

MNPEF

Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA – MNPEF**

JOSE MAILSON RAMOS FEITOSA

**ASPECTOS DA FÍSICA E SUA RELAÇÃO COM OS TRATAMENTOS
RADIOTERÁPICOS: UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO**

**TERESINA
2022**

JOSE MAILSON RAMOS FEITOSA

**ASPECTOS DA FÍSICA E SUA RELAÇÃO COM OS TRATAMENTOS
RADIOTERÁPICOS: UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO**

Dissertação de Mestrado/Produto Educacional apresentada à Coordenação do Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física MNPEF - Polo 26, da Universidade Federal do Piauí (UFPI) como requisito para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Física.

Linha de Pesquisa: Recursos Didáticos para o Ensino de Física.

Orientador(a): Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo

TERESINA

2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Sistema de Bibliotecas UFPI - SIBi/UFPI
Biblioteca Setorial do CCN

F297a Feitosa, José Mailson Ramos.
Aspectos da física e sua relação com os tratamentos
radioterápicos: uma abordagem para o ensino médio / José
Mailson Ramos Feitosa. – Teresina, 2022.
228 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Piauí.
Centro de Ciências da Natureza. Programa de Pós-Graduação
em Ensino de Física, Teresina, 2022.
Orientador: Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo.

1. Física das radiações. 2. Física Ensino e Aprendizagem.
3. Ensino médio. I. Araújo, Neuton Alves de. II. Título.

CDD 530.7

JOSE MAILSON RAMOS FEITOSA

**ASPECTOS DA FÍSICA E SUA RELAÇÃO COM OS TRATAMENTOS
RADIOTERÁPICOS: UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO**

Dissertação de Mestrado/Produto Educacional apresentada à Coordenação do Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física MNPEF - Polo 26, da Universidade Federal do Piauí (UFPI) como requisito para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Física, na Linha de Pesquisa Recursos Didáticos para o Ensino de Física.

Teresina (PI), _____ de _____ de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo – MNPEF/UFPI

Profa. Claudia Adriana de Sousa Melo – MNPEF/UFPI
Examinadora Interna

Profa. Dra. Disnah Barroso Rodrigues – DMTE/UFPI
Examinador(a) Externo(a)

Prof. Dr. Francisco Ferreira Barbosa Filho – MNPEF/UFPI
Suplente Interno(a)

Profa. Dra. Antonina Mendes Feitosa Soares – DMTE/UFPI
Suplente Externo(a)

Dedico este trabalho, em primeiro lugar, a Deus, fonte suprema de sabedoria e luz, e a minha família por todo o apoio genuíno e ímpar dispensado durante a jornada deste curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus professores do ciclo básico de ensino que foram essenciais nos primeiros passos de minha trajetória educacional, desde a alfabetização até o ensino médio. Também não esquecendo da confiança depositada em mim pela diretora-presidente do Colégio São Francisco (escola que trilhei toda minha trajetória do ensino básico), Aldenora Veloso Medeiros que, em alguns anos letivos, me concedeu bolsas de estudos para que eu pudesse continuar meus estudos naquela escola, referência em educação na cidade e região.

Agradeço à comunidade acadêmica do curso de Física na UEMA de São Luís – MA, pois contribuíram cada um à sua forma para o meu aprendizado e conclusão do referido curso.

Agradeço aos professores e colegas do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), pólo 52, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Blumenau, por todo o conhecimento adquirido no decorrer do tempo em que cursei disciplinas do referido Programa de Pós-Graduação, especialmente aos colegas Jean e Jadson pela parceria nas aulas, nas atividades acadêmicas, nos bate-papos, nos cafés no intervalo das aulas, não deixando aqui de mencionar, à época, o meu orientador Prof. Dr. Daniel Fagundes, que muito se dedicou a me conduzir aos primeiros passos da pesquisa e do Produto Educacional. Este momento foi extremamente importante para que eu apresentasse e aplicasse o projeto na instituição na qual, hoje, estou concluindo este curso.

Agradeço aos meu pais, Helena e Mário, pela dádiva da vida, por me ensinar desde cedo princípios éticos e morais tão necessários para uma vida em sociedade; pelo apoio e palavras de incentivo, por acreditar em meu potencial e proporcionar o aconchego familiar tão necessário nesse árduo desafio e trajetória.

Agradecer à minha tia Carmecita por todo o apoio desprendido a mim desde as fases iniciais até a conclusão deste curso. Sem ela, não seria possível ter logrado todas essas conquistas educacionais e pessoais até aqui, tens minha eterna gratidão.

Agradeço à minha esposa Alcirene, tão paciente e incentivadora desde a graduação até aqui. Suas palavras e atitudes tiveram impacto positivo, me encorajando a não me render às dificuldades, que, por vezes, têm sido presentes.

Agradeço às minhas avós Argenora (*in memoriam*) e Francisca (*in memoriam*) por todo carinho, cuidado e atenção, em especial à avó Argenora por toda paciência, dedicação na minha alfabetização e por sempre apoiar, torcer e rezar por mim.

Agradeço ao Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo, primeiramente por ter aceito o desafio de dar continuidade à orientação primeira deste estudo, pelo acompanhamento, dedicação, paciência e profissionalismo na condução da orientação do mesmo.

Ao MNPEF – Universidade Federal do Piauí (UFPI) por toda a responsabilidade e cuidado na condução deste programa de mestrado, acentuando a participação dos Prof. Francisco Barbosa (ex-coordenador do programa) e Prof. Dra. Cláudia Adriana (atual coordenadora do programa). Agradeço ainda ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)/ Ministério da Educação (MEC) – Código de Financiamento 001, por toda a organização, bolsa a mim conferida e pela oportunidade ofertada em cursar este mestrado.

Se ensinar significa facilitar a aprendizagem e se o modelo da narrativa não tem sido eficiente para alcançar tal objetivo, por que não o descartamos? Necessitamos apenas pensar sobre o que restou de todas as informações que recebemos na escola para concluirmos que o modelo da narrativa é deficiente. Algumas das disciplinas que cursamos parece que nunca existiram. Nada sobrou delas. Outras, como a Física, parecem levar as pessoas a dizer que nada aprenderam com elas. Por que, então, não calar a boca e deixar que os alunos falem? (MOREIRA, 2018, p. 85).

RESUMO

O tema Física das Radiações e suas aplicações, seja na medicina, na energia, na agricultura ou em outros campos do conhecimento, tem sido uma das temáticas previstas para ser abordada no currículo do ensino médio, o que pode ser constatado nos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino da Física – PCN (BRASIL, 2002), bem como, atualmente no documento Base Nacional Comum Curricular - BNCC (BRASIL, 2018a). A referida previsão, embora seja clara e necessária, esbarra em conteúdo que se entende ser complicado de se explorar por seu caráter pouco didático e não instigante, ou seja, no âmbito dos livros didáticos. Por outro lado, ao mesmo tempo em que se discute na literatura educacional, a exemplo dos documentos oficiais (PCN, BNCC), esta temática nos livros didáticos da Física aparece apenas como uma espécie de apêndice, tendo em vista seu caráter quase opcional, por ser pouco explorado. Assim, embora ocorram dificuldades, o enfoque desta temática no ensino da Física tem considerável relevância social, pois há inúmeras aplicações da mesma, por exemplo, na medicina, em que se pode trabalhar na perspectiva da interdisciplinaridade, ao se considerar o desenvolvimento de tecnologias médicas tão comuns e necessárias nos dias atuais. Isto posto, esta pesquisa é de abordagem qualitativa e tem como objetivo geral analisar as possibilidades de uma aprendizagem significativa de aspectos fundamentais da Física das Radiações Ionizantes aplicadas à Radioterapia a alunos da 3ª série do Ensino Médio, tendo como proposta uma Sequência Didática (Produto Educacional) na perspectiva da Pesquisa-ação. Para isso, como Produto Educacional, se desenvolveu e se aplicou uma Sequência Didática (SD) baseada em ensino e aprendizagem mais dinâmicos, com produção de significações dos conteúdos trabalhados, ao se considerar a interdisciplinaridade Física e tecnologia aplicada a partir da mediação de tal Produto Educacional e tecnologia aplicada à medicina. O Produto Educacional foi aplicado no decorrer de cinco encontros semanais, sendo que os quatro primeiros encontros, em decorrência da pandemia provocada pela COVID-19, ocorreram no formato ensino remoto e, o último, no presencial. Como instrumentos e técnicas de produção de dados, se fez uso da observação, dos questionários e das conversações dos grupos de *WhatsApp*. Por fim, a discussão e análise dos dados denotaram resultados satisfatórios, pois ficou evidenciado que os participantes desta pesquisa se sentiram motivados e desenvolveram significações, a partir das experiências vivenciadas durante a aplicação da Sequência Didática, acerca da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia, que no contexto de aprendizagem pela metodologia convencional (tradicional) apresentam diversas dificuldades, como, por exemplo, desmotivação e não reconhecimento da relevância social dessa temática. Nesta pesquisa, pôde-se observar que ocorreu exatamente o inverso: o aluno protagonista de seu aprendizado. Enfim, as ações planejadas e desenvolvidas durante os Encontros proporcionados pela SD impactaram não somente em um aprendizado significativo aos alunos, na medida em que se apropriaram de linguagem científica e resignificaram conceitos, mas, também no desenvolvimento da consciência professor/pesquisador no sentido de refletir sobre a sua prática pedagógica e, assim, repensar a organização do ensino de física.

Palavras-chave: física das radiações ionizantes aplicadas a radioterapia; ensino médio; aprendizagem significativa; metodologia da pesquisa-ação.

ABSTRACT

The Physics of Radiation and its applications, whether in medicine, energy, agriculture or in other fields of knowledge, has been one of the themes planned to be addressed in the high school curriculum, which can be seen in the National Curricular Parameters of the Teaching of Physics - PCN (BRASIL, 2002), as well as, currently in the document Base Nacional Comum Curricular - BNCC (BRASIL, 2018a). The mentioned forecast, although clear and necessary, comes up against content that is understood to be difficult to explore due to its not very didactic and not instigating nature, that is, in the scope of textbooks. On the other hand, at the same time that it is discussed in the educational literature, like the official documents (PCN, BNCC), this theme in Physics textbooks appears only as a kind of appendix, in view of its almost optional character, for be little explored. Thus, although there are difficulties, the focus on this theme in the teaching of Physics has considerable social relevance, as there are numerous applications of it, for example, in medicine, in which one can work from an interdisciplinary perspective, when considering the development of medical technologies so common and necessary today. That said, this research has a qualitative approach and its general objective is to analyze the possibilities of a meaningful learning of fundamental aspects of the Physics of Ionizing Radiations applied to Radiotherapy for students of the 3rd year of High School, having as proposal a Didactic Sequence (Educational Product) from the perspective of Action Research. For this, as an Educational Product, a Didactic Sequence (DS) was developed and applied based on more dynamic teaching and learning, with the production of meanings of the contents worked, when considering the interdisciplinarity of Physics and applied technology from the mediation of such Product Educational and technology applied to medicine. The Educational Product was applied over the course of five weekly meetings, with the first four meetings, due to the pandemic caused by COVID-19, taking place in the remote teaching format and, the last, in person. As instruments and data production techniques, observation, questionnaires and WhatsApp group conversations were used. Finally, the discussion and analysis of the data denoted satisfactory results, as it was evident that the participants of this research felt motivated and developed meanings, from the experiences lived during the application of the Didactic Sequence, about the Physics of Ionizing Radiations applied to Radiotherapy, that in the context of learning through the conventional (traditional) methodology, they present several difficulties, such as, for example, lack of motivation and non-recognition of the social relevance of this theme. In this research, it could be observed that exactly the opposite occurred: the student was the protagonist of his learning. Finally, the actions planned and developed during the Meetings provided by the SD impacted not only on a significant learning experience for the students, insofar as they appropriated scientific language and re-signified concepts, but also on the development of teacher/researcher awareness in the sense of reflecting about their pedagogical practice and, thus, rethink the organization of physics teaching.

Keywords: Physics of ionizing radiation applied to radiotherapy; High school; meaningful learning; Action research methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Radiografia da mão da esposa de Röntgen.....	30
Figura 2 – Espectro eletromagnético das radiações ionizantes e não ionizantes.....	33
Figura 3 – Representação de um reator nuclear.....	34
Figura 4 – Ilustração de um paciente administrado com radioisótopo e sendo mapeado com o cintilômetro.....	35
Figura 5 – Representação do tubo de vidro para experimento do Efeito Fotoelétrico.....	38
Figura 6 – Albert Einstein à época de 1905.....	39
Figura 7 – Representação do experimento para detecção do Efeito Compton.....	41
Figura 8 – Fotografia de rastros produzido pelo par na câmara de bolhas.....	43
Figura 9 – Ilustração da produção de pares e aniquilação.....	44
Figura 10 – Escala de Radiodensidade também conhecida como de Hounsfield. Os tons de cinza são apresentados mais bem distribuídos e especificados, quando comparados à tabela anterior.....	46
Figura 11 – <i>Bodyscan</i> em atividade numa estação de metrô.....	47
Figura 12 – Aparelho de radiografia aplicado às tubulações.....	47
Figura 13 – Ilustração do desenvolvimento desordenado de células através da displasia.....	50
Figura 14 – Tumor benigno e maligno.....	51
Figura 15 – Ilustração da proliferação de tumor do tipo invasivo.....	52
Figura 16 – Fotografia do acelerador linear e Representação de partes internas que compõem o acelerador.....	55
Figura 17 – Agulhas radioativas utilizadas no tratamento braquiterápico e paciente imersa num aparelho de TC para melhor análise do acompanhamento (c) TC do tórax com braquiterapia aplicada ao câncer de pulmão.....	55
Figura 18 – Fonte não selada de radiofármaco.....	56
Figura 19 – Acelerador Cíclotron- Estrutura de 670 toneladas que direciona os feixes de partículas: precisão milimétrica contra tumores.....	58
Figura 20 – Sala de Hadronterapia em Heidelberg - hospital universitário de Heidelberg.....	58
Figura 21 – Ilustração da dose recebida por um paciente em tratamento com terapia de prótons (esquerda) e radioterapia convencional (direita).....	60
Figura 22- Distribuição da atividade dos íons de carbono medida durante a irradiação.....	60
Figura 23 – Comparação entre o Tratamento do câncer de próstata com feixe de fótons de raio-X e prótons.....	61

Figura 24 – Ciclo básico da investigação-ação.....	68
Figura 25 – Vistas laterais dos prédios do CTBJ.....	71
Figura 26 – Arduíno conectado ao protótipo do PET/Scan e ao notebook (à esquerda), e o protótipo após projeto de acabamento (à direita)	76
Figura 27 – Imagem do simulador do Efeito Fotoelétrico utilizado na pesquisa.....	76
Figura 28 – Formação dos subgrupos no WhatsApp pelos participantes.....	78
Figura 29 – Momentos de reflexões das ideias centrais dos textos, pelos alunos.....	92
Figura 30: Simulação, pelos alunos, do funcionamento do aparelho PET/Scan através do protótipo.	
Figura 31 – Radiografia da mão da esposa de Röntgen.....	131
Figura 32 – Espectro eletromagnético das radiações ionizantes e não ionizantes.....	134
Figura 33 – Ilustração de um paciente administrado com radioisótopo e sendo mapeado com o cintilômetro.....	136
Figura 34 – Representação do tubo de vidro para experimento do Efeito Fotoelétrico.....	139
Figura 35 – Albert Einstein à época de 1905.....	140
Figura 36 – Representação do experimento para detecção do Efeito Compton.....	142
Figura 37 – Representação do experimento para detecção do Efeito Compton.....	145
Figura 38 – Fotografia de rastros produzido pelo par na câmara de bolhas.....	145
Figura 39 – Escala de Radiodensidade também conhecida como de Hounsfield. Os tons de cinza são apresentados mais bem distribuídos e especificados, quando comparados à tabela anterior.....	148
Figura 40 – <i>Bodyscan</i> em atividade numa estação de metrô.....	148
Figura 41 – Aparelho de radiografia aplicado às tubulações.....	149
Figura 42 – Ilustração do desenvolvimento desordenado de células através da displasia.....	151
Figura 43 – Tumor benigno e maligno.....	152
Figura 44 – Ilustração da proliferação de tumor do tipo invasivo.....	153
Figura 45 – Fotografia do acelerador linear e Representação de partes internas que compõem o acelerador.....	156
Figura 46 – Agulhas radioativas utilizadas no tratamento braquiterápico e paciente imersa num aparelho de TC para melhor análise do acompanhamento (c) TC do tórax com braquiterapia aplicada ao câncer de pulmão.....	156
Figura 47 – Fonte não selada de radiofármaco.....	157
Figura 48 – Acelerador Cíclotron- Estrutura de 670 toneladas que direciona os feixes de partículas: precisão milimétrica contra tumores.....	159

Figura 49 – Sala de Hadronterapia em Heidelberg - hospital universitário de Heidelberg....	159
Figura 50 – Ilustração da dose recebida por um paciente em tratamento com terapia de prótons (esquerda) e radioterapia convencional (direita).....	161
Figura 51 – Visualização do feixe dentro paciente através de imagens originadas por PET.	161
Figura 52 – Comparação entre o Tratamento do câncer de próstata com feixe de fótons de raio-X e prótons.....	162
Figura 53 – Imagem do simulador do Efeito Fotoelétrico utilizado na pesquisa.....	165
Figura 54 – Compton demonstrando a equação do efeito Compton desenvolvida por ele....	166
Figura 55 – Representação do Espalhamento Compton.....	168
Figura 56 – Simulação do efeito fotoelétrico e recepção dos elétrons na placa receptora, produzindo corrente elétrica.....	169
Figura 57 – Imagem do primeiro pósitron identificado por Carl Anderson.....	170
Figura 58 – Ilustração da produção do par elétron-pósitron.....	171
Figura 59 – Ilustração da aniquilação do par elétron-pósitron.....	171
Figura 60 – Representação dos comprimentos de ondas e frequências com atenção à dos raios X.....	172
Figura 61 – O efeito fotoelétrico.....	173
Figura 62 – O efeito Compton produzido a partir de uma colisão fóton de raios X com um elétron.....	174
Figura 63 – Wilhelm Conrad Röntgen, fotografia tirada em 1896.....	176
Figura 64: Dois tubos de descarga utilizado por Röntgen.....	176
Figura 65 – Tubo de Crookes, no qual fora obtido os primeiros Raios X.....	176
Figura 66 – Escala de Radiodensidade também conhecida como de Hounsfield.....	178
Figura 67 – Paciente recebendo radiação através do aparelho radioterápico.....	180
Figura 68 – Dimensão de tamanho de uma das alas do LHC em comparativo com o cientista.....	181
Figura 69 – Acelerador Cíclotron- Estrutura de 670 toneladas que direciona os feixes de partículas: precisão milimétrica contra tumores.....	183
Figura 70 – Sala de Hadronterapia em Heidelberg – Hospital Universitário de Heidelberg..	183
Figura 71 – Ilustração da dose recebida por um paciente em tratamento com terapia de prótons (esquerda) e radioterapia convencional (direita).....	185
Figura 72 – Tratamento de tumor craniano com fótons (imagem à esquerda, utilizando IMRT) e com íons de carbono (imagem à direita, utilizando dois campos de irradiação).....	185

Figura 73 – Retrocesso patológico em um paciente com tumor craniano tratado por íons de carbono.....	186
Figura 74 – Comparação entre o Tratamento do câncer de próstata com feixe de fótons de raio-X e prótons.....	186
Figura 75 – Simulação, pelos alunos, do funcionamento do aparelho PET/Scan através do protótipo.....	188
Figura 76 – Imagem do protótipo visto de cima.....	190
Figura 77 – Imagem do circuito elétrico com resistores.....	191
Figura 78 – Protótipo com circuito elétrico completo.....	192
Figura 79 – Acelerador linear de partículas.....	193
Figura 80 – Acelerador de partículas ciclotron.....	194
Figura 81 – Representação de um radiofármaco se ligando ao alvo (célula) a fim de gerar cintilância e imagens.....	195
radiográficas.	
Figura 82 – Laboratório de produção de radiofármacos (à esquerda) e radiofármaco pronto para transporte e preparação no momento do uso (à direita).....	194
Figura 83 – Aparelho PET Scan utilizado em procedimentos radiológicos por imagem.....	197
Figura 84 – Esquema de detecção de radiação gama pelos sensores do aparelho PET Scan.....	198

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre os tipos de radioterapia: convencional e hadronterapia	61
Quadro 2 – Esboço dos encontros formativos/aulas e suas respectivas ações, formato de aplicação, carga horária e data da pesquisa de campo.....	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Faixas de energia (para os três fenômenos) relacionando-se com o número atômico do material.....	36
Gráfico 2: Representação da dose de radiação <i>versus</i> profundidade da dose nos tecidos.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de atenuação para 60 KeV e densidade de alguns materiais importantes para raios X na medicina imagiológica.....	45
Tabela 2 – Relação dos tecidos às unidades de HU e o tom de cinza associado.....	46
Tabela 3 – Centros especializados em Hadronterapia até o ano 2005.....	59
Tabela 4 – Relação entre a estrutura física e suas correspondentes áreas.....	72
Tabela 5 – Coeficiente de atenuação para 60 KeV e densidade de alguns materiais importantes para raios X na medicina imagiológica.....	146
Tabela 6 – Relação dos tecidos às unidades de HU e o tom de cinza associado.....	147
Tabela 7 – Centros especializados em Hadronterapia até o ano 2005.....	160
Tabela 8 – Coeficiente de atenuação para 60 KeV e densidade de alguns materiais importantes para raios X na medicina imagiológica.....	177
Tabela 9 – Centros especializados em Hadronterapia até o ano 2005.....	184

LISTA DE SIGLAS

AVC	Acidente Vascular Cerebral
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
CTBJ	Colégio Técnico de Bom Jesus
DNA	Ácido desoxirribonucleico
EaD	Ensino à Distância
EPEF	Encontro de Pesquisa em Ensino de Física
EUA	Estados Unidos da América
FN	Física Nuclear
HU	Escala de Hounsfield
IMRT	Radioterapia de Intensidade Modulada
INCA	Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva
LDB	Lei de Diretrizes e Bases da educação nacional
LET	Transferência de Energia Linear
LED	Light Emitting Diode
LHC	Large Hadron Collider
MEC	Ministério da Educação
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais
PCN	Plano Curricular Nacional
PET	Tomografia por Emissão de Pósitrons
PROEP	Programa de Expansão do Ensino Profissionalizante
RBE	Efeito Biológico Relativo
Scan	Escaneamento
SD	Sequência Didática
SEDUC	Secretaria de Educação e Cultura do Piauí
SNEF	Simpósio Nacional de Ensino de Física
SPCET	Tomografia por emissão de fóton único
TC	Tomografia Computadorizada
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
TICS	Tecnologias da Informação e Comunicações
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
UFPI	Universidade Federal do Piauí

UNICAMP Universidade Estadual de Campinas

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

@ – Arroba

μ – Mi

Bq – Becquerel

C – Coulomb

c – Velocidade da luz

E – Energia

eV – Elétron volt

Gy – Gray

h – Constante de Planck

kg – Quilograma

m – Massa

M – Mega

p – Momento linear

R – Röntgen

s – Segundo

V – Volt ou Tensão elétrica

θ – Teta

λ – Lambda

v – Ni

π – Pi

Φ – Fi

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 RAIOS X: DA DESCOBERTA ÀS SUAS APLICAÇÕES.....	27
2.1 Contexto histórico da descoberta dos raios x.....	27
2.2 Radiações ionizantes e não ionizantes.....	32
2.2.1 Interação da radiação com a matéria: efeito fotoelétrico, Compton e produção por pares.....	35
2.3 Coeficientes de atenuação e escala de Hounsfield.....	44
2.4 Raios X e suas aplicações na indústria e medicina.....	46
3 RADIOTERAPIA CONVENCIONAL E HADRONTERAPIA.....	49
3.1 Formação de uma célula cancerígena.....	49
3.2 Doses de radiação aplicadas a tumores.....	52
3.3 Radioterapia convencional à base de raios X e fótons.....	53
3.4 Hadronterapia à base de prótons e íons de carbono.....	56
3.4.1 Aceleradores utilizados na Hadronterapia.....	57
4 APRESENTANDO A PESQUISA-AÇÃO NA PERSPECTIVA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA NO ENSINO DA FÍSICA.....	63
4.1 Aprendizagem significativa na perspectiva de Ausubel e suas aplicações no ensino da Física.....	63
4.2 Pesquisa-ação e suas possibilidades no ensino de Física.....	66
5 PERCURSO METODOLÓGICO DA PESQUISA.....	70
5.1 Caracterização da pesquisa.....	70
5.2 Campo empírico da pesquisa.....	71
5.3 Colaboradores/participantes da pesquisa.....	73
5.4 Técnicas e instrumentos de produção de dados.....	73
5.5 Procedimentos de análise de dados.....	79
5.6 Produto educacional.....	83
6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS EMPÍRICOS.....	84
6.1 Reconhecendo os conhecimentos prévios dos alunos sobre a Física aplicada à radioterapia.....	84

6.2 O movimento de elaboração e desenvolvimento da Sequência Didática (Produto Educacional) como base para o aprendizado significativo da Física das radiações ionizantes aplicada à radioterapia	91
6.3 Significações desenvolvidas pelos alunos sobre as potencialidades do Produto Educacional (SD).....	104
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
REFERÊNCIAS.....	145

1 INTRODUÇÃO

A educação tem despontado ao longo do tempo como o termômetro que regula o quão intensamente a sociedade se modifica e contribui para a perpetuação ou dissolvimento de novas tendências em diversas áreas, sobretudo no campo da ciência.

Diante de tais avanços, ela tem sugerido um aprimoramento nos currículos escolares através de seus Planos Curriculares Nacionais, a exemplo dos Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN (BRASIL, 2002). Atualmente, temos a Base Nacional Comum Curricular – BNCC (BRASIL, 2018a), tal documento normativo e obrigatório é a Base de referência para elaboração dos currículos da educação básica, desde a educação infantil ao ensino médio.

Sobre esta problemática dos currículos escolares, segundo Araújo (2015), problemas como carência de formação de professores de Física implica no imprevisto das aulas desta disciplina, e um ensino voltado a cálculos, dificultando o aprendizado por parte dos alunos. Outros problemas como carga horária reduzida para a disciplina também dificulta a boa exposição e mediação dos conteúdos trabalhados; outro fator não menos importante, é a questão salarial docente, o que suscita a necessidade em laborar em diversas escolas, e com isso, reduzir o tempo necessário a uma boa organização e planejamento da aula.

Há outros problemas também associados aos próprios alunos, como dificuldade na compreensão/interpretação de textos e linguagem matemática, o que torna o aprendizado mais difícil. Assim, dificuldades são as mais distintas. Elencamos apenas algumas delas, podendo ocorrer variações de acordo com o público estudantil ou estrutura e organização escolar.

No que tange às previsões de competências e habilidades presentes nos documentos oficiais como PCN e na própria Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional – (BRASIL, 1996), são estabelecidos os conteúdos do que devem ser trabalhados nas etapas educacionais, no caso deste estudo, do ensino médio. Segue a citação do que aponta alguns dos documentos.

A esse respeito, a BNCC (BRASIL, 2018a) contempla na área *Ciências da Natureza e Suas Tecnologias no Ensino Médio: Competências Específicas e Habilidades*, que o ensino de Física deve contemplar tópicos relacionados à Física ao se considerar a *Competência Específica 1 (Matéria e Energia)*, entre eles as radiações ionizantes, conforme é comentado:

[...] Dessa maneira, podem-se estimular estudos referentes a: estrutura da matéria; transformações químicas; leis ponderais; cálculo estequiométrico; princípios da conservação da energia e da quantidade de movimento; ciclo da água; leis da termodinâmica; cinética e equilíbrio químicos; fusão e fissão nucleares; espectro eletromagnético; efeitos biológicos das radiações ionizantes; mutação[...]. (BRASIL, 2018a, p. 554).

Como explícito nesta citação, o tema “efeitos biológicos das radiações ionizantes” inclui a possibilidade de aplicações metodológicas voltadas ao tratamento cancerígeno, com enfoque na Física Moderna, interdisciplinarmente com a Biologia Celular e Molecular, tão importantes no desenvolvimento dos tratamentos radioterápicos, bem como na criação e aperfeiçoamento dos aparelhos.

Com esse entendimento, fica evidenciada a necessidade da inserção dos alunos num ambiente escolar (ou extraescolar) em que eles possam observar a Física como uma ciência que se relaciona diretamente com a Medicina, contribuindo, dessa forma, no processo de conscientização da qualidade de vida e saúde da sociedade.

Ademais, a Física apresenta um papel central no desenvolvimento de aparelhos e técnicas que são empregadas na medicina, no tratamento de câncer, através do estudo da Física das radiações ionizantes. Além disso, ela também está presente nos tratamentos, sendo o radioterápico uma possibilidade do tratamento de câncer, podendo haver tratamentos quimioterápicos e/ou cirúrgicos direcionados a cada tipo de paciente em particular, a depender da região envolvida e evolução da patologia.

É importante esclarecer que, como explicita Teles (2006), a Radioterapia é uma modalidade clínica que trata do uso de radiações ionizantes no tratamento de pacientes com neoplasias malignas ou, ocasionalmente, benignas.

Há dois tipos de tratamento empregados em células cancerígenas: Radioterapia e a Hadronterapia. A Radioterapia emprega deposição de doses de raios X nas células cancerígenas, enquanto que a Hadronterapia utiliza prótons ou íons de carbono (a depender da especificidade da região a ser tratada), normalmente é utilizada em regiões delicadas, como o cérebro, em que se objetiva uma deposição mais precisa, a fim de evitar lesão em tecidos saudáveis (BURIGO, 2011).

Com propósito de se aprofundar essa discussão, são apresentadas e discutidas ao se recorrer à Revisão da Literatura acerca desta temática, alguns estudos e pesquisas. Na verdade, foram consultados Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC), Dissertações de Mestrado e Teses de Doutorado, ao se considerar o recorte temporal: 2010 – 2020. Para tanto, realizaram-se buscas livres no *Google Scholar* e no sítio do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

Assim, dentre os 20 trabalhos que foram localizados através do mecanismo de busca através do sítio do Google Acadêmico e buscando por expressões chaves como “física das radiações”, “física aplicada à radioterapia”, “física aplicada à medicina” e “física nuclear”. Apesar de ter realizado uma busca extensa, resultou que somente 05 deles estão voltados à temática Radioterapia aplicada ao Ensino de Física, os quais passamos a tecer comentários.

O 1º trabalho “*Aprendizagem Significativa crítica de tópicos de Física Nuclear por meio de aula de campo*” (SOUSA, 2012). Tem como objetivo geral: investigar o uso de aulas de campo como estratégia favorável à promoção da aprendizagem significativa como atividade crítica na compreensão de conceitos de FN. Trata-se de uma pesquisa de campo com o Tema Física Nuclear, realizada em uma turma de 30 alunos da 3ª série do ensino médio de uma escola estadual de Cuiabá/MT. A pesquisa é de caráter qualitativo e utilizou-se da Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e de Marcos Moreira.

De acordo com os resultados da pesquisa, para Sousa (2012), por mais que se tenha uma constante interação entre as atividades humanas e os fenômenos da Física Nuclear (FN), fundamentado em Sousa e Valente *et al* (2008, p. 14), estes são pouco explorados nos livros de Física do Ensino Médio: “nenhum dos textos traz elementos suficientes às discussões das questões sociais atuais” que envolvem aspectos desta área do conhecimento.

Sobre o 2º trabalho “*O ensino de conceitos do eletromagnetismo, óptica, ondas e física moderna e contemporânea através de situações na medicina*” (PARISOTO, 2011), tem como objetivo geral buscar subsídios para como ensinar teorias físicas em cursos para professores e futuros professores de Física do Ensino Médio e para pessoas que utilizam radiações ionizantes no trabalho, de forma potencialmente significativa, utilizando, para isso, tópicos de Eletromagnetismo, Ondas, Óptica, Física Moderna e Contemporânea aplicados à Medicina, tendo como fundamentação a Teoria de Aprendizagem Significativa de Ausubel (Ausubel, 2002), a Teoria de Aprendizagem Significativa Crítica (Moreira, 2005), a Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud (1990) e a epistemologia de Toulmin (1977).

Dentre outros resultados, a pesquisa desenvolvida por Parisoto (2011) revelou que: o ensino de Física aplicado na Medicina constitui, ainda, uma área pouco investigada; poucas propostas didáticas têm sido implementadas e avaliadas; os conhecimentos prévios são pouco investigados na Física aplicada à Medicina; o fator tempo parece ser relevante na aprendizagem; as metodologias diferenciadas facilitam o surgimento de indícios de aprendizagem significativa; o uso de simulações computacionais, juntamente com atividades experimentais facilita a aprendizagem significativa; mostra-se importante a existência de questões orientadoras para o desenvolvimento das simulações computacionais; o professor

precisa explicar o conteúdo antes de realizar as leituras orientadas e os estudos em grupo; quanto mais detalhado é o material, maiores são os indícios de aprendizagem significativa.

Quanto ao 3º trabalho “*Visitas ao setor de radiologia hospitalar como um recurso potencialmente significativo para o ensino de radiações ionizantes*” (BORTOLI, 2017), este tem como objetivo geral desenvolver uma estratégia de ensino, voltada à aprendizagem significativa, utilizando as visitas técnicas ao setor de radiologia hospitalar, com um recurso potencialmente significativo para o ensino das radiações ionizantes. De acordo com este autor, na expectativa de apoiar outros professores que tenham interesse em trabalhar o tema radiações ionizantes, ao final da dissertação foi gerado como produto educacional uma sequência didática em oito aulas, que envolveram a preparação prévia da visita técnica ao setor de radiologia hospitalar, a visita em si, e a abordagem posterior para consolidação dos conteúdos.

O 4º trabalho “*Raios-X e Radioterapia: Uma Oficina temática para abordar conceitos de Radiações e Radioatividade no Ensino Médio na Perspectiva da Contextualização*” (GONZATTO, 2020) tem como objetivo geral: desenvolver uma Oficina Temática para abordar o conteúdo sobre Radiações e Radioatividade, na perspectiva da contextualização, com estudantes do Ensino Médio de uma escola pública. Através da análise dos questionários respondidos pelos estudantes com relação ao conteúdo sobre Radiações e Radioatividade e dos materiais produzidos por eles ao longo do desenvolvimento do trabalho permitiu inferir que o aprendizado dos alunos apresentou avanços significativos com o emprego da metodologia de ensino por meio de Oficinas Temáticas. Esta estratégia metodológica propiciou a construção de novos conhecimentos por parte dos estudantes e contribuiu para que desenvolvessem novas formas de estudar Química.

Finalmente, o 5º trabalho “*Física Médica aplicada ao Ensino de Física das Radiações: Um relato de experiência na criação e aplicação de uma Sequência Didática para o ensino médio utilizando TICS*” (OLIVEIRA, 2018), que tem como objetivo geral abordar o desenvolvimento de uma sequência didática para o ensino de Física das Radiações tomando como base a aplicação na Medicina. Foi realizada com a utilização das Tecnologias da Informação e Comunicações (TICS), na qual se fez uso de simulações computacionais, slides e vídeos, que culminou na criação de um site de código aberto produzido pelos alunos. As metodologias de aprendizagem utilizadas foram a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e auxiliada pelos Mapas Conceituais de Joseph Novak.

Foi possível, portanto, observar um ganho significativo, por parte dos alunos, quando o conteúdo de Física das Radiações foi desenvolvido com a utilização das Tecnologias da

Informação e Comunicação. Outro aspecto que merece ser destacado é o fato de que a abordagem de Física Moderna e Contemporânea se torna cada vez mais difícil, pois a BNCC passa a definir o que as escolas precisam priorizar, excluindo cada vez mais conteúdos que fogem do seu foco: as necessidades do mundo do trabalho.

Diante do exposto, delimitando esta pesquisa/Produto Educacional, para o trabalho com alguns tópicos da Física presentes nos tratamentos radioterápicos, a exemplo da Física das radiações ionizantes. No entanto, avança nessa temática, pois aborda o conteúdo através da metodologia Pesquisa-ação, alinhada à Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. Na verdade, o que esta pesquisa traz de novo é a própria disposição da Sequência Didática que foi produzida com a finalidade de potencializar a aprendizagem no momento de aulas remotas, oriundas das necessidades provocadas pela pandemia causada pelo novo coronavírus (COVID – 19).

Esse momento em que vivenciamos, provocado pela pandemia, levou a refletir sobre o déficit educacional que tem ocorrido nas escolas públicas de Ensino Médio. Além disso, por meio desse olhar crítico da educação e das boas práticas do processo de ensino e aprendizagem que me fez despertar desde cedo a necessidade de enveredar pela/na pesquisa, o que me levou a cursar o Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

Me formei em Física (Licenciatura) pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), pólo: São Luís/MA, no ano de 2014, com o TCC intitulado “*Teoria da Relatividade Restrita: aspectos históricos*”. Desde então despertou em mim o interesse na pesquisa, buscando uma pós-graduação que me proporcionasse a possibilidade de ser um pesquisador.

Nesse sentido, vale destacar que o tema ensino em Física Médica surgiu a partir de uma palestra ministrada em um seminário de Física, na época, graduando na UEMA. O palestrante falava desse campo de estudo ligado à Física e das possibilidades de trabalho provenientes das especializações na área.

Isto posto, diante das dificuldades em abordar tal temática no Ensino Médio, ou seja, os conteúdos da Física da Radioatividade aplicada aos tratamentos de câncer, surgiu a ideia de pesquisar e desenvolver um Produto Educacional, nas perspectivas da Pesquisa-ação, somando-se à Aprendizagem Significativa de David Ausubel a alunos da 3ª série.

Vale reforçar que os livros didáticos trazem conteúdo pouco abrangente acerca dessas temáticas, como foi constatado na revisão de literatura, incluindo os cinco trabalhos analisados. Nesse sentido, este estudo torna-se relevante pela necessidade que apresenta de se reformular os currículos, aprofundando a discussão sobre a temática Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia, no Ensino Médio.

Sobre esta problemática, de acordo com o Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (BRASIL, 1999, p. 59),

A Física deve apresentar-se, portanto, como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construídos.

Desse modo, é de salutar importância produzir um ambiente que propicie a possibilidade de o aluno observar a estrita relação entre ciência e tecnologia e que diante disso ele possa desenvolver seu senso crítico.

Portanto, diante das inquietações oriundas das lacunas deixadas na minha formação acadêmica, seja na educação básica ou superior, na disciplina Física e ainda por considerar a minha vivência enquanto docente deste campo de saber ao longo dos últimos 13 anos, surge o **problema desta pesquisa** (ou questão norteadora): Quais as possibilidades de uma aprendizagem significativa de aspectos fundamentais da Física das Radiações Ionizantes aplicadas à Radioterapia a alunos da 3ª série do Ensino Médio, tendo como proposta uma Sequência Didática na perspectiva da Pesquisa-ação?

Desta forma, se elencou como **objetivo geral**: Analisar as possibilidades de uma aprendizagem significativa de aspectos fundamentais da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia a alunos da 3ª série do Ensino Médio, tendo como proposta uma Sequência Didática (Produto Educacional) na perspectiva da Pesquisa-ação. E, como **objetivos específicos**: a) Identificar os conhecimentos prévios dos participantes da pesquisa acerca da Radiação aplicada à Radioterapia; b) Desenvolver uma Sequência Didática (Produto Educacional) com potencialidades para servir como base para o aprendizado significativo da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia; c) Reconhecer as significações desenvolvidas pelos alunos, sobre a Sequência Didática.

Nesse sentido, se espera que este estudo e Produto Educacional possa contribuir na superação de paradigmas conservadores que apresentam a Física Radioativa apenas com seus malefícios à sociedade. Nessa perspectiva, se pretende esclarecer e difundir um tipo de tratamento radioterápico pouco conhecido no Brasil: a Hadronterapia.

Os ganhos apresentados à sociedade serão imensuráveis, tanto do ponto de vista social quanto científico e poderão determinar diretrizes a órgãos vinculados à educação para a produção de novos livros didáticos aplicados ao Ensino Médio, com foco numa Aprendizagem Significativa e servirá como material de apoio aos professores de Física, em especial do Piauí, para desenvolvimento de suas atividades pedagógicas relacionados à

temática, tendo em vista o produto didático ser de fácil e livre aquisição e o trabalho apresentar viabilidade para ser implementado no ambiente escolar.

Feitas as considerações, além da Introdução e das Considerações Finais, esta Dissertação apresenta outras 6 seções.

Na Seção 2 – **RAIOS X: DA DESCOBERTA ÀS SUAS APLICAÇÕES** –, inicialmente, foi apresentado o contexto histórico da descoberta dos raios X. Em seguida, serão feitas reflexões teóricas sobre as duas categorias de radiação: ionizantes e não ionizantes, com destaque na interação da radiação com a matéria: efeito fotoelétrico, Compton e produção por pares. E, por último, uma breve discussão sobre os coeficientes de atenuação e escala de Hounsfield.

Na Seção 3 – **RADIOTERAPIA CONVENCIONAL E HADRONTERAPIA** –, foram apresentadas algumas características gerais em termos de estudos de formação do câncer, bem como de suas formas de tratamentos à base de radiações ionizantes: a tradicional Radioterapia e a Hadronterapia.

Na Seção 4 – **APRESENTANDO A PESQUISA-AÇÃO NA PERSPECTIVA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA NO ENSINO DA FÍSICA** –, foi apresentada a proposta teórico-metodológico deste estudo: a Pesquisa-ação. No entanto, inicialmente se trouxe reflexões sobre a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, por entender que a Pesquisa-ação está alinhada a tal perspectiva teórica.

Na seção 5 – **PERCURSO METODOLÓGICO DA PESQUISA** –, foi apresentado o percurso metodológico desta pesquisa e do Produto Educacional. Para tanto, inicialmente se caracteriza a pesquisa. Em seguida, é descrito o campo empírico da pesquisa. Posteriormente, são apresentados os colaboradores/participantes da pesquisa, as técnicas e instrumentos de produção de dados e os procedimentos de análise de dados. Por último, o Produto Educacional.

Na seção 6 – **ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS EMPÍRICOS** –, procedeu-se à análise e discussão dos dados empíricos produzidos para esta pesquisa.

Por fim, a Seção 7 – **CONSIDERAÇÕES FINAIS** –, em que se deu uma retomada em todo o movimento da pesquisa/Produto Educacional, apresentando respostas para o problema de pesquisa.

2 RAIOS X: DA DESCOBERTA ÀS SUAS APLICAÇÕES

A descoberta dos raios X trouxe ao mundo uma nova forma de enxergar os raios catódicos, até então estudado por diversos cientistas, dentre eles William Crookes através do tubo de Crookes. É importante frisar que até a sua descoberta e publicação, diversos cientistas vinham realizando experimentos sobre os efeitos da eletricidade em gases rarefeitos encerrados em tubos. Com o aperfeiçoamento das pesquisas, se pensou em estudar tais efeitos com menos ar presente nos tubos. Nesse contexto, que, em 1880, William Crookes realizava experimentos com seu tubo de Crookes e observou que uma chapa fotográfica ao lado havia sido velada. Chegou a pensar em ir reclamar onde as comprou, imaginou que havia adquiridas usadas. Mal sabia que naquele momento ele lançava os fundamentos para a investigação dos “raios misteriosos” que posteriormente viriam a ser explicados e impactariam consideravelmente o mundo científico (MARTINS, 1997).

Diante do exposto, nesta seção, inicialmente será apresentado o contexto histórico da descoberta dos raios X. Em seguida, serão feitas reflexões teóricas sobre as duas categorias de radiação: ionizantes e não ionizantes, com destaque na interação da radiação com a matéria: efeito fotoelétrico, Compton e produção por pares. E, por último, uma breve discussão sobre os coeficientes de atenuação e escala de Hounsfield.

2.1 Contexto histórico da descoberta dos raios X

Segundo Martins (1998), todos os livros de Física Moderna relatam que os raios X foram descobertos pelo físico alemão, William Röntgen em 1895. Todavia, se atribui ao acaso tal descoberta, diminuindo os méritos obtidos pelo cientista na consecução de sua engenhosa experiência com foco no desvendamento e entendimento desses raios, até então, misteriosos.

A esse respeito, alguns físicos contribuíram substancialmente para o entendimento dos raios catódicos, essenciais para a descoberta e entendimento dos raios X. Pode-se citar entre eles: Hertz, Lenard, Geissler, Julius Plücker, Hittorf, Goldstein (MARTINS, 1998).

Os físicos Hertz, em 1892, e seu aluno Lenard, foram os pioneiros a estudar a passagem de raios catódicos (encerrados dentro de tubos de descarga) ao ultrapassar folhas finas de metal externas ao tubo (HERTZ, 1892 *apud* MARTINS, 1998). É importante citar a engenhosidade de Lenard ao construir um tubo de raio catódico com uma abertura e contendo uma fina camada de alumínio por onde passavam os raios e era possível o estudo de seus efeitos por alguns poucos centímetros. Esses raios tinham a capacidade de sensibilizar chapas

fotográficas; talvez sendo o primeiro contato do cientista com os raios x, porém sem o direcionamento para o estudo e descoberta dos raios X.

Assim, é necessário entender nesse processo que os raios catódicos tiveram início a partir do desenvolvimento das bombas à vácuo, desenvolvidas por volta do século XIX, tendo o físico Geissler desenvolvido a bomba à mercúrio, em 1894, reduzindo a pressão atmosférica à ordem de 10^{-4} atm. Sequencialmente, Julius Plücker aperfeiçoou essa bomba conseguindo pressões ainda menores às já obtidas por Geissler.

Em 1869, Hittorf (aluno de Julius Plücker) observou, através de um cátodo em forma de fio, que partes escuras, sombras, eram formadas nas paredes do tubo de vidro, quando havia objetos sólidos inseridos em seu interior. Previu que algo saía do cátodo e se propaga em linha reta: a esses raios chamou de raios de brilho (*Glimmstrahlen*).

Sete anos depois, Goldenstein lhe atribui o nome de raios catódicos por serem oriundos do cátodo. A partir de então se passou a tentar definir com exatidão a natureza desses raios, devido a suas peculiaridades com outros já estudados e conhecidos na natureza. Na época, os cientistas já citados nessa secção imaginavam que se tratavam de ondas transversais com a capacidade de serem desviadas por um campo magnético (JAUNCEY 1945 apud MARTINS, 1998).

Segundo Santin Filho (1995), o físico e engenheiro mecânico William Röntgen nasceu aos 27 de março de 1845 na cidade de Lennep - Alemanha. Mudando-se aos três anos com seus pais para a cidade de Konrad, na Holanda. Para Martins (1997), ele estudou na Universidade de Utrecht em 1865, sequencialmente, foi estudar na Universidade de Zurich onde formou-se em engenharia mecânica em 1866 e três anos mais tarde concluiria seu doutoramento em Física.

De acordo com Francisco (2005), Röntgen fora convidado a permanecer com o Dr. August Kundt (orientador) como seu professor assistente na mesma Universidade na qual doutorou-se. Sendo transferido para Würzburg e, posteriormente, para Estrasburgo, onde, em 1874, leva consigo seu assistente Röntgen. Ambos trabalhando em física experimental, o que rendeu dezenas de publicações a Röntgen, tendo trabalhado em temas como condutividade térmica dos cristais, calor específico dos gases, modificação dos planos da luz polarizada por influências eletromagnéticas, dentre outros trabalhos.

Por não ter condições de implementar suas experiências, ele retornou a Estrasburgo como professor associado de Física Teórica, o que facilitou sua dedicação às pesquisas.

Röntgen deu início a uma nova fase em seus experimentos, quando começou a investigar os raios catódicos estudados por Lenard. Em 08 de novembro de 1895, em seu laboratório na Universidade de Würzburg, começou a investigar o que aconteceria se o tubo de raios catódicos (ampola de Crookes) fosse recoberta por papel cartão preto. Nesse momento, induziu a corrente elétrica através do tubo na tentativa de verificar se ocorria alguma mudança referente à alguma luminosidade produzida através do tubo. Verificou uma luminescência numa placa de platinocianureto de bário que estava numa mesa um pouco afastada do tubo; repetiu o experimento e observou que o mesmo resultado se repetia.

Como forma de ampliar a pesquisa ao fenômeno novo descoberto, Röntgen pôs diversos materiais entre o tubo e a placa, a exemplo de madeira, vidro, dentre outros. Notou que o mesmo fenômeno se repetia, com exceção ao colocar o chumbo ou a platina que barravam totalmente os raios catódicos (até então). Imaginou e experimentou uma chapa fotográfica como anteparo para visualizar estruturas rígidas, desta maneira pensou em estruturas ósseas (só investigadas através de cirurgias, até então). Na ocasião, convidou Anna Bertha (sua esposa) para participar do experimento e para sua felicidade conseguiu ver as estruturas ósseas das mãos.

Essa foi a primeira radiografia oficial do mundo, conforme apresentada na Figura 1. A partir desse momento, se descobria uma aplicação para os raios X.

Figura 1: Radiografia da mão da esposa de Röntgen.



Fonte: Francisco (2005).

Röntgen se propôs a investigar as origens dos novos raios misteriosos que produziam a luminescência. Constatou que a iluminância produzia sombras bem definidas e regulares, desta forma estabeleceu que se tratavam de raios de características diferentes dos produzidos por ondas eletromagnéticas, pois não sofriam desvios na presença do campo magnético, eram refratados ou refletidos; possuíam uma alta capacidade de penetração em superfícies opacas. Por não haver características de raios conhecidos, nomeou-os de “raios X”.

Henry Dam, jornalista americano, fora um dos poucos a entrevistar o físico Röntgen a cerca de sua “descoberta” dos raios X, ocorrida em janeiro de 1896. Abaixo seguem-se trechos da entrevista, com atenção à alguma interpretação imprecisa por conta da dificuldade em conversar num idioma comum (língua inglesa ou alemã), utilizando em partes da entrevista o idioma francês.

“Agora, Professor”, eu disse, “o senhor poderia me contar a história da descoberta?”

“Não há história”, ele disse. Eu estava interessado há muito tempo no problema dos raios catódicos em tubos de vácuo, estudados por Hertz e Lenard. Eu havia seguido suas pesquisas e as de outros com grande interesse e decidira que logo que tivesse tempo faria algumas pesquisas próprias. Encontrei esse tempo no final do último mês de outubro. Eu já estava trabalhando há alguns dias quando descobri algo de novo.”

“Qual foi a data?”

“Oito de novembro.”

“E o que foi a descoberta?”

“Eu estava trabalhando com um tubo de Crookes coberto por uma blindagem de papelão preto. Um pedaço de papel com platino-cianeto de bário estava lá na mesa. Eu tinha passado uma corrente pelo tubo, e notei uma linha preta peculiar no papel.”

“O que era isso?”

“O efeito era algo que só poderia ser produzido, em linguagem comum, pela passagem de luz. Nenhuma luz poderia provir do tubo, pois a blindagem que o cobria era opaca a qualquer luz conhecida, mesmo a do arco elétrico.”

“E o que o senhor pensou?”

“Eu não pensei; eu investiguei. Assumi que o efeito devia vir do tubo, pois seu caráter indicava que ele não poderia vir de nenhum outro lugar. Eu o testei. Em poucos minutos não havia dúvida sobre isso. Estavam saindo raios do tubo que tinham um efeito luminescente

sobre o papel. Testei-o com sucesso a distâncias cada vez maiores, até mesmo a dois metros. Ele parecia inicialmente um novo tipo de luz invisível. Era claramente algo novo, algo não registrado.”

“E luz?”

“Não.”

“É eletricidade?”

“Não em qualquer forma conhecida.”

“O que é?”

“Eu não sei.”

E o descobridor dos raios X armou assim tão calmamente sua ignorância sobre sua essência quanto todos os outros que tinham escrito até então sobre o fenômeno. “Tendo descoberto a existência de um novo tipo de raios, _e claro que comecei a investigar o que eles fariam." (DAM 1896, p.413 apud MARTINS, 1997, p.374).”

Dessa forma, percebe-se o caráter investigativo de Röntgen ao dar continuidade aos trabalhos iniciados por outros físicos que o antecederam; além da obtenção dos raios com aplicações médicas, outro ponto muitíssimo importante fora o estudo da natureza desses raios. Somente assim, pode-se dar continuidade a outras características presentes nos mesmos e estabelecer parâmetros importantes para o uso seguro dos raios e posterior aperfeiçoamento e desenvolvimento de novas tecnologias, dentre elas às da área médica (FRANCISCO, 2005).

2.2 Radiações ionizantes e não ionizantes

Segundo Okuno (2010), radiação é uma forma de manifestação da energia, podendo se apresentar na forma corpuscular ou ondulatória. Esse tipo de energia pode ser transmitido através do vácuo, ar ou meios materiais.

De acordo com Guzzo (2020), há radiações presentes em nosso planeta de modo ininterrupto, os seres humanos (caso específico) são atingidos a todo instante com radiações que não interferem de maneira maléfica no sistema de defesa humano, a exemplo dos

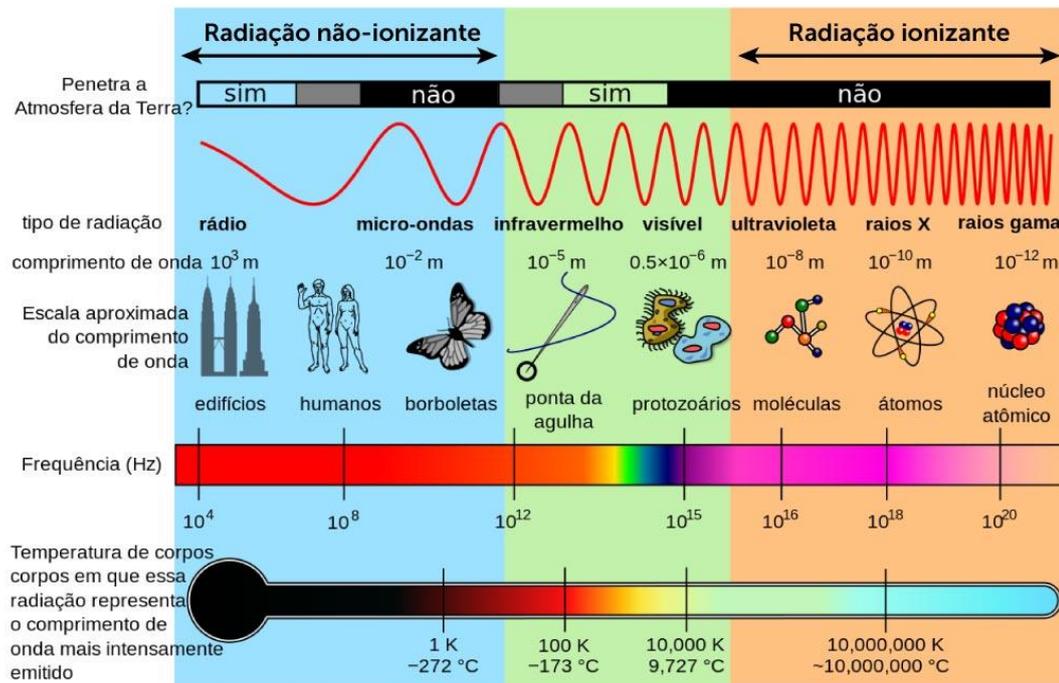
neutrinos¹, que atravessam o corpo humano a uma taxa de 50 bilhões de neutrinos por segundo.

A essas radiações de baixas frequência de vibração, energia e que não detêm poder de ionizar a matéria, ou seja, interagir de modo a arrancar elétrons das camadas eletrônicas do átomo, chamam-se de radiações não ionizantes. Como exemplo temos as radiações eletromagnéticas da luz visível (de frequência inferior a 3×10^{15} Hz e comprimento de onda superior a 100 nm^2), as ondas do infravermelho, micro-ondas, TV e rádio.

Ao passo que a radiação que detêm a capacidade de interagir com o átomo ou molécula, e nela seja possível a ejeção de elétron que esteja ligado à camada por forças eletrostáticas, denomina-se ionizante. Esse tipo de radiação se subdivide em radiações diretamente ionizante e indiretamente ionizante.

Radiação diretamente ionizante são as radiações causadas por partículas carregadas, a exemplo de prótons, elétrons, pósitrons, partículas alfas; enquanto a radiação indiretamente ionizante é descarregada eletricamente, como os fótons (raios X e gama) e nêutrons. Para ilustrar a classificação das radiações, é apresentada a Figura 2.

Figura 2: Espectro eletromagnético das radiações ionizantes e não ionizantes.



Fonte: Braun (2014).

¹ São partículas elementares leves, de massa infinitesimal e bem abundantes no espaço. São produzidas e radiadas pelo corpo humano ao mesmo tempo que este é atravessado por uma quantidade incontáveis delas.

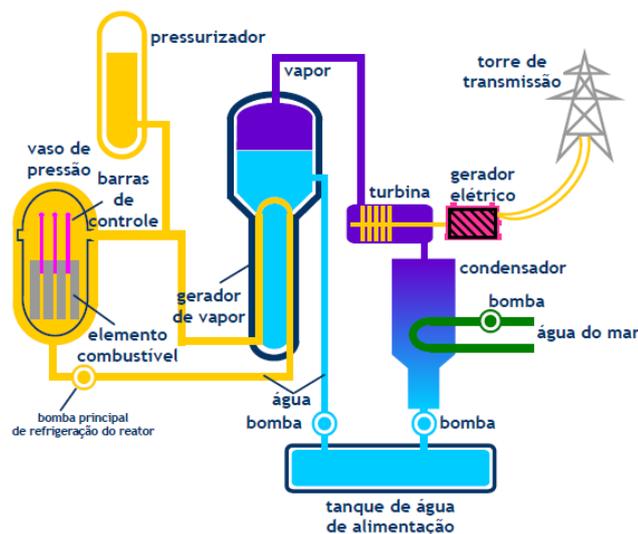
² O nm é um submúltiplo do metro que equivale a 10^{-9} m.

Nota-se um maior poder de ionização a partir do ultravioleta, com um aumento da frequência da oscilação e diminuição no comprimento de onda, que conferem um maior poder de penetração e, portanto, interferências na ordem das menores estruturas celulares e atômicas.

Um das aplicações radioativas é a Nuclear que pode ser dividida em duas: a Energia Nuclear e a Medicina Nuclear. A primeira delas se refere à capacidade de gerar energia elétrica através da fissão nuclear³ com o elemento Urânio-235 (^{235}U) dentro de um reator nuclear.

A seguir apresenta-se uma ilustração simplificada de como ocorre o processo desde a fissão no vaso de pressão até a energia elétrica chegando até as torres de transmissão (Figura 3).

Figura 3: Representação de um reator nuclear.



Fonte: Cardoso (2012).

A segunda aplicação Nuclear se refere à Medicina que utiliza radioisótopos⁴ para o diagnóstico e tratamentos de câncer. Estes, administrados ao paciente passam a produzir

³ É um processo nuclear produzido a partir de núcleos instáveis que se desintegram ao serem bombardeados por um nêutron e que resultam numa reação em cadeia.

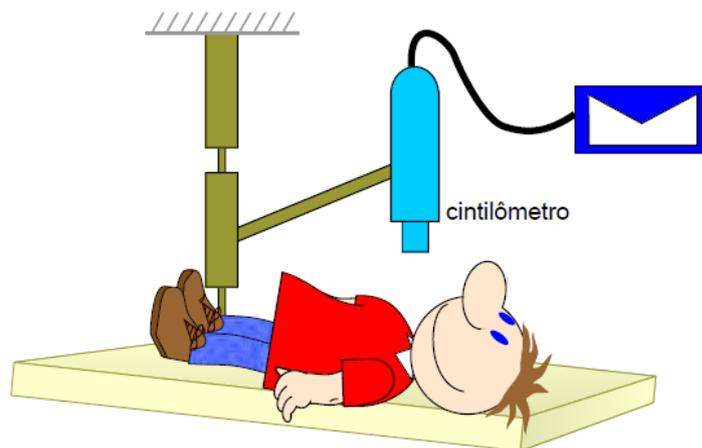
⁴ São elementos químicos radioativos utilizados em exames de diagnóstico e/ou tratamento de patologias, inclusive o câncer, com o objetivo de verificar o metabolismo de determinado órgão ou região do corpo.

radiação que é ligeiramente detectada pelos traçadores radioativos que realizam o papel de traçar/rastrear o percurso percorrido pelo radioisótopo na região irradiada.

O radioisótopo é formado por elemento químico que é biologicamente absorvido por algum órgão ou região do corpo humano, a exemplo do Iodo-131 que se liga à glândula tireóide, onde se fixa. Para diagnóstico, ao paciente é administrado uma dose de Iodo-131 que é absorvido pela glândula e realizada uma detecção com o traçador que verifica o padrão de absorção do radioisótopo pela glândula, desta forma determina-se se há alguma anormalidade, portanto, anomalia.

A seguir, se apresenta a Figura 4 com a ilustração de um paciente administrado com radioisótopo e sendo mapeado com o cintilômetro.

Figura 4: Ilustração de um paciente administrado com radioisótopo e sendo mapeado com o cintilômetro.



Fonte: Cardoso (2012).

É importante não esquecer de outras aplicações das radiações ionizantes em áreas como agricultura, atuando no controle de pragas e na conservação de alimentos, a exemplo de cebolas e batatas (CARDOSO, 2012).

O processo de radiação que produz a ionização são fenômenos explicados pela Física Moderna e tem efeitos importantes na produção de imagens, diagnósticos e tratamentos de patologias. Esses fenômenos serão explanados na seção abaixo.

2.2.1 Interação da radiação com a matéria: efeito fotoelétrico, Compton e produção por pares

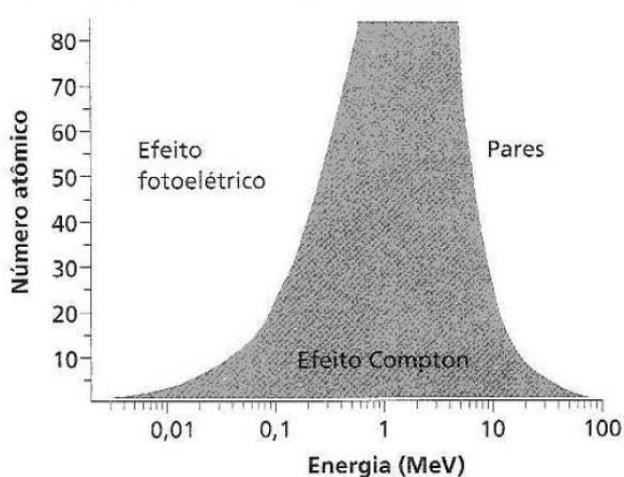
De acordo com Okuno (2010), ionização e excitação acontecem mediante a deposição de energia pela radiação ionizante na região incidente, o que acarreta interação com os elétrons do material alvo. Tais efeitos podem ser biológicos, desde que aplicados a algum tecido ou órgão. Radiações do tipo diretamente ionizante propiciam efeitos importantes no estudo dos efeitos biológicos, pois tem os fótons que podem interagir com os elétrons da molécula e do átomo.

Tais interações têm efeitos que dependem substancialmente da radiação emitida e do material alvo; interagem através de campos eletromagnéticos para interações fotônicas. As radiações do tipo *x* e *gama* interagem de modo estocástico⁵ com os tecidos, produzindo números insignificantes de interações durante sua transmissão pelo material. Os três principais fenômenos físicos relacionados à ionização e deposição de energia radioativa nos tecidos são: efeitos Fotoelétrico, Compton e Produção por pares.

Para cada um dos fenômenos citados há uma probabilidade de ocorrência na interação da radiação com a matéria que varia segundo o número atômico do material, energia do fóton e densidade do meio. Ou seja, a probabilidade de ocorrência do efeito Fotoelétrico num tecido ósseo e muscular são diferentes, variando em função da densidade de cada um desses tecidos. Esse tópico será melhor apresentado na secção seguinte.

Apresenta-se o Gráfico 1 que relaciona a probabilidade de manifestação dos três fenômenos na interação com a matéria.

Gráfico 1: Faixas de energia (para os três fenômenos) relacionando-se com o número atômico do material.



Fonte: Okuno (2010).

⁵ Estocástico é um padrão de ocorrências de dado evento de maneira indeterminado, ou seja, probabilística.

Neste gráfico, nota-se que, para baixas energias fotônicas e alto número atômico, há prevalência do efeito fotoelétrico, enquanto que para altas energias o efeito mais acentuado é o da produção por pares. Sobre estes efeitos, para uma discussão mais aprofundada do ponto de vista físico, comenta-se sobre cada um deles, separadamente.

Especificamente sobre o efeito Fotoelétrico, segundo Knight (2009), em 1886, Hertz foi o pioneiro a produzir ondas eletromagnéticas artificiais. Através de seus experimentos com bobinas e fios de cobre, pôde comprovar que as ondas de luz, produzida pelas centelhas, eram transmissíveis através do ar, corroborando a teoria de Maxwell que por meio de suas previsões e equações unificou duas áreas da Física até então distintas: a Ótica e o Eletromagnetismo. Hertz confirmou as propriedades das ondas de luz como reflexão, refração e polarização, previstas na teoria eletromagnética de Maxwell (TIPLER, 2014).

Naquela ocasião ele descobriu um fenômeno inesperado: observou que uma luz ultravioleta incidente sobre um eletroscópio negativamente carregado poderia ser descarregada pela ejeção de cargas negativas de sua superfície. Em 1889, Thomson demonstrou que as cargas negativas seriam os elétrons. A esse fenômeno nomeou-se de efeito fotoelétrico. Aos elétrons provenientes desse fenômeno passaram a se chamar fotoelétrons.

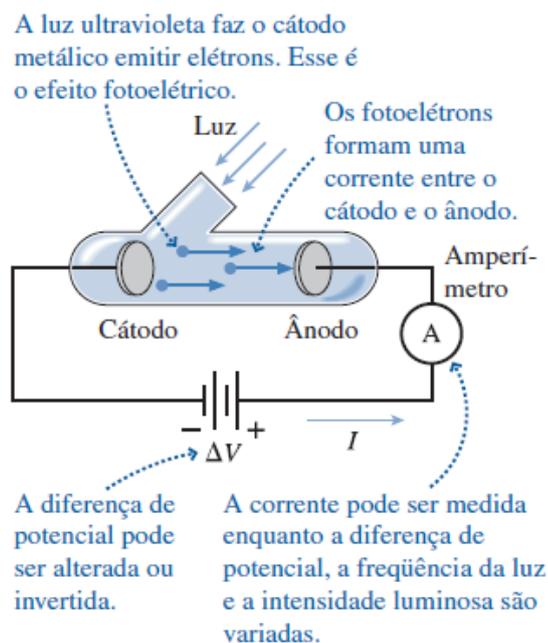
Em 1900, Phillip Lenard (discipulo de Hertz) realizou algumas observações e pôde perceber algumas características acerca do novo fenômeno. Observou que a corrente elétrica emitida a partir da ejeção de fotoelétrons variava em função do potencial de corte, da frequência e intensidade da luz incidente. Diante disto, Lenard, como afirmado por Knight (2009), enumerou os seguintes postulados:

1. A intensidade da corrente elétrica I é diretamente proporcional à da luz incidente;
2. A corrente elétrica I surge instantaneamente com a incidência da luz em cerca de $\sim 0,1$ s;
3. Fotoelétrons são ejetados a partir do momento em que a energia do fóton incidente supera a função trabalho W ;
4. A magnitude da frequência de corte depende do material (metal) irradiado;
5. A diferença de potencial ΔV , se for positiva, a corrente não varia com o aumento de ΔV ; caso seja negativa, a corrente decresce até atingir o valor nulo, o que configura o potencial de corte V_{corte} ;
6. O V_{corte} admite valor único e não varia com intensidades de correntes diferentes.

De acordo com a Teoria da Física Clássica, é necessário fornecer energia a um sistema para que ele emita uma nova forma de energia através da conservação de energia, ou seja, uma espécie de energia se convertendo em outra. No efeito fotoelétrico não é diferente, é necessário fornecer luz eletromagnética (radiação) além do ultravioleta para que *fotoelétrons* sejam ejetados do metal.

Com o propósito de ilustrar o efeito Fotoelétrico obtido por Lenard, se apresenta a Figura 5.

Figura 5: Representação do tubo de vidro para experimento do Efeito Fotoelétrico.



Fonte: Knight (2009).

A seguir, é apresentada a equação que rege as condições para a obtenção do fenômeno.

$$K_{máx} = K_e - W \quad (2.1)$$

Esta equação determina a energia mínima a fim de que os fotoelétrons possam ser emitidos a partir do material, sendo estabelecida pela diferença entre a energia fornecida pelo elétron K_e através da radiação e a função-trabalho W que depende de cada metal.

A função-trabalho W para ser atingida, depende de uma diferença de potencial ΔV estabelecida entre os eletrodos cátodo (-) e ânodo (+).

O potencial de corte é, assim, definido pela seguinte equação:

$$V_{corte} = \frac{K_{máx}}{e} \quad (2.2)$$

Logo, esse potencial de corte estabelece a energia máxima do elétron que irradia a superfície metálica.

É oportuno aqui destacar que, Albert Einstein, físico alemão, pesquisou sobre o Efeito Fotoelétrico, aos 26 anos, e depois de ter concluído seu doutorado no Instituto Politécnico de Zurique – Suíça, conseguiu um emprego no Escritório de Patentes de Berna. Lá ele tinha acesso a diversos artigos e trabalhos científicos, de tal forma que dispunha de tempo suficiente para pensar sobre os fenômenos Físicos (KNIGHT, 2009). Na Figura 6, tem-se Albert Einstein, à época de 1905.

Figura 6: Albert Einstein à época de 1905.



Fonte: Knight (2009).

Em 1905, considerado o ano miraculoso, Einstein lançou dois artigos que mudariam a história da Física. Um sobre a relatividade, e o segundo a respeito da radiação eletromagnética da luz. Neste segundo artigo ele propôs uma solução para explicar o Efeito Fotoelétrico estudado por Lenard. A ideia consistia em bases científicas desenvolvidas 05 anos antes pelo físico alemão Marx Planck que determinou a quantização da radiação térmica (energia térmica) emitida pelo corpo negro. Para Planck, a energia se apresentava em pacotes

discretos de energia a que ele chamaria de *quantum*. Determinou quanticamente a energia em múltiplos de uma grandeza, chamando-a de constante de Planck h .

$$E = 0, hf, 2hf, 3hf, \dots, \quad (2.3)$$

$$\text{Com } h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}.$$

Einstein baseou-se nas ideias de Planck sobre a quantização e determinou que a radiação eletromagnética da luz era análoga a da térmica e portanto, deveria obedecer à seguinte equação: $E = h \cdot f$. Ele passava a acreditar que a luz não era um espectro contínuo, mas descontínuo e se apresentava em pacotes discretos e definidos a que ele atribuiu de quantum de luz. Diante de tais ideias, ele pode contrapor as ideias clássicas de Lenard para explicar o fenômeno Fotoelétrico.

Baseado em tais ideias, Einstein pôde explicar as lacunas teóricas da Teoria de Lenard, baseadas na ainda Física Clássica. Na verdade, as discrepâncias eram duas: a da frequência limiar e a da instantaneidade da corrente elétrica.

A primeira se refere a uma frequência de limiar f_0 defendida por Lenard, o que não se evidenciou experimentalmente. Constatou-se que a mesma não existia, pois mesmo sofrendo variação, a ejeção de fotoelétrons existia. O que de fato existia era o potencial de corte. A segunda delas se origina da ideia defendida por Lenard de que os fotoelétrons se originavam de emissão de temperatura (fotoelétrons eram ejetados do material com o aumento da temperatura). Isso não se verificava na prática porque deveria haver um tempo até que o metal esquentasse para que pudessem ser emitidos os fotoelétrons a partir dele. O que se evidenciava era uma emissão quase que instantânea, levando-se a constatação de que não há dependência com a temperatura (KNIGHT, 2009).

Diante de tais inconstâncias, como citado por Knight (2009), Einstein explicou quanticamente o que ocorria no Efeito Fotoelétrico através de três postulados seguintes:

- A luz de frequência f consiste em quanta discretos, cada qual com energia $E = hf$. Cada fóton viaja à velocidade da luz c ;
- Os quanta de luz são emitidos ou absorvidos integralmente. Uma substância pode emitir 1, 2 ou 3 quanta, mas não 1,5 quantum. Analogamente, um elétron de um metal não pode absorver meio quantum, e sim, apenas um número inteiro deles;
- Um quantum de luz, quando absorvido pelo metal, transfere a totalidade de sua energia a *um único* elétron.

Por apresentar uma explicação satisfatória que condizia com os dados experimentais, Einstein foi laureado com o prêmio Nobel de Física em 1921 (KNIGHT, 2009). Delimitando o Efeito Compton, no ano de 1916, Einstein associou um *quantum* de luz ao momento linear de um fóton de energia, através da equação abaixo:

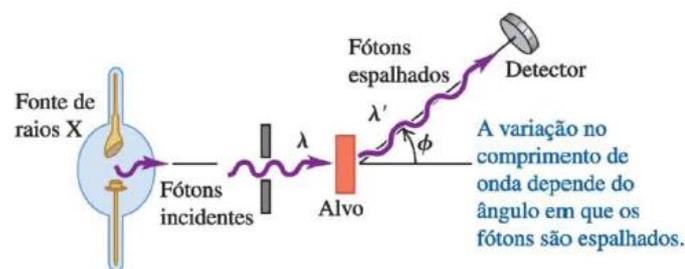
$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{momento linear do fóton}) \quad (2.4)$$

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.5)$$

Considerando, c é a velocidade da luz no vácuo e equivale a $\sim 3 \cdot 10^8$ m/s. Essa equação descreve o choque do fóton com um elétron do material atingido. A partir do instante da colisão, o fóton transfere parte de sua energia para o elétron, obedecendo os princípios clássicos de colisão.

O físico estadunidense Arthur Compton, em 1923, da Washington University, fez incidir um feixe de raios X sobre um elemento de carbono e como resultado obteve um comprimento de onda diverso do apresentado inicialmente pelo raio X ($\lambda = 71,1$ pm), com o $p = 10^{-12}$. Lembrando que o comprimento de onda espalhado λ' apresenta comprimento maior que o incidente e com dependência do ângulo de espalhamento (HALLIDAY, 2009, p. 191). A essa diferença de comprimentos de onda atribui-se a variável $\Delta\lambda$. Abaixo, com demonstrado na Figura 7, apresenta-se a ilustração do experimento de Compton.

Figura 7: Representação do experimento para detecção do Efeito Compton.



Fonte: Sears (2016).

Classicamente os raios X são ondas eletromagnéticas senoidais e deveriam transmitir toda a frequência, comprimento de ondas e propagação senoidal para o elétron alvo, mas não ocorre dessa forma.

Compton realizou seus cálculos levando em consideração as interações relativísticas combinadas com conservação da quantidade de energia e colisões, tendo em

vista de se tratar de um choque entre um fóton e um elétron do alvo (SEARS, 2016). Considerando a energia do fóton incidente como $E = h.f$, a do espalhado como $E' = h.f'$. As seguintes relações são válidas: $p = \frac{h.f}{c} = \frac{h}{\lambda}$; $E = m.c^2$; $p = m.c$; $E = p.c$

Idealizando a possibilidade do elétron está em repouso, de maneira que seu momento linear é zero e sua energia é $m.c^2$, após o choque ele passa a possuir momento linear P_e e energia $E_e^2 = (m.c^2)^2 + (p_e.c)^2$; e o fóton se move relativisticamente em direção ao elétron-alvo com momento linear p e energia inicial $p.c$, após o choque adquire momento linear p' e energia $p'.c$. Desta maneira, utiliza-se a conservação da energia e colisões a fim de dedução da equação do espalhamento de Compton.

$$p.c + m.c^2 = p'.c + E_e \quad (2.6)$$

Reorganizando os termos, chega-se à expressão abaixo

$$(p.c - p'.c + m.c^2)^2 = E_e^2 = (m.c^2)^2 + (P_e.c)^2 \quad (2.7)$$

Utilizando a Lei da Conservação do Momento Linear obtemos a seguinte relação:

$$p = p' + P_e$$

ou

$$P_e = p - p' \quad (2.8)$$

Aplicando a equação acima 2.8 com a lei dos cossenos, obtém-se:

$$P_e^2 = p^2 - p'^2 - 2.p.p'.\cos\theta \quad (2.9)$$

Substitui-se a equação 2.9 na 2.7. Coloca-se c^2 em evidência e divide-se tudo por $(p.p')$, obtendo a seguinte equação:

$$\frac{m.c}{p'} + \frac{m.c}{p} = 1 - \cos\phi \quad (2.1.0)$$

E aplicando-se as seguintes relações $p' = \frac{h}{\lambda'}$; $p = \frac{h}{\lambda}$ e multiplicando por $\frac{h}{m.c}$ na equação 2.1.0, obtém-se a equação do espalhamento.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \phi) \quad (2.1.1)$$

Postas as considerações da probabilidade de manifestação dos fenômenos na interação com a matéria, Efeitos Fotoelétrico e Compton, é chegado o momento de se discutir sobre o Efeito Produção por Pares.

De acordo com Sears (2016), tal fenômeno também é originário das interações dos raios X com a matéria, porém, predominante na faixa das altas energias. Ocorre quando um feixe de raios X inicialmente com energia de 1,022 MeV⁶, interage com o núcleo atômico de um átomo-alvo do receptor. O fóton (sem massa) desaparece completamente ao se aproximar do núcleo dando origem a um par elétron e pósitron⁷, com cargas (-) e (+), respectivamente. Tudo isso só é possível devido a Teoria da Relatividade Especial de Einstein que estabelece a relação $E = m.c^2$. Obedece também ao Princípio da Conservação da Energia e passa a ter 0,511 MeV para cada elemento do par.

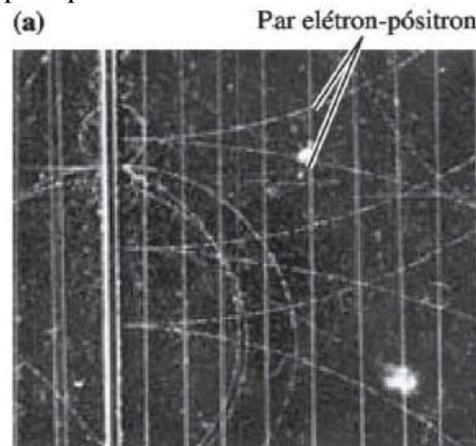
O processo invertido também acontece quando o pósitron gerado no evento anterior encontra outro elétron de um outro átomo em seu percurso e os dois se aniquilam. O que pode ser evidenciado pelo princípio da conservação de energia: $(-e) + (+e) = 0$.

Neste processo de aniquilamento há a produção de dois novos fótons (ou eventualmente três) que viajam diametralmente no espaço e somados retomam os 1,022 MeV iniciais do fóton de raios X. A seguir, fotografia da produção de pares e a ilustração do processo de produção e aniquilação, respectivamente, representadas nas Figuras 8 e 9.

⁶ MeV é uma unidade de medida da energia das partículas relativísticas.

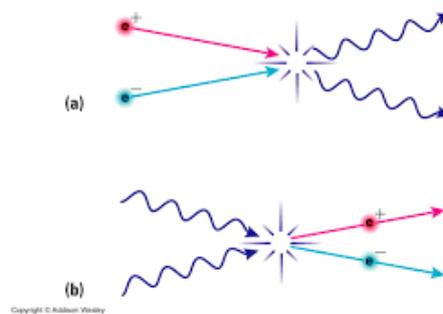
⁷ Pósitron é uma partícula de mesma massa do elétron e carga elétrica oposta.

Figura 8: Fotografia de rastros produzido pelo par na câmara de bolhas.



Fonte: Sears (2016).

Figura 9: Ilustração da produção de pares e aniquilação.



Fonte: Munhoz (s.d).

As figuras 8 e 9 representam um fenômeno físico imprescindível para a produção de imagens em exames de Medicina Nuclear, que produzem efeitos, como o de contrastes em aparelhos utilizados no diagnóstico e tratamento de células cancerígenas e que serão melhor discutidos em seções posteriores.

2.3 Coeficientes de atenuação e escala de Hounsfield

O espalhamento e absorção de raios X na matéria são propriedades que podem determinar desde o nível de energia empregada até o tipo de tecido irradiado, posteriormente, produzindo imagem através da Tomografia Computadorizada⁸ (TC), podendo ser mensuradas através do coeficiente de atenuação linear.

⁸ Tomografia computadorizada é um exame de imagens radiográficas que utiliza os raios X e algoritmos para produção de imagens mais detalhadas (permitindo uma diferenciação dos tecidos) que as radiografias convencionais.

No efeito fotoelétrico, o fóton é absorvido, enquanto no Compton, é espalhado, podendo contribuir para ruídos na imagem produzida, acarretando em perdas ou não na qualidade da imagem obtida na TC.

O efeito Compton diferencia os materiais de composições químicas diferentes, não obtendo tanto sucesso em tecidos moles, pois apresentam densidades semelhantes. Tendo a anatomia diferenciada pelo efeito fotoelétrico por atuar com baixas energias.

A interação dos fótons de raios X com o tecido corporal e a forma como cada um deles é absorvido nomeia-se de coeficiente de atenuação linear. Se resume numa média estabelecida dos diferentes tecidos que irradiados podem ser visualizados em alguma medida devido à absorção sofrida pelos efeitos Fotoelétrico ou Compton. É simbolizado pela letra grega μ , a letra grega mu (KANE, 2009). A Tabela 1 traz as relações dos coeficientes de atenuação e densidades de tecidos.

Tabela 1: Coeficiente de atenuação para 60 KeV e densidade de alguns materiais importantes para raios X na medicina imagiológica.

Absorção do material	Coeficiente de atenuação para 60 KeV, μ (cm^{-1})	Densidade ρ (g/cm^3)
Gordura.	0,1788	0,91
Tecido mole que não seja gordura (músculos, fluidos corporais).	0,2045	1,00
Água.	0,2055	1,00
Cérebro.	0,2061	1,00
Ar.	$\sim 3 \cdot 10^{-4}$	0,00129
Osso.	0,466 a 0,548	1,65 a 2,00

Fonte: Kane (2009).

De acordo com a Tabela 1, é possível comparar os coeficientes de atenuação do osso e da gordura na faixa de 60 keV. Identifica-se que o osso por possuir uma densidade maior que a gordura, facilita uma absorção dos raios X pelo tecido ósseo, o que implica num maior coeficiente de atenuação; a gordura por possuir o coeficiente de atenuação menor, a transmissão da radiação se torna maior através dos seus tecidos.

É importante frisar que, cada material tem seu próprio coeficiente de atenuação, pois o mesmo é obtido segundo uma média que considera os elementos químicos envolvidos no tecido corporal (em específico).

Há equações que relacionam grandezas como intensidade dos raios X emitidos sobre os tecidos e contrastes, ambos importantes para uma melhor definição e qualidade na produção da imagem radiológica. Embora elas possuam coeficiente de atenuação em suas equações, não será objeto de apresentação desta secção as equações citadas, pois já relacionam outra parte do assunto diverso do apresentado aqui.

A escala de Hounsfield (HU) também chamada de *tons de cinza* foi uma homenagem a seu criador. Ele imaginou uma escala que pudesse ser utilizada para diferenciar os tecidos na imagem radiológica. Determinou como referência o HU da água como 0. Esses tons podem apresentar alguma variação de tonalidade a depender da energia do feixe empregada nos tecidos-alvo (KANE, 2009). Na Tabela 2 são relacionados os tecidos às unidades de HU e o tom de cinza associado.

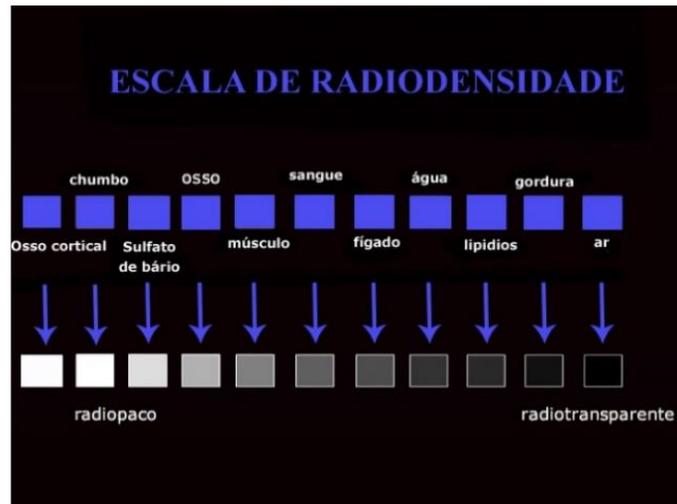
Tabela 2: Relação dos tecidos às unidades de HU e o tom de cinza associado.

Densidade	Unidades Hounsfield	Cor
Meio de contraste	+100 a 1000	Branca brilhante
Osso	100	Branca
Água e partes moles	0 a 100	Cinza médio
Gordura	-100 a -60	Cinza escuro
Ar	-1000 a -120	Preta

Fonte: Lara Filho (2013).

Abaixo representamos através da Figura 10 a escala de Radiodensidade e seus valores em HU e tonalidades correspondentes.

Figura 10: Escala de Radiodensidade também conhecida como de Hounsfield.



Fonte: Disponível em: <http://www.radioinmama.com.br/historiadatomografia.html>

Os tons de cinza são apresentados mais bem distribuídos e especificados, quando comparados à tabela anterior.

2.4 Raios X e suas aplicações na indústria

No início do descobrimento dos raios X por Röntgen em 1905, as aplicações se restringiam às radiografias de partes do corpo humano. No decorrer dos anos, notou-se um alargamento das aplicações dos raios X, destacando-se áreas da indústria e saúde.

Na indústria, como mostrado na Figura 11, há algumas aplicações como Inspeção Corporal. Estes aparelhos são muito comuns em portos e aeroportos, também chamados de *Bodyscan*. Têm a função de detectar metais, armas, drogas, explosivos e mais algumas substâncias ou materiais ilícitos (GROUP, 2020).

Figura 11: *Bodyscan* em atividade numa estação de metrô.



Fonte: Group (2020).

Outra aplicação, o que pode ser observado na Figura 12, se refere à radiografia industrial, ramo destinado à inspeção de dutos industriais que objetiva assegurar o controle de qualidade dos dutos e desta maneira, evitar fissuras que possam comprometer a peça e parte considerável da estrutura relacionada. Utilizam-se fontes radioativas de Ir-192, Se-75 e Co-60 ou equipamentos emissores de raios X como forma de inspecionar o material em questão, podendo ser dutos de navios, industriais, aviação, petróleo, dentre outros (GROUP, 2020).

Figura 12: Aparelho de radiografia aplicado às tubulações.



Fonte: Disponível em: <https://www.trkd.org.tr>

Assim, uma terceira aplicação seria na mineralogia (ciência que estuda os minerais). Através da difração por raios X é possível identificar as partículas de argilas e outros minerais presentes. Outra técnica associada aos estudos de cristais, chamada de cristalografia, utilizada para obtenção do arranjo estrutural e, desta forma, realizar estudos quanto à sua melhor aplicabilidade, grau de dureza, dentre outras características estudadas na área de ciências dos materiais (MINERAÇÃO, s.d).

Em linhas gerais, considerando as três aplicações mencionadas dos raios X na indústria, constata-se a enorme contribuição dos raios X em tecnologias médicas, industriais e comerciais, o que evidencia o quão necessário se torna a divulgação científica de tal fenômeno físico entre a sociedade, sobretudo nos espaços escolares.

3 RADIOTERAPIA CONVENCIONAL E HADRONTERAPIA

Nesta seção serão apresentadas algumas características gerais em termos de estudos de formação do câncer, bem como de suas formas de tratamentos à base de radiações ionizantes: a tradicional Radioterapia e a Hadronterapia.

3.1 Formação de uma célula cancerígena

No empreendimento das discussões relacionadas à essa temática, se recorreu ao material ABC do câncer: abordagens básicas para o controle do câncer (BRASIL, 2018b), produzido pelo Ministério da Saúde, do Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva (INCA). Assim, inicialmente, se enfatiza que, o câncer é uma doença conhecida desde à antiguidade (cerca de 5 milênios antes de Cristo). É sabido que Hipócrates⁹ foi o primeiro a pronunciar a palavra *karkínos*, que em grego significa caranguejo, atualmente conhecida por câncer (BRASIL, 2018b).

Diante do exposto, se faz oportuno enfatizar que, o processo de formação da maioria das células cumpre um ciclo de vida que vai desde seu surgimento, através da divisão celular, passando pela multiplicação até seu desfazimento (morte), a exemplo das epiteliais. Tal processo natural e contínuo, para algumas células, não necessariamente indicam um distúrbio, mas um processo natural e necessário para a renovação celular e, portanto, a manutenção da vida.

Desta forma, o câncer se define pela capacidade de divisão celular de modo desordenado; sua proliferação em outras estruturas orgânicas, ocasiona um mal funcionamento das estruturas, o que pode acarretar na morte de tecidos e órgãos vitais.

No formato do crescimento controlado de células, estas aumentam a uma proporção limitada por aspectos fisiológicos ou patológicos. São consideradas células normais e podem ser do mesmo grupo que compõe a região, ou de grupos diferentes. A título de exemplos, têm-se a hiperplasia, a metaplasia, sendo que:

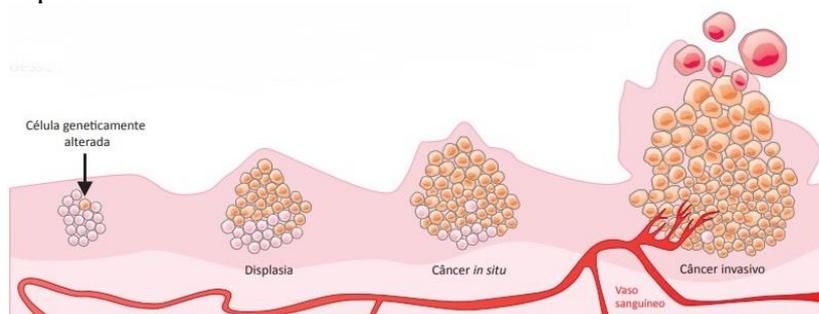
- Hiperplasia pode ocorrer na forma fisiológica a fim de atender a uma necessidade específica do organismo. Exemplo: glândulas mamárias se multiplicando durante a gestação;

⁹ Médico grego considerado o “pai da medicina”, vivendo entre 460 e 377 a.C

- Metaplasia é um processo de multiplicação e reparação de células normais que se divergem daquelas oriundas de dada região. Exemplo: Aplica-se aos fumantes que têm substituídos seus epitélios de revestimento pseudoestratificado ciliado que reveste os brônquios por um tecido formado por células diferentes, o epitélio escamoso estratificado (BRASIL, 2018b).

Isto posto, outra possibilidade de crescimento celular seria no formato descontrolado, sendo que este ocorre através da displasia. Neste modelo, as células modificadas apresentam características diferenciadas quanto a tamanho, à forma, dentre outras. Desse modo, ocorre um crescimento desordenado no tecido epitelial, sobretudo, no epitélio metaplásico. Neste caso, uma região que é observada com razoável facilidade seria a dos epitélios de revestimento do colo do útero. Na Figura 13, se descreve o processo de displasia.

Figura 13: Ilustração do desenvolvimento desordenado de células através da displasia.



Fonte: Disponível em: <https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files/media/document/livro-abc-4-edicao.pdf>

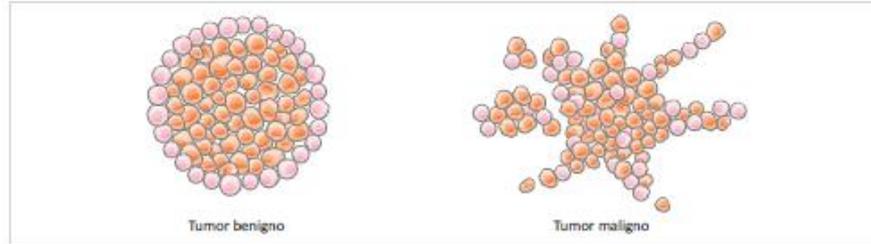
Esta Figura descritiva da displasia ocorre com uma massa tumoral, em decorrência da reprodução celular descontrolada após os estímulos responsáveis por sua formação. A este processo nomeia-se de neoplasias (câncer *in situ* e câncer invasivo), conhecido popularmente por tumores.

As neoplasias classificam-se em benignas ou malignas. Quanto às benignas estas ocorrem de maneira organizada, lenta e têm formato definido. Não invadem os tecidos adjacentes, mas adquirem proporções de modo a dificultar ou limitar o funcionamento de alguns órgãos ou estruturas. Por sua vez, as malignas apresentam uma multiplicação mais acelerada e descontrolada e têm capacidade de invadir tecidos adjacentes ou vizinhos. Sofrem a divisão celular do tipo metástase¹⁰, podendo ser resistentes a tratamentos, ocasionando a

¹⁰ É um processo de desprendimento e disseminação do tumor principal por outros tumores originários e que se proliferam para outras regiões distintas.

morte do paciente. Na Figura 14 estão representadas as formas dos dois tipos de proliferação tumoral.

Figura 14: Tumor benigno e maligno.

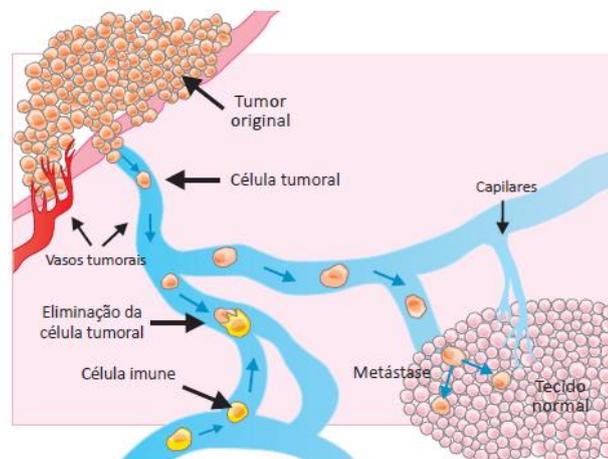


Fonte: Disponível em: <https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files/media/document/livro-abc-4-edicao.pdf>

Ainda sobre essa discussão, outra classificação que se considera necessária relacionada aos tumores, se refere à sua capacidade em ser invasivo ou não invasivo. Do exposto, os não invasivos são aqueles que não detêm a capacidade de se espalhar por tecidos adjacentes; se restringem à região na qual se formam. Já os invasivos atuam de maneira oposta aos não invasivos, ou seja, se proliferam para outras regiões do corpo, dando origem a outros tumores nas regiões atingidas. A esses novos focos de proliferação se nomeiam de metástase.

Os tumores do tipo invasivo se apresentam como verdadeiros desafios aos tratamentos de câncer, dificultando aqueles realizados por meio cirúrgico, ocorrendo a necessidade de recorrer a outros tipos de tratamentos (BRASIL, 2018b). Para melhor caracterizar tal situação, se apresenta a Figura 15.

Figura 15: Ilustração da proliferação de tumor do tipo invasivo.



Fonte: Disponível em: [acesse.one/DIcQT](https://www.acesse.one/DIcQT)

3.2 Doses de radiação aplicadas a tumores

Um exemplo de uma relação analógica estabelecida entre doses de radiação aplicada a tumores e doses de drogas administradas a dada população (pessoas, animais, etc), pode ser expressa da seguinte forma: determinada população pode morrer se submetida ao contato com drogas e o tempo necessário para a conclusão do evento. Tomando como exemplo o evento 50/30, isto significa que 50% da população em contato com alguma droga tem chance de morrer num intervalo de 30 dias.

Por outro lado, este evento não se enquadra a doses de radiação aplicadas a tumores, tendo em vista apresentar inúmeras particularidades como: tipo de aparelho utilizado para irradiar, dose administrada, região do corpo irradiada, tempo de exposição da radiação, dentre outras métricas.

Exposições altas de radiação podem levar um paciente a óbito, porém àquelas em pequenas quantidades durante um tempo prolongado, também podem levar à morte. Essa radiação pode ser mensurada em MBq (Mega Becquerel) sendo aplicada em pequenas quantidades a centenas por sessão nos tratamentos radioterápicos. A radiação tem seu ciclo de vida baseado em meias-vida e pode permanecer durante um período no corpo humano.

Uma quantidade determinada de radiação é irradiada no corpo, mas apenas uma proporção dessa radiação é absorvida pelo corpo. Há uma quantificação para uma quantidade de radiação ionizada no ar por raios X ou gama: o Röntgen (R). A título de esclarecimento, um Roentgen é a relação entre a carga elétrica que ioniza o ar por kg, equivalente a $R = 2,58 \times 10^{24}$ Coulomb/kg. Há outras unidades de medida para radiação: o cinza (Gy) e o rad. Um Gy corresponde a 1J/kg e um rad corresponde a 0,01 Gy.

Quantidades específicas de doses de radiação dão a ideia de quanto cada região pode receber e absorver a fim de produzir determinado efeito, como por exemplo:

- 1 a 10 Gy: para todo o corpo ou alguns órgãos mais sensíveis pode causar a morte;
- Dezenas de dose Gy: são utilizadas durante semanas em frações menores, sendo administrado doses menores diariamente;
- m^{11} Gy: utilizadas em exames de raios X, mamografia, etc.

Também há outras formas de mensurar a absorção de doses iguais e tipos de radiação diferentes, a exemplo de radiação por emissão de elétrons e gama. A esta quantidade de absorção ao longo dos tecidos se atribui de Transferência de Energia Linear (LET), sendo

¹¹ Submúltiplo que corresponde a 10^{-3} .

que esta pode variar em função de radiações, com doses iguais, mas de elementos diferentes como radiação alfa e raios X, para danos ao tecido biológico, implicando, possivelmente, em diferentes danos.

A essa capacidade de mensurar os danos e efeitos ao tecido biológico, se atribui o nome de Efeito Biológico Relativo (RBE). Esta se traduz como a razão entre a quantidade de uma partícula padrão para causar o mesmo dano biológico que a partícula em estudo. Eis alguns exemplos de RBE:

- Raios-X, raios gama e partículas beta (elétrons e pósitrons) são padronizados com RBE de 1,0;
- Partículas alfas têm um RBE de cerca de 20;
- Nêutrons têm valores variando de 5 a 20.

Como efeito exemplificativo, imagina-se RBE = 2,0 e RBE = 0,5, significa que a primeira apresenta um dano biológico 2 vezes maior que os valores padrões, enquanto, que a segunda apresenta um dano biológico reduzido à metade em relação aos valores padrões (1). Diante dessas considerações, a medida de uma dose equivalente em Sievert (Sv) corresponde ao produto da Gy pelo RBE, representada pela equação:

$$Sv = Gy * RBE \quad (3.1)$$

Dessa maneira, as doses de radiação são mensuradas e aplicadas a diagnósticos por imagem ou células cancerígenas. É importante enfatizar que os pormenores não estão totalmente detalhados nessa seção. Para maior aprofundamento, se recomenda a leitura do livro *“Introduction to Physics in Modern Medicine”*, da pesquisadora Kane (2009).

Na subseção seguinte serão discutidos os conceitos fundamentais da Radioterapia convencional.

3.3 Radioterapia convencional à base de raios X e fótons

Segundo Teles (2006), a Radioterapia é uma terapia baseada em radiações ionizantes para tratar pacientes acometidos por tumores do tipo maligno ou benigno. Tem como objetivo irradiar uma região tumoral com seus limites bem definidos, causando o menor prejuízo possível a regiões adjacentes, bem como ionizar as células tumorais levando à sua completa destruição e, assim, prolongar a sobrevivência do paciente. Além disso, pode ser utilizada também com caráter paliativo, a fim de aliviar dores e manutenção da qualidade de vida do paciente em fase terminal.

É oportuno, ainda, destacar que a radioterapia aplicada em tumores malignos consiste no ato de lançar feixes de fótons sobre regiões ou porções que contêm células malignas. Uma dificuldade associada à dissolução do tumor, se relaciona ao fato deste se espalhar pelo corpo após sofrer metástase. E, dessa forma, dificultar a aniquilação somente de tecidos tumorais, o que implica no atingimento de tecidos saudáveis em regiões vizinhas. Um exemplo seria um tumor localizado no abdômen, que precisaria de feixes de fótons da ordem de MeV para transpor os tecidos mais superficiais e chegar a atingir e aniquilar o tumor selecionado.

Há também as partículas alfa que trabalham na faixa de energia de 4 a 20 MeV¹² e podem ser bem utilizadas para tratar tumores mais superficiais, a exemplo do de pele, de lábios e do pescoço, pois sua capacidade de penetração é pequena, atingindo de 1 a 6 cm nos tecidos. A radioterapia pode ser aplicada de três formas distintas, a saber:

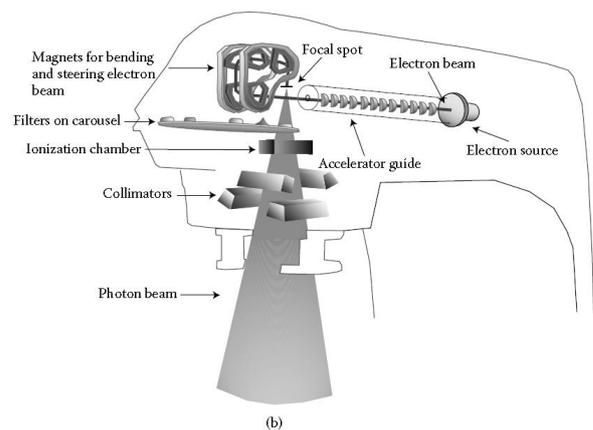
- Radioterapia externa. Trata-se da modalidade que visa atacar o tumor maligno ou benigno através de uma fonte externa de radiação, podendo ser os raios X ou elétrons de alta energia produzidos através de aceleradores lineares. É largamente a mais utilizada entre as demais devido às suas características e regiões nas quais se apresentam os tumores.

Na Figura 16 há fotografias com a representação de um acelerador linear utilizado pela radioterapia (à esquerda) e sua composição interna (à direita).

Figura 16: Fotografia do acelerador linear e composições internas do acelerador.



(a)



(b)

Fonte: Kane (2009).

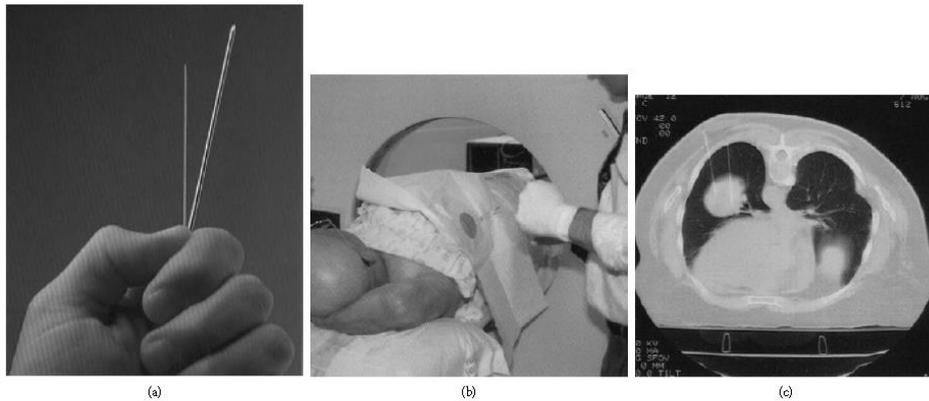
- Braquiterapia ou fonte não selada. Consiste numa modalidade de radioterapia em que se utiliza uma fonte radioativa próxima das vizinhanças do tumor, o que diminui

¹² Múltiplo da unidade de medida para energia radioativa que corresponde a 10⁶.

consideravelmente a exposição radioativa de tecidos saudáveis nas adjacências do tumor. É implementada em tumores que estão acessíveis através de cavidades naturais ou por meio de cateteres ou agulhas. Tem aplicações em órgãos reprodutores femininos.

Na Figura 17 se encontram as ferramentas utilizadas na braquiterapia, assim como também as imagens radiológicas das regiões tratadas.

Figura 17: Agulhas radioativas utilizadas no tratamento braquiterápico e paciente imersa num aparelho de TC para melhor análise do acompanhamento (c) TC do tórax com braquiterapia aplicada ao câncer de pulmão.



Fonte: Kane (2009).

- Fonte não selada. Esta também se configura como outro tipo de radioterapia na qual se utilizam fontes radiofármacos¹³ a fim de tratar regiões bem específicas, por exemplo: tireóide através do iodo-131, conforme Figura 18, e leucemia com o fósforo-32 (KANE, 2009).

Figura 18: Fonte não selada de radiofármaco.



Fonte: Gomes (2021).

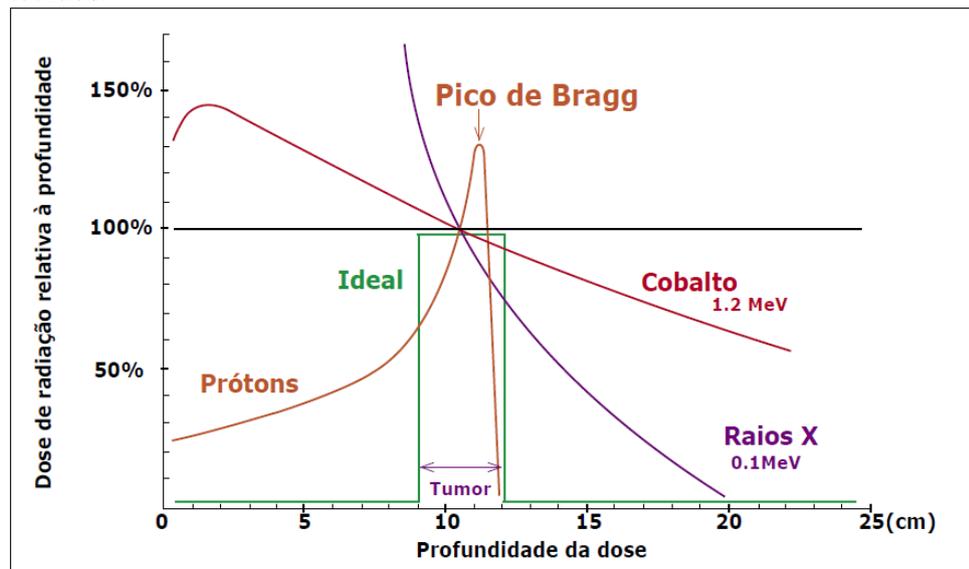
¹³ São compostos radioativos, oriundo da junção de radionuclídeos (isótopos instáveis que detém decaimento nuclear) e alguma substância química, utilizados em diagnóstico e tratamentos em Medicina Nuclear.

3.4 Hadronterapia à base de prótons e íons de carbono

De acordo com Hussein (2005), a Hadronterapia se refere a um tipo de tratamento radioterápico em que se utilizam as partículas pesadas: prótons, íons de carbono e nêutrons. Estes elementos apresentam uma característica diferenciada em relação aos feixes de elétrons (radioterapia convencional), ao irradiar na região a ser tratada; atingem menos os tecidos que estão ao redor e, portanto, preservam mais os tecidos saudáveis. Isso ocorre devido a uma característica peculiar de deposição dessas partículas, chamada de “Pico de Bragg”.

O Gráfico 2 mostra como se comporta essa deposição de energias nos tecidos. Nesse gráfico se observa a comparação entre a deposição de energia dos raios-x, feixe de elétrons (radioterapia convencional) e prótons (Hadronterapia).

Gráfico 2: Representação da dose de radiação *versus* profundidade da dose nos tecidos.



Fonte: Hussein (2015).

Neste gráfico, se observam as diferenças entre as energias depositadas nos tecidos, desde a entrada até regiões um pouco mais profundas, pelo feixe de elétrons (produzido a partir do Cobalto-60) e pelos prótons (Hadronterapia).

Ainda é possível verificar que o feixe de elétrons penetra no tecido com uma energia alta e vai se dissipando à medida que se aprofunda na região; ao passo que os feixes de prótons entram no tecido com uma energia relativamente baixa e vão aumentando gradualmente à medida em que se aprofunda, até culminar com o pico máximo de deposição de energia na região tumoral (HUSSEIN, 2005).

3.4.1 Aceleradores utilizados na Hadronterapia

Para Pivetta (2014), na produção de feixes de partículas, utilizadas na radioterapia, são empregados os aceleradores. Nesse caso, os feixes de elétrons valem-se de um tipo de acelerador chamado de linear; os de prótons e íons de carbono, por sua vez, utilizam os aceleradores circulares chamados de acelerador cíclotron.

O acelerador cíclotron tem por objetivo acelerar prótons e íons de carbono a velocidades próximas de $2/3$ da velocidade da luz, que é de aproximadamente 225.000 km/s, e com isso modular a intensidade, utilizando técnica semelhante às da Radioterapia com Intensidade Modulada (IMRT)¹⁴, a energia para irradiação na região desejada.

No que tange ao custo do tratamento Hadronterápico (à base de prótons) na Europa, conforme afirma Degiovanni (2015), um tratamento completo apresenta um custo médio de cerca de € 20 a 25 mil euros.

O centro de Hadronterapia mais avançado da Europa se localiza na Universidade de Heidelberg – Alemanha. Nele são tratados pacientes com feixes de prótons em sua maioria, cerca de 90% dos tratados, pois é uma terapia mais eficiente que a dos raios X e de duas a três vezes menos energéticas que as de íons de carbono que são empregados em casos mais complicados.

Inaugurado em 2009, esse centro custou € 120 milhões, é composto de um prédio de três andares com 5 mil metros quadrados. Uma estrutura de aço gigantesca, que pesa 670 toneladas e tem 25 metros de comprimento e 13 de diâmetro, conecta-se ao seu síncrotron. E ocupa uma área de 03 andares que são utilizadas para organizar o aparato para envio dos feixes com precisão milimétrica para a sala ao lado. A seguir, nas Figuras 19 e 20 apresentam-se um pouco do aparato necessário para instalação de um centro médico de Hadronterapia.

¹⁴ Radioterapia de Intensidade Modulada.

Figura 19: Acelerador Cíclotron-Estrutura de 670 toneladas que direciona os feixes de partículas: precisão milimétrica contra tumores.



Fonte: Pivetta (2014).

Figura 20: Sala de Hadronterapia em Heidelberg - hospital universitário de Heidelberg.



Fonte: Pivetta (2014).

São esses e outros pontos que dificultam a instalação de centros como esse no Brasil. Há poucos em operação no mundo. Listaremos abaixo os centros de pesquisa que dispõem da estrutura para esse tipo de tratamento, com base em uma relação ao ano de 2005 (Tabela 3).

Tabela 3: Centros especializados em Hadronterapia até o ano 2005, outros não listados aqui estão em processo de construção e implantação na Europa.

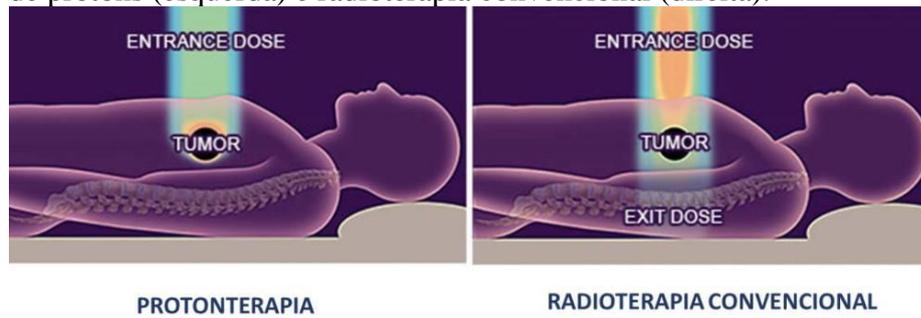
Centros especializados em hadronterapia		
NTPC, Harvard	Massachusetts (EUA)	Próton
Loma Linda	Califórnia (EUA)	Próton
MPRI	Indiana (EUA)	Próton
UCSF - CNL	Califórnia (EUA)	Próton
Moscou	Rússia	Próton
São Petersburgo	Rússia	Próton
Dubna	Rússia	Próton
PMRC, Tsukuba	Japão	Próton
HIMAC, Chiba	Japão	Próton, íon pesado
NCC, Kashiwa	Japão	Próton
Hyogo	Japão	Próton, íon pesado
Wakasa Bay	Japão	Próton
PSI (72 - 200MeV)	Suíça	Próton
Uppsala	Suécia	Próton
Clatterbridge	Inglaterra	Próton
Louvain-la-Neuve	Bélgica	Próton
Nice	França	Próton
Orsay	França	Próton
N.A.C., Faure	África do Sul	Próton
TRIUMF	Canadá	Próton
GSI Darmstadt	Alemanha	Íon pesado
HMI Berlim	Alemanha	Próton
Munique	Alemanha	Próton
Erlangen	Alemanha	Próton
Heidelberg	Alemanha	Próton
INFN-LNS, Catani	Itália	Próton
CNAO, Milan & Pavia	Itália	Próton
Central Italy	Itália	Próton
TOP Project ISS Roma	Itália	Próton
CGMH	Coreia do Norte	Próton
Bratislava	Eslováquia	Próton, íon pesado
Austron	Áustria	Próton, íon pesado

Fonte: Hussein (2015).

Para Márcio Fagundes, hoje esses números já somam 30 em centros dos EUA e outros 20 na Alemanha e Holanda. Segundo dados mais recentes apontados por Lühr *et al* (2018) confirmam que nos últimos 10 a 15 anos os centros de protonterapia chegam a cerca de 70 centro de tratamento espalhados pelo Globo e que já se atingiu um total de 150 mil pacientes tratados. É importante frisar que, devido à eficácia da radioterapia convencional para alguns tipos de câncer, ainda não temos no Brasil esses centros.

Feitos os comentários, a fim de se estabelecer comparativos entre a radioterapia convencional e a hadronterapia (à base de prótons), na Figura 21 se apresenta o demonstrativo da comparação entre aplicações de técnicas de radioterapia convencional e a hadronterapia.

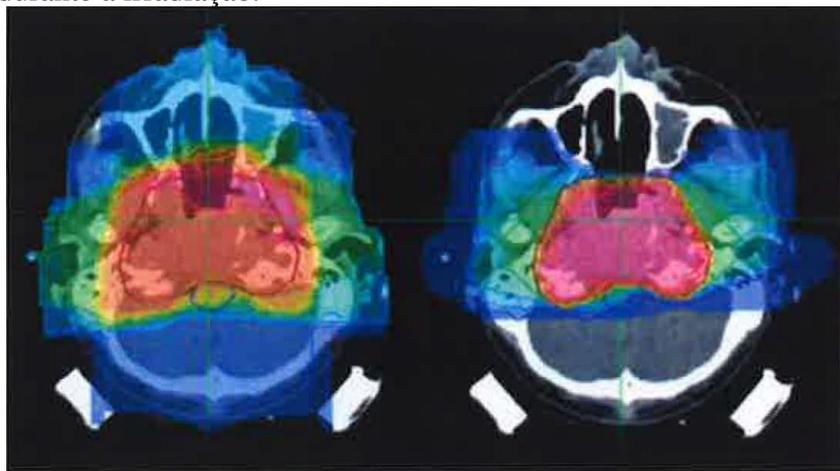
Figura 21: Ilustração da dose recebida por um paciente em tratamento com terapia de prótons (esquerda) e radioterapia convencional (direita).



Fonte: Barragán (s.d).

Ainda sobre a comparação entre aplicações de técnicas de radioterapia convencional e a hadronterapia, conforme Figura 22, uma comparação entre as duas imagens nos revela a precisão do planejamento do tratamento utilizando a referida técnica.

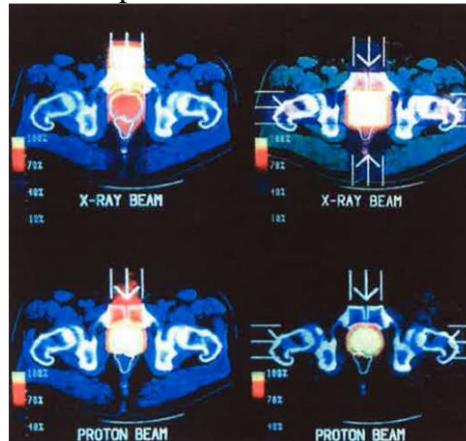
Figura 22- Distribuição da atividade dos íons de carbono medida durante a irradiação.



Fonte: Teles (2006).

Como se observa na Figura 23, imagem cedida gentilmente pelo Prof. Dr. J.de Boer da Universidade de Munique, Alemanha, há diferenças nas doses de radiação depositada no tumor e em regiões adjacentes nos dois tipos de tratamento.

Figura 23: Comparação entre o Tratamento do câncer de próstata com feixe de fótons de raio-X e prótons.



Fonte: Teles (2006).

Assim, as Figuras 22 e 23 mostram as comparações entre a radioterapia convencional e hadronterapia. Nelas observamos a radiação na região de acesso ao tumor e a energia depositada nele. A extrema diferença de perda de energia na entrada, para a convencional, e o pico de Bragg na região estimada, utilizando-se a protonterapia (VIEIRA, 2014). Em síntese, o Quadro 1 traz as principais comparações entre a radioterapia convencional e a hadronterapia.

Quadro 1: Comparação entre os tipos de radioterapia: convencional e hadronterapia.

	Radioterapia convencional	Hadronterapia
Custo	Acessível.	Extremamente alto.
Localização dos centros de tratamento	Comum em diversos países, inclusive no Brasil.	Existe em centros como EUA, Europa e Ásia. Ainda não existe no Brasil.
Eficácia	Apresenta eficácia comprovada, principalmente em casos mais superficiais.	Muito eficiente em casos de localizações tumorais mais profundas.
Efeitos colaterais	Efeitos mais acentuados, devido a eliminação de tecidos saudáveis no caminho.	Efeitos menos acentuados, por danificar menos tecidos saudáveis adjacentes.
Casos mais indicados	Câncer de pele, linfoma, entre outros.	Câncer de próstata, colo do útero, mama esquerda,

		cérebro, colón e reto, pediátrico etc.
Alcance com eficiência (cm)	Podem atingir até 3 centímetros de profundidade do tecido.	Podem atingir até 30 centímetros de profundidade no tecido.

Fonte: Teles (2006).

Com afirma Hussein (2005), as novas pesquisas mundiais se concentram em descobrir: a origem real da mutação genética; como as células se comportam, quando estão predispostas a desenvolver a doença e com isso já combater antecipadamente a mesma; desenvolver um medicamento universal que consiga curar todos as variações da doença.

Esses e outros objetivos relacionados a esses estudos terão potencial de sucesso com os estudos de física de partículas que é feita no LHC e em outros aceleradores de partículas espalhados no mundo, a exemplo do Brasil, com Sirius, que se localiza na UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas-SP e que se objetiva a realizar estudos em áreas de ciência base e aplicada, entendendo a matéria a nível mais microscópico possível, para auxílio ao desenvolvimento de medicamentos.

4 APRESENTANDO A PESQUISA-AÇÃO NA PERSPECTIVA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA NO ENSINO DA FÍSICA

Nesta seção é apresentada a proposta teórico-metodológico deste estudo: a Pesquisa-ação. No entanto, inicialmente se trouxe reflexões sobre a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, por entender que a Pesquisa-ação está alinhada a tal perspectiva teórica.

4.1 Aprendizagem significativa na perspectiva de Ausubel e suas aplicações no ensino da Física

A Teoria da Aprendizagem Significativa foi proposta por David Ausubel (1918-2008) no ano de 1963, sendo que nas primeiras descrições de tal teoria se empregava a terminologia Aprendizagem Verbal Significativa (*Meaningful Verbal Learning*), através de sua obra *The Psychology of Meaningful Verbal Learning* (A Psicologia da Aprendizagem Verbal Significativa (MOREIRA, 2019).

Vale esclarecer que este formato de aprendizagem parte do pressuposto de que as ideias novas (aprendizado) sejam adquiridas através de uma relação não impositiva, mas a partir de associações como elementos não literais presentes em sua estrutura cognitiva.

Nessa perspectiva, inicialmente para que a Aprendizagem Significativa ocorra, é necessário que o aluno seja possuidor de conhecimentos preexistentes e, a partir deles, sejam produzidos outros novos. Esses conhecimentos, entre outros, podem ser figuras, símbolos e definições, que possam servir de ancoragem ou subsunçor, ou seja, ponto de partida para associação aos novos conhecimentos apresentados e que se integrarão à sua estrutura cognitiva (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980).

Para Moreira (2006), os subsunçores são adquiridos com objetivo de formação de conceitos, e estão presentes desde a fases de crianças até a velhice, se apresentam assim como a base par todo conhecimento. Do exposto, a aprendizagem significativa para que aconteça de maneira satisfatória, espera-se que: o aluno manifeste predisposição em aprender e que o material seja potencialmente significativo.

Nessa perspectiva, a significação, é, em sua essência, um atributo pessoal, e só é factível de ocorrer se o aluno for detentor de motivação intrínseca ou extrínseca. Caso contrário, estará fadado a permanecer com as ideias pré-existentes em si.

Por outro lado, todo material é potencialmente significativo, pois a significação é inerente ao próprio aluno. O que pode haver é um material que facilite esse processo, do

ponto de vista de favorecer conexões entre elementos mais comuns no cotidiano, mas sempre deixando o maior esforço por parte do aprendiz, que organiza, interpreta, seleciona e combina informações relevantes ao seu aprendizado, através de uma condicionante não arbitrária e substantiva.

O ser humano, por si, detém uma capacidade de aprendizado baseado em representatividade inata. Isso fica mais claro na medida em que o ser humano começa a obter significações desde os primeiros anos de vida, aproximadamente em torno de 2 anos de vida. Nessa fase, o bebê memoriza suas primeiras palavras como bola, por exemplo. Essa estrutura cognitiva o possibilita associar a “bola-objeto” a uma figura de uma bola, desta forma se apresentam os primeiros indícios da aprendizagem dos significados, o que proporcionará adquirir um aprendizado por meio de significações no futuro (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980). Assim, tal processo de aprendizagem por aquisição de significados pode ser descrito da seguinte forma:

[...] A criança adquire essa compreensão generalizando, subverbalmente e intuitivamente, a partir de múltiplos contatos com as duas formas complementares da proposição de equivalência representacional transmitidas por aqueles que dominam a língua de origem [...] (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980, p. 44).

Desse modo, se reforça o que o já foi explicitado, pois os autores apresentam em termos teóricos o papel dos superiores, pais ou responsáveis, nesse processo de aquisição do conhecimento por meio de significações, o que dará subsídios a outra terminologia igualmente importante e que faz parte da estrutura cognitiva da criança: a linguagem. O conhecimento está intrinsecamente ligado à linguagem (AUSUBEL, 1980). No entanto,

A linguagem está longe de ser neutra no processo de perceber, bem como no processo de avaliar nossas percepções. Estamos acostumados a pensar que a linguagem “expressa” nosso pensamento e que ela “reflete” o que vemos. Contudo, esta crença é ingênua e simplista, a linguagem está totalmente implicada em qualquer e em todas nossas tentativas de perceber a realidade (POSTMAN; WEINGARTNER, 1969 apud MOREIRA, 2006a, p. 22).

Toda e qualquer linguagem é uma forma de relacionar e transmitir o conhecimento, porém, o conhecimento advém da linguagem que se desenvolve no indivíduo desde a infância até os primeiros 2 anos de vida. Estes, ou seja, o conhecimento e a linguagem, dão suporte e base para a aquisição de uma linguagem própria de cada área do conhecimento, contribuindo, assim, para uma aprendizagem significativa.

Em sua teoria, conforme explica Moreira (2006), Ausubel define três tipos de aprendizagens significativas que são serão apresentadas a seguir, a saber: representacional, de conceitos e proposicional.

A aprendizagem representacional representa o tipo mais simples entre as três. Se dá pela representação através dos símbolos que podem ser conceitos, objetos, eventos. Estes símbolos representam valores criados pelo indivíduo que está aprendendo e passa a representar os símbolos ou objetos que de fato o são.

Por sua vez, a aprendizagem significativa de conceitos pode ser compreendida como o tipo representacional, porém podendo ser definida em categorias que atendem a certos critérios de diferenciação. Para Moreira (2006b, p. 25), fundamentado em Ausubel (1978), entende-se por conceitos os “[...] objetos, eventos, situações ou propriedades que possuem atributos criteriosais comuns e são designados, em uma dada cultura, por algum signo ou símbolo aceito.”

O terceiro e último tipo de aprendizagem é a proposicional. Este representa a antítese da representacional, pois ela não se atém em propiciar uma aprendizagem por meio de palavras ou combinações delas, mas a interpretar e desenvolver um aprendizado por meio de ideias e locuções propositivas. Não se restringe mais a uma palavra ou conceito, acontece num sentido mais amplo, mas sempre se atendo à sua base que é representacional: alicerce para todo o processo de aprendizagem por meio da significação (MOREIRA, 2006b).

Diante de tais classificações da aprendizagem significativa, torna-se necessário uma avaliação da aprendizagem, a fim de diagnosticar a aprendizagem, pois, de acordo com Moreira (2006b, p. 27):

[...] O significado real para o indivíduo (significado psicológico) emerge quando o significado potencial (significado lógico) do material de aprendizagem converte-se em conteúdo cognitivo diferenciado e idiossincrático por ter sido relacionado, de maneira substantiva e não arbitrária, e interagido com ideias relevantes existentes na estrutura cognitiva do indivíduo [...].

Isto posto, para que o aluno aprenda, é necessário que ele detenha posicionamentos claros, precisos e que possam ser transferidos ou explicados de um outro formato, ou seja, usando outras palavras.

Essa tarefa apresenta-se como um grande desafio para o professor enquanto organizador do ensino, pois o aluno pode simplesmente decorar fórmulas, conceitos, e desta forma obter bons resultados nas avaliações.

Aqui, duas sugestões podem ser apresentadas: a primeira é realizar avaliações com questões diferentes, apresentadas em um contexto diferenciado das questões postas nos livros didáticos. “Solução de problemas, sem dúvida, é um método válido e prático de se procurar evidência de aprendizagem significativa” (MOREIRA, 2006b, p. 28). A segunda sugestão seria estimular os alunos a exporem suas ideias conceituais, de maneira verbal e escrita, com o objetivo de diferenciar conceitos semelhantes; e que estes alunos também identifiquem conceitos que estão fora de ordem ou misturados a outras áreas distintas. Tais sugestões se apresentam apenas como alternativas, pois cabe ao professor desenvolver outros mecanismos de avaliação a depender dos contextos socioculturais de seus aprendizes.

Outro fator essencialmente importante para o aprendizado significativo é o professor que atua de modo a facilitar a aprendizagem por meio de determinados símbolos e instrumentos relacionados a alguma área específica do saber.

Nessa perspectiva, professor e aluno têm tarefas distintas dentro do processo de aprendizagem significativa. Enquanto o professor tem a incumbência de verificar se os conceitos adquiridos pelo aprendiz são comuns aos compartilhados pela comunidade acadêmica; ao aluno cabe a tarefa de constatar se os conceitos aprendidos são similares aos estabelecidos no meio acadêmico (MOREIRA, 2008).

Ademais, ao professor cabe o papel de ser um mediador do aprendizado, exercendo o papel de uma espécie de “ponte do conhecimento” entre o aprendiz e o material potencialmente significativo. É importante frisar que o papel do aprendiz é insubstituível neste processo de aprendizagem, tendo em vista, que somente ele pode realizar as conexões necessárias entre o que é apresentado de conhecimento novo e o que existe em si mesmo como subsunção (MOREIRA, 2008).

4.2 Pesquisa-ação e suas possibilidades no ensino de Física

De acordo com Barbier (2002), conforme citado por Chisté (2016), o termo pesquisa-ação foi cunhado por Kurt Lewin, alemão naturalizado estadunidense, que desenvolveu uma pesquisa a pedido do governo Norte-Americano que desejava uma mudança nos hábitos alimentares de seus cidadãos, tendo em vista que as donas do lar não cultivavam o hábito de se alimentar de vísceras bovinas e naquele momento o país passava por uma grave crise financeira. O objetivo era de que as pessoas adquirissem o hábito de se alimentar das vísceras bovinas e as carnes nobres deveriam ser exportadas a outros países.

Como resultado de sua pesquisa, Lewin não obteve êxito em descobrir os motivos pelos quais os participantes da pesquisa não gostavam de consumir as vísceras, mas contribuiu significativamente para a mudança de postura e de atitude em relação ao objeto de estudo. A essa pesquisa ele atribuiu o nome de *Action-Research*, que traduzida significa pesquisa-ação.

Esta modalidade de pesquisa atende a pressupostos teóricos, elencados segundo alguns autores, a saber:

A pesquisa-ação consiste em um tipo de pesquisa social com base empírica que é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Nesta modalidade de pesquisa os pesquisadores e os participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo (THIOLLENT, 1947 *apud* MARANTE, 2009).

A referida citação, elenca a estreita relação existente entre uma pesquisa social atrelada a resolução de um problema coletivo. Cita também o papel cooperativo ou participativo, existente nesta modalidade de pesquisa, englobando os sujeitos da pesquisa.

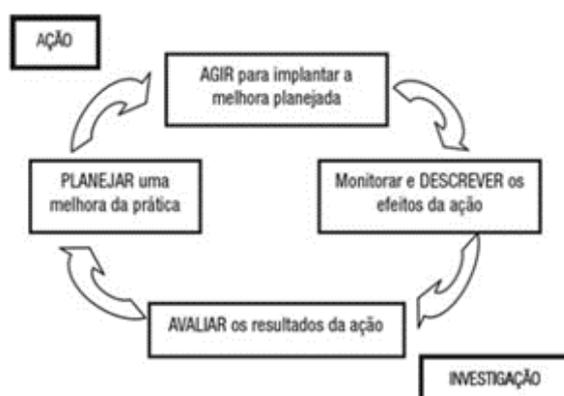
Ainda nessa mesma linha de raciocínio, segundo Thiollent (2011, *apud* CHISTÉ 2016, p. 796), para que uma pesquisa possa ser definida como pesquisa-ação é necessário que haja o envolvimento efetivo entre o grupo de sujeitos envolvidos ou grupos relacionados à situação-problema, a fim de buscar entender ou mesmo produzir uma solução viável.

Sobre a mesma temática e na visão de Koerich (2017, p. 718),

A pesquisa-ação visa fornecer aos pesquisadores e grupos sociais os meios de se tornarem capazes de responder com maior eficiência aos problemas da situação em que vivem, em particular sob a forma de estratégias de ação transformadora e, ainda, facilitar a busca de soluções face aos problemas para os quais os procedimentos convencionais têm contribuído pouco.

A seguir, apresenta-se o ciclo básico da investigação-ação. São quatro etapas fundamentais para a consecução da citada pesquisa, servindo para nortear a tomada de decisão e análise de como devem ocorrer de maneira a se atingir suas devidas finalidades (TRIPP, 2005).

Figura 24: Ciclo básico da investigação-ação.



Fonte: Tripp (2005).

Pode-se elencar que há quase um consenso entre os autores sobre o referencial teórico da pesquisa em questão. Todos citam o envolvimento, na pesquisa-ação, que deve existir entre os sujeitos da pesquisa (público-alvo) de modo a interferir diretamente no andamento da pesquisa, possibilitando, assim, a realização de ajustes em parâmetros com potencial de interferir no sucesso da mesma.

Como forma de aplicação da pesquisa-ação na área de educação, somente a partir de 1960 ocorreu sua ampliação no campo da Sociologia e Psicologia. Desta forma, desenvolveram-se pesquisas qualitativas baseadas na metodologia da pesquisa-ação, objetivando a busca por melhoria no ensino através da aplicação das pesquisas no ambiente escolar (sala de aula). Outra finalidade relevante na pesquisa era a da qualificação profissional dos professores, considerando que a mesma possui a capacidade de envolvê-los no processo, como também seu ambiente de trabalho, levando-os a uma maior reflexão e envolvimento no desenvolvimento da mesma (ENGEL 2000, p. 182).

Para Chisté (2016), essa metodologia passa a ser aplicada na área de Educação a partir de 1950 e 1960, incorporando um viés positivista e passa a ser aplicada à prática docente como forma de melhorar as práticas e resultados educacionais, ficando evidenciados através de dois artigos publicados por Stephen Corey, e outro de Taba e Noel, em 1949 e 1957, respectivamente.

Especificamente é possível a aplicação desta metodologia de pesquisa em diversas áreas do conhecimento, a exemplo da Física Moderna e Contemporânea. A título de exemplo, destaca-se o estudo de Campos *et al* (2020). Neste trabalho, os autores apresentam um exemplo de inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea no ensino de Física da Educação Básica. A partir de uma abordagem CTS, que acentua o caráter significativo do

conhecimento, evidenciando suas relações com os vários aspectos da organização social, e da metodologia da pesquisa-ação.

A seguir são apresentados os percursos metodológicos que permearam esta pesquisa.

5 PERCURSO METODOLÓGICO DA PESQUISA

Nesta seção é apresentado o percurso metodológico desta pesquisa e do Produto Educacional. Para tanto, inicialmente se caracteriza a pesquisa. Em seguida, é descrito o campo empírico da pesquisa. Posteriormente, são apresentados os colaboradores/participantes da pesquisa, as técnicas e instrumentos de produção de dados e os procedimentos de análise de dados. Por último, o Produto Educacional (APÊNDICE A).

5.1 Caracterização da Pesquisa

Ao se considerar o problema (ou questão norteadora) deste estudo, se trata de uma pesquisa-ação de abordagem qualitativa. A pesquisa-ação, como enfatiza Tripp (2005, p. 447), “pesquisa-ação é uma forma de investigação-ação que utiliza técnicas de pesquisa consagradas para informar a ação que se decide tomar para melhorar a prática”.

Entende-se ser de abordagem qualitativa, como afirma Oliveira (2017, p. 37), por ser “[...] um processo de reflexão e análise da realidade através da utilização de métodos e técnicas para compreensão detalhada do objeto de estudo em seu contexto histórico e/ou segundo sua estruturação.”

Ainda de acordo com Oliveira (2017), esta abordagem de pesquisa requer um conjunto de ferramentas para que possa ser implementada, como estudo literário, entrevista e a aplicação de questionários com os participantes, além de uma análise de dados como forma de inferir comportamentos e dados subjetivos.

Para Minayo (2009, p. 21), a pesquisa qualitativa “[...] trabalha com o universo dos significados, dos motivos, das aspirações, das crenças, dos valores e das atitudes”. Para a referida autora, todos esses atributos são inerentes ao ser humano e, portanto, indissociáveis na relação da vivência humana, as ações, pensamentos e críticas acerca de relações do cotidiano com seus semelhantes.

Lüdke e André (2018), fundamentadas em Bogdan e Biklen (1982), apresentam cinco características da pesquisa qualitativa: 1) possui ambiente natural como sua fonte direta de dados e o seu pesquisador como principal instrumento/técnica; 2) os dados produzidos através dos instrumentos e técnicas são de natureza descritiva; 3) há uma preocupação muito maior com o processo (captação do objeto de estudo) do que com o produto (a dissertação/produto educacional propriamente dito); 4) Para o pesquisador, as significações produzidas pelos participantes da pesquisa é o que mais interessa ao pesquisador nas análises

e discussão dos dados; 5) A análise dos dados cumpre um processo que é indutivo. Neste caso, “os pesquisadores não se preocupam em buscar evidências que comprovem hipóteses definidas antes do início dos estudos” (LÜDKE; ANDRÉ, 2018, p. 14).

Levando em conta, sobretudo, os objetivos deste estudo, esta pesquisa também apresenta tipologia do tipo descritiva. Na visão de Gil (1994, p. 46),

as pesquisas deste tipo têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou estabelecimento de relações entre as variáveis. São inúmeros estudos que podem ser classificados sob este título e uma de suas características mais significativas é a utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados.

Na subseção seguinte será a apresentado o campo empírico no qual fora realizada a pesquisa, bem como, suas características estruturais e organizacionais, importantes para entendimento das considerações finais desta pesquisa.

5.2 Campo Empírico da Pesquisa

Esta pesquisa teve como campo empírico o Colégio Técnico de Bom Jesus – CTBJ (Figura 25) – escola de educação técnica profissional vinculada à UFPI. Foi fundada em 1891 sob a nomenclatura de Colégio Agrícola de Bom Jesus, passando a se chamar CTBJ a partir do ano de 2016. Está situada na região do Vale do Gurguéia, Bom Jesus/PI, a 640 km de Teresina (PIAÚÍ, 2021).

Figura 25 - Vistas laterais dos prédios do CTBJ.



Fonte: Próprio autor (2022).

Em março de 1922 teve início o primeiro curso Técnico em Agropecuária enfocando em áreas como Bovinocultura, Apicultura, Forragicultura, entre outras. O curso se

assentava numa área de 22,5 hectares, situado na Vila Stela. Ao ano de 1993, a escola migrou para uma escola de 1º grau (nível fundamental), doada pela Prefeitura Municipal de Bom Jesus, e passou a oferecer o Curso de Pré-qualificação em Agropecuária de 1º grau.

Em 2006, a escola teve suas estruturas físicas ampliadas por adesão ao Programa de Expansão do Ensino Profissionalizante (PROEP). Contou com a construção de novas salas de aulas, laboratórios de química, informática e biologia (PIAUI, 2021). Atualmente, o CTBJ conta com a seguinte estrutura física resumida na Tabela 4.

Tabela 4: Relação entre a estrutura física e suas correspondentes áreas.

Ambientes/ Salas	Quantidade	Área (m²)
Salas de Aula	11	653,52
Laboratórios	07	617,36
Bloco Biblioteca	03	639,54
Bloco Auditório	03	491,41
Bloco Banheiros	04	369,84
Bloco Pedagógico	19	550,54
Bloco Administrativo	24	1179,46
Fazenda Escola/ Residência Estudantil	13	2470,00
Total	71	6971,67

Fonte: Secretaria Administrativa do CTBJ (2022).

Importante destacar que, dos 7 laboratórios, 1 é de química, 1 de biologia e 1 de enfermagem; os demais são de informática. Destes, Laboratório 01 (Prática): 21 Computadores; Laboratório 02 (Prática): 21 Computadores; Laboratório de Robótica: 13 Computadores; Laboratório de Manutenção: 10 computadores, sendo os 65 computadores do tipo desktop.

Atualmente são ofertados os cursos de Agropecuária e Informática, na modalidade Ensino Médio Técnico; e Enfermagem, na modalidade subsequente (modalidade de ensino técnico destinada a alunos que concluíram o Ensino Médio). O corpo docente é formado por 41 professores, destes, 9 especialistas, 18 mestres e 14 doutores, atendendo as modalidades de ensino: médio e técnico, ofertadas pela instituição de ensino.

5.3 Colaboradores/participantes da Pesquisa

Esta Pesquisa/Produto Educacional foi desenvolvida com alunos da 3ª série do Ensino Médio do CTBJ. Das duas turmas, inicialmente, perfazendo um total de 76 alunos, sendo 34 alunos da turma A e 42 da turma B. Em decorrência dos critérios pré-estabelecidos pelo Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, inicialmente, tinha-se uma amostra de 24 participantes, no entanto, destes, finalizou-se a pesquisa apenas com 14 alunos/participantes.

Os participantes, a maioria, é oriunda da cidade de Bom Jesus/PI, porém, a alunos das cidades circunvizinhas: Cristino Castro, Gilbués, Curimatá, Colônia do Gurguéia, Alvorada da Gurguéia, Redenção do Gurguéia, Eliseu Martins, Manoel Emídio, dentre outras. Assim, alunos de grande parte da região Sul do PI buscam a referida instituição de ensino por ser referência em formação no Ensino Médio Técnico.

A título de esclarecimentos, inicialmente, o pesquisador se utilizou de parte da aula do professor substituto de Física do CTBJ, para então, se pronunciar, via remota, acerca da realização da pesquisa. Para isso, destacou, dentre outros pontos, relevância, objetivos, metodologia e resultados esperados com a pesquisa. Ressaltou também que a adesão seria voluntária, e, portanto, poderiam participar os que se sentissem motivados e interessados em colaborar com a pesquisa. Dos alunos presentes, somente 24 devolveram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido assinado.

Tal quantidade de adesão à pesquisa, certamente, se justifica por, inicialmente, ter ocorrido no formato remoto. Além disso, os próprios alunos afirmaram que tinham outras atribuições acadêmicas: o próprio ensino médio, o técnico, a participação em projetos de pesquisa e extensão, dentre outras possíveis atribuições de caráter pessoal.

5.4 Técnicas e Instrumentos de Produção de Dados

De acordo com Marconi e Lakatos (2017), no processo de produção de dados devem ser empregadas técnicas e instrumentos. Para estas autoras, técnicas de pesquisa são definidas

[...] como “instrumentos utilizados para se coletar dados e informações em pesquisa de campo, que devem ser escolhidos e elaborados criteriosamente, visando à análise e explicação de aspectos teóricos estudados” [...] é por meio das técnicas de pesquisa que as fontes de informação “falam”: “são, portanto, ferramentas essenciais para a

pesquisa e merecem todo o cuidado na sua elaboração, para garantir fidelidade, qualidade e completude dos resultados” (2017, p. 189, grifo das autoras).

A esse respeito, é oportuno explicar que vários instrumentos podem constituir ou ser utilizados em uma técnica. Por exemplo, na observação sistemática, podem ser utilizados: quadros, anotações, escalas, dispositivos mecânicos, câmeras etc. (MARCONI; LAKATOS, 2017).

Isto posto, como instrumento e técnicas de produção de dados, nesta pesquisa, se empregou a observação, aplicação de questionários e as conversações dos grupos *WhatsApp*. Destes instrumentos e técnicas, inicialmente se fez uso da observação sistemática. Para Lüdke (1986, p. 29),

Para que se torne um instrumento válido e fidedigno de investigação científica, a observação precisa ser antes de tudo controlada e sistemática. Isso implica a existência de um planejamento cuidadoso do trabalho e uma preparação rigorosa do observador.

Belei *et al* (2008, p. 191) complementam que, na aplicação da observação, “[...] são registrados dados visíveis e de interesse da pesquisa. As anotações podem ser feitas por meio de registro cursivo (contínuo), uso de palavras-chaves, *check list* e códigos, que são transcritos posteriormente”. E, para Poupart *et al* (2008, p. 255), tal técnica se configura como:

[...] procedimento de pesquisa qualitativa, implica a atividade de um pesquisador que observa pessoalmente e de maneira prolongada situações e comportamentos pelos quais se interessa, em reduzir-se a conhecê-los somente por meio das categorias utilizadas por aqueles que vivem essas situações.

Assim, com o objetivo de desenvolver uma Sequência Didática (Produto Educacional) com potencialidades para servir como base para o aprendizado significativo da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia, foi possível observar o envolvimento e a participação dos alunos nas atividades propostas.

Especificamente sobre o questionário, este se configura como um instrumento de produção de dados. No caso desta pesquisa, foram aplicados antes, durante e após a aplicação do Produto Educacional (APÊNDICE A), perfazendo um total de 6 questionários, com as seguintes finalidades:

- Questionário 1: reconhecer os conhecimentos prévios dos alunos sobre a Física aplicada à radioterapia (APÊNDICE C);

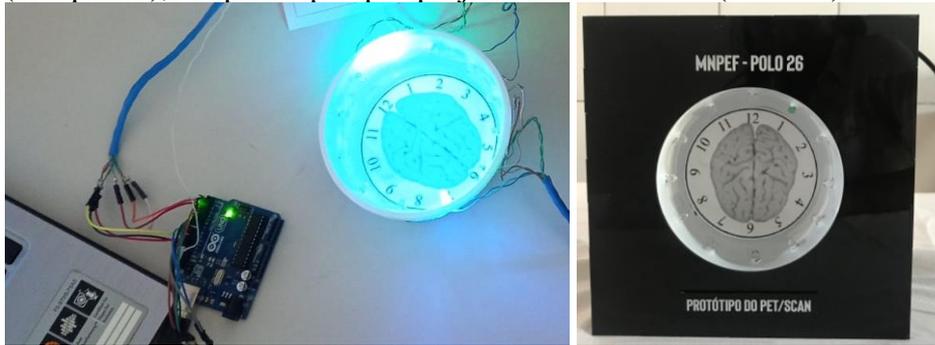
- Questionário 2: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 02 (APÊNDICE D);
- Questionário 3: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 03 (APÊNDICE E);
- Questionário 4: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 04 (APÊNDICE F);
- Oficina/Atividade com o protótipo do aparelho PET/Scan *simulation* (APÊNDICE G);
- Questionário 5: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 05 (APÊNDICE H);
- Questionário 6: reconhecer as significações produzidas pelos participantes da pesquisa sobre o Produto Educacional (APÊNDICE J).

Especificamente sobre o Questionário 5 (APÊNDICE H), buscou-se reconhecer por parte dos alunos as aprendizagens sobre o *PET simulation de LED*, a finalidade desta simulação e o modo de funcionamento do PET/Scan.

A título de esclarecimentos, o protótipo do aparelho PET/Scan, comentado anteriormente, foi construído com a utilização de um dispositivo de arduino e teve como objetivo simular o funcionamento do aparelho de PET/Scan, tão utilizado na radioterapia para diagnóstico e tratamento de câncer. Para isso, utiliza como princípios físicos principais as radiações ionizantes através dos radiofármacos, produção e aniquilação por pares.

Para Horst e Cordenonsi (2021), o Arduino surgiu na Itália em 2005 e se trata de uma placa eletrônica que tem um microcontrolador anexo à sua estrutura que dispõe de facilidade na programação, podendo ser utilizados códigos simples e abertos. Possuindo a capacidade de se conectar a sensores, LED, dentre outros, com a capacidade de conexão entre o digital e o analógico. Diante de tal facilidade de uso e manuseio, é bastante utilizada em projetos de robótica e automação. A Figura 26 apresenta o protótipo funcionando e conectado ao computador.

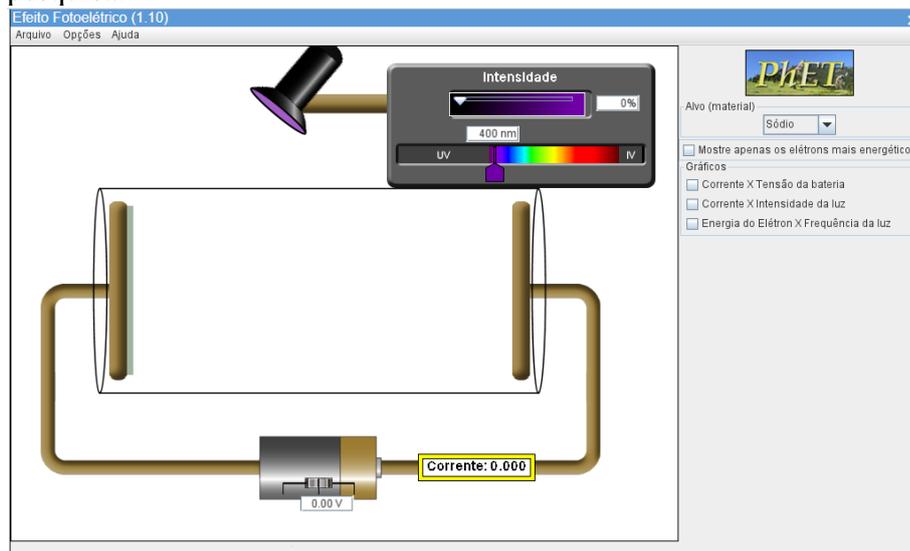
Figura 26: Arduino conectado ao protótipo do PET/Scan e ao notebook (à esquerda), e o protótipo após projeto de acabamento (à direita).



Fonte: Próprio autor.

Já o Questionário 2 (APÊNDICE D), dentre outros dados produzidos, tratou do simulador *online* Phetcolorado, ferramenta também empregada na aplicação do Produto Educacional. É uma plataforma voltada à simulação de áreas como matemática, física, química, biologia, dentre outras. Possui código aberto (código fonte que permite colaboração dos usuários para fins de aprimoramento das simulações pré-estabelecidas) e se apresentam nas versões Java ou Flash. Podendo ser simulada no navegador do computador, ou baixada no próprio aparelho; assim como no aparelho de smartphone através do aplicativo Phetcolorado (PHETCOLORADO, 2022), demonstrada na Figura 27.

Figura 27: Imagem do simulador do Efeito Fotoelétrico utilizado na pesquisa.



Fonte: Phetcolorado (s.d).

Essa simulação do Efeito Fotoelétrico foi implementada com o objetivo de reforçar e complementar o debate do Texto 1, enviado de forma escrita no Encontro 02,

através do *Google Classroom*. Outro objetivo foi o de reforçar o aprendizado ancorado na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, baseado numa experiência de laboratório virtual.

Assim, retomando a importância dos Questionários enquanto instrumentos de produção de dados, segundo Oliveira (2017), com fins de se buscar registrar sentimentos, crenças, expectativas, situações vivenciadas e sobre todo e qualquer dado que o pesquisador queira registrar, se utilizam os questionários. São bastantes utilizados nos registros de características pessoais dos sujeitos/participantes ou de grupos sociais que fazem parte da pesquisa. No caso deste estudo, através da aplicação dos questionários objetivou-se identificar os conhecimentos prévios dos participantes da pesquisa acerca da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia; e reconhecer as significações desenvolvidas pelos alunos, sobre a Sequência Didática.

Como instrumentos auxiliares e complementares na produção de dados, foram empregadas ferramentas tecnológicas digitais. De acordo com Junior e Albuquerque (2016), atualmente estão disponíveis uma gama de aplicativos direcionados à comunicação instantânea entre usuários, a exemplo do *Messenger*, *Telegram*, *Facebook*, *Gtalk*, *WhatsApp*, entre outros. Tratando-se do *WhatsApp*, este se popularizou e tornando-se mais presente no cotidiano de seus usuários. Inicialmente, o objetivo era o de estabelecer comunicação entre as pessoas por meio de mensagens enviadas e recebidas com o auxílio da internet. No decorrer do tempo, com o desenvolvimento das tecnologias, adquiriu novas aplicações, sobretudo, nas relações comerciais, marketings, saúde, telecomunicações, dentre outras.

A educação vem se utilizando dessa ferramenta tecnológica para mediar relações mais estreitas entre professor e aluno, como também facilitar o envio de materiais e tarefas direcionadas ao ensino, realidade esta que se tornou mais visível nas aulas remotas, em decorrência da pandemia provocada pela COVID-19.

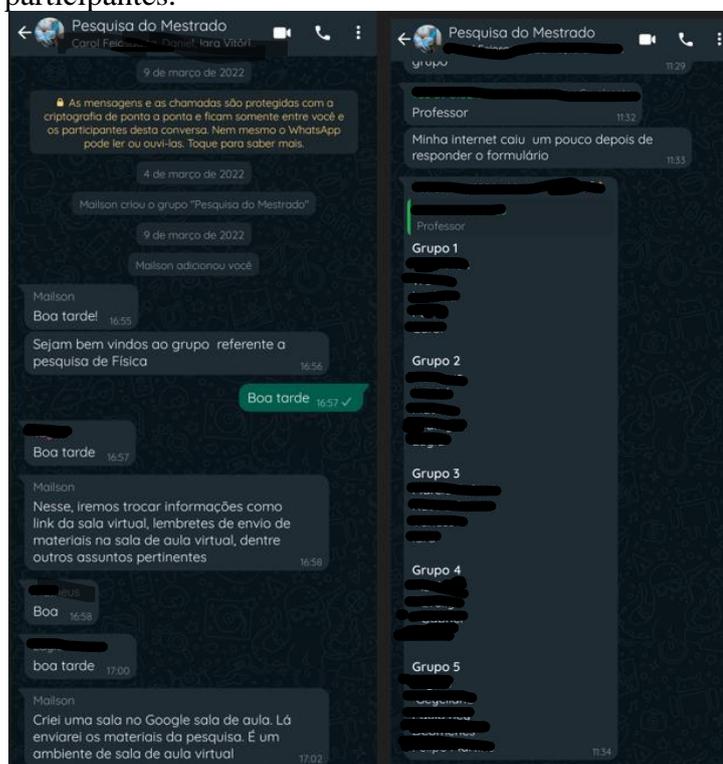
No entanto, a utilização do referido aplicativo na educação, o que não é diferente de qualquer outro recurso mediador, requer um planejamento e direcionamento por parte do professor para que o mesmo não seja utilizado com outros fins. Nesse sentido, Lopes e Vaz (2016, p. 3), fundamentados em Junior e Albuquerque (2016), esclarecem que

O WhatsApp em si não é uma rede social, pois sua estrutura é compatível com a definição de mídia social, porém esse aplicativo tem a capacidade de gerar incontáveis redes sociais através da formação de grupos em sua plataforma, fomentando de forma intensa a interação dos participantes, ou seja, os “atores sociais” envolvidos.

Apesar de não ser considerado rede social, nas palavras dos autores em tela, ele se adequa muito bem à formação de grupos para aplicação de metodologias ativas de aprendizagem, tanto nos formatos presencial e Ensino à Distância (EaD).

No caso desta pesquisa, o *WhatsApp* foi um recurso bastante utilizado, produzindo, a partir das conversações dados que nos deram elementos para respostas do problema de pesquisa. A título de exemplificação, na Figura 28, são apresentadas conversas trocadas entre os participantes e o pesquisador. Para preservar a identificação dos nomes reais e contatos dos participantes da pesquisa, foram utilizados efeitos ao longo das conversas.

Figura 28: Formação dos subgrupos de *WhatsApp* pelos participantes.



Fonte: Próprio autor (2022).

É importante destacar que, devido às condições financeiras de grande parte dos estudantes brasileiros, sobretudo os pertencentes às escolas públicas, muitas escolas adotaram a ferramenta *WhatsApp* como instrumento de comunicação e de mediação facilitação nas aulas remotas.

Tal recurso tecnológico se apresentou no período pandêmico como importante ferramenta para que o ensino acontecesse de alguma forma, pois muitos estudantes não dispunham de computadores. Esta ferramenta, delimitando esta pesquisa, apresentou grande

potencial na interação de seus participantes e pesquisador, o que produziu uma proximidade maior através da plataforma digital. Reforçam Guerra *et al* (2021, p. 283) que

[...] o aplicativo WhatsApp, pode ser uma importante ferramenta pedagógica, pelo seu dinamismo e interatividade, sendo um suporte de transformação dos processos de ensino e aprendizagem. Sendo uma ferramenta de suporte para prática pedagógicas e de mensuração da colaboração, mediação e construção do conhecimento.

Enfim, esta ferramenta tecnológica contribuiu na comunicação entre o pesquisador e os participantes, por intermédio dela se enviavam informações e se dirimiam algumas dúvidas pontuais quanto a prazos para leituras, confirmação dos próximos Encontros (momento e aplicação da pesquisa de modo virtual e presencial), formação de grupos para debate no horário dos Encontros, envio de links para acesso à sala do *Google Meet* e outros encaminhamentos pertinentes.

5.5 Procedimentos de Análise de Dados

Partindo do pressuposto de que a etapa dos procedimentos de análise de dados é um momento bem complexo, inicialmente, se organizou todos os dados produzidos através das técnicas e instrumentos já mencionados, considerando os 5 (cinco) encontros formativos/aulas com os alunos, participantes da pesquisa, conforme o Quadro 2.

Quadro 2: Esboço dos encontros formativos/aulas e suas respectivas ações, formato de aplicação, carga horária e data da pesquisa de campo.

Encontros /aulas	Data	Carga horária	Formato de aplicação	Ações
1º	10/03/22	2 h/a	Via Plataforma <i>Google Meet</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentação da proposta de pesquisa/Produto Educacional, por meio de slides, a fim de conscientizar os alunos da sua relevância, com destaque nos objetivos, metodologia, referencial teórico e relevância, bem como foi informado o número de encontros/aulas previstos; • Esclarecimentos e assinaturas, pelos

				<p>alunos interessados em participar da pesquisa, do TCLE (APÊNDICE B);</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instruções, através de slides, de como os alunos participantes da pesquisa deveriam proceder a fim de aproveitar e conseguir melhor rendimento no estudo do material, disponibilizado no <i>Google Classroom</i>; • Aplicação do Questionário 1: Conhecimentos prévios sobre a Física aplicada à radioterapia (APÊNDICE C).
2º	18/03/22	2 h/a	Via Plataforma Google Meet	<ul style="list-style-type: none"> • Constituição de equipes de alunos para reflexões das ideias centrais do texto: Interação da radiação com a matéria, disponibilizado anteriormente no <i>Google Classroom</i>; • Propiciar momento para debate, em que as dúvidas possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer as dúvidas sob a mediação e intervenção do professor/pesquisador; • Simulação/demonstração <i>on-line</i>, pelo professor pesquisador, do Efeito Fotoelétrico, através do <i>Phetcolorado</i>, mediado pela plataforma <i>Web</i>; • Aplicação do Questionário 2: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 02 (APÊNDICE D); • Disponibilização do material sobre Raios X: Raio x convencional e Tomografia Computadorizada (TC),

				<p>no <i>Google Classroom</i>, referente ao Encontro 3;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilização do Questionário 2: Questionário 2: Conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 02 (APÊNDICE D).
3º	24/03/22	2 h/a	Via Plataforma Google Meet	<ul style="list-style-type: none"> • Propiciar momento para debate do tema “Raios X: Raio x convencional e Tomografia Computadorizada (TC)”, em que as dúvidas possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer as dúvidas sob a mediação e intervenção do professor/pesquisador; • Aplicação do Questionário 3: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 03 (APÊNDICE E); • Disponibilização do material sobre Radioterapia e Hadronterapia, no <i>Google Classroom</i>, referente ao Encontro 4.
4º	01/04/22	2 h/a	Via Plataforma Google Meet	<ul style="list-style-type: none"> • Propiciar momento para debate sobre Radioterapia e Hadronterapia, em que as dúvidas possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer tais dúvidas sob a mediação e intervenção do professor/pesquisador; • Aplicação do Questionário 4: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 04 (APÊNDICE F); • Disponibilização do material sobre PET/Scan e Radioterapia, no <i>Google</i>

				<i>Classroom</i> , referente ao Encontro 5.
5°	07/04/22	2 h/a	Presencial	<ul style="list-style-type: none"> • Propiciar momento para debate do tema “PET/Scan e radiofármacos”, em que as dúvidas possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer tais dúvidas sob a mediação e intervenção do professor/pesquisador; • Oficina/simulação computacional com utilização do Arduíno Uno; • Aplicação do Questionário 5: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 05 (APÊNDICE H).

Fonte: Próprio autor (2022).

Isto posto, foi feita uma leitura minuciosa dos dados produzidos, buscando encontrar caminhos para a análise e discussão dos dados, em conformidade com a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel. Assim, se recorreu às contribuições teóricas de Minayo (2010), com a proposta do procedimento conhecido como categorização. A categorização, na verdade, se trata de uma

[...] uma operação de classificação de elementos constitutivos de um conjunto, por diferenciação e, seguidamente, por reagrupamento segundo o gênero (analogia), com critérios previamente definidos. As categorias são rubricas ou classe, as quais reúnem um grupo de elementos (unidades de registro) sob um título genérico [...]. Trabalhando com depoimentos, por exemplo, podemos agregar aqueles que falam de “ofensas morais” e “perdas materiais” numa categoria denominada “danos”. A categorização tanto pode ser realizada previamente, exigindo um conhecimento sólido por parte do pesquisador para encontrar um esquema classificatório adequado ao assunto a ser analisado, como pode surgir a partir da análise do material de pesquisa (MINAYO, 2010, p. 88, grifo da autora).

Partindo desse entendimento e considerando os dados produzidos nesta pesquisa, estes, no processo de análise e discussão dos dados, foram divididos em três categorias, a saber:

- Reconhecendo os conhecimentos prévios dos alunos sobre a Física aplicada à radioterapia;

- O movimento de elaboração e desenvolvimento da Sequência Didática (Produto Educacional) como base para o aprendizado significativo da Física das Radiações aplicada à Radioterapia;

- Significações desenvolvidas pelos alunos sobre as potencialidades do Produto Educacional (SD).

5.6 Produto Educacional

O Produto Educacional – Sequência Didática: ASPECTOS DA FÍSICA E SUA RELAÇÃO COM OS TRATAMENTOS RADIOTERÁPICOS: UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO – será apresentado no Apêndice A deste trabalho.

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS EMPÍRICOS

Nesta seção, procedeu-se à análise e discussão dos dados empíricos produzidos a partir dos instrumentos e técnicas: a observação, aplicação de questionários e as conversações dos grupos *WhatsApp*. Para tanto, se adotou a proposta do procedimento conhecido como categorização (MINAYO, 2010). Assim, se chegou a três categorias:

- Reconhecendo os conhecimentos prévios dos alunos sobre a Física aplicada à radioterapia;
- O movimento de elaboração e desenvolvimento da Sequência Didática (Produto Educacional) como base para o aprendizado significativo da Física das Radiações Ionizante aplicada à Radioterapia;
- Significações desenvolvidas pelos alunos sobre as potencialidades do Produto Educacional (SD).

6.1 Reconhecendo os conhecimentos prévios dos alunos sobre a Física aplicada à radioterapia

Esta categoria refere-se ao Encontro 1, ocorrido em 10/03/2022, em que se aplicou o Questionário 1: conhecimentos prévios dos alunos sobre a Física aplicada à radioterapia, composto de quatro questões (APÊNDICE C). Com este instrumento, procurou-se atingir o objetivo específico desta pesquisa, o qual já está implícito no próprio título do referido Questionário: Identificar os conhecimentos prévios dos participantes da pesquisa acerca da Radiação aplicada à Radioterapia. É importante destacar que dos 14 participantes, somente 11 responderam ao Questionário. De acordo com Vinholi Júnior (2017, p. 27), apoiado em Moreira (2010),

os conhecimentos prévios assumem um importante papel no processo de aprender significativamente, pois quando novas informações são incorporadas à estrutura cognitiva do sujeito e este possui conhecimento prévio adequado sobre determinado assunto, os subsunçores vão adquirindo novos significados, tornando-se diferenciados e mais estáveis.

O interesse em identificar tais conhecimentos prévios se justifica por corroborar com o pesquisador deste autor Vinholi Júnior (2017). Fica evidenciado o papel dos conhecimentos prévios, subsunçores, inerentes à estrutura cognitiva do indivíduo, como defende a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel.

Sobre a **Questão 1 – Você já ouviu falar em aplicações das leis da física na medicina? Em caso afirmativo, explique –**, eis as respostas:

Sim, em quase tudo que envolva medicina (A1).

Não (A2).

Não (A3).

Não (A4).

Não (A5).

Não (A6).

Sim, já li alguns livros que falavam sobre o assunto (A7).

Não (A8).

Sim, em muitos casos de terapia, principalmente muscular, são utilizados muitos recursos relacionados à física. Um exemplo são o uso de câmaras a vácuo (A9).

Sim (A10).

Não (A11).

Não (A12).

Sim. A maioria dos métodos medicinais necessitam do uso da física, seja no uso de máquinas, na radioterapia, nos medicamentos. (A13).

Não (A14).

Em linhas gerais, ao se fazer a análise das respostas dos alunos, os dados revelam que 9 (64,28%) deles nunca ouviram falar em aplicações das leis da física na medicina. Este resultado, de certa forma, vai ao encontro do estudo de Silva (2019), o qual teve como objetivo, a partir de uma análise de livros didáticos, compreender de que forma livros didáticos de Física abordam a temática da utilização das radiações na Medicina. Para este mesmo autor (2019, p. 226),

Nos periódicos revisados não encontramos nenhum trabalho que tivesse analisado como livros didáticos voltados ao ensino básico abordam as inter-relações entre as radiações e a Medicina. Encontramos trabalhos desse tipo apenas no âmbito de eventos científicos nacionais como o Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF) e o Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (EPEF).

Esta é uma situação emblemática e, portanto, deve ser repensada pela escola, uma vez que a própria BNCC (BRASIL, 2018a) já comentado anteriormente, na área CIÊNCIAS DA NATUREZA E SUAS TECNOLOGIAS NO ENSINO MÉDIO: COMPETÊNCIAS ESPECÍFICAS E HABILIDADES, traz como Competência Específica 1: “Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas interações e relações entre matéria e energia, para propor ações individuais e coletivas que aperfeiçoem processos produtivos,

minimizem impactos socioambientais e melhorem as condições de vida em âmbito local, regional e global”. E, dentre os conteúdos a serem trabalhados na referida competência específica, têm-se: espectro eletromagnético e efeitos biológicos das radiações ionizantes.

Diante do exposto, se reforça a relevância social desta pesquisa e Produto Educacional, e como explicita Silva (2019, p. 238, grifo do autor),

[...] sugerimos que além de abordar aspectos do funcionamento da radiografia, da tomografia computadorizada, da ressonância magnética, da radioterapia, do mapeamento por radioisótopos e da tomografia por emissão de pósitrons, sejam abordados também de forma sistemática os riscos associados à exposição à radiação ionizante, a diferença entre as doses de radiação ionizante envolvidas em diagnósticos e em terapias, a diferença entre contaminação e irradiação, os problemas resultantes do aumento do número de exames que realizamos, os interesses em jogo, os custos envolvidos e de que forma eles atuam para delimitar quem pode ter acesso aos “produtos da modernidade” etc.

Quanto à afirmação de ter conhecimentos prévios sobre as aplicações das leis da física na medicina, apenas 4 (28,57 %) participantes responderam que “SIM”, apresentando explicação e, somente 1 (7,15 %) respondeu “SIM”, sem apresentar justificativa, o que denota, na verdade, não ter conhecimento prévio sobre as Leis da Física.

Especificamente sobre os alunos que responderam que têm conhecimentos prévios, apresentando alguma explicação sobre tal subsunçor, ao afirmarem que “*em quase tudo que envolva medicina*” (A1); “*já li alguns livros que falavam sobre o assunto*” (A7); “*em muitos casos de terapia, principalmente muscular, são utilizados muitos recursos relacionados à física. Um exemplo são o uso de câmaras a vácuo*” (A9); “*Sim. A maioria dos métodos medicinais necessitam do uso da física, seja no uso de máquinas, na radioterapia, nos medicamentos*” (A13), pode-se dizer que estes alunos ainda não têm uma estabilidade cognitiva mais elaborada deste subsunçor.

Isso ficou mais evidenciado na fala de A7 que, embora tenha dito que já leu livros sobre tal problemática, não demonstrou nenhum conhecimento prévio, o que não foi diferente do A10, ao afirmar que já ouviu falar em aplicações das leis da física na medicina, como também A9 ao apresentar a propriedade de tais conhecimentos nos tratamentos radioterápicos. Certamente, estes alunos já receberam algumas informações sobre tal temática.

Quanto a A9, nos provocou a refletir por que estabelecer essa relação da aplicação das Leis da Física ao uso de câmaras a vácuo. Na nossa análise, acredita-se que este aluno já tem algum conhecimento prévio sobre a ventosaterapia ou já recebeu aplicações de tal procedimento fisioterápico. Tal procedimento é classificado, como explica Salemi (2020, p. 17), “[...] de diversas formas dentre elas o tipo dry cupping [...], no qual o tratamento é

realizado através do estímulo de pontos específicos (acupontos) ou sobre os pontos de dor, para tratar as patologias ou condições de origem musculoesqueléticas [...]”.

Merece um destaque à afirmação de A13, posto que já reconhece a aplicação das leis da física no que ela chama de métodos medicinais. A referida aluna ainda dá exemplos de situações em que ocorrem tal aplicação: uso de máquinas, na radioterapia e na produção de medicamentos, a exemplo dos radiofármacos.

A respeito dos conhecimentos prévios de A13, pelo viés da Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, pode-se afirmar que interações entre novos conhecimentos e o subsunçor “a aplicação das leis da física na medicina”, este ficará mais acessível a uma aprendizagem significativa, onde a aluna expandirá cada vez mais os seus conhecimentos acerca desta temática.

Em síntese, as análises dos dados produzidos a partir da Questão 1 vão ao encontro das reflexões de Moreira (2012, p. 30, tradução nossa), ao comentar que:

O subsunçor pode ter maior ou menor estabilidade cognitiva, pode estar mais ou menos diferenciado, ou seja, mais ou menos elaborado em termos de significados. Contudo, como o processo é interativo, quando serve de idéia-âncora para um novo conhecimento ele próprio se modifica adquirindo novos significados, corroborando significados já existentes. É importante reiterar que a aprendizagem significativa se caracteriza pela interação entre conhecimentos prévios e conhecimentos novos, e que essa interação é não-literal e não-arbitrária. Nesse processo, os novos conhecimentos adquirem significado para o sujeito e os conhecimentos prévios adquirem novos significados ou maior estabilidade cognitiva.

Diante dessas primeiras considerações, passa-se a analisar os dados produzidos a partir das respostas da **Questão 2 – Tem conhecimentos dos efeitos resultantes da radiação com a matéria, a exemplo do Compton, fotoelétrico e produção por pares? Tem conhecimentos de raios X e suas aplicações?**

Não, mas um pouco sobre raios e suas aplicações (A1).

Não tenho conhecimentos dos efeitos resultantes da radiação com a matéria, porém tenho conhecimentos de raios X e suas aplicações na medicina (A2).

Somente sobre raios X e suas aplicações na medicina (A3).

Não, mas um pouco sobre raios X e suas aplicações (A4).

Não (A5).

Sobre raios X sim (A6).

Muito pouco sobre radiação e nunca ouvi falar em raios X (A7).

Não (A8).

Não lembro de ter ouvido ou estudado sobre radiação, mas já ouvi falar de raios X (A9).

Só ouvi falar de raios X (A10).

De radiação não, mas de raios X sim (A11).

O que eu sei é que o raio x está presente no dia a dia da medicina, como por exemplo na ortopedia, em que o médico analisa se há alguma modificação nos ossos/articulações (A12).

Tenho noções bem básicas quanto a esse assunto. Em sua grande parte, sim. Por conta de estudos com química no ensino médio e no fundamental (A13).

Tenho um pouco de conhecimento de radiação e raios X (A14).

Sobre a Questão 2, fica evidenciado que 11 (78,57 %) dos alunos não têm conhecimentos prévios sobre os efeitos resultantes da radiação com a matéria, a exemplo do Compton, fotoelétrico e produção por pares. Sendo assim, apenas 3 (21,43 %) dos alunos participantes da pesquisa, tem algum conhecimento sobre este conteúdo, o que pode ser comprovado nas falas: *“Muito pouco sobre radiação e nunca ouvi falar em raios X” (A7); “Tenho noções bem básicas quanto a esse assunto. Em sua grande parte, sim. Por conta de estudos com química no ensino médio e no fundamental” (A13); “Tenho um pouco de conhecimento de radiação e raios X” (A14).*

Diante dessa situação, ao se analisar que 11 alunos não têm conhecimentos prévios sobre os efeitos resultantes da radiação com a matéria, a exemplo do Compton, fotoelétrico e produção por pares, o que mais nos chamou atenção, pergunta-se: como explicar tal cenário? No entender deste pesquisador e professor de física da educação básica, isso se justifica em decorrência de uma série de fatores, como, por exemplo: estes conteúdos não são trabalhados no ensino fundamental e tão pouco no ensino médio, em consequência de a carga horária da disciplina física ter sido reduzida para 2 horas-aula semanais. Essa nossa justificativa vai ao encontro do pensamento de Moura e Vianna (2020, p. 2) ao explicitarem que,

Somado ao fato das escolas públicas terem uma reduzida carga horária para a Física, os conteúdos programáticos de Física Moderna, Quântica e Nuclear geralmente não são ensinados de forma satisfatória e, em alguns casos, esses conteúdos nem sequer são ministrados pelos professores. A deficiência no Ensino de Física Moderna causa prejuízos na formação dos estudantes, pois dificulta a compreensão de muitos dos aspectos tecnológicos do mundo contemporâneo, como as telecomunicações com e sem fio, a aplicação Física na área da medicina, engenharias, funcionamento de aparatos tecnológicos de uso diário como smartphones, computadores, CD's, DVD's, internet, etc.

Por outro lado, ao se perguntar: **Tem conhecimentos de raios X e suas aplicações?**, 12 (85,71 %) dos alunos responderam que “SIM” ou têm conhecimentos (ou já

ouviram falar) acerca desta temática, enquanto apenas 2 (14,29 %) alunos, respectivamente, A5 e A8 responderam que “NÃO” têm conhecimento algum.

Sobre esse resultado, ou seja, em que a maioria dos alunos afirmou que tem conhecimento sobre os raios X, na nossa análise, certamente, estes alunos associam o conteúdo raios X trabalhado na física ao seu cotidiano, por ter vivenciado a realização de alguma radiografia, solicitada pelos médicos. Nessa mesma lógica de raciocínio, para Dalmolin (2018, p. 118), “[...] ao que parece, relacionaram os raios X ao aparelho de diagnóstico, atribuindo a este a capacidade de visualizar o interior do corpo humano [...]”.

Vale ainda destacar que, dos 12 alunos que responderam “SIM”, muito nos chamou a atenção da fala de A12: *“O que eu sei é que o raio x está presente no dia a dia da medicina, como por exemplo na ortopedia, em que o médico analisa se há alguma modificação nos ossos/articulações”*. Esta aluna evidenciou propriedade da aplicação dos raios X na medicina, destacando o caso da ortopedia.

Para esta aluna que, de certa forma, já tem conhecimento dos raios X e suas aplicações, estudar acerca da radioterapia vai corroborar os seus conhecimentos prévios. Para Moreira (2012), isto garante à aluna mais estabilidade cognitiva e, provavelmente, mais estabilidade e propriedade.

Com relação à **Questão 3 – Tem conhecimentos científicos sobre técnicas de imagens por tomografias computadorizadas (TC)?**, dos 14 alunos participantes da pesquisa, 11 (78,58 %) responderam “NÃO”, sem apresentar comentários. Desse modo, apenas 3 (21,42 %) responderam que “SIM”. Destes, somente A12 fez comentário acerca de sua resposta. Para esta aluna, *“as tomografias computadorizadas são utilizadas no dia a dia da neurologia, ao fazer uma TC podemos descobrir se uma pessoa está com um tumor, coágulo, derrame, ou seja, acesso a massa do cérebro.”* (A12).

O que se observa é que a referida aluna, embora tenha empregado termos científicos (neurologia, tumor e coágulo), ainda está presa a termos do senso comum, o que pode ser constatado quando ela faz a associação entre *“derrame”* e *“massa do cérebro”*. Isso, certamente, segue a nossa mesma linha de raciocínio e de análise e explicação dada por Dalmolin (2018), a respeito dos 12 (85,71 %) alunos que responderam que “SIM” ao se fazer a pergunta: Tem conhecimentos de raios X e suas aplicações?

Sobre essa situação, considerando os pressupostos da Teoria da Aprendizagem Significa de Ausubel, reforça-se que um aluno que tenha conhecimentos prévios sobre TC usará esses conhecimentos ao se deparar com aulas de física sobre Radiações aplicadas à radioterapia. Ou seja, esses conhecimentos (neurologia, tumor, coágulo, derrame e massa do

cérebro) auxiliarão a entender as formas como são aplicadas as radiações nos tratamentos radioterápicos. E, para complementar essa nossa análise, destaca-se que, “[...] na interação entre o conhecimento novo e o antigo, ambos serão modificados de uma maneira específica por cada aprendente, como consequência de uma estrutura cognitiva peculiar a cada pessoa” (TAVARES, 2004, n.p).

Por fim, se apresenta a análise das respostas da **Questão 4 – Sabe-se algo sobre terapias de combate ao câncer, a exemplo da radioterapia, que utiliza raios X para tratamentos de tumores? Você já ouviu falar acerca do tratamento radioterápico à base de hádrons, chamado Hadronterapia?**

Sei mais ou menos sobre radioterapia e nunca ouvi falar sobre a hadronterapia (A1).

Não (A2).

Não (A3).

Já ouvi comentários somente sobre os raios X na radioterapia (A4).

Não ouvi qualquer comentário sobre radioterapia e hadronterapia (A5).

Nunca li nada sobre esses assuntos (A6).

Só ouvi falar sobre radioterapia (A7).

Não tenho conhecimento sobre nenhuma delas (A8).

Só não sei falar sobre a hadronterapia (A9).

O pouco que eu ouvi falar foi sobre a radioterapia em pessoas com câncer (A10).

Não (A11).

Sim. Não (A12).

Sim. Não (A13).

Sim, já me explicaram por cima o que se trata. Não (A14).

Dentre os 14 participantes, 6 (42,85 %) afirmaram que “NÃO” têm conhecimentos acerca das terapias de combate ao câncer, embora na própria pergunta se tenha dado o exemplo de raios X para tratamentos de tumores. Logo, apenas 8 (51,15 %) afirmaram que têm algum conhecimento acerca da temática em pauta.

Diante deste resultado, observa-se que a ausência desse conhecimento pode ser justificada pela própria escola ao negligenciar conteúdos em seu currículo relacionados aos fenômenos físicos aplicados às tecnologias, sobretudo, àquelas da radioterapia. E, quando estes conteúdos são trabalhados, são desprovidos de significados, uma vez que os professores parecem não trabalhar com a perspectiva da contextualização e da interdisciplinaridade. A esse respeito, Medeiros e Lobato (2010, p. 66) esclarecem que:

O ensino de Radiações pode ser apoiado em material didático que aborde o conteúdo de maneira contextualizada, mostrando avanços tecnológicos promovidos pela utilização das Radiações e as formas de interação com a matéria, descrevendo-as e explicando-as, diferentemente de como o conteúdo é abordado em alguns livros didáticos de Ensino Médio. [...] os estudantes podem perder a oportunidade de aprender mais sobre o que ocorre no mundo que os cerca, pelo fato de os currículos de Física, Biologia e Química ou os livros didáticos, muitas vezes, não apresentarem os conteúdos de forma contextualizada.

Delimitando à pergunta, **Você já ouviu falar acerca do tratamento radioterápico à base de hádrons, chamado Hadronterapia?**, conforme os dados produzidos a partir do Questionário 1 (APÊNDICE C), dos 14 participantes, nenhum revelou conhecimento prévio sobre tal tratamento radioterápico. A explicação que se pode dar para essa realidade, certamente, se justifica pelo fato de a hadronterapia ainda não ser implementada no Brasil e, também, por não ser discutida nos livros didáticos de física do ensino médio. Além disso, “[...] cara e disponível em apenas cerca de 40 centros médicos ou hospitais localizados na Ásia, Europa, Estados Unidos e África do Sul (no Brasil não há nenhum), a hadronterapia já foi empregada em aproximadamente 112 mil pessoas nos últimos 20 anos [...]” (PIVETTA 2014, p. 24).

6.2 O movimento de elaboração e desenvolvimento da Sequência Didática (Produto Educacional) como base para o aprendizado significativo da Física das Radiações aplicada à Radioterapia

Nesta categoria, a partir dos dados produzidos através da observação e da aplicação de Questionário, buscou-se analisar o movimento de elaboração e desenvolvimento de uma Sequência Didática (Produto Educacional) com potencialidades para servir como base para o aprendizado significativo da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia.

Isto posto, no Encontro 1, com duração de 2 horas-aula (100 min), ocorrido em 10/03/2022, inicialmente, foi feita a apresentação da proposta de pesquisa/Produto Educacional, por meio de slides, a fim de conscientizar os alunos da sua relevância, com destaque nos objetivos, metodologia, referencial teórico e relevância, bem como foi informado o número de encontros/aulas previstos. Em seguida, àqueles alunos interessados em participar da pesquisa/Produto Educacional, foram dados esclarecimentos e solicitadas as assinaturas do TCLE (APÊNDICE B).

Dando prosseguimento às ações deste primeiro Encontro, através de slides, foram dadas instruções aos alunos participantes da pesquisa/Produto Educacional de como deveriam

proceder a fim de aproveitar e conseguir melhor rendimento no estudo do material, disponibilizado no *Google Classroom*, realizando, portanto, uma leitura prévia deste material, com possíveis questionamentos, posto que a nossa proposta metodológica se alinhou à Pesquisa-ação.

Por fim, se aplicou o Questionário 1 (APÊNDICE C), com o objetivo de identificar os conhecimentos prévios dos participantes da pesquisa acerca da Radiação aplicada à Radioterapia, cuja análise e discussão dos dados já foi realizada na categoria anterior.

No Encontro 02, com duração de 2 horas-aula (100 min), realizado em 18/03/2022, *a priori*, foram constituídas as equipes de alunos, distribuídas entre os 14 participantes, para reflexões das ideias centrais do texto: Interação da radiação com a matéria.

Figura 29: Momentos de reflexões das ideias centrais dos textos, pelos alunos.



Fonte: próprio pesquisador (FEITOSA, 2022).

É oportuno esclarecer que, previamente, foi disponibilizado aos alunos um Questionário com questões abertas (APÊNDICE D) para mediar a discussão do texto, no entanto, deixando livre para que os alunos apresentassem as suas ideias centrais.

Observou-se que os alunos se mostraram bastante motivados e, portanto, fizeram os registros, inicialmente, destacando o que haviam entendido por efeito Compton e por fotoelétrico, como revelados nos fragmentos:

Compton, é o espalhamento de um fóton por uma partícula carregada, geralmente um elétron, que resulta em uma diminuição da energia (aumento do comprimento de onda) do fóton espalhado, tipicamente na faixa de raios-X ou de raios gama [...]. O efeito fotoelétrico ocorre quando um raio X ou gama incide sobre um elétron, transferindo-lhe toda a sua energia e, desse modo, arrancando-o do átomo e

ganhando energia cinética. Esse efeito é predominante ou tem maior probabilidade de ocorrer quando a energia do raio incidente é menor que 100 keV [...]. A energia dos fotoelétrons depende da frequência da radiação incidente, não dependendo da intensidade desta (A1).

O efeito Compton acontece quando há uma diminuição da energia de um fóton de raio X, que transfere como energia cinética para o elétron (A7).

O efeito Compton ocorre quando é emitido um fóton de luz em direção ao alvo e este elétron(alvo) absorve parte dessa energia, com o elétron sendo ejetado e o foto será espalhado formando um feixe de luz. O espalhamento será máximo quando o ângulo de espelhamento é igual a $\pi/2$ (A8).

Pelo fato dos feixes dos raios x serem compostos de fótons que viajam a velocidade da luz, usaram a cinemática relativística de Einstein e sua famosa relação massa-energia. após a colisão dos fótons de raios x com o material do qual se deseja receber imagens nota-se um espalhamento. Para concluir o espalhamento se utiliza a equação de De Broglie. Chegando então a sua fórmula do Efeito Compton (A9).

O efeito compton é quando um fóton é espelhado por uma partícula carregada. o espelhamento é máximo quando o ângulo do espelhamento é igual a $\pi/2$ (A8).

O efeito Compton ocorre quando um feixe de partículas fótons atinge um elétron da camada de valência de um átomo, dando a ele metade de sua energia e retirando o elétron daquele lugar e fazendo -o espalhar-se do átomo. O espalhamento torna-se o máximo quando o ângulo teta de espalhamento se torna $\pi/2$ ou seja, 90° . Caso contrário, o feixe estará voltando para o seu local de início (A13).

Se houver variação na intensidade do feixe de luz para um dado elemento haverá uma injeção maior de fotoelétrons e elétrons com isso terá uma maior geração de corrente elétrica [...] existe um momento em que os fotoelétrons param de produzir corrente elétrica e passam a retornar ao ponto de origem porque não será fornecido a energia mínima para que os fotoelétrons possam chegar até a outra placa [...] a mudança do elemento químico no efeito fotoelétrico implica necessariamente em variação do comprimento de onda porque a energia e a função trabalho vão mudar e isso faz com que ocorra a utilização de uma variação de radiação com maior ou menor comprimento de onda (A3).

O efeito fotoelétrico acontece quando os fótons que incidem sobre um material apresentam certa energia capaz de arrancar os elétrons desse material, essa energia e igual a 25KeV [...] ocorrera uma maior injecao de fotoeletrons e eletrons fazendo com que se tenha uma maior geracao de corrente elétrica [...] porque a energia fornecida é menor que a energia da função trabalho, fazendo com que os elétrons se separem do material e sejam atraídos novamente [...] porque a função trabalho ira mudar, será necessário uma variacao na radiacao com maior ou menor comprimento de onda (A6).

No geral, a observação e a análise dos dados apresentados acima, do processo de aprendizagem dos alunos sobre os efeitos Compton e fotoelétrico, permitem-nos revelar que, houve uma aprendizagem significativa, como defendida por Ausubel. No entanto, merece chamar atenção de algumas compreensões equivocadas por parte dos alunos.

O aluno A9, ao afirmar que, “*pelo fato dos feixes dos raios x serem compostos de fótons que viajam a velocidade da luz, usaram a cinemática relativística de Einstein e sua famosa relação massa-energia. após a colisão dos fótons de raios x com o material do qual se deseja receber imagens nota-se um espalhamento. Para concluir o espalhamento se utiliza*

a equação de De Broglie. Chegando então ao sua fórmula do Efeito Compton (A9)”, na verdade, há uma interpretação equivocada por parte desse aluno ao afirmar que, “*com o material do qual se deseja receber imagens nota-se um espalhamento*”. Este aluno não especificou o alvo no material a ser atingido pelo fóton, o que nos remete a uma interpretação que possa vir a ser tanto um elétron quanto um fóton.

É oportuno lembrar que, de acordo com Sears (2016), Compton realizou seus cálculos levando em consideração as interações relativísticas combinadas com conservação da quantidade de energia e colisões, tendo em vista se tratar de um choque entre um fóton e um elétron do alvo.

Sobre a compreensão do aluno A8, de que “*o efeito compton é quando um fóton é espelhado por uma partícula carregada. o espelhamento é máximo quando o ângulo do espelhamento é igual a $\pi/2$* ”, merece também um destaque. Constata-se outro equívoco nessa afirmação, pois o aluno afirma que o fóton é espelhado por uma partícula carregada, sendo que, nesse caso, o correto seria afirmar que houve um espalhamento de um elétron e não de uma partícula qualquer carregada. Como explica Tipler (2014, p. 88, grifo do autor), “[...] se o processo de espalhamento fosse considerado uma “colisão” entre um fóton de energia [...] e um elétron, o elétron absorveria parte da energia inicial e, portanto, a energia [...] do fóton difratado seria menor do que a do fóton incidente”.

Como também observado em A13, ao dizer que, “*o efeito Compton ocorre quando um feixe de partículas fótons atinge um elétron da camada de valência de um átomo, dando a ele metade de sua energia e retirando o elétron daquele lugar e fazendo-o espalhar-se do átomo [...]*”, constata-se uma outra interpretação equivocada sobre o efeito Compton. Para Sears (2016, p. 212), na verdade, o que ocorre diante dessa situação é que “o fóton incidente perderia parte de sua energia e momento linear para o elétron, que recua como resultado de seu impacto”.

Prosseguindo a análise, nas ideias apresentadas pelo aluno A3 sobre efeito fotoelétrico, ao explicitar que, “*se houver variação na intensidade do feixe de luz para um dado elemento haverá uma injeção maior de fotoelétrons e elétrons com isso terá uma maior geração de corrente elétrica [...]*”, fica evidenciado que o referido aluno acrescentou o termo “elétrons” que não coaduna com a teoria do efeito fotoelétrico, conforme esclarece Sears (2016, p. 204): “dependendo da diferença de potencial V_{AC} entre os dois catodos, os elétrons emitidos pelo catodo iluminado (chamados de *fotoelétrons*) podem atravessar o anodo, produzindo uma *corrente fotoelétrica* no circuito externo [...]”.

Ainda sobre as reflexões realizadas pelos alunos sobre o efeito fotoelétrico, também merecem ser pontuados os aspectos. Primeiro, o fato de o aluno A6 afirmar que, “o efeito fotoelétrico acontece quando os fótons que incidem sobre um material apresentam certa energia capaz de arrancar os elétrons desse material, essa energia é igual a 25KeV [...]”. Nesse caso, a energia é de até 25 KeV, e não igual a 25 KeV.

Um segundo aspecto a ser pontuado é a afirmação feita por esse mesmo aluno: “[...] ocorrerá uma maior injeção de fotoelétrons e elétrons fazendo com que se tenha uma maior geração de corrente elétrica [...] porque a energia fornecida é menor que a energia da função trabalho, fazendo com que os elétrons se separem do material e sejam atraídos novamente [...]”. O que ocorre é que, diante dessa situação, a energia fornecida deve ser maior que a função trabalho para que os fotoelétrons sejam ejetados (AMADOR, 2009).

E, um último aspecto, a ser considerado ainda sobre os comentários do aluno A6 é o fato do mesmo entender que “[...] a função trabalho irá mudar, será necessário uma variação na radiação com maior ou menor comprimento de onda”. A esse respeito, para Sears (2016), a função trabalho não apresenta dependência com a radiação e, sim, com o tipo de material a ser irradiado.

Feitas essas análises, uma outra discussão empreendida pelos alunos e professor pesquisador, ao destacarem as ideias centrais do texto trabalhado, foi sobre a produção e aniquilação por pares. Vale lembrar que se trata de mais um efeito da interação da radiação com a matéria. Eis trechos selecionados dos comentários feitos pelos alunos participantes da pesquisa, extraídos do Questionário (APÊNDICE D).

Na produção por pares o fóton que vem com 1,022 MeV que vai passar próximo ao núcleo e vai se dividir em 2 partículas com energias iguais a zero, 511 MeV Que são os chamados de elétrons e pósitrons, e depois que é produzido o pósitron ele vai se chocar com outro elétron com zero 0,511 MeV Que vão se aniquilar produzindo 2 partículas de fótons com energias iguais a 0,511 MeV (A3).

Para a produção de pares é necessário que o fóton tenha energia superior a 1,022 MeV, e passe perto do núcleo atômico (A6).

Para produzir o fóton tem que possuir uma energia superior a 1,022MeV e ele deve passar perto de um núcleo atômico, já para aniquilar o pósitron perde energia e se choca com um novo elétron (A7).

O fóton inicial emitido com 1.022MeV passará próximo ao núcleo dividindo-se em 2 partículas ambas com energia de 0.511 MeV, sendo estas partículas denominadas elétron e pósitron, logo após a produção do pósitron, o mesmo se chocará com outro elétron de átomo distinto também com 0.511 MeV aniquilando-se com esse elétron, gerando dois novos fótons que irão se deslocar diametralmente ambos com 0.511 MeV (A8).

Constata-se, no geral, indícios de que os alunos produziram conhecimentos de forma significativa sobre a produção e aniquilação por pares. No entanto, foi possível identificar afirmações, de certa forma incompletas, pois poderiam ser mais exploradas. A título de exemplos, têm-se os registros dos comentários dos alunos A6 e A7.

Observou-se que o aluno A6, limitou-se apenas em dizer que, *“para a produção de pares é necessário que o fóton tenha energia superior a 1,022 MeV, e passe perto do núcleo atômico”*, diferentemente dos alunos A3 e A8, que demonstraram mais propriedades acerca desta temática. O aluno A3, por exemplo, entende que, além disso se faz necessário que, *“[...] se dividir em 2 partículas com energias iguais a zero, 511 MeV Que são os chamados de elétrons e pósitrons, e depois que é produzido o pósitron ele vai se chocar com outro elétron com zero 0,511 MeV Que vão se aniquilar produzindo 2 partículas de fótons com energias iguais a 0,511 MeV [...]”*.

O mesmo ocorreu com o aluno A7, ou seja, limitando-se apenas em destacar que, *“para produzir o fóton tem que possuir uma energia superior a 1,022MeV e ele deve passar perto de um núcleo atômico, já para aniquilar o pósitron perde energia e se choca com um novo elétron”*. Como diz, o aluno A8, na verdade, *“o mesmo se chocará com outro elétron de átomo distinto também com 0.511 MeV aniquilando-se com esse elétron, gerando dois novos fótons que irão se deslocar diametralmente ambos com 0.511 MeV”*.

Finalizado esse momento das reflexões apresentadas pelos alunos acerca das ideias centrais do texto “Interação da radiação com a matéria: propriedades dos efeitos Compton, fotoelétrico e produção de pares”, o professor/pesquisador realizou o experimento, com a participação dos alunos, da simulação/demonstração *on-line* do Efeito Fotoelétrico, através do *Phetcolorado*, mediado pela plataforma *Web*, a fim de que o processo ensino e aprendizagem acontecesse de maneira significativa. Essa simulação/demonstração teve como objetivo apresentar aos alunos as variações ocorridas em parâmetros físicos como: intensidade de corrente elétrica, tensão elétrica, variação no espectro eletromagnético, variação nos elementos químicos-alvo, dentre outras.

Feitas essas considerações, passa-se a analisar os dados produzidos durante o Encontro 3, com duração de 2 horas-aula (100 min), ocorrido em 24/03/2022. Neste Encontro, inicialmente, se propiciou momento para debate do texto: “Raios X: Raio x convencional e Tomografia Computadorizada (TC)”, apresentado logo abaixo, a fim de que as dúvidas fossem socializadas entre as equipes, bem como esclarecendo as dúvidas sob a mediação e intervenção do professor/pesquisador. É importante destacar, tendo em vista que se trabalhou

com a proposta da Sala de Invertida, que foi disponibilizado, previamente, aos alunos o material trabalhado neste encontro.

Assim, apresentado o texto, eis fragmentos das conversações dos alunos, participantes da pesquisa, sobre os aspectos que eles consideraram mais relevantes do referido texto, com destaque nas temáticas: raios X, Radiodensidade/Escala de HU e Tomografia Computadorizada (TC).

Os raios X são produzidos quando elétrons em alta velocidade, provenientes do filamento aquecido, chocam-se com o alvo (anodo) produzindo radiação. O feixe de raios X pode ser considerado como um “chuveiro” de fótons distribuídos de modo aleatório. Os raios X possuem propriedades que os tornam extremamente úteis [...] São feixes de elétrons produzidos quando uma diferença de potencial elevada é estabelecida entre dois eletrodos localizados no interior de um recipiente fechado contendo gás rarefeito (A1).

Os raios X são produzidos quando elétrons em alta velocidade, vindos de filamentos aquecidos chocam-se com o alvo (anodo) produzindo radiação, e se formam com o choque de elétrons com o anodo (A3).

A produção e formação dos raios x acontece quando os elétrons em alta velocidade se chocam com o anodo (um alvo metálico), isso produz radiação (A7).

O coeficiente de atenuação fornece a medida da fração da intensidade de radiação dispersada ou absorvida pela matéria através dos diversos tipos de interação, as imagens geradas vão depender da densidade molecular do corpo em exame (A1).

O coeficiente de atenuação é um parâmetro da interação da radiação com a matéria, ele fornece a medida da fração da intensidade da radiação dispersada ou absorvida pela matéria, e ela se relaciona com a radiodensidade a partir de dosagem, a mesma deverá ser aplicada em doses diferentes (A3).

O coeficiente de atenuação é uma medida aleatória desenvolvida por Hounsfield e ele se relaciona com a Radiodensidade para dar a quantidade de atenuação do feixe do raio X que é preciso em cada situação (A7).

A escala Hounsfield está relacionada à obtenção de imagens com raios-X. Ela transforma os diferentes tons de cinza, adquiridos no imageamento com raios-X, em valores numéricos. Esta transformação possibilita a abertura de janelas dentro da escala de cinza obtida nas imagens, permitindo maior diferenciação entre cores anteriormente muito semelhantes (e muitas vezes indistinguíveis ao olho humano) (A1).

A escala de Hounsfield, é uma escala quantitativa que descreve a radiodensidade, e seu papel é denominar a tonalidade da cor na diferenciação dos tecidos e diagnóstico por imagem que pode variar(A3).

Para cada tom de cinza, existe um número de TC correspondente à densidade do tecido, que é representado em HU (Hounsfield unit). Hounsfield compôs uma escala designando, arbitrariamente, a água com o número 0, o osso com o número 1.000 e o ar com o número negativo -1.000 (A7).

No funcionamento do aparelho CT Scan o procedimento é realizado através da emissão de raios-x rotacionada ao redor do corpo, que por sua vez e de forma variada, a depender de cada tecido, atenua o feixe de raios-X, que são absorvidos

por detectores de radiação, que enviam então os dados para um sistema computacional. Posteriormente, as imagens podem ser reformatadas em vários planos, até gerar imagens digitais que podem ser visualizadas em um monitor específico para isso. Além disso, podem ser impressas ou transferidas para o PACS – ou também, enviadas diretamente para um serviço de telerradiologia (A1).

[...] todo aparelho de tomografia tem um tubo de raio-X, que é conectado a um sistema de detectores, e quando inicia tubo e detectores giram 360° em torno do paciente, emitindo a radiação necessária para o registro de imagens, A mesa em que o paciente fica também se movimenta, Cada estrutura anatômica da região examinada absorve mais ou menos radiação, o feixe de raios-X atinge os detectores, produzindo sinais que são transmitidos a um computador com um programa que transforma esses dados em imagens (A3).

O funcionamento do TC Scan se dá por meio de ampola de raios-x e detectores (A7).

Os fótons são partículas que compõem a luz e podem ser definidos como pequenos pacotes que transportam a energia contida nas radiações eletromagnéticas (A3).

Caráter físico de Fotón, que são como pequenos "pacotes" que transportam a energia contida nas radiações eletromagnéticas (A7).

O que se observa, no geral, é que os alunos mobilizaram conhecimentos científicos sobre Raios X: Raio x convencional e Tomografia Computadorizada (TC). Assim, compreenderam o que são raios X e como estes são produzidos, o que pode ser comprovado, por exemplo, na fala de A1: *“os raios X são produzidos quando elétrons em alta velocidade, provenientes do filamento aquecido, chocam-se com o alvo (anodo) produzindo radiação. O feixe de raios X pode ser considerado como um “chuveiro” de fótons distribuídos de modo aleatório. Os raios X possuem propriedades que os tornam extremamente úteis”*. Porém, cabe aqui comentar que este aluno ao afirmar: *“os raios X são produzidos quando elétrons em alta velocidade, provenientes do filamento aquecido [...]”*, deixa de citar que o filamento aquecido é produzido no polo negativo, ou seja, no cátodo. Conforme explica Santos (2002, s.d), *“o choque do feixe de raios catódicos (elétrons) com o anodo (eletrodo positivo) produzia os raios X”*.

Na análise dos comentários feitos pelos alunos A3 e A7, constatou-se a mesma problemática detectada na afirmação do aluno A1, ou seja, não complementaram suas afirmações destacando que o filamento do tungstênio (W) aquecido é produzido no polo negativo (cátodo).

Quanto à temática coeficiente de atenuação, um aspecto a ser destacado é o da aluna A7, ao mencionar que *“o coeficiente de atenuação é uma medida aleatória desenvolvida por Hounsfield e ele se relaciona com a Radiodensidade para dar a quantidade de atenuação do feixe do raio X que é preciso em cada situação”*, não compreendeu que tal

coeficiente trata-se de uma medida padronizada por Hounsfield, e não aleatória. Como apoio teórico a essa análise, para Amador (2009), o cálculo matemático toma por base substâncias avaliadas e água, a qual se atribui valor zero HU na escala de Hounsfield.

Para Amador (2009), os coeficientes de atenuação são apresentados através de uma escala numérica de valores que indicam a capacidade de um tecido absorver os raios x incidentes na região. Essa escala de valores é associada a *tons de cinza* e que recebe o nome de Escala de Hounsfield. Assim compreendido, o aluno A1, ao pontuar que “*a escala Hounsfield está relacionada à obtenção de imagens com raios-X. Ela transforma os diferentes tons de cinza, adquiridos no imageamento com raios-X, em valores numéricos [...]*”, na verdade, não entendeu que a escala de HU não transforma os diferentes tons de cinza. Ela é uma escala numérica de valores que indicam a capacidade de um tecido absorver os raios X incidentes na região.

Uma outra observação a ser feita trata-se da temática CT Scan. De acordo com Diniz *et al* (2007, n.p),

A máquina de TC possui uma ampola que emite os Raios X e gira totalmente em volta do corpo do paciente, havendo também um complexo conjunto de detectores de Raios X que vai simultaneamente recolhendo esses raios do lado oposto à ampola [...]. A intensidade dos Raios-X que atinge um detector é convertida em um sinal digital denominado "varredura" do feixe [...].

Assim, ao analisar a compreensão da aluna A7 sobre a CT Scan, esta apenas afirma que o seu funcionamento “[...] *se dá por meio de ampola de raios-x e detectores*”, faltando, portanto, maiores esclarecimentos acerca do funcionamento do CT Scan, o que pode ser complementado recorrendo aos comentários acima de Diniz *et al* (2007).

No Encontro 4, com duração de 2 horas-aula (100 min), ocorrido em 01/04/2022, via plataforma Google Meet, foi possibilitado aos alunos, participantes da pesquisa, momento para debate sobre o texto Radioterapia e Hadronterapia, apresentado logo abaixo, em que as dúvidas pudessem ser socializadas entre as equipes.

Seguindo a mesma lógica das análises dos Encontros anteriores, a nossa intenção é conhecer as ideias centrais que estes alunos trazem sobre o assunto, como está registrado nos fragmentos de texto, em que deram ênfase à radioterapia e à hadronterapia.

Hádrons são partículas subatômicas que realizam interações fortes. Sua matéria é menor do que um átomo [...] esta terapia exhibe algumas vantagens cruciais para o tratamento de tumores profundos localizados em comparação à terapia convencional de fótons. Na Hadronterapia são utilizados menos feixes de elétrons em regiões saídas do que a radioterapia [...] A diferença que existe entre as deposições de energias aplicadas ao tumor através da radioterapia e da hadronterapia, é porque a hadronterapia afeta menos tecidos sadios do corpo (A1).

Hádrons são partículas que estão sob a ação da interação forte, são obtidos através de colisões de partículas subatômicas através de colisões de partículas, e são encontrados em colisores de partículas [...]. A hadronterapia é um tipo especial de tratamento com radiação que usa feixes de prótons ou íons acelerados para o tratamento de tumores no corpo humano [...] Na hadronterapia quase toda a energia desse fluxo de partículas subatômicas é canalizada para o exato momento e lugar em que prótons ou íons cessam de se movimentar. E na radioterapia as partículas antes de atingirem a região do tumor, perdem parte de sua energia durante o seu trajeto e danificam o DNA das células normais com que entraram em contato (A3).

Hádrons são as partículas que estão sob ação da interação da força nuclear forte, responsável por manter o núcleo atômico coeso. São obtidas a partir de colisões de partículas. São encontrados no LHC, que é onde vive [...] a hadronterapia é um tipo de tratamento peculiar com radiação que usa feixes de prótons ou íons acelerados para o tratamento de tumores no corpo humano. São utilizados prótons e íons [...] A energia da hadronterapia aplicada ao tumor é direta e seletiva a cada partícula, fazendo com que o tumor seja combatido de forma mais eficaz que a energia da radioterapia, que é menos seletiva [...] a hadronterapia é caracterizada por uma baixa deposição de energia no canal de entrada da irradiação e um máximo pronunciado próximo ao final do alcance das partículas seguido por uma queda brusca na deposição [...] (A4).

Hádrons são partículas subatômicas, eles são obtidos a partir de colisores de partículas [...] Hadronterapia é um tipo de tratamento que utiliza radioterapia. Ela utiliza partículas pesadas, que são: prótons, íons de carbono e nêutrons [...] na hadronterapia a deposição de energia atinge menos tecidos do que na radioterapia. A hadronterapia danifica menos os tecidos que estão ao redor da área diferente da radioterapia convencional, que danifica bastante os tecidos causando mais efeitos colaterais [...] o tratamento radioterápico é indicado em casos mais superficiais, como câncer de pele e o tratamento hadronterápico em casos mais profundos como câncer de mama [...] a diferença em que aparelhos são formados os feixes de raios-x, feixes de prótons e íons de carbono está na dose de radiação utilizada (A7).

É uma partícula sub-atômica formada por um estado ligado de quarks. Os hádrons, que incluem os bárions e os mésons, mantêm sua coesão interna devido à interação forte. Coseguimos obter eles a partir de colissores de partículas [...] A hadronterapia é um tipo especial de tratamento com radiação que usa feixes de prótons ou íons acelerados para o tratamento de tumores no corpo humano. Partículas pesadas como ions de carbono, protons e nêutrons [...] A quantidade de tecidos atingidos no processo, na hadronterapia a deposição de energia atinge menos tecidos que a radioterapia [...] pois a sua deposição de energia atinge menos tecidos que a radioterapia [...] a radioterapia é mais indicada para casos mais superficiais por exemplo o câncer de pele, a hadronterapia para casos mais profundos como cancer de intestino (A11).

Nos comentários dos alunos A1, A3, A4, A7 e A11, observa-se que estes desenvolveram conhecimentos científicos sobre a radioterapia e a hadronterapia, no entanto, também, como constatado na análise dos Encontros anteriores, ficaram evidenciadas algumas questões que merecem ser discutidas.

A título de exemplos têm-se os alunos A1 e A3. A1 ao explicar que “[...] na Hadronterapia são utilizados menos feixes de elétrons em regioes saídas do que a radioterapia [...]”, se equivocou posto que, na hadronterapia não são utilizados feixes de elétrons. Já o aluno A3, ao afirmar que “[...] a hadronterapia é um tipo especial de tratamento

com radiação que usa feixes de prótons ou íons acelerados para o tratamento de tumores no corpo humano”, não destacou que, diante dessa situação, os íons, necessariamente, devem ser de Carbono (C).

Sobre essa problemática, faz-se oportuno esclarecer que a hadronterapia é um tipo de tratamento radioterápico em que se utilizam partículas pesadas, são elas: prótons, íons de carbono e nêutrons. Tais elementos apresentam uma característica diferenciada em relação aos feixes de elétrons (radioterapia convencional) que, ao irradiar na região a ser tratada, atingem menos os tecidos que estão ao redor e, portanto, preservam mais os tecidos saudáveis (HUSSEIN; REBELLO, 2005).

Por fim, o Encontro 5, com duração de 2 horas-aula (100 min), ocorreu em 07/04/2022. Como já havia sido disponibilizado aos alunos, participantes da pesquisa, o texto: “PET/Scan e radiofármacos”, apresentado abaixo, para leitura prévia, inicialmente, também, propiciou-se momento para debate do tema em tela. Assim, as dúvidas foram socializadas entre as equipes, sob a mediação e intervenção do professor/pesquisador.

Exposto o texto, retomando às análises dos dados produzidos no Encontro 5 em que se aplicou Questionário 5 (APÊNDICE H) e também se realizou a observação, propondo-se que os alunos se manifestassem sobre o aparelho PET/Scan e radiofármacos.

O PET/Scan é utilizado para diagnosticar inúmeras doenças como Alzheimer e numerosas outras doenças mentais [...] a radiação é representada pelos LED,s ao acenderem linhas dupla detectam o tumor em um ponto em comum [...] uma luz de LED se acende de maneira isolado porque os pósitron não encontram outro elétron para se aniquilarem [...] normalmente a preparação de radiofármacos fez-se por adição de um gerador, produzindo um radiofármaco pronto para ser usado [A1].

O PET simulation é uma simulação do PET/Scan, porém é feito com LED's . Entregar a nós alunos a experiência mais próxima do PET/Scan [...] Os pares de LED's ao se acenderem mostram pontos ligados, tem um ponto onde se encontram, achando o tumor. A captação da radiação pela câmara gama já temos uma imagem direta do tumor [...] são partículas do pósitron que não encontram outra molécula para se aniquilarem [...] radiofármacos são produzidos a partir do Tecnécio 99m para dar mais precisão ao exame [A5].

O exame tomografia por PET/Scan mapeia os pontos certos onde estão as anomalias no tecido submetido ao exame. A finalidade da simulação foi mostrar como são formados os raios gama para localizarem com precisão os pontos de anomalia [...] a localização do tumor ocorre onde há o maior número de cruzamento dos pares ligados e onde está a anomalia (tumor) [...] os raios gama unitários são partículas de pósitron isoladas que não encontram um elétron e acaba se aniquilando e não formam raios gama [...] radiofármacos são compostos radioativos formados por radionuclídeos isótopos radioativos responsáveis pela emissão de radiação e ligados quimicamente a moléculas de algum elemento químico não radioativo que desempenha alguma função específica num tecido [A7].

É um aparelho que se destina a compreensão do funcionamento dos aparelhos usados no tratamento de vários tipos de problema em órgãos diversos. Para compreender como funciona para ter um ponto exato de um possível tumor [...] para ter uma imagem da região mais detalhada. E com o avanço dos equipamentos utilizados torna mais apropriado o uso de radiofármacos para direcionar com mais precisão a emissão de radiação [...] raios gamas únicos são partículas de pósitron que não encontraram outro elétron para se aniquilarem [...] radiofármacos são formados por radionucleotídeos, isótopos radioativos responsáveis pela emissão de radiação e ligada quimicamente a molécula de algum elemento químico não radioativo [A12].

Fica evidenciado nos registros dos depoimentos dos alunos A1, A5, A7 e A12 cada vez mais visível um nível maior de desenvolvimento cognitivo e maior aquisição da linguagem, logicamente, em consequência da produção de conhecimentos científicos. Essa constatação condiz com as afirmações de Moreira (2003, p. 3), fundamentado em Ausubel (1968), ao explicitar que:

[...] a aquisição da linguagem é que, em grande parte, permite aos seres humanos a aquisição, por aprendizagem significativa receptiva, de uma vasta quantidade de conceitos e princípios que, por si sós, poderiam nunca descobrir ao longo de suas vidas. Por outro lado, o escopo e complexidade das idéias e conceitos adquiridos por aprendizagem significativa torna possível, e promove, um nível de desenvolvimento cognitivo que seria inconcebível sem a linguagem [...].

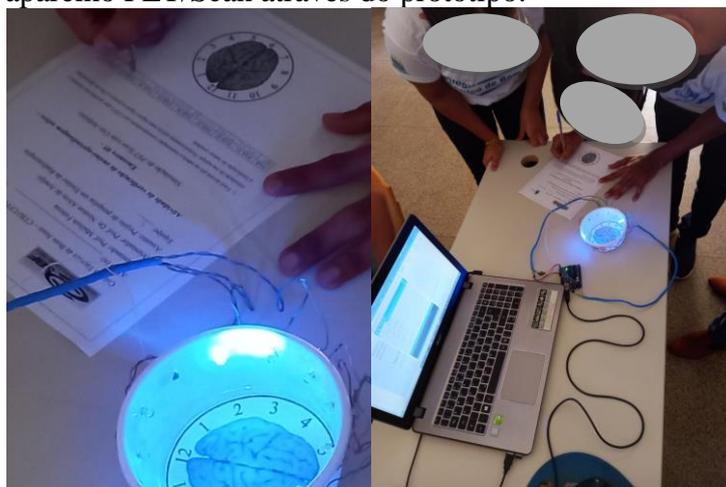
No geral, considerando as observações e análises a partir dos conhecimentos prévios já analisados anteriormente sobre a Física das Radiações aplicada à Radioterapia, constata-se que houve uma superação daqueles conhecimentos impregnados do senso comum. Nessa discussão, se faz oportuno destacar a importância do diálogo uma vez que se possibilitou aos alunos leituras prévias dos textos trabalhados em sala de aula e em equipes. Se observou, portanto, o quanto os alunos participavam e se envolviam nas questões levantadas pelo professor pesquisador, dando oportunidade para que eles falassem sobre o que haviam entendido dessas questões, ou melhor, das temáticas trabalhadas.

Conforme comentado pelos alunos A5 e A7, em seus respectivos comentários, “*são partículas do pósitron que não encontram outra molécula para se aniquilarem*” e “*os raios gama unitários são partículas de pósitron isoladas que não encontram um elétron e acaba se aniquilando e não formam raios gama*”, verifica-se que os referidos alunos cometeram equívocos ao comentar a respeito dos fótons isolados na simulação através do protótipo PET/Scan *simulation*. O aluno A5 não cita qual seria a outra partícula que deveria colidir com o pósitron a fim de ocorrer uma aniquilação por pares. O aluno A7, também, cometeu um equívoco em relação à mesma discussão feita por A7, pois afirma que um pósitron não encontra um elétron e acaba se aniquilando, o que pode ser corretamente

explicado por Amador (2009), ao afirmar que o princípio físico de funcionamento do PET Scan se baseia na geração do par elétron-pósitron pelo radiofármaco administrado ao paciente, momentos antes da realização do exame. Após o radiofármaco emitir a radiação gama (produto da aniquilação do par elétron-pósitron), esta é detectada por sensores posicionados diametralmente.

Feitos esses comentários, o professor pesquisador orientou os alunos a utilizar o protótipo do aparelho PET/Scan *simulation*. Para isso, inicialmente, se demonstrou o funcionamento real do aparelho. Em seguida, os alunos, na prática, simularam o funcionamento do aparelho PET/Scan através do protótipo, como revelam a Figura 30; anotaram os pares de LED que se acendiam simultaneamente ou de maneira isolada; fizeram os registros desses dados na folha de atividades, disponibilizada pelo pesquisador e, posteriormente, ligaram os pontos anotados na folha; quando surgiam aos pares, conforme pode ser verificado no APÊNDICE G.

Figura 30: Simulação, pelos alunos, do funcionamento do aparelho PET/Scan através do protótipo.



Fonte: arquivos do pesquisador (FEITOSA, 2022).

Diante disso, localizavam o tumor cerebral a partir da intersecção das retas. Desse modo, pôde-se fortalecer o aprendizado significativo da aniquilação por pares intermediado por tal aparelho.

6.3 Significações desenvolvidas pelos alunos sobre as potencialidades do Produto Educacional (SD)

Nesta última categoria, a fim de se atingir o objetivo específico reconhecer as significações desenvolvidas pelos alunos, sobre a Sequência Didática, foi solicitado que estes respondessem o Questionário (APÊNDICE J). Assim, foram analisadas as reflexões das significações produzidas por eles sobre a referida sequência didática como possibilidade para uma aprendizagem significativa da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia. Para isso, partiu-se do pressuposto que tem como implicação,

[...] mesmo que o material de aprendizagem possa se relacionar a idéias da estrutura cognitiva do aluno (subsunçores), substantiva e não arbitrariamente, não haverá aprendizagem significativa, se houver o propósito de memorizar *ipsis litteris* e arbitrariamente as partes componentes desse material, em vez de se procurar aprendê-lo significativamente (PONTES NETO, 2006, p. 118).

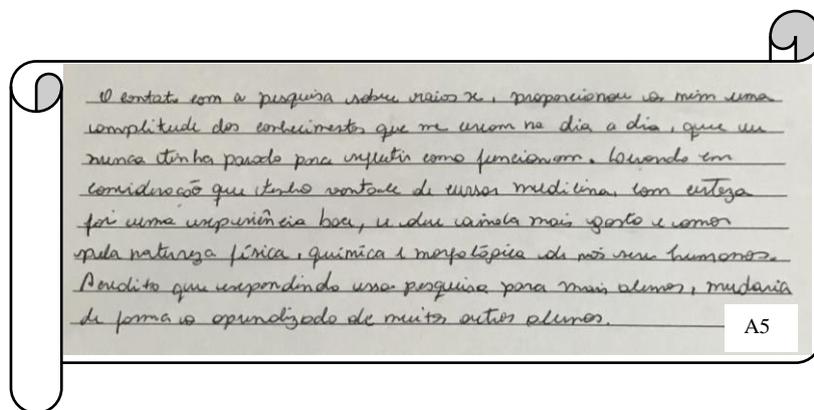
Assim, por corroborar com as reflexões de Pontes Neto (2006), se pensou em uma Sequência Didática com potencialidades para que os alunos superassem os seus conhecimentos prévios acerca da Física das Radiações aplicada à Radioterapia, não se limitando à simples memorização dos conteúdos, desprovidos de significações e, conseqüentemente, não possibilitando uma aprendizagem significativa destes conteúdos.

Nessas condições, não se pode deixar de considerar que o Produto Educacional (SD) trouxe implicações para uma aprendizagem significativa aos alunos, participantes da pesquisa, a partir da reelaboração de seus conhecimentos prévios da temática trabalhada. Tomando como base a nossa experiência enquanto professor de física, sabe-se que o ensino que esses alunos vêm recebendo na educação básica, na sua grande maioria, se distancia de sua realidade e sem uma contextualização dos conteúdos. Além disso, como a própria pesquisa nos revelou, tem-se negligenciada a problemática da Física das Radiações.

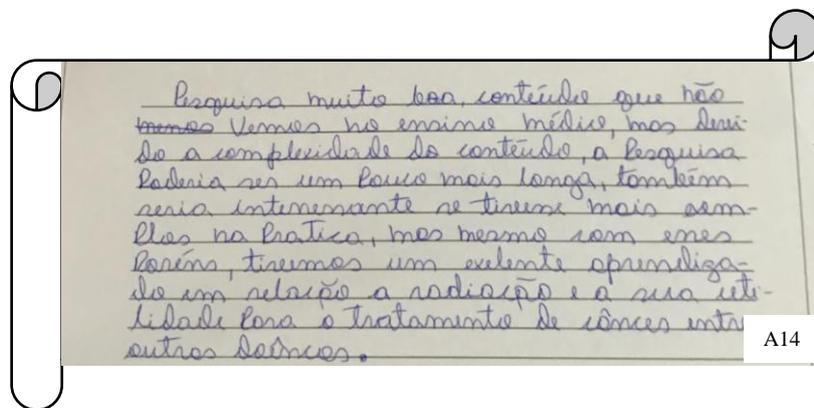
Com intuito de se mostrar essas e outras constatações, são apresentados alguns comentários escritos pelos alunos, os quais constam no Questionário/Pós-teste (APÊNDICE J), na verdade, são significações produzidas por estes alunos, a partir de suas reflexões sobre as experiências vivenciadas durante as ações desenvolvidas dos 5 Encontros propostos na Sequência Didática. Dito isto, eis comentários escritos dos alunos, na sua íntegra:



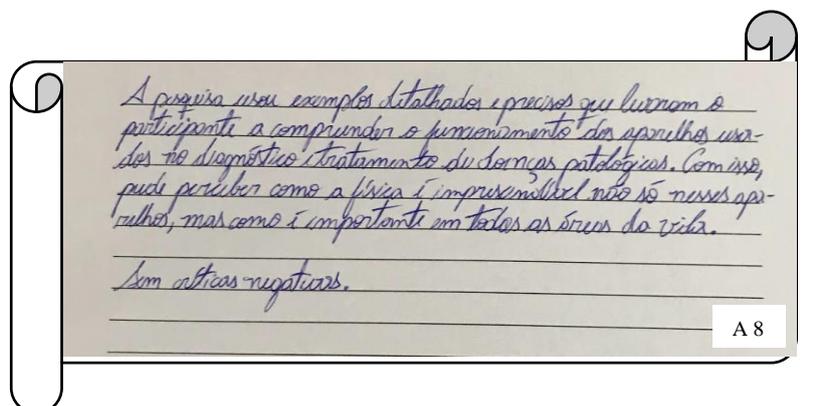
A2



A5



A14



A8

Já meu ver foi uma pesquisa bastante interessante
 para ter entendido sobre o assunto abordado e sobre
 a relação entre a física e a radioterapia, e deu para
 aprender bastante coisa sobre o tema, e para mim
 foi aproveitar estudar sobre o tema, e momentos que
 tenha mais pesquisas deste modelo.

A 10

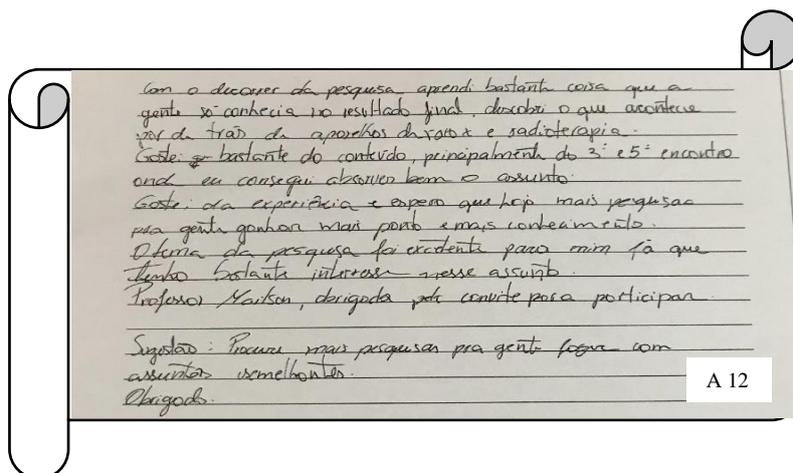
Foram os momentos de ensinamentos legais, onde
 pude entender melhor sobre exames que são feitos
 e que muitas pessoas fazem. Gostei das aulas
 das explicações e principalmente das aulas práticas,
 achei bastante interessante a demonstração do aparelho
 para detectar os tumores nas pessoas.

Foi um prazer fazer parte dessa
 experiência! 😊

A 9

Gostei muito, pois aprendi coisas que não
 sabia, principalmente sobre radioterapia e outros tratamen-
 tos e máquinas. Muito interessante o simulador
 usado na aula. O único defeito foi que não tivemos
 mais momentos presenciais, pois acho que aprendemos
 melhor, mas pelo lado acho que teríamos gostamos

A 3



Analisando os comentários dos alunos, inicialmente, com destaque em A2, A10, A12 e A14, se observa a conscientização destes alunos quanto à importância e necessidade de se estudar conteúdos relativos à Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia. Isso pode ser comprovado nas falas: “nesta pesquisa pude obter um conhecimento “extra” que eu não receberia apenas com o ensino médio, consegui compreender mais sobre a própria radiação em si e suas utilidades, principalmente na medicina [...]” (A2, grifo do aluno); “há meu ver foi uma pesquisa bastante interessante para ter entendimento sobre o assunto abordado e sobre a relação entre a física e a radioterapia, e deu para aprender bastante coisa sobre o tema, e para mim foi proveitoso estudar sobre o tema, e recomendo que tenha mais pesquisa deste modelo” (A10); “com o decorrer da pesquisa aprendi bastante coisa que a gente só conhecia o resultado final, descobri o que acontece por de trás de aparelhos de raios X e radioterapia [...] o tema da pesquisa foi excelente para mim já que tenho bastante interesse nesse assunto [...]” (A12); “pesquisa muito boa, conteúdo que não vemos no ensino médio [...]” (A14).

Assim, a análise desses comentários nos chamou atenção o quanto os alunos se sentiram motivados a debater sobre essa temática. No entanto, como já comentado anteriormente, o que vai ao encontro das reflexões destes alunos, tal temática quando aparece nos livros didáticos da Física, configura-se apenas como uma espécie de apêndice, tendo em vista seu caráter quase opcional por ser pouco explorada. Portanto, tratando-se desta pesquisa, os dados nos revelam que esta temática não vem sendo abordada. No caso do aluno A2, certamente, o que este aluno já sabia sobre radiação, se limitava a seus conhecimentos prévios, no entanto, através das experiências vivenciadas pelos Encontros proporcionados

pela aplicação e desenvolvimento do Produto Educacional (SD), este conseguiu expandir seus conhecimentos sobre a radiação e suas utilidades, sobretudo, na medicina.

Ao analisar a fala de A5: “[...] *levando em consideração que tenho vontade de cursar medicina, com certeza foi uma experiência boa, e deu ainda mais gosto e amor pela natureza física, química e morfológica de nós seres humanos*”, fica evidenciado que o estudo sobre a Física das Radiações aplicada à Radioterapia despertou neste aluno um maior interesse em cursar Medicina, ressaltando a interdisciplinaridade da física com a química e a morfologia do homem. Desta forma, este aluno desenvolveu significados da física presente em outros campos de conhecimento.

Também nos chamou atenção as reflexões do aluno A8, ao explicitar que a pesquisa/Produto Educacional foi relevante no sentido de ajudá-lo “[...] *a compreender o funcionamento dos aparelhos usados no diagnóstico e tratamento de doenças patológicas. Com isso pude perceber como a física é importante não só nesses aparelhos, mas como é importante em todas as áreas da vida*”. Desse modo, pode-se dizer que o referido aluno passou a produzir significações da física no sentido de reconhecer a sua aplicação em aparelhos ligados à radiação. Este mesmo aluno ao afirmar que a física “[...] *é importante em todas as áreas da vida*”, nos remete às reflexões de Angotti, Bastos e Mion (200, p. 187) ao entenderem que,

É preciso reelaborar os conhecimentos físicos, assumidos como conhecimentos educacionais em Física, mediante o estudo de leis, princípios, conceitos, e relações de conceitos etc., envolvidos na fabricação e funcionamento de artefatos tecnológicos, como possibilidade de refletir sobre seus significados. É preciso discutir temáticas que poderão ser levantadas, problematizando, a partir desses objetos, situações e fenômenos do nosso cotidiano.

Com relação às significações desenvolvidas sobre a SD, A9 ao afirmar: “[...] *gostei das aulas, das explicações e principalmente das aulas práticas, achei bastante interessante a demonstração do aparelho para descobrirem os tumores nas pessoas*”, o referido aluno reconhece a importância das aulas práticas, que, no caso deste estudo, se trata da simulação com o protótipo do aparelho PET/Scan, enquanto recurso didático complementar da SD. Nessa mesma perspectiva, ao falar do aparelho PET/Scan nas aulas práticas desenvolvidas nesta pesquisa, tem-se o aluno A3, ao enfatizar que é “[...] *muito interessante a simulação usada na aula [...]*”.

Essas significações desenvolvidas pelos alunos A9 e A3 vão ao encontro das reflexões de Moreira *et al* (2018, p. 737), fundamentados em Rosa *et al.* (2016), ao pontuarem

que “[...] o uso de novas tecnologias, como a plataforma Arduino, contribui para a discussão dos conceitos envolvidos, instiga a curiosidade dos alunos, serve como fomento à busca da pesquisa e ciência, e aproxima a escola com situações vivenciais e cotidianas”.

Em síntese, as reflexões resultantes das análises dos dados referentes a essa categoria, ao se considerar as significações desenvolvidas pelos alunos sobre SD, denotam possibilidades de se ensinar aspectos fundamentais da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia a alunos da 3ª série do Ensino Médio, abordando temas relacionados ao tratamento de câncer, desde o diagnóstico por imagem até o seu tratamento, adotando-se a Pesquisa-ação e a Teoria da Aprendizagem Significativa.

Nos textos produzidos para debate, com leitura prévia, criou-se um ambiente de aprendizagem em que os alunos tiveram autonomia para, no coletivo e/ou individualmente, apresentar as suas impressões acerca das temáticas trabalhadas. Dessa forma, procurou-se romper com a prática do ensino tradicional, limitado a exposição e transmissão do conteúdo pelo professor, em outras palavras, implicando em uma aprendizagem mecânica, desmotivadora para o aluno. Esse entendimento vai na mesma perspectiva de Pelizzari *et al* (2002, p. 38), ao compreenderem que,

Para haver aprendizagem significativa são necessárias duas condições. Em primeiro lugar, o aluno precisa ter uma disposição para aprender: se o indivíduo quiser memorizar o conteúdo arbitrariamente e literalmente, então a aprendizagem será mecânica. Em segundo, o significado lógico depende somente da natureza do conteúdo, e o significado psicológico é uma experiência que cada indivíduo tem. Cada aprendiz faz uma filtragem dos conteúdos que têm significado ou não para si próprio.

Diante do exposto, a pesquisa/Produto Educacional nos possibilitou enquanto professor, a refletir sobre a nossa prática pedagógica, entendendo a necessidade de se redimensionar as ações desta prática. Assim, as reflexões e significações desenvolvidas pelos alunos, bem como as contribuições dos pesquisadores que deram sustentação teórica a esta pesquisa, certamente, possibilitaram que os conteúdos trabalhados fossem apreendidos, configurando-se como uma aprendizagem, como dito por Pelizzari *et al* (2002), potencialmente significativa, ou melhor, lógico-psicologicamente significativa.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aprendizagem significativa é a responsável pela construção do conhecimento. O conjunto dessas aprendizagens fica armazenado na estrutura cognitiva, um constructo de alto poder explicativo [...] é o principal fator desencadeador da aprendizagem significativa, de acordo com a teoria ausubeliana (PONTES NETO, 2006, p. 119).

A presente seção se concretiza como momento de se apresentar uma síntese das reflexões desenvolvidas ao longo da pesquisa/Produto Educacional em que se buscou construir conhecimentos, a partir da aprendizagem significativa, de aspectos da Física aplicados à Radioterapia, envolvendo alunos da 3ª série do Ensino Médio. Como tão bem diz Pontes Neto (2006), na epígrafe acima, “a aprendizagem significativa é a responsável pela construção do conhecimento”. Assim, considerando o contexto, e diante das reflexões e significações desenvolvidas pelos alunos participantes da pesquisa, sobre o tema em tela, a pesquisa visou responder à questão norteadora (ou problema de pesquisa): quais as possibilidades de uma aprendizagem significativa de aspectos fundamentais da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia a alunos da 3ª série do Ensino Médio, tendo como proposta uma Sequência Didática na perspectiva da Pesquisa-ação?

Diante do exposto, na busca por respostas à esta questão problema, inicialmente, se fez um estudo teórico e documental sobre o contexto histórico das descobertas dos raios X à suas aplicações à indústria e medicina, bem como das técnicas radioterápicas: radioterapia convencional e hadronterapia, desde a formação de uma célula cancerígena à problemática dos aceleradores de partículas utilizados na hadronterapia. Assim, teórico-metodologicamente se recorreu à perspectiva da Aprendizagem Significativa em Ausubel, alinhada à Pesquisa-ação. Para tanto, dentre outros, contou-se com as contribuições, dentre outros: Moreira, Ausubel, Novak e Hanesian, Chisté, Marante, Koerich, Tripp e Engel.

Portanto, com o propósito de responder à questão problema, delineou-se como objetivo geral: analisar as possibilidades de uma aprendizagem significativa de aspectos fundamentais da Física das Radiações Ionizantes aplicadas à Radioterapia a alunos da 3ª série do Ensino Médio, tendo como proposta uma Sequência Didática (Produto Educacional) na perspectiva da Pesquisa-ação e, como objetivos específicos: identificar os conhecimentos prévios dos participantes da pesquisa acerca da Radiação aplicada à Radioterapia; desenvolver uma Sequência Didática (Produto Educacional) com potencialidades para servir como base para o aprendizado significativo da Física das Radiações Ionizante aplicada à Radioterapia; reconhecer as significações desenvolvidas pelos alunos sobre a Sequência Didática.

Do exposto, a fim de se contemplar o primeiro objetivo específico foi proposto aos alunos que respondessem o Questionário 1: Conhecimentos prévios sobre a Física aplicada à radioterapia (APÊNDICE C). Esse momento foi de grande relevância para esta pesquisa, posto que o ponto de partida foi evidenciar o papel dos conhecimentos prévios, ancorados à estrutura cognitiva do aluno, como postulado na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel. Assim, se constatou que os alunos, participantes desta pesquisa, no geral, apresentaram indícios de que não tinham uma estabilidade cognitiva mais elaborada do subsunçor: a Física aplicada à radioterapia, como ficou evidenciado nas análises das respostas constantes no Questionário sobre conhecimentos prévios.

Diante dessa consideração, acredita-se que essa realidade esteja atrelada, como já apontado por esta pesquisa, ao fato desta temática não ser trabalhada no ensino fundamental e nem no ensino médio, em particular nas escolas públicas, devido a carga horária da disciplina física (no caso do ensino médio) ter sido reduzida para 2 horas-aula semanais. Por outro lado, quando esta temática é trabalhada, o que se evidenciou é que os professores trabalham numa perspectiva desconectada da contextualização e interdisciplinaridade, ou seja, com um ensino mecânico em que os conteúdos, no geral, são desprovidos de significados e sentidos para os alunos.

Para se atingir o segundo objetivo específico, elaborou-se e aplicou-se a Sequência Didática com base para o aprendizado significativo da Física das Radiações ionizantes aplicada à Radioterapia. Assim, criou-se um ambiente de aprendizagem na lógica da Pesquisa-ação, sendo possibilitado aos alunos 5 Encontros/aulas, com duração de 2 horas-aula cada um deles. Para isso, se deu autonomia aos alunos, a partir de diálogos, nas equipes constituídas e leituras prévias dos textos, produzidos pelo professor/pesquisador, em que estes apresentaram as ideias centrais dos textos.

E, para complementar e auxiliar no processo de mediação das reflexões e discussão dos textos, se empregou atividade prática por meio do protótipo do aparelho PET/Scan *simulation*. Assim, além das observações feitas pelo professor/pesquisador, no final de cada Encontro foi solicitado aos alunos que respondessem Questionário, a fim de identificar os conhecimentos desenvolvidos durante os 5 Encontros.

Feitos os comentários, ao se analisar e explicar os dados produzidos durante a aplicação da Sequência Didática/Produto Educacional, destacam-se indícios de possibilidades da referida SD para um aprendizado significativo da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia. Essa afirmação se assenta em comparativos entre os Questionários de Conhecimentos Prévios, Questionários do 1 ao 6 em que se evidenciam aprendizados após sua

aplicação, somando-se as observações do pesquisador. Primeiro, a superação, por parte dos alunos, dos conhecimentos prévios, ou seja, daqueles conhecimentos impregnados do senso comum. Em segundo, o movimento das reflexões e diálogos, durante os Encontros, com a intervenção do professor/pesquisador em que se constatou o quanto os alunos participavam e se envolviam nas questões pontuadas, dando oportunidade para que eles falassem sobre o que haviam entendido dessas questões. Isso, certamente, impactou em mudança qualitativa no desenvolvimento cognitivo, ou melhor, em um aprendizado significativo, como defendido Ausubel e seus intérpretes.

Por fim, para se contemplar o último objetivo específico, aplicou-se um Questionário (APÊNDICE J), junto aos alunos, a fim de se reconhecer as significações sobre a SD. Ficou evidenciado, inicialmente, a conscientização por parte dos alunos quanto à importância e necessidade de se estudar a Física das Radiações ionizantes aplicada à Radioterapia. Outro aspecto a ser destacado, é o reconhecimento da importância das aulas práticas, no caso desta pesquisa, da simulação com o protótipo do aparelho PET/Scan. Para isso, houve a necessidade do pesquisador criar os algoritmos (códigos) que determinam o funcionamento do próprio protótipo, conforme o Apêndice I.

Diante dessas considerações, faz-se oportuno destacar que, as ações planejadas pelo pesquisador e desenvolvidas durante os Encontros proporcionados pela SD, impactou não somente em um aprendizado significativo da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia aos alunos participantes da pesquisa, mas, também, no desenvolvimento da nossa consciência enquanto professor/pesquisador no sentido de refletir sobre a nossa prática pedagógica e, assim, repensar a organização do ensino de física.

Assim, espera-se que, dentre as contribuições desta pesquisa/Produto Educacional, seja ampliado o campo teórico relacionado ao ensino de física, com destaque na Física das Radiações ionizantes aplicada à Radioterapia, alinhado à Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e da perspectiva metodológica Pesquisa-ação, sobretudo, no contexto do ensino médio.

REFERÊNCIAS

ANGOTTI, J. A. P.; BASTOS, F. da P. de; MION, R.A. Educação Em Física: discutindo ciência, tecnologia e sociedade. **Ciência & Educação**, v.7, n.2, p.183-197, 2001.

AUSUBEL, D.P., NOVAK, J.D. e HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. Tradução para o português, de Eva Nick *et al*, da segunda edição de Educational psychology: a cognitive view. Rio de Janeiro: Inter-americana, 1980.

AZAMBUJA, A. Q. de. *et al*. Reflexões acerca do funcionamento didático de um jogo de tabuleiro no contexto da sala de aula de física. **CCNExt-Revista de Extensão**, v. 3, p. 75-81, 2016.

BELEI, R. A. *et al*. O uso de entrevista, observação e videogravação em pesquisa qualitativa. **Cadernos de Educação**, Pelotas/RS, ano 2008, n. 30, p. 187 - 199, jan/jun 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/caduc/article/view/1770/1645>. Acesso em: 25 set. 2022.

BORTOLI, L. de. **Visitas ao setor de radiologia hospitalar como um recurso potencialmente significativo para o ensino de radiações ionizantes**. Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul – RS 2017. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/3118/Dissertacao%20Leomar%20de%20Bortoli.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 22 out. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. INCA. **ABC do câncer: abordagens básicas para o controle do câncer**. 4. ed. Rio de Janeiro – RJ: Inca, 2018b. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files/media/document/livro-abc-4-edicao.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2022.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular: Ensino Médio**. 2018a. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/wp-content/uploads/2018/12/BNCC_19dez2018_site.pdf. Acesso em: 22 nov. 2021.

BRASIL. Ministério da Educação. **Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional**. Lei n. 9.394/96. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9394.htm. Acesso em: 15 dez. 2021.

BRASIL. Ministério da Educação. **Parâmetros Curriculares Nacionais: ensino médio**. Brasília: MEC, 1999.

BRASIL. Ministério da Educação. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio. Parte III: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília: MEC/SEF, 2000. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2021.

BRASIL. Ministério da Educação. BNCC. **Aprendizagem significativa – breve discussão acerca do conceito**. [S. l.], jan/dez [2019?]. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/implementacao/praticas/caderno-de->

praticas/aprofundamentos/191-aprendizagem-significativa-breve-discussao-acerca-do-conceito. Acesso em: 4 set. 2022.

BRASIL. Ministério da Educação. **PCN+ Ensino Médio**. Orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC, 2006. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2021.

BRASIL. Ministério da Educação. **PCN+ Ensino Médio**: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, matemática e suas tecnologias. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Brasília: MEC; SEMTEC, 2002.

BRASIL. CNEN. **Produção de Radiofármacos**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/crcnne/pt-br/assuntos/areas-de-atuacao/producao-de-radiofarmacos>. Acesso em: 9 set. 2022.

BRAUN, T. Espectrômetro plots, 2014. Disponível em: <https://cta.if.ufrgs.br/projects/espectrometro-plots/wiki/Wiki?version=19>. Acesso em: 16 mai. 2022.

BRAGA, N. C. **Como Funciona o Raio X**: produzindo Raios X. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/9203-como-funciona-o-raio-x-art1807.html>, 2014. Acesso em: 10 de mar. 2021.

CAMPOS, L. B. et al. Um exemplo de pesquisa-ação na Inserção da Física Moderna no ensino médio. **e-Mosaicos**, [S.l.], v. 9, n. 21, p. 134-155, jul. 2020. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/e-mosaicos/article/view/46043/34497>. Acesso em: 07 mar. 2023.

CARDOSO, E. **Aplicações de Energia Nuclear**. Apostilas Educativas. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) - 3. ed.- Rio de Janeiro: CNEN, 2012. Disponível em: <http://antigo.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/apostila-educativa-aplicacoes.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2022.

CHISTE, P. de S. Pesquisa-Ação em mestrados profissionais: análise de pesquisas de um programa de pós-graduação em ensino de ciências e de matemática. **Ciência & Educação**. Bauru/SP, v. 22, n. 3, 2016, p. 789-808. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1516-731320160030015>. Acesso em: 12 jan. 2023.

DEGIOVANNI, A.; AMALDI, U. History of hadron therapy accelerators. **Physica Medica**. v.31, 2015, p. 322-332, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1120179715000629>. Acesso em: 17 ago. 2021.

DINIZ *et al.* Atlas de neurotomografia computadorizada. **V CEEL**, 2007. Disponível em: <https://www.peteletricaufu.com.br/static/ceel/doc/artigos/artigos2007/ceel2007059.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2022.

- ENGEL, G. I. Pesquisa-ação. **Educar em Revista**. v. 16, n. 16, p.181-191, 2000. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/educar/article/view/2045>. Acesso em: 26 dez. 2022.
- FRANCISCO, F. C, *et al.* Radiologia: 110 anos de história. **Rev. Imagem**, 24:281-286, 2005. Disponível em: <http://www.imaginologia.com.br/dow/upload%20historia/Radiologia-110-anos-de-Historia.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2022.
- GARCIA, e. R. S; MAURÍCIO, L. A. evolução do conceito de energia mecânica: aplicando a história da ciência em uma aula de física do ensino médio. **IX ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO** – Universidade do Vale do Paraíba. p.1-6, 2013.
- GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo. Atlas. 1991.
- GOMES, B. **Desinteresse do Legislativo pode prejudicar milhões de pacientes dependentes da medicina nuclear**, 2021. Disponível em: <https://abdan.org.br/2021/12/15/desinteresse-do-legislativo-pode-prejudicar-milhoes-de-pacientes-dependentes-da-medicina-nuclear/>. Acesso em: 15 ago. 2022.
- GÓMEZ, N. **5 mil brasileiros morrem por falta de radioterapia, mas cenário deve mudar**. [S. l.], 28 mar. 2019. Disponível em: <https://www.uol.com.br/vivabem/noticias/redacao/2019/03/28/5-mil-pacientes-morrem-por-falta-de-radioterapia-mas-cenario-deve-mudar.htm>. Acesso em: 1 dez. 2021.
- GONZATTO, E. F. **Raios-x e radioterapia**: uma oficina temática para abordar conceitos de radiações e radioatividade no ensino médio na perspectiva da contextualização. Mestrado Profissional em Química na Rede Nacional. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/219088?show=full>. Acesso em: 30 de mar. 2021
- GROUP, M. **Quais são as áreas de atuação da radiologia industrial?**. Rio de Janeiro/RJ, 8 jul. 2020. Disponível em: <https://maximgroup.com.br/quais-sao-as-areas-de-atuacao-da-radiologia-industrial/>. Acesso em: 24 ago. 2022.
- GUERRA, G. C. et al. Educação em tempos pandêmicos: Desafios e possibilidades através do WhatsApp no ensino remoto. **Revista Docência e Cibercultura**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 4, ed. 2021, p. 273–285, 2021.
- GUZZO, M. O que são Neutrinos?. *In: Sociedade Brasileira de Física*. Campinas - SP: Instituto de Física Gleb Wataghin UNICAMP, 27 maio 2020. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/v1/home/images/fisicaaovivo/fisica-ao-vivo-2020-05-27.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2022.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, v. 4, 2009.
- HORST, E. L.; CORDENONSI, A. Z. O uso das plataformas de prototipagem Arduino e Raspberry Pi na educação brasileira: uma Revisão Sistemática de Literatura. **RENOTE**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 470–480, 2021. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/index.php/renote/article/view/110287>. Acesso em: 24 out. 2022.

HUSSEIN, M. S.; REBELLO, P. Combate ao câncer ganha novas técnicas: a física nuclear e o tratamento de tumores. **Revista USP**, REVISTA USP, São Paulo, n. 66, p. 80-95, jul. 2005. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13435/15253>. Acesso em: 26 nov. 2021.

JUNIOR, J. B. B.; ALBUQUERQUE, O. C. P. Possibilidades para o uso do WhatsApp na educação: análise de casos e estratégias pedagógicas. **Anais do I Simpósio Nacional de Tecnologias Digitais na Educação**, São Luís/MA, ano 2016, p. 315–332, 21 nov. 2016.

KANE, S. A. **Introduction to Physics in Modern Medicine**. 2. ed. Haverford College Pennsylvania, USA: CRC Press, 2009.

KNIGHT, R. **Física - uma abordagem estratégica: relatividade física quântica**. 2. ed. Porto Alegre - RS: Bookman, v. 4, 2009.

KOERICH, M. S. *et al.* Pesquisa-ação: ferramenta metodológica para a pesquisa qualitativa. **Revista Eletrônica de Enfermagem**, Goiânia, Goiás, Brasil, v. 11, n. 3, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/fen/article/view/47234>. Acesso em: 02 jan. 2023.

LARA FILHO, L. *et al.* Achados tomográficos de pacientes submetidos a tomografia de crânio no pronto-socorro do Hospital Universitário Cajuru. **Radiologia Brasileira**, Curitiba/PR, ed. 46, p. 143–148, 2013. Disponível em: http://www.rb.org.br/detalhe_artigo.asp?id=2412&idioma=Portugues. Acesso em: 24 ago. 2022.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M.E.D.A. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1986.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em educação: Abordagens Qualitativas**. 2. ed. Rio de Janeiro/RJ: E.P.U, 2018.

LÜHR, A. *et al.* “Radiobiology of Proton Therapy”: Results of an international expert workshop, **Journal Radiotherapy and Oncology**, v. 128, p. 56-67, 2018.

MARANTE, W. O.; SANTOS, M. C. dos. Metodologia de ensino da educação física: reflexão e mudanças a partir da pesquisa ação. **Revista Mackenzie de Educação Física e Esporte**, v. 7, n. 2, 2009. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/remef/article/view/583>. Acesso em: 13 jan. 2023. Acesso em: 24 ago. 2022.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2017.

MARTINS, R. de A. A descoberta dos raios x e o primeiro comunicado de Röntgen. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 20, n. 4, 1998.

MENDONÇA, E. T. de *et al.* Paradigmas e tendências do ensino universitário: a metodologia da pesquisa-ação como estratégia de formação docente. **Interface - Comunicação, Saúde**,

Educação [online], v. 19, n. 53, p. 373-386, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-57622013.1024>. Acesso em: 26 dez. 2022.

MINAYO, M. C. de S. (Org.). **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. Petrópolis: Vozes, 2010.

MINAYO, M. C. de S. **Pesquisa Social: Teoria, método e criatividade**. 28. ed. Petrópolis/RJ: Vozes, 2009.

MINERAÇÃO: DIFRAÇÃO DE RAIO X (XRD). Barueri - SP, s.d s.d. Disponível em: <https://www.sgsgroup.com.br/pt-br/mining/metallurgy-and-process-design/high-definition-mineralogy/x-ray-diffraction-xrd#:~:text=A%20difra%C3%A7%C3%A3o%20de%20raio%20X,para%20identificar%20as%20fases%20presentes>. Acesso em: 24 ago. 2022.

MOREIRA, M. A. **A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula**. Brasília: Editora UnB, 2006b.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa subversiva. **Série-Estudos - Periódico do Programa de Pós-Graduação em Educação da UCDB**, [S. l.], n. 21, 2006a. Disponível em: <https://www.serie-estudos.ucdb.br/serie-estudos/article/view/289>. Acesso em: 5 set. 2022.

MOREIRA, M. A. Ensino de Física no século XXI: desafios e equívocos. **Revista do Professor de Física**, Brasília, v. 2, n. 3, 2018. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/rpf/article/download/19959/18380/>. Acesso em: 15 jun. 2022.

MOREIRA, M. A. Negociação de Significados e aprendizagem significativa. **Ensino, Saúde e Ambiente**, v. 1, n. 2, 30 dez. 2008.

MOREIRA, M. M. P. C. *et al.* Contribuições do Arduino no ensino de Física: uma revisão sistemática de publicações na área do ensino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 721-745, dez. 2018.

MOURA, F. A. de; OLIVEIRA, V. P. O Ensino de Física Moderna baseado no filme Interestelar: Abordagem didática para a aprendizagem significativa. **Society and Development Research**. v. 8, n. 3, 2019. Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=560662194015>. Acesso em 10 ago. 2022.

MUNHOZ, M. **Física Moderna I: Aula 06**. [S. l.], s.d. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/333662/mod_resource/content/2/Aula06.pdf. Acesso em: 24 ago. 2022.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

OLIVEIRA, M. M. de. **Como fazer pesquisa qualitativa**. Petrópolis/RJ: Vozes, 2017.

OLIVEIRA, R. P. de. **Física médica aplicada ao ensino de física das radiações: um relato de experiência na criação e aplicação de uma sequência didática para o ensino médio**

utilizando TICs. Mestrado Profissional em Ensino de Física. Universidade de Brasília (UnB), Brasília – DF, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/33747>. Acesso em: 18 jun. 2021.

PARISOTO, M. F. **O conceito de eletromagnetismo, ótica, ondas e física moderna e contemporânea através das práticas na medicina**. Dissertação de Mestrado em Ensino de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto, Alegre – RS, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/56668?show=full>. Acesso em: 18 de dez. 2021.

PAULINO, A. R. *et al.* **Uma análise dos conhecimentos prévios dos alunos sobre energia**. 2007. Disponível em: http://www.ciencia.iao.usp.br/dados/snef/_umaanalisedosconheciment.trabalho.pdf. Acesso em: 14 set. 2021.

PELLIZZARI, A.; KRIEGL, M. L.; BARON, M. P.; FINCK, N. T. L.; DOROCINSKI, S. I. Teoria da Aprendizagem Significativa segundo Ausubel. **Revista PEC**, Curitiba, v. 2, nº 1, p. 37-42, jul. 2001/jul. 2002.

PHETCOLORADO. **O que é PhET? Uma breve introdução às simulações PhET**. [S. l.], s.d. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/ptBR/about>. Acesso em: 26 set. 2022.

PIAUI. Universidade Federal do Piauí. **Histórico do Colégio Técnico de Bom Jesus (CTBJ)**, 2021. Disponível em: <https://ufpi.br/historico-ctbj>. Acesso em: 19 set. 2022.

PIVETTA, M. Prótons e íons na medida certa: Hadronterapia combate tumores de forma mais seletiva e eficaz que a radioterapia convencional. **PESQUISA FAPESP**, São Paulo/SP, n. 223, p. 24-25, set. 2014. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2014/09/024-025cancer-proton223.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2021.

PONTES NETO, J. A. da S. Teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel: perguntas e respostas. **Série-Estudos - Periódico do Mestrado em Educação da UCDB**. Campo Grande-MS, n. 21, p.117-130, jan./jun. 2006.

POUPART, J. *et al.* **A pesquisa qualitativa: Enfoques epistemológicos e metodológicos**. Petrópolis/RJ: Vozes, 2008.

POZO, J. I.; CRESPO, M. A. G. **A aprendizagem e o ensino de Ciências: do conhecimento cotidiano ao conhecimento científico**. Porto Alegre: Artmed, 2009.

SALEMI, M. de M. **Efeito da ventosaterapia sobre a dor e incapacidade funcional em indivíduos com dor lombar inespecífica persistente: um ensaio clínico randomizado sham controlado**. Dissertação (Mestre em Fisioterapia). Programa de Pós-Graduação em Fisioterapia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/39372/1/DISSERTA%20de%20Melo%20Salemi.pdf>. Acesso em: 26 set. 2022.

SANTOS, E.; NACIF, M. **Tomografia: Manual de técnicas em Tomografia Computadorizada**. [S. l.]: Rubio, s.d. Disponível em: <http://www.radioinmama.com.br/historiadatomografia.html>. Acesso em: 24 ago. 2022.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: ótica e física moderna**. 14. ed. São Paulo, SP: Pearson Addison Wesley, v. 4, 2016.

SILVA, A. C. da. As radiações na medicina: o que dizem livros didáticos de física do ensino médio?. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 24 (3), p. 222-243, 2019. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/9135/22b2c469b2fb4a22db1305c7eab3680fb169.pdf>. Acesso em: 26 set. 2022.

SOUSA, S. M. G. de. **Aprendizagem significativa crítica de tópicos de física nuclear por meio de aula de campo**. 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências Naturais) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Cuiabá, 2012. Disponível em Acesso em 14 de jun. 2022.

STRUNK, A. *et al.* Model PET Scan Activity. **The Physics Teacher**. V. 56, p. 278-280. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324621700_Model_PET_Scan_Activity. Acesso em: 02 abr. 2022.

TAVARES, R. **Aprendizagem significativa**, jul./2003/jun./2004. Disponível em: http://www.projetos.unijui.edu.br/formacao/_medio/fisica/_MOVIMENTO/ufpb_energia/Textos/ASConceitos.pdf. Acesso em: 2 ago. 2022.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

TRIPP, D. Pesquisa-ação: uma introdução metodológica. **Educação e Pesquisa**, v. 31, n. 3, p. 443-466, set./dez. 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ep/a/3DkbXnqBQyyq5bV4TCL9NSH/#>. Acesso em: 02 dez. 2022.

VIEIRA, B. A. B. **Caracterização da deposição de energia de um feixe de próton, utilizando o código de Monte Carlo FLUKA**. 2014. 20 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação - TCC (Bacharel em Física Médica)- Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu/SP, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/142911/000867022.pdf?sequence=1>. Acesso em: 26 nov. 2021.

VINHOLI JÚNIOR, A. J. Diagnóstico dos Conhecimentos Prévios de estudantes sobre Ecologia: Interfaces com a Teoria da Aprendizagem Significativa. **Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review**, [s. l.], v. 7, 1. ed, p. 25-38, 2017. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/asr/main/artigos/openAbstract.php?idArtigo=109>. Acesso em: 27 set. 2022.

ZANELLA, L. Aprendizagem: uma introdução. **Psicologia e Educação: o significado de aprender**. Porto Alegre: Edipuc/RS, 2003, p. 23-38.

SANTIN FILHO, O. **Breve histórico dos cem anos da descoberta dos raios X: 1895-1955**. Revista Química Nova, 1995, 18 (6). Instituto de Física da Universidade de São Paulo – SP.

RADIOTERAPIA, 2020. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/doencas/radioterapia.htm>. Acesso em: 17 set. 2022.

GIANNINI, A. **Acelerador de partículas do Cern retomará busca por ‘matéria escura’**, 2022. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/ciencia/acelerador-de-particulas-do-cern-retomara-busca-por-materia-escura/>. Acesso em: 5 jul. 2022.

Research Shows Benefits of Protons. Disponível em: <https://www.floridaproton.org/newsletter/2020/january/research-shows-benefits-protons>. Acesso em: 15 mai. 2022.

PENAFIEL, B. R. V. de L. *et al.* Gerenciamento de radiofármacos em serviços de medicina nuclear: estatísticas e perspectivas na atuação do farmacêutico no cenário nacional. II COINTER PDVS, Recife, 2020. Disponível em: <https://cointer.institutoidv.org/smart/2020/pdvs/uploads/536.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2022.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Produto Educacional



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PIAUÍ



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA – MNPEF**

JOSE MAILSON RAMOS FEITOSA

**SEQUÊNCIA DIDÁTICA APLICADA AO ENSINO MÉDIO: ASPECTOS DA FÍSICA
E SUA RELAÇÃO COM OS TRATAMENTOS RADIOTERÁPICOS**

**TERESINA
2022**

JOSE MAILSON RAMOS FEITOSA

**SEQUÊNCIA DIDÁTICA APLICADA AO ENSINO MÉDIO: ASPECTOS DA FÍSICA
E SUA RELAÇÃO COM OS TRATAMENTOS RADIOTERÁPICOS**

Produto Educacional apresentado à Coordenação do Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física MNPEF - Polo 26, da Universidade Federal do Piauí (UFPI) como requisito para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Física.

Linha de Pesquisa: Recursos Didáticos para o Ensino de Física.

Orientador(a): Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo

TERESINA

2022

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

MNPEF
Associação Nacional de Profissionais em Física

ASPECTOS DA FÍSICA E SUA
RELAÇÃO COM OS TRATAMENTOS
RADIOTERÁPICOS

Sequência Didática aplicada ao Ensino Médio

Jose Mailson Ramos Feitosa

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	171
2 RAIOS X: DA DESCOBERTA ÀS SUAS APLICAÇÕES.....	174
2.1 Contexto histórico da descoberta dos raios x.....	174
2.2 Radiações ionizantes e não ionizantes.....	178
2.2.1 Interação da radiação com a matéria: efeito fotoelétrico, Compton e produção por pares.....	181
2.5 Coeficientes de atenuação e escala de Hounsfield.....	190
2.6 Raios X e suas aplicações na indústria e medicina.....	193
3 RADIOTERAPIA CONVENCIONAL E HADRONTERAPIA.....	195
3.1 Formação de uma célula cancerígena.....	195
3.2 Doses de radiação aplicadas a tumores.....	198
3.3 Radioterapia convencional à base de raios X e fótons.....	200
3.4 Hadronterapia à base de prótons e íons de carbono.....	202
3.4.1 Aceleradores utilizados na Hadronterapia.....	203
4 Desenvolvimento da Sequência Didática como base para o aprendizado significativo da Física das Radiações ionizantes aplicada à Radioterapia.....	209
REFERÊNCIAS.....	247
APÊNDICES.....	XX

APRESENTAÇÃO

Prezado(a) Professor(a),

Esta Sequência Didática (SD) tem como objetivo geral propor orientações didáticas com potencialidades para servir como base para o aprendizado significativo da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia. Para isso, alinhamos tal orientação didática à Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e à metodologia da Sala de Aula Invertida (*Flipped Classroom*).

A Teoria da Aprendizagem Significativa foi proposta por David Ausubel (1918-2008) no ano de 1963, sendo que nas primeiras descrições de tal teoria se empregava a terminologia Aprendizagem Verbal Significativa (*Meaningful Verbal Learning*), através de sua obra *The Psychology of Meaningful Verbal Learning* (A Psicologia da Aprendizagem Verbal Significativa (MOREIRA, 2006, 2008).

Vale esclarecer que este formato de aprendizagem parte do pressuposto de que as ideias novas (aprendizado) sejam adquiridas através de uma relação não impositiva, mas a partir de associações como elementos não literais presentes em sua estrutura cognitiva.

Nessa perspectiva, inicialmente, para que a Aprendizagem Significativa ocorra é necessário que o aluno seja possuidor de conhecimentos preexistentes e a partir deles sejam produzidos outros novos. Esses conhecimentos, entre outros, podem ser figuras, símbolos e definições que possam servir de ancoragem ou subsunçor, ou seja, ponto de partida para associação aos novos conhecimentos apresentados e que se integrarão à sua estrutura cognitiva (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980).

Para Moreira (2006), os subsunçores são adquiridos com objetivo de formação de conceitos, e estão presentes desde a fases de crianças até a velhice, se apresentam assim como a base par todo conhecimento.

Do exposto, a aprendizagem significativa para que aconteça de maneira satisfatória, espera-se que:

- O aluno manifeste predisposição em aprender;
- O material seja potencialmente significativo.

Nessa perspectiva, a significação, é em sua essência um atributo pessoal, e só é factível de ocorrer se o aluno for detentor de motivação intrínseca ou extrínseca. Caso contrário estará fadado a permanecer com as ideias pré existentes em si.

Sobre a Sala de Aula Invertida, trata-se de uma metodologia de ensino ativa, pois possibilita aos alunos que estes sejam protagonistas do processo da aprendizagem, podendo

ser empregada tanto nas modalidades à distância e presencial. Foi criada em 2007 por Jonathan Bergmann e Aaron Sams, colegas de trabalho, enquanto ensinavam ciências numa escola de Ensino Médio nos Estados Unidos (ARGENTO, 2021).

Esta SD foi aplicada em sala de aula (via remota e presencial) a alunos da 3ª série do Colégio Técnico de Bom Jesus (CTBJ) em Bom Jesus/Piauí. Na referida SD, inicialmente se faz uma reflexão teórica sobre:

- Raios X, com destaque no seu contexto histórico, na relação entre radiações ionizantes e não ionizantes, na interação da radiação com a matéria: efeito fotoelétrico, Compton e produção por pares, Coeficientes de atenuação e escala de Hounsfield e suas aplicações na indústria e medicina;
- Radioterapia convencional e hadronterapia, com ênfase nas temáticas: formação de uma célula cancerígena, doses de radiação aplicadas a tumores, radioterapia convencional à base de raios X e fótons, e hadronterapia à base de prótons e íons de carbono.

Isto posto, você encontrará sugestões de como desenvolver aulas sobre a Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia, propostas de textos e atividade prática por meio do protótipo do aparelho PET/Scan *simulation*. Na verdade, o intuito é disponibilizar planos de aula (APÊNDICES J, L, M, N), a fim de que possam ser desenvolvidos ou adaptados à realidade de cada escola.

Especificamente sobre o desenvolvimento e aplicação desta SD, no contexto considerado, criou-se um ambiente de aprendizagem na lógica da Sala de Aula Invertida, sendo possibilitado aos alunos 5 Encontros/aulas, com duração de 2 horas-aula cada um deles. Para isso, se deu autonomia aos alunos, a partir de diálogos, nas equipes constituídas e leituras prévias dos textos, produzidos pelo professor/pesquisador, em que estes apresentaram as ideias centrais dos textos.

Portanto, ao se analisar e explicar os dados produzidos durante a aplicação da SD/Produto Educacional, destacaram-se indícios de possibilidades da referida SD para um aprendizado significativo da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia. Primeiro, a superação, por parte dos alunos, dos conhecimentos prévios, ou seja, daqueles conhecimentos impregnados do senso comum. Em segundo, o movimento das reflexões e diálogos, durante os Encontros, com a intervenção do professor/pesquisador em que se constatou o quanto os alunos participavam e se envolviam nas questões pontuadas, dando oportunidade para que eles falassem sobre o que haviam entendido dessas questões. Isso, certamente, impactou em mudança qualitativa no desenvolvimento cognitivo, ou melhor, em um aprendizado significativo, como defendido Ausubel e seus intérpretes.

2 RAIOS X: DA DESCOBERTA ÀS SUAS APLICAÇÕES

A descoberta dos raios X trouxe ao mundo uma nova forma de enxergar os raios catódicos, até então estudado por diversos cientistas, dentre eles William Crookes através do tubo de Crookes. É importante frisar que até a sua descoberta e publicação, diversos cientistas vinham realizando experimentos sobre os efeitos da eletricidade em gases rarefeitos encerrados em tubos. Com o aperfeiçoamento das pesquisas, se pensou em estudar tais efeitos com menos ar presente nos tubos. Nesse contexto que em 1880, William Crookes realizava experimentos com seu tubo de Crookes e observou que uma chapa fotográfica ao lado havia sido velada. Chegou a pensar em ir reclamar onde as comprou, imaginou que havia adquiridas usadas. Mal sabia que naquele momento ele lançava os fundamentos para a investigação dos “raios misteriosos” que posteriormente viriam a ser explicados e impactariam consideravelmente o mundo científico (MARTINS, 1998).

Diante do exposto, nesta Seção, inicialmente será apresentado o contexto histórico da descoberta dos raios X. Em seguida, serão feitas reflexões teóricas sobre as duas categorias de radiação: ionizantes e não ionizantes, com destaque na interação da radiação com a matéria: efeito fotoelétrico, Compton e produção por pares. E, por último, uma breve discussão sobre os coeficientes de atenuação e escala de Hounsfield.

2.1 Contexto histórico da descoberta dos raios X

Segundo Martins (1998), todos os livros de Física Moderna relatam que os raios X foram descobertos pelo físico alemão, William Röntgen em 1895. Todavia, se atribui ao acaso tal descoberta, diminuindo os méritos obtidos pelo cientista na consecução de sua engenhosa experiência com foco no desvendamento e entendimento desses raios, até então, misteriosos.

A esse respeito, alguns físicos contribuíram substancialmente para o entendimento dos raios catódicos, essenciais para a descoberta e entendimento dos raios X. Pode-se citar entre eles: Hertz, Lenard, Geissler, Julius Plücker, Hittorf, Goldstein (MARTINS, 1998).

Os físicos Hertz, em 1892, e seu aluno Lenard foram os pioneiros a estudar a passagem de raios catódicos (encerrados dentro de tubos de descarga) ao ultrapassar folhas finas de metal externas ao tubo (HERTZ, 1892 *apud* MARTINS, 1998). É importante citar a engenhosidade de Lenard ao construir um tubo de raio catódico com uma abertura e contendo uma fina camada de alumínio por onde passavam os raios e era possível o estudo de seus efeitos por alguns poucos centímetros. Esses raios tinham a capacidade de sensibilizar chapas

fotográficas; talvez sendo o primeiro contato do cientista com os raios x, porém sem o direcionamento para o estudo e descoberta dos raios X.

Assim, é necessário entender nesse processo que os raios catódicos tiveram início a partir do desenvolvimento das bombas à vácuo, desenvolvidas por volta do século XIX, tendo o físico Geissler com o desenvolvimento da bomba à mercúrio, em 1894, reduzindo a pressão atmosférica à ordem de 10^{-4} atm. Sequencialmente, Julius Plücker aperfeiçoou essa bomba conseguindo pressões ainda menores às já obtidas por Geissler.

Em 1869, Hittorf (aluno de Julius Plücker) observou através de um cátodo em forma de fio que partes escuras, sombras, eram formadas nas paredes do tubo de vidro, quando havia objetos sólidos inseridos em seu interior. Previu que algo saía do cátodo e se propaga em linha reta, a esses raios chamou de raios de brilho (*Glimmstrahlen*).

Sete anos depois, Goldenstein lhe atribui o nome de raios catódicos por serem oriundos do cátodo. A partir de então se passou a tentar definir com exatidão a natureza desses raios, devido a suas peculiaridades com outros já estudados e conhecidos na natureza. Na época os cientistas já citados nessa secção imaginavam que se tratavam de ondas transversais com a capacidade de serem desviadas por um campo magnético (JAUNCEY 1945 apud MARTINS, 1998).

Segundo Santin Filho (1995), o físico e engenheiro mecânico William Röntgen nasceu aos 27 de março de 1845 na cidade de Lennep - Alemanha. Mudando-se aos três anos com seus pais para a cidade de Konrad na Holanda. Para Martins (1998), ele estudou na Universidade de Utrecht em 1865, sequencialmente, foi estudar na Universidade de Zurich onde formou-se em engenharia mecânica em 1866 e três anos mais tarde concluiu seu doutoramento em Física.

De acordo com Francisco (2005), Röntgen fora convidado a permanecer com o Dr. August Kundt (orientador) como seu professor assistente na mesma Universidade na qual doutorou-se. Sendo transferido para Würzburg e posteriormente para Estrasburgo onde em 1874, levando consigo seu assistente Röntgen. Ambos trabalhando em física experimental, o que rendeu dezenas de publicações a Röntgen, tendo trabalhado em temas como condutividade térmica dos cristais, calor específico dos gases, modificação dos planos da luz polarizada por influências eletromagnéticas, dentre outros trabalhos.

Por não ter condições de implementar suas experiências ele retornou a Estrasburgo como professor associado de Física Teórica, o que facilitou sua dedicação às pesquisas.

Röntgen deu início a uma nova fase em seus experimentos, quando começou a investigar os raios catódicos estudados por Lenard. Em 08 de novembro de 1895 em seu laboratório na Universidade de Würzburg, começou a investigar o que aconteceria se o tubo de raios catódicos (ampola de Crookes) fosse recoberta por papel cartão preto. Nesse momento, induziu a corrente elétrica através do tubo na tentativa de verificar se ocorria alguma mudança referente à alguma luminosidade produzida através do tubo. Verificou uma luminescência numa placa de platinocianureto de bário que estava numa mesa um pouco afastada do tubo; repetiu o experimento e observou que o mesmo resultado se repetia.

Como forma de ampliar a pesquisa ao fenômeno novo descoberto, Röntgen pôs diversos materiais entre o tubo e a placa, a exemplo de madeira, vidro, dentre outros. Notou que o mesmo fenômeno se repetia, com exceção ao colocar o chumbo ou a platina que barravam totalmente os raios catódicos (até então). Imaginou e experimentou uma chapa fotográfica como anteparo para visualizar estruturas rígidas, desta maneira pensou em estruturas ósseas (só investigadas através de cirurgias, até então). Na ocasião, convidou Anna Bertha (sua esposa) para participar do experimento e para sua felicidade conseguiu ver as estruturas ósseas das mãos.

Essa foi a primeira radiografia oficial do mundo, conforme apresentada na Figura 31. A partir desse momento, se descobria uma aplicação para os raios X.

Figura 31: Radiografia da mão da esposa de Röntgen.



Fonte: Francisco (2005).

Röntgen se propôs a investigar as origens dos novos raios misteriosos que produziam a luminescência. Constatou que a iluminância produzia sombras bem definidas e regulares, desta forma estabeleceu que se tratavam de raios de características diferentes dos produzidos por ondas eletromagnéticas, pois não sofriam desvios na presença do campo magnético, eram refratados ou refletidos; possuíam uma alta capacidade de penetração em superfícies opacas. Por não haver características de raios conhecidos, nomeou-os de “raios X”.

Henry Dam, jornalista americano, fora um dos poucos a entrevistar o físico Röntgen a cerca de sua “descoberta” dos raios X, ocorrida em janeiro de 1896. Abaixo seguem-se trechos da entrevista, com atenção à alguma interpretação imprecisa por conta da dificuldade em conversar num idioma comum (língua inglesa ou alemã), utilizando em partes da entrevista o idioma francês.

“Agora, Professor”, eu disse, “o senhor poderia me contar a história da descoberta?”

“Não há história”, ele disse. Eu estava interessado há muito tempo no problema dos raios catódicos em tubos de vácuo, estudados por Hertz e Lenard. Eu havia seguido suas pesquisas e as de outros com grande interesse e decidira que logo que tivesse tempo faria algumas pesquisas próprias. Encontrei esse tempo no final do último mês de outubro. Eu já estava trabalhando há alguns dias quando descobri algo de novo.”

“Qual foi a data?”

“Oito de novembro.”

“E o que foi a descoberta?”

“Eu estava trabalhando com um tubo de Crookes coberto por uma blindagem de papelão preto. Um pedaço de papel com platino-cianeto de bário estava lá na mesa. Eu tinha passado uma corrente pelo tubo, e notei uma linha preta peculiar no papel.”

“O que era isso?”

“O efeito era algo que só poderia ser produzido, em linguagem comum, pela passagem de luz. Nenhuma luz poderia provir do tubo, pois a blindagem que o cobria era opaca a qualquer luz conhecida, mesmo a do arco elétrico.”

“E o que o senhor pensou?”

“Não.”

“Eu não pensei; eu investiguei. Assumi que o efeito devia vir do tubo, pois seu caráter indicava que ele não poderia vir de nenhum outro lugar. Eu o testei. Em poucos minutos não havia dúvida sobre isso. Estavam saindo raios do tubo que tinham um efeito luminescente sobre o papel. Testei-o com sucesso a distâncias cada vez maiores, até mesmo a dois metros. Ele parecia inicialmente um novo tipo de luz invisível. Era claramente algo novo, algo não registrado.”

“E luz?”

“Não.”

“É eletricidade?”

“Não em qualquer forma conhecida.”

“O que é?”

“Eu não sei.”

E o descobridor dos raios X armou assim tão calmamente sua ignorância sobre sua essência quanto todos os outros que tinham escrito até então sobre o fenômeno.

“Tendo descoberto a existência de um novo tipo de raios, _e claro que comecei a investigar o que eles fariam.” (DAM 1896, p.413 apud MARTINS, 1998, p. 374).”

Dessa forma, percebe-se o caráter investigativo de Röntgen ao dar continuidade aos trabalhos iniciados por outros físicos que o antecederam; além da obtenção dos raios com aplicações médicas, outro ponto muitíssimo importante fora o estudo da natureza desses raios. Somente assim, pode-se dar continuidade a outras características presentes nos mesmos e estabelecer parâmetros importantes para o uso seguro dos raios e posterior aperfeiçoamento para o aperfeiçoamento e desenvolvimento de novas tecnologias, dentre elas às da área médica (FRANCISCO, 2005).

2.2 Radiações ionizantes e não ionizantes

Segundo Okuno (2010), radiação é uma forma de manifestação da energia, podendo se apresentar na forma corpuscular ou ondulatória. Esse tipo de energia pode ser transmitido através do vácuo, ar ou meios materiais.

De acordo com Guzzo (2020), há radiações presentes em nosso planeta de modo ininterrupto, os seres humanos (caso específico) são atingidos a todo instante com radiações que não interferem de maneira maléfica no sistema de defesa humano, a exemplo dos

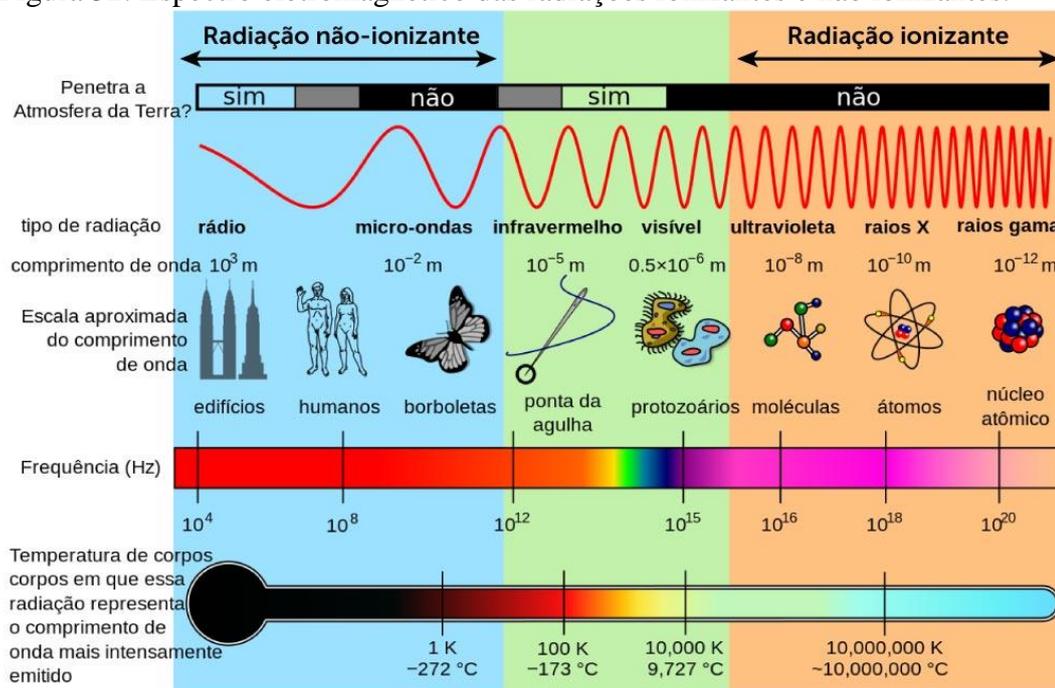
neutrinos¹⁵, que atravessam o corpo humano a uma taxa de 50 bilhões de neutrinos por segundo.

A essas radiações de baixas frequência de vibração, energia e que não detêm poder de ionizar a matéria, ou seja, interagir de modo a arrancar elétrons das camadas eletrônicas do átomo, chamam-se de radiações não ionizantes. Como exemplo temos as radiações eletromagnéticas da luz visível (de frequência inferior a 3×10^{15} Hz e comprimento de onda superior a 100 nm ¹⁶), as ondas do infravermelho, micro-ondas, TV e rádio.

Ao passo que a radiação que detêm a capacidade de interagir com o átomo ou molécula, e nela seja possível a ejeção de elétron que esteja ligado à camada por forças eletrostáticas, denomina-se ionizante. Esse tipo de radiação se subdivide em radiações diretamente ionizante e indiretamente ionizante.

Radiação diretamente ionizante são as radiações causadas por partículas carregadas, a exemplo de prótons, elétrons, pósitrons, partículas alfas; enquanto a radiação indiretamente ionizante é descarregada eletricamente, como os fótons (raios X e gama) e nêutrons. Para ilustrar a classificação das radiações, é apresentada a Figura 32.

Figura 32: Espectro eletromagnético das radiações ionizantes e não ionizantes.



Fonte: Braun (2014).

¹⁵ São partículas elementares leves, de massa infinitesimal e bem abundantes no espaço. São produzidas e radiadas pelo corpo humano ao mesmo tempo que este é atravessado por uma quantidade incontáveis delas.

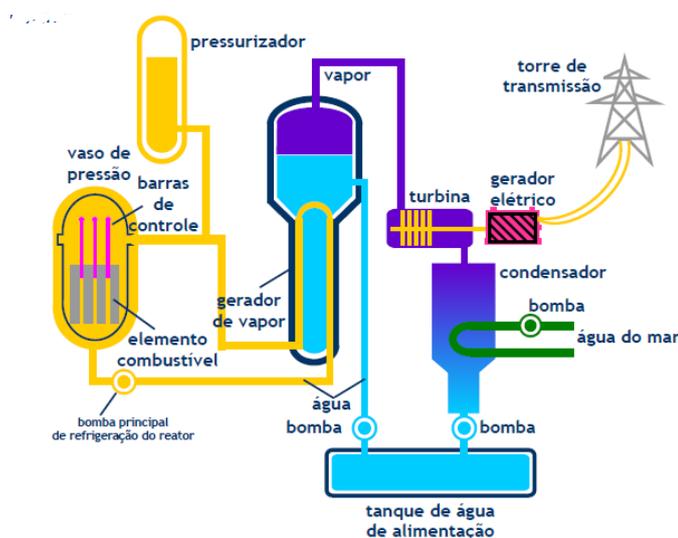
¹⁶ O nm é um submúltiplo do metro que equivale a 10^{-9} m .

Nota-se um maior poder de ionização a partir do ultravioleta, com um aumento da frequência da oscilação e diminuição no comprimento de onda, que conferem um maior poder de penetração e, portanto, interferências na ordem das menores estruturas celulares e atômicas.

Um das aplicações radioativas é a Nuclear que pode ser dividida em duas: a Energia Nuclear e a Medicina Nuclear. A primeira delas se refere à capacidade de gerar energia elétrica através da fissão nuclear¹⁷ com o elemento Urânio-235 (^{235}U) dentro de um reator nuclear.

A seguir apresenta-se uma ilustração simplificada de como ocorre o processo desde a fissão no vaso de pressão até a energia elétrica chegando até as torres de transmissão (Figura 32).

Figura 32: Representação de um reator nuclear.



Fonte: Cardoso (2012).

A segunda aplicação Nuclear se refere à Medicina que utiliza radioisótopos¹⁸ para o diagnóstico e tratamentos de câncer. Estes, administrados ao paciente passam a produzir radiação que é ligeiramente detectada pelos traçadores radioativos que realizam o papel de traçar/rastrear o percurso percorrido pelo radioisótopo na região irradiada.

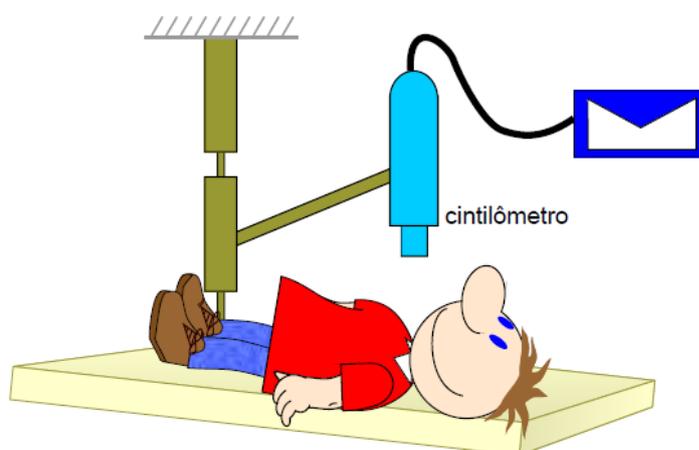
¹⁷ Fissão nuclear é um processo nuclear produzido a partir de núcleos instáveis que se desintegram ao serem bombardeados por um nêutron e que resultam numa reação em cadeia.

¹⁸ Radioisótopos são elementos químicos radioativos utilizados em exames de diagnóstico e/ou tratamento de patologias, inclusive o câncer, com o objetivo de verificar o metabolismo de determinado órgão ou região do corpo.

O radioisótopo é formado por elemento químico que é biologicamente absorvido por algum órgão ou região do corpo humano, a exemplo do Iodo-131 que se liga à glândula tireóide, onde se fixa. Para diagnóstico, ao paciente é administrado uma dose de Iodo-131 que é absorvido pela glândula e realizada uma detecção com o traçador que verifica o padrão de absorção do radioisótopo pela glândula, desta forma determina-se se há alguma anormalidade, portanto, anomalia.

A seguir, se apresenta a Figura 33 com a ilustração de um paciente administrado com radioisótopo e sendo mapeado com o cintilômetro.

Figura 33: Ilustração de um paciente administrado com radioisótopo e sendo mapeado com o cintilômetro.



Fonte: Cardoso (2012).

É importante não esquecer de outras aplicações das radiações ionizantes em áreas como agricultura, atuando no controle de pragas e na conservação de alimentos, a exemplo de cebolas e batatas (CARDOSO, 2012).

O processo de radiação que produz a ionização são fenômenos explicados pela Física Moderna tem efeitos importantes na produção de imagens, diagnósticos e tratamentos de patologias. Esses fenômenos serão explanados na seção abaixo.

2.2.1 Interação da radiação com a matéria: efeito fotoelétrico, Compton e produção por pares

De acordo com Okuno (2010), ionização e excitação acontecem mediante a deposição de energia pela radiação ionizante na região incidente, o que acarreta interação com os elétrons do material alvo. Tais efeitos podem ser biológicos, desde que aplicados a algum tecido ou órgão. Radiações do tipo diretamente ionizante propiciam efeitos importantes no

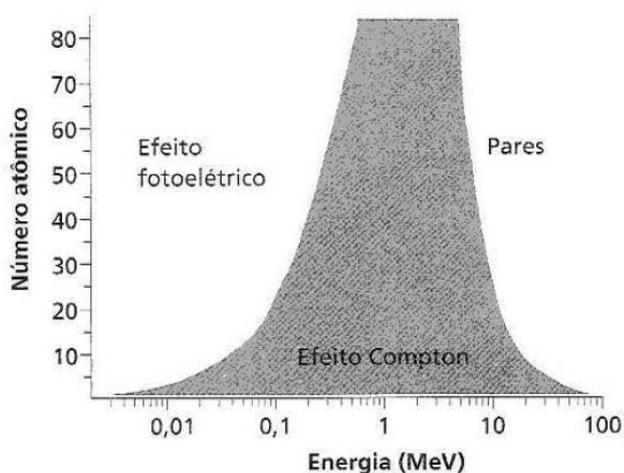
estudo dos efeitos biológicos, pois tem os fótons podem interagir com os elétrons da molécula e do átomo.

Tais interações têm efeitos que dependem substancialmente da radiação emitida e do material alvo; interagem através de campos eletromagnéticos para interações fotônicas. As radiações do tipo *x* e *gama* interagem de modo estocástico¹⁹ com os tecidos, produzindo números insignificantes de interações durante sua transmissão pelo material. Os três principais fenômenos físicos relacionados à ionização e deposição de energia radioativa nos tecidos são os: efeitos Fotoelétrico, Compton e Produção por pares.

Para cada um dos fenômenos citados há uma probabilidade de ocorrência na interação da radiação com a matéria que varia segundo o número atômico do material, energia do fóton e densidade do meio. Ou seja, a probabilidade de ocorrência do efeito Fotoelétrico num tecido ósseo e muscular são diferentes, variando em função da densidade de cada um desses tecidos. Esse tópico será melhor apresentado na secção seguinte.

Apresenta-se o Gráfico 1 que relaciona a probabilidade de manifestação dos três fenômenos na interação com a matéria.

Gráfico 1: Faixas de energia (para os três fenômenos) relacionando-se com o número atômico do material.



Fonte: Okuno (2010).

Neste gráfico, nota-se que, para baixas energias fotônicas e alto número atômico, há prevalência do efeito fotoelétrico, enquanto que para altas energias o efeito mais acentuado é o da produção por pares.

¹⁹ Estocástico é um padrão indeterminado, que depende de eventos probabilísticos para ocorrer.

Sobre estes efeitos, para uma discussão mais aprofundada do ponto de vista físico, comenta-se sobre cada um deles, separadamente.

Especificamente sobre o efeito Fotoelétrico, segundo Knight (2009), em 1886, Hertz foi o pioneiro a produzir ondas eletromagnéticas artificiais. Através de seus experimentos com bobinas e fios de cobre, pôde comprovar que as ondas de luz, produzida pelas centelhas, eram transmissíveis através do ar, corroborando a teoria de Maxwell que por meio de suas previsões e equações unificou duas áreas da Física até então distintas: a Ótica e o Eletromagnetismo. Hertz confirmou as propriedades das ondas de luz como reflexão, refração e polarização, previstas na teoria eletromagnética de Maxwell (TIPLER, 2014).

Naquela ocasião ele descobriu um fenômeno inesperado: observou que uma luz ultravioleta incidente sobre um eletroscópio negativamente carregado poderia ser descarregada pela ejeção de cargas negativas de sua superfície. Em 1889, Thomson demonstrou que as cargas negativas seriam os elétrons. A esse fenômeno nomeou-se de efeito fotoelétrico. Aos elétrons provenientes desse fenômeno passaram a se chamar fotoelétrons.

Em 1900, Phillip Lenard (discipulo de Hertz) realizou algumas observações e pôde perceber algumas características acerca do novo fenômeno. Observou que a corrente elétrica emitida a partir da ejeção de fotoelétrons variava em função do potencial de corte, da frequência e intensidade da luz incidente.

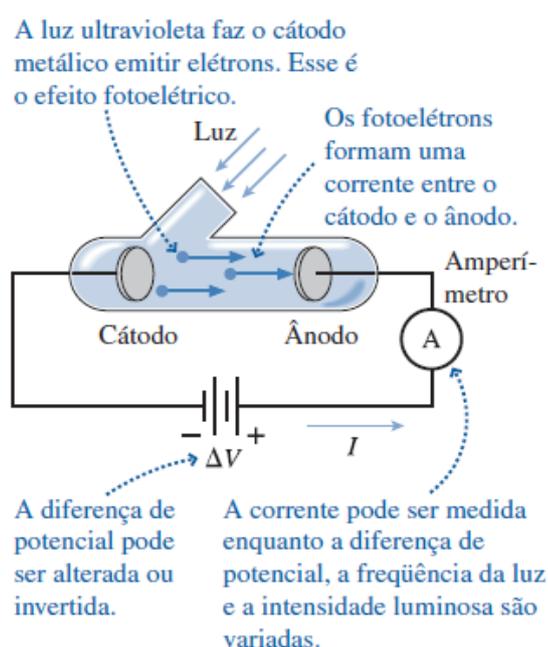
Diante disto, Lenard, como afirmado por Knight (2009), enumerou os seguintes postulados:

1. A intensidade da corrente elétrica I é diretamente proporcional à da luz incidente;
2. A corrente elétrica I surge instantaneamente com a incidência da luz em cerca de $\sim 0,1$ s;
3. Fotoelétrons são ejetados a partir do momento em que a energia do fóton incidente supera a função trabalho W ;
4. A magnitude da frequência de corte depende do material (metal) irradiado;
5. A diferença de potencial ΔV , se for positiva, a corrente não varia com o aumento de ΔV ; caso seja negativa, a corrente decresce até atingir o valor nulo, o que configura o potencial de corte V_{corte} ;
6. O V_{corte} admite valor único e não varia com intensidades de correntes diferentes.

De acordo com a Teoria da Física Clássica, é necessário fornecer energia a um sistema para que ele emita uma nova forma de energia através da conservação de energia, ou seja, uma espécie de energia se convertendo em outra. No efeito fotoelétrico não é diferente, é necessário fornecer luz eletromagnética (radiação) além do ultravioleta para que *fotoelétrons* sejam ejetados do metal.

Com o propósito de ilustrar o efeito Fotoelétrico obtido por Lenard, se apresenta a Figura 34.

Figura 34: Representação do tubo de vidro para experimento do Efeito Fotoelétrico.



Fonte: Knight (2009).

A seguir, é apresentada a equação que rege as condições para a obtenção do fenômeno.

$$K_{máx} = K_e - W \quad (2.1)$$

Esta equação determina a energia mínima a fim de que os fotoelétrons possam ser emitidos a partir do material, sendo estabelecida pela diferença entre a energia fornecida pelo elétron K_e através da radiação e a função-trabalho W que depende de cada metal.

A função-trabalho W para ser atingida, depende de uma diferença de potencial ΔV estabelecida entre os eletrodos cátodo (-) e ânodo (+).

O potencial de corte é, assim, definido pela seguinte equação:

$$V_{\text{corte}} = \frac{K_{\text{máx}}}{e} \quad (2.2)$$

Logo, esse potencial de corte estabelece a energia máxima do elétron que irradia a superfície metálica.

É oportuno aqui destacar que, Albert Einstein, físico alemão, no Efeito Fotoelétrico aos 26 anos e depois de ter concluído seu doutorado no Instituto Politécnico de Zurique – Suíça, conseguiu um emprego no Escritório de Patentes de Berna. Lá ele tinha acesso a diversos artigos e trabalhos científicos, de tal forma que dispunha de tempo suficiente para pensar sobre os fenômenos Físicos (KNIGHT, 2009). Na Figura 35, tem-se Albert Einstein, à época de 1905.

Figura 35: Albert Einstein à época de 1905.



Fonte: Knight (2009).

Em 1905, considerado o ano miraculoso, Einstein lançou dois artigos que mudariam a história da Física. Um sobre a relatividade, e o segundo a respeito da radiação eletromagnética da luz. Neste segundo artigo ele propôs uma solução para explicar o Efeito Fotoelétrico estudado por Lenard. A ideia consistia em bases científicas desenvolvidas 05 anos antes pelo físico alemão Marx Planck que determinou a quantização da radiação térmica (energia térmica) emitida pelo corpo negro. Para Planck, a energia se apresentava em pacotes discretos de energia a que ele chamaria de *quantum*. Determinou quanticamente a energia em múltiplos de uma grandeza, chamando-a de constante de Planck h .

$$E = 0, hf, 2hf, 3hf, \dots, \quad (2.3)$$

$$\text{Com } h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}.$$

Einstein baseou-se nas ideias de Planck sobre a quantização e determinou que a radiação eletromagnética da luz era análoga a da térmica e portanto, deveria obedecer à seguinte equação: $E = h \cdot f$. Ele passava a acreditar que a luz não era um espectro contínuo, mas descontínuo e se apresentava em pacotes discretos e definidos a que ele atribuiu de quantum de luz. Diante de tais ideias, ele pode contrapor as ideias clássicas de Lenard para explicar o fenômeno Fotoelétrico.

Baseado em tais ideias, Einstein pôde explicar as lacunas teóricas da Teoria de Lenard, baseadas na ainda Física Clássica. Na verdade, as discrepâncias eram duas: a da frequência limiar e a da instantaneidade da corrente elétrica.

A primeira se refere a uma frequência de limiar f_0 defendida por Lenard, o que não se evidenciou experimentalmente. Constatou-se que a mesma não existia, pois mesmo sofrendo variação, a ejeção de fotoelétrons existia. O que de fato existia era o potencial de corte. A segunda delas se origina da ideia defendida por Lenard de que os fotoelétrons se originavam de emissão de temperatura (fotoelétrons eram ejetados do material com o aumento da temperatura). Isso não se verificava na prática porque deveria haver um tempo até que o metal esquentasse para que pudessem ser emitidos os fotoelétrons a partir dele. O que se evidenciava era uma emissão quase que instantânea, levando-se a constatação de que não há dependência com a temperatura (KNIGHT, 2009).

Diante de tais inconstâncias, como citado Knight (2009), por Einstein explicou quanticamente o que ocorria no Efeito Fotoelétrico através de três postulados seguintes:

- A luz de frequência f consiste em quanta discretos, cada qual com energia $E = hf$. Cada fóton viaja à velocidade da luz c ;
- Os quanta de luz são emitidos ou absorvidos integralmente. Uma substância pode emitir 1, 2 ou 3 quanta, mas não 1,5 quantum. Analogamente, um elétron de um metal não pode absorver meio quantum, e sim, apenas um número inteiro deles;
- Um quantum de luz, quando absorvido pelo metal, transfere a totalidade de sua energia a um único elétron.

Por apresentar uma explicação satisfatória que condizia com os dados experimentais, Einstein foi laureado com o prêmio Nobel de Física em 1921 (KNIGHT, 2009).

Delimitando o Efeito Compton, no ano de 1916, Einstein associou um *quantum* de luz ao momento linear de um fóton de energia, através da equação abaixo:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{momento linear do fóton}) \quad (2.4)$$

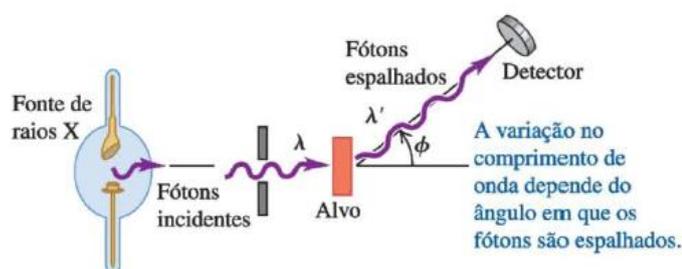
$$c = \lambda \cdot f \quad (2.5)$$

Considerando, c é a velocidade da luz no vácuo e equivale a $\sim 3 \cdot 10^8$ m/s. Essa equação descreve o choque do fóton com um elétron do material atingido. A partir do instante da colisão, o fóton transfere parte de sua energia para o elétron, obedecendo os princípios clássicos de colisão.

O físico estadunidense Arthur Compton, em 1923, da Washington University, fez incidir um feixe de raios X sobre um elemento de carbono e como resultado obteve um comprimento de onda diverso do apresentado inicialmente pelo raio X ($\lambda = 71,1$ pm), com o $p = 10^{-12}$. Lembrando que o comprimento de onda espalhado λ' apresenta comprimento maior que o incidente e com dependência do ângulo de espalhamento (HALLIDAY, 2009, p. 191). A essa diferença de comprimentos de onda atribui-se a variável $\Delta\lambda$.

Abaixo, com demonstrado na Figura 36, apresenta-se a ilustração do experimento de Compton.

Figura 36: Representação do experimento para detecção do Efeito Compton.



Fonte: Sears (2016).

Classicamente os raios X são ondas eletromagnéticas senoidais e deveriam transmitir toda a frequência, comprimento de ondas e propagação senoidal para o elétron alvo, mas não ocorre dessa forma.

Compton realizou seus cálculos levando em consideração as interações relativísticas combinadas com conservação da quantidade de energia e colisões, tendo em vista de se tratar de um choque entre um fóton e um elétron do alvo (SEARS, 2016).

Considerando a energia do fóton incidente como $E = h.f$, a do espalhado como $E' = h.f'$. As seguintes relações são válidas: $p = \frac{h.f}{c} = \frac{h}{\lambda}$; $E = m.c^2$; $p = m.c$; $E = p.c$

Idealizando a possibilidade do elétron está em repouso, de maneira que seu momento linear é zero e sua energia é $m.c^2$, após o choque ele passa a possuir momento linear P_e e energia $E_e^2 = (m.c^2)^2 + (P_e.c)^2$; e o fóton se move relativisticamente em direção ao elétron-alvo com momento linear p e energia inicial $p.c$, após o choque adquire momento linear p' e energia $p'.c$.

Desta maneira, utiliza-se a conservação da energia e colisões a fim de dedução da equação do espalhamento de Compton.

$$p.c + m.c^2 = p'.c + E_e \quad (2.6)$$

Reorganizando os termos, chega-se à expressão abaixo

$$(p.c - p'.c + m.c^2)^2 = E_e^2 = (m.c^2)^2 + (P_e.c)^2 \quad (2.7)$$

Utilizando a Lei da Conservação do Momento Linear obtemos a seguinte relação:

$$p = p' + P_e$$

ou

$$P_e = p - p' \quad (2.8)$$

Aplicando a equação acima 2.8 com a lei dos cossenos, obtém-se:

$$P_e^2 = p^2 - p'^2 - 2.p.p'.\cos\theta \quad (2.9)$$

Substitui-se a equação 2.9 na 2.7. Coloca-se c^2 em evidência e divide-se tudo por $(p.p')$, obtendo a seguinte equação:

$$\frac{m.c}{p'} + \frac{m.c}{p} = 1 - \cos \phi \quad (2.1.0)$$

E aplicando-se as seguintes relações $p' = \frac{h}{\lambda'}$; $p = \frac{h}{\lambda}$ e multiplicando por $\frac{h}{m.c}$ na equação 2.1.0, obtém-se a equação do espalhamento.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \phi) \quad (2.1.1)$$

Postas as considerações da probabilidade de manifestação dos fenômenos na interação com a matéria, Efeitos Fotoelétrico e Compton, é chegado o momento de se discutir sobre o Efeito Produção por Pares.

De acordo com Sears (2016), tal fenômeno também é originário das interações dos raios X com a matéria, porém, predominante na faixa das altas energias. Ocorre quando um feixe de raios X inicialmente com energia de 1,022 MeV²⁰, interage com o núcleo atômico de um átomo-alvo do receptor. O fóton (sem massa) desaparece completamente ao se aproximar do núcleo dando origem a um par elétron e pósitron²¹, com cargas (-) e (+), respectivamente. Tudo isso só é possível devido a Teoria da Relatividade Especial de Einstein que estabelece a relação $E = m.c^2$. Obedece também ao Princípio da Conservação da Energia e passa a ter 0,511 MeV para cada elemento do par.

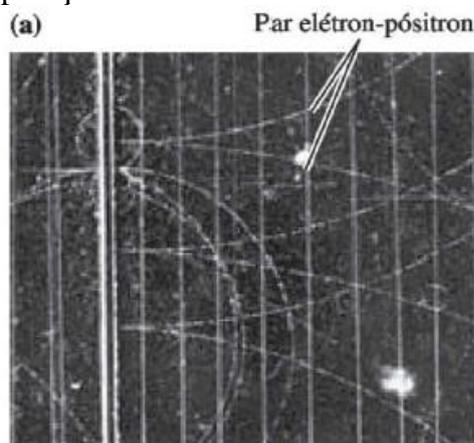
O processo invertido também acontece quando o pósitron gerado no evento anterior encontra outro elétron de um outro átomo em seu percurso e os dois se aniquilam. O que pode ser evidenciado pelo princípio da conservação de energia: $(-e) + (+e) = 0$.

Neste processo de aniquilamento há a produção de dois novos fótons (ou eventualmente três) que viajam diametralmente no espaço e somados retomam os 1,022 MeV iniciais do fóton de raios X. A seguir, fotografia da produção de pares e a ilustração do processo de produção e aniquilação, respectivamente, representadas nas Figuras 37 e 38.

²⁰ MeV é uma unidade de medida da energia das partículas relativísticas.

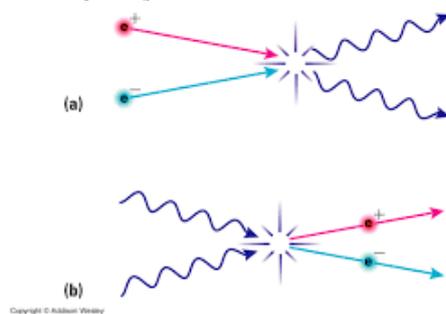
²¹ Pósitron é uma partícula de mesma massa do elétron e carga elétrica oposta.

Figura 37: Fotografia de rastros produzido pelo par na câmara de bolhas.



Fonte: Sears (2016).

Figura 38: Ilustração da produção de pares e aniquilação.



Fonte: Munhoz (s.d).

2.3 Coeficientes de atenuação e escala de Hounsfield

O espalhamento e absorção de raios X na matéria são propriedades que podem determinar desde o nível de energia empregada até o tipo de tecido irradiado, posteriormente, produzindo imagem através da Tomografia Computadorizada²² (TC), podendo ser mensuradas através do coeficiente de atenuação linear.

²² Tomografia computadorizada é um exame de imagens radiográficas que utiliza os raios X e algoritmos para produção de imagens mais detalhadas (permitindo uma diferenciação dos tecidos) que as radiografias convencionais.

No efeito Fotoelétrico, o fóton é absorvido, enquanto no Compton, é espalhado, podendo contribuir para ruídos na imagem produzida, acarretando em perdas ou não na qualidade da imagem obtida na TC.

O efeito Compton diferencia os materiais de composições químicas diferentes, não obtendo tanto sucesso em tecidos moles, pois apresentam densidades semelhantes. Tendo a anatomia diferenciada pelo efeito Fotoelétrico por atuar com baixas energias.

A interação dos fótons de raios X com o tecido corporal e a forma como cada um deles é absorvido nomeia-se de coeficiente de atenuação linear. Se resume numa média estabelecida dos diferentes tecidos que irradiados podem ser visualizados em alguma medida devido à absorção sofrida pelos efeitos Fotoelétrico ou Compton. É simbolizado pela letra grega μ , a letra grega mu (KANE, 2009).

A Tabela 5 traz as relações dos coeficientes de atenuação e densidades de tecidos.

Tabela 5: Coeficiente de atenuação para 60 KeV e densidade de alguns materiais importantes para raios X na medicina imagiológica.

Absorção do material	Coeficiente de atenuação para 60 KeV, μ (cm^{-1})	Densidade ρ (g/cm^3)
Gordura.	0,1788	0,91
Tecido mole que não seja gordura (músculos, fluidos corporais).	0,2045	1,00
Água.	0,2055	1,00
Cérebro.	0,2061	1,00
Ar.	$\sim 3 \cdot 10^{-4}$	0,00129
Osso.	0,466 a 0,548	1,65 a 2,00

Fonte: Kane (2009).

De acordo com a Tabela 5, é possível comparar os coeficientes de atenuação do osso e da gordura na faixa de 60 keV. Identifica-se que o osso por possuir uma densidade maior que o gordura, facilita uma absorção dos raios X pelo tecido ósseo, o que implica num maior coeficiente de atenuação; a gordura por possuir o coeficiente de atenuação menor, a transmissão da radiação se torna maior através dos seus tecidos.

É importante frisar que, cada material tem seu próprio coeficiente de atenuação, pois o mesmo é obtido segundo uma média que envolve os elementos químicos envolvidos no tecido corporal (em específico).

Há equações que relacionam grandezas como intensidade dos raios X emitidos sobre os tecidos e contrastes, ambos importantes para uma melhor definição e qualidade na produção da imagem radiológica. Embora elas possuam coeficiente de atenuação em suas equações, não será objeto de apresentação desta secção as equações citadas, pois já relacionam outra parte do assunto diverso do apresentado aqui.

A escala de Hounsfield (HU) também chamada de tons de cinza foi uma homenagem a seu criador. Ele imaginou uma escala que pudesse ser utilizada para diferenciar os tecidos na imagem radiológica. Determinou como referência o HU da água como 0. Esses tons podem apresentar alguma variação de tonalidade a depender da energia do feixe empregada nos tecidos-alvo (KANE, 2009).

Na Tabela 6 são relacionados os tecidos às unidades de HU e o tom de cinza associado.

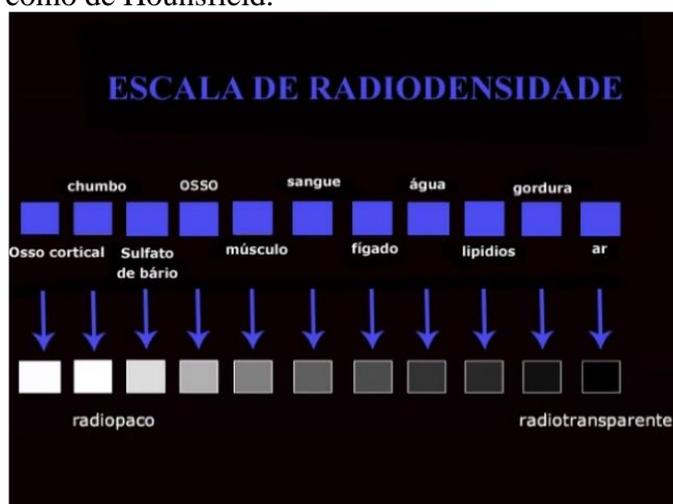
Tabela 6: Relação dos tecidos às unidades de HU e o tom de cinza associado.

Densidade	Unidades Hounsfield	Cor
Meio de contraste	+100 a 1000	Branca brilhante
Osso	100	Branca
Água e partes moles	0 a 100	Cinza médio
Gordura	-100 a -60	Cinza escuro
Ar	-1000 a -120	Preta

Fonte: Lara Filho (2013).

Abaixo representamos através da Figura 39 a escala de Radiodensidade e seus valores em HU e tonalidades correspondentes.

Figura 39: Escala de Radiodensidade também conhecida como de Hounsfield.



Fonte: Disponível em: <http://www.radioinmama.com.br/historia-datografia.html>

Os tons de cinza são apresentados mais bem distribuídos e especificados, quando comparados à tabela anterior.

2.4 Raios X e suas aplicações na indústria

No início do descobrimento dos raios X por Röntgen em 1905, as aplicações se restringiam às radiografias de partes do corpo humano. No decorrer dos anos, notou-se um alargamento das aplicações dos raios X, destacando-se áreas da indústria e saúde.

Na indústria, como mostrado na Figura 40, há algumas aplicações como Inspeção Corporal. Estes aparelhos são muito comuns em portos e aeroportos, também chamados de *Bodyscan*. Têm a função de detectar metais, armas, drogas, explosivos e mais algumas substâncias ou materiais ilícitos (GROUP, 2020).

Figura 40: *Bodyscan* em atividade numa estação de metrô.



Fonte: Group (2020).

Outra aplicação, o que pode ser observado na Figura 41, se refere à radiografia industrial, ramo destinado à inspeção de dutos industriais que objetiva assegurar o controle de qualidade dos dutos e desta maneira, evitar fissuras que possam comprometer a peça e parte considerável da estrutura relacionada. Utilizam-se fontes radioativas de Ir-192, Se-75 e Co-60 ou equipamentos emissores de raios X como forma de inspecionar o material em questão, podendo ser dutos de navios, industriais, aviação, petróleo, dentre outros (GROUP, 2020).

Figura 41: Aparelho de radiografia aplicado às tubulações.



Fonte: Disponível em: <https://www.trkd.org.tr>

Assim, uma terceira aplicação seria na mineralogia (ciência que estuda os minerais). Através da difração por raios X é possível identificar as partículas de argilas e outros minerais presentes. Outra técnica associada aos estudos de cristais, chamada de cristalografia, utilizada para obtenção do arranjo estrutural e, desta forma, realizar estudos quanto à sua melhor aplicabilidade, grau de dureza, dentre outras características estudadas na área de ciências dos materiais (MINERAÇÃO, s.d).

Em linhas gerais, considerando as três aplicações mencionadas dos raios X na indústria, constata-se a enorme contribuição dos raios X em tecnologias médicas, industriais e comerciais, o que evidencia o tão necessário se torna a divulgação científica de tal fenômeno físico entre a sociedade, sobretudo nos espaços escolares.

3 RADIOTERAPIA CONVENCIONAL E HADRONTERAPIA

Nesta Seção serão apresentadas algumas características gerais em termos de estudos de formação do câncer, bem como de suas formas de tratamentos à base de radiações ionizantes: a tradicional Radioterapia e a Hadronterapia.

3.1 Formação de uma célula cancerígena

No empreendimento das discussões relacionadas à essa temática, se recorreu ao material ABC do câncer: abordagens básicas para o controle do câncer (BRASIL, 2018b), produzido pelo Ministério da Saúde, do Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva (INCA). Assim, inicialmente, se enfatiza que, o câncer é uma doença conhecida desde à antiguidade (cerca de 5 milênios antes de Cristo). É sabido que Hipócrates²³ foi o primeiro a pronunciar a palavra *karkínos*, que em grego significa caranguejo, atualmente conhecida por câncer (BRASIL, 2018b).

Diante do exposto, se faz oportuno enfatizar que, o processo de formação da maioria das células cumpre um ciclo de vida que vai desde seu surgimento, através da divisão celular, passando pela multiplicação até seu desfazimento (morte), a exemplo das epiteliais. Tal processo natural e contínuo, para algumas células, não necessariamente indicam um distúrbio, mas um processo natural e necessário para a renovação celular e, portanto, a manutenção da vida.

Desta forma, o câncer se define pela capacidade de divisão celular de modo desordenado; sua proliferação em outras estruturas orgânicas, ocasiona um mal funcionamento das estruturas, o que pode acarretar na morte de tecidos e órgãos vitais.

No formato do crescimento controlado de células, estas aumentam a uma proporção limitada por aspectos fisiológicos ou patológicos. São consideradas células normais e podem ser do mesmo grupo que compõe a região, ou de grupos diferentes. A título de exemplos, têm-se a hiperplasia, a metaplasia, sendo que:

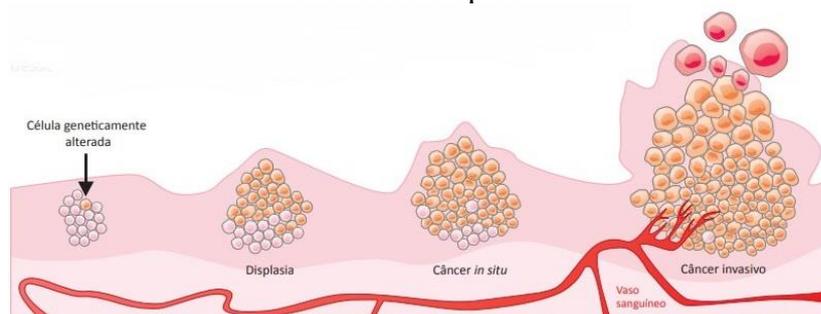
- Hiperplasia pode ocorrer na forma fisiológica a fim de atender a uma necessidade específica do organismo. Exemplo: glândulas mamárias se multiplicando durante a gestação;

²³ Médico grego considerado o “pai da medicina”, vivendo entre 460 e 377 a.C

- Metaplasia é um processo de multiplicação e reparação de células normais que se divergem daquelas oriundas de dada região. Exemplo: Aplica-se aos fumantes que têm substituídos seus epitélios de revestimento pseudoestratificado ciliado que reveste os brônquios por um tecido formado por células diferentes, o epitélio escamoso estratificado (BRASIL, 2018b).

Isto posto, outra possibilidade de crescimento celular seria no formato descontrolado, sendo que este ocorre através da displasia. Neste modelo, as células modificadas apresentam características diferenciadas quanto a tamanho, à forma, dentre outras. Desse modo, ocorre um crescimento desordenado no tecido epitelial, sobretudo, no epitélio metaplásico. Neste caso, uma região que é observada com razoável facilidade seria a dos epitélios de revestimento do colo do útero. Na Figura 42, se descreve o processo de displasia.

Figura 42: Ilustração do desenvolvimento desordenado de células através da displasia.



Fonte: Disponível em: <https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files/media/document/livro-abc-4-edicao.pdf>

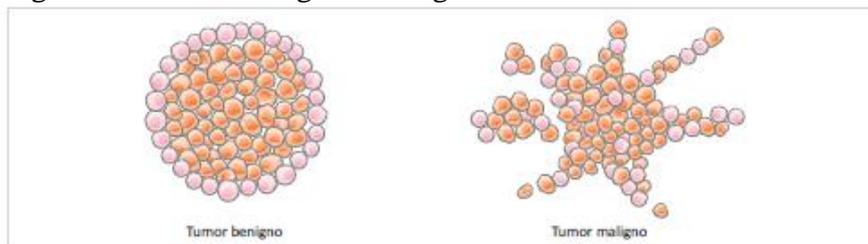
Esta Figura, descritiva da displasia, ocorre com uma massa tumoral, em decorrência da reprodução celular descontrolada após os estímulos responsáveis por sua formação. A este processo nomeia-se de neoplasias (câncer *in situ* e câncer invasivo), conhecido popularmente por tumores.

As neoplasias classificam-se em benignas ou malignas. Quanto às benignas estas ocorrem de maneira organizada, lenta e têm formato definido. Não invadem os tecidos adjacentes, mas adquirem proporções de modo a dificultar ou limitar o funcionamento de alguns órgãos ou estruturas. Por sua vez, as malignas apresentam uma multiplicação mais acelerada e descontrolada e têm capacidade de invadir tecidos adjacentes ou vizinhos. Sofrem

a divisão celular do tipo metástase²⁴, podendo ser resistentes a tratamentos, ocasionando a morte do paciente.

Na Figura 43 estão representadas as formas dos dois tipos de proliferação tumoral.

Figura 43: Tumor benigno e maligno.



Fonte: Disponível em: <https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files/media/document/livro-abc-4-edicao.pdf>

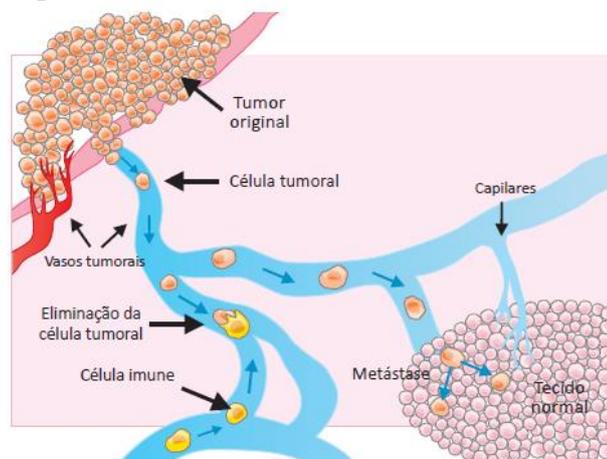
Ainda sobre essa discussão, outra classificação que se considera necessária relacionada aos tumores, se refere à sua capacidade em ser invasivo ou não invasivo.

Do exposto, os não invasivos são aqueles que não detêm a capacidade de se espalhar por tecidos adjacentes; se restringem à região na qual se formam. Já os invasivos atuam de maneira oposta aos não invasivos, ou seja, se proliferam para outras regiões do corpo, dando origem a outros tumores nas regiões atingidas. A esses novos focos de proliferação se nomeiam de metástase.

Os tumores do tipo invasivo se apresentam como verdadeiros desafios aos tratamentos de câncer, dificultando aqueles realizados por meio cirúrgico, ocorrendo a necessidade de recorrer a outros tipos de tratamentos (BRASIL, 2018b). Para melhor caracterizar tal situação, se apresenta a Figura 44.

²⁴ É um processo de desprendimento e disseminação do tumor principal por outros tumores originários e que se proliferam para outras regiões distintas.

Figura 44: Ilustração da proliferação de tumor do tipo invasivo.



Fonte: Disponível em: <https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files/media/document/livro-abc-4-edicao.pdf>

3.2 Doses de radiação aplicadas a tumores

Um exemplo de uma relação analógica estabelecida entre doses de radiação aplicada a tumores e doses de drogas administradas a dada população (pessoas, animais, etc), pode ser expressa da seguinte forma: determinada população pode morrer se submetida ao contato com drogas e o tempo necessário para a conclusão do evento. Tomando como exemplo o evento 50/30, isto significa que, 50% da população em contato com alguma droga tem chance de morrer num intervalo de 30 dias.

Por outro lado, este evento não se enquadra a doses de radiação aplicadas a tumores, tendo em vista apresentar inúmeras particularidades como: tipo de aparelho utilizado para irradiar, dose administrada, região do corpo irradiada, tempo de exposição da radiação, dentre outras métricas.

Exposições altas de radiação podem levar um paciente a óbito, porém àquelas em pequenas quantidades durante um tempo prolongado, também podem levar à morte. Essa radiação pode ser mensurada em MBq (Mega Becquerel) sendo aplicada em pequenas quantidades a centenas por sessão nos tratamentos radioterápicos. A radiação tem seu ciclo de vida baseado em meias-vida e pode permanecer durante um período no corpo humano.

Uma quantidade determinada de radiação é irradiada no corpo, mas apenas uma proporção dessa radiação é absorvida pelo corpo. Há uma quantificação para uma quantidade de radiação ionizada no ar por raios X ou gama: o Röntgen (R). A título de esclarecimento, um Roentgen é a relação entre a carga elétrica que ioniza o ar por kg, equivalente a $R = 2,58 \times$

10^{24} Coulomb/kg. Há outras unidades de medida para radiação: o cinza (Gy) e o rad. Um Gy corresponde a 1J/kg e um rad corresponde a 0,01 Gy.

Quantidades específicas de doses de radiação dão a ideia de quanto cada região pode receber e absorver a fim de produzir determinado efeito, como por exemplo:

- 1 a 10 Gy: para todo o corpo ou alguns órgãos mais sensíveis pode causar a morte;
- Dezenas de dose Gy: são utilizadas durante semanas em frações menores, sendo administrado doses menores diariamente;
- m^{25} Gy: utilizadas em exames de raios X, mamografia, etc.

Também há outras formas de mensurar a absorção de doses iguais e tipos de radiação diferentes, a exemplo de radiação por emissão de elétrons e gama. A esta quantidade de absorção ao longo dos tecidos se atribui de Transferência de Energia Linear (LET), sendo que esta pode variar em função de radiações com doses iguais mais de elementos diferentes como radiação alfa e raios X, para danos ao tecido biológico, implicando, possivelmente, em diferentes danos.

A essa capacidade de mensurar os danos e efeitos ao tecido biológico, se atribui o nome de Efeito Biológico Relativo (RBE). Esta se traduz como a razão entre a quantidade de uma partícula padrão para causar o mesmo dano biológico que a partícula em estudo. Eis alguns exemplos de RBE:

- Raios-X, raios gama e partículas beta (elétrons e pósitrons) são padronizados com RBE de 1,0;
- Partículas alfas têm um RBE de cerca de 20;
- Nêutrons têm valores variando de 5 a 20.

Como efeito exemplificativo, imagina-se RBE = 2,0 e RBE =0,5, significa que a primeira apresenta um dano biológico 2 vezes maior que os valores padrões, enquanto, que a segunda apresenta um dano biológico reduzido à metade em relação aos valores padrões (1).

Diante dessas considerações, a medida de uma dose equivalente em Sievert (Sv) corresponde ao produto da Gy pelo RBE, representada pela equação:

$$Sv = Gy * RBE$$

Dessa maneira, as doses de radiação são mensuradas e aplicadas a diagnósticos por imagem ou células cancerígenas. É importante enfatizar que os pormenores não estão

²⁵ Submúltiplo que corresponde a 10^{-3} .

totalmente detalhados nessa seção. Para maior aprofundamento, se recomenda a leitura do livro *“Introduction to Physics in Modern Medicine”*, da pesquisadora Kane (2009).

Na subseção seguinte serão discutidos os conceitos fundamentais da Radioterapia convencional.

3.3 Radioterapia convencional à base de raios X e fótons

Segundo Teles (2006), a Radioterapia é uma terapia baseada em radiações ionizantes para tratar pacientes acometidos por tumores do tipo maligno ou benigno. Tem como objetivo irradiar uma região tumoral com seus limites bem definidos, causando o menor prejuízo possível a regiões adjacentes, bem como ionizar as células tumorais levando à sua completa destruição e, assim, prolongar a sobrevivência do paciente. Além disso, pode ser utilizada também com caráter paliativo, a fim de aliviar dores e manutenção da qualidade de vida do paciente em fase terminal.

É oportuno, ainda, destacar que a radioterapia aplicada em tumores malignos consiste no ato de lançar feixes de fótons sobre regiões ou porções que contêm células malignas. Uma dificuldade associada à dissolução do tumor, se relaciona ao fato deste se espalhar pelo corpo após sofrer metástase. E, dessa forma, dificultar a aniquilação somente de tecidos tumorais, o que implica no atingimento de tecidos saudáveis em regiões vizinhas. Um exemplo seria um tumor localizado no abdômen, que precisaria de feixes de fótons da ordem de MeV para transpor os tecidos mais superficiais e chegar a atingir e aniquilar o tumor selecionado.

Há também as partículas alfa que trabalham na faixa de energia de 4 a 20 MeV²⁶ e podem ser bem utilizadas para tratar tumores mais superficiais, a exemplo do de pele, de lábios e do pescoço, pois sua capacidade de penetração é pequena, atingindo de 1 a 6 cm nos tecidos.

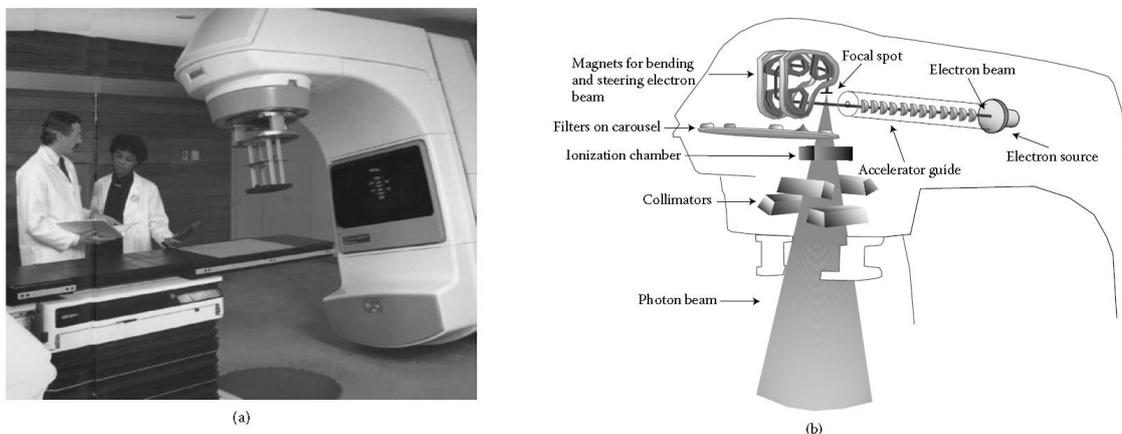
A radioterapia pode ser aplicada de três formas distintas, a saber:

- Radioterapia externa. Trata-se da modalidade que visa atacar o tumor maligno ou benigno através de uma fonte externa de radiação, podendo ser os raios X ou elétrons de alta energia produzidos através de aceleradores lineares. É largamente a mais utilizada entre as demais devido às suas características e regiões nas quais se apresentam os tumores. Na

²⁶ Múltiplo da unidade de medida para energia radioativa que corresponde a 10⁶.

Figura 45 há fotografias com a representação de um acelerador linear utilizado pela radioterapia (à esquerda) e sua composição interna (à direita).

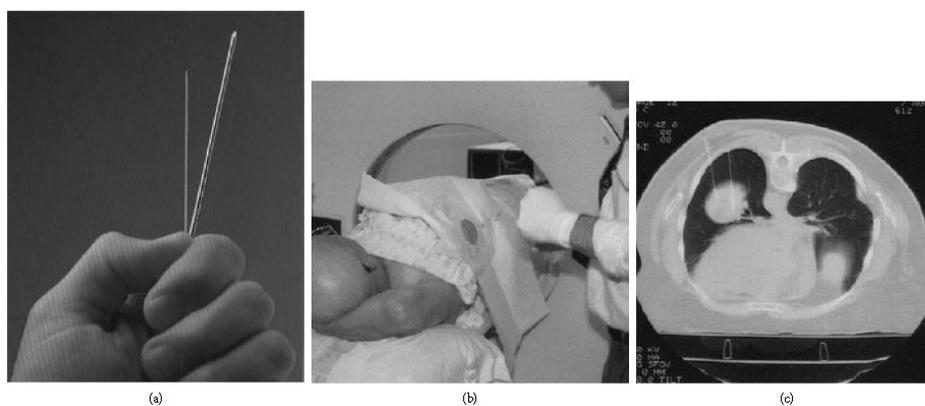
Figura 45: Fotografia do acelerador linear e Representação de partes internas que compõem o acelerador.



Fonte: Kane (2009).

- Braquiterapia ou fonte não selada. Consiste numa modalidade de radioterapia em que se utiliza uma fonte radioativa próxima das vizinhanças do tumor, o que diminui consideravelmente a exposição radioativa de tecidos saudáveis nas adjacências do tumor é implementada em tumores que estão acessíveis através de cavidades naturais ou por meio de cateteres ou agulhas. Tem aplicações em órgãos reprodutores femininos. Na Figura 46 se encontram as ferramentas utilizadas na braquiterapia, assim como também as imagens radiológicas das regiões tratadas.

Figura 46 – Agulhas radioativas utilizadas no tratamento braquiterápico e paciente imersa num aparelho de TC para melhor análise do acompanhamento (c) TC do tórax com braquiterapia aplicada ao câncer de pulmão.



Fonte: Kane (2009).

- Fonte não selada. Esta também se configura como outro tipo de radioterapia na qual se utilizam fontes radiofármacos²⁷ a fim de tratar regiões bem específicas, por exemplo: tireóide através do iodo-131 e leucemia com o fósforo-32 (KANE, 2009).

Figura 47 – Fonte não selada de radiofármaco.



Fonte: Gomes (2021).

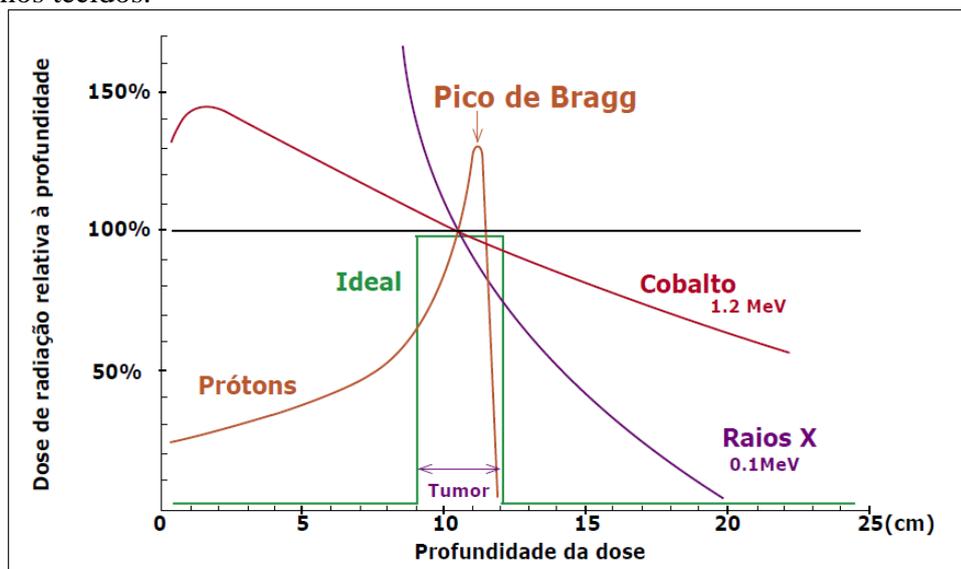
3.4 Hadronterapia à base de prótons e íons de carbono

De acordo com Hussein (2005), a Hadronterapia se refere a um tipo de tratamento radioterápico em que se utilizam as partículas pesadas: prótons, íons de carbono e nêutrons. Estes elementos apresentam uma característica diferenciada em relação aos feixes de elétrons (radioterapia convencional), ao irradiar na região a ser tratada; atingem menos os tecidos que estão ao redor e, portanto, preservam mais os tecidos saudáveis. Isso ocorre devido a uma característica peculiar de deposição dessas partículas, chamada de “Pico de Bragg”.

O Gráfico 2 mostra como se comporta essa deposição de energias nos tecidos. Neste gráfico, se observa a comparação entre a deposição de energia dos raios-x, feixe de elétrons (radioterapia convencional) e prótons (Hadronterapia).

²⁷ São compostos radioativos, oriundo da junção de radionuclídeos (isótopos instáveis que detêm decaimento nuclear) e alguma substância química, utilizados em diagnóstico e tratamentos em Medicina Nuclear.

Gráfico 2: Representação da dose de radiação *versus* profundidade da dose nos tecidos.



Fonte: Hussein (2015).

Neste gráfico, se observam as diferenças entre as energias depositadas nos tecidos, desde a entrada até regiões um pouco mais profundas, pelo feixe de elétrons (produzido a partir do Cobalto-60) e pelos prótons (Hadronterapia).

Ainda é possível verificar que o feixe de elétrons penetra no tecido com uma energia alta e vai se dissipando à medida que se aprofunda na região; ao passo que os feixes de prótons entram no tecido com uma energia relativamente baixa e vão aumentando gradualmente à medida em que se aprofunda, até culminar com o pico máximo de deposição de energia na região tumoral (HUSSEIN, 2005).

3.4.1 Aceleradores utilizados na Hadronterapia

Para Pivetta (2014), na produção de feixes de partículas, utilizadas na radioterapia, são empregados os aceleradores. Nesse caso, os feixes de elétrons valem-se de um tipo de acelerador chamado de linear; os de prótons e íons de carbono, por sua vez, utilizam os aceleradores circulares chamados de acelerador cíclotron.

O acelerador cíclotron tem por objetivo acelerar prótons e íons de carbono a velocidades próximas de $2/3$ da velocidade da luz, que é de aproximadamente 225.000 km/s, e

com isso modular a intensidade, utilizando técnica semelhante às da Radioterapia com Intensidade Modulada (IMRT)²⁸, a energia para irradiação na região desejada.

No que tange ao custo do tratamento Hadronterápico (à base de prótons) na Europa, conforme afirma Degiovanni (2015), um tratamento completo apresenta um custo médio de cerca de € 20 a 25 mil euros.

O centro de Hadronterapia mais avançado da Europa se localiza na Universidade de Heidelberg – Alemanha. Nele são tratados pacientes com feixes de prótons em sua maioria, cerca de 90% dos tratados, pois é uma terapia mais eficiente que a dos raios X e de duas a três vezes menos energéticas que as de íons de carbono que são empregados em casos mais complicados.

Inaugurado em 2009, esse centro custou € 120 milhões, é composto de um prédio de três andares com 5 mil metros quadrados. Uma estrutura de aço gigantesca, que pesa 670 toneladas e tem 25 metros de comprimento e 13 de diâmetro, conecta-se ao seu síncrotron. E ocupa uma área de 03 andares que são utilizadas para organizar o aparato para envio dos feixes com precisão milimétrica para a sala ao lado.

A seguir, nas Figuras 48 e 49 apresentam-se um pouco do aparato necessário para instalação de um centro médico de Hadronterapia.

Figura 48 – Acelerador Cíclotron- Estrutura de 670 toneladas que direciona os feixes de partículas: precisão milimétrica contra tumores.



Fonte: Pivetta (2014).

Figura 49 – Sala de Hadronterapia em Heidelberg - hospital universitário de Heidelberg.



Fonte: Pivetta (2014).

²⁸ Radioterapia de Intensidade Modulada.

São esses e outros pontos que dificultam a instalação de centros como esse no Brasil. Há poucos em operação no mundo.

Listaremos os centros de pesquisa que dispõem da estrutura para esse tipo de tratamento, com base em uma relação ao ano de 2005 (Tabela 7).

Tabela 7: Centros especializados em Hadronterapia até o ano 2005.

Centros especializados em hadronterapia		
NTPC, Harvard	Massachusetts (EUA)	Próton
Loma Linda	Califórnia (EUA)	Próton
MPRI	Indiana (EUA)	Próton
UCSF - CNL	Califórnia (EUA)	Próton
Moscou	Rússia	Próton
São Petersburgo	Rússia	Próton
Dubna	Rússia	Próton
PMRC, Tsukuba	Japão	Próton
HIMAC, Chiba	Japão	Próton, íon pesado
NCC, Kashiwa	Japão	Próton
Hyogo	Japão	Próton, íon pesado
Wakasa Bay	Japão	Próton
PSI (72 - 200MeV)	Suíça	Próton
Uppsala	Suécia	Próton
Clatterbridge	Inglaterra	Próton
Louvain-la-Neuve	Bélgica	Próton
Nice	França	Próton
Orsay	França	Próton
N.A.C., Faure	África do Sul	Próton
TRIUMF	Canadá	Próton
GSI Darmstadt	Alemanha	Íon pesado
HMI Berlim	Alemanha	Próton
Munique	Alemanha	Próton
Erlangen	Alemanha	Próton
Heidelberg	Alemanha	Próton
INFN-LNS, Catani	Itália	Próton
CNAO, Milan & Pavia	Itália	Próton
Central Italy	Itália	Próton
TOP Project ISS Roma	Itália	Próton
CGMH	Coreia do Norte	Próton
Bratislava	Eslováquia	Próton, íon pesado
Austron	Áustria	Próton, íon pesado

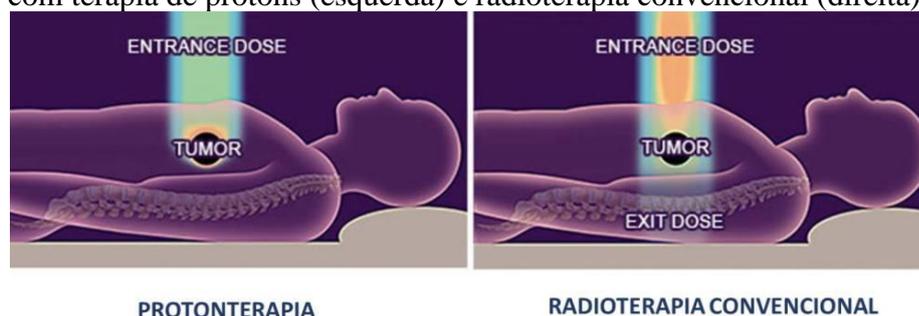
Fonte: Hussein (2015).

Segundo Márcio Fagundes, hoje esses números já somam 30 em centros dos EUA e outros 20 na Alemanha e Holanda.

É importante frisar que, devido à eficácia da radioterapia convencional para alguns tipos de câncer, ainda não temos no Brasil esses centros.

Feitos os comentários, a fim de se estabelecer comparativos entre a radioterapia convencional e a hadronterapia (à base de prótons), na Figura 50 se apresenta o demonstrativo da comparação entre aplicações de técnicas de radioterapia convencional e a hadronterapia.

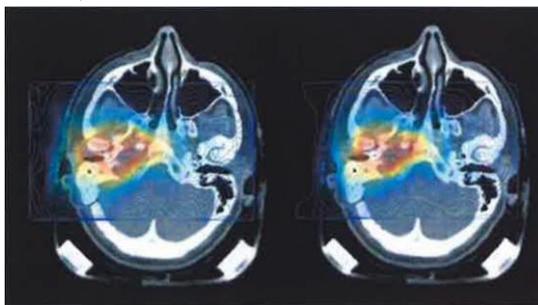
Figura 50: Ilustração da dose recebida por um paciente em tratamento com terapia de prótons (esquerda) e radioterapia convencional (direita).



Fonte: Disponível em: <https://www.floridaproton.org/newsletter/2020/january/research-shows-benefits-protons>

Ainda sobre essa mesma demonstração da comparação entre aplicações de técnicas de radioterapia convencional e a hadronterapia, a Figura 51 traz a distribuição da atividade dos íons de carbono medida durante a irradiação. Desse modo, uma comparação entre as duas imagens nos revela a precisão do planejamento do tratamento utilizando a referida técnica.

Figura 51 – Visualização do feixe dentro do paciente através de imagens originadas por PET²⁹.

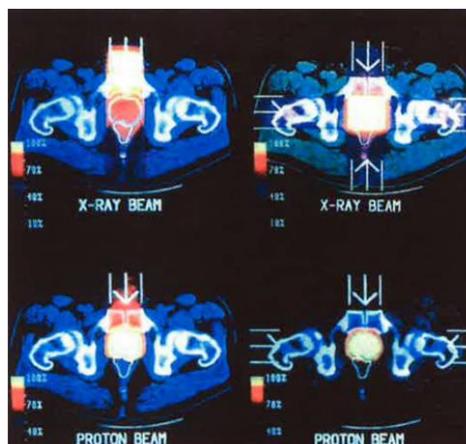


Fonte: Teles (2006).

Como se observa na Figura 61, imagem cedida gentilmente pelo Prof. Dr. J.de Boer da Universidade de Munique, Alemanha, há diferenças nas doses de radiação depositada no tumor e em regiões adjacentes nos dois tipos de tratamento.

²⁹ Tomografia por Emissão de Pósitrons, aparelho destinado ao diagnóstico e acompanhamento de doenças que necessitam de imagens, inclusive o câncer.

Figura 52: Comparação entre o Tratamento do câncer de próstata com feixe de fótons de raio-X e prótons.



Fonte: Teles (2006).

Assim, as Figuras 51 e 52 mostram as comparações entre a radioterapia convencional e hadronterapia. Nelas observamos a radiação na região de acesso ao tumor e a energia depositada nele. A extrema diferença de perda de energia na entrada, para a convencional, e o pico de Bragg na região estimada, utilizando-se a protonterapia (VIEIRA, 2014).

Em síntese, o Quadro 1 traz as principais comparações entre a radioterapia convencional e a hadronterapia.

Quadro 1: Comparação entre os tipos de radioterapia: convencional e hadronterapia

	Radioterapia convencional	Hadronterapia
Custo	Acessível	Extremamente alto
Localização dos centros de tratamento	Comum em diversos países, inclusive no Brasil	Existe em centros como EUA, Europa e Ásia. Ainda não existe no Brasil
Eficácia	Apresenta eficácia comprovada, principalmente em casos mais superficiais	Muito eficiente em casos de localizações tumorais mais profundas
Efeitos colaterais	Efeitos mais acentuados, devido a eliminação de	Efeitos menos acentuados, por danificar menos tecidos saudáveis

	tecidos saudáveis no caminho	adjacentes
Casos mais indicados	Câncer de pele, linfoma entre outros	Câncer de próstata, colo do útero, mama esquerda, cérebro, colón e reto, pediátrico etc.
Alcance com eficiência (cm)	Podem atingir até 3 centímetros de profundidade do tecido.	Podem atingir até 30 centímetros de profundidade no tecido.

Fonte: Teles (2006).

Com afirma Hussein (2005), as novas pesquisas mundiais se concentram em descobrir: a origem real da mutação genética; como as células se comportam, quando estão predispostas a desenvolver a doença e com isso já combater antecipadamente a mesma; desenvolver um medicamento universal que consiga curar todas as variações da doença.

Esses e outros objetivos relacionados a esses estudos terão potencial de sucesso com os estudos de física de partículas que é feita no LHC e em outros aceleradores de partículas espalhados no mundo, a exemplo do Brasil com Sirius que se localiza na UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas-SP e que se objetiva a realizar estudos em áreas de ciência base e aplicada, entendendo a matéria a nível mais microscópico possível, para auxílio ao desenvolvimento de medicamentos.

4 DESENVOLVIMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA COMO BASE PARA O APRENDIZADO SIGNIFICATIVO DA FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES APLICADA À RADIOTERAPIA

ENCONTRO 1

A duração máxima deverá ser de 2 horas-aula (100 min). Inicialmente, apresentar a proposta da SD, por meio de slides ou outro recurso, a fim de conscientizar os alunos da sua relevância, com destaque no objetivo, metodologia, referencial teórico e relevância, bem como informar o número de encontros/aulas previstos.

Para isso, o ponto de partida deverá ser o diagnóstico, a partir da proposição de questões dirigidas aos alunos sobre a Física das Radiações Ionizantes aplicada ao Ensino Médio, a fim de reconhecer os conhecimentos prévios dos alunos a cerca dessa temática. Prosseguindo às ações deste primeiro Encontro, dar instruções aos alunos de como deverão proceder a fim de aproveitar e conseguir melhor rendimento no estudo do material, o qual sugere-se que seja disponibilizado no *Google Classroom*, realizando, portanto, uma leitura prévia deste material (Texto 1), com possíveis questionamentos, posto que a proposta metodológica se alinha à Sala de Aula Invertida.

ENCONTRO 2

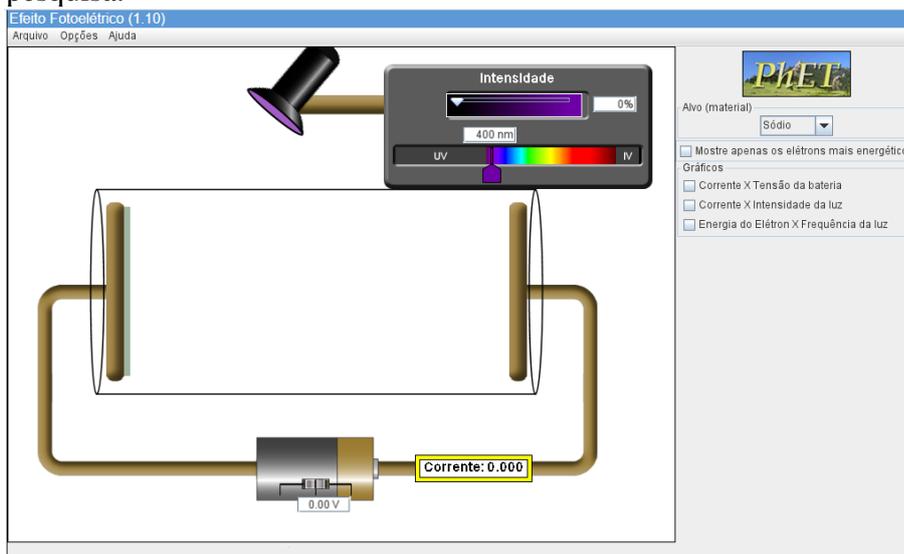
Duração máxima de 2 horas-aula (100 min). Constituir as equipes de alunos, distribuídas entre toda a turma/sala de aula, para reflexões das ideias centrais do Texto 1: Interação da radiação com a matéria, apresentado logo abaixo e disponibilizado anteriormente no *Google Classroom* ou outra plataforma digital.

Finalizado esse momento das reflexões apresentadas pelos alunos acerca das ideias centrais do texto “Interação da radiação com a matéria: propriedades dos efeitos Compton, fotoelétrico e produção de pares”, o professor realizará o experimento, com a participação dos alunos, da simulação/demonstração *on-line* do Efeito Fotoelétrico, através do *Phetcolorado*, mediado pela plataforma *Web*, a fim de que o processo ensino e aprendizagem aconteça de maneira qualitativa.

O simulador *online* Phetcolorado é uma plataforma voltada à simulação de áreas como matemática, física, química, biologia, dentre outras. Possui código aberto (código fonte

que permite colaboração dos usuários para fins de aprimoramento das simulações pré estabelecidas) e se apresentam nas versões Java ou Flash. Podendo ser simulada no navegador do computador, ou baixada no próprio aparelho; assim como no aparelho de smartphone através do aplicativo Phetcolorado (PHETCOLORADO, 2022), demonstrada na Figura 53.

Figura 53: Imagem do simulador do Efeito Fotoelétrico utilizado na pesquisa.



Fonte: Phetcolorado (s.d).

A implementação da simulação/demonstração do efeito fotoelétrico tem como objetivo reforçar e complementar o debate do Texto 1. Outro objetivo é o de reforçar o aprendizado ancorado na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, baseado numa experiência de laboratório virtual ou físico. Em síntese, terá como objetivo apresentar aos alunos as variações ocorridas em parâmetros físicos como:

- Intensidade de corrente elétrica;
- Tensão elétrica;
- Alteração no espectro eletromagnético de composição da luz;
- Variação nos elementos químicos-alvo, dentre outras.

Posteriormente, o professor deverá aplicar o Questionário 1: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 02 (APÊNDICE C), com o objetivo de avaliar os conhecimentos adquiridos por parte dos alunos no presente Encontro.

TEXTO 1

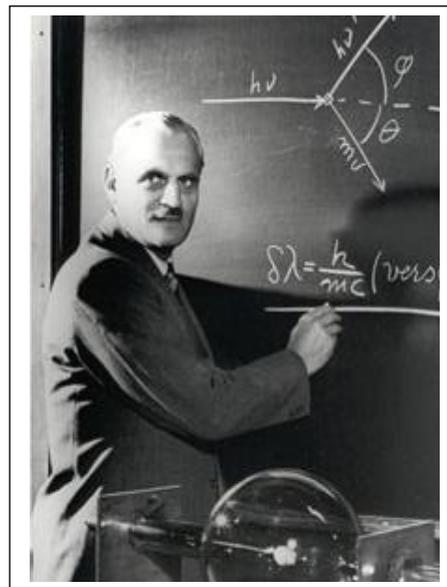
Interação da radiação com a matéria: propriedades dos efeitos Compton, fotoelétrico e produção de pares³⁰

Em 1927, o físico norte-americano Arthur Holly **Compton** foi laureado com a mais importante premiação científica mundial, o prêmio Nobel, por seus trabalhos acerca do espalhamento produzido pela interação fóton-elétron, a esse fenômeno ele nomeou como Efeito Compton (SILVA; FREIRE JUNIOR, 2014).

Na verdade, Compton (BETZ, s.d) se baseou em algumas hipóteses:

- o espalhamento pode ser interpretado como uma *colisão entre um fóton de raio X e um elétron* do material alvo;

Figura 54: Compton demonstrando a equação do efeito Compton desenvolvida por ele.



Fonte: Silva (s.d).

- como a energia de um fóton de raio X é muito maior que as energias cinéticas e potenciais de um elétron na matéria, podemos desprezar estas energias e considerar o elétron como livre e inicialmente em repouso;
- a energia e o momentum linear são conservados na colisão.
- como a energia inicial do fóton não é muito menor que a energia de massa do elétron, precisamos utilizar a cinemática einsteiniana”.

Assim, o que Compton fez foi incidir um feixe raios X, composto por fóton (elemento discreto que compõe a luz e não tem massa) que viaja à velocidade da luz c , que, por isso torna-se necessário utilizar a cinemática relativística de Einstein e sua famosa relação massa-energia, qual seja:

$$E = m.c^2$$

E : energia relativística einsteiniana que converte massa relativística em grande energia, podendo ocorrer a recíproca.

³⁰ O referido texto é uma produção deste pesquisador (FEITOSA, 2021).

m : massa de repouso ou massa inercial do fóton ou elétron.

c^2 : velocidade da luz ao quadrado ($c = 3.10^8$ m/s)

Nessas condições, Compton observa o espalhamento quando faz incidir um feixe de fótons de Raios X num elétron do material; gera-se um espalhamento, com ângulo θ que está diretamente relacionado à perda de energia e ao comprimento de onda após a colisão, considerando a conservação da energia e do momento linear.

É importante frisar que o Efeito Compton decorre da interação dos Raio X com o material, do qual se deseja obter imagens, a exemplo do corpo humano, duto metálico etc.

Compton considera a dualidade onda-partícula, proposta por De Broglie (1892-1987) para realizar seus cálculos e chegar à conclusão de sua equação para o espalhamento:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{Equação de De Broglie}), \text{ em que:}$$

o momento linear p se relaciona ao movimento do fóton como partícula e está relacionado à constante de Planck $h = 6,62.10^{-34}$ m².kg/s e ao comprimento de onda λ , associado ao fóton que se apresentando como onda.

Após algebrismos, deduções resultantes das leis físicas citadas acima, Compton chega à sua famosa equação:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos \theta) \quad [\text{Efeito Compton}], \text{ em que}$$

o comprimento de onda é constante e foi nomeado como comprimento de onda do elétron inercial λ_e ,

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e \cdot c} = 2,43 \text{ pm}$$

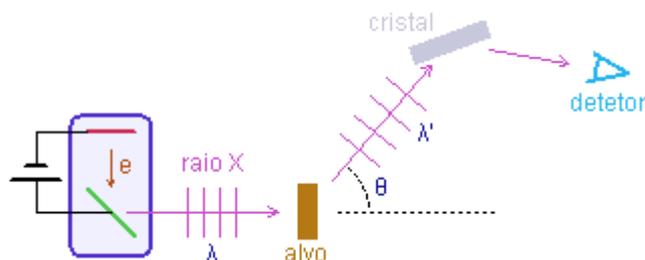
λ' = comprimento de onda do fóton após o espalhamento, apresenta sempre a característica de ser maior, devido a perda de energia durante o espalhamento;

λ = comprimento de onda do fóton antes da colisão, apresenta comprimento menor, devido à sua maior energia antes de colidir com o elétron da matéria;

P = pico, unidade de medida que corresponde a 10^{-12} .

θ = ângulo de espalhamento, obtido após o espalhamento e que varia entre $2\pi < \theta \leq \pi$, quando resulta $\frac{\pi}{2}$ o ângulo de espalhamento será máximo, ou seja, o fóton fará uma trajetória oposta à de início (SILVA; FREIRE JUNIOR, 2014).

Figura 55: Representação do Espalhamento Compton



Fonte: Silva (2014).

Apresentados os efeitos deste fenômeno físico na matéria, há um segundo fenômeno de interação com a mesma, que ocorre no tubo de produção de raios X, momento em que os raios X interagem com a estrutura atômica da célula radiografada.

▪ Efeito Fotoelétrico

No ano de 1887, o físico Heinrich Hertz estudava a natureza das faíscas geradas em tubos de raios catódicos e observou que não ocorriam mudanças na intensidade das faíscas produzidas fora e dentro do tubo de vidro. Logo, chegou à conclusão de que não se tratava de fenômeno eletrostático, pois não havia diferenças se as faíscas eram produzidas dentro de superfícies condutoras ou isolantes. Depois de diversos experimentos com a luz, chegou-se à conclusão de que a luz ultravioleta interferia com maior intensidade nas faíscas produzidas entre as placas emissora e coletora.

No ano seguinte, os cientistas Lenard e Wolf publicaram um artigo na *Annalen der Physik*, no qual citavam a luz ultravioleta como a responsável por fazer com que elétrons fossem arrancados do metal.

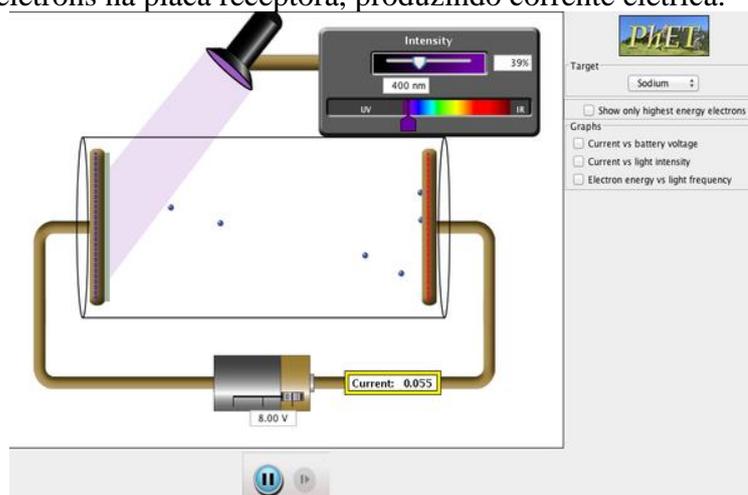
Thomson, após estabelecer a famosa relação carga-massa do elétron, lançou um postulado em que afirmava que o efeito fotoelétrico decorria diretamente da emissão de elétrons.

Apoiado nas ideias de Max Planck, Einstein formulou suas ideias e postulados na tentativa de explicar o efeito fotoelétrico. Assim, ele chegou às seguintes interpretações (SANTOS, 2002):

- ✓ Ocorria uma dualidade onda partícula, conforme descrita por De Broglie, passando a retomar a teoria corpuscular de Newton;
- ✓ Que a luz era composta por pequenos pacotes de energia, que ele passou a chamar de fótons;
- ✓ Todo quantum (fóton) transfere a energia a um único elétron, independentemente da quantidade de fótons que chegam à superfície do material;
- ✓ Cada fóton transporta uma energia descrita por $h\nu$, no qual h é a constante de Planck e ν é a frequência do fóton da luz;
- ✓ Estabelece a equação da energia máxima necessária para arrancar um elétron do metal: $E_{máx} = h\nu - \phi$, no qual $E_{máx}$ é a energia máxima de cada elétron ejetado do metal, $h\nu$ é a energia do fóton e ϕ é a função trabalho ou energia mínima necessária para possibilitar que elétrons possam ser arrancados do metal e vale $h\nu_0$ é no qual ν_0 é a frequência inicial.

A seguir, apresentamos uma representação de como pode ser produzido o experimento do efeito fotoelétrico.

Figura 56: Simulação do efeito fotoelétrico e recepção dos elétrons na placa receptora, produzindo corrente elétrica.

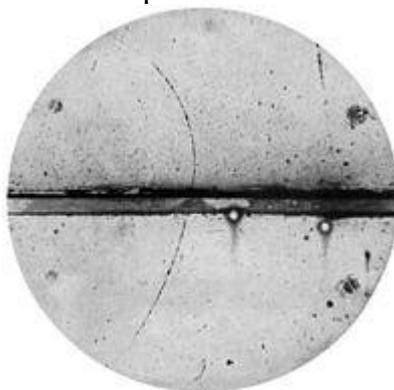


Fonte: Phet (2021).

▪ Produção de pares

Em 1932, o físico estadunidense, Carl D. Anderson, descobriu experimentalmente a antipartícula do elétron, o pósitron, e este feito lhe garantiu o Prêmio Nobel em Física em 1936. Com isso, Anderson conseguiu detectar os rastros deixados pelo pósitron, através de uma câmera de nuvens que foi inserida dentro de um campo magnético com o objetivo de observar o desvio curvo sofrido por essa partícula carregada. Observou que uma partícula se desviava rumo à direção negativa gerada pelo campo magnético (JR. JONH; SERWAY, 2013), conforme Figura abaixo:

Figura 57: Imagem do primeiro pósitron identificado por Carl Anderson.



Fonte: Pósitron (2020).

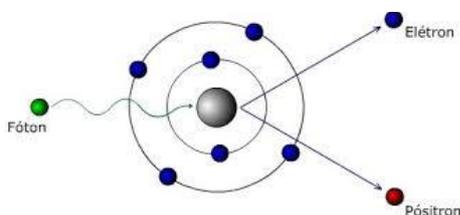
Depois dessa observação, diversos experimentos foram reproduzidos através destes fundamentos experimentais. O princípio básico para a produção de pares é que o fóton tenha energia superior a 1,022 MeV (mega elétron-volt), unidade de medida para energia relativística, e que passe próximo ao núcleo atômico, produzindo mais facilmente o par elétron-pósitron. Como há conservação da energia e momento linear, o fóton dá origem ao par com a energia do fóton dividida, cada um com 0,511 MeV. O elétron (-) e pósitron (+) possuem massas e cargas elétricas iguais, mas com sinais opostos, possuindo $\pm 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Em resumo, o pósitron é um elétron com carga positiva. Essa descoberta foi a base para outra observação experimental: a aniquilação do par.

- **Aniquilação do par elétron-pósitron**

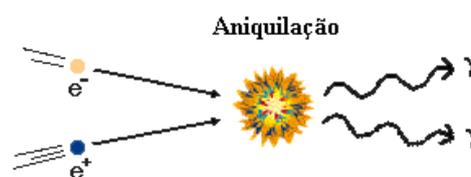
O sentido oposto para a formação do par, pode ocorrer, desde que o pósitron criado, perca energia e se choque com um novo elétron no caminho, o que produzirá dois fótons com energias equivalentes a 0,511 MeV, cada. Eles se propagarão em sentidos opostos, podendo ser captados por aparelhos sensíveis utilizados na medicina nuclear (SILVA NETO, s.d), como demonstrado nas Figuras 58 e 59. Especificamente, na Figura 67, pode-se observar o fóton incidindo no núcleo atômico ou passando extremamente próximo e a consequente formação do par. Já na Figura 68, após a aniquilação, há a formação de dois fótons com energias iguais a 0,511 MeV.

Figura 58: Ilustração da produção do par elétron-pósitron.



Fonte: Disponível em: <http://abrahamo-radiologia.blogspot.com/2012/06/interacao-das-radiacoes.html>

Figura 59: Ilustração da aniquilação do par elétron-pósitron.



Fonte: Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/evol/node42a.htm>

Contribuições das interações da radiação com a matéria em alguns exames por imagem

A imagiologia¹⁷ revolucionou o universo dos diagnósticos médicos, na medida em que possibilita a visualização de regiões internas ao corpo do paciente, tornando-se uma ferramenta poderosa e muito requisitada em uma gama de procedimentos médicos (AMADOR, 2009). Para que tais formações de imagens sejam possíveis, há necessidade que aconteçam interações físicas da radiação com a matéria, as quais iremos realizar um breve direcionamento de suas contribuições no processo de formação de imagens.

Os raios X são feixes de fótons produzidos em um tubo de raios catódicos, os quais têm comprimento de onda da ordem de 10 nm (nanômetro 10^{-9} m), ou seja, menor que o da luz visível. De acordo com a equação abaixo, verifica-se que comprimento de onda e frequência são grandezas inversamente proporcionais, o que indica que quanto menor for o comprimento de onda, maior será sua frequência e energia.

¹⁷ Imagiologia é uma técnica médica que se refere a técnicas de geração de imagens internas ao corpo do paciente, com o objetivo de propiciar diagnósticos e procedimentos menos invasivos.

Assim, fica evidenciado através da equação abaixo que relaciona Energia (E) medida em quilo elétron-volts (KeV) que equivale a $\sim 1,6 \cdot 10^{-19}$ joules (J), ao comprimento de onda (λ) com unidade em metro (m) e a frequência de oscilação (ν) medida em hertz (hz).

$$E = h\nu \text{ (I)}$$

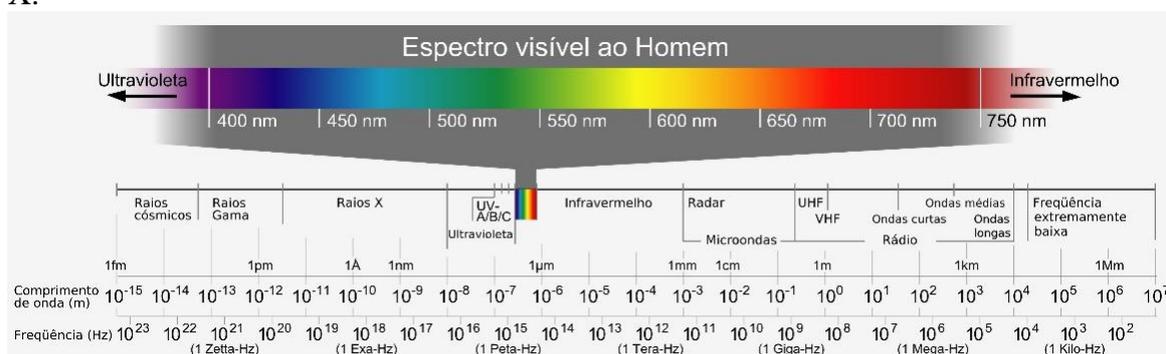
$$c = \lambda\nu \text{ (II)}$$

Substituindo (II) em (I), obtemos a relação entre E e λ , expressa através da equação abaixo, demonstrando quanto menor for o comprimento de onda, maior será a energia associada.

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Abaixo temos a representação dos espectros eletromagnéticos (Figura 60) que formam os comprimentos de onda que vão desde as ondas de rádio até os raios cósmicos.

Figura 60: Representação dos comprimentos de ondas e frequências com atenção à dos raios X.



Fonte: Garcia (2015).

As energias utilizadas na obtenção de imagens radiológicas operam na faixa entre 17 e 150 KeV (quilo elétron volts) e são extremamente menores dos que às utilizadas em radiofármacos¹⁸ e radioterapia³³

Durante o processo de interação da radiação com a matéria, podem ocorrer, basicamente, dois efeitos. O primeiro deles é o de absorção, que se caracteriza como a deposição de raios X na região atingida excitada e que dá origem ao fóton-elétron livre (pode

¹⁸ São elementos radiativos produzidos com radiação controlada e acoplado a alguns elementos como Flúor (Z=18), Iodo (Z=123, Z=121) com o objetivo de gerar luminescência no interior do organismo a partir da radiação emitida por ele.

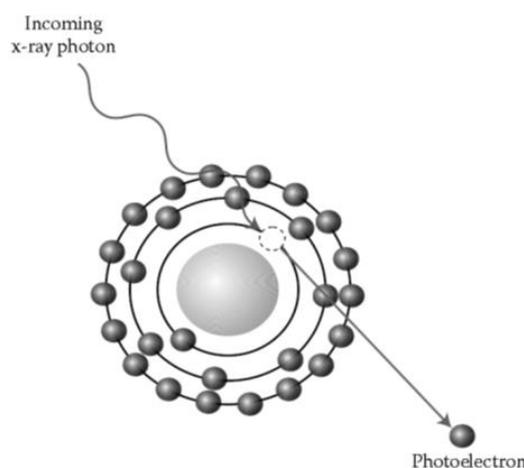
³³ É uma técnica que emprega feixes de raios X para tratar anomalias em células geneticamente modificadas, as quais se designam tumores.

ser pensado como oriundo da radiação gerada após a colisão do fóton com o elétron do orbital mais interno, ou seja, de menos energia).

O efeito fotoelétrico, que domina no processo de absorção de raios X quando a energia é de até 25 KeV. O fóton, ao ser emitido pela fonte geradora de raios X, atinge o átomo do material, ou em específico o corpo do paciente, que em tecidos moles pode ser o hidrogênio (H), oxigênio (O), carbono (C), sendo que, em tecidos ósseos (duros), pode ser o cálcio (Ca).

A representação do efeito fotoelétrico nos tecidos é demonstrada na Figura 61. Nesta Figura, pode-se observar que um fóton de raios X interage com um átomo dentro do corpo, resultando na excitação de um elétron no orbital interno. O fotoelétrico resultante é livre para viajar, enquanto o fóton de raios X é totalmente absorvido.

Figura 61: O efeito fotoelétrico.

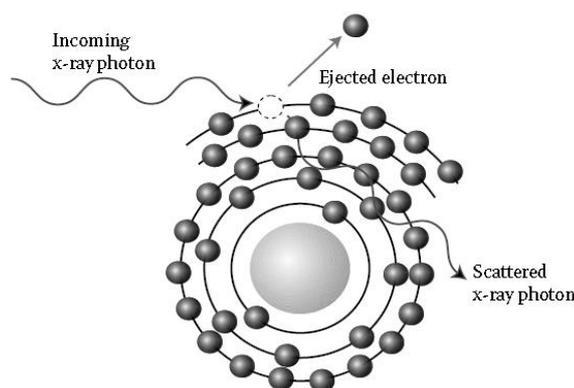


Fonte: Amador (2009).

Após a ejeção do fóton-elétron, o fóton incidente é totalmente absorvido pelo tecido. Após a ocupação do orbital vago pelo elétron da camada mais externa, há a emissão de raios X característico.

Por sua vez, o segundo é o de espalhamento, que ocorre através do efeito Compton, quando a energia é superior à necessária para que os fótons arranquem os elétrons das camadas mais externas. Diante disso, os fótons das camadas mais externas (mais energéticas) são arrancados e passam a vagar pelo tecido o que ocasiona os ruídos (imperfeições, ausência de nitidez) na formação da imagem. A representação de como ocorre esse efeito pode ser visto na ilustração abaixo.

Figura 62: O efeito Compton produzido a partir de uma colisão fóton de raios X com um elétron.



Fonte: Amador (2009).

ENCONTRO 3

Seguindo a mesma lógica dos Encontros anteriores, duração máxima de 2 horas-aula (100 min). Assim, propiciar momento para debate do Texto 2 – Raios X: Raio x convencional e Tomografia Computadorizada (TC), apresentado abaixo, em que as dúvidas possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer tais dúvidas sob a mediação e intervenção do professor.

Feito isso, o professor deverá aplicar o Questionário 2: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 03 (APÊNDICE D), com o objetivo de avaliar os conhecimentos adquiridos por parte dos alunos no presente Encontro. Por fim, disponibilizar o Texto 3: Radioterapia e Hadronterapia, no *Google Classroom* ou outra plataforma digital, referente ao Encontro 4.

TEXTO 2

Raios X: Raio x convencional e Tomografia Computadorizada (TC)³⁴

Funcionamento e produção dos Raios X

No final do século XVIII os físicos já estudavam os efeitos de descargas elétricas em gases encerrados em tubos de vidro. O primeiro a estudar tais fenômenos fora o físico inglês Michael Faraday (1791-1862) em 1838. Ele verificou em seus estudos o surgimento da

³⁴ O referido texto é uma produção deste pesquisador (FEITOSA, 2021).

ionização gerada em gases rarefeitos, quando sujeitos a uma baixa tensão elétrica e uma pressão da ordem de 10^5 menor que a pressão atmosférica ($1,013 \cdot 10^5$ Pa), produzido a partir de uma tensão elétrica aplicada aos terminais do tubo (MORSCH, 2016).

Embora não conseguisse explicar com êxito o porquê de tais fenômenos, seus estudos foram precursores e deram sustentação à continuação das pesquisas por meio de outros físicos, como o inglês Sir William Crookes (1832-1919), que não conseguiram explicar o fenômeno observado dos papéis “velados” que eram obtidos por estarem próximos ao tubo de raios catódicos.

Em 1876, o aluno de Röntgen, o físico alemão Julius Plücker (1801-1868), observou uma sombra projetada no lado oposto ao cátodo (no vidro) por um objeto colocado dentro do tubo, chegando à conclusão de que os esses raios eram emitidos em linha reta pelo cátodo e que tinham sua passagem interrompida naquela área representada pelo objeto.

O físico alemão Eugen Goldstein (1850-1931), em 1880, publicou um artigo no qual citava a presença de fluorescência na tela, mesmo com a ausência de gás rarefeito, e descreveu os raios gerados através desses gases, como raios catódicos (*Kathodenstrahlen*). Os físicos ficaram abismados com a descoberta, porém não souberam explicar de maneira coerente tal fenômeno observado (SANTOS, 2002).

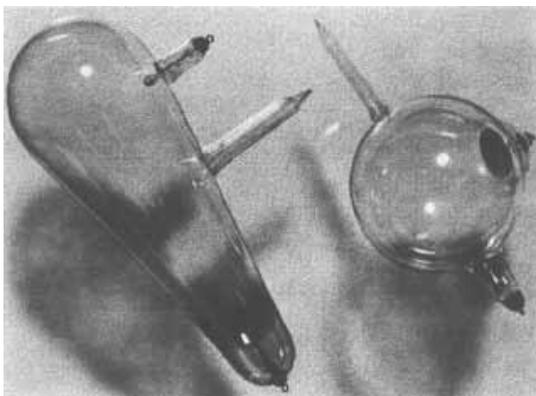
Willem Röntgen (Figura 63), físico alemão, descobriu os raios X em 1895, aos 50 anos de idade, e pôs fim ao mistério que sondava a “velação” nos papéis que ficavam próximos aos raios catódicos e a fluorescência que se apresentava somente ao fundo do tubo de vidro (lado oposto ao cátodo) quando o gás era retirado, fazendo com que a pressão baixasse a valores muito pequenos, próximos ao vácuo. Na Figura 64, observa-se que o cátodo (em forma de disco) e o ânodo estão em ângulo reto. Nesses tubos, o feixe de raios catódicos atinge o vidro, e não o ânodo.

Figura 63: Wilhelm Conrad Röntgen, fotografia tirada em 1896.



Fonte: Martins (1998).

Figura 64: Dois tubos de descarga utilizados por Röntgen.

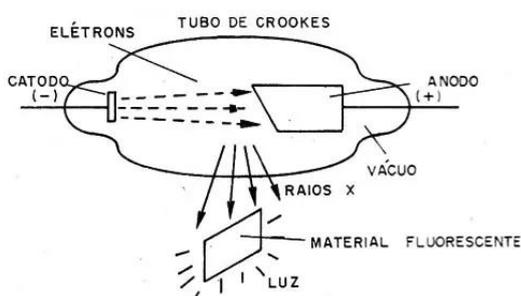


Fonte: Martins (1998).

Como não havia um nome estabelecido a esses raios catódicos obtidos por radiação, Röntgen atribui o nome de *Raios X*.

A produção, como mostrado na Figura 65, acontece da seguinte forma: Os raios catódicos são produzidos a partir de uma diferença de potencial elétrico (ΔV) estabelecido entre os polos do tubo positivo (catodo) e o do negativo (ânodo). Esses elétrons são emitidos do catodo e fortemente atraídos pelo ânodo, ao atingirem o ânodo eles perdem energia cinética no frenamento e passam a gerar aceleração nos elétrons do ânodo gerando os Raios X, de natureza fotônica (MARTINS, 1998).

Figura 65: Tubo de Crookes, no qual fora obtido os primeiros Raios X.



Fonte: Braga (2014).

Coeficientes de atenuação

Quando raios X atingem uma região do corpo a ser radiografada, eles interagem diferentemente ao atingir regiões com diferentes números atômicos e densidades, implicando em peculiares impressões no filme fotográfico ou nas imagens reproduzidas na tela do computador que comanda o aparelho de raios X. Essas interações fazem com que a absorção ocorra com intensidades distintas pela região atingida. A Tabela 8 apresenta os valores comparativos dos coeficientes de atenuação e densidade entre os diferentes tecidos.

Tabela 8: Coeficiente de atenuação para 60 KeV e densidade de alguns materiais importantes para raios-x na medicina imagiológica.

Absorção do material	Coeficiente de atenuação para 60 KeV, μ (cm^{-1})	Densidade ρ (g/cm^3)
Gordura.	0,1788	0,91
Tecido mole que não seja gordura (músculos, fluidos corporais).	0,2045	1,00
Água.	0,2055	1,00
Cérebro.	0,2061	1,00
Ar.	$\sim 3 \cdot 10^{-4}$	0,00129
Osso.	0,466 a 0,548	1,65 a 2,00

Fonte: Amador (2009).

Na Tabela 8, pode-se observar que o tecido ósseo é o que detém o maior *coeficiente de atenuação* e a *densidade*, o que justifica na prática o fato deles absorverem radiação com mais facilidade que os tecidos moles, resultando na transmissão da radiação incidente.

Como há uma relação direta entre a capacidade de absorção da radiação e o coeficiente de atenuação e a densidade, percebe-se uma customização na dosagem de radiação (medida em, *mAs*, como sendo o produto entre a corrente elétrica medida em *mileampères (mA)* e o tempo de exposição à radiação medido em segundos (*s*)), ou seja, a mesma deverá ser aplicada em doses diferentes a depender do *coeficiente de atenuação*, *densidade do tecido* e *espessura do tecido* (AMADOR, 2009).

Escala de Hounsfield (HU) na Tomografia Computadorizada (TC)

Os coeficientes de atenuação são apresentados através de uma escala numérica de valores que indicam a capacidade de um tecido absorver os raios X incidentes na região. Essa escala de valores é associada a *tons de cinza* e que recebe o nome de Escala de Hounsfield. O cálculo matemático toma por base substâncias avaliadas. À água se atribui valor zero HU na escala de Hounsfield. É importante frisar que essas tonalidades de cinza apresentam uma margem de variância a depender da energia empregada pelos raios X (AMADOR, 2009).

A Tabela 8 que relaciona os tecidos, as unidades de HU e o tom de cinza associado escala e seus valores em HU e tonalidades correspondentes, e a Figura 66 – Escala de Radiodensidade também conhecida como escala de Hounsfield, os tons de cinza são apresentados mais bem distribuídos e especificados, quando comparados à Tabela 8.

Figura 66: Escala de Radiodensidade também conhecida como de Hounsfield.



Fonte: Santos; Nacif (2009).

Para um maior entendimento acesse as mídias audiovisuais presentes nos links abaixo. Lembrando que para dar acesso ao link, você deve clicar em **Ctrl + clique do lado esquerdo do mouse**. Com esse material e com ajuda dos textos complementares, você terá um material de apoio para que possa refletir acerca dos raios X.

Materiais complementares (audiovisuais):

Raios catódicos: [Animação de Raios Catódicos](#);

Raios X: [Produção de Raios X](#); [CT Scan](#).

Obs: Caso possua dificuldades com a língua inglesa, ative a legenda em português (clique em Configurações → Legendas/CC → Traduzir automaticamente → **Português**), se preferir.

ENCONTRO 4

Também, com duração máxima de 2 horas-aula (100 min). Primeiro, propiciar momento para debate sobre o Texto 3: Radioterapia e Hadronterapia, em que as dúvidas possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer tais dúvidas sob a mediação e intervenção do professor. Em segundo, aplicação do Questionário 3: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 04 (APÊNDICE E). Terceiro, disponibilizar o Texto 4: PET/Scan e radiofármacos, no Google Classroom, referente ao Encontro 5.

TEXTO 3

Radioterapia e Hadronterapia³⁵

Tratamento Radioterápico

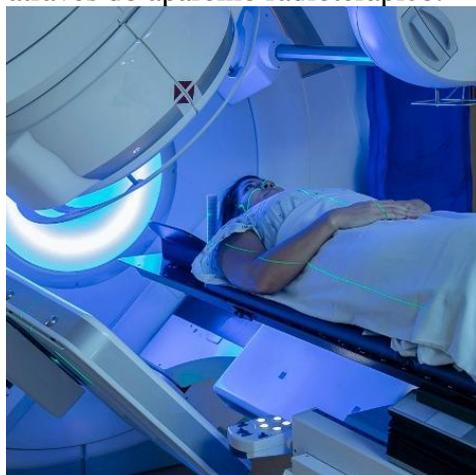
Após a Segunda Guerra Mundial, ocasião em que foram lançadas as primeiras bombas atômicas numa guerra e que se constatou seus efeitos nocivos ao homem, os cientistas se preocuparam com os efeitos provenientes da radiação, a começar pela radiação X que se baseava em três processos principais: absorção (produzida pelo efeito fotoelétrico), espalhamento (produzido pelo efeito Compton) e produção por pares, proveniente da geração do par elétron-pósitron (HUSSEIN; REBELLO, 2005).

A radioterapia é um processo que utiliza radiações basicamente compostas por feixes de elétrons acelerados através de uma estrutura conhecida como acelerador linear de partículas; incidindo doses controladas de radiações sobre os tecidos-alvo cancerígenos a fim de eliminá-los e, desta forma, cessar o crescimento da massa tumoral ou processo de metástase, tumores do tipo benigno e maligno, respectivamente. A radiação incidente pode ionizar a água presente na célula, induzindo a produção de radicais livres e também causar danos às fitas de Ácido desoxirribonucleico – DNA (TELES, 2006).

Esta estrutura foi desenvolvida duas décadas depois da Segunda Guerra Mundial, iniciando seu desenvolvimento com o gerador de Van der Graff (gerador de corrente elétrica estática). Na Figura 67, apresenta-se um aparelho radioterápico.

³⁵ O referido texto é uma produção deste pesquisador (FEITOSA, 2021).

Figura 67: Paciente recebendo radiação através do aparelho radioterápico.



Fonte: Radioterapia (2020).

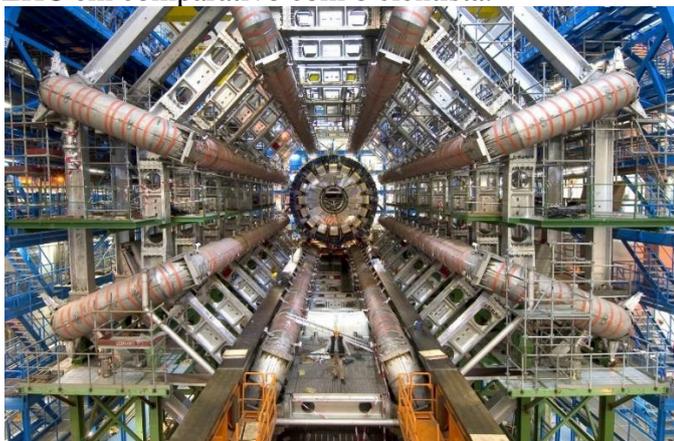
Neste aparelho, o paciente fica deitado estaticamente na posição decúbito dorsal (pessoa que deita com a barriga voltada para cima) aparelho gira ao redor do paciente e emite doses de radiações que atingem a região-alvo nas mais variadas posições, objetivando-se uma radiação mais efetiva para que as células cancerígenas venham a sofrer disfunções genéticas e a partir, de então, morram. Abaixo será introduzido a Hadronterapia que se apresenta como um “novo” tratamento no combate ao câncer.

Partículas subatômicas: hádrons

Por séculos acreditou-se que o átomo era indivisível, até que ocorreram pesquisas físicas que nos descobriram a existências de partes componentes dos átomos, como o elétron, próton, nêutron, antipartículas (HUSSEIN; REBELLO, 2005).

Com o avanço das pesquisas, passou-se a investigar outras estruturas subatômicas presentes dentro do próton; para isso desenvolveram-se técnicas de colisões de partículas subatômicas através de colisores de partículas, sendo que o maior e mais famoso deles é o *Large Hadron Collider* (LHC), construído no subsolo da fronteira entre a França e a Suíça. Possui 27 km de extensão em forma circular e está a 100 m abaixo do solo. Na Figura 68, apresenta-se uma fotografia desse grande colisor de partículas.

Figura 68: Dimensão de tamanho de uma das alas do LHC em comparativo com o cientista.



Fonte: Giannini (2022).

Com todas as características acima, ele é o maior do mundo em pesquisas científicas. Grande parte das pessoas alheias ao assunto, imagina que esse colisor se destina exclusivamente a encontrar partículas subatômicas presentes à época da criação de nosso Universo, todavia, essas pesquisas enfocam bastante em aplicações para soluções em problemas da sociedade, como: agricultura, tecnologia e saúde. Neste texto, dar-se atenção especial à saúde.

Após a descoberta dos hádrons, do grego, que significa “*forte*”, “*pesado*”, o físico Robert R. Wilson propôs o uso de partículas nucleares carregadas (hádrons carregados) nos tratamentos de radioterapia, por serem partículas mais pesadas que os feixes de elétrons e com isso poderem também combater tumores (HUSSEIN; REBELLO, 2005).

Tempos depois, os primeiros testes começaram em Uppsala, Suécia. Após essa primeira fase, mais de 3 mil pacientes foram submetidos a testes no Laboratório Cíclotron de Harvard, com a colaboração do Hospital Geral de Massachusetts (PIVETTA, 2014).

Em 1954, deram se início às primeiras aplicações clínicas dessa técnica, ocorrendo simultaneamente nos EUA, Suécia e antiga União Soviética, representando um marco na tecnologia radioterapêutica.

Tratamento Hadronterápico

Hadronterápico é um tipo de tratamento radioterápico em que se utilizam partículas pesadas: prótons, íons de carbono e nêutrons. Estes elementos apresentam uma característica diferenciada em relação aos feixes de elétrons (radioterapia convencional), ao irradiar na região a ser tratada; atingem menos os tecidos que estão ao redor e, portanto,

preservam mais os tecidos saudáveis (HUSSEIN; REBELLO, 2005). Isso ocorre devido a uma característica peculiar de deposição dessas partículas, chamada de “Pico de Bragg”.

No Gráfico 2, pode-se observar as diferenças entre as energias depositadas nos tecidos, desde a entrada até regiões um pouco mais profundas, pelo feixe de elétrons – produzido a partir do Cobalto-60 e pelos prótons – Hadronterapia (HUSSEIN; REBELLO, 2005).

Observa-se que o feixe de elétrons penetra no tecido com uma energia alta e vai se dissipando à medida que se aprofunda na região; ao passo que os feixes de prótons entram no tecido com uma energia relativamente baixa e vão aumentando gradualmente à medida em que se aprofunda, até culminar com o pico máximo de deposição de energia na região tumoral.

Aceleradores utilizados na Hadronterapia

Para produção de feixes de partículas utilizados na radioterapia, são utilizados os aceleradores. Os feixes de elétrons utilizam um tipo de acelerador chamado de *linear*; os de prótons e íons de carbono utilizam os aceleradores circulares chamados de *acelerador cíclotron*.

Este aparelho tem por objetivo acelerar prótons e íons de carbono a velocidades próximas a 2/3 da velocidade da luz (225.000 Km/s), e, com isso, modular a intensidade, utilizando técnica semelhante às do IMRT, a energia para irradiação na região desejada (PIVETTA, 2014).

Segundo a explicação de Márcio Fagundes, diretor do Instituto de Câncer de Miami do Hospital Batista de Saúde do Sul da Flórida, a grande dificuldade do emprego da Hadronterapia é devido à necessidade de uma área grande para instalações físicas e o custo elevado de instalação e operação, de cerca de R\$ 80 mil e variando até R\$ 400 mil (cotação leva em conta a cotação atual) no tratamento pediátrico (GÓMEZ, 2019).

O centro de Hadronterapia mais avançado da Europa se localiza na Universidade de Heidelberg – Alemanha. Nele são tratados pacientes com feixes de prótons em sua maioria, cerca de 90% dos tratados, pois é uma terapia mais eficiente que a dos raios X e de duas a três vezes menos energéticas que as de íons de carbono que são empregados em casos mais complicados (PIVETTA, 2014).

Assim, inaugurado em 2009, este centro custou € 120 milhões; é composto de um prédio de três andares com 5 mil metros quadrados. Uma estrutura de aço gigantesca, que

pesa 670 toneladas e tem 25 metros de comprimento e 13 de diâmetro, conecta-se ao seu síncrotron, ocupando uma área de 3 andares, utilizada na organização do aparato para o envio dos feixes com precisão milimétrica para a sala ao lado. Nas Figuras 69 e 70 são apresentadas um pouco do aparato necessário para instalação de um centro médico de Hadronterapia.

Figura 69: Acelerador Cíclotron-Estrutura de 670 toneladas que direciona os feixes de partículas: precisão milimétrica contra tumores.



Fonte: Pivetta (2014).

Figura 70: Sala de Hadronterapia em Heidelberg – Hospital Universitário de Heidelberg.



Fonte: Pivetta (2014).

São estes e outros pontos que dificultam a instalação de centros no Brasil. Há poucos em operação no mundo. Eis a Tabela 9 com os centros de pesquisa que dispõem da estrutura para esse tipo de tratamento, com base em uma relação ao ano de 2005.

Tabela 9: Centros especializados em Hadronterapia até o ano 2005.

Centros especializados em hadronterapia		
NTPC, Harvard	Massachusetts (EUA)	Próton
Loma Linda	Califórnia (EUA)	Próton
MPRI	Indiana (EUA)	Próton
UCSF - CNL	Califórnia (EUA)	Próton
Moscou	Rússia	Próton
São Petersburgo	Rússia	Próton
Dubna	Rússia	Próton
PMRC, Tsukuba	Japão	Próton
HIMAC, Chiba	Japão	Próton, íon pesado
NCC, Kashiwa	Japão	Próton
Hyogo	Japão	Próton, íon pesado
Wakasa Bay	Japão	Próton
PSI (72 - 200MeV)	Suíça	Próton
Uppsala	Suécia	Próton
Clatterbridge	Inglaterra	Próton
Louvain-la-Neuve	Bélgica	Próton
Nice	França	Próton
Orsay	França	Próton
N.A.C., Faure	África do Sul	Próton
TRIUMF	Canadá	Próton
GSI Darmstadt	Alemanha	Íon pesado
HMI Berlim	Alemanha	Próton
Munique	Alemanha	Próton
Erlangen	Alemanha	Próton
Heidelberg	Alemanha	Próton
INFN-LNS, Catani	Itália	Próton
CNAO, Milan & Pavia	Itália	Próton
Central Italy	Itália	Próton
TOP Project ISS Roma	Itália	Próton
CGMH	Coreia do Norte	Próton
Bratislava	Eslováquia	Próton, íon pesado
Austron	Áustria	Próton, íon pesado

Fonte: Hussein (2015).

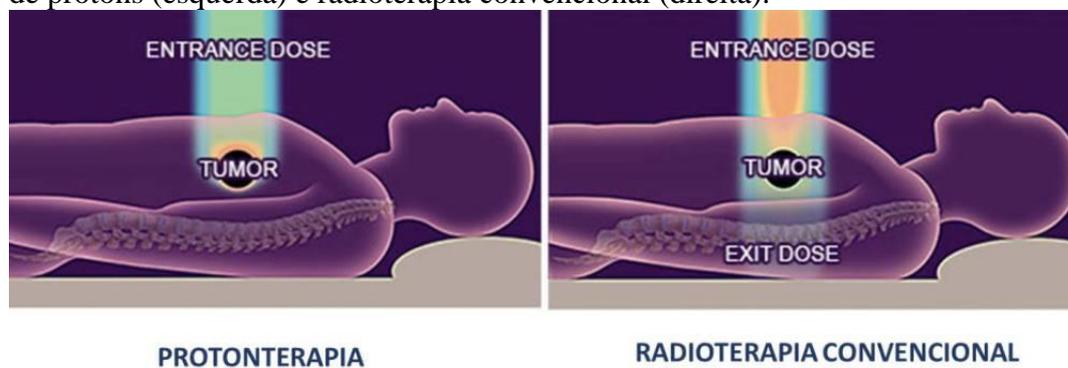
Segundo Márcio Fagundes, hoje esses números já somam 30 em centros dos EUA e outros 20 na Alemanha e Holanda. Segundo dados mais recentes apontados por Lühr *et al* (2018) confirmam que nos últimos 10 a 15 anos os centros de protonterapia chegam a cerca de 70 centro de tratamento espalhados pelo Globo e que já se atingiu um total de 150 mil pacientes tratados.

É importante frisar que um dos motivos pelos quais esses centros ainda não chegaram no Brasil, refere-se à eficácia da radioterapia convencional para alguns tipos de câncer.

Na próxima subseção, será feito um comparativo entre as duas modalidades de terapia para combate ao câncer. Para isso, serão apresentadas fotografias e ilustrações comparativas entre aplicações de técnicas de radioterapia convencional e a hadronterapia.

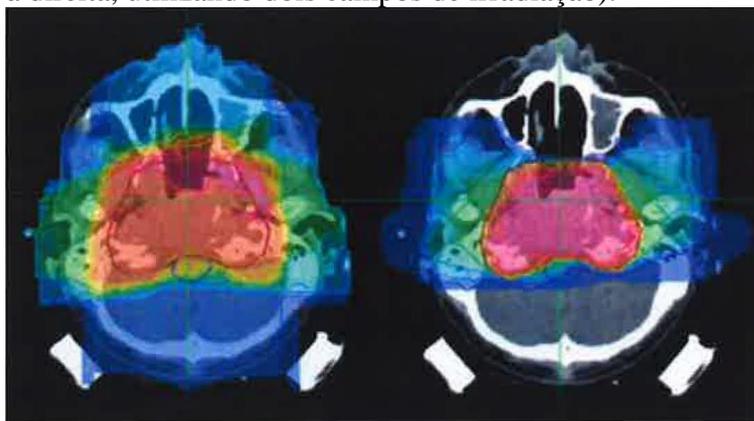
Comparativos entre a Hadronterapia e a Radioterapia convencional

Figura 71: Ilustração da dose recebida por um paciente em tratamento com terapia de prótons (esquerda) e radioterapia convencional (direita).



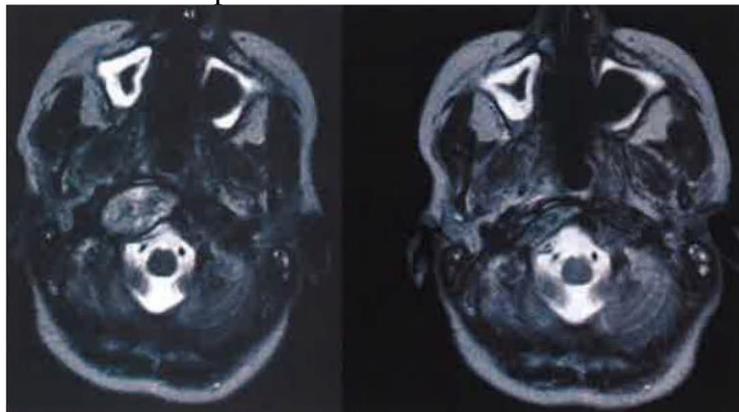
Fonte: Disponível em: <https://www.floridaproton.org/newsletter/2020/january/research-shows-benefits-protons>

Figura 72: Tratamento de tumor craniano com fótons (imagem à esquerda, utilizando IMRT) e com íons de carbono (imagem à direita, utilizando dois campos de irradiação).



Fonte: Teles (2006).

Figura 73: Retrocesso patológico em um paciente com tumor craniano tratado por íons de carbono.



Fonte: Teles (2006).

Figura 74: Comparação entre o Tratamento do câncer de próstata com feixe de fótons de raio-X e prótons.



Fonte: Teles (2006).

As fotografias mostram as comparações entre a radioterapia convencional e hadronterapia; nelas observamos a radiação na região de acesso ao tumor e à energia depositada nele. A extrema diferença de perda de energia na entrada, para a convencional, e o pico de Bragg na região estimada, utilizando-se a protonterapia (VIEIRA, 2014). Reveja o Quadro 1 a fim de verificar as particularidades e comparações existentes entre a radioterapia convencional e a hadronterapia.

Novas pesquisas na Radioterapia

As novas pesquisas a nível mundial se concentram em descobrir: a origem real da mutação genética; como as células se comportam, quando estão predispostas a desenvolver a doença e com isso já combater antecipadamente a mesma; desenvolver um medicamento universal que consiga curar todos as variações da doença.

Esses e outros objetivos relacionados a esses estudos terão potencial de sucesso com os estudos de física de partículas que é feita no LHC e em outros aceleradores de partículas espalhados no mundo, a exemplo do Brasil, com o Sirius, que se localiza na UNICAMP, Campinas-SP e que objetiva a realizar estudos em áreas de ciência base e aplicada, entendendo a matéria a nível mais microscópico possível, para auxílio ao desenvolvimento de medicamentos (HUSSEIN; REBELLO, 2005).

Material complementar

- (audiovisuais):

[Simulação da Hadronterapia \(protonterapia\)](#)

ENCONTRO 5

O Encontro 5, com duração máxima deverá ser de 2 horas-aula (100 min), deverá ter início com o debate do Texto 4: PET/Scan e radiofármacos, apresentado abaixo, em que as dúvidas dos alunos possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer tais dúvidas sob a mediação e intervenção do professor. Em seguida, desenvolver a oficina/simulação computacional com utilização do Arduíno Uno. E, por último, aplicar o Questionário 4 (APÊNDICE F): identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 05.

A título de esclarecimentos, é oportuno explicar que, de acordo com Horst e Cordenonsi (2021), o Arduino surgiu na Itália em 2005 e se trata de uma placa eletrônica que tem um microcontrolador anexo à sua estrutura que dispõe de facilidade na programação, podendo ser utilizado códigos simples e abertos. Possuindo a capacidade de se conectar a sensores, LED, dentre outros, com a capacidade de conexão entre o digital e o analógico. Diante de tal facilidade de uso e manuseio, é bastante utilizada em projetos de robótica e automação.

Quanto à oficina, empregar o protótipo do aparelho PET/Scan *simulation*. Para isso, inicialmente, deve-se demonstrar o funcionamento real do aparelho, lembrando que, no Texto 4, há maiores informações sobre o referido aparelho. Em seguida, os alunos, na prática, deverão simular o funcionamento do mesmo através do protótipo do aparelho PET/Scan *simulation*, a exemplo da Figura 75. Assim, instruir os alunos a anotarem os pares de LED que se acendem, simultaneamente ou de maneira isolada. Por fim, deverão realizar os registros desses dados na folha de atividades (APÊNDICE G) para que, assim, possam ligar os pontos anotados na folha, quando se acenderem os LED. Para isso, houve a necessidade de se criar os algoritmos (códigos) que determinam o funcionamento do próprio protótipo, conforme o Apêndice I.

Figura 75: Simulação, pelos alunos, do funcionamento do aparelho PET/Scan através do protótipo.



Fonte: arquivos do pesquisador (FEITOSA, 2022).

Diante disso, espera-se que os alunos localizem o tumor cerebral a partir da intersecção das retas. Desse modo, pode-se fortalecer o aprendizado significativo da aniquilação por pares intermediado por tal aparelho.

Manual de confecção do protótipo do aparelho PET/Scan *simulation*

Uma das partes fundamentais para a consecução desta Sequência Didática é a construção do protótipo, para tanto, se fazem necessárias instruções de como desenvolvê-lo para complementar a aplicação do Produto Educacional. Nos próximos parágrafos serão elencados os materiais e etapas para sua confecção.

Iniciaremos com os materiais necessários:

1. Uma bacia plástica de cerca de 10 centímetros de diâmetro – adquirida em lojas de importados, supermercados, etc;
2. Uma placa de Arduíno (Arduíno) – adquirida em lojas de eletrônicos no segmento informática;
3. Uma impressão da representação do cérebro humano com as devidas marcações do 1 ao 12 – retirado do artigo científico (referencial para a construção deste protótipo);
4. Um computador do tipo desktop ou notebook para o processamento de dados do protótipo – adquirido nas mais variadas lojas;
5. Doze resistores com 1000Ω com tolerância de 3% – adquirido em lojas de eletrônicos;
6. Doze LED da mesma cor ou um com uma cor diferente para facilitar a demarcação da posição numérica após a fixação – adquirido em lojas de eletrônicos;
7. Uma cola de papel – adquirida em papelarias;
8. Um ferro de solda (40 W) e fio de estanho – adquirido em lojas de eletrônicos;
9. Pedaco de fio de cobre fino de aproximadamente 15 centímetros – adquirido em lojas de eletrônicos;
10. Cabo De Rede (cftv) de aproximadamente 10 centímetros – adquirido em lojas de eletrônicos;

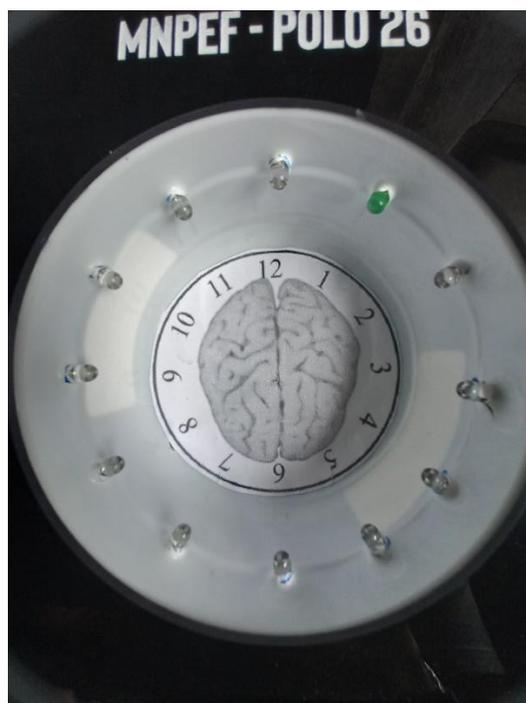
Após a previsão de materiais a serem utilizados para a construção do protótipo, elenca-se o os passos necessários para a realização da tarefa. Lembrando que os procedimentos a seguir foram desenvolvidos por esse pesquisador, pois na referência do artigo (literatura) apresenta apenas a ideia do projeto e não seus procedimentos para implementação.

1º Passo

Deve-se colar a representação do cérebro impressa no fundo da bacia plástica.

2º Passo Realiza-se 12 furos com o ferro de solda aquecido nas posições correspondentes onde se encaixaram os LED de 1 a 12, tendo atenção para que os furos fiquem nas dimensões suficientes para o encaixe dos LED.

Figura 76: Imagem do protótipo visto de cima.

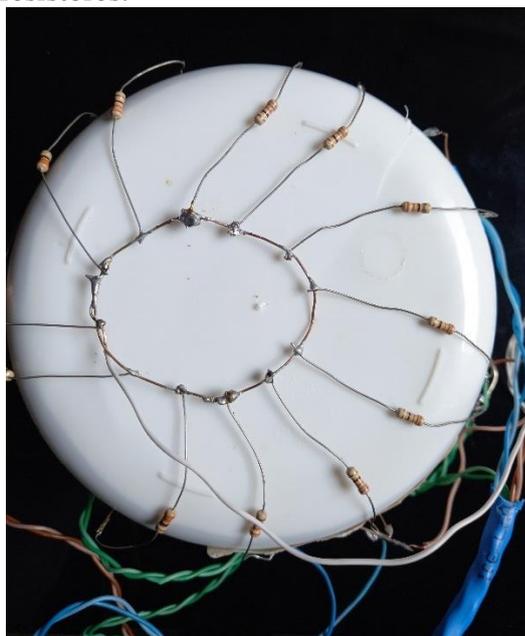


Fonte: arquivos do pesquisador (FEITOSA, 2022).

3º Passo

Com o ferro de solda e o fio de estanho, solda-se as duas extremidades do fio de cobre, formando um círculo. Sequencialmente solda-se uma das extremidades do resistor no em um ponto periférico do círculo de cobre e a outra em um dos fios do cabo de rede. Somando-se a isto, solda-se um fio independente (retirado do cabo de rede) no círculo de cobre.

Figura 77: Imagem do circuito elétrico com resistores.

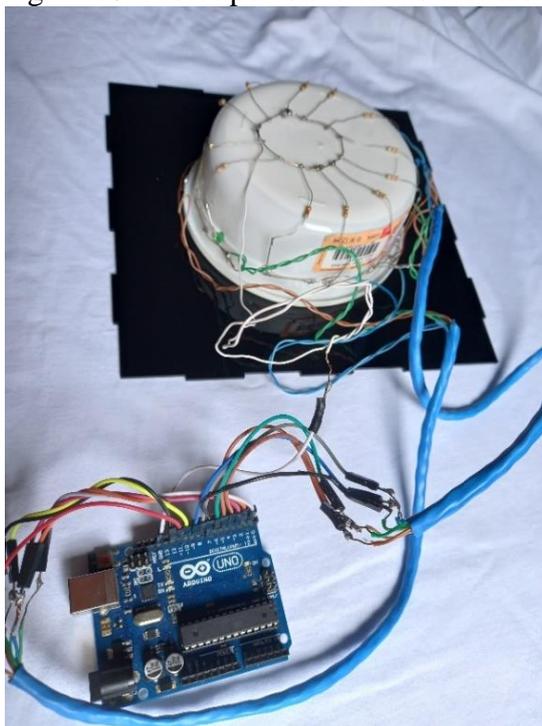


Fonte: arquivos do pesquisador (FEITOSA, 2022).

4º Passo

Neste momento deve-se soldar a outra extremidade solta do resistor no LED, de modo a comandá-lo, de acordo com o algoritmo. Posteriormente, as extremidades dos fios do cabo de rede (soldadas previamente) devem ser conectadas às entradas digitais de 1 ao 12 e o fio independente à entrada GND (ou Terra).

Figura 78: Protótipo com circuito elétrico completo.



Fonte: arquivos do pesquisador (FEITOSA, 2022).

5º Passo

Salienta-se a necessidade de que o aplicativo uno arduino esteja instalado no aparelho de desktop ou notebook, podendo ser baixado do sítio: <https://www.arduino.cc/en/software>. E que o algoritmo seja copiado no aplicativo. Pronto! A partir desse momento é só executar o aplicativo e dar continuidade à aplicação da Sequência Didática. Para mais informações, pesquise no material referencial (STRUNK, 2018).

TEXTO 4

PET/Scan e radiofármacos³⁶

Aceleradores de partículas

Consiste num aparelho destinado a produção e aceleração de feixes de partículas carregadas como elétrons, prótons, íons de carbono, pósitrons, antiprótons, nêutrons, entre outros. Eles são acelerados sob a ação de campos eletromagnéticos podendo chegar a velocidades próximas às da luz ($3 \cdot 10^8$ m/s), o que os tornam mais energéticos para

³⁶ O referido texto é uma produção deste pesquisador (FEITOSA, 2021).

determinadas necessidades específicas como irradiar tecidos e regiões cancerígenas (AMADOR, 2009).

Na medicina nuclear são utilizados dois tipos de aceleradores: linear e o cíclotron. Acelerador linear é um aparelho que produz radiação ionizante através de energia elétrica. Ele produz raios X de alta energia (utilizado no tratamento de regiões mais profundas devido seu alto poder de penetração nos tecidos) e feixes de elétrons acelerados (utilizados em regiões mais superficiais). É importante frisar que os aparelhos de raios X convencionais trabalham na ordem de dezenas de KeV e para energias mais altas utilizam-se os aceleradores lineares. A Figura 79, abaixo, apresenta um acelerador linear.

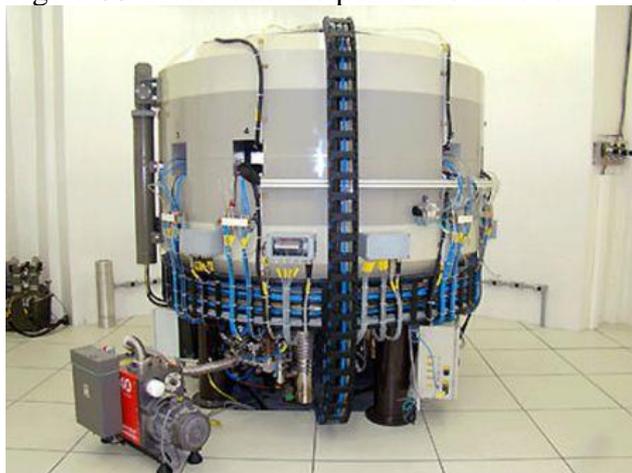
Figura 79: Acelerador linear de partículas.



Fonte: Paraíba (2016).

Acelerador cíclotron é um aparelho que tem estruturas internas semicirculares destinadas a aceleração de íons impulsionados por campos elétricos em frequência definida e orientados por campos magnéticos, a fim de colidirem com alvos sólidos, líquidos ou gasosos a altas energias na ordem de MeV, mediante o tipo de radioisótopo que se deseja produzir. Radioisótopos formados por fótons e partículas. Abaixo apresenta-se a Figura 80 de um acelerador cíclotron.

Figura 80: Acelerador de partículas cíclotron.



Fonte: Ipen (s.d).

A produção dos radionuclídeos é essencial para a produção de outro componente radioterápico a ser discutido na sessão seguinte.

Radiofármacos

São compostos radioativos formados por radionuclídeos (isótopos radioativos responsáveis pela emissão de radiação) e ligados quimicamente a molécula de algum elemento químico não-radioativo que desempenha alguma função específica num tecido, estrutura ou órgão a ser investigado ou tratado (AMADOR, 2009).

Esses radiofármacos atendem a necessidades específicas de diagnóstico e tratamentos médicos, pois permitem visualizar a morfologia de regiões específicas do corpo humano como pulmões, coração, sistema vascular, cérebro, entre outros. É também largamente utilizado no tratamento de doenças como Alzheimer, Câncer, Acidente Vascular Cerebral – AVC, dentre outras patologias.

Figura 81: Representação de um radiofármaco se ligando ao alvo (célula) a fim de gerar cintilância e imagens radiográficas.



Fonte: Penafiel (2020).

São produzidas em laboratórios equipados e sujeitos aos mais rigorosos controles de qualidade e segurança, por se tratar de elementos altamente radioativos. As fotografias abaixo retratam um pouco do ambiente no qual esses radiofármacos são produzidos.

Figura 82: Laboratório de produção de radiofármacos (à esquerda) e radiofármaco pronto para transporte e preparação no momento do uso (à direita).



Fonte: Brasil (2021).

Abaixo, apresenta-se uma Quadro que dispõe alguns dos principais radiofármacos utilizados no Brasil e algumas de suas peculiaridades.

Quadro 1: Principais Radiofármacos e suas características utilizados em centros de medicina nuclear.

Radiofármacos	Aplicações	Tempo aproximado para realização

		do exame
^{99m}Tc -Pertecnetato de sódio	Carcinoma da tiróide e metástases e hipertiroidismo	6 horas
^{99m}Tc -ECD (Neurolite)	Sequelas de trombose	6 horas
^{99m}Tc -Sestamibe (Cardiolite)	Avaliação e localização da isquemia e necrose tecidual no enfarte do miocárdio	6 horas
^{67}Ga -citrato de gálio	Tumores primários como doença de Hodgkin, linfomas, tumor dos pulmões e melanoma. Localização de doença inflamatória aguda e infecções	78 h
^{99m}Tc -enxofre coloidal (TechneColl)	Avaliação da função hepatobiliar	6 horas
^{99m}Tc -leucócitos	Localização de infecção e inflamação	6 horas

Fonte: Oliveira *et. al* (2020).

Para um melhor entendimento dos radiofármacos, recomendo assistir aos recursos audiovisuais recomendados no “material complementar” no final deste material.

Nesta próxima sessão será apresentado o aparelho no qual o radiofármaco é utilizado e um pouco de seus princípios físicos envolvidos no seu funcionamento.

Aparelho PET Scan

Até pouco tempo era uma tarefa bem difícil para a medicina visualizar as estruturas cerebrais e com isso realizar diagnósticos e tratar patologias presentes nessa região. Com o advento dos estudos da física de partículas, em específico os hádrons, tornou-se

possível a realização de visualizações através dos aparelhos SPECT-CT (Tomografia por emissão de fóton único) e PET-Scan (Tomografia por emissão de pósitrons), ambos associados a aparelhos de tomografia computadorizada.

Esses aparelhos são capazes de diagnosticar doenças como Alzheimer, esquizofrenia e numerosas outras doenças mentais. Além de serem extremamente úteis no mapeamento de regiões específicas do cérebro que se relacionam a fala, visão, paladar, dentre outras, e com isso minimizar os riscos pré-existentes numa cirurgia.

Nos atentaremos a falar exclusivamente do PET-Scan que, além de diagnósticos às patologias cerebrais citadas, é extremamente utilizado em outras estruturas ou órgãos como, a parte óssea, auxiliando no diagnóstico de doenças ósseas; disfunções de funcionamento do coração, rins, fígado, pulmões, dentre outros. É bastante utilizado no diagnóstico e tratamento do Câncer.

Para que as imagens internas do corpo possam ser visualizadas, é necessário que se “jogue luz”. Desta forma, são utilizados os radiofármacos, que auxiliam na formação da imagem. Lembrando que cada radiofármaco se destina a imagear uma região diferente do corpo e isso tem relação direta com o fármaco associado ao radionucleotídeo.

O radionucleotídeo Tecnécio 99m é um dos mais utilizados para imageamento no aparelho PET Scan, tendo em vista que o mesmo pode ser combinado com uma dezena de fármacos chamados de “kits liofilizados”. Abaixo apresenta-se uma Figura 83 do aparelho PET Scan utilizado nos procedimentos radiológicos por imagem (AMADOR, 2009).

Figura 83: Aparelho PET Scan utilizado em procedimentos radiológicos por imagem.

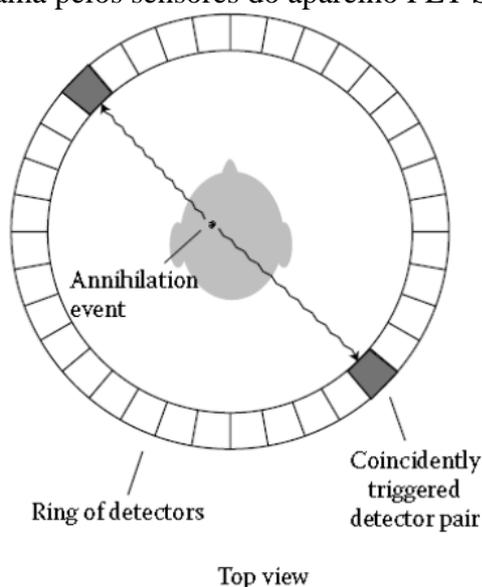


Fonte: Experts (2016).

O princípio físico de funcionamento do PET Scan se baseia na geração do par elétron-pósitron pelo radiofármaco administrado ao paciente, momentos antes da realização

do exame. Após o radiofármaco emitir a radiação gama (produto da aniquilação do par elétron-pósitron), esta é detectada por sensores posicionados diametralmente, conforme mostra a ilustração abaixo (AMADOR, 2009).

Figura 84: Esquema de detecção de radiação gama pelos sensores do aparelho PET Scan.



Fonte: Amador (2009).

É importante frisar a importância da Física de partículas para o funcionamento desse aparelho. Sem o domínio da mesma, estaríamos fadados a diagnósticos imprecisos e tratamentos rudimentares no combate às doenças investigadas pelo aparelho.

Esse desenvolvimento da Física Médica aplicada à radioterapia só reforça o quanto importante é a inserção de tal conteúdo tão importante ao ensino médio, pois pode despertar o interesse em alunos que possam ser futuros profissionais da área e com seu trabalho contribuir para a continuação do desenvolvimento da sociedade em aspectos sociais e tecnológicos (AMADOR, 2009).

Material complementar
(audiovisuais):

[Explicando o radiofármaco - IPEN](#)

Boas reflexões!

REFERÊNCIAS

AMADOR, S. K. Introduction to Physics in Modern Medicine. 2^a. ed. Haverford College Pennsylvania, USA: CRC Press, 2009.

AUSUBEL, D.P., NOVAK, J.D. e HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. Tradução para o português, de Eva Nick *et al*, da segunda edição de Educational psychology: a cognitive view. Rio de Janeiro: Inter-americana, 1980.

BETZ, M. **Efeito Compton**: Espalhamento de raios X. [S. l.], s.d. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~betz/iqXXA/efCompt/aEfComptonFrame.htm>. Acesso em: 1 nov. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. INCA. **ABC do câncer**: abordagens básicas para o controle do câncer. 4. ed. Rio de Janeiro – RJ: Inca, 2018. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files/media/document/livro-abc-4-edicao.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2022.

BRAUN, Thomas. Espectrômetro plots, 2014. Disponível em: <https://cta.if.ufrgs.br/projects/espectrometro-plots/wiki/Wiki?version=19>. Acesso em: 16 mai. 2022.

CARDOSO, E. **Aplicações de Energia Nuclear**. Apostilas Educativas. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) - 3. ed.- Rio de Janeiro: CNEN, 2012. Disponível em: <http://antigo.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/apostila-educativa-aplicacoes.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2022.

DEGIOVANNI, Alberto; AMALDI, Ugo. History of hadron therapy accelerators. **Physica Medica**. v.31, 2015, p. 322-332, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1120179715000629>. Acesso em: 17 ago. 2021.

EXPERTS, Onco. **A UTILIZAÇÃO DO PET/CT NO TRATAMENTO DO CÂNCER**. São Paulo, 2 fev. 2016. Disponível em: <https://www.oncofisio.com.br/noticia/a-utilizacao-do-pet-ct-no-tratamento-do-cancer>. Acesso em: 8 dez. 2021.

FRANCISCO, F. C, *et al*. Radiologia: 110 anos de história. **Rev. Imagem**, 24:281-286, 2005. Disponível em: <http://www.imaginologia.com.br/dow/upload%20historia/Radiologia-110-anos-de-Historia.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2022.

GOMES, Bruno. **Desinteresse do Legislativo pode prejudicar milhões de pacientes dependentes da medicina nuclear**, 2021. Disponível em: <https://abdan.org.br/2021/12/15/desinteresse-do-legislativo-pode-prejudicar-milhoes-de-pacientes-dependentes-da-medicina-nuclear/>. Acesso em: 15 ago. 2022.

GÓMEZ, N. **5 mil brasileiros morrem por falta de radioterapia, mas cenário deve mudar**. [S. l.], 28 mar. 2019. Disponível em: <https://www.uol.com.br/vivabem/noticias/redacao/2019/03/28/5-mil-pacientes-morrem-por-falta-de-radioterapia-mas-cenario-deve-mudar.htm>. Acesso em: 1 dez. 2021.

GROUP, M. **Quais são as áreas de atuação da radiologia industrial?**. Rio de Janeiro/RJ, 8 jul. 2020. Disponível em: <https://maximgroup.com.br/quais-sao-as-areas-de-atuacao-da-radiologia-industrial/>. Acesso em: 24 ago. 2022.

GUZZO, M. O que são Neutrinos?. *In: Sociedade Brasileira de Física*. Campinas - SP: Instituto de Física Gleb Wataghin UNICAMP, 27 maio 2020. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/v1/home/images/fisicaaovivo/fisica-ao-vivo-2020-05-27.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2022.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, v. 4, 2009.

HOGAN 2, Sam. **Cathode Ray Tube - Animated Explanation**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=II09bp5BAa0>. Acesso em: 1 nov. 2021.

HORST, E. L.; CORDENONSI, A. Z. O uso das plataformas de prototipagem Arduino e Raspberry Pi na educação brasileira: uma Revisão Sistemática de Literatura. **RENOTE**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 470–480, 2021. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/index.php/renote/article/view/110287>. Acesso em: 24 out. 2022.

HUSSEIN, M. S.; REBELLO, P. Combate ao câncer ganha novas técnicas: a física nuclear e o tratamento de tumores. **Revista USP**, São Paulo, n. 66, p. 80-95, jul. 2005. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13435/15253>. Acesso em: 26 nov. 2021.

IPEN (SP). **Equipamentos multiusuários: Acelerador de Partículas Ciclotron - Cyclone 18**. [S. l.], s.d. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=839&campo=5060. Acesso em: 26 nov. 2021.

JR. JONH, W; SERWAY, R. A. **Física para Cientistas e Engenheiros: Luz, Óptica e Física Moderna**. São Paulo: Cengage, 2013, v. 4.

KANE, S. A. **Introduction to Physics in Modern Medicine**. 2. ed. Haverford College Pennsylvania, USA: CRC Press, 2009.

KNIGHT, R. **Física - uma abordagem estratégica: relatividade física quântica**. 2. ed. Porto Alegre - RS: Bookman, v. 4, 2009.

LARA FILHO, L. *et al.* Achados tomográficos de pacientes submetidos a tomografia de crânio no pronto-socorro do Hospital Universitário Cajuru. **Radiologia Brasileira**, Curitiba/PR, ed. 46, p. 143–148, 2013. Disponível em: http://www.rb.org.br/detalhe_artigo.asp?id=2412&idioma=Portugues. Acesso em: 24 ago. 2022.

LAURA FILHO L. A., *et al.* Achados tomográficos de pacientes submetidos a tomografia de crânio no pronto-socorro do Hospital Universitário Cajuru, 2013. *Revista Radiologia Brasileira*. **Colégio Brasileiro de Radiologia e Diagnóstico por Imagem**. Disponível em: http://www.rb.org.br/detalhe_artigo.asp?id=2412&idioma=Portugues. Acesso em: 12 ago. 2021.

LÜHR, A. *et al.* “Radiobiology of Proton Therapy”: Results of an international expert workshop, **Journal Radiotherapy and Oncology**, v. 128, p. 56-67, 2018.

MARTINS, R. de A. A descoberta dos raios x e o primeiro comunicado de Röntgen. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 20, n. 4, 1998.

MARTINS, R. de A. A Descoberta dos Raios X: O Primeiro Comunicado de Rontgen. **Revista Brasileira de Ensino de Física, Instituto de Física**, v. 20, n. 08, p. 373-391, dez. 1998. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v20_373.pdf. Acesso em: 30 abr. 2021.

MEDICAL MEDIA, N. **CT Scan**. [S. l.], s.d. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gaiCtdo6CLE>. Acesso em: 1 nov. 2021.

MINERAÇÃO: DIFRAÇÃO DE RAIOS X (XRD). Barueri - SP, s.d s.d. Disponível em: <https://www.sgsgroup.com.br/pt-br/mining/metallurgy-and-process-design/high-definition-mineralogy/x-ray-diffraction-xrd#:~:text=A%20difra%C3%A7%C3%A3o%20de%20raio%20X,para%20identificar%20as%20fases%20presentes>. Acesso em: 24 ago. 2022.

MOREIRA, M. A. **A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula**. Brasília: Editora UnB, 2006b.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa subversiva. **Série-Estudos - Periódico do Programa de Pós-Graduação em Educação da UCDB**, [S. l.], n. 21, 2006a. Disponível em: <https://www.serie-estudos.ucdb.br/serie-estudos/article/view/289>. Acesso em: 5 set. 2022.

MOREIRA, M. A. Negociação de Significados e aprendizagem significativa. **Ensino, Saúde e Ambiente**, v. 1, n. 2, 30 dez. 2008.

MORSCH, J. A. **RX de tórax OIT: como é feito e para que serve?**, 2016. Disponível em: <https://telemedicinamorsch.com.br/blog/rx-de-torax-oit-para-que-serve#:~:text=O%20Rx%20de%20t%C3%B3rax%20OIT,clareza%20para%20saber%20sua%20evolu%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 14 mai. 2021.

MUNHOZ, M. **Física Moderna I: Aula 06**. [S. l.], s.d. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/333662/mod_resource/content/2/Aula06.pdf. Acesso em: 24 ago. 2022.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

OLIVEIRA, R. et. al. Preparações radiofarmacêuticas e suas aplicações. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**. vol. 42, n. 2, p. 151-165, abr./jun., 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcf/a/RjFqKQxWrfCHv8Z4hqqq68m/?lang=pt>. Acesso em: 20 out. 2021.

PARÁIBA recebe primeiro acelerador linear do Plano de Expansão da Radioterapia. [S. l.], 29 nov. 2016. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/noticias/paraiba-recebe-primeiro-acelerador-linear-do-plano-de-expansao-da-radioterapia>. Acesso em: 15 dez. 2021.

PHET – **Efeito Fotoelétrico**. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric. Acesso em: 1 nov. 2021.

PHETCOLORADO. **O que é PhET? Uma breve introdução às simulações PhET.** [S. l.], s.d. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/ptBR/about>. Acesso em: 26 set. 2022.

PIVETTA, M. Prótons e íons na medida certa: Hadronterapia combate tumores de forma mais seletiva e eficaz que a radioterapia convencional. **PESQUISA FAPESP**, São Paulo/SP, n. 223, p. 24-25, set. 2014. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2014/09/024-025cancer-proton223.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2021.

PIVETTA, M. Prótons e íons na medida certa: Hadronterapia combate tumores de forma mais seletiva e eficaz que a radioterapia convencional. **PESQUISA FAPESP**, São Paulo/SP, n. 223, p. 24-25, set. 2014. Disponível em: http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2014/09/024-025_cancer-proton_223.pdf. Acesso em: 26 nov. 2021.

SANTIN FILHO, O. **Breve histórico dos cem anos da descoberta dos raios X: 1895-1955.** Revista Química Nova, 1995, 18 (6). Instituto de Física da Universidade de São Paulo – SP.

SANTOS, C. A. dos. **A Descoberta dos Raios X.** 2002. Disponível em: <https://if.ufrgs.br/tex/fis142/raiosx/rxhist.html>. Acesso em: 29 abr. 2021.

SANTOS, C. A. dos. **Física Moderna: Capítulo 3 - Efeito Fotoelétrico.** 2009. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/index.html>. Acesso em: 28 abr. 2021.

SANTOS, E. S dos; NACIF, M. S. **Manual de Técnicas em Tomografia Computadorizada.** Rio de Janeiro/RJ: Rubio, 2009.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: ótica e física moderna.** 14. ed. São Paulo, SP: Pearson Addison Wesley, v. 4, 2016.

SILVA NETO, J. da. **Formação de pares,** s.d. Disponível em: <http://lief.if.ufrgs.br/~jader/formapares.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2021.

SILVA, I.; FREIRE JUNIOR, O. A descoberta do efeito Compton: de uma abordagem semiclássica a uma abordagem quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Salvador/BA, v. 36, n. 1, p. 1601-1614, fev. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v36n1/26.pdf>. Acesso em: 18 maio 2018.

TECHNOLOGIES, S. **Production of X Rays.** [S. l.], s.d. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=T1WwHh4b__M. Acesso em: 1 nov. 2021.

TELES, P. R. **Hadronterapia: Abordagem Semiclássica da Perda de Energia, Efeitos da Fragmentação Nuclear e Taxa de Reação.** 2006. 118 p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2006.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

VIEIRA, B. A. B. **Caracterização da deposição de energia de um feixe de próton, utilizando o código de Monte Carlo FLUKA.** 2014. 20 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação - TCC (Bacharel em Física Médica)- Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu/SP, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/142911/000867022.pdf?sequence=1>. Acesso em: 26 nov. 2021.

APÊNDICE B - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE)

ASPECTOS DA FÍSICA E SUA RELAÇÃO COM OS TRATAMENTOS RADIOTERÁPICOS: UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO

José Mailson Ramos Feitosa (Pesquisador)
Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo (Orientador)

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

Você está sendo convidado a participar como voluntário de uma pesquisa. Este documento visa assegurar seus direitos como participante da pesquisa, sendo impresso em duas vias, uma para o pesquisador e outra para os participantes do MNPEF (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) do polo da Universidade Federal do Piauí, campus Teresina.

O projeto de pesquisa do Mestrado Profissional pertence ao Prof. Esp. José Mailson Ramos Feitosa (Pesquisador) e orientado pelo Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo (Orientador).

Por favor, leia com atenção e calma, aproveitando para esclarecer suas dúvidas. Se houver perguntas antes ou mesmo depois de assiná-lo, você poderá esclarecê-las com a pesquisador. Se preferir, pode levar a via impressa deste Termo para casa e consultar seus familiares ou outras pessoas antes de decidir participar.

Justificativa e objetivos:

É de salutar importância produzir um ambiente que propicie a possibilidade de o aluno perceber a estrita relação entre ciência e tecnologia e que diante disso ele possa adquirir senso crítico e consiga emitir juízos de valor.

Nesse sentido, contribuirá para mudanças de paradigmas de que a física radioativa só causa malefícios à sociedade, assim como esclarecerá e difundirá um tipo de tratamento pouquíssimo conhecido/difundido no Brasil: a Hadronterapia. Entretanto, se utilizada de maneira responsável, pode acrescer satisfatoriamente às demandas de soluções hospitalares requisitadas pela sociedade.

Os alunos que participarem dessa pesquisa poderão desenvolver um maior senso de responsabilidade social, assim como serem propagadores desse conhecimento na comunidade que estão inseridos, agindo como potenciais divulgadores científicos em nossa sociedade que tanto carece de conhecimento, sobretudo no campo científico.

O presente estudo contempla os seguintes objetivos:

- 1) Identificar os conhecimentos prévios dos participantes da pesquisa acerca da Radiação aplicada à Radioterapia;
- 2) Desenvolver uma Sequência Didática (Produto Educacional) com potencialidades para servir como base para o aprendizado significativo da Física das Radiações Ionizantes aplicada à Radioterapia;
- 3) Reconhecer as significações desenvolvidas pelos alunos, sobre a Sequência Didática.

Procedimentos:

A pesquisa qualitativa será executada em 05 encontros semanais previamente agendados e neles serão desenvolvidas as etapas da pesquisa.

Desconfortos e riscos:

A presente pesquisa não apresenta riscos ou desconfortos aos participantes por se assemelhar em partes com as aulas já ministradas e assistidas pelos alunos. A mesma trará benefícios que serão citados abaixo.

Benefícios:

Acompanhamento e assistência:

A forma de acompanhamento ocorrerá presencialmente e virtualmente através das seguintes plataformas: Google for Education, e-mail e WhatsApp.

Sigilo e privacidade:

As informações obtidas servirão exclusivamente para os dados da pesquisa e serão confidenciais, sendo resguardado o sigilo sobre a participação em todas as etapas do estudo. Não haverá identificação do aluno de quaisquer formas, para tanto, podendo ser utilizada a identificação alfabética, numérica ou alfanumérica.

O Comitê de Ética em Pesquisa (CEP):

Comitê de Ética em Pesquisa Humana (CEP) da Universidade Federal do Piauí avalia as pesquisas envolvendo seres humanos, realizando pesquisas sobre os projetos cadastrados na Plataforma Brasil, no site da Comissão Nacional de Ética em Pesquisa (CONEP), pelos pesquisadores.

O CEP visa a criar uma política concreta acerca das investigações propostas nas diversas áreas do conhecimento, atuando de forma voluntária, autônoma e independente no exercício de sua função.

Consentimento livre e esclarecido:

Após ter lido este documento e estar ciente do que trata a pesquisa, manifesto o interesse em participar da mesma.

Nome do(a) participante:

Contato telefônico:

e-mail:

Data: ___/___/___

(Assinatura do participante)

Responsabilidade da Pesquisador:

Asseguro utilizar os dados desta pesquisa apenas para fins acadêmicos que contemplem a utilização destes dados, mas nunca com outra finalidade diversa que possa comprometer a imagem ou quaisquer prejuízos aos participantes.

Data: 04 / 03 /2022.

José Mailson Ramos Feitosa
(Pesquisador)

Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo
(Orientador)



Colégio Técnico de Bom Jesus – CCTBJ/UFPI

Aluno (a): _____ Série: _____

Orientando: Prof. Mailson Feitosa

Orientador: Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo.

APÊNDICE C – Questionário 1: reconhecer os conhecimentos prévios dos alunos sobre a Física aplicada à radioterapia

1 – Você já ouviu falar em aplicações das leis da física na medicina? Em caso afirmativo, explique.

2 – Tem conhecimentos dos efeitos resultantes da radiação com a matéria, a exemplo do Compton, fotoelétrico e produção por pares? Tem conhecimentos de raios X e suas aplicações?

3 – Tem conhecimentos científicos sobre técnicas de imagens por tomografias computadorizadas (TC)?

4 – Sabe-se algo sobre terapias de combate ao câncer, a exemplo da radioterapia, que utiliza raios X para tratamentos de tumores? Você já ouviu falar acerca do tratamento radioterápico à base de hádrons, chamado Hadronterapia?



Colégio Técnico de Bom Jesus – CTBJ/UFPI

Aluno (a): _____ Série: _____

Orientando: Prof. Mailson Feitosa

Orientador: Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo.

APÊNDICE D – Questionário 2: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 2

1 – O que é o efeito Compton, como ocorre? Em qual condição trigonométrica o espalhamento se torna máximo?

2 – O que é o efeito Fotoelétrico? Como ocorre na interação com o átomo?

3 – O que ocorre se houver variação na intensidade do feixe de luz para um dado elemento (vide simulação)?

4 – Por que existe um momento em que os fotoelétrons param de produzir corrente elétrica e passam a retornar ao ponto de origem?

5 – Por que a mudança do elemento químico no efeito fotoelétrico implica necessariamente em variação do comprimento de onda?

6 – Explique a ocorrência da produção e aniquilação por pares através da radiação eletromagnética.

7 – Explique o processo de absorção e espalhamento dos raios x quanto ao domínio de energias (faixa de energias)?



Colégio Técnico de Bom Jesus – CTBJ/UFPI

Aluno (a): _____ Série: _____

Orientando: Prof. Mailson Feitosa

Orientador: Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo.

APÊNDICE E – Questionário 3 – Conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 3

1 – Como ocorre o processo de produção e formação dos raios X?

2 – Que caráter físico possui um raio catódico?

3 – Explique o coeficiente de atenuação e a forma com a qual ele se relaciona com a Radiodensidade.

4 – Explique o papel da escala de Hounsfield na diferenciação dos tecidos e diagnóstico por imagem.

5 – Como funciona o aparelho de CT Scan?



Colégio Técnico de Bom Jesus – CTBJ/UFPI

Aluno (a): _____ Série: _____

Orientando: Prof. Mailson Feitosa

Orientador: Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo.

APÊNDICE F – Questionário 4: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 4

- 1- O que são Hádrons? Como são obtidos? Onde são encontrados?
- 2- O que é a Hadronterapia? Que partículas são utilizadas nas aplicações radioterápicas?
- 3- Que diferenças existem entre as deposições de energias aplicadas ao tumor através da radioterapia e da hadronterapia?
- 4- Porque o tratamento com a hadronterapia causa menos efeitos colaterais ao paciente em comparação com radioterapia convencional?
- 5- Quais diferenças e em que aparelhos são formados os feixes de raios-x, feixes de prótons e íons de carbono?
- 6- Quais as dificuldades apresentadas para instalações de centros de radioterapia pelo mundo?



Colégio Técnico de Bom Jesus – CTBJ/UFPI

Aluno (a): _____ Série: _____

Orientando: Prof. Mailson Feitosa

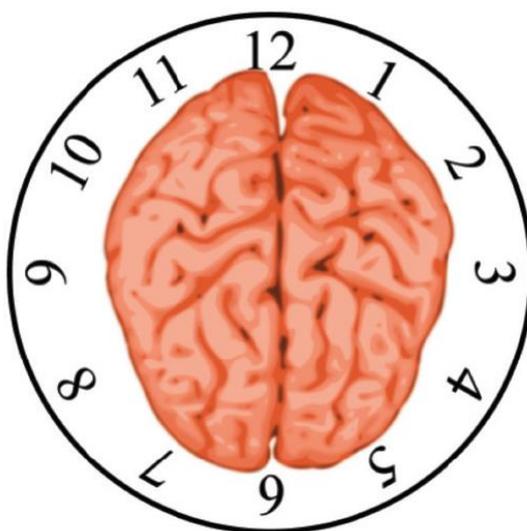
Orientador: Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo.

APÊNDICE G – Oficina/Atividade com o protótipo do aparelho PET/Scan *simulation* desenvolvida durante o Encontro 5

Simulação do *PET Scan* com Uno Arduíno

1- Você deverá pôr na tabela a numeração correspondente aos LED's que acenderem durante a simulação de sua equipe. Posteriormente utilize uma régua e ligue os pontos a fim de determinar a localização do tumor cerebral.

PAR	PAR 01	PAR 02	PAR 03	PAR 04	PAR 05	PAR 06	PAR 07	PAR 08
N ^{os}								





Colégio Técnico de Bom Jesus – CTBJ/UFPI

Aluno (a): _____ Série: _____

Orientando: Prof. Mailson Feitosa

Orientador: Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo.

APÊNDICE H – Questionário 5: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 5

1- O que é o *PET simulation de LED*? Qual a finalidade desta simulação em seu aprendizado acerca do modo de funcionamento do PET/Scan?

2- Como pode-se relacionar do ponto de vista das ciências físicas, o acendimento dos LED aos pares com a captação da radiação pela câmara gama?

3- Qual a finalidade de serem traçadas retas que ligam dois pontos distintos (números onde se encontram os LED)?

4- Qual a explicação física para o acendimento de LED de maneira isolada?

5- Como são produzidos os radiofármacos? Qual sua função essencial nos exames de imagens?



Colégio Técnico de Bom Jesus – CTBJ/UFPI

Aluno (a): _____ Série: _____

Orientando: Prof. Mailson Feitosa

Orientador: Prof. Dr. Neuton Alves de Araújo.

APÊNDICE I – Códigos-fontes utilizados no protótipo PET/Scan simulation - Encontro 5

Abaixo estão dispostos os algoritmos implementados através do *Arduino Uno*.

Foram desenvolvidos 5 algoritmos, referentes às 5 equipes que participaram da pesquisa.

Equipe 1	Equipe 2	Equipe 3	Equipe 4	Equipe 5
/* //Simulador de detecção de radiação pelo aparelho PETScan (Positron Emission Tomography). */ void setup() { //Nomeação de variáveis (12 LED's). pinMode(12, OUTPUT); pinMode(11, OUTPUT); pinMode(10, OUTPUT); pinMode(9, OUTPUT); pinMode(8, OUTPUT); pinMode(7, OUTPUT); pinMode(6, OUTPUT); pinMode(5, OUTPUT);	/* //Simulador de detecção de radiação pelo aparelho PETScan (Positron Emission Tomography). */ void setup() { //Nomeação de variáveis (12 LED's). pinMode(12, OUTPUT); pinMode(11, OUTPUT); pinMode(10, OUTPUT); pinMode(9, OUTPUT); pinMode(8, OUTPUT); pinMode(7, OUTPUT); pinMode(6, OUTPUT); pinMode(5, OUTPUT);	/* //Simulador de detecção de radiação pelo aparelho PETScan (Positron Emission Tomography). */ void setup() { //Nomeação de variáveis (12 LED's). pinMode(12, OUTPUT); pinMode(11, OUTPUT); pinMode(10, OUTPUT); pinMode(9, OUTPUT); pinMode(8, OUTPUT); pinMode(7, OUTPUT); pinMode(6, OUTPUT);	Equipe 04 /* //Simulador de detecção de radiação pelo aparelho PETScan (Positron Emission Tomography). */ void setup() { //Nomeação de variáveis (12 LED's). pinMode(12, OUTPUT); pinMode(11, OUTPUT); pinMode(10, OUTPUT); pinMode(9, OUTPUT); pinMode(8, OUTPUT); pinMode(7, OUTPUT); pinMode(6, OUTPUT);	/* //Simulador de detecção de radiação pelo aparelho PETScan (Positron Emission Tomography). */ void setup() { //Nomeação de variáveis (12 LED's). pinMode(12, OUTPUT); pinMode(11, OUTPUT); pinMode(10, OUTPUT); pinMode(9, OUTPUT); pinMode(8, OUTPUT); pinMode(7, OUTPUT); pinMode(6, OUTPUT); pinMode(5,

<pre>pinMode(4, OUTPUT); pinMode(3, OUTPUT); pinMode(2, OUTPUT); pinMode(1, OUTPUT); }</pre> <pre>void loop() { // I. Acendimento simultâneo de 01 par de LED's, durante 4 segundos; II. Apagamento desse par durante 1 segundo; III. Continuação do ciclo.</pre> <pre>digitalWrite(1, HIGH); digitalWrite(6, HIGH); delay(4000); digitalWrite(1, LOW); digitalWrite(6, LOW); delay(1000); digitalWrite(1, HIGH); delay(4000); digitalWrite(1, LOW); delay(1000); digitalWrite(4, HIGH); digitalWrite(6, HIGH); delay(4000); digitalWrite(4, LOW); digitalWrite(6, LOW);</pre>	<pre>pinMode(4, OUTPUT); pinMode(3, OUTPUT); pinMode(2, OUTPUT); pinMode(1, OUTPUT); }</pre> <pre>void loop() { // I. Acendimento simultâneo de 01 par de LED's, durante 4 segundos; II. Apagamento desse par durante 1 segundo; III. Continuação do ciclo.</pre> <pre>digitalWrite(12, HIGH); digitalWrite(9, HIGH); delay(4000); digitalWrite(12, LOW); digitalWrite(9, LOW); delay(1000); digitalWrite(11, HIGH); digitalWrite(2, HIGH); delay(4000); digitalWrite(11, LOW); digitalWrite(2, LOW); delay(1000);</pre>	<pre>pinMode(5, OUTPUT); pinMode(4, OUTPUT); pinMode(3, OUTPUT); pinMode(2, OUTPUT); pinMode(1, OUTPUT); }</pre> <pre>void loop() { // I. Acendimento simultâneo de 01 par de LED's, durante 4 segundos; II. Apagamento desse par durante 1 segundo; III. Continuação do ciclo.</pre> <pre>digitalWrite(10, HIGH); digitalWrite(2, HIGH); delay(4000); digitalWrite(10, LOW); digitalWrite(2, LOW); delay(1000); digitalWrite(11, HIGH); delay(4000); digitalWrite(11, LOW); delay(1000); digitalWrite(3, HIGH);</pre>	<pre>pinMode(5, OUTPUT); pinMode(4, OUTPUT); pinMode(3, OUTPUT); pinMode(2, OUTPUT); pinMode(1, OUTPUT); }</pre> <pre>void loop() { // I. Acendimento simultâneo de 01 par de LED's, durante 4 segundos; II. Apagamento desse par durante 1 segundo; III. Continuação do ciclo.</pre> <pre>digitalWrite(4, HIGH); digitalWrite(10, HIGH); delay(4000); digitalWrite(4, LOW); digitalWrite(10, LOW); delay(1000); digitalWrite(2, HIGH); digitalWrite(9, HIGH); delay(4000); digitalWrite(2, LOW); digitalWrite(9, LOW); delay(1000);</pre>	<pre>OUTPUT); pinMode(4, OUTPUT); pinMode(3, OUTPUT); pinMode(2, OUTPUT); pinMode(1, OUTPUT); }</pre> <pre>void loop() { // I. Acendimento simultâneo de 01 par de LED's, durante 4 segundos; II. Apagamento desse par durante 1 segundo; III. Continuação do ciclo.</pre> <pre>digitalWrite(10, HIGH); digitalWrite(4, HIGH); delay(4000); digitalWrite(10, LOW); digitalWrite(4, LOW); delay(1000); digitalWrite(1, HIGH); digitalWrite(7, HIGH); delay(4000); digitalWrite(1, LOW); digitalWrite(7,</pre>
--	--	--	--	--

delay(1000); digitalWrite(4, HIGH); digitalWrite(11, HIGH); delay(4000); digitalWrite(4, LOW); digitalWrite(11, LOW); delay(1000); digitalWrite(3, HIGH); digitalWrite(10, HIGH); delay(4000); digitalWrite(3, LOW); digitalWrite(10, LOW); delay(1000); digitalWrite(7, HIGH); delay(4000); digitalWrite(7, LOW); delay(1000); digitalWrite(2, HIGH); digitalWrite(8, HIGH); delay(4000); digitalWrite(2, LOW); digitalWrite(8, LOW); delay(1000); digitalWrite(7, HIGH); digitalWrite(1, HIGH); delay(4000);	digitalWrite(4, HIGH); delay(4000); digitalWrite(4, LOW); delay(1000); digitalWrite(3, HIGH); digitalWrite(11, HIGH); delay(4000); digitalWrite(3, LOW); digitalWrite(11, LOW); delay(1000); digitalWrite(12, HIGH); digitalWrite(8, HIGH); delay(4000); digitalWrite(12, LOW); digitalWrite(8, LOW); delay(1000); digitalWrite(8, HIGH); delay(4000); digitalWrite(8, LOW); delay(1000); digitalWrite(1, HIGH); digitalWrite(10, HIGH); delay(4000); digitalWrite(1, LOW); digitalWrite(10, LOW);	digitalWrite(12, HIGH); delay(4000); digitalWrite(3, LOW); digitalWrite(12, LOW); delay(1000); digitalWrite(2, HIGH); digitalWrite(8, HIGH); delay(4000); digitalWrite(2, LOW); digitalWrite(8, LOW); delay(1000); digitalWrite(2, HIGH); digitalWrite(7, HIGH); delay(4000); digitalWrite(2, LOW); digitalWrite(7, LOW); delay(1000); digitalWrite(5, HIGH); delay(4000); digitalWrite(5, LOW); delay(1000); digitalWrite(2, HIGH); digitalWrite(9, HIGH); delay(4000); digitalWrite(2, LOW); digitalWrite(9, LOW); delay(1000); digitalWrite(3,	digitalWrite(7, HIGH); digitalWrite(12, HIGH); delay(4000); digitalWrite(7, LOW); digitalWrite(12, LOW); delay(1000); digitalWrite(12, HIGH); delay(4000); digitalWrite(12, HIGH); delay(4000); digitalWrite(12, HIGH); delay(4000); digitalWrite(11, HIGH); digitalWrite(6, HIGH); delay(4000); digitalWrite(6, HIGH); delay(4000); digitalWrite(11, LOW); digitalWrite(6, LOW); delay(1000); digitalWrite(8, HIGH); delay(4000); digitalWrite(8, LOW); delay(1000); digitalWrite(1, HIGH); digitalWrite(8, HIGH); delay(4000); digitalWrite(1, LOW); digitalWrite(8,	LOW); delay(1000); digitalWrite(1, HIGH); delay(4000); digitalWrite(1, LOW); delay(1000); digitalWrite(3, HIGH); digitalWrite(9, HIGH); delay(4000); digitalWrite(3, LOW); digitalWrite(9, LOW); delay(1000); digitalWrite(6, HIGH); digitalWrite(12, HIGH); delay(4000); digitalWrite(6, LOW); digitalWrite(12, LOW); delay(1000); digitalWrite(11, HIGH); digitalWrite(5, HIGH); delay(4000); digitalWrite(11, LOW); digitalWrite(5, LOW); delay(1000); digitalWrite(10, HIGH); delay(4000);
---	--	---	---	--

<pre>digitalWrite(7, LOW); digitalWrite(1, LOW); delay(1000); }</pre>	<pre>delay(1000); digitalWrite(1, HIGH); delay(4000); digitalWrite(1, LOW); delay(1000); }</pre>	<pre>HIGH); delay(4000); digitalWrite(3, LOW); delay(1000); }</pre>	<pre>LOW); delay(1000); digitalWrite(2, HIGH); delay(4000); digitalWrite(2, LOW); delay(1000); }</pre>	<pre>digitalWrite(10, LOW); delay(1000); digitalWrite(2, HIGH); digitalWrite(8, HIGH); delay(4000); digitalWrite(2, LOW); digitalWrite(8, LOW); delay(1000); }</pre>
---	--	---	--	--

APÊNDICE L – PLANO DE AULA 1

MNPEF

Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PIAUÍ



SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

DISCIPLINA: Física

NÍVEL DE ENSINO: Ensino Médio SÉRIE: 3ª

PROFESSOR: José Mailson Ramos Feitosa.

DATA: 18/03/22 TEMPO: 02 aulas - 100 min

PLANO DE AULA

1. TEMA

- Interação da radiação com a matéria.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Explicar como ocorre o efeito Compton, com destaque a colisão entre o fóton e o elétron, bem com sua aplicação na produção de imagens radiológicas;
- Caracterizar o efeito fotoelétrico a partir da fundamentação teórica e simulação computacional através do aplicativo PhetColorado;
- Apresentar os efeitos da produção e aniquilação por pares e suas contribuições nos exames produzidos no aparelho PET/Scan;
- Reconhecer as contribuições das interações da radiação com a matéria em alguns exames por imagem.

3. CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

- Efeito Compton;

- Efeito Fotoelétrico;
- Produção de pares;
- Contribuições das interações da radiação com a matéria em alguns exames por imagem.

4. METODOLOGIA

- Iniciar a aula com a constituição de equipes de alunos para reflexões das ideias centrais do texto: Interação da radiação com a matéria, disponibilizado anteriormente no *Google Classroom*;
- Propiciar momento para debate, em que as dúvidas possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer tais dúvidas sob a mediação e intervenção do professor/pesquisador;
- Simulação/demonstração on-line, pelo professor pesquisador, do Efeito Fotoelétrico, através do Phetcolorado, mediado pela plataforma Web;
- Aplicação do Questionário 2: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 02;
- Disponibilização do material sobre Raios X: Raio x convencional e Tomografia Computadorizada (TC), no *Google Classroom*, referente ao Encontro 3;
- Disponibilização do Questionário 2: Conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 02.

5. RECURSOS DIDÁTICOS E TECNOLÓGICOS

- Texto: Interação da radiação com a matéria, disponibilizado anteriormente no *Google Classroom*;
- Computador;
- Plataforma Digital *Google Meet*;
- Aplicativo *PhetColorado*.

6. AVALIAÇÃO

A avaliação da aprendizagem dar-se-á:

- Através dos questionamentos que evidenciam o quanto o aluno se envolveu com a atividade proposta;
- Por meio da interação com os colegas, nas equipes de discussão e atividades simulacionais;
- Através das respostas ao questionário de conhecimentos absorvidos que foi repassado após as atividades simulacionais.

7. REFERÊNCIAS

AMADOR, S. K. **Introduction to Physics in Modern Medicine**. Haverford College Pennsylvania, USA: CRC Press, 2009.

BETZ, M. **Efeito Compton**: Espalhamento de raios X. [S. l.], s.d. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~betz/iqXXA/efCompt/aEfComptonFrame.htm>. Acesso em: 1 nov. 2021.

JR. JONH, W; SERWAY, R. A. **Física para Cientistas e Engenheiros**: Luz, Óptica e Física Moderna. São Paulo: Cengage, 2013, v. 4.

PHET – **Efeito Fotoelétrico**. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric. Acesso em: 1 nov. 2021.

SANTOS, C. A. dos. **Efeito Fotoelétrico**, 2002. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/raiosx/rxhist.html>. Acesso em: 29 abr. 2021.

SANTOS, C. A. dos. **Física Moderna**: Capítulo 3 - Efeito Fotoelétrico. 2009. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/index.html>. Acesso em: 28 abr. 2021.

SILVA NETO, J. da. **Formação de pares**, s.d. Disponível em: <http://ief.if.ufrgs.br/~jader/formapares.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2021.

SILVA, I.; FREIRE JUNIOR, O. A descoberta do efeito Compton: de uma abordagem semiclássica a uma abordagem quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Salvador/BA, v. 36, n. 1, p. 1601-1614, fev. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v36n1/26.pdf>. Acesso em: 18 maio 2018.

APÊNDICE M – PLANO DE AULA 2



DISCIPLINA: Física

NÍVEL DE ENSINO: Ensino Médio SÉRIE: 3ª

PROFESSOR: José Mailson Ramos Feitosa.

DATA: 24/03/22 TEMPO: 02 aulas - 100 min

PLANO DE AULA

1. TEMA

- Raios X: Raio x convencional e Tomografia Computadorizada (TC).

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aprender como se formam os raios X nos tubos catódicos e verificar sua aplicação a exames médicos;
- Explicar o coeficiente de atenuação baseado nas densidades dos tecidos;
- Entender a maneira como se aplica a Escala Hounsfield (HU) na diferenciação dos tecidos e possível diagnóstico e/ou tratamento de patologias;

3. CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

- Funcionamento e produção dos Raios X;
- Coeficientes de atenuação;
- Escala de Hounsfield (HU) na Tomografia Computadorizada (TC).

4. METODOLOGIA

- Iniciar a aula propiciando momento para debate do tema “Raios X: Raio x convencional e Tomografia Computadorizada (TC)”, em que as dúvidas possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer tais dúvidas sob a mediação e intervenção do professor/pesquisador;
- Aplicação do Questionário 3: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 03;
- Disponibilização do material sobre Radioterapia e Hadronterapia, no *Google Classroom*, referente ao Encontro 4.

5. RECURSOS DIDÁTICOS E TECNOLÓGICOS

- Texto: Raios X: Raio x convencional e Tomografia Computadorizada (TC), disponibilizado anteriormente no *Google Classroom*;
- Computador;
- Plataforma Digital *Google Meet*.

6. AVALIAÇÃO

A avaliação da aprendizagem dar-se-á:

- Através dos questionamentos que evidenciam o quanto o aluno se envolveu com a atividade proposta;
- Por meio da interação com os colegas, nas equipes de discussão e intervenção do professor;
- Através das respostas ao questionário de conhecimentos absorvidos que foram repassados no Encontro anterior.

7. REFERÊNCIAS

AMADOR, S. K. **Introduction to Physics in Modern Medicine**. Haverford College Pennsylvania, USA: CRC Press, 2009.
HOGAN 2, Sam. **Cathode Ray Tube - Animated Explanation**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=II09bp5BAa0>. Acesso em: 1 nov. 2021.

LAURA FILHO L. A., *et.al.* Achados tomográficos de pacientes submetidos a tomografia de crânio no pronto-socorro do Hospital Universitário Cajuru, 2013. *Revista Radiologia Brasileira. Colégio Brasileiro de Radiologia e Diagnóstico por Imagem*. Disponível em: http://www.rb.org.br/detalhe_artigo.asp?id=2412&idioma=Portugues. Acesso em: 12 ago. 2021.

MARTINS, R. de A. A Descoberta dos Raios X: O Primeiro Comunicado de Rontgen. *Revista Brasileira de Ensino de Física, Instituto de Física*, v. 20, n. 08, p. 373-391, dez. 1998. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v20_373.pdf. Acesso em: 30 abr. 2021.

MEDICAL MEDIA, N. **CT Scan**. [S. l.], s.d. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gaiCtdo6CLE>. Acesso em: 1 nov. 2021.

MORSCH, J. A. **RX de tórax OIT**: como é feito e para que serve?, 2016. Disponível em: <https://telemedicinamorsch.com.br/blog/rx-de-torax-oit-para-que-serve#:~:text=O%20Rx%20de%20t%C3%B3rax%20OIT,clareza%20para%20saber%20sua%20evolu%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 14 mai. 2021.

SANTOS, C. A. dos. **A Descoberta dos Raios X**. 2002. Disponível em: <https://if.ufrgs.br/tex/fis142/raiosx/rxhist.html>. Acesso em: 29 abr. 2021.

SANTOS, E. S dos; NACIF, M. S. **Manual de Técnicas em Tomografia Computadorizada**. Rio de Janeiro/RJ: Rubio, 2009.

TECHNOLOGIES, S. **Production of X Rays**. [S. l.], s.d. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=T1WwHh4b__M. Acesso em: 1 nov. 2021.

APÊNDICE N – PLANO DE AULA 3



DISCIPLINA: Física

NÍVEL DE ENSINO: Ensino Médio SÉRIE: 3ª

PROFESSOR: José Mailson Ramos Feitosa.

DATA: 01/04/22 TEMPO: 02 aulas - 100 min

PLANO DE AULA

1. TEMA

- Radioterapia e Hadronterapia

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar a Hadronterapia como a mais moderna técnica de Radioterapia, até o momento, baseado numa sequência didática que favoreça a aprendizagem de forma mais fácil e profícua;
- Estabelecer uma razão de eficiência e precisão no tratamento de câncer utilizando a Radioterapia e a Hadronterapia;
- Compreender como o pico de Bragg influencia na precisão do tratamento e na redução de danos aos tecidos saudáveis;
- Reconhecer os aceleradores utilizados na Hadronterapia;
- Caracterizar os tipos de regiões mais indicadas à utilização da Hadronterapia.

3. CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

- Tratamento Radioterápico;
- Partículas subatômicas: hádrons;

- Tratamento Hadronterápico;
- Aceleradores utilizados na Hadronterapia;
- Comparativos entre a Hadronterapia e a Radioterapia convencional;
- Novas pesquisas na Radioterapia.

4. METODOLOGIA

- Iniciar a aula propiciando momento para debate sobre Radioterapia e Hadronterapia, em que as dúvidas possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer tais dúvidas sob a mediação e intervenção do professor/pesquisador;
- Aplicação do Questionário 4: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 04;
- Disponibilização do material sobre PET/Scan e Radioterapia, no *Google Classroom*, referente ao Encontro 5.

5. RECURSOS DIDÁTICOS E TECNOLÓGICOS

- Texto: Radioterapia e Hadronterapia, disponibilizado anteriormente no *Google Classroom*;
- Computador;
- Plataforma Digital Google Meet.

6. AVALIAÇÃO

A avaliação da aprendizagem dar-se-á:

- Através dos questionamentos que evidenciam o quanto o aluno se envolveu com a atividade proposta;
- Por meio da interação com os colegas, nas equipes de discussão e intervenção do professor;
- Através das respostas ao questionário de conhecimentos absorvidos que foram repassados no Encontro anterior.

7. REFERÊNCIAS

GÓMEZ, N. **5 mil brasileiros morrem por falta de radioterapia, mas cenário deve mudar**. [S. l.], 28 mar. 2019. Disponível em: <https://www.uol.com.br/vivabem/noticias/redacao/2019/03/28/5-mil-pacientes-morrem-por-falta-de-radioterapia-mas-cenario-deve-mudar.htm>. Acesso em: 1 dez. 2021.

HUSSEIN, M. S.; REBELLO, P. Combate ao câncer ganha novas técnicas: a física nuclear e o tratamento de tumores. **Revista USP**, São Paulo, n. 66, p. 80-95, jul. 2005. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13435/15253>. Acesso em: 26 nov. 2021.

LÜHR, A. *et al.* “Radiobiology of Proton Therapy”: Results of an international expert workshop, **Journal Radiotherapy and Oncology**, v. 128, p. 56-67, 2018.

PIVETTA, M. Prótons e íons na medida certa: Hadronterapia combate tumores de forma mais seletiva e eficaz que a radioterapia convencional. **PESQUISA FAPESP**, São Paulo/SP, n. 223, p. 24-25, set. 2014. Disponível em: http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2014/09/024-025_cancer-proton_223.pdf. Acesso em: 26 nov. 2021.

TELES, P. R. **Hadronterapia**: Abordagem Semiclássica da Perda de Energia, Efeitos da Fragmentação Nuclear e Taxa de Reação. 2006. 118 p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2006.

VIEIRA, B. A. B. **Caracterização da deposição de energia de um feixe de próton, utilizando o código de Monte Carlo FLUKA**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação - TCC (Bacharel em Física Médica) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu/SP, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/142911/000867022.pdf?sequence=1>. Acesso em: 26 nov. 2021.

APÊNDICE O – PLANO DE AULA 4



DISCIPLINA: Física

NÍVEL DE ENSINO: Ensino Médio SÉRIE: 3ª

PROFESSOR: José Mailson Ramos Feitosa.

DATA: 07/04/22 TEMPO: 02 aulas - 100 min

PLANO DE AULA

1. TEMA

- PET/Scan e radiofármacos.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender as diferenças entre os aceleradores de partículas utilizados na Radioterapia e na Hadroterapia;
- Entender a composição do radiofármaco, bem como as suas aplicações nos exames radiológicos;
- Analisar os princípios fundamentais da aniquilação de pares na geração de imagens e localização do tumor no organismo, utilizando o *PET simulation de LED's*.

3. CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

- Aceleradores de partículas;
- Radiofármacos;
- Aparelho PET Scan.

4. METODOLOGIA

- Iniciar a aula propiciando momento para debate do tema “PET/Scan e radiofármacos”, em que as dúvidas possam ser socializadas entre as equipes, a fim de esclarecer tais dúvidas sob a mediação e intervenção do professor;
- Oficina/simulação computacional com utilização do Arduíno Uno;
- Aplicação do Questionário 5: identificar conhecimentos desenvolvidos durante o Encontro 05.

5. RECURSOS DIDÁTICOS E TECNOLÓGICOS

- Texto: PET/Scan e radiofármacos, disponibilizado anteriormente no *Google Classroom*;
- Computador;
- Data show;
- Pincel;
- Apagador;
- Protótipo PET/Scan *simulation*;
- Arduíno Uno.

6. AVALIAÇÃO

A avaliação da aprendizagem dar-se-á:

- Através dos questionamentos que evidenciam o quanto o aluno se envolveu com a atividade proposta;
- Por meio da interação com os colegas, nas equipes de discussão e intervenção do professor;
- Através das respostas ao questionário de conhecimentos absorvidos que foram repassados no Encontro anterior.
- Pela participação oral do aluno na equipe, através da exposição de ideias críticas sobre a atividade de simulação, realizada no encontro;
- Através do envolvimento na consecução das atividades práticas;
- Pelas respostas individuais ao questionário do PET *simulation* de LED's.

7. REFERÊNCIAS

AMADOR, S. K. Introduction to Physics in Modern Medicine. 2ª. ed. Haverford College Pennsylvania, USA: CRC Press, 2009.

EXPERTS, Onco. **A UTILIZAÇÃO DO PET/CT NO TRATAMENTO DO CÂNCER.** São Paulo, 2 fev. 2016. Disponível em: <https://www.oncofisio.com.br/noticia/a-utilizacao-do-pet-ct-no-tratamento-do-cancer>. Acesso em: 8 dez. 2021.

IPEN (SP). **Equipamentos multiusuários:** Acelerador de Partículas Ciclotron - Cyclone 18. [S. l.], s.d. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=839&campo=5060. Acesso em: 26 nov. 2021.

OLIVEIRA, R. et. al. Preparações radiofarmacêuticas e suas aplicações. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas.** vol. 42, n. 2, p. 151-165, abr./jun., 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcf/a/RjFqKQxWrfCHv8Z4hqq68m/?lang=pt>. Acesso em: 20 out. 2021.

PARAÍBA recebe primeiro acelerador linear do Plano de Expansão da Radioterapia. [S. l.], 29 nov. 2016. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/noticias/paraiba-recebe-primeiro-acelerador-linear-do-plano-de-expansao-da-radioterapia>. Acesso em: 15 dez. 2021.