



SURFANDO NAS ONDAS DA REDE PARA DESCOBRIR OS PODERES DOS RAIOS X

Ana Paula Bim Maldonado

Produto Educacional da Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – Polo UEM, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo Garcia Fernandes

Maringá - PR
Abril de 2020

Caro Professor,

O Produto Educacional (PE) elaborado nesse trabalho é uma Sequência Didática (SD) baseada em Zabala (1998). Buscando proporcionar uma maior aproximação do aluno do Ensino Médio com o conteúdo de Física Moderna e Contemporânea e fazendo uso de tecnologias educacionais no espaço escolar por meio do Acesso Remoto, desenvolveu-se essa Sequência Didática/PE intitulado “Surfando nas ondas da rede para descobrir os poderes dos Raios X”.

Para tal, inicia-se a apresentação com um histórico de como se originou essa idéia, em que se aborda o conteúdo de ondas eletromagnéticas, especificamente as ondas de Raios X. Ao surfar pelo conteúdo proposto na SD relacionam-se o cotidiano, o conteúdo científico e a experimentação apresentando diversas possibilidades didático-metodológicas. O objetivo principal ao planejar e aplicar essa SD, é o de proporcionar uma aprendizagem significativa, ou seja, que os novos conhecimentos relacionam-se com o conhecimento prévio que o aluno possui, e que esses tenham significado. Acreditando-se também que os alunos possam sentir-se mais motivados e consigam relacionar e valorizar a importância da Física como Ciência.

A aplicação desta SD é sugerida para o terceiro ano do Ensino Médio, na componente curricular de Física, com o uso de 8 aulas de 50 minutos para aplicação integral.

Continuando a surfar nesta SD, nela estão contidas sugestões e aplicações de diversas metodologias e práticas pedagógicas, inclusive a experimentação. Para realização da experimentação há uma parceria com o Laboratório de Acesso Remoto (LARI) que possui um equipamento de Raios X (EXPERT 4.0 (PHYWE)), na Universidade Estadual de Maringá. Utiliza-se esse aparelho para capturar imagens, como por exemplo: de uma calculadora no interior da sua embalagem e da fruta Urucum (*Bixaorellana*), o ideal é escolher algo do cotidiano dos alunos, tal que sejam previamente selecionados na fase do planejamento. Tal captura é feita via acesso remoto em tempo real, por alunos e professores situados na própria escola.

Por fim, conhecido os poderes dos Raios X e chegando à “praia” das ondas da rede, finaliza-se este PE, com as avaliações. Como instrumentos avaliativos utilizam-se mapas conceituais e seminários. O mapa conceitual é usado inicialmente para avaliar o conhecimento prévio do aluno, o seminário é usado durante a aplicação do conteúdo e para finalizar utiliza-se outro mapa conceitual para comparar com o inicial

e analisar a evolução da aprendizagem, verificando assim se o objetivo foi atingido.

Espera-se que essa SD possa contribuir com o Ensino de Física, sendo útil aos professores de Física ou outros que se sintam interessados em conhecê-la e aplicá-la de acordo com sua realidade e possibilidades, podendo também ser adaptada, desde que contribua significativamente no processo ensino aprendizagem.

Este material estará disponível para download na página do MNPEF/DFI/UEM (<http://www.dfi.uem.br/dfimestrado/?q=node/60>).

A autora

Sumário

CARTA AO PROFESSOR	02
INTRODUÇÃO	05
1 Apresentação do Produto Educacional	11
1.1 Práticas Pedagógicas e Materiais Utilizados	12
1.2 Elaboração e Estrutura da Sequência Didática	13
1.3 Ficha Técnica – Sequência Didática	14
1.4 Estrutura das Aulas	16
2 Avaliações	22
2.1 Mapa Conceitual (referente as aulas 1 e 8)	22
2.2 Seminários (referente as aulas 4 e 5).....	24
3 Resultados Esperados	25
Considerações Finais	26
Referências Bibliográficas	27
APÊNDICE A – Ficha para as Aulas: 1 e 8 (Mapa Conceitual)	29
APÊNDICE B – TEXTO DE APOIO - Física dos Raios X	30

Introdução

Mesmo antes de cursar o Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), a autora sempre sentiu necessidade de promover a seus alunos experiências e situações que corroborassem com o Ensino de Física. No entanto, sempre encontrou diversas barreiras: escola pequena, pouca infraestrutura, falta de recursos tecnológicos, baixo interesse por parte dos alunos em dar continuidade aos estudos, falta de interação entre escolas e universidades e outros. Ao ingressar no MNPEF, algumas dessas barreiras foram rompidas e a vontade de realizar algo inédito na escola era enorme. Ao tomar conhecimento, por meio de seu então orientador, do aparelho de Raios X na Universidade Estadual de Maringá (UEM), com a proposta de desenvolver um trabalho envolvendo o mesmo. E, a autora sentiu necessidade de levar esse conhecimento também aos alunos da escola na qual lecionava. Para isso, começaram as pesquisas e leituras de como isso seria possível.

Tendo conhecimento de que o estudo de Raios X é abordado dentro do conteúdo de Ondas Eletromagnéticas para alunos do terceiro ano do ensino médio, porém de maneira superficial, e de que nos materiais disponíveis, raramente apresentavam um estudo mais detalhado sobre Raios X e sequer havia sugestões de atividades experimentais, a autora ficou determinada a planejar um conjunto de atividades para confirmar a importância dos Raios X desde sua descoberta até os dias atuais para a Física.

A primeira etapa consistiu em conhecer e aprender a manusear o aparelho de Raios X da UEM que já estava em uso no âmbito MNPEF, o mesmo foi usado por Oliveira (2016) para desenvolver seu produto educacional também via acesso remoto. No entanto, com enfoque bem diferente do apresentado pela autora, que afirma, após ter conhecimento, de que o aparelho ainda não havia sido utilizado para captura de imagens de objetos. Inicialmente, foram realizados vários testes obtendo as imagens de Raios X utilizando frutas, tais como: uva, pera, ameixa, pêssigo e o Urucum (pertence a espécie *Bixaorellana*) Figura 0.1; amendoim que é uma leguminosas (*Arachishypogaea*).

Figura 0.1 – Fotografia do aparelho de Raios X do tipo EXPERT 4.0 (PHYWE) contendo um objeto para análise. Neste caso o objeto é o fruto de *Bixaorellana*, conhecida comumente como Urucum ou colorau. No lado esquerdo a ampola de tungstênio (W) ligada, e indicada na parte inferior.

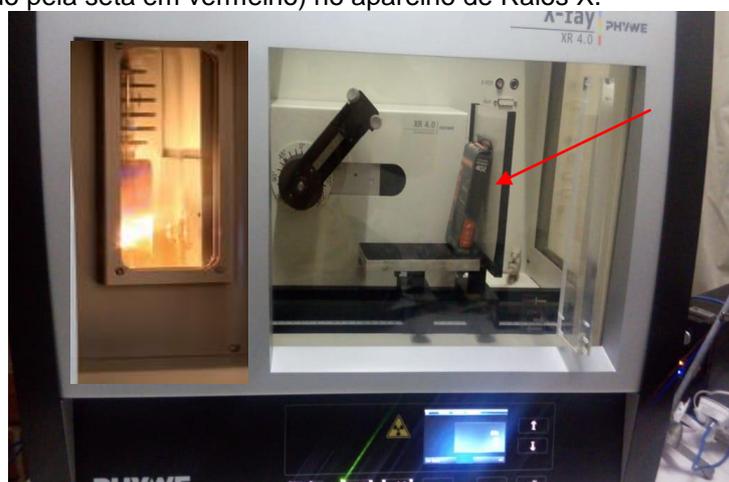


Fonte: arquivos da autora.

O Urucum (*Bixaorellana*) foi apresentado como sugestão, por fazer parte do cotidiano dos alunos na qual a autora atua como docente, região noroeste do Paraná, em que muitos trabalham na colheita ou em cooperativas deste fruto (Inajá fica a 21 Km de Paranacity a capital do Urucum).

Após os testes com elementos de conhecimento da região do público alvo, utilizou-se como amostra uma calculadora dentro da embalagem original como ilustra a Figura 0.2.

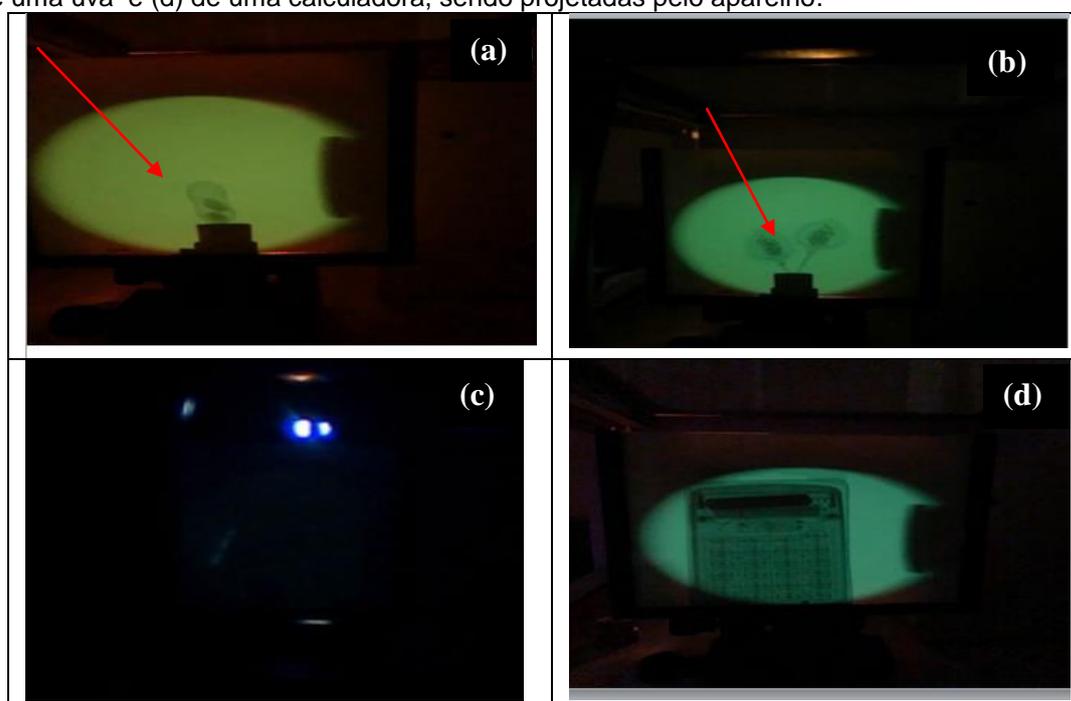
Figura 0.2 – Fotografia registrada no momento em que fora inserida uma calculadora comum dentro da embalagem (indicado pela seta em vermelho) no aparelho de Raios X.



Fonte: arquivos da autora.

Observando as imagens formadas com a aplicação dos Raios X, verificou-se que as imagens que ficaram mais nítidas, devido à absorção, foram a do amendoim (Figura 0.3(a), Urucum (Figura 0.3(b)) e calculadora (Figura 0.3(d)). A ameixa (Figura 0.3(c)) e as demais frutas não apresentaram uma imagem nítida. Assim, definimos que o Urucum e a calculadora seriam os objetos a serem utilizados na SD. Além de se obter as melhores imagens, ressaltamos que o Urucum é encontrado fartamente na região de Inajá fazendo assim, parte do cotidiano dos alunos.

Figura 0.3 – Imagem fotográfica contendo os resultados dos objetos/alimentos utilizados no aparelho de Raios X. Imagem de Raios X: (a) de um fruto de amendoim; (b) de dois frutos de Urucum (com semente); (c) de uma uva e (d) de uma calculadora, sendo projetadas pelo aparelho.

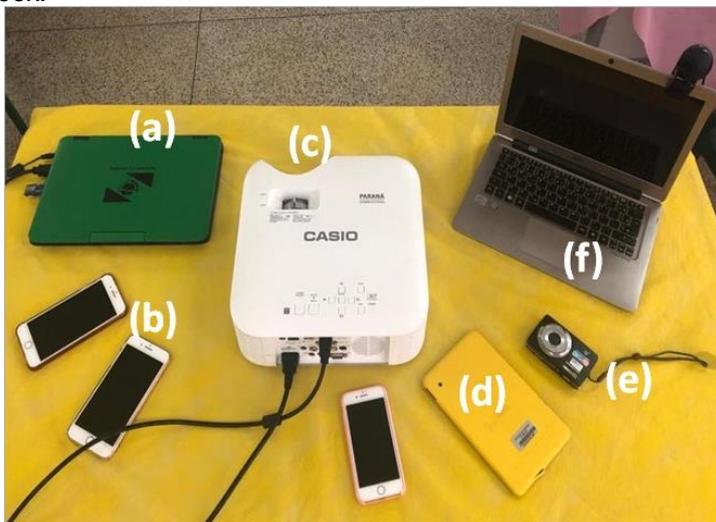


Fonte: arquivos da autora.

Por se tratar de uma escola com distância aproximada de 100 quilômetros da Universidade Estadual de Maringá (UEM) onde se encontra o equipamento de Raios X, a autora decidiu também que faria uso do acesso remoto para realização da experimentação com os alunos.

Desta forma, duas ações já estavam definidas: a experimentação com foco no equipamento de Raios X (Figura 0.1) e os chamados *mobile learning (m-learning)*. Os selecionados para este PE, são os apresentados na Figura 0.4: (a) computador portátil do tipo net-book; (b) smartphones do tipo Android® ou iOS®; (c) projetor multimídia – Datashow; (d) tablet; (e) câmera fotográfica (f) computador portátil do tipo notebook.

Figura 0.4 – Fotografia contendo imagens de materiais de fácil acesso (tanto para os alunos e professores, como para a escola). Sendo: (a) computador portátil do tipo *net-book*; (b) *smartphones* do tipo Android® ou iOS®; (c) projetor multimídia – *Datashow*; (d) *tablet*; (e) câmera fotográfica (f) computador portátil do tipo *notebook*.



Fonte: arquivos da autora.

Reforçando o uso de tecnologias no espaço escolar (acesso remoto). Para isso foram elencados programas (*softwares*) e aplicativos gratuitos, no qual são necessários realizar o *download* e instalação nos computadores, antes da utilização do acesso remoto. São eles:

- *Team Viewer 11*, um programa livre e gratuito que permite o acesso remoto, que deve ser instalado no computador da escola e no laboratório da UEM;
- *Measure*, um programa que controla o equipamento de Raios X (*EXPERT 4.0 - PHYWE*). Esse vem em um *CD* juntamente com o manual do aparelho, deve ser instalado no computador do laboratório a ser acessado;
- *Mydlink*, um aplicativo oficial da D-Link que controla nuvens pessoais com roteadores e câmeras, é um aplicativo de fácil *download*, no qual possibilita a visualização de câmeras ao vivo via nuvem usando conexão *Wi-Fi* ou 3G.

Após a escolha dos programas, materiais e aplicativos necessários para o acesso remoto e a experimentação, foi dado continuidade aos estudos teóricos, planejando assim um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas, buscando alcançar o objetivo educacional.

Assim, o presente Produto Educacional contempla um conjunto de atividades ordenadas, abordando o tema Ondas Eletromagnéticas com ênfase em Raios X. Este conteúdo encontra-se presente nas Diretrizes Curriculares do Estado do Paraná (Paraná/SEED/DEB, 2008), na componente curricular Física, no conteúdo estruturante

eletromagnetismo. O mesmo também está presente na Proposta Pedagógica Curricular de Física da Instituição a ser aplicada.

Na elaboração deste trabalho, buscou-se relacionar as atividades com as reais necessidades dos educandos, levando em considerações as concepções prévias dos alunos e as condições para aprendizagem significativa de acordo com a teoria da aprendizagem significativa (TAS) de Ausubel (Ausubel, Novak e Hanesian, 1980). Eles informam, que:

“Se eu tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um único princípio, diria isto: o fato isolado mais importante que informação na aprendizagem é aquilo que o aprendiz já conhece. Descubra o que ele sabe e baseie isso nos seus ensinamentos” (AUSUBEL et al, 1980, p.137).

Após abordar a teoria de aprendizagem, buscou-se adotar metodologias capazes de contribuir na efetivação desta aprendizagem, acreditando que o aluno deva participar ativamente de seu aprendizado, para isso baseamos no Construtivismo onde o professor é entendido como um mediador e motivador das intenções entre os alunos e entre eles e o meio. No construtivismo o professor busca criar situações que possam estimular a construção do aprendizado, contribuindo assim para que o aluno possa aprender a aprender. Portanto, a teoria de Ausubel é compatível com a Teoria de Lev Semionovitch Vygotsky (1896-1934) - sócio interacionista (Construtivismo) e a de Jean Piaget (1896-1980) sobre o desenvolvimento cognitivo (“aprender a aprender”), (Ghedin, 2012).

D. Ausubel, considera que o aluno é o principal agente construtor de sua aprendizagem. A teoria propõe que os conhecimentos prévios dos alunos sejam valorizados, para que possam construir estruturas mentais utilizando, como meio, mapas conceituais que permitem descobrir e redescobrir outros conhecimentos, caracterizando, assim, uma aprendizagem prazerosa e eficaz.

De acordo com a TAS, leva-se em consideração que quando o aluno chega à escola para estudar Física, o mesmo já possui concepções empíricas sobre os fenômenos Físicos que acontecem a sua volta, essas concepções também podem ser consideradas como conhecimentos prévios (denominados por Ausubel de subsunçores). Cabe aos educadores motivar e buscar maneiras para que as duas condições necessárias (disposição e o conteúdo ser significativo) aconteçam e a aprendizagem ocorra. Não esquecendo que para uma prática pedagógica eficaz, se faz necessário um embasamento teórico.

Em relação às avaliações estas são diagnósticas, ou seja, utilizam-se instrumentos

que facilitem a verificação de aprendizagem. Aplicam-se mapas conceituais iniciais para analisar os conhecimentos prévios e mapas conceituais no término da SD para verificar a evolução do processo ensino aprendizagem.

A sugestão de aplicação do presente PE é para estudantes da Terceira Série do Ensino Médio, na qual se realiza um estudo mais detalhado sobre ondas eletromagnéticas em especial os Raios X. O material apresenta diversas atividades, contemplando as mais possíveis formas de aprendizagem, são elas: Raios X de objetos presentes no cotidiano, debates, seminários, mapas conceituais, uso de tecnologias no espaço escolar, sendo o professor interlocutor e mediador das atividades propostas, favorecendo assim a aprendizagem significativa e buscando evidenciar o aluno como sujeito ativo e protagonista.

Esclarecendo que o Eletromagnetismo é um tema presente no ensino da escola básica, no entanto ao abordarem os conceitos de ondas eletromagnéticas não enfatizam a importância e presença dos Raios X, nem se quer com uso de experimentação. Além disso, ressalta-se que muitas vezes os conceitos são abordados superficialmente, apenas com o uso do livro didático público, na qual o aluno é apenas o receptor. Identificando essa necessidade, é proposto um estudo mais detalhado dos Raios X com realização de uma atividade experimental, fazendo uso de tecnologias e promovendo uma aproximação da escola pública com a Universidade.

Os conteúdos abordados neste PE seguem um cronograma, partindo do conceito mais amplo de ondas, ondas eletromagnéticas chegando até o específico de Raios X. Os conceitos Físicos essenciais para aplicação desta SD são: Contextualização do surgimento da Física Moderna e Contemporânea à partir do final do século XIX; Ondas eletromagnéticas; Espectro Eletromagnético; Produção e aplicação de Raios X na tecnologia; Noções de Física Nuclear, acelerador de partículas – Luz Síncrotron. Para auxiliar a quem foi aplicar, este conteúdo está apresentado como um texto de apoio no Apêndice B.

E este é o trabalho que vos aguarda, para aplicar, e esperamos um resultado tão satisfatório quanto tivemos. Ressaltamos que este texto contém partes descritas exatamente iguais a da dissertação de mestrado (Maldonado, 2020) que gerou o presente trabalho. Mas, não exatamente na mesma ordem.

1 – Apresentação do Produto Educacional

Buscando proporcionar uma maior aproximação do aluno do Ensino Médio com o conteúdo de Física Moderna e Contemporânea e fazendo uso de tecnologias educacionais no espaço escolar por meio do Acesso Remoto desenvolveu-se uma Sequência Didática.

O conteúdo abordado é o de ondas eletromagnéticas, especificamente as ondas de Raios X. Esse conteúdo ao ser abordado na componente curricular de Física no Ensino Médio, muitas vezes é bem superficial, sem atividades experimentais e em forma apenas de textos, normalmente a do livro-texto adotado pela instituição.

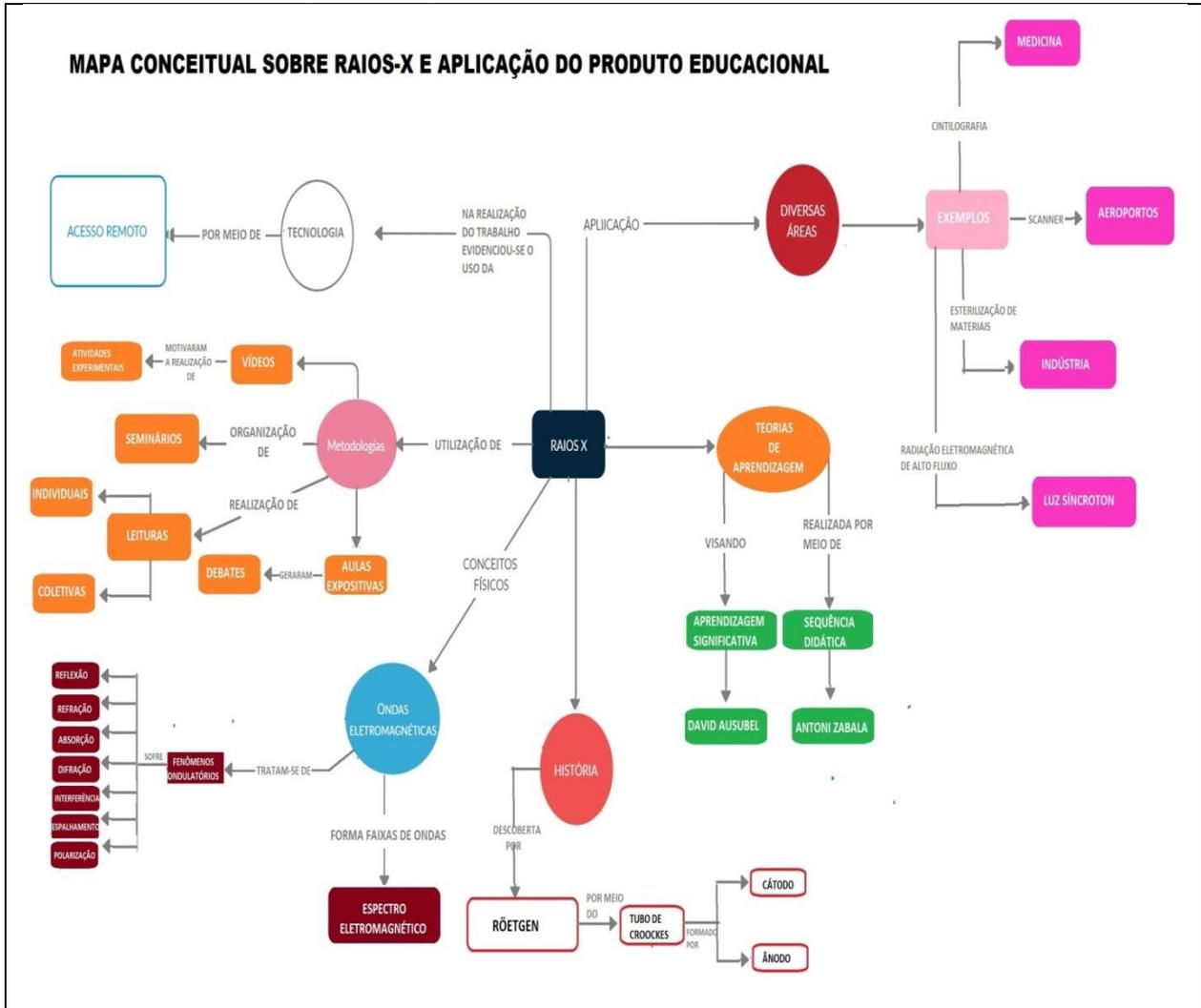
O objetivo principal ao planejar e aplicar essa SD, é o de proporcionar uma aprendizagem significativa, ou seja, que os novos conhecimentos relacionem-se com o conhecimento prévio (subsunçores) que o aluno possui, e que esses tenham significados, seguindo a teoria de aprendizagem significativa (TAS) de David Ausubel (Moreira e Masini, 2006). Acreditando-se também que os alunos possam sentir-se mais motivados e consigam relacionar e valorizar a importância da Física como Ciência, pois foi estruturado considerando o cotidiano, o conteúdo científico e a experimentação apresentando diversas possibilidades didático-metodológicas.

O público alvo para aplicação desta SD é sugerida o terceiro ano do Ensino Médio, na componente curricular Física, com o uso de 8 aulas de 50 minutos cada para aplicação integral.

Para realização da experimentação há uma parceria com o Laboratório de Acesso Remoto que possui um equipamento de Raios X (EXPERT 4.0 - PHYWE), na Universidade Estadual de Maringá. Utilizou-se esse aparelho de Raios X para capturar imagens de uma calculadora no interior da sua embalagem e da fruta Urucum na forma original (dentro da casca) que foram previamente selecionados na fase do planejamento. Tal captura é feita via acesso remoto em tempo real, por alunos e professores situados na própria escola. É necessário um auxílio técnico para ter quem coloque a amostra no aparelho, apague a luz externa (a da sala) e organize o laboratório.

Destacando que a autora ao iniciar a escrita do Produto Educacional, elaborou o seu mapa conceitual, esse que serviu como um norteador de todo o trabalho proposto conforme Figura 1.1.

Figura 1.1 – Imagem do Mapa conceitual elaborada pela autora no início da elaboração do Produto Educacional. Para visualizar de um zoom.



Fonte: a autora

Como instrumentos avaliativos utilizaram-se mapas conceituais e seminários. O mapa conceitual é usado inicialmente para avaliar o conhecimento prévio do aluno, o seminário é usado durante a aplicação do conteúdo e para finalizar utiliza-se outro mapa conceitual para comparar com o inicial e analisar a evolução da aprendizagem, verificando assim se objetivo foi atingido.

1.1 Práticas Pedagógicas e Materiais Utilizados

Contempla-se nesta Sequência Didática as seguintes práticas pedagógicas:

- a) O uso de Mapas Conceituais;

- b) A pesquisa e o trabalho como princípios educativos;
- c) Uso de tecnologias educacionais – “*Mobile learning (Carvalho, 2016)*” e o Acesso Remoto;
- d) Experimentação.

Para a aplicação desta SD são necessários os seguintes materiais, equipamentos, programas e aplicativos:

- Papel sulfite para elaboração dos Mapas Conceituais;
- Livros diversos para pesquisa bibliográfica;
- Projetor multimídia para apresentações dos seminários e vídeos;
- Computadores com acesso à *internet*;
- Objetos diversos (Urucum e calculadora) para realização de Raios X
- Equipamento de Raios X (*EXPERT 4.0 - PHYWE*) – Disponível no Bloco G68 sala 14 – DFI – UEM;
- Programas Computacionais (*softwares*): *Team Viewer 11*; *Windows 10* ou *Linux*; e *Mydlink*.

1.1 Elaboração e Estrutura da SD

Na elaboração desta Proposta Didática, baseada na SD segundo Zabala, como Produto Educacional, buscou-se relacionar as atividades com as reais necessidades dos educandos, levando em consideração as concepções prévias dos alunos e as condições para aprendizagem significativa, pois segundo Zabala, (1998):

“para compreender o valor educacional de uma sequência didática e as razões que a justificam, é necessário identificar suas fases, as atividades que a conformam e as relações que se estabelecem. A partir daí, pode-se introduzir mudanças ou atividades novas que a melhorem, tendo em vista atender às reais necessidades dos educandos.”(ZABALA,1998, p.54).

O conteúdo de Ondas Eletromagnéticas com ênfase em Raios X encontra-se nas Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais de Física (Brasil, 2000; 2002), contemplado no item III - Ciência e Tecnologia na Atualidade e no Tema Estruturador 4 (Som, Imagem e Informação).

As atividades presentes na SD são ordenadas de maneira a aprofundar o tema que está sendo estudado. As metodologias são: leituras, aulas dialogadas, seminários, uso de tecnologias educacionais, mapas conceituais, vídeos e experimentos com acesso remoto. Desta forma, cabe ao professor ser o interlocutor e mediador das atividades propostas. Para facilitar, detalhar e deixar mais claro a organização desta SD apresenta-se uma “ficha técnica” e, posteriormente, a estrutura das aulas.

1.3 Ficha Técnica – Sequência Didática

Apresentamos, nesta seção, o Quadro 1.1. Nele, podemos observar a sugestão da estrutura das aulas a serem desenvolvidas, bem como, dados relacionados a estas aplicações.

Quadro 1.1 – Ficha Técnica da Sequência didática.

TEMA: Ondas eletromagnéticas com ênfase em Raios X
TIPO: <i>Investigação Científica e Aprendizagem significativa</i>
PÚBLICO ALVO: <i>Alunos do Terceiro ano do Ensino Médio</i>
DURAÇÃO: <i>08 aulas¹.</i>
CONTEÚDOS: <ul style="list-style-type: none"> - Contextualização do surgimento da Física Moderna e Contemporânea a partir do final do século XIX; - Ondas eletromagnéticas; -Espectro Eletromagnético; -Produção e aplicação de Raios X na tecnologia; - Noções de Física Nuclear - Acelerador de partículas – Luz Síncrotron.
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none"> - Compreender e relacionar a importância, a presença e a evolução da Física para a humanidade; - Analisar e diferenciar os tipos de ondas eletromagnéticas; - Entender o espectro eletromagnético; - Reconhecer a importância da descoberta dos Raios X, bem como diferenciar fontes naturais de fontes artificiais que emitem os Raios X; - Identificar as diferentes áreas de aplicação dos Raios X com a evolução tecnológica;

¹ Considerar que cada hora-aula contenha 50 minutos de duração.

- Compreender a importância dos Raios X nos dias atuais destacando a descoberta da Luz Síncrotron.

METODOLOGIAS:

- Mapas Conceituais;
- Pesquisas bibliográficas;
- Textos;
- Vídeos;
- Uso do Acesso Remoto – Laboratório UEM- LARI

RECURSOS DIDÁTICOS E TECNOLÓGICOS:

- Livros didáticos e paradidáticos;
- Laboratório de informática;
- *Notebook* e retroprojeter (“*Mobile learning*”)
- Cópias reprográficas (“Xerox”) e impressão de materiais;
- Lousa e pincel

AVALIAÇÃO:

- Elaboração de mapas conceituais e comparação entre mapa conceitual inicial com o final, fazendo uso da teoria da aprendizagem significativa de D. Ausubel. Avaliação diagnóstica, sendo o mapa inicial para identificar os conhecimentos prévios dos alunos e o mapa conceitual final para verificar se houve avanços no processo ensino-aprendizagem.

-Apresentação de seminários, com os seguintes critérios de avaliação:

- Postura do aluno;
- Conteúdo da pesquisa;
- Domínio do conteúdo pesquisado;
- Criatividade;
- Organização da ideias principais.

Referências Bibliográficas recomendadas:

1. BRASIL. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais Mais: Ensino Médio – Brasília: Ministério da Educação, 2000 e 2002.
2. BURKARTER, E. et al. Livro Didático Público – FÍSICA – 2ª. Edição. SEED-PR, Curitiba: 2007. Cap. 12 pág. 195
3. CHIBENI, Silvio Seno **AS ORIGENS DA CIÊNCIA MODERNA** Disponível em:<www.unicamp.br/~chibeni/textosdidaticos/cienciaorigens.pdf>Acesso em 10 de Maio de 2018.
4. GASPAR, A. – Compreendendo a Física Eletromagnetismo e Física Moderna – Volume 3. Editora Ática, 2ª. Edição; São Paulo: 2014.
5. GOULART, Cláudia. As práticas orais na escola: o seminário como objeto de ensino. Campinas, 2005. 228p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Estudos da Linguagem,

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

6. HALLIDAY, D., RESNICK, R. - Fundamentos de Física. Vol. 4: Ótica e Física Moderna. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991.
7. LABORATORIO NACIONAL DE LUZ SINCROTRON (LNLS). Disponível em <<https://www.lnls.cnpem.br/>> acesso em 20 de Maio de 2018.
8. LIMA, Rodrigo Silva. AFONSO, Júlio C. Raios-x: fascinação, medo e ciência. Revista Química. Nova, Vol. 32, No. 1, 263-270, 2009.
9. SILVA, C. X.; FILHO, B.B.; Física aula por aula: eletromagnetismo, ondulatória, física moderna - Vol. 3 .1ª. Edição, FTD, São Paulo: 2010.

Fonte: adaptado de Nitsche, 2019.

1.4 Estrutura das Aulas

Apresenta-se, nesta seção, o Quadro 1.2. que consta de uma sugestão para a estrutura e conteúdo das aulas a serem desenvolvidas, bem como, dados relacionados a estas aplicações.

Quadro 1.2 – Estrutura e conteúdo das aulas a ser desenvolvidas.

Identificação
Instituição: Turma: Nº de Alunos: Professor (a): Trimestre:
AULA 1
Diálogo para apresentação do trabalho a ser realizado (SD), informações com relação à autorização e aplicação. ➤ Atividade 1 - Investigando o conhecimento prévio do aluno. Entrega de uma folha com a palavra Raios X, solicitando aos alunos que reflitam, busquem relacionar outras palavras ao tema e escreva-as na folha. Elaborando assim um mapa conceitual. Os mesmos já tinham conhecimento de mapas conceituais. Os conceitos ou palavras que forem apresentadas nos mapas conceituais deverão ser analisadas e poderão servir de âncora para a nova aprendizagem - Modelo no Apêndice A.

AULA 2

Organização e sorteio dos temas dos seminários

- Os temas foram estabelecidos, no entanto o aluno pode ser visto como agente construtor, pois têm a liberdade de escolher quais materiais pretende usar, de que forma, quais recursos, com qual linguagem irá conseguir se identificar e como irá abordar o tema.
- Divisão dos alunos em grupos (de no máximo 5 alunos), com sorteio e orientações aos grupos sobre os temas para pesquisa e posterior (aulas 4 e 5) apresentação em forma de seminários. Quando se tratar de uma turma numerosa provavelmente será necessário os 50 minutos da aula para organizar e orientar os grupos sobre os seminários. Os temas foram estabelecidos para ter um sequência, no entanto, cada grupo ficará livre para usar as ferramentas e metodologias que julguem necessárias.

TEMAS:

1. O que são ondas e como podem ser classificadas;
2. Ondas eletromagnéticas, espectro eletromagnético com ênfase em Raios X;
3. Como surgiram os Raios X, uma visão histórica;
4. Produção de Raios X, propriedades e difração;
5. Detecção de Raios X e aplicações na saúde e na alimentação;
6. Aplicação dos Raios X na indústria, segurança e investigação científica (novas descobertas).

Sobre essas questões há no Apêndice B, um texto de apoio sobre esse conteúdo.

AULA 3

➤ **Atividade 2** - Leitura coletiva de um texto científico para compreender a origem da Física Moderna. Acreditando ser fundamental para o aluno a familiarização de textos mais complexos, visto que estão próximos de tornarem-se universitários.

➤ Título do texto - As Origens da Ciência Moderna - Chibeni (2018).

Aula Expositiva com debates sobre a Física Moderna e Contemporânea.

AULAS 4 e 5

➤ **Atividade 3** - Apresentação dos seminários dos grupos distribuídos e organizados na aula 2, com duração média de 15-20 minutos cada.

AULA 6

Nessa aula sugere-se que os alunos trabalhem de forma individual com a leitura e síntese de um texto sobre Raios X com o título: Raios X- Fascinação, Medo e Ciência. Pretende-se assim, agregar novos significados ao subsunçor, de acordo com a teoria de Ausubel.

➤ **Atividade 4** – leitura e elaboração de uma síntese sobre o texto.

Título: Raios x: fascinação, medo e ciência. (Lima, 2009).

AULA 7

- Sugere-se que o professor faça uma abordagem sobre Acesso Remoto e apresente o equipamento de Raios X do Laboratório de Acesso remoto da UEM.

➤ **Atividade 5** - Atividade Experimental – Manipulação do equipamento de Raios X por acesso remoto em tempo real, com realizações de experimentos utilizando objetos presentes no cotidiano.

ROTEIRO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

Este é o roteiro experimental para que se possa acessar remotamente o equipamento de Raios X, do laboratório LARI/DFI/UEM. O modelo disponível é o EXPERT 4.0 da PHYWE. Lembrando que para seu uso, deve-se agendar antecipadamente.

Materiais, equipamentos e programas necessários

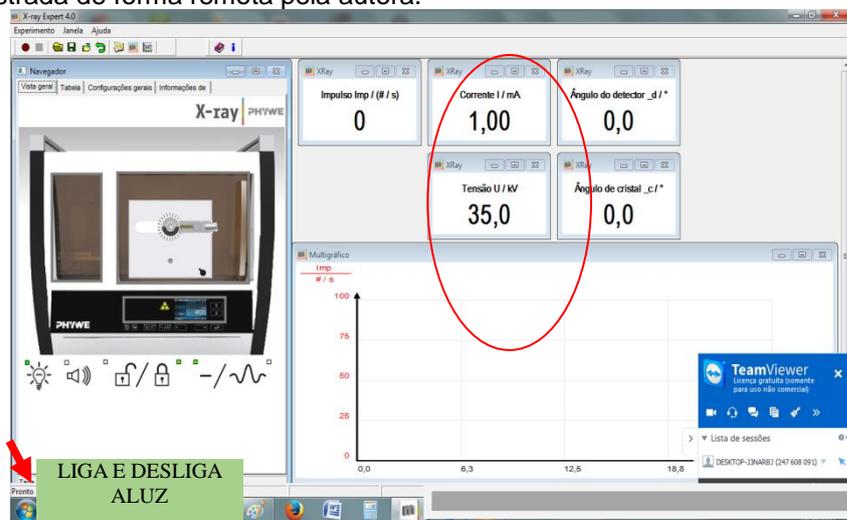
- Computadores, Celulares e Retroprojetores (*Mobile learning*);
- Laboratório LARI –UEM agendamento do equipamento X-RAY – Modelo: EXPERT 4.0, Marca - PHYWE;
- Rede WiFi;
- Objetos diversos. Exemplos: calculadora na embalagem original ou no interior de uma caixa, fruto do Urucum, ou outros que tiverem interesse. Escolher materiais cujo invólucro seja fino (espessuras além de 2 mm);
- Programa *software Team Viewer 11* instalado no computador da escola ou o que for utilizar na sala de aula.
- Programa *software Mydlink* instalado no computador da escola (ou o que for utilizar na sala de aula) para ter acesso às imagens do LARI.

Procedimento Experimental

- Primeiramente fazer o *download* dos *softwares* Team Viewer e Mydlink no computador a ser utilizado na escola.

- Entrar em contato com o laboratório no qual se encontra o equipamento de Raios X - EXPERT 4.0 (PHYWE), o contato pode ser via site: www.dfi.life.uem.br (ou via programa: *Team Viewer 11*) ou fone 44-30114295 Bloco G68 sala 14 DFI/UEM, ou se direcionar à secretaria do DFI/UEM (3011 43 30).
- Agendar um horário disponível com o professor responsável para testar o aparelho de Raios X via acesso remoto.
- As câmeras serão acessadas via *mydlink* à partir do usuário e senha fornecido pelo responsável do LARI.
- Acessando o *TeamViewer 11* como sendo o acesso remoto. Em seguida o *Measure* (que está instalado no computador que será acessado de forma remota, este vem junto com o equipamento em um cd) para controlar o equipamento de Raios X - EXPERT 4.0 (PHYWE). Inicie o programa "Measure" com o equipamento de Raios X ligado. Verifique a partir das imagens (câmeras) se a luz do aparelho está acesa.
- Com o *Team Viewer 11* testar as funções do equipamento Raios X, como ligar e desligar a luz por meio do programa *Measure*, exemplo na Figura 1.2. A tensão (35,0 kV) e a corrente (1,00 mA) não serão alteradas, permanecerão fixos.

Figura 1.2 – Imagem (*Printscreen*) da tela de comando do programa *Measure* - controle do equipamento, registrada de forma remota pela autora.



Fonte: arquivos da autora.

- Verificado o funcionamento do equipamento, dar o comando, por meio de um aviso/sinal enviado por meio da *webcam*, *WhatsApp web* ou ligação de vídeo, ao responsável, que estará no local presencial onde está o aparelho, para que o mesmo coloque a amostra dentro do equipamento. Após a amostra ser posicionada dentro do equipamento e a “porta” fechada pelo responsável, e visualizar por meio da câmera, então clicar de forma remota no desenho do cadeado fechado, indicado na Figura 1.3 para trava a porta do equipamento, pois o mesmo não funciona se a porta não estiver travada, por motivos de segurança.

Figura 1.3 – Imagem (*Printscreen*) da tela de comando do programa *Measure* - Indicação da tecla para travar o equipamento, registrada de forma remota pela autora.



Fonte: a autora.

- Em seguida iniciar as medidas clicando na imagem de onda conforme indicado Figura 1.4. Para visualizar a imagem dos Raios X é necessário apagar a luz do laboratório (solicitar ao responsável). Ao pressionar a tecla INICIAR MEDIDAS são obtidas as imagens de Raios X dos objetos selecionados, essa é observada por meio das câmeras via *Mydlink*. Após, clicar em parar medidas.

Figura 1.4- Imagem da tela (*printscreen*) acessada de forma remota para mostrar a tecla para iniciar e parar as medidas de Raios X via *Measure*.



Fonte: arquivos da autora.

Para posterior discussão é recomendado fotografar as imagens obtidas de Raios X, conforme exemplo da Figura 1.5, em que se registrou a imagem da calculadora na sua embalagem original.

Figura 1.5 - Imagem fotográfica de Raios X(a) de uma calculadora dentro da embalagem original e (b) de dois urucuns – uma imagem do fruto do Urucum aberto está apresentado na foto na parte superior da imagem (b).



Fonte: arquivos da autora.

Após finalizar os registros de imagens, avisar ao responsável no laboratório que a atividade está encerrada, para que ele organize o local, desligando todo o equipamento, retirando e guardando as amostras. Bem, como possa ser liberado, pois todos são voluntários.

➤ **Atividade 6** - Após a experimentação, realizar uma discussão sobre os resultados obtidos e da experiência realizada.

AULA 8

➤ **Atividade 7** - Vídeo abordando a evolução da Física junto à tecnologia.

Título: SÍNCROTRON – APLICAÇÕES NA CIÊNCIA. (LNLS, 2018).

Debate sobre o vídeo. Após, sugestão de acesso e leitura ao *site* do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. (LNLS, 2018).

Na última sessão do Apêndice B, há um texto sobre esse item. E acrescido de um texto sobre o SIRIUS, caso haja tempo de abordagem, fica como sugestão.

➤ **Atividade 8 - Análise Final** - Entrega de uma folha com a palavra Raios X e elaboração de um novo mapa conceitual para análise e verificação da aprendizagem significativa (avaliação). No capítulo 3 está uma abordagem mais detalhada sobre a questão das avaliações.

Fonte: a autora

2 - Avaliações

Para avaliar é necessário recorrer a diversos instrumentos. De acordo com as Diretrizes Curriculares do Estado do Paraná de Física, a avaliação oferece subsídios para que tanto o aluno quanto o professor acompanhem o processo de ensino-aprendizagem.

Com os instrumentos propostos nesta SD, pretende-se que o aluno possa ampliar, resignificar ou aprimorar seus conceitos relacionados aos Raios X, como aplicação, presença no cotidiano e sua relação com a Física Moderna.

Sabemos que segundo Ausubel, a aprendizagem não ocorre no momento em que avaliamos, para alguns pode levar um maior tempo ou até mesmo nem ocorrer pois depende de fatores cognitivos, afetivos e sociais.

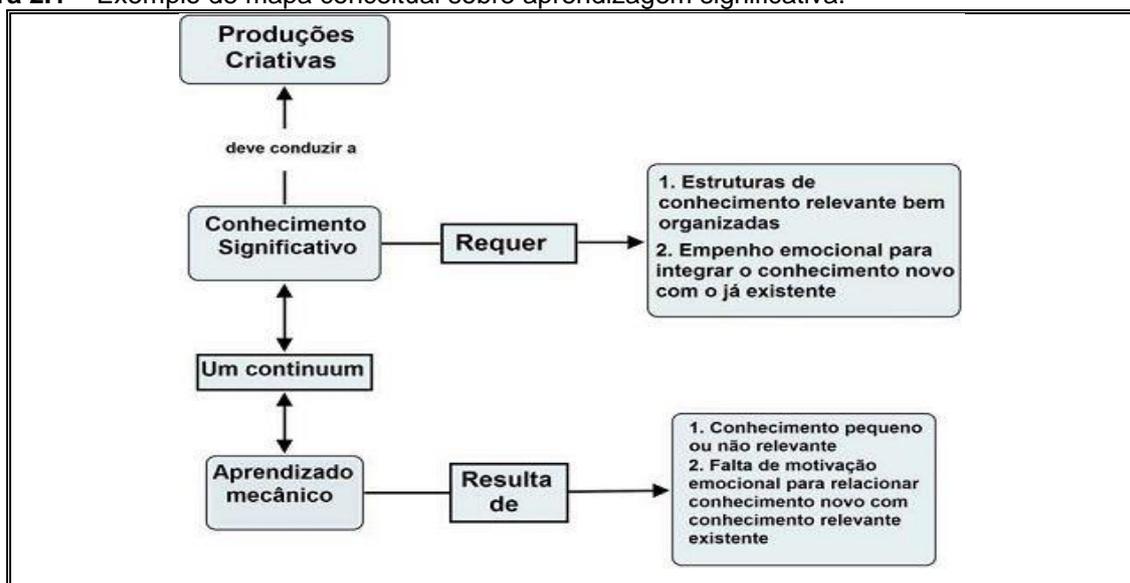
[...] é essencial levar - se em consideração as complexidades provenientes da situação de classe de aula, estes por sua vez, incluem a presença de muitos alunos de motivação, prontidão e aptidões desiguais; as dificuldades de comunicação entre professor e aluno; as características particulares de cada disciplina que esta sendo ensinada; e as características das idades dos alunos (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980, p. 5).

A avaliação é contínua e diagnóstica, no entanto ocorre com maior ênfase em três momentos: Na aula 1, com a elaboração do mapa conceitual individual para identificar os possíveis subsunçores ou as ideias principais dos alunos sobre o tema. Na aula 4 e 5, com a apresentação dos seminários e na aula 8, com a elaboração do mapa conceitual final, para verificar se ocorreu evolução por parte do aluno com relação a aprendizagem. Justificam-se a seguir, as escolhas e os critérios adotados para cada uma delas.

2.1 Mapa Conceitual (referente as aulas 1 e 8)

Na Figura 2.1, apresenta-se um mapa conceitual sobre aprendizagem significativa elaborado por Novak e Cañas (2010) apud da Silva, A. L. Silva (201?). Neste é possível observar os conceitos distribuídos e relacionados entre si.

Figura 2.1 – Exemplo de mapa conceitual sobre aprendizagem significativa.



Fonte: Novak e Cañas (2010) apud da Silva, A. L. Silva (201?). Disponível em: <<http://www.infoescola.com/pedagogia/mapas-conceituais-no-processo-de-ensino-aprendizagem-aspectos-praticos/>>

De acordo com (Novak e Cañas, 2008) os mapas conceituais podem servir como recurso didático, instrumento de avaliação e ferramenta de intervenção.

- Recurso didático: o mapa conceitual facilita a aprendizagem, por meio de diagramas que são elaborados a partir de um conceito.
- Ferramenta de intervenção: professores e alunos podem utilizá-lo na organização ou planejamento de estudo.
- Instrumento de avaliação: favorece a compreensão e conexão de conceitos por meio da cognição do indivíduo (Moreira, 1999).

Aplica-se o Mapa Conceitual com o objetivo de diagnosticar o conhecimento prévio que o aluno traz sobre o tema e também como avaliação.

Em relação a seu uso na Aula 8, o mapa conceitual é usado como um instrumento avaliativo de comparação e verificação, visto que, compara-se com o mapa inicial no qual o aluno apresenta apenas os conhecimentos prévios e em seguida verifica se ocorreu uma aprendizagem significativa, se existe novas informações que se relacionam com as anteriores ou complementam as mesmas.

Lembrando que não existe mapa conceitual certo ou errado, o que se pode avaliar é o contexto, a relação dos conceitos com o tema proposto e a ligação entre eles.

Nesta SD, a avaliação final é realizada com o uso do mapa conceitual, é um

diagnóstico tanto da aprendizagem do aluno, como da prática pedagógica do professor.

2.2 Seminários (referente as Aulas 4 e 5)

O seminário consiste de uma apresentação oral de determinado tema, e perguntas durante ou no final para esclarecer o assunto abordado. Geralmente quando aplicado em sala de aula, devido ao número de alunos, propõem-se como um trabalho a ser realizado em grupos.

O seminário possibilita um processo sistemático e aprofundado de leitura, análise, interpretação de textos e dados, a fim de se formular um problema de pesquisa, uma hipótese e se conduzir uma investigação.

O uso do seminário como avaliação, permite ao professor ter autonomia para decidir os critérios de avaliação e a forma como o seminário vai ser conduzido.

Campos (2018), afirma que na aplicação do seminário estimula-se o desenvolvimento de outras três técnicas de ensino: a exposição, o debate e o ensino com pesquisa. É visto como um instrumento muito complexo, pois requer diversas ações por parte do aluno para uma boa apresentação.

Para avaliar a apresentação do seminário, adotou-se os seguintes critérios: postura do aluno; conteúdo da pesquisa; domínio do conteúdo pesquisado e a criatividade.

3. Resultados Esperados

Nas diversas atividades realizadas, espera-se que os alunos possam ter uma visão positiva da Física como Ciência. Que consigam, de acordo com os objetivos propostos nas aulas, identificar a importância e a presença das ondas eletromagnéticas no cotidiano e em especial que compreendam a importância da descoberta dos Raios X e suas crescentes aplicações desde o período de Röntgen até os dias atuais com a sua atuação como uma Luz Síncrotron. É importante perceber que assim como possui uma evolução na sua aplicabilidade, foi se aprendendo também os riscos que essa radiação pode causar caso não seja utilizada com os devidos cuidados.

Com relação ao próprio aluno, acredita-se contribuir para a construção do sujeito autônomo, que seja capaz de utilizar as ferramentas que a tecnologia permite acesso a favor do conhecimento. Por exemplo, elaborar atividades ou abordar temas que instiguem a curiosidade dos próprios colegas, em apresentação de seminários, criar vídeos, elaborar experimentos, criar *charges* e tirinhas sobre os temas abordados, ou seja, buscar com que o aluno tenha interesse, autoestima e deixe de ser um coadjuvante para tornar-se protagonista na sala de aula. Destacando sempre a importância do professor como mediador.

Acredita-se que o uso das metodologias propostas contribua na aprendizagem dos diversos alunos, pois sabemos que não há um único caminho, a “sala de aula” é heterogênea, e cabe a cada aluno encontrar a melhor forma de conseguir construir ou reconstruir seu conhecimento. Espera-se que esse conhecimento possa ser significativo e contribua na compreensão do mundo, que possam ter noções de como ocorre os Raios X, que identifiquem a diferença e nitidez das imagens obtidas por Raios X, de acordo com os tipos de materiais que compõem o objeto. Que reconheçam a importância e contribuição dos Raios X no meio científico e no cotidiano, também entendam que a Física é uma ciência que busca descrever, prever, compreender e explicar fenômenos que acontecem com a matéria no decorrer do tempo e espaço.

Considerações Finais

Este PE busca contribuir com o Ensino de Física em especial a FMC no estudo dos Raios X e com a prática pedagógica, este trabalho teve como objetivo a elaboração e aplicação de uma sequência didática, baseando-se na SD proposta por Zabala (2008).

Além disso, o conteúdo de Ondas Eletromagnéticas com ênfase em Raios X está contemplado nas DCNS.

Na SD, é abordada o uso de diversas metodologias e uma atividade experimental com o uso de equipamento de Raios X (PHYWE), baseado na Teoria de Aprendizagem atribuída a Ausubel, e a Aprendizagem Significativa de David Ausubel, (Moreira e Masini, 2006) valorizando os conhecimentos prévios dos estudantes. Neste caso, o tema inicial foi Raios X.

Esta proposta contempla uma relação entre Ciência, (o conteúdo), Tecnologia (uso do acesso remoto) e Sociedade (implicações dos Raios X no cotidiano) e o uso de metodologias diferenciadas, a fim de proporcionar ao aluno maior motivação, participação, contribuindo assim para efetivação de uma aprendizagem significativa.

A escolha dos objetos na atividade experimental fica a critério de cada docente. O Urucum (Bixaorellana) foi apresentado como sugestão, por fazer parte do cotidiano dos alunos na qual a autora atua como docente, região noroeste do Paraná, em que muitos trabalham na colheita ou em cooperativas deste fruto (Inajá fica a 21 Km de Paranacity a capital do Urucum). E no âmbito escolar a amostra escolhida foi uma calculadora dentro da embalagem original. (Figuras 1.5 (a) e (b)). No entanto, é possível e recomendado aplicar a sequência e realizar a experimentação com inúmeros materiais, de acordo com a realidade dos educandos.

Também destacamos que a fundamentação teórica citada é um exemplo de como a autora elaborou o trabalho e assim aplicou, é possível que cada professor possa elencar e dar ênfase aos conceitos de acordo com sua vivência e realidade.

Foi obtido grande êxito quando a autora aplicou a SD, os alunos foram participativos, os temas abordados significativos, a comunidade escolar apoiou o trabalho e o objetivo foi alcançado. Acreditando poder colaborar com a prática docente, buscando despertar e instigar professores a fazerem uso das tecnologias educacionais, em especial o acesso remoto, a autora sente-se muito grata.

Referências

Ausubel, D. P.; Novak, J. D.; Hanesian, H. (1990) *Psicologia Educacional*. Rio de Janeiro: Interamericana.

BRASIL. Parâmetros Nacionais para o Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Física. Secretaria de Educação Média e Tecnológica/ MEC, Brasília, 2000;

BRASIL, *Parâmetros Nacionais para o Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*. Brasília: Secretaria de Educação Média e Tecnológica/MEC, 2002.

Campos, A. M. N.. *A prática de ensino dos docentes do Curso de Turismo do CEFET/PA – uma análise centrada na metodologia do ensino*. Maringá: Revista Urutágua. Nº 6, abr/mai/jun/jul, 2006. Disponível em <<http://www.urutagua.uem.br/009/09campos.htm>>. Acesso em 23/08/2018.

Carvalho, R. *Como funciona o Mobile Learning?* (2016). Disponível em <https://www.edools.com/mobile-learning> , Acesso em 24 /05/2018.

Chibeni, Silvio Seno (2018). *As origens da ciência moderna*. Disponível em: <www.unicamp.br/~chibeni/textosdidaticos/cienciaorigens.pdf> Acesso em 10/10/2018.

C.E. Barão do Rio Branco. *Proposta Pedagógica Curricular para a disciplina de Física – Ensino Médio Organizada por Trimestre*. CE Barão do Rio Branco – EFM e EJA.

Gaspar, A., *Compreendendo a Física Eletromagnetismo e Física Moderna*. 32ª. Ed. São Paulo: Editora Ática, 2014;

Ghedin, E. *Teorias Psicopedagógicas do Ensino Aprendizagem*. Boa Vista: UERR Editora, 2012.

Goulart, C. *As práticas orais na escola: o seminário como objeto de ensino*. Campinas, 228p. Dissertação de Mestrado. Instituto da Linguagem, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2005.

Halliday, D.; Resnick, R; Walker, J., *Fundamentos de Física - Ótica e Física Moderna*. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009;

Laboratório Nacional de Luz Sincrotron (LNLS). Disponível em <<https://www.lnls.cnpem.br/>>. Acesso em 20/10/ 2018.

Lima, R. S.; Afonso, J. C., *Raios-x: fascinação, medo e ciência*. Revista Química. Nova, 32, 1, 263-270, 2009;

Maldonado, A. P. B., Ondas eletromagnéticas com ênfase em Raios X: uma proposta didática com o uso de tecnologias educacionais, Dissertação de mestrado (2020), Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná.

Moreira, M. A.; Masini, E. A. S.; *Aprendizagem significativa: a teoria de aprendizagem de David Ausubel*. São Paulo: Centauro Editora. 2ª ed. 2006;

Moreira, M. A. Teorias de Aprendizagem, São Paulo: EPU, 1999;

Novak, J. D.; Cañas, A. J.; *The Theory Underlying Concept Maps and How to Construct and Use Them*. IHMCCmapTools. 1–36, 2008;

Novak, J. D.; Cañas, A. J ; (2010) apud da Silva, A. L. Silva (201?), *Mapas Conceituais no Processo de Ensino-Aprendizagem: aspectos práticos* .Disponível em: <<http://www.infoescola.com/pedagogia/mapas-conceituais-no-processo-de-ensino-aprendizagem-aspectos-praticos/> >

Oliveira, I. F. de. Raios X no Ensino Médio via Acesso Remoto na Perspectiva da Aprendizagem Significativa. 2016. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – Departamento de Física, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná. Disponível em: <<http://www.dfi.uem.br/dissertacao/mnpef/uem.php>>. Acesso em 03/09/2016;

Paraná/SEED/DEB. *Diretrizes Curriculares da Educação Básica de Física Diretrizes Curriculares da Educação Básica/DCEs – Física*. Curitiba: SEED/DEB, 2008.

TeamViewer 11, Teamviewer lança versão final di teamviewer 11, 2015. Disponível em: <<https://www.teamviewer.com/pt/press/teamviewer-finalizes-teamviewer-11.aspx>>. Acesso em 03/09/2016;

Zabala, A. *Prática educativa: como ensinar*. Porto Alegre, RS: Artmed.57, 1998.

APÊNDICE A – Ficha para as Aulas: 1 e 8 (Mapa Conceitual)

Identificação:

Nome do Colégio: _____

Componente Curricular: Física

Professor(a): _____

Turma: _____

Data da Atividade: _____

Nome do(a) aluno(a): _____

Elabore um mapa conceitual a partir da palavra Raios X.

RAIOS X

APÊNDICE B – TEXTO DE APOIO – FÍSICA DOS RAIOS X

Neste texto será apresentada uma revisão da Física envolvida no contexto dos Raios X, contendo os principais fatos históricos considerados importantes para a contextualização do assunto. Em aspectos relacionados à pesquisa científica, têm-se várias formas de se trabalhar com esse assunto, dependendo do que se deseja analisar. Assim, para contextualizar os Raios X como uma faixa da radiação eletromagnética esta seção foi dividida em 2 principais partes: Ondas eletromagnéticas e os fenômenos ondulatórios, e os Raios X e suas aplicações, em destaque o Síncrotron (LNLS e o SIRIUS).

B.1. Ondas Eletromagnéticas e os Fenômenos Ondulatórios

Segundo Nussenzveig (2002), num sentido bastante amplo, uma onda é qualquer sinal que se transmite de um ponto a outro em um meio com velocidade definida. As ondas podem ser mecânicas, sonoras ou eletromagnéticas. As mecânicas e sonoras precisam de um meio material para se propagar, enquanto que as ondas eletromagnéticas podem se propagar também no vácuo.

As ondas eletromagnéticas foram descritas matematicamente pelo físico escocês James Clerk Maxwell no século XIX. Ele se baseou nas equações dos cientistas: Coulomb, Ampère, Gauss e Faraday, dando a elas uma nova visão e formando um conjunto de quatro equações que demonstram a interação entre o campo elétrico e campo magnético, e suas relações com a tensão e a corrente elétrica. Estas equações passaram a ser conhecidas como as equações de Maxwell e são à base do eletromagnetismo.

Cada uma dessas equações de Maxwell foi determinada empiricamente, e podem ser representadas de três formas. Uma conhecida como a forma integral, a segunda como diferencial, e a terceira como tensorial. Isso porque a primeira envolve integrais, a segunda derivadas, e a terceira tensores (nesta forma, as 4 equações são representadas por duas e é estudada ao introduzir a teoria relativística (Reitz e Milford, 1982)). No Quadro B.1, apresentam-se no contexto de cada lei do eletromagnetismo, as formas, integral e diferencial que são as mais conhecidas.

Quadro B.1 –Equações de Maxwell – formas integrais e diferenciais. Em que: \vec{E} é o campo elétrico gerado, \vec{B} o campo magnético, ϵ_0 a permissividade no vácuo, μ_0 permeabilidade magnética no vácuo, Φ_E representa o fluxo elétrico, Φ_B fluxo magnético, t o tempo e i_c todas as correntes envolvidas. E, na forma diferencial ρ é termo de densidade de carga e \vec{j} da densidade de corrente.

Equações de Maxwell	
Nas equações a seguir consideramos: $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t)$ e $\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t)$	
Lei de Gauss Elétrica	
Forma Integral $\oint \vec{E} \cdot \hat{n} dA = \frac{q_{int}}{\epsilon_0}$	Forma Diferencial $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
Lei de Gauss Magnética	
Forma Integral $\oint \vec{B} \cdot \hat{n} dA = 0$	Forma Diferencial $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Lei de Ampère – Maxwell	

Forma Integral	Forma Diferencial
$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i_c + \frac{\varepsilon_0 d\phi_E}{dt} \right)$	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
Lei de Faraday – Lenz	
Forma Integral	Forma Diferencial
$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\phi_B}{dt}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

Fonte: adaptado da referência <<https://www.respondeai.com.br/conteudo/fisica/ondas-eletromagneticas-e-luz/equacoes-de-maxwell/709>>.

Analisando cada uma delas:

1º - Lei de Gauss para a eletricidade: a primeira das quatro equações foi proposta primeiramente pelo matemático alemão Carl Friedrich Gauss (1777-1855). Essa equação observada na forma integral relaciona o fluxo do campo elétrico (Φ_E) numa superfície fechada (dA) com cargas no seu interior, relacionando os campos elétricos ($\vec{E}(\vec{r}, t)$) e suas fontes às cargas elétricas (q), e pode ser aplicada mesmo para campos elétricos variáveis com o tempo. Esse termo de fonte na representação diferencial é a densidade de carga $\rho(\vec{r}, t)$.

2º - Lei de Gauss para o magnetismo: esta segunda equação equivale a da primeira lei, mas aplicável aos campos magnéticos ($\vec{B}(\vec{r}, t)$). Como no caso do campo magnético não existem monopolos magnéticos, o fluxo (Φ_B) através de qualquer superfície fechada (dA) é nulo. De acordo com essa lei, as linhas de campo magnético são contínuas, diferente das linhas de força de um campo elétrico que se originam em cargas elétricas positivas e terminam em cargas elétricas negativas.

3º - Lei de Ampère- Maxwell: a lei de Ampère descreve a relação entre um campo magnético ($\vec{B}(\vec{r}, t)$) e a corrente elétrica (i) que o origina. A equação define a integral de linha do campo elétrico em qualquer curva fechada. Também estabelece que um campo magnético é sempre produzido por uma corrente elétrica ou por um campo elétrico variável. Este último previsto por Maxwell, pois se um campo magnético variável no tempo induz uma corrente elétrica (i), e conseqüentemente um campo elétrico, então um campo elétrico ($\vec{E}(\vec{r}, t)$) variável no tempo deve induzir um campo magnético ($\vec{B}(\vec{r}, t)$). No caso diferencial, $\vec{J}(\vec{r}, t)$ é o termo da densidade de corrente.

4º - Lei de Faraday-Lenz: essa quarta equação descreve as características do campo elétrico originando um fluxo magnético variável ($\vec{\Phi}_B(\vec{r}, t)$). Os campos magnéticos originados são variáveis no tempo, gerando assim campos elétricos do tipo rotacionais.

Unindo a força de Lorentz² (Eq. [B.1]), que representa a superposição de duas forças, a gerada pelo campo elétrico e a pelo campo magnético, que atuam sobre uma partícula de carga (q) que se move com velocidade \vec{v} na presença de campo magnético,

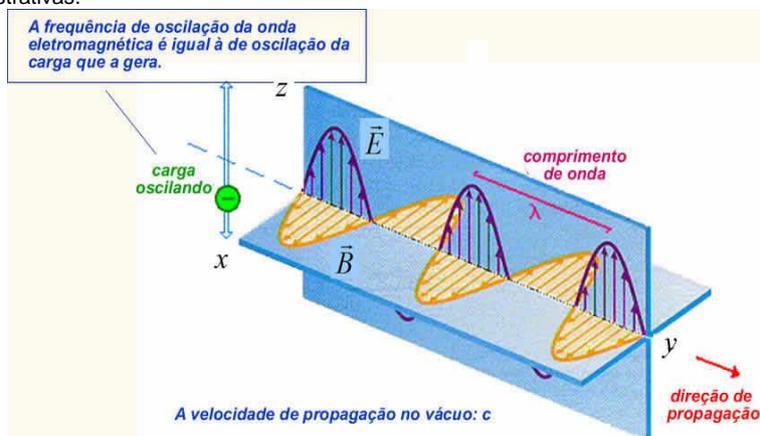
$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad [B.1]$$

e as 4 equações de Maxwell, está a base do eletromagnetismo e conseqüentemente da óptica clássica. Essa força é importante, pois está aplicada no funcionamento dos ciclotrons, raios catódicos, espectrômetros de massa, canhões elétricos, entre outros.

² Hendrik Antoon Lorentz, escreveu esta lei em 1892, que denominou de força ponderomotiva. **Fonte:** https://pt.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7a_de_Lorentz. Acesso: 29/02/2020.

Os conceitos fundamentais para compreensão das ondas eletromagnéticas, primeiramente deve-se ter bem claro que essas são compostas por campo elétrico e magnético simultâneos, que oscilam em planos diferentes, perpendiculares entre si, conforme a Figura B.1.

Figura B.1 – Representação de uma onda eletromagnética transversal – apresentação dos campos elétrico (\vec{E}) e magnético (\vec{B}). As cores são meramente ilustrativas.



Fonte: <https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504304&chapterid=2717>.

Assim, Maxwell provou que a luz é uma onda eletromagnética e que todas as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com a velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Todas estas contribuições, o tornou tão importante para o Eletromagnetismo quanto Isaac Newton é para a Mecânica Clássica.

Segundo Albert Einstein e a Teoria da Relatividade, a máxima velocidade alcançada por uma onda eletromagnética é c pode ser calculado por meio da equação:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} . \quad [\text{B.2}]$$

Na Equação [B.2] o termo μ_0 representa a permeabilidade magnética no vácuo dada por: $4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$, e ϵ_0 é a constante permissividade no vácuo dada por: $\approx 8,85418782 \times 10^{-12} \frac{\text{A}^2 \text{s}^4}{\text{Kg m}^3}$.

O comprimento de onda, representado por λ , indicado na Figura B.3, é a distância espacial que separa dois pontos consecutivos de uma onda que têm a mesma configuração espacial. Os pontos mais altos de uma onda são denominados de crista e os pontos mais profundos são denominados vales.

As ondas eletromagnéticas apresentam algumas propriedades em comum que sempre podem ser observadas, são elas:

- Os campos, elétrico e magnético são perpendiculares entre si, bem como à direção de propagação da onda;
- Os campos variam sempre na mesma frequência (f) e estão em fase;
- A sua velocidade de propagação é igual à velocidade constante da luz no vácuo " c " ($c \approx 299.792,458 \text{ km/s} \approx 300.000 \text{ km/s} = 300.000.000 \text{ m/s}$), e pode variar dependendo do meio em que se propaga.

A equação [B.3] ilustra a relação entre o comprimento de onda (λ), velocidade da luz (c) e frequência (f) de oscilação da onda:

$$\lambda = \frac{c}{f} . \quad [B.3]$$

As ondas eletromagnéticas têm características especiais que as diferem das ondas mecânicas (ex. numa corda, ou em uma mola) ou das ondas sonoras, pois não necessitam de um meio de propagação que dê suporte a elas. Por outro lado, alguns aspectos são comuns a todas as ondas, como a possibilidade de transferir energia de um ponto a outro sem transferência de matéria (Machado, 2006).

Elas apresentam uma grande relevância, tanto no meio científico quanto no meio tecnológico. Diariamente, estamos interagindo com algum tipo de onda eletromagnética, sejam por uso de celulares, exames médicos, em aeroportos, com radiações nucleares, entre outros, ou naturalmente, a luz solar (radiação ultravioleta, infravermelho, faixa do visível,...).

Além disso, Max Planck, em 1900, deu início à chamada Física Quântica, com seus postulados sobre a radiação de corpo negro. E, Albert Einstein, em 1905, revolucionou os conhecimentos da Ciência, lançando a Teoria da Relatividade e o Efeito Fotoelétrico, abrindo caminho para o maior desenvolvimento científico da história. Com isso, as equações de Maxwell podem ser consideradas o marco final da chamada Mecânica Clássica.

Na subseção seguinte aborda-se um estudo detalhado sobre o espectro das ondas eletromagnéticas, dando ênfase para a visualização na faixa em que está situada a radiação de Raios X Bem como, quais os outros tipos de radiação fazem parte deste espectro.

B.1.1 Espectro Eletromagnético

O espectro eletromagnético é a distribuição da intensidade da radiação eletromagnética com relação a sua frequência (f) ou comprimento de onda (λ). Pode ser organizado e representado em ordem crescente de comprimento de onda. Também conhecido como uma escala de radiações eletromagnéticas, e são identificados por regiões conforme apresentado na Tabela B.1, com valores aproximados do comprimento de onda, frequência e energia para regiões selecionadas.

Tabela B.1 - Espectro da radiação eletromagnética. Apresentação dos sete tipos de ondas eletromagnéticas, bem como, o comprimento de onda (medido em Angstroms e centímetros); frequência em Hertz (Hz) e, energia (medida em eletrovolts (eV)).

Espectro de Radiação Eletromagnética				
Região	λ (Å)	λ (cm)	f (Hz)	E (eV)
Rádio	$> 10^9$	> 10	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Micro-ondas	$10^9 - 10^6$	$10 - 10^{-2}$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 10^{-2}$

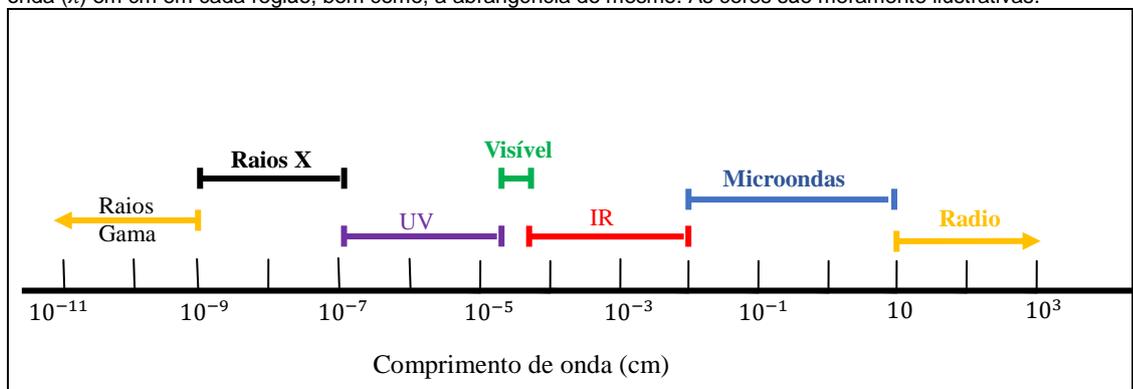
Infra-vermelho	$10^6 - 7 \times 10^3$	$10^{-2} - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4,3 \times 10^{14}$	$10^{-2} - 2$
Visível	$7 \times 10^3 - 4 \times 10^3$	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{14} - 7,5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Ultravioleta	$4 \times 10^3 - 10$	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7,5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Raios X	$10 - 0,1$	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Raios Gama	$< 0,1$	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Fonte: adaptada da referência Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/oei/cgu/espec/intro.htm>>.

Portanto, no espectro eletromagnético são representados, para melhor visualização na Figura B.2, os sete tipos de ondas de radiação eletromagnéticas: ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, Raios X e Raios Gama. As ondas se propagam à velocidade da luz (c) e, com exceção da luz visível, são todas invisíveis a olho nu.

Essas ondas previstas por Maxwell, em 1873, foram confirmadas experimentalmente por Heinrich Hertz, em 1888, por meio de aparelhos emissores e detectores de Radio. Conforme ilustrado na Figura B.2, este faz parte do espectro de ondas eletromagnéticas que tem o maior comprimento de onda, sua faixa variando de 10 a 10^3 cm.

Figura B.2 – Representação do limite do espectro eletromagnético. Esquemática dos valores numéricos dos comprimentos de onda (λ) em cm em cada região, bem como, a abrangência do mesmo. As cores são meramente ilustrativas.



Fonte: Adaptada da referência do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <<http://www.if.ufrgs.br/oei/cgu/espec/intro.htm>>

Há também o espectro de luz visível, que pode ser subdividido de acordo com a cor, o vermelho nos comprimentos de onda longos e violeta para os comprimentos de onda mais curtos, conforme ilustrado, esquematicamente, na Figura B.3. O original da figura usa um acrônimo para lembrar a ordem das cores, sendo esse a sequência nas iniciais das cores na língua inglesa: ROY G BV (um acrônimo para a sequência de matrizes comumente descrita constituindo o arco-íris)³. Mas no lugar de um acrônimo há na literatura⁴ em português uma regra mnemônica: **Vamos LAVamos Avançar**

³Apresentação das regiões red=vermelho; orange=alaranjado; yellow=amarelo; Green =verde; blue=azul e Violet =violeta.

⁴ Disponível no site: <<https://pt.wikihow.com/Lembrar-as-Cores-do-Arco-%C3%8Dris>>.

Figura B.3 – Representação esquemática da sequência de cores do espectro visível, e a regra mnemônica utilizada para lembrar a sequência das cores.



Fontes: adaptado das referências <<http://www.if.ufrgs.br/oei/cgu/espec/intro.htm>> e <<https://pt.wikihow.com/Lembrar-as-Cores-do-Arco-%C3%8Dris>>.

Contextualizado a faixa em que se encontram os chamados Raios X (10^{-9} a 10^{-7} cm), que não é visível aos olhos, como o espectro do visível⁵ apresentado na Figura B.3, apresenta-se na próxima subseção a propriedade das ondas denominada de difração.

B.1.2 Difração

Para compreender o fenômeno da difração nesta subseção será apresentada para a luz, uma onda eletromagnética na faixa do visível (Figura B.3).

A luz de acordo com a Óptica Geométrica apresenta os fenômenos de reflexão e refração, baseada no princípio de propagação retilínea. Contrariando este princípio, via Óptica Física, a luz ainda tem a capacidade de contornar obstáculos⁶ colocados em sua trajetória, esse fenômeno é denominado de difração.

Fenômeno esse descrito e publicado pelo físico e padre jesuíta Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), em meados do século XVII, denominado por ele de “*Diffraction*”. Conforme citado por Bassalo (1995):

“Em 1665, no livro *Physico-Mathesis de Lumine, ColoribusetIride* publicado após sua morte, o físico Italiano Francesco Maria Grimaldi (1618 – 1663) descreveu algumas experiências nas quais mostrou que a propagação da luz pode se realizar de uma quarta maneira (além das três tradicionalmente conhecidas a sua época: reflexão, refração e difusão) denominada por ele, então de **difração**”. Sua convicção a respeito desse novo fenômeno foi tão grande que o apresentou como proposição I desse seu livro e, a partir daí, passou a relatar algumas experiências que realizou explicando-as por intermédio desse novo fenômeno físico que acabara de descobrir. Na descrição de uma dessas experiências, Grimaldi demonstrou que se um feixe de luz branca passar através de dois estreitos orifícios, situados um atrás do outro, e em seguida atingir um anteparo branco, haverá neste uma região iluminada além da que deveria existir se a luz se propagasse em linha reta. É como se a luz se “encurvasse” ao passar pelos orifícios, afirmou Grimaldi. (BASSALO, 1995, p. 294).

Todos os sistemas ondulatórios sejam elas ondas sonoras, eletromagnéticas ou mecânicas, possuem este fenômeno.

⁵Sendo esta a faixa em que se formam o arco Iris na decomposição da luz do Sol, ao incidir nas gotas de chuva. Este fenômeno da natureza ocorre devido a efeitos de refração e reflexão da luz.

⁶Como exemplo pode-se citar a incidência de um feixe de luz laser em um fio de cabelo esticado, como apresentado na referência de Oliveira (2015).

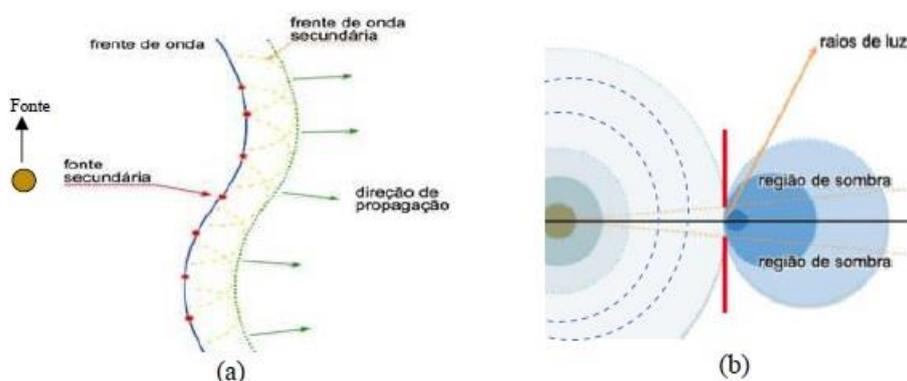
A difração ocorre toda vez que uma porção de uma frente de onda é obstruída de alguma maneira. O que ocorre, é que ao encontrar um obstáculo os vários segmentos da frente de onda sofrem alterações de amplitude ou fase tais que, ao se propagarem após o obstáculo, sofrem interferência ocasionando uma distribuição particular de energia que é conhecida como espectro de difração ou figura de difração.

Nem sempre observamos a difração da luz em nosso cotidiano, mas esse fenômeno se faz presente, um exemplo é a difração das ondas sonoras, o som contorna diversos obstáculos de tamanhos diversos, tais como pessoas, árvores e móveis situados em determinado ambiente.

O que diferencia a difração do som do da luz são os seus respectivos comprimentos de onda. O comprimento de onda do som é da ordem de 1 m , enquanto que o da luz visível é da ordem de 500 nm ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$). As ondas eletromagnéticas utilizadas na transmissão de sinais para rádio, televisão e telefonia móvel apresentam comprimentos de onda que variam entre algumas dezenas de centímetros até alguns quilômetros, essas, dependendo do caso, contornam facilmente obstáculos como árvores e carros e até prédios.

No caso da luz visível, de acordo com o princípio de Huygens proposto por Christiaan Huygens no século XVII (1678), esquematizado na Figura B.4 (a), cada ponto de uma frente de ondas comporta-se como um centro emissor de ondas esféricas com a mesma frequência da fonte original.

Figura B.4 – Esquema do Princípio de Huygens (a) para a construção geométrica de uma frente de onda, a partir de uma frente de onda anterior. (b) ilustração de uma frente de onda esférica indicando as regiões de sombra após a fenda



Fonte: adaptados da referência (Zilio, 2007), disponível em: <<http://efisica.if.usp.br/optica/universitario/difracao/huygens/>>

Nesse caso, quando a onda eletromagnética (raio de luz) incide a fenda (obstáculo de dimensões comparáveis ao comprimento de onda da luz incidente) é como se ocorresse um espalhamento causado devido a essa interação, ou seja, o raio segue uma trajetória que não obedece às leis da óptica geométrica, pois é desviado sem haver mudanças no índice de refração do meio, provocando uma perturbação, conduzindo-a para locais que não deveria ser detectada normalmente, que são as regiões de sombra, conforme ilustrado na Figura B.4 (b), (Zilio, 2007).

Mas, estes fatos não foram suficientes para explicar o efeito da difração. Fresnel em 1816 impôs regras sobre a fase e a amplitude de ondas secundárias, justificando assim, ambos os comportamentos, a da linearidade da propagação e as das propriedades da luz como uma onda, passando assim a ser conhecida como o princípio de Huygens-Fresnel. Conforme citados pelos autores da apostila da disciplina de Física Experimental IV da USP (FAP-214, 2006):

O princípio de Huygens-Fresnel diz que qualquer ponto de uma frente de onda que não seja obstruído, em qualquer instante se comporta como uma fonte de ondas esféricas secundárias, da mesma frequência da onda primária. A amplitude do campo óptico em qualquer ponto após a passagem pelo obstáculo, é a superposição das amplitudes das ondas esféricas secundárias, levando em conta suas fases (FAP-214, 2006, p. 2).

Os cientistas deste século defendiam ideias distintas, Isaac Newton defendia a teoria corpuscular da luz e Christiaan Huygens defendia a teoria ondulatória da luz. Esses pensamentos distintos sobre a dualidade da luz, também era questionado com relação aos Raios X, questionavam se o mesmo era constituído de partículas ou apenas energia.

Então, em 1905, Einstein “vê” a luz composta por partículas denominadas de fótons para explicar o Efeito Fotoelétrico. Os fótons são minúsculas partículas elementares que possuem energia e são mediadoras do efeito fotoelétrico. Suas características são: partícula não massiva, não possui carga, e viaja com a velocidade da luz (c).

No efeito fotoelétrico os elétrons são emitidos de uma superfície metálica quando exposto por uma radiação eletromagnética alta, como a UV. No caso, é considerada a energia da radiação incidente, isto é a energia do fóton, como:

$$E = h\nu . \quad [B.4]$$

A Equação [B.4] nos informa que E , a energia do fóton, é proporcional a ν a frequência do fóton. Sendo a constante de proporcionalidade h a constante de Planck.

Logo, os estudos da difração da luz com a matéria em nível atômico permitiram descrever os princípios da Mecânica Quântica. No caso da difração dos Raios X eles são mais difíceis de serem observados porque apresentam comprimentos de onda muito menores, variam de 1 a 100 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$), ou seja, da mesma ordem de grandeza das distâncias interatômicas.

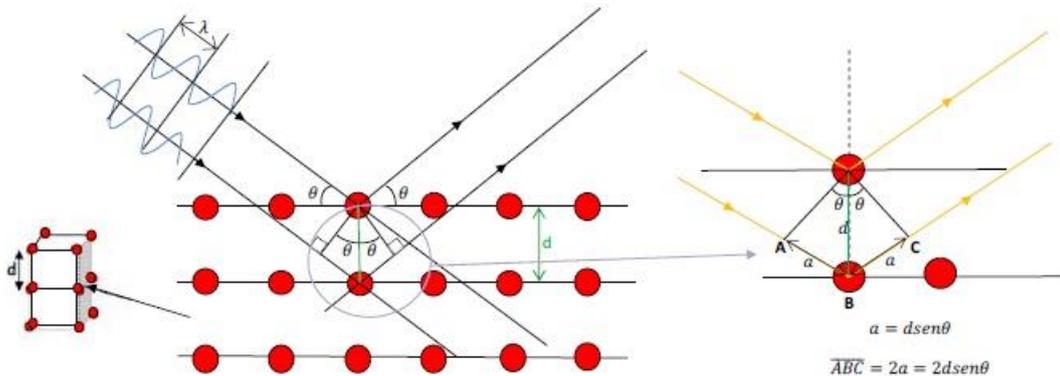
Max von Laue em 1912 concebeu a possibilidade de realizar difração de Raios X, utilizando uma estrutura cristalina como rede de difração tridimensional (cristalografia). As primeiras experiências foram realizadas por dois alunos de Laue, Walter Friedrich e Paul Knipping que fizeram um feixe de Raios X atravessar um cristal, resultando no fenômeno de interferência igual ao da Luz, assim concluíram que os Raios X eram ondas eletromagnéticas. Laue foi laureado⁷ com o prêmio Nobel de Física, por ter descoberto o fenômeno da difração de Raios X em cristais no ano de 1914.

Logo depois, William Henry Bragg e seu filho William Lawrence Bragg demonstraram a relação que passou a ser conhecida como lei de Bragg, fundamental para o estudo de estruturas cristalinas com o uso da difração de Raios X.

Esse processo de difração ocorre quando a radiação eletromagnética de comprimento de onda comparado à distância entre dois planos de átomos é refletida especularmente por planos consecutivos. Conforme apresentado na Figura B.5 (b), um feixe de Raios X incide sobre um conjunto de planos cristalinos, cuja distância interplanar é d (representado na Figura B.5 (a) em uma rede cúbica). A diferença do caminho óptico entre os feixes é dada por $2 d \sin \theta$ obtido em destaque em na Figura B.5 (c).

⁷ Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Max_von_Laue>.

Figura B.5 – Ilustração do Modelo de Bragg sendo representado em duas dimensões, λ indica o comprimento de onda da onda incidente/refletida, θ o ângulo da onda incidente com o plano, que é igual ao da onda refletida, d a distância entre planos, em destaque, mostrada em uma rede cúbica, bem como a obtenção de termo $d \sin \theta$ que é a diferença do caminho óptico.



Fonte: adaptado da Figura 03 da referência <<http://www.geocities.ws/raioxusp/aula2/aula2.html>>.

O ângulo de incidência θ é conhecido como ângulo de Bragg. Quando os máximos e mínimos de uma onda coincidem com os máximos e mínimos da outra dizemos que as ondas estão em fase, conforme indicado em azul na Figura B.5. Para que isso ocorra, a diferença de caminho óptico ($2 d \sin \theta$) da onda tem que ser um número inteiro. Dizemos que a Lei de Bragg é satisfeita de acordo com a Equação [B.5]

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad [B.5]$$

em que λ é o comprimento de onda da radiação utilizada, e n é um número inteiro. Logo, quando a diferença entre seus caminhos ópticos for um número inteiro n , de comprimentos de onda λ , as ondas refletidas interferem entre si de forma construtiva (em fase) ou destrutivas (defasadas) e geram os padrões de difração que podem ser detectados ou registrados em um filme.

William Henry Bragg e seu filho William Lawrence Bragg foram laureados com o Nobel em Física no ano de 1915, pela Lei de Bragg, fundamental para o estudo de estruturas cristalinas com o uso da difração de Raios X. Sendo William, então com 25 anos de idade, o mais jovem cientista a receber tal prêmio⁸ até os dias atuais.

No ano de 1920 ficou comprovado o comportamento corpuscular dos Raios X. A dualidade, no entanto, foi definitivamente estabelecida depois da experiência de Compton. Em 1923, Compton “visualiza”, em um jogo de bilhar, o comportamento dos fótons usando Raios X e uma amostra de grafite (Halliday, 2009). Arthur Holly Compton ganhou o Prêmio Nobel em Física de 1927, pelo trabalho chamado de efeito Compton que demonstra a natureza da partícula da radiação eletromagnética.

Em 1925, Louis Victor Pierre Raymond, 7º duque de Broglie⁹, assim conhecido por Louis de Broglie, estendeu o caráter dual da luz para a matéria. Por representar um grande passo para a Física, de Broglie recebeu, em 1929, o Prêmio Nobel de Física. A proposta de de Broglie para a dualidade onda-partícula para a matéria se estende a toda matéria como: prótons, nêutrons, átomos, moléculas e não somente aos elétrons.

⁸ Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/William_Lawrence_Bragg>.

⁹ Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Louis_de_Broglie>.

Ele sugeriu a relação $\lambda = \frac{h}{p}$, sendo λ o chamado comprimento de onda de de Broglie e h é a constante de Planck e p o momento da partícula envolvida. Combinando assim, as equações de Planck (Eq. [B.4]) e de Einstein ($E = mc^2$), concluiu-se que "tudo o que é dotado de energia, vibra e há uma onda associada a qualquer coisa que tenha massa".

Portanto, o Princípio de De Broglie atribui um comprimento de onda de matéria para qualquer massa m com velocidade c , representada matematicamente por:

$$E = hv = mc^2 \quad [\text{B.6}]$$

Até o momento, apresentou-se as equações fundamentais do eletromagnetismo, que são as 4 equações de Maxwell e a força de Lorentz. Partindo de suas 4 equações, para o caso sem fonte (fonte distante), as equações da onda foram deduzidas. Mostrando assim que a radiação eletromagnética são ondas compostas de campos elétricos e magnéticos oscilando perpendicularmente entre si, denominadas de ondas eletromagnéticas. E, que no decorrer da história do eletromagnetismo por meios experimentais este fato foi verificado por Hertz, e que dentro do limite da radiação eletromagnética, esta possui diferentes tipos de radiação. Todos comprovados experimentalmente.

Como uma onda, e respeitando os fenômenos e propriedades de reflexão e refração, da óptica geométrica, analisou-se do ponto de vista clássico e via óptica física, o fenômeno da difração, no limite da luz visível, nos experimentos de fenda simples e dupla e para uma luz monocromática.

Posteriormente, apresentou-se o comportamento da dualidade partícula-onda e sua energia, abrangendo assim a difração por meio ondulatório da interação fóton-elétron. Assunto esse abordado em Física Moderna.

A seguir, apresentam-se os principais aspectos dos Raios X, desde a sua descoberta e aplicações que compreendemos ser motivadoras aos alunos e outras citadas por eles nos seminários.

B.2 Raios X: da descoberta às aplicações

Conforme apresentado, os Raios X são ondas eletromagnéticas de comprimento de onda muito pequeno, que vão desde 0,01 até 10 nm e suas respectivas frequências na faixa de 3×10^{16} a 3×10^{19} Hz. Desde a sua descoberta, até os dias atuais, os Raios X estão em nosso cotidiano e nas áreas de pesquisas da Física. Desta forma apresenta-se a seguir como ocorreu a descoberta dos Raios X, e citam-se o que essa descoberta proporcionou no ramo da física, química e medicina.

B.2.1 Descoberta dos Raios X

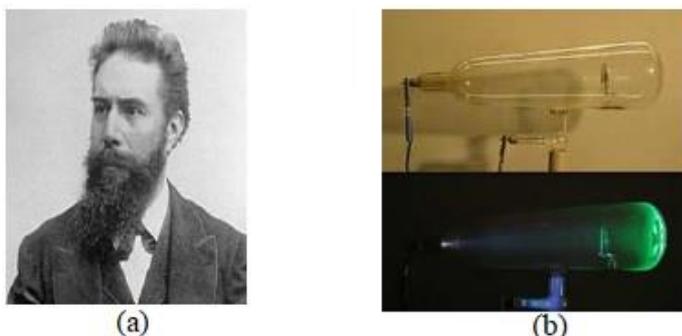
Sua descoberta e a primeira radiografia da história ocorreram em 1895 pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen¹⁰ (Figura B.6 (a)) (Röntgen, 1895; 1896; Glasser, 1993). Repetindo o experimento de Joseph John Thompson (1856-1940) em seu laboratório na Universidade de Wurzburg, Alemanha, Röntgen procurou detectar a radiação eletromagnética de alta frequência prevista por Heinrich Hertz

¹⁰ Também escrita na literatura com a grafia: Roentgen e Röntgen.

(1857-1894).

Com um tubo de Crookes (Figura B.6 (b)), Röntgen tentou observar um estranho fenômeno descrito pelo físico Philipp Lenard (1862-1947).

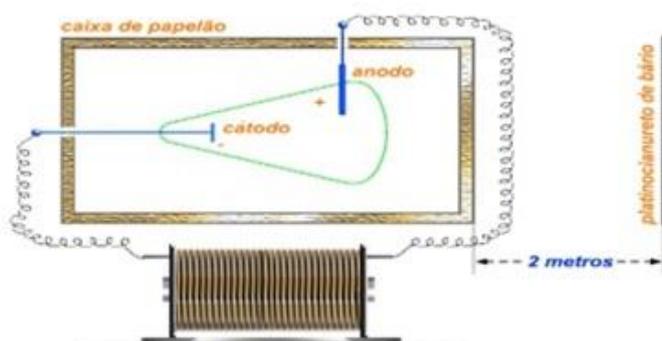
Figura B.6 – (a) Imagem fotográfica: (a) do físico e engenheiro mecânico alemão Wilhelm Conrad Röntgen. (b) do tubo de Crookes.



Fonte: (a) <<https://www.spr.org.br/a-spr/historia-da-radiologia>>. e (b) <https://pt.wikipedia.org/wiki/Tubo_de_Crookes>.

De acordo com a entrevista publicada em abril de 1896, na revista McClure's Magazine, Röntgen afirmou que estava trabalhando com um tubo de Crookes, coberto por uma caixa de papelão (Figura B.7) recoberta com uma substância luminescente, o platino cianeto de bário ($\text{BaPt}(\text{CN})_4$), quando ao passar uma corrente de alta voltagem pelo tubo, ele observou uma “linha preta” que se formou sobre o papel que o cobria.

Figura B.7 – Representação esquemática do aparato experimental construído por Röntgen. As cores são meramente ilustrativas.



Fonte: <<http://efisica.if.usp.br/moderna/raios-x/raios-x/>>.

Essa linha preta descrita pelo cientista talvez seja uma sombra que se formou quando a substância começou a brilhar. Um efeito que só poderia ser produzido pela passagem de algum tipo de luz. Entretanto a luz não poderia estar saindo do tubo, pois ele havia sido coberto com uma caixa de papelão justamente para evitar a passagem da luz produzida pelo arco elétrico.

Röntgen investigou e percebeu que o efeito se originava do tubo de descarga. Aumentou gradualmente a distância entre o tubo e a tela de material fluorescente, até aproximadamente dois metros (conforme indicado na Figura B.7), o brilho continuava, o que o levou a concluir que não poderia ser os raios catódicos do tubo devido à distância. Ele havia descoberto algo novo. (Dam, 1896).

Com suas experiências, Röntgen descreveu algumas observações e propriedades da radiação que havia descoberto, dentre elas:

- que a produção de luminescência em certos materiais fluorescentes sensibilizava chapas fotográficas;
- invisível ao olho humano;
- parecia não sofrer reflexão, nem refração, nem polarização.

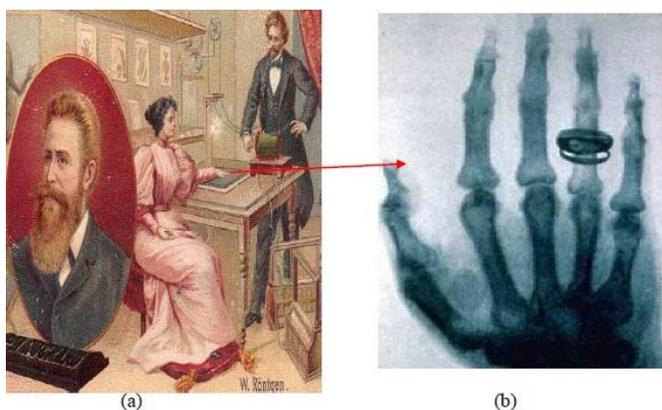
Por ser invisível e atravessar grandes espessuras de papel ou madeira, acreditava-se não se tratar de luz. Também não eram raios catódicos pois não sofriam desvio com ímãs e tinham alto poder de penetração.

Röntgen conclui que se tratava de um novo tipo de radiação invisível, com poder de penetração ainda desconhecido, capaz de atravessar materiais opacos à luz e a outras radiações conhecidas. A esses raios desconhecido deu o nome de Raios X.

Desta forma, ele começou a empregar placas radiográficas na revelação das imagens que conseguia com a exposição aos Raios X e passou a expor essas imagens.

Em 22 de dezembro de 1895, fez a radiação atravessar por 15 minutos a mão esquerda da esposa Ana Bertha Ludwig, conforme ilustra a Figura B.8 (a), atingindo do outro lado com uma chapa fotográfica. Revelada a chapa viu a sombra dos ossos de Bertha, sendo essa a primeira radiografia conhecida de uma parte do corpo humano. Na imagem da radiografia observaram alguns metacarpos e ossos dos dedos (falanges) da mão, incluindo um anel, conforme Figura B.8 (b).

Figura B.8 – Imagem (a) de Röntgen realizando Raios X da mão esquerda de sua esposa Bertha. Em destaque, apresenta-se o busto de Wilhelm Röntgen, e em (b) do resultado da imagem por Raios X.



Fontes: (a) <<https://hypescience.com/27195-primeiros-raios-x/>> (b) <https://www.researchgate.net/figure/Imagem-por-raio-X-da-mao-da-esposa-de-Roentgen-Roentgen-1895_fig5_263235771>

Pela descoberta dos Raios X, rendeu a Wilhelm Röntgen Conrad o primeiro prêmio Nobel de Física em 1901. Sendo muito questionado enfrentou a desconfiança de muitos cientistas da época, mas continuou dedicando-se ao estudo do mesmo. Ele respondeu aos críticos com uma nobre atitude: doou o dinheiro que ganhou com o Prêmio Nobel à Universidade de Wurzburg.

A descoberta dos Raios X e sua divulgação provocaram enorme repercussão no meio científico e fora dele; diversas histórias apareceram, algumas delas questionando a autoria da descoberta. Pois, impressões em chapas fotográficas e brilho de substâncias luminescentes já haviam sido observados por

outros cientistas antes de Röntgen, porém nenhum deles deu a devida importância ao fenômeno ou deixou para aprofundar as investigações em outro momento. Entre eles Johann Hittorf, Eugen Goldstein, Philipp Lenard e o interessante caso de William Crookes (inventor do tubo de Crookes) que notou algumas vezes que as chapas fotográficas ficavam veladas antes de ser exposta a luz, chegaram inclusive a reclamar com o fabricante (Nitske, 1971).

Também surgiram várias hipóteses para tentar explicar a natureza da nova radiação. Físicos e alguns jornais da época faziam confusão entre Raios X e os raios catódicos, usavam esses termos indistintamente. Os Raios catódicos, feixe de partículas de carga elétrica negativa, foram caracterizados dois anos após a descoberta dos Raios X, fruto do trabalho de Joseph John Thomson.

Em busca de uma explicação para tal fenômeno, diversas hipóteses foram levantadas:

- que os Raios X eram ondas eletromagnéticas transversais de pequeno comprimento de onda, semelhantes à radiação ultravioleta;
- que esses raios seriam ondas eletromagnéticas longitudinais (hipótese levantada pelo próprio Röntgen);
- que a radiação X corresponderia a pulsos não periódicos de radiação eletromagnética;
- que os Raios X eram de natureza corpuscular, formados por raios catódicos modificados (neutros).

Depois de extensivos experimentos, a polêmica foi decidida favoravelmente à primeira hipótese: “Que os Raios X eram ondas eletromagnéticas transversais de pequeno comprimento de onda, semelhantes à radiação ultravioleta”.

Ainda neste ano de 1896, Antoine Henri Becquerel analisou o Urânio metálico, em sua pesquisa sobre a relação entre a emissão de Raios X e a luminescência, devido a descoberta de Röntgen. O que Becquerel verificou que o Urânio emitia algo que marcava chapas fotográficas além de ionizar o ar a sua volta.

Em 1898, entra em cena madame Marie Sklodowska Curie (polonesa, casada com o físico francês Pierre Curie), em sua tese de doutorado apresentada à Academia Francesa de Ciências, de que o Urânio emitia era radiação, tal qual o tório tinha o mesmo fenômeno físico. Essa “radiação” não era os Raios X e sim, outro tipo de radiação denominado de radiação gama, que é um tipo de radiação espontânea e natural.

Becquerel, Pierre e Marie Curie ganharam o Prêmio Nobel de Física de 1903. Em relação a essa descoberta é que esses materiais chamados radioisótopos são elementos que tem emissão de radiação espontânea (naturalmente), e não por geração em um tubo (“artificial”) como os Raios X da descoberta de Röntgen.

Marie Curie foi a responsável pela “teoria da radioatividade” - nomeada assim por ela - técnicas de isolar isótopos radioativos (método de descoberta do polônio, tório e rádio). O primeiro elemento químico de sua descoberta deu o nome de polônio em homenagem a seu país de origem, a Polônia. Em 1913 ganhou outro prêmio Nobel, desta vez em Química.

Entre a importância de suas pesquisas, além do método elétrico de quantificação de radiação e de sua identificação diante aos outros fenômenos, há a construção de unidades móveis de Raios X em sua dedicação na Primeira Guerra Mundial. Em que carregava testes de rádio (outra de sua descoberta na emissão de radiação) nos bolsos o que lhe provocou leucemia da qual faleceu em 1934, aos 66 anos de

idade.

Com o uso de forma errônea, os materiais radioativos estavam sendo utilizados por produtores de cosméticos, motivo da qual era também requisitada para sua divulgação.

Em 1926, com a fama das águas radioativas de Águas de Lindóia (SP), visitou o Brasil, na época o município chamava-se somente Lindóia (Viana, 2015).

B.2.2 Processo de Produção dos Raios X

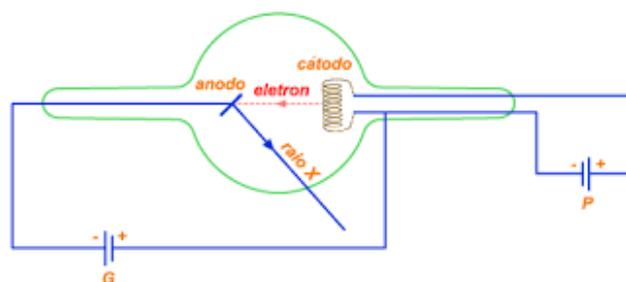
Como apresentado, os Raios X são ondas eletromagnéticas de comprimento de onda muito pequeno, que vão desde 0,01 até 10 *nm* e suas respectivas frequências na faixa de 3×10^{16} a 3×10^{19} *Hz* com variação de energia de 100 *eV* até 100 *KeV*. Portanto, os Raios X podem ser produzidos quando elétrons são acelerados em direção a um alvo metálico.

Os tubos de Raios X são, portanto, fontes artificiais e não naturais, a radiação gerada pelo mesmo é denominado de Radiação ionizante (Okuno, 2013), visto a sua capacidade de arrancar elétrons ao interagir com o material, e é um tipo de radiação bastante penetrante quando comparados com outros tipos de radiação (alfa e beta).

Assim, os equipamentos de Raios X, normalmente é constituído por tubos com gás à pressão de mais ou menos 0,001 *mmHg*. O tubo é esférico, e além do cátodo C e do ânodo A, possui um terceiro eletrôdo B, chamado alvo, colocado no centro da esfera.

O alvo B está ligado ao ânodo A, de maneira que ficam ao mesmo potencial. Este alvo combinado com o ânodo produz um campo elétrico que encurva a trajetória dos elétrons e faz com que a maioria dos elétrons encontre o alvo perpendicularmente, conforme representado na Figura B.9. A diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo nestes tubos é de 30 *K* a 50 *KV*.

Figura B.9 – Representação esquemática de um tubo a gás utilizado na produção de Raios X que consiste de uma ampola de vidro ou metal, a vácuo, com um filamento de tungstênio em uma extremidade, denominado cátodo, e um alvo de metal na outra extremidade, denominado ânodo.



Fonte: Instituto de Física – Universidade de São Paulo disponível em <<http://efisica.if.usp.br/moderna/raios-x/raios-x/>>.

Etapas para o processo de emissão de Raios X:

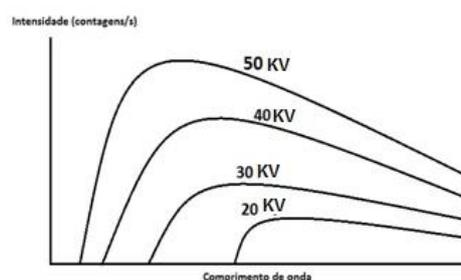
- I. Emissão termoiônica - o cátodo é aquecido e, essa energia térmica é capaz de liberar elétrons;
- II. Essa nuvem eletrônica liberada é acelerada em direção ao ânodo, devido à aplicação de uma diferença de potencial (*KV*) formando uma corrente (*mA*). O tempo de duração desta aplicação multiplicado pela corrente é chamada de produto corrente-tempo (*mA s*);
- III. Emissão de Raios X:

- iii.a - Se chocarem com o ânodo, os elétrons penetram no material e passam muito próximo dos núcleos dos átomos, causando uma desaceleração, pois faz com que estes elétrons percam energia que é emitida em forma de fótons de Raios X. Processo esse conhecido por *Bremsstrahlung* ou radiação de freamento (ou frenamento).
- iii b - Os elétrons podem também colidir com elétrons orbitais dos átomos do material do ânodo e retirá-los, caso a energia cinética destes seja maior ou igual à energia dos elétrons no átomo. Ao ser removido do átomo, o elétron deixa uma vacância naquela órbita. Isso faz com que elétrons de camadas mais externas ocupem essa vacância. Como em órbitas mais internas há uma menor energia de ligação, o excesso é emitido em forma de fótons de Raios X. Processo denominado de Raios X característico.
- iv. Depois de formados, os Raios X saem do tubo passando através de uma janela de berílio (Be) e passam por um filtro que pode ser de molibdênio (Mo), ródio (Rh) ou tungstênio (W), os quais absorvem os fótons de Raios X indesejáveis para a imagem. Atualmente, algumas combinações de alvo e filtro são comuns: Mo/Mo, Mo/Rh, Rh/Rh e W/Al. Espectros de Raios X produzidos por um alvo de molibdênio (Mo) e um de tungstênio (W). O alvo de Mo produz fótons com energias mais baixas do que o de W, que melhora o contraste radiográfico.

Nos Raios X o espectro é um gráfico representado pela quantidade de Raios X incidente pela energia emitida. A unidade utilizada usualmente para a quantidade de Raios X é unidade arbitrária (*u. a.*) e indicada por *I* de intensidade, e para a energia é o quilovolts (*KV*), pois a faixa de energia utilizada em radiodiagnóstico está nesta ordem, tanto para Raios X de freamento quanto o Raios X característico; ou gráficos da Intensidade de Raios X (*u. a.*) versus comprimento de onda (\AA), para várias faixas de energia em (*KV*).

Na Figura B.10 apresenta-se um gráfico da Intensidade de Raios X (contagens por segundo) versus comprimento de onda (λ), para várias diferenças de potenciais (ddps), indicando o comportamento dos espectros obtidos para um ânodo de tungstênio. Observe que todas as curvas têm em comum o fato de que há um comprimento de onda máximo variável (menor para maiores ddps) e em todas elas um mínimo, abaixo do qual não se observa qualquer radiação de Raios X. A diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo, usados para acelerar o feixe de elétrons são indicados acima da curva correspondente (Javan, 2013).

Figura B.10 – Representações dos comportamentos gráficos dos espectros contínuos utilizando um ânodo de tungstênio de acordo com a ddp em quilovolt (KV). O espectro contínuo é uma curva da intensidade em contagens por segundo, versus comprimento de onda (λ) dos Raios X.



Fonte: Adaptado de <<https://tecnicoderadiologia.blogspot.com/2013/04/resumo-producao-de-raio-x.html>>

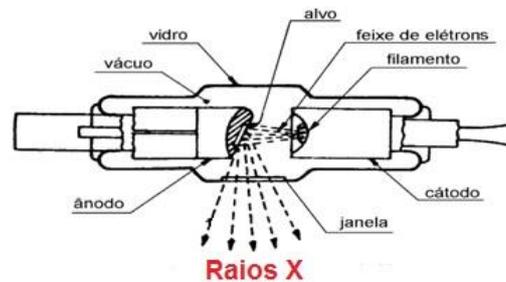
Segundo Santos (2002):

O espectro contínuo é simplesmente uma curva de contagens por segundo (intensidade), *versus* comprimento de onda (λ) dos Raios X, ou seja, Intensidade *versus* λ . Conforme foi proposto por Einstein, um fóton de radiação, com frequência f , transporta uma energia $hf = \frac{hc}{\lambda}$, onde λ é o comprimento de onda da radiação (Santos, C. A, 2002. p 1).

Portanto, os Raios X emitidos deverão ter energia máxima igual à energia do elétron incidente, ou seja, o espectro contínuo é limitado pelo comprimento de onda associado à energia máxima do elétron.

Atualmente os Raios X são produzidos por tubo de *Coolidge* (Figura B.11) estruturado por um tubo oco com vácuo e uma placa de metal geradora de fluxo de elétrons de alta energia liberado a partir da incandescência da placa (cátodo).

Figura B.11 – Desenho esquemático do tubo de *Coolidge* para emissão de Raios X. As partes constituintes deste aparato estão indicadas no próprio desenho, bem como, a representação dos Raios X sendo produzidos.



Fonte: adaptado da referência: <http://1.bp.blogspot.com/2EpQCHZdZac/UTz6_dDFLHI/AAAAAAAAAEk/EHd2_Dd9kSM/s1600/tubo+de+coolidge.png>

Como já citado os Raios X podem ocorrer: por decaimento (os Raios X característicos) ou por interações de partículas carregadas (radiação) com a matéria (Raios X de freamento). As radiações ou ondas eletromagnéticas são de altas energias oriundas de transições eletrônicas de níveis e subníveis mais internos no átomo.

Os Raios X de freamento é o utilizado para gerar Raios X para uso médico e industrial, pois depende exclusivamente da energia das partículas incidentes com a matéria, gerando desde centenas de KV até centenas de MV, conforme a aplicação desejada. Por exemplo, a radiografia oral ocorre com uma diferença de potencial entre 50 a 90 KV, já a nível industrial ocorre entre 150 – 500 KV.

B.2.3 Interação dos Raios X com a Matéria

Os Raios X interagem, em nível atômico, com a matéria de quatro formas diferentes, dependendo de sua energia (energia do fóton incidente) e da composição do material. São elas (Javan, 2013):

- a) **Absorção Fotoelétrica ou efeito fotoelétrico:** é aquela na qual o fóton de Raios X é absorvido e, toda sua energia é transferida para um elétron. Quando energia do fóton é um pouco maior que a energia de ligação dos elétrons da camada mais interna tem maior probabilidade de ocorrer o efeito fotoelétrico. Acontece principalmente com Raios X moles.

Devido a esse efeito, observa-se o contraste do osso aparecer mais claro do que a região a sua volta, pelo pulmão ser mais escuro do que o material a sua volta, pois o efeito é inversamente proporcional a energia ao cubo, e diretamente proporcional ao cubo do número atômico do material absorvedor.

- b) Espalhamento Compton (EC):** é uma forma de espalhamento inelástico, em que o fóton, do Raios X, incidente ao interagir com a camada mais externa de um átomo transfere a energia para o elétron ejetando-o (efeito Compton), e a outra parte da energia será a radiação espalhada que têm um comprimento de onda maior do que o da radiação incidente. Esta parte espalhada de Raios X diminui a resolução das imagens radiográficas. A probabilidade do EC ocorrer é inversamente proporcional a sua energia ($1/E$), e é praticamente independente do número atômico do material absorvedor. O EC é o mecanismo predominante em Raios X duros na geração de imagens médicas.
- c) Espalhamento não modificado ou coerente:** observado primeiramente por Thomson é um espalhamento puro, sendo esta uma interação de pura dispersão, sem deposição de energia no material. Nesse processo, o fóton interage com os elétrons dos orbitais atômicos da matéria de forma que enquanto os elétrons oscilam por um período de tempo muito curto outro fóton de mesma energia é liberado e se propaga em direções diferentes. Como esse tipo de interação é mais provável para fótons de energia baixa, não são importantes para a radiologia diagnóstica. A sua maior probabilidade de ocorrer é para fótons incidentes com energia menores que 10 KeV . (Portal da Educação, 2018 e Hipermídia, 2018):
- d) Produção de par – absorção pura –** Este tipo de interação ocorre somente quando o fóton incidente de Raios X teve uma energia maior que $1,02\text{ MeV}$. Tal que, quando se aproxima do núcleo atômico fica sob influência da força do campo nuclear, e o fóton incidente desaparece, dando origem a duas partículas carregadas: o pósitron (positivo) e o elétron (negativo). O pósitron irá se combinar com um elétron livre do meio, e irá gerar dois fótons com energia de $0,512\text{ MeV}$, denominada de radiação de aniquilação. Sendo esse o processo usado em tomografias por emissão de pósitrons. Já o elétron irá perder sua energia por meio de excitação ou ionização (Hipermídia, 2018).

Os Raios-X são capazes de penetrar em alguns materiais, dependendo dos elementos que constituem esse material. A essa propriedade chamamos de absorção. Na escolha dos materiais ou objetos a serem submetidos a imagem de Raios X, deve-se ficar atento a sua classificação, os mesmos podem ser transparentes, translúcidos e opacos:

- Os materiais transparentes permitem a passagem da luz, sendo assim, a luz percorre trajetórias bem definidas.
- Os materiais translúcidos permitem que a luz passe através deles difusamente, uma trajetória não regular, então não permitem uma visão completa e nítida da imagem.
- Os materiais opacos não permitem a propagação da luz, eles absorvem (convertem em energia térmica) e refletem essa luz.

A capacidade de penetração é o que difere os materiais uns dos outros.

Röntgen verificou que os Raios X atravessam materiais de baixa densidade e são absorvidos por

materiais de alta densidade. Como exemplo, podemos citar os músculos do corpo humano, quando o indivíduo realiza exames de Raios X os músculos não aparecem na imagem, no entanto, os ossos, com alta densidade são observados nitidamente.

Há alguns fatores que afetam na absorção de Raios X. De acordo com Dmitruk (2016) são eles:

- a) Espessura do absorvedor:** quanto maior a espessura de um material, ou seja, quanto mais grosso, maior a absorção de Raios X.
- b) Densidade do absorvedor:** como se sabe a densidade diz respeito a massa por unidade de volume, assim um material de maior densidade é mais absorvedor que um de menor densidade.
- c) Número atômico do absorvente:** constitui-se num dos principais fatores que afetam as características de absorção dos Raios X. Essa absorção depende do número atômico e está relacionada a energia do feixe Raios X incidente.
- d) Meio de contraste:** constituem-se de substâncias que diferem em densidade e em número atômico dos tecidos animais.
- e) Kilovoltagem:** os Raios X produzidos por baixa Kilovoltagem possuem um maior comprimento de onda o que por sua vez os torna menos penetrantes que aqueles produzidos com alta Kilovoltagem devido à diferença dos seus comprimentos de onda. Quanto maior a voltagem, menor o comprimento de onda e vice-versa. Conforme apresentado na Figura B.10 (nota da autora).
- f) Filtração:** constitui-se numa forma de se remover do feixe de Raios X aqueles raios que possuem menor energia e por conseqüência, menos penetrantes, utilizando-se dos conceitos de absorção. Esse processo é também denominado **endurecimento do feixe**.
- g) Composição do alvo:** a maioria dos tubos de Raios X possuem um alvo de Tungstênio por apresentar as seguintes propriedades: o maior ponto de fusão entre os metais e alta densidade. Podem ser constituídos também de uma liga de Rênio (Re) e Tungstênio (W) e para o caso de algumas aplicações especiais como é o caso da mamografia, o alvo é de Molibdênio.
(Dmitruk, 2016, p.1).

Portanto, os Raios X possuem propriedades específicas, segundo Tipler (1999), são elas:

- a) Os Raios X possuem todas as propriedades gerais de ondas eletromagnéticas: sofrem reflexão, refração, interferência, difração e polarização;
- b) Propagam-se em linha reta, com velocidade igual à da luz;
- c) Tornam fluorescentes muitos corpos sobre os quais incidem, como por exemplo, platino cianureto de bário (e por esta propriedade que permitiu sua descoberta).
- d) Provocam ação química em certas substâncias. Eles impressionam chapas fotográficas mesmo quando elas estão protegidas por superfícies que a luz não atravessa, como por exemplo, caixas de papelão, ou papel preto;
- e) Atravessam grandes espessuras de materiais. A facilidade maior ou menor com que os Raios X atravessam as substâncias depende do comprimento de onda dos Raios X, da espessura da substância e do seu peso atômico. Os Raios X de menor comprimento de onda, da ordem de $0,01 \text{ \AA}$, têm maior facilidade para penetrar nos corpos: são chamados Raios X duros. Os de maior comprimento de onda, da ordem de 1 \AA , penetram menos nos corpos: são chamados Raios X moles. Atravessam com grande facilidade as substâncias de pequeno peso atômico, como por exemplo, os elementos fundamentais dos corpos orgânicos, carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. As substâncias “densas” são dificilmente atravessadas. Assim, o chumbo é usado frequentemente para barrar os Raios X;
- f) Ionizam as moléculas dos gases por onde passam;

- g) Não tem carga elétrica com isso não sofrem desvios por campo elétrico e nem por campo magnético.

B.2.4 Aplicações dos Raios X

Esta subseção está dedicada à apresentação da aplicação quanto aos aspectos gerais e uma aplicação específica que é a radiação Síncrotron.

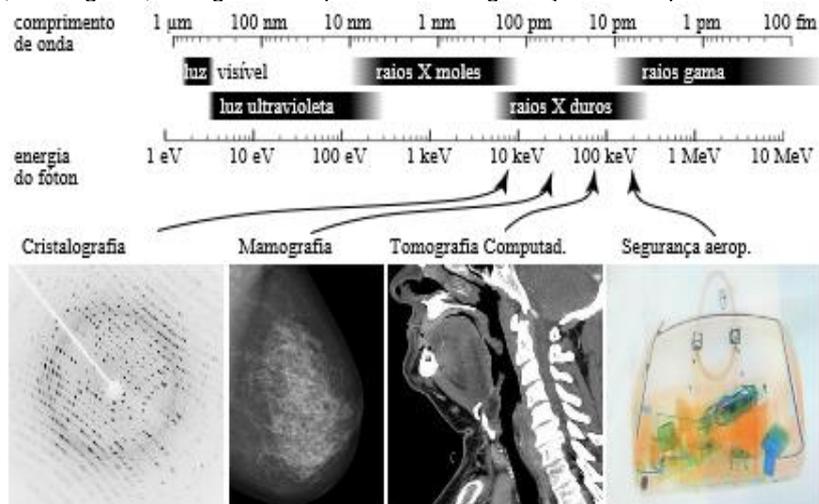
B.2.4.1 Aplicações Gerais

Em relação às energias dos Raios X, apresentou-se (subseção B.1.1) que os Raios X são radiações eletromagnéticas localizadas entre a radiação ultravioleta (UV) e os raios gama no espectro eletromagnético (Figura B.2). Normalmente, suas energias estão na faixa entre 100 eV (elétron-volt) e 100 KeV (quilo elétron-volt). Como por exemplo, nos Raios X de diagnóstico varia de 10 a 150 KeV, mas em algumas aplicações industriais e medicinais utilizam Raios X com energias da ordem de 1 MeV (mega elétron-volt). Quanto a capacidade de penetração dos Raios X nos materiais, estes são classificados em Raios X moles aos que possuem energias de até 5 KeV e os com energias maiores que esse valor são os chamados de Raios X duros. A referência, duros e moles é em relação a essa capacidade de penetração.

Essa radiação (Raios X duros) têm seu uso variado desde o ponto de vista de aplicação quanto científico, visto que possui comprimento de onda comparável ao tamanho dos átomos, apresentando uma energia muito grande a ponto de ocorrer ionização das moléculas além do seu grande poder de penetração.

Exemplos de aplicações desta faixa de Raios X são em: Cristalografia, mamografia, tomografia computacional, controle de bagagem em aeroportos, conforme indicado na Figura B.12.

Figura B.12 – Representação de um espectro eletromagnético e energia de penetração indicando dentro da faixa dos Raios X, os Raios X moles e os duros. E, exemplos de aplicações no cotidiano dos Raios X duros (alta energia), cristalografia, mamografia, tomografia computacional e segurança em aeroportos.



Fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b7/X-ray_applications.svg/1000px-X-ray_applications.svg.png.

Logo, os Raios X possuem grande aplicação, pois é um tipo de radiação de alta energia, com

capacidade de penetrar em organismos vivos e atravessar tecidos de menor densidade. Ele é absorvido pelas partes mais densas do corpo, como os ossos e os dentes. Em razão dessa característica, o principal uso dos Raios X é em radiografias para diagnóstico médico.

Essa capacidade de penetrar nos nossos tecidos faz dos Raios X um perigo em potencial, pois a exposição prolongada a eles pode levar à formação de células cancerígenas. Por isso, pessoas que trabalham com radiografias usam aventais de chumbo (que não permitem que essas radiações atravessem) e se mantêm longe no momento do disparo atrás de uma placa de chumbo.

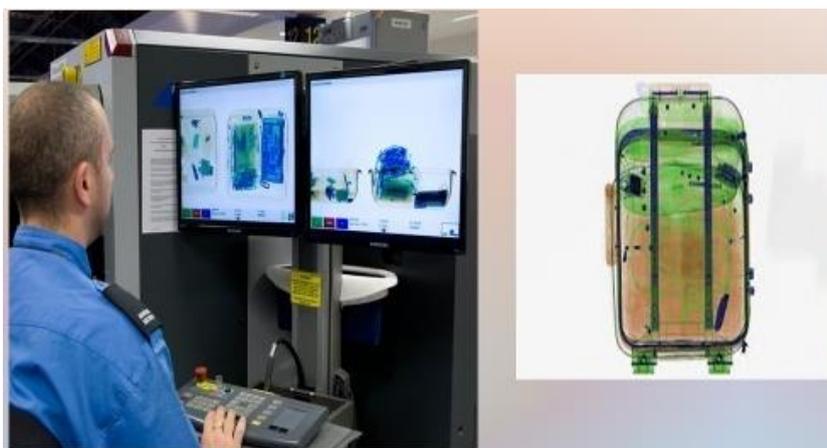
Ele também é usado industrialmente, para observar a estrutura interna de objetos, procurando ver se há falhas em sua estrutura, até mesmo como controle de qualidade.

Na Geologia, uma das suas aplicações é na investigação geológica, por intermédio da difração destas radiações, é possível analisar, de forma não destrutiva, a estrutura interna dos minerais, ao registrar como os seus cristais interagem com a radiação.

Em aeroportos e portos os Raios X são aplicados nas bagagens e *containers* a fim de analisar os objetos presentes, identificando armas, drogas ou outros itens não permitidos.

Essa radiação é medida por duas camadas de receptores: a radiação fraca (bloqueada por algum objeto) é captada por ela, mas não passa do filtro de cobre que separa as camadas, mas a radiação forte atravessa o filtro de cobre e chega aos receptores da segunda camada. O computador interpreta os dados recebidos pelos receptores de 1 e 2. Se a radiação não chegou nem à camada 1, significa que há um metal na mala. Se chegou à camada 1, mas não à 2, há um material misto. Se chegou à camada 2, é orgânico. O computador utiliza cores para distinguir os objetos (Figura B.13), de acordo com o material.

Figura B.13 – Imagem demonstrando o uso de Raios X em aeroportos. À esquerda se pode observar um operador verificando os pertences no interior das malas que passam pelo aparelho. À direita destacamos o efeito dos Raios X em uma mala de viagens. Esta é uma prática comum nos aeroportos de modo que não sejam despachados produtos ilegais.



Fonte: <https://airway.com.br/wp-content/uploads/2015/12/raiox_aerosol_02-750x500.jpg>

Na área de alimentos, os Raios X são usados para gerenciar riscos e falhas: no controle de qualidade; verificar vazios ou bolhas de gás; identificar componentes fora do tamanho, faltantes ou até mesmo ausência; conferir se há presença de rachaduras ou fissuras no produto e ou embalagem; identificar aglomerações em produtos em pó; conservação de alimentos com a irradiação a indústria consegue aumentar o tempo de conservação.

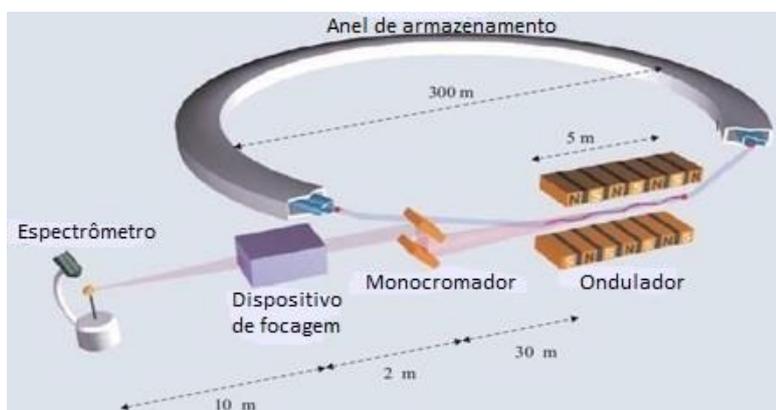
Portanto, os Raios X, desde sua descoberta, até os dias atuais, têm grande aplicação e continuam como tema de estudos e pesquisas na Física.

B.2.4.2 Aplicação em Pesquisa na Física - Radiação Síncrotron¹¹

Há também estudos e pesquisas, que envolve a produção das radiações do tipo Ultra Violeta (UV), Infra Vermelho (IV) e a de Raios X, que são denominados de Radiação Síncrotron ou Luz Síncrotron,

Esse termo, radiação Síncrotron é usado como um termo genérico para descrever radiação de partículas carregadas viajando em velocidades ultra relativísticas em um campo magnético, que as forçam a viajar ao longo de um caminho com curvas, sempre sincronizado. O sistema injetor é o que vai produzir o feixe de elétrons e acelerá-los até atingir uma determinada energia necessária para a etapa principal, que é o anel de armazenamento (Figura B.14).

Figura B.14 – Ilustração (tradução da autora) do processo de obtenção de Raios X - Anel de Armazenamento Síncrotron.



Fonte: Apud *Espectroscopia de raios X* – UFPR <http://fisica.ufpr.br/grad/espectroscopia_rx.pdf>

Nesta figura temos a representação de um acelerador de partículas, no qual as partículas injetadas são medidas a partir do espectrômetro¹² e direcionada ao monocromador (equipamento que seleciona comprimentos de ondas distintos) por meio de um dispositivo de foco. Após passar pelo monocromador o feixe é direcionado para um conjunto de imãs, chamado de ondulador, cuja função é desviar a partícula do caminho inicial para fazer as curvas do anel circular (de armazenamento), tudo isso com ação de um campo magnético. Após inseridas nesse anel as partículas viajam e possuem suas trajetórias delimitadas, graças a ação de uma câmara a vácuo. Há algumas cavidades de radiofrequência que são usadas para repor a energia perdida pelas partículas e também usadas para acelerar os feixes quando necessários.

A radiação Síncrotron é então produzida em anéis de armazenamento (Figura B.14) onde os elétrons e os pósitrons são mantidos circulando com energia constante.

Portanto, em um acelerador do tipo Síncrotron, o feixe de partículas carregadas é guiado em órbitas circulares por um conjunto de eletroímãs. O campo magnético produzido pelos eletroímãs age de forma

¹¹ Este texto é parte do texto utilizado como material didático da UFPR, disponível no site:<http://fisica.ufpr.br/grad/espectroscopia_rx.pdf>, do site do LNS_Sirius_Campinas, disponível em:<<https://www.lnls.cnpe.br/sirius/introducao-a-maquina/>>, do LNS_Campinas disponível no site:<<https://www.lnls.cnpe.br/grupos/fac/>> e LNLS_Projeto Sirius, 2014.

¹² Instrumento óptico utilizado para medir as propriedades da luz.

sincronizada sobre as partículas, que a cada volta possuem velocidades e, portanto, energias cada vez maiores. Desta ação sincronizada vem o nome acelerador Síncrotron.

A luz Síncrotron pode penetrar a matéria e revelar características de sua estrutura molecular e atômica. Por apresentar um amplo espectro, essa radiação permite aos pesquisadores utilizar os comprimentos de onda mais adequados para o experimento que desejarem executar. O alto fluxo e o alto brilho também proporcionam a realização de experimentos mais rápidos e a investigação de detalhes cada vez menores, com resolução espacial de nanômetros.

Está situado no Brasil o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron¹³ (LNLS) ele é responsável pela operação das duas fontes de luz Síncrotron da América Latina. O LNLS começou a ser projetado em 1987 e foi inaugurado após 10 anos em 1997. A maior parte dos componentes presentes no acelerador do LNLS foi fabricada no próprio laboratório, o que possibilitou que a atual fonte fosse construída com um índice de nacionalização de 85%. Em 1º de julho de 1997 a fonte de luz Síncrotron UVX é aberta à comunidade de ciência e tecnologia. Pouco antes, em abril do mesmo ano, havia sido aberta a primeira chamada para que os pesquisadores desenvolvessem suas pesquisas no Síncrotron.

Na época, a fonte contava com sete linhas de luz: estrutura fina da absorção de Raios X (XAS), espectroscopia de Raios X moles (SXS), espalhamento de Raios X a baixos ângulos (SAXS), difração de Raios X (DRX), cristalografia de proteínas (PCR) e duas linhas de espectroscopia no ultravioleta.

O outro acelerador, também administrado pelo LNLS é o SIRIUS¹⁴ (Figura B.15), inaugurado em 14/12/2018. O início de sua construção foi em 2014. Essa geração de radiação necessita de dois aceleradores, sendo um o sistema injetor: um linear (Linac – atua de forma pulsada – 2 vezes/s) e um Síncrotron injetor (*booster*) - recebe o pulso de corrente do Linac, e acelera até atingir a energia final, conduzindo via a linha de transporte até o anel de armazenamento. Este foi projetado para operar na energia de 3 GeV. Imagem e texto detalhado de seu funcionamento pode ser visto na referência: Projeto Sirius (2014, p. 22).

Figura B.15 – Imagem fotográfica do SIRIUS. O acelerador de partículas possui 518 m de circunferência e emitância de 0,27 nm – rad.



Fonte: ALS-NIELSEN e McMORROW, 2011 apud Espectroscopia de Raios X – UFPR <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Sirius_\(acelerador_de_part%C3%ADculas\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sirius_(acelerador_de_part%C3%ADculas))>

Ambos os aceleradores, LNLS e o SIRIUS, estão situados no município de Campinas – SP.

¹³ O LNLS é uma instituição brasileira de pesquisa em física, biologia estrutural e nanotecnologia desenvolvendo projetos nas áreas de Física, Química, Engenharia, Meio Ambiente e Ciências da Vida, localizado na cidade de Campinas – SP.

¹⁴ Fonte: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Sirius_\(acelerador_de_part%C3%ADculas\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sirius_(acelerador_de_part%C3%ADculas))>; O nome SIRIUS é em “homenagem” a estrela mais brilhante SIRIUS da nossa constelação. Website: <www.lnls.cnpm.br/sirius>

REFERÊNCIAS

ALS-NIELSEN J. e McMORROW D., *Elements of Modern X-ray Physics*, Second Edition, Wiley Press, 2011.

BASSALO, J. M. F. Nascimentos da Física: Idade Renascentista (4-95-2). *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 17, n. 4, p. 284 – 295, dezembro, 1995. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol17a36.pdf>>. Acesso em 24/04/2020.

DAM, H. J. W.. "The New Marvel in Photography." *The McClure's Magazine* VI nº 5: 403-15, 1896 <<http://www.gutenberg.org/files/14663/14663-h/14663-h.htm>>. Acesso em 20/07/2019.

de OLIVEIRA, M. A. F., *Utilizando um fenômeno físico para medir o diâmetro de um fio de cabelo*, 60, 38 f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física). Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2016. Disponível em: <<http://www.dfi.uem.br/dissertacao/mnpef/uem.php>> . Acesso em 07/09/2019.

DMITRUK, P. P. Física Radiológica: Fatores que Influenciam na Produção dos Raios X 2016 p.1 disponível em :<<https://pt.linkedin.com/pulse/fisica-radiologica-fatores-que-influenciam-na-dos-x-phillip>>. Acesso em 07/03/ 2020.

Espectroscopia de raios X – UFPR <http://fisica.ufpr.br/grad/espectroscopia_rx.pdf>. Acesso em 10/10/2019.

FAP-214_2006, Difração, 2006. Disponível em <<https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=2618098>>. Acesso em 28/02/2020.

GLASSER, O. *William Conrad Roentgen and the Early Story of the Roentgen Rays*, Charles C. Thomas: Springfield. 1934, 1993. Disponível no site: <<https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=5GJs4tyb7wEC&oi=fnd&pg=PA1&ots=97tZRcs sfj&sig=m2szSQUJ2hNdaHu2fclECWosPpQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>>.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R; WALKER, J. *Fundamentos de Física – Vol. 4, Ótica e Física Moderna*. Rio de Janeiro: LTC. 8. ed. 2009;

HIPERMÍDIA, Espalhamento Coerente, 2018. Disponível em: <<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/>>. Acesso em 19/05/2020.

HIPERMÍDIA, Produção de Pares, 2018. Disponível em: <<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/>>. Acesso em 19/05/2020.

JAVAN, *Produção de Raio X*, 2013. Disponível no site: <<https://tecnicoderadiologia.blogspot.com/2013/04/resumo-producao-de-raio-x.html>>, acesso em 20/05/2018.

Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS). Disponível em <<https://www.lnls.cnpem.br/>> acesso em 20/05/2018.

LNLS_Sincrotron, «Cap. 3». In: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. *Projeto Sirius* (pdf). A nova fonte de luz síncrotron brasileira. Campinas: [s.n.] p. 28, 2014. Disponível no site: <http://www.lnls.cnpem.br/wp-content/uploads/2016/08/Livro-do-Projeto-Sirius-2014.pdf>. Acesso em 05/03/2020.

MACHADO, K. D., Teoria do Eletromagnetismo vol. 3..281 páginas, Editora: UEPG, 2006.

NITSKE, W. R.. *The Life of Wilhelm Conrad Röntgen: Discoverer of X Ray*. Arizona: Tucson: The University of Arizona Press,. 154. 1971.

NUSSENZEIG, H. M. *Curso de física básica: ótica, relatividade e física quântica*. São Paulo: Edgard Blücher. Vol.4, 2002;

O Espectro Eletromagnético, regiões do espectro. Instituto de Física – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/oei/cgu/espec/intro.htm>> acesso em 10/05/2019.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M.. *Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente Radiológico de Goiânia*. São Paulo: Estud. av. vol.27 nº.77 , 2013;

PORTAL DA EDUCAÇÃO, *Interação de raios X com a matéria*, disponível no site: <https://siteantigo.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/medicina/interacao-de-raios-x-com-a-materia/35827>> acesso em 20/05/2018.

REITZ, J. R., MILFORD, F. J.,CHRISTY, R. W., *Fundamentos da Teoria Eletromagnética*, Editora Campus, 516 páginas, 1982;

RÖNTGEN, W. C.. *Annalen der Physik und Chemie*.64, 1, 1895.

RÖNTGEN, W. C.; *Rev. Gen. Sci.*, 7, 59, 1896.

SANTOS,C. A. (2002) *Conceitos Elementares de Raios X*. Instituto de Física. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)*. p1 disponível em <<https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/raiosx/rxconc.html>> acesso em 10 de outubro de 2019.

TIPLER, P. A. (1999). *Física*, Vol. 03, 4ª. Ed. New York, LTC, 1999.

VIANA, M. H. *Águas de Lindóia e a Celebração da Química*, 2015. Disponível em: <<http://www.s bq.org.br/38ra/noticia/aguas-de-lindoia-e-celebracao-da-quimica>>

ZILIO, S. C. *Difração*, 2007, disponível em:<<http://efisica.if.usp.br/optica/universitario/difracao/huygens/>>. Acesso em 10/02/2020.
