecnologia, demonstrando e analisando como é feito o processo para o controle de qualidade de peças de metais para garantir a segurança e qualidade no material.

4.3 A Técnica da Gamagrafia e seu Papel no Controle de Qualidade

Como analisado, a gamagrafia industrial é um ensaio não destrutivo que utiliza a radiação ionizante para inspecionar a integridade de peças metálicas, sem causar danos ao material analisado. Método esse amplamente empregado em setores como o aeronáutico, naval, petroquímico e metalúrgico, com o objetivo de garantir a qualidade de soldas, peças industriais, tubulações, dutos de transporte de fluidos e estruturas sujeitas a altas pressões e temperaturas.

O processo de gamagrafia envolve a emissão de forma controlada de radiação gama por meio de algumas fontes radioativas, como o Irídio-192, Cobalto-60, Túlio-170 ou Selênio-75. Essa radiação atravessa a peça submetida a ensaio e atinge um filme radiográfico, formando uma imagem que permite revelar possíveis falhas internas como rachaduras no material, fissuras e descontinuidades. Nas regiões com menor densidade, como trincas, porosidades ou vazios, o material oferece menor resistência à radiação, permitindo que uma maior quantidade de radiação atinja o filme radiográfico. Isso resulta em áreas mais escuras na imagem revelada. Por outro lado, as regiões mais densas ou espessas absorvem mais radiação, impedindo que ela atinja o filme com a mesma intensidade, formando assim áreas mais claras. Na Figura 18 é demonstrado um exemplo do resultado de um filme radiográfico revelando a pequena trinca na solda de um tubo.

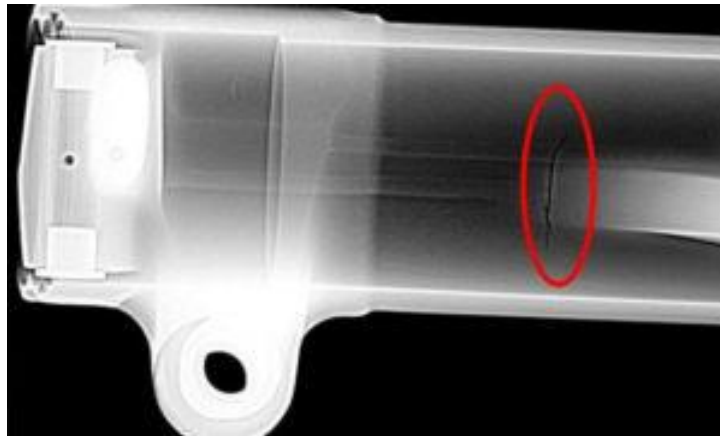


Figura 18. Filme de gamagrafia da inspeção de tubo

Fonte: [33].

Há outras formas de inspeção para o controle de qualidade de peças metálicas, no entanto a gamagrafia industrial se destaca dentre as demais outras técnicas pelas principais vantagens:

- Alta precisão na detecção de falhas internas em metais;
- Capacidade de inspecionar peças sem causar danos;
- Registro permanente da inspeção por meio de filmes radiográficos;
- Aplicação em materiais de diversas espessuras, incluindo aço, alumínio e concreto.

Além dessas vantagens, a eficiência da gamagrafia industrial depende de uma análise criteriosa de fatores como a espessura do material, a geometria da peça e o tipo de defeito a ser identificado para saber qual método vai ser utilizado, raios gama ou raios X . Como discutido durante o trabalho, a escolha do método de radiação e a fonte a ser utilizada dependem diretamente dessas condições. Por exemplo, para materiais de alta espessura, como concreto armado, grandes estruturas metálicas ou condições de difícil acessibilidade, fontes de alta intensidade como o Cobalto-60 são mais recomendadas, pois oferecem maior penetração e detalhes na radiografia sendo usado como método dos raios gama [5].

Durante a análise das fontes analisou-se que o Irídio-192, por exemplo, é amplamente utilizado por sua meia-vida curta (75 dias), o que exige reposições frequentes, mas ainda assim é ideal para inspecionar materiais com espessura intermediária, como aços e ligas metálicas [5].

O Cobalto-60, com uma meia-vida mais longa (5,3 anos), é mais adequado para situações em que é necessário um período mais extenso de uso contínuo, como na inspeção de materiais de grandes dimensões, como concreto armado e metais mais espessos. Sua alta intensidade de radiação também é um fator importante quando a penetração mais profunda é necessária [5]. Já o Selênio-75, devido à sua baixa intensidade, é ideal para materiais mais finos e para inspeções rápidas, especialmente quando o tempo de exposição é um fator crítico.

A análise das diferenças entre raios X e raios gama para a gamagrafia mostrou que, enquanto ambos têm propriedades semelhantes, existem diferenças significativas em relação à sua geração e aplicação. Os raios X são gerados por máquinas que aceleram elétrons contra um alvo metálico, enquanto os raios gama são produzidos a partir do decaimento de elementos radioativos. Isso implica que os raios X exigem uma fonte de energia elétrica para operação, o que limita seu uso em locais sem fornecimento de energia elétrica. Em contrapartida, os raios gama não necessitam de energia elétrica, sendo uma opção mais flexível, especialmente em ambientes remotos ou de difícil acesso. É importante destacar que os raios X e os raios gama não devem ser vistos como técnicas concorrentes, mas sim como métodos que se complementam em diferentes aplicações [11].

Embora a gamagrafia industrial apresente diversas vantagens e seja amplamente utilizada em diferentes contextos de inspeção, é fundamental considerar os cuidados necessários em relação à segurança radiológica. Devido ao uso de fontes radioativas, como o Irídio-192, o Cobalto-60 e o Selênio-75, o processo exige um rigoroso controle operacional para proteger tanto os operadores quanto o ambiente. A exposição inadequada à radiação pode trazer riscos significativos à saúde, razão pela qual a prática da gamagrafia é regulamentada por órgãos internacionais, como a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) [22].

Para garantir a segurança durante as inspeções, são empregadas blindagens específicas, geralmente de chumbo ou aço inoxidável, além da implementação de procedimentos de segurança e monitoramento contínuo. Assim, a aplicação eficaz da gamagrafia depende não apenas da escolha adequada do método e da fonte, mas também do cumprimento rigoroso das normas de proteção radiológica.

4.4 Desmistificando a Radiação e a Importância da Educação Científica

A análise realizada neste estudo demonstrou que a radiação nuclear, quando utilizada

de forma controlada, é uma ferramenta essencial para o progresso tecnológico e a segurança industrial. Apesar da visão negativa associada à radiação, suas aplicações na medicina, na agricultura, na indústria e no setor alimentício provam que essa tecnologia traz inúmeros benefícios para a sociedade.

Um dos desafios enfrentados pela radiação nuclear, especialmente no setor industrial, é o preconceito e o medo infundado sobre seus efeitos. Muitas pessoas ainda associam a radiação exclusivamente a tragédias nucleares e ao uso bélico, sem considerar os benefícios essenciais que essa tecnologia proporciona à humanidade.

A gamagrafia industrial, por exemplo, desempenha um papel fundamental no controle de qualidade prevenindo contra acidentes, garantindo a integridade de estruturas críticas de asas de aviões, tubulações, plataformas petrolíferas, reatores nucleares e até mesmo em estruturas de pontes. Sem essa tecnologia, falhas estruturais poderiam passar despercebidas, resultando em graves acidentes podemos chegar até mesmo em perdas humanas.

Portanto, a educação científica é essencial para desmistificar a radiação, promovendo um entendimento mais amplo sobre suas aplicações e benefícios. A divulgação de informações baseadas em evidências científicas pode reduzir o medo irracional e incentivar o uso responsável dessa tecnologia em prol do desenvolvimento sustentável da sociedade.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo, buscamos compreender todo o processo de controle de qualidade na indústria utilizando a gamagrafia, expondo de forma qualitativa os conceitos fundamentais da radiação nuclear, e demonstrando as principais aplicações do processo desde o campo da agricultura até a medicina.

Como aspecto introdutório, abordamos um contexto histórico da radiação nuclear, onde destacamos os personagens principais e suas contribuições na área, destacando alguns eventos relevantes sobre a radiação, de modo a proporcionar uma compreensão mais ampla do que se trata o tema.

Apresentamos como a gamagrafia industrial desempenha um papel essencial no controle de qualidade de peças metálicas, garantindo a segurança e a confiabilidade de estruturas utilizadas em setores estratégicos, como o aeronáutico, metalúrgico e petrolífero. A gamagrafia se destacou como uma ferramenta fundamental no controle de detecção de falhas

internas em peças metálicas, garantindo a integridade e a segurança de componentes, como aqueles usados no setor aeronáutico, metalúrgico e petrolífero.

A partir da estrutura física dos átomos instáveis e os processos de emissão de radiação, estudamos como a radiação, embora frequentemente associada a estigmas negativos, pode ser empregada de forma controlada e segura para fins industriais e científicos. A análise dos diferentes tipos de radiação, especialmente a radiação gama, destacou suas propriedades essenciais para a gamagrafia, como o alto poder de penetração e a capacidade de gerar imagens precisas, fundamentais para a avaliação da qualidade de materiais em diversas espessuras.

Ao longo do nosso estudo, observamos que as fontes de radiação mais frequentemente usadas, como o Irídio-192, Cobalto-60 e Selênio-75, apresentam características distintas que tornam cada uma delas mais adequada para diferentes tipos de inspeção como, por exemplo, espessura do material, geometria da peça e o tempo de exposição. O Cobalto-60, com sua longa meia-vida, é ideal para materiais de grandes dimensões e para inspeções prolongadas, enquanto o Irídio-192 e o Selênio-75 são mais adequados para materiais mais finos e para situações onde a reposição rápida é possível.

Em relação aos métodos de raios X e raios gama, as principais diferenças estão na forma de geração da radiação e nos requisitos operacionais. Os raios X exigem energia elétrica para o funcionamento do equipamento, limitando sua aplicação em locais sem fornecimento de energia. Por outro lado, os raios gama, apesar de não necessitarem de energia elétrica, emitem radiação continuamente, o que requer um cuidado extra com a segurança e com a blindagem das fontes. Em termos de manutenção, as fontes de raios gama se mostraram mais vantajosas, pois exigem menos custos operacionais, enquanto as máquinas de raios X demandam manutenção mais constante devido à complexidade dos seus componentes, por tais motivos sendo os raios gama mais utilizados na maioria das inspeções.

Do ponto de vista econômico, as fontes radioativas possuem um custo inicial mais baixo, o que as torna uma solução mais acessível a longo prazo, principalmente em áreas de difícil acesso, onde a portabilidade das fontes é uma vantagem significativa. No entanto, a escolha entre os métodos deve sempre considerar as condições específicas da aplicação e segurança, como a necessidade de intensidade de radiação, a acessibilidade ao local e o tempo disponível para a inspeção. A utilização de blindagens adequadas e o cumprimento rigoroso das normas de proteção radiológica são essenciais para garantir que o processo de inspeção

seja realizado de forma segura, tanto para os operadores quanto para o ambiente em que a inspeção é realizada.

Além disso, este trabalho abordou a importância de desmistificar os mitos e temores relacionados à radiação nuclear. A educação científica desempenha um papel crucial nesse processo, ajudando a promover um entendimento mais amplo sobre as aplicações e os benefícios da radiação nuclear para a sociedade, diminuindo a resistência ao seu uso e incentivando práticas responsáveis e seguras.

Concluimos que a análise da gamagrafia industrial é uma ferramenta crucial na detecção de falhas internas em materiais e estruturas e a comparação com outros métodos de inspeção destaca suas vantagens em termos de precisão, capacidade de inspeção sem danificar o material e a flexibilidade em locais de difícil acesso. A aplicação de fontes radioativas, embora exija cuidados rigorosos com a segurança radiológica, contribui de maneira significativa para a melhoria da qualidade e a segurança em diversas indústrias.

REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, Paulo Roberto Bairros da. **Energia nuclear: mitos e conflitos**. 2010.
- [2] BATISTA, Izaure Rita Silva; NASCIMENTO, Maria das Graças Borges. **O acidente com o célio 137 sob o olhar dos trabalhadores de vigilância sanitária**. Revista UFG, v. 9, n. 1, 2007.
- [3] MARTINS, Roberto Vieira. **Como Becquerel não descobriu a radioatividade**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, p. 27-45, 1990. Disponível em: [file:///C:/Users/Cliente/Downloads/administrador.+ 2 +Como+Becqu...+OK+normas.pdf](file:///C:/Users/Cliente/Downloads/administrador.+2+Como+Becqu...+OK+normas.pdf). Acesso em Dez. 2023.
- [4] XAVIER, Allan Moreira et al. **Marcos da história da radioatividade e tendências atuais**. Química Nova, v. 30, p. 83-91, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/c4djyOOXBCLfrZNfFNWB7nC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 28 fev. 2024.
- [5] SÁNCHEZ, Wladimir; PENTEADO FILHO, Azor Camargo. **Gamagrafia**. 1967. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/iea/IEA_INF_8.pdf . Acesso em 2 mar. 2024.
- [6] CARDOSO, Eliezer de Moura. **Aplicações da energia nuclear**. 2008. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/material-divulgacao-videos-imagens-publicacoes/publicacoes-1/aplicacoesdaenergianuclear.pdf>. Acesso em 22 mar. 2023.
- [7] DE SOUZA, Luana Silva; DA SILVA, Francisco Cesar Augusto. **10 Recomendações para prevenção de acidentes radiológicos em gamagrafia industrial**. Brazilian Journal of Radiation Sciences, v. 6, n. 2B, 2018.
- [8] NOUAILHETAS, YANNICK et al. **Radiações Ionizantes e a vida**. Apostilas Educativas. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/index.php/component/content/article>, 2005.
- [9] CARDOSO, ELIEZER DE MOURA et al. **Radioatividade**. Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN, 2000. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fisica-4/radio.pdf>. Acesso em 05 fev. 2024.
- [10] SANTOS, Fábio Pereira et al. **O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO**. Cadernos Macambira, v. 4, n. 1, p. 61-60, 2019.
- [11] SANCHEZ, W.; OKI, H. **Técnicas de gamagrafia aplicadas ao controle de**

qualidade de soldas em tubulações de sistemas adutores de água. 1974. Disponível em:

<<https://repositorio-api.ipen.br/server/api/core/bitstreams/40e5e408-661a-4224-bf36-10217f8c9902/content>>. Acesso em 10 mar. 2024.

[12] QUÂNTICA, Física. **Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**, R. Eisberg & R. Resnick, Editora Campus, 1979.

[13] Sears, W., Zemansky, M. W. Young, H. D., & Freedman, R. A. (2004). **Física IV–ÓTICA E FÍSICA MODERNA**. Trad. Cláudia Martins, 12.

[14] Gonzalez, M. **Algunos hitos históricos en el desarrollo del diagnóstico médico por imágenes**. Rev. Med. Clin. Condes, 2013.

[15] Dawang. "**Fundições de qualidade: 9 métodos de inspeção de fundição de uma peça de metal**." Disponível em: <<https://dawangcasting.com/pt/blog/quality-castings-9-casting-inspection-methods-of-metal-part/>> . Acesso em 6 abr. 2024.

[16] SÉRGIO R. Muniz. **Constituintes do átomo – O elétron**. Estrutura da Matéria, curso de Licenciatura em Ciências, USP, 2014.

[17] OLIVEIRA, Marcos Jhonaths. **RADIOATIVIDADE: UMA ANÁLISE DE CONHECIMENTOS DE ALUNOS NO ENSINO MÉDIO**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia da Informação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2022. Disponível em: <file:///C:/Users/Cliente/Downloads/MarcosJO_MONO.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2024.

[18] GONÇALVES, Odair Dias., IPS de ALMEIDA. "**A energia nuclear**". Ciência hoje 37.220 (2005): 36-44.

[19] Instituto de Física. **O que é Radioatividade**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/radio/capitulo1n3.htm>>. Acesso em 10 de junho 2024.

[20] YOSHIMURA, Elisabeth Mateus. "**Física das Radiações: interação da radiação com a matéria**." Revista Brasileira de Física Médica 3.1 (2009): 57-67.

[21] FERREIRA, Diane. **Tipos de Radiações Ionizantes**. Opus Medical, 2020.

[22] DE SOUZA, Erica Fernanda. **Estudo para rastreamento de irradiadores de gamagrafia industrial por meio do uso do sistema de posicionamento global (GPS)**. Monografia (Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear) Universidade Federal

do Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em:
<https://www.nuclear.ufrr.br/images/Dissertacao_Erica_Fernanda_de_Souza.pdf>. Acesso em 12 jun. 2024.

[23] ABCMed. "**Cintilografia da tireoide.**" ABCMed, 2016.

[24] Santin Filho, Ourides. "**Breve histórico dos cem anos da descoberta dos raios X: 1895-1995.**" Química Nova 18 (1995): 6.

[25] Santos, Carmem Terezinha Ribeiro dos. **Impacto dos Agrotóxicos.** Universidade Federal do Pampa, 2017.

[26] TIPLER, P. A., & MOSCA, G. *Física para Cientistas e Engenheiros.* LTC, 2009.

[27] SILVEIRA, Paula Luana; PINHAL JR, Paulo. **O Uso da Radiação na Conservação dos Alimentos.** UNILUS Ensino e Pesquisa, v. 13, n. 30, p. 241, 2016.

[28] TARCÍSIO, LIMA FILHO et al. **Energia ionizante na conservação de alimentos: revisão.** Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, v. 30, n. 2, 2012.

[29] BARDINI, Inácio Zapparoli et al. **Estudo teórico e comparativo das técnicas de gamagrafia e radiografia industrial com base na análise de eficácia aplicacional.** Disciplinarum Scientia Naturais e Tecnológicas, v. 25, n. 2, p. 67-78, 2024.

[30] BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Norma CNEN-NN-6.04 – Radioproteção e Segurança de Fontes Radioativas Seladas.** Brasília, DF, 2022. p. 12, Art. 39. Disponível em:
<<https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-6/grupo6-nrm604.pdf>>
Acesso em: 01 fev. 2025.

[31] RODRIGUES, Esequiel Biasi. **Alternativas de projeto de bunker para gamagrafia industrial objetivando a otimização da radioproteção.** 2016. Disponível em:
<https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17477/1/CT_CEEST_XXXII_2016_13.pdf>.
Acesso em: 02 fev. 2025.

[32] RELA, Paulo Roberto et al. Sealed radiation sources production in Brazil for industrial applications; **Produção de fontes seladas no Brasil para aplicações industriais.** 1996. Disponível em: <<https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/662725>>.
Acesso em: 02 fev. 2025.

[33] A DE MIN S/A. Radiografia Industrial Nível I. Disponível em:
<<https://ademinsa.com/portfolio/radiografia-industrial-nivel-i/>>. Acesso em: 8 mar. 2025.

[34] FLÔR, Rita de Cássia; GELBCKE, Francine Lima. **Tecnologias emissoras de radiação ionizante e a necessidade de educação permanente para uma prática segura da enfermagem radiológica.** Revista Brasileira de Enfermagem, v. 62, p. 766-770, 2009.

Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/reben/a/TyHzMsYzZv948dP6ZW5X7rs/?format=pdf&lang=pt>>.

Acesso em: 05 fev. 2024.

[35] HELAYËL-NETO, José Abdalla. **A física contemporânea descreve os fenômenos naturais em**. Disponível em: <<https://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/simetria.pdf>>.

Acesso em 14 Ago. 2024.