

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS EXATAS

ALEXANDRE DIMAS QUEIROZ D'ANDREA

CÂMARA DE WILSON ELETRÔNICA PARA O AUXÍLIO NA
APRENDIZAGEM DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO

SÃO CARLOS

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS EXATAS

ALEXANDRE DIMAS QUEIROZ D'ANDREA

CÂMARA DE WILSON ELETRÔNICA PARA O AUXÍLIO NA
APRENDIZAGEM DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Exatas da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências Exatas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Alves Barros

SÃO CARLOS

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

D178cw D'andrea, Alexandre Dimas Queiroz.
Câmara de Wilson eletrônica para o auxílio na
aprendizagem de física moderna no ensino médio /
Alexandre Dimas Queiroz D'andrea. -- São Carlos : UFSCar,
2014.
125 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2014.

1. Física moderna. 2. Radioatividade. 3. Wilson, Câmara
de. I. Título.

CDD: 539 (20^a)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Exatas

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a defesa de dissertação de Mestre Profissional em Ensino de Ciências Exatas do candidato Alexandre Dimas Queiroz D'Andrea, realizada em 21/11/2014:

Prof. Dr. Marcelo Alves Barros
USP

Profa. Dra. Ducinei Garcia
UFSCar

Prof. Dr. Luiz Vitor de Souza Filho
USP

“O que não consigo criar, não consigo compreender.”

– Richard P. Feynman.

DEDICATÓRIAS

Dedico fundamentalmente este trabalho à minha esposa, Andréia, cuja fé, esperança e frequente fonte de incentivo, fez com que um trabalho intelectual possuísse alma e espírito.

À minha filha Karen e ao meu filho Fernando, que me ensinam a viver.

Aos meus pais, Vicente e Maria, que certamente estariam muito felizes.

Às minhas tias, Diva e Vanda, que na ausência de meus pais, dedicaram suas vidas à minha criação e formação.

Às minhas irmãs, Mônica (in memoriam), Margarida e Ângela, sempre me incentivando em qualquer situação.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Marcelo Alves Barros, meu orientador, por suas valiosas orientações e, ao mesmo tempo, dando-me liberdade com responsabilidade ao longo do processo de desenvolvimento prático e de escrita deste trabalho.

A todos os meus professores da UFSCar, que durante o curso de mestrado, a cada aula, deixavam-me cada vez mais fascinado pela física.

Aos meus jovens colegas do curso de pós-graduação, cujas personalidades marcantes, fizeram inesquecíveis os momentos em que estivemos juntos nas aulas presenciais.

Ao secretário e secretária do PPGECE, Júnior e Jociane, pelo grande apoio, prontidão e boa vontade.

À Secretaria da Educação do Estado de São Paulo, pela concessão da bolsa de auxílio financeiro.

RESUMO

A introdução do Ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no currículo do ensino médio no Brasil evidenciou a necessidade de adequar as atividades didático-pedagógicas em sala de aula, com o intuito de reposicionar a atitude cognitiva e interpretativa do aluno frente a uma sociedade em que a tecnologia é parte integrante de seu cotidiano. Neste processo de adequação e transposição didática, os docentes desta disciplina vêm faceando alguns obstáculos epistemológicos e dificuldades didáticas. O presente trabalho teve como objetivo a elaboração de um Instrumento Educacional auxiliar no processo ensino-aprendizagem de FMC, notadamente no que se refere aos tópicos Estrutura da Matéria, Radioatividade, Raios Cósmicos e Partículas Elementares. Decorre daí o obstáculo epistemológico relacionado à fenomenologia associada aos conteúdos propostos, uma vez que estes se referem a estruturas e fenômenos físicos que não são facilmente observáveis diretamente no cotidiano do aluno. Assim, o presente trabalho propõe a construção de uma Câmara de Wilson Eletrônica, inspirada na câmara de nuvens de Wilson e na câmara de difusão de Langsdorf, mas utilizando materiais de fácil aquisição e que pode ser construída sem grandes dificuldades pelo professor. Existem vários tutoriais para a construção das mesmas, mas a característica principal de tais câmaras é a formação de gradiente de temperatura utilizando dióxido de carbono sólido (gelo seco). Entretanto, este produto não é encontrado com facilidade, além de ser altamente sublimável, dificultando seu armazenamento e ocorrendo grande perda de um dia para outro. A câmara eletrônica aqui proposta contorna este problema, introduzindo o conceito de resfriamento por estado sólido eletrônico com módulos termoelétricos (efeito Peltier), facilitando seu transporte e uso em sala de aula. O Instrumento Educacional deverá então ser apresentado aos alunos num contexto de ensino por investigação ou metodologia investigativa, dado que vários autores defendem a atividade prática, laboratorial, o exercício de observação e o raciocínio investigativo como sendo estratégias valiosas do ponto de vista didático.

Palavras chave: Física Moderna. Radioatividade. Câmara de Wilson.

ABSTRACT

The introduction of the Teaching of Modern and Contemporary Physics (MCP) in the curriculum of the middle school in Brazil evidenced the need to adapt the activities didactic-pedagogical in the classroom, in order to reposition the cognitive and interpretative attitude of the student in a society where technology is an integral part of his daily. In this process of adequacy and implementation of this didactic transposition, teachers have been facing some epistemological obstacles and didactic difficulties. This present work had as objective the development of an Educational Instrument to help in the teaching-learning process of MCP, mainly those related to the topics of Structure of Matter, Radioactivity, Cosmic Rays and Elementary Particles. It follows an epistemological obstacle related to the phenomenology associated with the proposed contents, since they refer to structures and physical phenomena that are not easily and directly observable in the student's everyday life. In this sense, this present work proposes the construction of an Electronic Wilson Cloud Chamber, inspired by the Wilson Cloud Chamber and the Langsdorf's Diffusion Chamber, but using easily obtainable materials and that can be built without great difficulties by teacher. There are several tutorials for constructing them, but the main feature of such chambers is the formation of temperature gradient using solid carbon dioxide (dry ice). However, this product is not easily found, besides being highly sublimable, hindering their storage and large loss occurring overnight. The Electronic Chamber proposed here circumvents this problem by introducing the concept of electronic cooling by electronic solid state thermoelectric modules (Peltier effect), facilitating its transport and use in the classroom. The Educational Instrument shall then be presented to the students in a context of Education by Research or Investigative Methodology, given that many authors advocate the practical activity, laboratorial, the observation exercise and the investigative thinking as being valuable tools from didactic point of view.

Keywords: Modern Physics. Radioactivity. Wilson Chamber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Câmara de difusão com gelo seco	20
Figura 2 - Ampola utilizada por Thomson	25
Figura 3 – Experimento de Thomson	26
Figura 4 - Roentgen e a radiografia da mão de sua esposa.....	27
Figura 5 - Radiografia dos cristais de sulfato duplo de urânio e potássio	28
Figura 6 – Núcleo estável e instável	30
Figura 7 - Poder de penetração das radiações.....	33
Figura 8 – Quadro da evolução dos modelos atômicos	34
Figura 9 – Curva de decaimento típica	38
Figura 10 – Exemplos de tempos de meia vida	39
Figura 11 – Séries radioativas naturais	40
Figura 12 – Ciclo do carbono-14	44
Figura 13 – Relação entre unidades radiológicas	48
Figura 14 - Simulador para o efeito fotoelétrico.....	50
Figura 15 - O efeito Compton.....	51
Figura 16 - O arranjo de Compton.....	52
Figura 17 - Produção de par.....	52
Figura 18 - Interações da radiação eletromagnética	53
Figura 19 - Interação eletromagnética com a matéria.....	53
Figura 20 - Detector a gás.....	55
Figura 21 – Contagem dos pulsos gerados	55
Figura 22 - Regiões de trabalho dos detectores a gás	56
Figura 23 - Regiões de detecção à gás por amplitude de pulso	56
Figura 24 - Avalanche de Townsend	57
Figura 25 - Detector Proporcional	57
Figura 26 - Esquema do detector Geiger-Muller	59
Figura 27 - Ampolas Geiger-Muller	59
Figura 28 – Esquema do tubo fotomultiplicador	60
Figura 29 – Diagrama de blocos de um contador cintilador.....	61
Figura 30 – LKB Wallac Gamma Counter 1282 Compugamma.....	61
Figura 31 – Quadro geral dos detectores de radiação	62

Figura 32 – “Brocken spectre” observado por Wilson	63
Figura 33 – Câmara de nuvens de Wilson	64
Figura 34 – Esquema câmara de Wilson	65
Figura 35 – Partículas α de radio	66
Figura 36 – Traçados de partículas α e β de rádio	67
Figura 37 – Ionização por raios X	67
Figura 38 – Esquema da câmara de difusão de Langsdorf	69
Figura 39 – Efeito Seebeck	70
Figura 40 - Termopares	71
Figura 41 – Efeito Peltier	71
Figura 42 – Módulo termoelétrico	72
Figura 43 – Blocos de Bi ₂ Te ₃ ligados em série	72
Figura 44 – Aspectos construtivos	73
Figura 45 – Detalhe construtivo	74
Figura 46 – Fluxo de calor entre os componentes	74
Figura 47 – Especificações TEC1-12708	76
Figura 48 - Especificações TEC1-12706	76
Figura 49 – Temperatura relativa num módulo termoelétrico	77
Figura 50 – Principais parâmetros para dimensionamento	78
Figura 51 – Coeficiente de Performance	78
Figura 52 – Software para cálculo de parâmetros de módulos	79
Figura 53 – Resultado apresentado pelo software	80
Figura 54 – Análise gráfica para um módulo TEC1-12708	81
Figura 55 – Montagem em cascata	82
Figura 56 – Análise gráfica para o módulo1	84
Figura 57 – Diferenças de temperaturas no sistema	86
Figura 58 – Análise gráfica com 12 V no módulo TEC1-12706	87
Figura 59 – Análise gráfica TEC1-12706 com 5 V	88
Figura 60 – Estimativa do COP em cascata	89
Figura 61 – Parâmetros do sistema com módulos em cascata	90
Figura 62 – Medição da voltagem no módulo2	91
Figura 63 – Medida da corrente no módulo 2	91
Figura 64 – Voltagem medida no módulo1	92
Figura 65 – Corrente medida no módulo 1	93

Figura 66 – Medida da temperatura no radiador de calor	94
Figura 67 – Medida de temperatura no lado frio do sistema	95
Figura 68 – Módulos Termoelétricos	96
Figura 69 – Radiador de Calor.....	97
Figura 70 - Ventoinhas e radiador	97
Figura 71 – Recipiente de acrílico	98
Figura 72- Fonte de alimentação	98
Figura 73 – Montagem final	99
Figura 74 – Cerâmica radioativa.....	100
Figura 75 – Manta de lampião	100
Figura 76 – Fonte de Amerício-241 de detector de fumaça	101
Figura 77 – Ponteiro radioativo	101
Figura 78 – Contador Geiger GMC-300E	102
Figura 79 – Visão interna do contador Geiger.....	103
Figura 80 – Amerício-241 e traçados observados na câmara	104
Figura 81 - Cerâmica com Óxido de Urânio e visualização	104
Figura 82 - Ponteiro de relógio com radioatividade	104
Figura 83 – Intermediação didática do Instrumento Educacional	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alcance das partículas alfa	31
Tabela 2 – Alcance das partículas beta	32
Tabela 3 - Camada semi-redutora	32
Tabela 4 – Fator de Ponderação de Radiação (WR)	47
Tabela 5 – Referencias de CPM para o detector	102
Tabela 6 – Os 10 alimentos mais radioativos	115
Tabela 7 – Prolongamento do tempo útil dos alimentos.....	116

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REFERENCIAIS TEÓRICOS	15
2.1 A TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA E OBSTÁCULOS EPISTEMOLÓGICOS	15
2.2 CONSTRUTIVISMO, METODOLOGIA INVESTIGATIVA E EXPERIMENTAÇÃO	20
3. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS	22
3.1 BREVE HISTÓRICO DA RADIOATIVIDADE	22
3.2 DECAIMENTO RADIOATIVO E UNIDADES DE MEDIDAS DE RADIAÇÃO.....	34
3.3 VISÃO GERAL DOS DETECTORES DE PARTÍCULAS	49
3.4 A CÂMARA DE NUENS DE WILSON E A CÂMARA POR DIFUSÃO	62
4. CONSTRUÇÃO DA CÂMARA DE WILSON ELETRÔNICA	70
4.1 RESFRIAMENTO POR MÓDULOS TERMOELÉTRICOS	70
4.2 DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS TERMOELÉTRICOS	75
4.3 ETAPAS DA CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	96
4.4 TESTES DE SENSIBILIDADE E DETECÇÃO	100
5. PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA	105
6. CONCLUSÕES E PESPECTIVAS	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

1. INTRODUÇÃO

A prática de ensino de Física no Ensino Médio, inserido em um panorama social em que o desenvolvimento tecnológico tem crescido de maneira exponencial, tem conduzido seus docentes a frequentes introspecções para reavaliar seu posicionamento didático-pedagógico adotado até então.

Sem dúvida, esta reavaliação e reposicionamento tornam-se imperativos tendo em vista que o desenvolvimento científico e tecnológico vivenciado pelos alunos em seu cotidiano na forma de tecnologia consumível tais como celulares (smartphones), tablets, smart tv, videogames, etc., aliadas ao volume e velocidade de geração e divulgação de informações pelas diferentes mídias disponíveis atualmente como, além da tradicional televisão, rádio e jornais impressos, temos também a internet e as redes sociais aí existentes e é uma realidade em tempo integral que não se pode ignorar.

Como consequência, um grande número de autores defende a ideia que para a compreensão desta realidade, atualmente vivenciada pelos alunos, seja necessário que o Estudo da Física Moderna e Contemporânea (FMC) contemplado no currículo do Ensino Médio seja revisto, ampliado, repensado, adequado e adaptado. No Brasil, encontramos este posicionamento explicitado nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio:

Mesmo considerando os obstáculos a superar, uma proposta curricular que se pretenda contemporânea deverá incorporar como um dos seus eixos as tendências apontadas para o século XXI. A crescente presença da ciência e da tecnologia nas atividades produtivas e nas relações sociais, por exemplo, que, como consequência, estabelece um ciclo permanente de mudanças, provocando rupturas rápidas, precisa ser considerada. (BRASIL, 2000, p. 12).

A questão da introdução do ensino da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio já era objeto de estudo e reestruturação há algum tempo, como afirma Aubrecht (1976) apud Ostermann e Moreira (2000):

Nos Estados Unidos e, provavelmente, em nível internacional, a preocupação com o ensino de FMC nas escolas e nos cursos universitários introdutórios começou, ou intensificou-se, com a “Conferência sobre o Ensino de Física Moderna”, realizada no Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois, em abril de 1986, na qual, aproximadamente, 100 professores interagiram com cerca de 15 físicos. O objetivo específico da conferência era promover a abordagem de tópicos de pesquisa em Física, em especial Física de Partículas e Cosmologia, no ensino médio e em cursos

introdutórios de graduação. (AUBRECHT, 1986, apud OSTERMANN e MOREIRA, 2000).

Uma vez que o conhecimento científico está em constante evolução e transformação, tanto o conteúdo a ser ensinado assim como o processo ensino-aprendizagem devem ser adaptados e acompanhados pelo professor, como argumenta Pietrocola (2008a) (grifo nosso):

Os currículos de ciências, mais do que os de outras áreas de conhecimento, ressentem pressões por mudanças. Isso porque, além das influências externas, originadas no sistema de ensino ao qual pertencem, somam-se, muitas vezes, demandas internas à própria área do saber. Em primeiro lugar, os conhecimentos científicos estão em constante evolução e transformação. Isso implica que, de tempos em tempos, existe a necessidade de revisão dos conteúdos a serem ensinados. Em segundo lugar, há questionamentos originados da falta de eficiência inerente ao processo de ensino-aprendizagem. *Professores estão permanentemente atentos ao sucesso do ensino que praticam, seja em termos de motivação e interesse dos alunos, seja da pertinência e utilidade dos conteúdos.* (PIETROCOLA, 2008a, p.2).

Assim, acreditamos que a motivação e o interesse do aluno sejam catalizadores do aprendizado. Sendo assim, toda prática pedagógica que venha despertar estes dois elementos, pode vir a ser de grande valia para a atividade didático-pedagógica.

O objetivo que pretendemos alcançar com a construção de um instrumento educacional para o ensino do tópico radioatividade, englobado pelo tema Física Moderna e Contemporânea, é o de aproximar os diferentes temas tratados no assunto (o que é a radioatividade em si, decaimento radioativo, acidentes nucleares, aplicações da radioatividade, uso bélico, uso na medicina, história da radioatividade, etc.) com a experiência pessoal do aluno de perceber a radioatividade com seus sentidos, isto é que possam “ver” e “ouvir” o fenômeno radioativo.

Queremos dizer que quando o aluno associa teorias e conteúdos com algo vivenciado pelos seus próprios sentidos, obtém-se uma aprendizagem significativa e que não se consegue, frequentemente, com conceitos puramente abstratos, constituindo aí um obstáculo epistemológico fenomenológico a ser superado e que acreditamos que uma atividade experimental de demonstração/experimentação, utilizando nosso instrumento educacional, venha auxiliar nesta superação.

Araújo e Adib (2003a), em análise dos trabalhos publicados entre 1992 e 2001 sobre a utilização de experimentação como estratégia de ensino de física na Revista Brasileira de Ensino de Física (SBF), em seu encarte Física na Escola e também no Caderno Catarinense de

Ensino de Física (UFSC), considera, em sua “Análise do grau de direcionamento das atividades” (p.181), no subtítulo “Atividades de Demonstração/Observação” (grifo nosso):

Uma das modalidades da experimentação mais utilizadas pelos autores investigados refere-se ao emprego de atividades de demonstração. Provavelmente, a característica mais marcante dessas atividades é a ***possibilidade de ilustrar alguns aspectos dos fenômenos físicos abordados, tornando-os de alguma forma perceptíveis e com possibilidade de propiciar aos estudantes a elaboração de representações concretas referenciadas.*** (...) Assim, na linha de proposta de atividades de demonstração encontram-se autores que salientam justamente a importância dessas atividades para ilustrar e ***tornar menos abstratos os conceitos físicos abordados, ao mesmo tempo que torna mais interessante, fácil e agradável o seu aprendizado, motivando a participação dos alunos.*** (ARAÚJO e ABIB, 2003b, p. 181).

Acreditamos então que uma atividade pedagógica em que a demonstração do fenômeno físico abordado possa ser observado pelo aluno, redundará em acréscimo de interesse e participação, facilitando o aprendizado.

2. REFERENCIAIS TEÓRICOS

2.1 A TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA E OBSTÁCULOS EPISTEMOLÓGICOS

No contexto educacional, optamos por situar nosso trabalho na estrutura filosófica da Transposição Didática direcionada ao ensino de física moderna e contemporânea com o intuito de auxiliar a superar o obstáculo epistemológico relacionado à questão da fenomenologia.

Optamos pelo texto base apresentado por Pietrocola (2008b) intitulado “*Inovação Curricular em Física: Transposição Didática de Teorias Modernas e a Sobrevivência dos Saberes*”, por considerar que nosso trabalho encontra-se aí contextualizado, como pretendemos mostrar adiante.

A Transposição Didática são as modificações ou transformações adaptativas que o Saber Sábio, produzido pelos cientistas (conhecimento científico) sofre até chegar à sala de aula (Saber Ensinado) passando pelos programas e livros didáticos (Saber a Ensinar), como nos mostra Pietrocola (2008c):

A idéia de Transposição Didática foi formulada originalmente pelo sociólogo Michel Verret, em 1975. Porém, em 1980, o matemático Yves Chevallard retoma essa idéia e a insere num contexto mais específico, tornando-a uma teoria e com ela analisando questões importantes no domínio da Didática da Matemática. Em seu trabalho, Chevallard (1991) analisou como o conceito de “distância” nasce no campo da pesquisa em matemática pura e reaparece modificado no contexto do ensino de matemática. Ele define a Transposição Didática como um instrumento eficiente para analisar o processo através do qual o saber produzido pelos cientistas (o Saber Sábio) se transforma naquele que está contido nos programas e livros didáticos (o Saber a Ensinar) e, principalmente, naquele que realmente aparece nas salas de aula (o Saber Ensinado). Chevallard analisa as modificações que o saber produzido pelo “sábio” (o cientista) sofre até ser transformado em um objeto de ensino. (PIETROCOLA, 2008c, p. 6).

Neste mesmo sentido, Polidoro e Stigar (2010) escrevem:

O termo foi introduzido em 1975 pelo sociólogo Michel Verret e rediscutido por Yves Chevallard em 1985 em seu livro *La Transposition Didactique*, onde mostra as transposições que um saber sofre quando passa do campo científico para o campo escolar. Chevallard conceitua “Transposição Didática” como o trabalho de fabricar um objeto de ensino, ou seja, fazer um objeto de saber produzido pelo “sábio” (o cientista) ser objeto do saber escolar. A Transposição Didática, em um sentido restrito, pode ser entendida como a passagem do saber científico ao saber ensinado.

Tal passagem, entretanto, não deve ser compreendida como a transposição do saber no sentido restrito do termo: apenas uma mudança de lugar. Supõe-se essa passagem como um processo de transformação do saber, que se torna outro em relação ao saber destinado a ensinar. (POLIDORO e STIGAR, 2010, p. 154).

Dentro do contexto do Saber Ensinado, os valores didáticos são predominantes e o docente é responsável por esta transformação do saber. Conforme escreve Pietrocola (2008d) (grifo nosso):

O saber presente nos livros e programas não necessariamente coincide com aquele produzido em sala de aula. Ou seja, quando o professor efetivamente ensina em suas aulas, tendo como base o Saber a Ensinar, ele produz o Saber Ensinado. Nessa esfera há, portanto, o predomínio de valores didáticos, ***pois agora a finalidade dessa transposição está voltada para o trabalho do professor em sua prática diária.*** (PIETROCOLA, 2008d, p.10).

Neste mesmo sentido, Nunes, Silva e Carvalho (2010) consideram (grifo nosso):

A escola, dentre suas principais funções, tem o papel da transmissão de conhecimentos produzidos pela humanidade. Para ocorrer esta comunicação, se faz necessário que o conhecimento seja transformado. O processo de transformação do conhecimento coloca diversas problemáticas, dentre elas, a diferença entre os elementos do conhecimento produzido e do conhecimento a ser aprendido. ***Um grande desafio do professor é transformar um conhecimento do saber em um conteúdo didático.*** De fato, as teorias complexas com suas propriedades e características, precisam ser preservadas e transformadas para serem assimiladas pelos alunos. ***Para isso os conteúdos devem sofrer a ação didática criativa do professor de forma a transformar um saber científico em saber ensinado.*** (NUNES, DA SILVA e DE CARVALHO, 2010, p.12).

Entretanto, neste exercício de transposição didática em sala de aula, o professor depara-se com vários obstáculos para realizá-la. Entre os obstáculos encontrados, existem os ligados ao ensino de Física Moderna e Contemporânea e que se diferenciam daqueles encontrados no ensino da Física Clássica.

Na mesma pesquisa, Pietrocola (2008e) sistematiza e classifica os obstáculos como sendo de dois tipos: *obstáculos epistemológicos* e *didático-pedagógicos*.

Sendo os obstáculos epistemológicos para a introdução de Teorias Modernas e Contemporâneas: i) Fenomenologia, ii) Linguagem/formalização, iii) Estruturação Conceitual, iv) Ontologia de Base.

Enquanto que os obstáculos didático-pedagógicos seriam: i) Hierarquia Conceitual de Pré-requisitos, ii) Didática Intuitiva dos Professores, iii) Seleção de Conteúdos, iv) Tipos de Atividades Propostas, v) Avaliação.

Para os objetivos deste trabalho vamos nos atentar aos obstáculos epistemológicos, e mais especificamente aos relacionados à fenomenologia, proposto pelo autor, dado que a construção da câmara de Wilson eletrônica visa, fundamentalmente, ser um instrumento educacional auxiliar no processo ensino-aprendizagem de Física Moderna.

Neste sentido, Pietrocola (2008f) justifica:

A intenção de propor a existência de obstáculos epistemológicos, especialmente ligados ao ensino/aprendizagem de Física Moderna e que diferem daqueles eventualmente ligados à Física Clássica, parte da idéia, que pretendemos validar, de que:

- i) A Física Clássica parte de idéias forjadas a partir do cotidiano;
 - ii) A Física Moderna decorre da exaustão de idéias clássicas.
- (PIETROCOLA, 2008f, p.24).

Ainda com respeito ao obstáculo relacionado à fenomenologia da FMC, nos escreve (grifo nosso):

A grande maioria dos fenômenos sobre os quais estão alicerçados os conteúdos da Física Clássica são acessíveis no cotidiano e em laboratórios didáticos na forma de atividade experimentais simples. Os fenômenos sobre os quais se fundamentam as Teorias Clássicas e Contemporâneas pertencem a um mundo para além dos limites do cotidiano: do muito pequeno, do muito rápido, do muito antigo etc. *Tais fenômenos não são acessíveis no cotidiano, nem passíveis de serem apresentados em laboratórios didáticos por meio de experimentos simples.* Apenas para ilustrar essas afirmações, enquanto um gotejar que gera uma onda circular num lago ou numa cuba de ondas pode ser utilizado para iniciar uma discussão sobre o conceito de onda mecânica, qual fenômeno pode ser utilizado para se discutir a Natureza Dual da Luz? (PIETROCOLA, 2008g, p. 25).

Em seu trabalho, Siqueira (2012a) aponta, entre as dificuldades à inserção da Física Moderna e Contemporânea, a falta de materiais didáticos (grifo nosso):

É necessário o desenvolvimento de material didático para abordagem dos temas de FMC na sala de aula, como, por exemplo, textos, atividades experimentais, recursos audiovisuais, simulações, entre outros. Isso é necessário porque as teorias modernas e contemporâneas tratam de conceitos abstratos, que distanciam da física do senso comum e, por isso, os professores têm dificuldade em abordá-los em sala de aula. Além disso, quando há atividades, elas são complexas, abstratas e de alto custo, inviabilizando sua utilização nas escolas brasileiras. *Somente com o desenvolvimento de materiais, é possível mostrar uma direção para abordar esses tópicos em sala de aula, fornecendo subsídios aos professores para sua prática.* (SIQUEIRA, 2012a, p.70).

Em relação à questão da dificuldade do “formalismo matemático sofisticado” da FMC, Siqueira (2012b) propõe (grifo nosso):

Devido ao alto nível exigido da matemática nas teorias modernas e contemporâneas, torna-se inviável tratar esses tópicos nesta perspectiva, pois essa estrutura matemática está além daquelas estudadas pelos alunos da Educação Básica. *Por isso, é necessário que se pense em uma perspectiva fenomenológica para a FMC.* (SIQUEIRA, 2012b, p. 69).

Não obstante disto e, mais especificamente, o estudo do tema radioatividade e a dificuldade na transposição didática no ensino médio é objeto de vários estudos. Dentre eles, encontramos o estudo de Araújo e Dickman (2013) onde uma investigação de sondagem foi realizada junto a professores de Física, Química e Biologia, na forma de questionário, com o intuito de verificar sua prática docente, seu conhecimento sobre energia nuclear e radiação, e as dificuldades que eles encontram quando ensinam tópicos relacionados ao assunto.

Nas considerações finais, escreve:

Daqueles que se declararam com muita dificuldade, muitos não são formados na área em que atuam e reclamam da falta de materiais didáticos com linguagem acessível, com discussões abrangentes, objetivas, atraentes e de fácil compreensão, ao contrário dos materiais incompletos e cheios de exercícios numéricos aos quais eles têm acesso em suas escolas(...) (DE ARAÚJO e DICKMAN, 2013, p.7).

Em uma análise de artigos referentes ao ensino e aprendizagem de radioatividade em periódicos nacionais de ensino de Física, Química e Ciências entre 1990 e 2012, Silva, Campos e Almeida (2012a) constatam que foram encontrados apenas 16 relativos ao tema. Como descrevem (grifo nosso):

No período escolhido para investigação, foram encontrados 16 artigos sobre ensino e aprendizagem de radioatividade, nos periódicos selecionados. Dos trabalhos encontrados, *há uma forte tendência em estratégias e propostas de ensino com ênfase na História da radioatividade e suas aplicações, principalmente a energia nuclear, além de propostas de analogias e análise de livros didáticos.* (DA SILVA, CAMPOS e DE ALMEIDA, 2012a, p.4).

A análise feita destes artigos corrobora com a nossa ideia de alocar esforços para a produção de material didático que venha ajudar preencher uma lacuna existente no ensino e aprendizagem de radioatividade em sala de aula. Neste sentido, Silva, Campos e Almeida (2012b) consideram (grifo nosso):

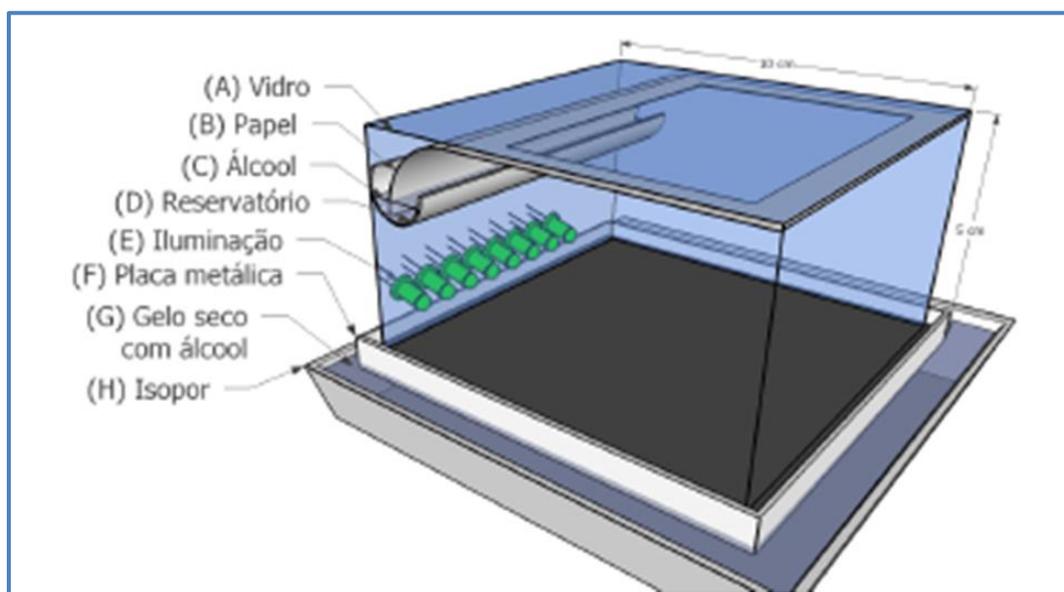
Percebemos que grande parte dos artigos analisados trazem o desenvolvimento e aplicação de estratégias didáticas além de propostas de analogias, bem como análise de livros didáticos. ***Possivelmente, essa tendência deve-se ao fato das limitações do tema quanto a compreensão do conhecimento químico em nível macroscópico e microscópico***, por se tratar de fenômenos que envolvem emissões radioativas. ***Para minimizar essas limitações, sugere-se o uso de simulações, software, vídeos, dentre outros recursos didáticos, como uma forma de levar os alunos a entrar em contato com esses fenômenos.*** (...) Acreditamos que ***estratégias inovadoras*** de ensino e aprendizagem possam contribuir na tentativa de minimizar as dificuldades e limitações da radioatividade quando esta está inserida no contexto escolar. ***As essas estratégias podem ser somados recursos didáticos que, em certa medida, preenchem a lacuna existente na compreensão dos fenômenos radioativos a nível macroscópico.*** (DA SILVA, CAMPOS e DE ALMEIDA, 2012b, p.10).

Não podemos ignorar a existência de instrumentos educacionais que permitem a observação da fenomenologia das radiações pelos alunos. Encontramos várias propostas e realizações de câmaras de difusão na internet, em trabalhos e artigos.

Notadamente, encontramos no trabalho de Laganá (2011) a descrição para a construção de uma câmara de difusão (Figura 1), utilizando como elemento resfriador dióxido de carbono sólido (gelo seco), cuja descrição é:

Um recipiente de vidro (A) é apoiado sobre uma placa metálica (F) parcialmente submersa numa mistura de álcool comum e gelo seco (G), que se encontra armazenada em um recipiente de isopor (H). Um reservatório (D) mantém um pedaço de papel (B) afixado na parte superior interna do vidro constantemente embebido em álcool isopropílico (C). (LAGANÁ, 2011).

Figura 1 – Câmara de difusão com gelo seco



Fonte: (<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/333302.pdf>)

Decorre daí, que para sua utilização em sala de aula como um instrumento didático, o professor deverá ter à sua disposição o dióxido de carbono sólido, que, dependendo de sua localidade, nem sempre estará disponível e por ser um produto altamente sublimável, a perda do material é grande.

A nossa câmara de Wilson eletrônica propõe contornar este problema, pois, dispensando o uso de gelo seco, permite total mobilidade, bastando uma tomada elétrica à disposição.

2.2 CONSTRUTIVISMO, METODOLOGIA INVESTIGATIVA E EXPERIMENTAÇÃO

Na revisão da literatura encontramos farto material em que este enfoque é adotado. Entre os quais, a título de exemplificação, vamos destacar alguns mais emblemáticos.

Entre as tendências epistemológicas relacionadas às atividades práticas, destacou-se o chamado *Ensino por Investigação* (ou tratado também como: ensino por descoberta; aprendizagem por projetos; questionamentos; resolução de problemas, dentre outras) originado das ideias do filósofo John Dewey como descrito também por Zômpero e Laburú (2011):

Dentre essas tendências, pode ser citado o ensino por investigação, conhecido também como “inquiry”, que recebeu grande influência do filósofo e pedagogo americano John Dewey. Na literatura, encontram-se

diferentes conceituações de inquiry, como: ensino por descoberta; aprendizagem por projetos; questionamentos; resolução de problemas, dentre outras. A perspectiva do ensino com base na investigação possibilita o aprimoramento do raciocínio e das habilidades cognitivas dos alunos, e também a cooperação entre eles, além de possibilitar que compreendam a natureza do trabalho científico. (ZÔMPERO e LABURÚ, 2011, p. 68).

É importante caracterizar a Metodologia Investigativa, dado que, à primeira vista, esta não tem limites claramente definidos quanto à sua aplicação em sala de aula, variando amplamente dependendo do enfoque dos pesquisadores que tratam do assunto.

A combinação dos fatores envolvidos neste processo de ensino evoca uma combinação ativa e cognitiva, no que concordamos com os dizeres de Munford e Lima (2007):

Para os autores, fazer e compreender a investigação científica significa combinar conceitos e teorias científicas com processos, tais como observação, inferência, experimentação. Nesse caso, não basta fazer observações e levantar hipóteses sobre mudanças nas características de uma população de pássaros, nas características de um material ou no movimento de um objeto. Fazer ciências significa se apropriar de teorias do campo científico para investigar e explicar esses fenômenos, tais como a teoria da seleção natural, a teoria atômica ou as leis de Newton. Esse olhar “impregnado” de teorias científicas é parte essencial do “fazer científico” que muitas vezes não recebe a necessária articulação no ensino. (MUNFORD e LIMA, 2007, p. 11).

A atividade prática mostrou-se eficiente e motivador instrumento para o aprendizado de Física, abordando ainda o papel da formação continuada dos professores de física, como nos mostra Coelho e Nunes (2008) (grifo nosso):

A falta de apoio material e pedagógico das escolas para o desenvolvimento de metodologias que privilegiem atividades experimentais investigativas, bem como limitações na formação acadêmica do professor em relação ao saber experimental são fatores que contribuem para a ausência ou realização não sistemática de experimentação na realidade escolar do ensino de Física nos níveis Fundamental e Médio. A formação continuada tem, assim, um importante papel por possibilitar aos professores o conhecimento de novas metodologias aplicáveis ao ensino experimental de Física. (COELHO e NUNES, 2008, p. 9).

Portanto, com a construção do instrumento didático, pretendemos colaborar com o desenvolvimento de práticas experimentais referentes aos fenômenos envolvendo a estrutura da matéria e a radioatividade.

3. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS

3.1 BREVE HISTÓRICO DA RADIOATIVIDADE

Uma pequena abordagem histórica sobre a estrutura da matéria e radioatividade faz-se necessária, uma vez que esses conceitos deverão ser tratados no capítulo correspondente à sugestão de aplicação didática, seção 5.

Para chegarmos à instabilidade natural e artificial do núcleo atômico, com as emissões radioativas correspondentes, passando pelo processo de fusão e fissão nuclear até as aplicações pacíficas e não pacíficas da energia nuclear, o aluno deverá ser conduzido a uma retrospectiva histórica relativa à busca das ciências experimental e teórica para um modelamento da estrutura da matéria e, mais especificamente, a radioatividade.

As questões relativas aos acidentes nucleares como os ocorridos em Goiânia, Chernobyl, Three Mile Island, Fukushima e outros menos divulgados, poderão ser tratados no capítulo da aplicação didática, objetivando suscitar debates junto aos alunos sobre os benefícios e malefícios do uso da energia nuclear.

Limitar-nos-emos, então, ao aspecto cronológico das questões científicas que surgiram ao longo da história e as abordagens teóricas e experimentais decorrentes.

A história da radioatividade está logicamente relacionada à história da modelagem atômica e remonta ao Atomismo Grego com Leucipo e Demócrito, filosofia formulada no século V a.C. onde já se concebia a ideia de átomo. Porto (2013) destaca:

Para Leucipo e Demócrito, o mundo material é composto de infinitos entes minúsculos, incriáveis e indestrutíveis, denominados átomos, que se movem incessantemente por um vazio e não possuem outras propriedades além de tamanho e forma geométrica. Nessa concepção, os objetos que se colocam diante de nossos sentidos são, na realidade, formados pela combinação de muitos desses átomos. (PORTO, 2013).

A hipótese atômica foi retomada somente no século XIX com os pesquisadores em química, destacando Jhon Dalton, que em 1808 apresentou a teoria atômica quando da publicação de seu livro “A New System of Chemical Philosophy”.

Uma observação interessante pode ser encontrada no trabalho de Viana (2007):

É interessante destacar que a primeira edição de A New System of Chemical Philosophy, publicada em 1808, apresenta poucas páginas

dedicadas à explicação da teoria atômica (pp. 162 – 168). Uma dificuldade envolvida no estudo é que cerca de 75 % dos originais de Dalton foram queimados durante a Segunda Guerra Mundial. (VIANA, 2007, p. 32).

Dalton procurou então explicar a Lei da Conservação da Massa de Lavoisier onde se observa que numa reação química não ocorre variação de massa e, portanto a massa dos produtos obtidos é igual à soma das massas dos reagentes e também a Lei das Proporções Definidas de Proust em que uma dada substância contém seus elementos constituintes na mesma proporção em massa.

Para os objetivos deste trabalho, destacamos a interpretação atual dos postulados de Dalton:

- Toda matéria é feita de átomos. Esses corpos, indivisíveis e indestrutíveis, constituem as partículas finais da química.
- Todos os átomos de um dado elemento são idênticos, não só quanto à massa, mas também quanto às outras propriedades. Átomos de elementos diferentes têm massas diferentes e propriedades diferentes.
- Os compostos se formam pela combinação de duas ou mais espécies diferentes de átomos. Os átomos se combinam na razão de números inteiros pequenos, por exemplo, um átomo de A com um átomo de B, dois átomos de A com um átomo de B.
- Os átomos são as unidades das mudanças químicas. Uma reação química envolve apenas combinação, separação e rearranjo de átomos, mas os átomos não são criados, nem destruídos, nem divididos, ou convertidos em outras espécies durante uma reação química.

Uma interessante observação com relação à teoria atômica de Dalton pode ser encontrada no texto:

A teoria atômica de Dalton, porém, não teve uma aceitação pronta e universal; muito pelo contrário. A determinação experimental dos pesos atômicos permaneceu precária por muito tempo, e a confusão que frequentemente se fazia entre átomos e moléculas, ajudou a manter a incerteza. Por isso, durante a maior parte do século XIX preferiu-se trabalhar com o conceito de peso equivalente das espécies químicas, no lugar de peso atômico ou molecular. Só nas últimas décadas do século XIX é que a situação começaria a esclarecer-se e a teoria atômica de Dalton passaria a ocupar pouco a pouco o lugar de proeminência que ela goza na Química. (HAINZENREDER e SALGADO, 2014).

No decorrer do século XIX diversos trabalhos coadjuvaram à teoria atômica. Em 1811 Amadeo Avogadro, com a finalidade de interpretar as Leis Volumétricas de Gay-Lussac, estabeleceu a hipótese da existência de moléculas que correspondem ao agrupamento de átomos e que gases que contêm moléculas formadas por um único átomo são

monoatômicos, de dois átomos são diatômicos, etc. Após 1834 a interpretação das Leis de Eletrólise de Michael Faraday, permitiu a conclusão que os átomos transportassem cargas elétricas. São elas:

- 1ª Lei: A massa de uma substância eletrolisada é diretamente proporcional à quantidade de eletricidade aplicada à solução.

- 2ª Lei: A mesma quantidade de eletricidade irá eletrolisar massas de substâncias diferentes que serão proporcionais aos respectivos Equivalente-grama de oxirredução (E).

No ano de 1869 o químico russo Dmitri Ivanovich Mendeleev classificou os elementos numa tabela periódica de acordo com seus pesos atômicos. Na classificação feita por Mendeleev haviam espaços vazios, prevendo assim a descoberta de novos elementos.

Outros estudos importantes colaboraram para a formação de hipótese da estrutura da matéria, mais especificamente o átomo.

Em 1878, o cientista inglês Willian Crookes construiu um dispositivo formado por uma ampola de vidro com eletrodos nas extremidades para investigações de descargas elétricas através de gases à baixa pressão. Suas observações resultaram na proporcionalidade entre a condutividade e a pressão do gás. Oliveira e Fernandes (2006a) escrevem:

Nesses estudos, verificou-se que se a pressão dos gases estivesse próxima de 10 mmHg não haveria condução de eletricidade. Mas, a partir dessa pressão e até próximo de 1 mmHg, os gases passavam a conduzir eletricidade, o que podia ser percebido pelo aparecimento de um feixe luminoso saindo do cátodo para a região oposta da ampola ou podia ser medido com instrumentos de aferição de fluxo de corrente. (OLIVEIRA e FERNANDES, 2006a, p. 9).

Investigando as propriedades deste feixe luminoso, Crookes observou que eles se propagavam em linhas retas, causavam fosforescência nos objetos sobre os quais são aplicados e produziam grande quantidade de calor no impacto. Acreditou ter descoberto um quarto estado da matéria, que ele denominou de "matéria radiante".

Posteriormente, esta matéria radiante mencionada por Crookes seria considerada como um quarto estado da matéria, como descreve Nelson (2013):

O plasma, hoje conhecido como o quarto estado da matéria, foi identificado primeiramente (1879) por Sir. William Crookes em um tubo, tubo de Crookes, e inicialmente denominado de matéria radiante. (NELSON, 2013).

Em 1886, Gotthilf-Eugen Goldstein utilizando uma ampola similar à de Crookes, mas acrescentado perfurações no cátodo, pode observar a existência de raios em sentido contrário aos raios catódicos os quais chamou de “raios canais” devido ao fato destes passarem pelos “canais” ou orifícios do cátodo. Com relação a este experimento, Oliveira e Fernandes (2006b) consideram:

Noutro experimento, Goldstein utilizou uma ampola de Crookes com um cátodo perfurado e observou novos feixes luminosos que pareciam sair desses furos ou canais e se dirigiam em sentido inverso aos raios catódicos. Goldstein não sabia o que formava esses feixes luminosos, porém, acreditando tratar-se de radiações, deu o nome de raios canais aos constituintes dos feixes emitidos a partir dos canais dos cátodos das ampolas de Crookes. O fato, porém, é que não existiam dados suficientes para uma definição sobre o que era observado nos experimentos, surgindo um conflito de opiniões em relação aos constituintes dos raios catódicos e dos raios canais: entre cientistas alemães, prevalecia a ideia de que seriam radiações e, entre os britânicos, de que seriam partículas. (OLIVEIRA e FERNANDES, 2006b, p. 10).

Os experimentos realizados por Joseph John Thomson em 1897 (Figura 2) puseram fim a esta polêmica, demonstrando que os raios catódicos eram elétrons, portanto partículas de carga negativa e que os “raios canais” eram íons carregados positivamente.

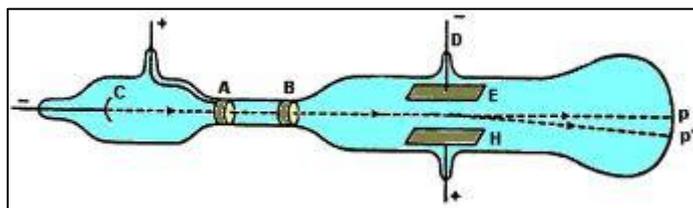
Figura 2 - Ampola utilizada por Thomson



Fonte: (<http://cuantozombi.com/2012/10/01/el-experimento-de-thompson/>)

Utilizando campos elétricos e magnéticos sobre os raios catódicos na ampola de Crookes, Thomson pode definir a relação entre a carga e a massa do elétron (Figura 3).

Figura 3 – Experimento de Thomson



Fonte: (www.feiradeciencias.com.br)

As pesquisas de Thomson e Crookes são descritas sucintamente no trabalho de Caruso e Oguri (1997):

Desde a metade do século passado, físicos como Crookes e J. J. Thomson dedicaram-se à tentativa de entender e explicar a natureza do fecho que aparece dentro desses tubos. Através de uma série de experimentos, chegou-se à conclusão de que o feixe luminoso era constituído de partículas carregadas. Em 1897, Thomson conseguiu medir, com boa precisão, a razão entre a carga e a massa destas partículas, encontrando um valor muito maior que para íons em eletrólises, indicando que a ordem de grandeza da massa dessas partículas era muito pequena. Ainda neste mesmo artigo, ele verificou que estes corpúsculos carregados eram exatamente os mesmos, quaisquer que fossem os elementos do catodo, do anodo e do gás dentro do tubo. Estes pareciam ser constituintes universais da matéria (os elétrons), mostrando empiricamente que o átomo não é indivisível. Dois anos mais tarde, Thomson pode estimar que a massa dos elétrons (m_e) era 1840 vezes menor que a do íon de hidrogênio (m_p), o próton, termo introduzido na Física somente em 1919. (CARUSO e OGURI, 1996, p. 328).

Posteriormente, em 1908, engenhosamente, Robert Andrews Millikan, determinou a carga do elétron.

Ainda no século XIX, em 8/11/1895, Wilhelm Conrad Roentgen repetindo o experimento de Thomson com o objetivo de detectar a radiação eletromagnética de alta frequência prevista por Heinrich, descobriu um tipo de radiação que atravessava corpos opacos, produzia luminescência e sensibilizava chapas fotográficas (Figura 4). Como eram de natureza desconhecida, foram denominados de Raios X.

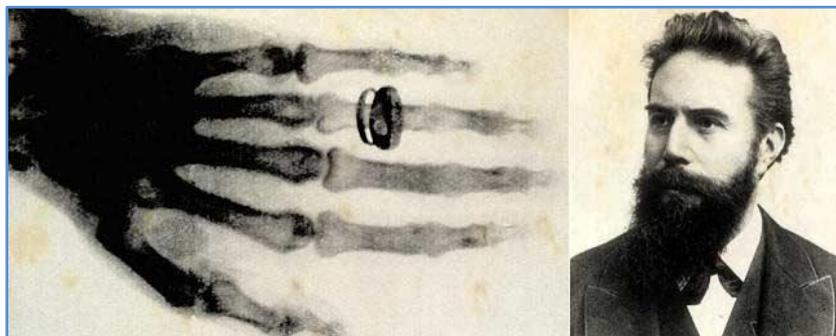
Roentgen assim descreve algumas propriedades da radiação que acabara de descobrir: “Ela produzia luminescência em certos materiais fluorescentes, sensibilizava chapas fotográficas, mas em si era invisível ao olho humano, não parecia sofrer refração, nem reflexão, nem polarização. Não se tratava de luz (por ser invisível e atravessar grandes espessuras de madeira ou papel), não era igual aos raios catódicos (não sofria desvio com ímãs e tinha poder de penetração muito superior), nem aos raios ultravioleta ou infravermelho (pelo seu poder de penetração)”. Com base nessas

observações, Roentgen chegou à conclusão de que se tratava de um novo tipo de raio invisível, com poder de penetração ainda desconhecido, capaz de atravessar materiais opacos à luz e a outras radiações conhecidas (raios catódicos, raios ultravioleta e infravermelho). (LIMA, AFONSO e PIMENTEL, 2008, p. 263).

Roentgen, recebendo o primeiro premio Nobel de Física pelos seus trabalhos, enfrentou a desconfiança de cientistas, como nos descreve Lima, Afonso e Pimentel (2009):

Por esse trabalho, Roentgen recebeu o 1º Prêmio Nobel de Física, em 1901. No entanto, enfrentou a desconfiança de cientistas. Muitos pesquisadores famosos como Herbert Jackson (1863-1936), Johann Hittorf (1824-1914), Eugen Goldstein (1850-1930), Willian Crookes (1832-1919) e, particularmente, Philipp Lenard, teriam detectado fenômenos de fluorescência próximos a tubos de descarga. Contudo, ou interpretaram erroneamente aquele fato, ou não se detiveram na análise do fenômeno. Ao contrário, Roentgen dedicou-se intensamente ao estudo do mesmo. Ele também optou por responder aos críticos com atitudes nobres: doou o dinheiro que ganhou com o Prêmio Nobel à Universidade de Wurzburg. “Eu considero que o trabalho de uma universidade deve beneficiar a todos, sem idéia de lucro”, afirmou na época. (LIMA, AFONSO e PIMENTEL, 2008, p. 267).

Figura 4 - Roentgen e a radiografia da mão de sua esposa



Fonte: (<http://veja.abril.com.br/historia/olimpiada-1896/ciencia-raio-x-wilhelm-rontgen.>)

Em 1896, H. Poincaré apresentou os resultados dos estudos de Roentgen na Academia de Ciências de Paris e na “Revue Générale des Sciences”. Henri Becquerel, entusiasmado com a apresentação de Poincaré, intensificou seus estudos sobre materiais fosforescentes e fluorescentes, como descreve Martins (1984).

Henri Becquerel (1852-1908), entusiasmado com a apresentação de Poincaré, intensificou seus estudos sobre materiais fosforescentes e fluorescentes. No mesmo ano de 1896 Becquerel estabeleceu a partir de seus

trabalhos que os sais de urânio emitiam radiação análoga às do raio X e que impressionavam chapas fotográficas. (MARTINS, 1984, p. 07).

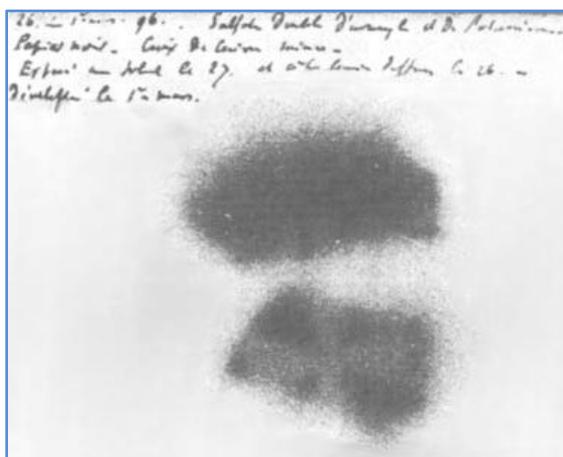
Historicamente, atribui-se a descoberta da radioatividade a Henri Becquerel, mas vários autores defendem que estudos e conclusões semelhantes já haviam sido realizados.

Neste resumo histórico preferimos manter os estudos de Becquerel sobre os materiais fosforescentes e fluorescentes, juntamente com os trabalhos do casal Curie, como marco histórico.

A clássica história de como, por acidente, Becquerel percebeu a impressão de chapa fotográfica por sais de urânio (Figura 5) é descrita por Martins (2004), que reproduz em seu trabalho a parte do artigo em que Becquerel relata o fato ocorrido:

Insistirei particularmente sobre o seguinte fato, que me parece muito importante e estranho ao domínio dos fenômenos que se esperaria observar. Os mesmos flocos cristalinos, colocados junto às chapas fotográficas, nas mesmas condições, isolados pelos mesmos anteparos, mas sem receber excitação pela incidência de radiação e mantidos no escuro, ainda produzem as mesmas impressões fotográficas. Este foi o modo pelo qual fui levado a fazer essas observações: entre os experimentos precedentes, alguns foram preparados na quarta-feira, 26, e na quinta-feira, 27 de fevereiro; e como, nesses dias, o Sol apareceu apenas de modo intermitente, guardei os experimentos que havia preparado e coloquei as chapas com seus envoltórios na obscuridade da gaveta de um móvel, deixando os flocos de sal de urânio em seu lugar. Como o Sol não apareceu novamente nos dias seguintes, no dia 1 de março eu revelei as chapas fotográficas, esperando encontrar imagens muito fracas. Pelo contrário, as silhuetas apareceram com uma forte intensidade. Eu logo pensei que a ação devia ter continuado na obscuridade [...] (BECQUEREL,(1896) apud MARTINS, 2004, p. 507).

Figura 5 - Radiografia dos cristais de sulfato duplo de urânio e potássio



Fonte: (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Ur%C3%A2nio>)

Os raios de Becquerel foram estudados também por Kelvin, Beatle, Smoluchwski, Elster, Geitel, Schm (Martins,1984) e também pelo casal Pierre Curie e Maria Slodowska Curie.

Em 1898, como resultado de suas pesquisas de doutorado, Madame Curie apresenta à Academia Francesa de Ciências suas primeiras constatações acerca da propriedade de ionização do ar pela radiação do urânio, que o elemento tório emitia o mesmo tipo de radiação. Neste sentido, Peduzzi e Cordeiro (2011a), reproduzem a conclusão de Marie Curie (grifo nosso):

Todos os compostos do urânio estudados são ativos e o são, em geral, na proporção em que contêm o urânio. Os compostos do tório são muito ativos. O óxido de tório é até mais ativo que o urânio metálico. [...] Dois minerais de urânio: a pechblenda (óxido de urânio) e a calcolita (fosfato de cobre e uranila) são muito mais ativos que o próprio urânio. ***Este fato é muito interessante e leva a crer que esses minerais possam conter um elemento mais ativo que o urânio.*** Eu reproduzi a calcolita pelo procedimento de Debray com produtos puros; essa calcolita artificial não é mais ativa que qualquer outro sal de urânio. (PEDUZZI e CORDEIRO, 2011a).

O elemento mais ativo que o urânio, viria a ser descoberto posteriormente e na realidade eram dois: o polônio e o rádio. A descoberta destes dois elementos, especialmente o rádio, consolidou a radioatividade, pois o casal Curie já explicava a radioatividade como uma propriedade atômica.

Marie Curie descobriu, ao mesmo tempo em que Schmidt, que o elemento tório apresentava também as mesmas características radioativas do urânio.

Neste cenário, o fenômeno da radioatividade atraía a atenção de vários cientistas, entre eles Ernest Rutherford, que chegando à Universidade de McGill, no Canadá em 20 de setembro de 1898, publicou ainda em janeiro do ano seguinte, um artigo com 54 páginas, considerado hoje como um dos clássicos da literatura científica.

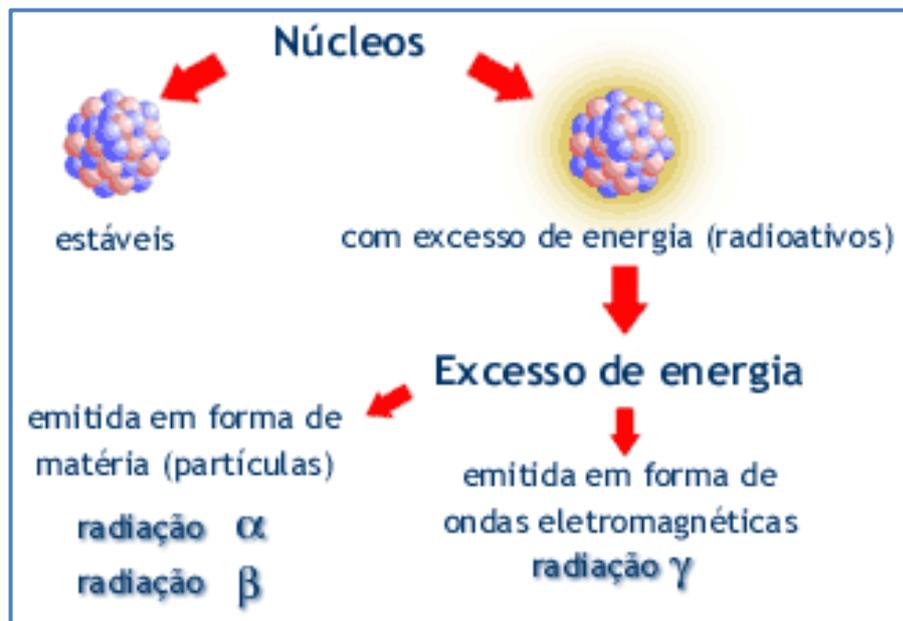
Nesse trabalho, Rutherford demonstra a existência de pelo menos dois tipos de emissões radioativas: *alfa e beta*. Nos anos seguintes descobre que os raios alfa não são propriamente raios e sim partículas exatamente iguais ao núcleo do hélio. Peduzzi e Cordeiro (2011b) relatam (grifo nosso):

Na Universidade de McGill, no Canadá, Rutherford conduz diversos experimentos de natureza elétrica com o urânio e publica, em janeiro de 1899, um trabalho na *Philosophical Magazine* com os resultados obtidos. Dentre eles, pela primeira vez, surgem as denominações *alfa e beta* para dois tipos de radiações. O experimento consistia na medição da radiação que ultrapassava diversas camadas finas de metal. Rutherford conclui: *Esses experimentos mostram que a radiação do urânio é complexa e que estão presentes ao menos dois tipos distintos de radiação - uma que é muito rapidamente absorvida, que será denominada, por conveniência, de radiação alfa, e a outra, de caráter mais penetrante, que será chamada radiação beta.* (PEDUZZI e CORDEIRO, 2011b, p. 3601-3).

Em 1900, o físico francês Paul Ulrich Villard, estudando a radioatividade de alguns elementos, descobriu outra forma de radioatividade que não apresentava carga elétrica, semelhante aos raios X, mas com poder de maior penetração, sendo chamada de *radiação gama*.

A história da radioatividade nos mostra, então, que quando o núcleo de um átomo encontra-se em um estado muito energético este tende a *decair* a um nível mais estável de energia emitindo partículas (alfa e beta) e/ou radiação eletromagnética gama (Figura 6) que será detalhado no próximo item deste capítulo.

Figura 6 – Núcleo estável e instável



Fonte: (Apostila educativa da CNEN: Radioatividade disponível em <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>)

A unidade de energia comumente usada é o elétron-volt (eV) que é a energia adquirida por um elétron quando submetido a uma diferença de potencial de 1 Volt e corresponde a aproximadamente $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joules.

As características principais destas emissões são sumariamente descritas a seguir.

As partículas alfa são idênticas ao núcleo do átomo do gás hélio, isto é, constituída de dois prótons e dois nêutrons sendo, portanto, uma partícula “pesada”.

Segundo Okuno et al. (1982) na interação de uma partícula alfa com átomos de ar, há a perda de 33 eV por ionização. Assim, uma partícula alfa com energia cinética inicial de 4,8 MeV, emitida pelo rádio-226, produz o número de ionizações (Ni):

$$N_i = \frac{4,8 \cdot 10^6 \text{ eV}}{33 \text{ eV}} \cong 145000 \text{ ionizações}$$

A distância que uma partícula percorre num meio até parar é chamada de *alcance* e depende da energia da partícula emitida e da densidade deste meio.

O alcance das partículas alfa é muito pequeno, o que faz com estas sejam facilmente blindadas. Um feixe de partículas alfa de 5 MeV são completamente barradas por uma folha de alumínio de 21 μm .

A tabela a seguir nos dá um comparativo do alcance das partículas alfa em três meios distintos.

Tabela 1 – Alcance das partículas alfa

PARTÍCULAS ALFA ENERGIA (MeV)	ALCANCE (cm)		
	AR	TECIDO HUMANO	ALUMÍNIO
1,0	0,55	$0,33 \cdot 10^{-2}$	0,0032
2,0	1,04	$0,63 \cdot 10^{-2}$	0,0061
3,0	1,67	$1,00 \cdot 10^{-2}$	0,0098
4,0	2,58	$1,55 \cdot 10^{-2}$	0,0105
5,0	3,50	$2,20 \cdot 10^{-2}$	0,0206

Fonte: (Okuno,Caldas e Chow,1982 – adaptado)

As partículas beta são semelhantes massivamente ao elétron (ou à sua antipartícula o pósitron), possuindo carga elétrica unitária. Seu alcance é bem maior que o da partícula alfa decorrente de sua grande velocidade e pequena massa.

O número de ionizações causadas por uma partícula beta num meio é muito menor comparada às ionizações produzidas pelas partículas alfa.

Segundo Eichler, Calvete e Salgado (1997), “Normalmente, durante o seu percurso na matéria, as partículas beta ionizam somente 1% dos átomos ou moléculas que constituem o material, embora sofra colisão com cerca de 8400 átomos a cada centímetro que percorre”.

A tabela a seguir nos dá um comparativo do alcance das partículas beta em três meios distintos.

Tabela 2 – Alcance das partículas beta

PARTÍCULAS BETA	ALCANCE (cm)		
	AR	TECIDO HUMANO	ALUMÍNIO
0,1	12	$1,51 \cdot 10^{-3}$	0,0043
0,5	154	0,18	0,059
1,0	420	0,50	0,15
2,0	840	1,00	0,34
3,0	1260	1,50	0,56

Fonte: (Okuno,Caldas e Chow,1982 – adaptado)

A radiação gama ou raios gama são ondas eletromagnéticas de altíssimo poder de penetração e não produzem ionização diretamente.

Como será abordada posteriormente neste trabalho, veremos que radiação gama interage com a matéria pelo efeito fotoelétrico, efeito Compton e criação de par elétron-pósitron que por sua vez, ionizam o meio.

Um fóton de radiação gama pode percorrer determinada distância sem interagir com a matéria e pode, quando interage, perder toda sua energia nesta interação. A distância que ele percorre com 50% de chance de interagir é chamada de *camada semi-redutora*.

A título de exemplo, a tabela a seguir apresenta as camadas semi-redutoras para raios X ou γ para alguns valores de energia.

Tabela 3 - Camada semi-redutora

RAIOS GAMA	CAMADA SEMI-REDUTORA (cm)	
	TECIDO HUMANO	CHUMBO
0,01	0,13	0,00045

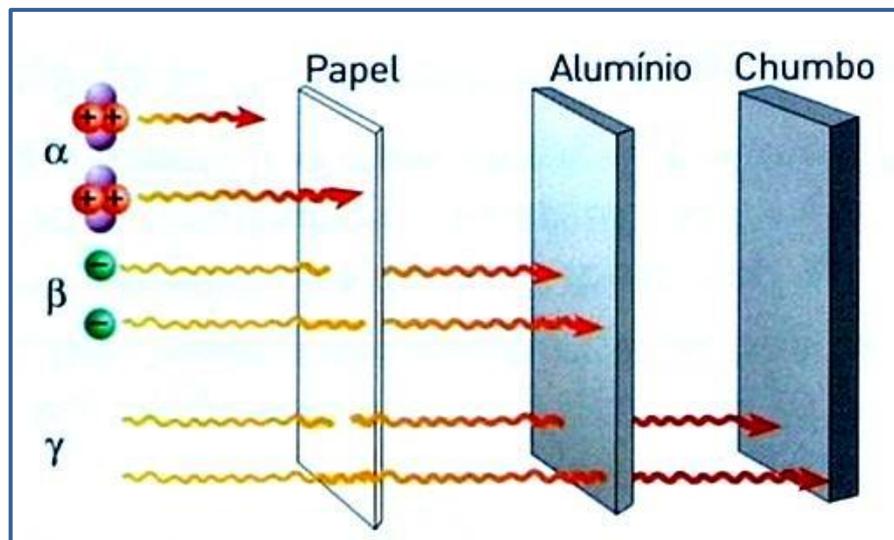
0,05	3,24	0,008
0,5	7,23	0,38
1,0	9,91	0,86
5,0	23,10	1,44

Fonte: (Okuno,Caldas e Chow,1982 – adaptado)

Para blindagem da radiação gama usa-se chumbo, concreto, aço ou terra.

Uma visualização do poder de penetração de cada tipo de radiação pode ser vista na Figura 7.

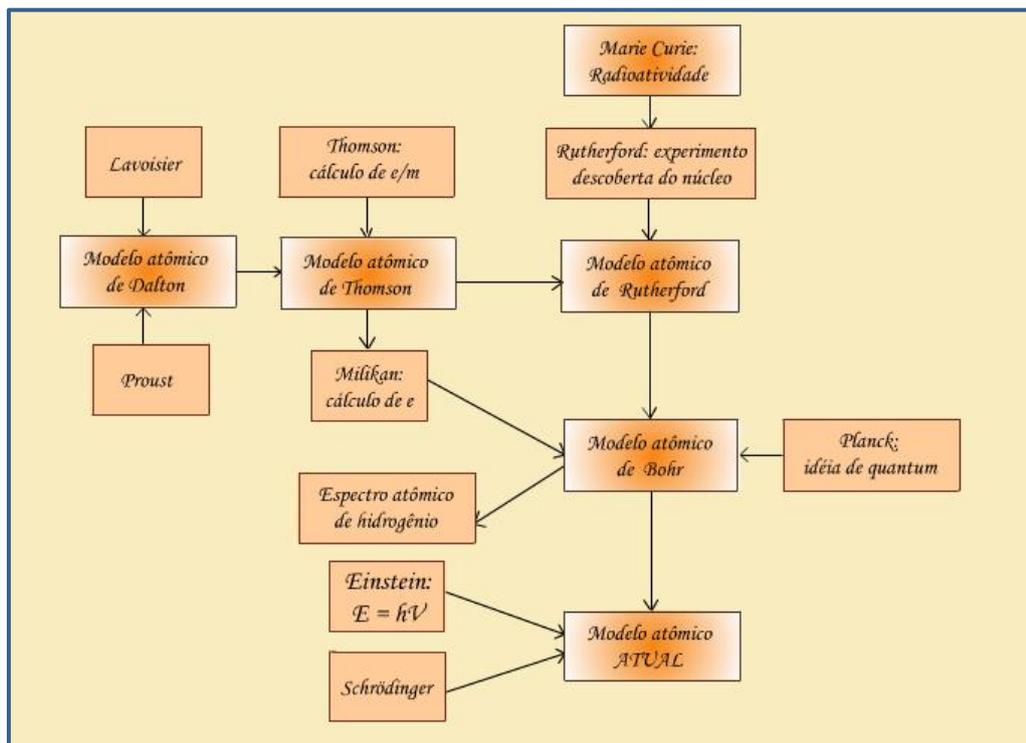
Figura 7 - Poder de penetração das radiações



Fonte: (<http://img.photobucket.com/albums/v731/Baffler/Poderpenetrante.jpg>)

Um quadro resumo da evolução da modelagem atômica pode ser vista na Figura 8.

Figura 8 – Quadro da evolução dos modelos atômicos



Fonte:

(http://www.iq.ufrgs.br/ead/fisicoquimica/modelosatomicos/fluxograma_pagina.html)

3.2 DECAIMENTO RADIOATIVO E UNIDADES DE MEDIDAS DE RADIAÇÃO.

Partindo do princípio da constituição geral do núcleo do átomo em prótons e nêutrons, cada elemento químico é caracterizado pelo número de prótons presentes em seu núcleo.

No entanto, o número de nêutrons pode variar para um mesmo elemento químico, denominado *isótopos* deste elemento que, por sua vez, podem ser estáveis ou instáveis.

Um isótopo *instável* de um elemento químico, denominado de *radioisótopo*, é caracterizado por possuir um nível energético elevado (excitado) e eventualmente pode dar origem à emissão espontânea de elementos provenientes do núcleo (partículas e ondas eletromagnéticas) de modo a remeter este núcleo a um estado mais estável. Este fenômeno é chamado de *desintegração nuclear*, *desintegração radioativa* ou *decaimento radioativo* (OKUNO, CHOW e CALDAS, 1986).

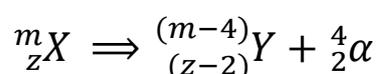
Um elemento químico (X) é caracterizado pelo seu número de massa (m) que corresponde à soma do número de prótons e nêutrons e pelo seu número atômico (z), representados pelo símbolo:



Assim, na natureza encontramos isótopos estáveis, isto é, que não sofrem desintegração radioativa como o carbono $^{12}_6\text{C}$ e $^{13}_6\text{C}$ e os radioisótopos $^{11}_6\text{C}$, $^{14}_6\text{C}$, $^{15}_6\text{C}$ etc.

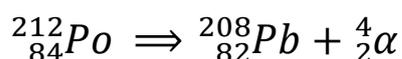
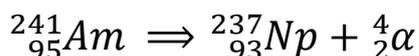
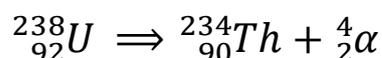
A emissão de elementos pelo núcleo pode ocorrer, basicamente, de três formas ou decaimentos: Decaimento Alfa (α), Decaimento Beta (β) e Decaimento Gama γ .

O decaimento α consiste na emissão de dois prótons e dois nêutrons que correspondem ao núcleo do átomo de Hélio. O elemento químico tem então seu número de massa diminuído de quatro unidades e seu número atômico diminuído de duas unidades, conforme reação:



Dizemos que ocorreu uma *transmutação*, pois o elemento Y possui um número atômico diferente do elemento X.

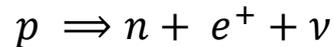
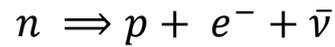
Damos abaixo alguns exemplos de decaimento alfa para alguns elementos químicos como o Urânio, Amerício e Polônio.



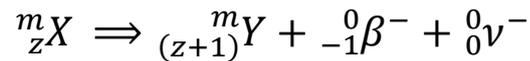
O *decaimento β* consiste na emissão espontânea de um elétron ou um pósitron pelo núcleo.

O pósitron, que é idêntico ao elétron com exceção de sua carga que é positiva, foi descoberto em 1932 por Carl David Anderson (Premio Nobel de Física em 1936) por meio de análises fotográficas de raios cósmicos que atravessavam uma *câmara de nuvens* (OKUNO e YOSHIMURA, 2010a).

O decaimento beta tem sua origem na desintegração (decaimento) de um nêutron (n) ou um próton (p) no núcleo do átomo, originando, além do elétron (e^-) ou pósitron (e^+), neutrino (ν^+) e antineutrino ($\bar{\nu}$). Simbolicamente, estas transformações podem ser representadas:



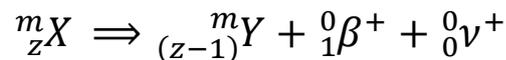
Uma reação típica do Decaimento β^{-} (e^{-}) pode ser escrita:



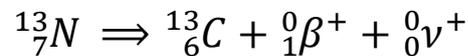
Um exemplo típico utilizando o elemento fósforo:



Uma reação típica do Decaimento β^{+} (e^{+}) pode ser escrita:

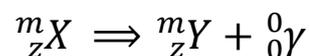


Um exemplo típico utilizando o elemento Nitrogênio:

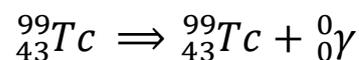


O decaimento gama (γ) é um fóton de energia $h\nu$ e ocorre após um decaimento α ou β estando o núcleo ainda em estado excitado. Neste caso o núcleo não sofre transmutação, mas decai em um estado fundamental.

A reação típica do decaimento gama pode ser simbolizada:



Um exemplo típico utilizando o elemento Tecnécio:



A lei fundamental do decaimento radioativo foi estabelecida experimentalmente por Ernest Rutherford e Frederick Soddy em um importante artigo, *The cause and nature of*

Radioactivity (Philosophical Magazine, v. 4, p. 370-396, 1902 apud Okuno e Yoshimura, 2010b), da forma:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Onde $N(t)$ o número de átomos que ainda não se desintegraram após um intervalo de tempo t , N_0 é o número de átomos inicialmente presentes numa amostra e λ é chamada Constante de Desintegração ou Constante Radioativa característica de cada radionuclídeo.

Essa mesma lei foi deduzida posteriormente por Ergon von Schweiler em 1905, com um enfoque estatístico, isto é a taxa de variação do número de radionuclídeos decaindo no tempo deve ser proporcional (λ) ao número total de radionuclídeos da (N):

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Ou

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

O sinal negativo indica que N decresce com o aumento de t .

Sendo N_0 o número de átomos presentes no tempo $t = 0$, podemos integrá-la:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

obtendo:

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda \cdot t$$

ou ainda:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Que é exatamente a equação obtida por Rutherford e Soddy.

Se considerarmos que num determinado tempo $t = T_{1/2}$ temos a desintegração da metade dos radionuclídeos iniciais, isto é $N = N_0/2$, podemos estabelecer uma relação entre $T_{1/2}$ e λ :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

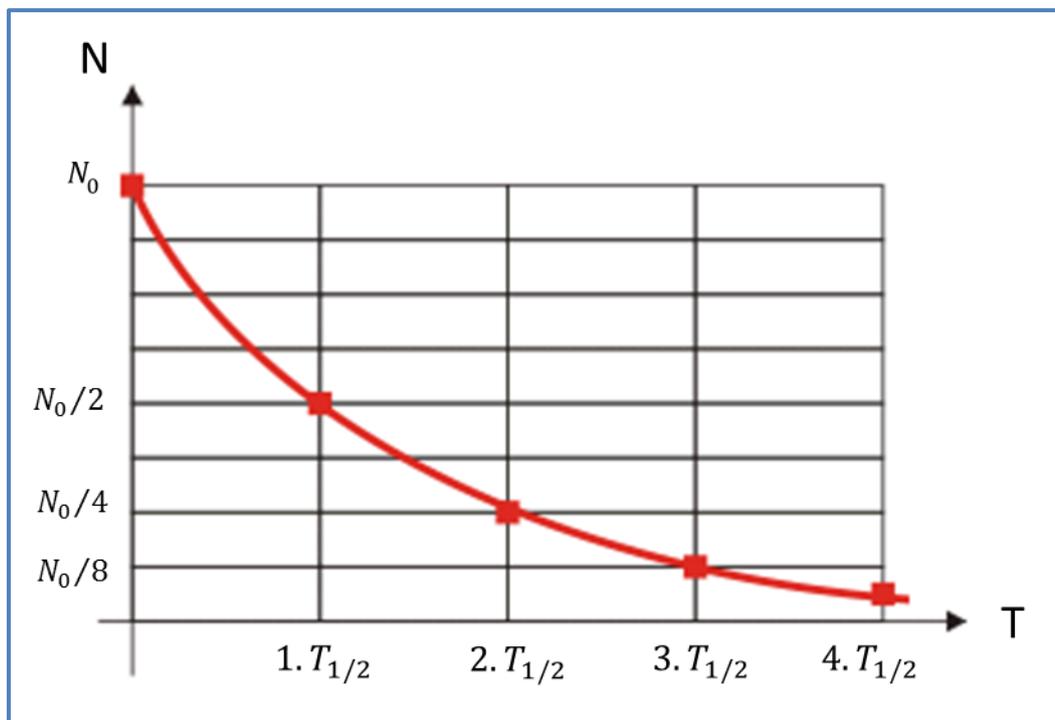
$$\ln 2 = \lambda \cdot T_{1/2}$$

Finalmente:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}$$

A visualização da curva característica do decaimento de uma amostra em função do tempo pode ser visualizada na Figura 9.

Figura 9 – Curva de decaimento típica



Fonte: (http://alfaconnection.net/pag_avsf/rad0101.htm#RAD010104 - modificada)

O tempo de meia vida ($T_{1/2}$) de um radioisótopo varia de frações de segundos até bilhões de anos como podemos verificar na Figura 10.

Figura 10 – Exemplos de tempos de meia vida

Elemento	Isótopo	T _{1/2}
polônio	214	0,001 s
	218	3 min
	210	138 dias
potássio	42	12,4 horas
iodo	131	8 dias
cobalto	60	5,27 anos
urânio	235	710 milhões de anos
	238	4,5 bilhões de anos
carbono	14	5730 anos

Fonte: (http://alfaconnection.net/pag_avsf/rad0101.htm#RAD010104)

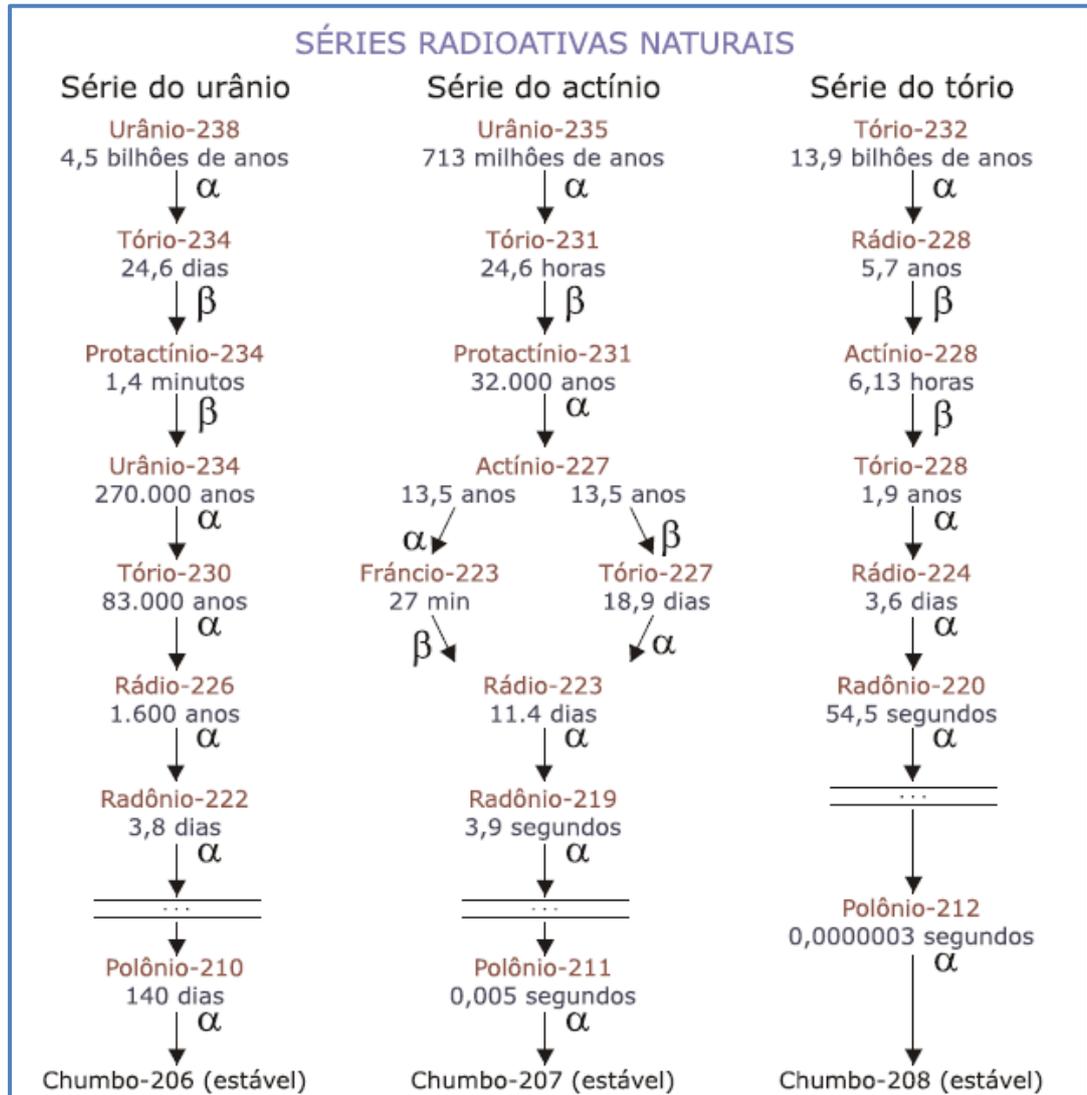
Encontramos na natureza elementos que realizam decaimento, transmutações ou desintegrações sucessivas, dando origem a novos elementos, até que o núcleo atinja uma configuração estável.

Em cada decaimento, temos a emissão de radiações alfa, beta e/ou gama originando uma sequência de elementos diferentes do anterior. Tais sequências foram denominadas de *séries radioativas ou famílias radioativas naturais* (CARDOSO, 2008).

Constatou-se que existem três séries ou famílias radioativas naturais: *Série do Urânio*, *Série do Actínio* e *Série do Tório*, sendo que descobriu-se posteriormente que a série do actínio, na realidade, inicia-se com o Urânio-235.

Um esquema simplificado das três séries radioativas pode ser vistas na Figura 11.

Figura 11 – Séries radioativas naturais



Fonte: (<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>)

Observamos que as três séries naturais terminam em isótopos estáveis do chumbo: chumbo-206, chumbo-207 e chumbo-208.

Uma vez que conhecemos a meia vida de um radioisótopo e esta é relacionada à sua constante de desintegração, podemos determinar a constante de desintegração de cada elemento conforma a expressão já estabelecida:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}$$

A título de exemplo, a constante de desintegração do elemento ${}^{198}_{79}\text{Au}$, cuja meia vida é $T_{1/2} = 2,7$ dias será:

$$\lambda = \frac{0,693}{2,7} = 0,257 \text{ desintegrações por dia}$$

ou ainda $\lambda = 2,97 \cdot 10^{-6}$ desintegrações por segundo (DPS)

O valor absoluto da taxa de decaimento de uma amostra radioativa, que é o número de decaimentos por unidade de tempo é chamada de *Atividade (A)* da amostra, isto é :

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N$$

e lembrando que:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

a atividade de uma amostra pode ser determinada:

$$A = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Definindo a atividade inicial da amostra como sendo:

$$A_0 = \lambda \cdot N_0$$

Definimos a Atividade de uma amostra como sendo:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Percebe-se que tanto o número de átomos de um radioisótopo quanto a atividade diminuem exponencialmente com o tempo.

Não existem equipamentos que meçam o número de átomos de uma amostra radioativa, mas a *atividade* de uma amostra, que é o número de desintegrações por unidade de tempo, pode ser medida, por exemplo, por um detector Geiger-Müller.

A unidade de *Atividade* adotada pelo Sistema Internacional de Unidades é o *becquerel* (*Bq*) que corresponde a uma desintegração por segundo, isto é, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$. Ela veio substituir a unidade *curie* (*Ci*), anteriormente adotada em homenagem à Mme. Curie e que corresponde ao número de desintegrações por segundo de uma amostra de 1 g de Radio-226.

A equivalência entre as unidades é:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Um interessante exercício-exemplo pode ser encontrado na obra de Okuno e Yoshimura (2010c) no qual os autores relacionam a atividade do Radio-226 com sua meia vida.

O exercício, adaptado aqui, parte de 1g de Rádio-226 cuja atividade é 1Ci (conforme a definição da unidade) e é pedido para se calcular:

- a) O número de átomos de Ra-226 na amostra;
- b) A meia-vida do Ra-226

A resolução é apresentada:

a) A massa atômica do Ra-226 é 226. Portanto em 226 g dessa amostra estão contidos $6,02 \cdot 10^{23}$ átomos (número de Avogrado) de Ra-226. Aplicando a regra de três, obtém-se o número N de átomos contidos em 1g de massa:

$$N = \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{226} = 2,66 \cdot 10^{21} \text{ átomos de Ra} - 226$$

b) Para calcular a meia-vida, calcula-se primeiro a constante de desintegração.

Como $A = \lambda \cdot N$,

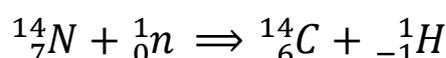
$$\lambda = \frac{A}{N} = \frac{3,7 \cdot 10^{10}}{2,66 \cdot 10^{21}} = 1,39 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

Sabendo que:

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} = \frac{0,693}{1,39 \cdot 10^{-11}} = 4,98 \cdot 10^{10} = 1.578 \text{ anos.}$$

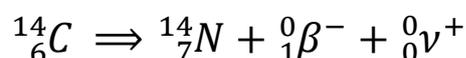
Uma importante aplicação utilizando-se o decaimento de um radionuclídeo é, sem dúvida, a chamada técnica de *datação por carbono-14*, desenvolvida em Chicago por Willard Libby em meados da década de 1940.

A concentração de isótopos do carbono na atmosfera é aproximadamente de 98,9% de $^{12}_6\text{C}$, 10 partes por bilhão de $^{14}_6\text{C}$ e 1,1% de $^{13}_6\text{C}$, sendo que apenas o $^{14}_6\text{C}$ é radioativo. O $^{14}_6\text{C}$ é formado continuamente pela reação nuclear ocorrida com o nitrogênio, que compõe 80% de nossa atmosfera, e as radiações cósmicas incidentes no planeta, essencialmente nêutrons, pela reação:



Com a formação do carbono-14, este se combina com o oxigênio, originando o dióxido de carbono (gás carbônico, CO_2) que, por sua vez, é absorvido pelas plantas no processo de fotossíntese. Pela cadeia alimentar, as plantas são ingeridas por vários animais, incorporando, desta forma, o carbono-14 (Figura 12).

O átomo de carbono-14 é instável está constantemente decaindo conforme a reação:

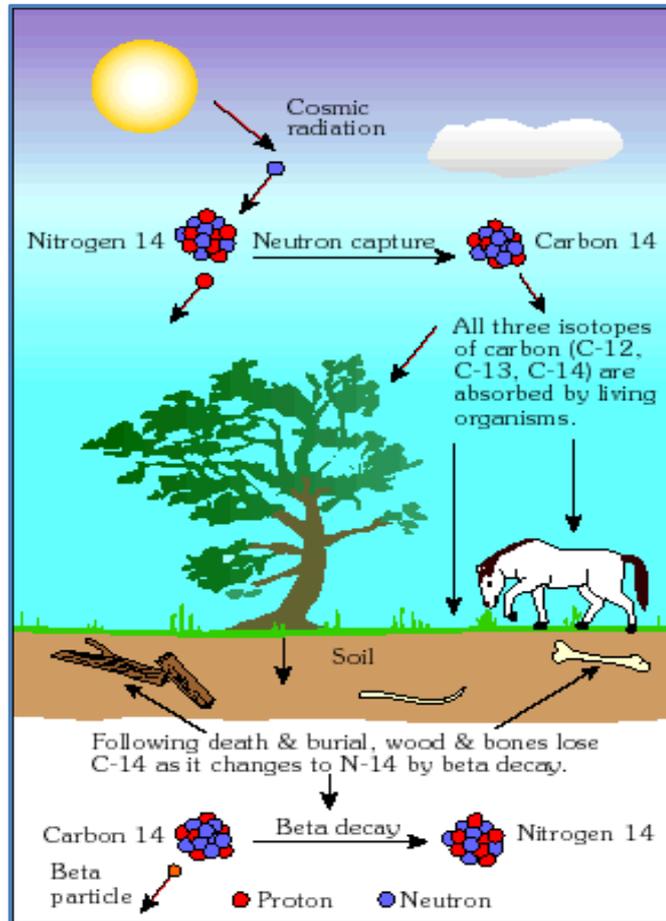


A relação entre o carbono não radioativo e o carbono-14 permanece constante durante todo o tempo e é na ordem de um átomo de carbono-14 para um trilhão de carbono-12 na natureza e nos seres vivos. Assim, para um ser vivo, temos uma atividade constante (A_0) de aproximadamente 15,3 dpm por grama de material.

Assim, quando um ser vivo morre, este para de assimilar carbono-14 e a proporção entre carbono-14 e carbono-12 se altera e ao compará-la com relação a um ser vivo podemos determinar a idade aproximada deste fóssil.

Uma observação importante a ser considerada é que não se pode simplesmente medir a atividade de uma determinada amostra fóssil pois esta apresentará outros radionuclídeos que poderão influenciar na medida. Deve-se separar o carbono presente na amostra por meios físico-químicos adequados.

Figura 12 – Ciclo do carbono-14



Fonte: (<http://sdsu-physics.org/physics180/physics180B/Chapters/phys180Bch3.html>)

De modo simplificado, podemos determinar a datação por carbono-14 de uma amostra partindo da equação da atividade:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow \frac{A}{A_0} = e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow \ln \left[\frac{A}{A_0} \right] = -\lambda \cdot t \Rightarrow \ln \left[\frac{A_0}{A} \right] = \lambda \cdot t$$

Isolando o tempo t :

$$t = \frac{\ln \left[\frac{A_0}{A} \right]}{\lambda}$$

Por outro lado:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}$$

Determinamos, então, a expressão para o tempo da amostra:

$$t = \frac{\ln \left[\frac{A_0}{A} \right]}{0,693} \Rightarrow t = \ln \left[\frac{A_0}{A} \right] \cdot \frac{T_{1/2}}{0,693}$$

Para o carbono-14 temos $T_{1/2} = 5710$ anos e $A_0 = 15,3$ dpm/g.

A título de exemplo, se tivermos uma amostra com uma atividade (A) de 2,16 dpm/g, podemos estimar sua idade:

$$t = \ln \left[\frac{15,3}{2,16} \right] \cdot \frac{5710}{0,693}$$

Encontramos:

$$t \cong 16.130 \text{ anos}$$

Após a descoberta dos raios X e da Radioatividade, verificou-se um uso desenfreado das radiações, na crença que esta seria a solução para vários males. Assim, radionuclídeos foram incorporados em uma vasta gama de produtos, tais como: águas, cremes de beleza, cremes dentais, cigarros e até preservativos.

Paralelamente a isto, desde o início, casos relacionados à exposição e/ou contaminação por material radioativo começavam a surgir. O próprio Becquerel detectou queimadura na sua pele devido a um frasco contendo rádio, ganho de Mme. Curie, que levava no bolso da camisa para suas conferências.

Somente 30 anos depois da descoberta dos raios X foi criada a primeira comissão para tratar das radiações ionizantes, dos equipamentos, dos protocolos para medir níveis de radiação e os cuidados ao se trabalhar com ela.

Esta comissão denominada *Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)* foi criada em 1925, em Londres, no Primeiro Congresso Internacional de Radiologia. Desde então, várias unidades de medidas relativas à atividade radioativa de uma fonte, a interação da radioatividade com o ambiente e as exposições externa e interna por sistemas biológicos foram definidas.

De uma forma generalizada, podemos classificar as unidades de medida de radiação em quatro grupos distintos: a *Atividade*, a *Exposição*, a *Dose Absorvida* e a *Dose Equivalente*.

A *Atividade* (A), já mencionada anteriormente, é característica da fonte radioativa e quantifica o número de desintegrações nucleares que ocorrem por unidade de tempo.

Inicialmente, adotou-se a unidade *Curie* em homenagem à Mme. Curie, sendo definida como o número de desintegrações por segundo de uma amostra de 1 g de Radio-226, sendo:

$$1 Ci = 3,7 \cdot 10^{10} dps$$

A unidade atualmente adotada pelo Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Becquerel (Bq) e equivale a uma desintegração por segundo (dps). Assim:

$$1 Ci = 3,7 \cdot 10^{10} dps = 3,7 \cdot 10^{10} Bq$$

A *Exposição* (X) refere-se à criação de pares de íons provocada por um feixe de *radiação eletromagnética* (raios X, Raios gama, ultravioleta, etc.) em 1 Kg de ar seco e puro nas condições normais de pressão e temperatura.

Inicialmente, a unidade de exposição era o *roentgen* (R) correspondendo a $1,6125 \cdot 10^{15}$ pares de íons por Kg de ar, equivalente a $2,58 \cdot 10^{-4}$ Coulombs por Kg. Assim:

$$1 R = 1,6125 \cdot 10^{15} \frac{(\text{pares de íons})}{Kg} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{C}{Kg}$$

A *Dose Absorvida* (D) é a unidade de radiação que considera efetivamente a *energia absorvida* (em Joules) em 1 Kg de material.

Inicialmente, esta grandeza era expressa em *rad* (*Radiation Absorbed Dose*) ou Dose de Radiação Absorvida, de forma que $1 rad = 0,01 J/Kg$.

No SI a unidade adotada é o Gray (Gy) em homenagem ao físico e radiologista inglês Louis Harold Gray e é equivalente a 100 rads ou 1 joule por Kg. Assim:

$$1 Gy = 1 \frac{J}{Kg} = 100 rads$$

A unidade de *Dose Equivalente*, *Equivalente de Dose* ou *Dose Efetiva* corresponde à energia por Kg depositada em tecido biológico causado por diferentes radiações multiplicado por um *fator de qualidade* (FQ) ou *Fator de Ponderação de Radiação* (WR) que depende do

tipo de radiação incidente. Assim, por exemplo, 1 Gy para a radiação alfa é mais danoso aos tecidos do que 1 Gy de radiação gama.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) apresenta a recomendação ICRP-103 para o Fator de Ponderação de Radiação (WR), de acordo com a tabela:

Tabela 4 – Fator de Ponderação de Radiação (WR)

Tipo de Radiação	Fator de Ponderação de Radiação W_R
Fótons	1
Elétrons e muons	1
Prótons e píons pesados	2
Partículas alfa, fragmentos de fissão, íons pesados	20
Nêutrons	Função contínua da energia do nêutron

Fonte: (Okuno,Caldas e Chow,1982 – adaptado)

Assim, a unidade inicial de *Dose Equivalente* (H) foi expressa como sendo Roentgen Equivalent Men (rem) que é o produto da Radiation Absorbed Dose (rad) pelo WR, de forma que:

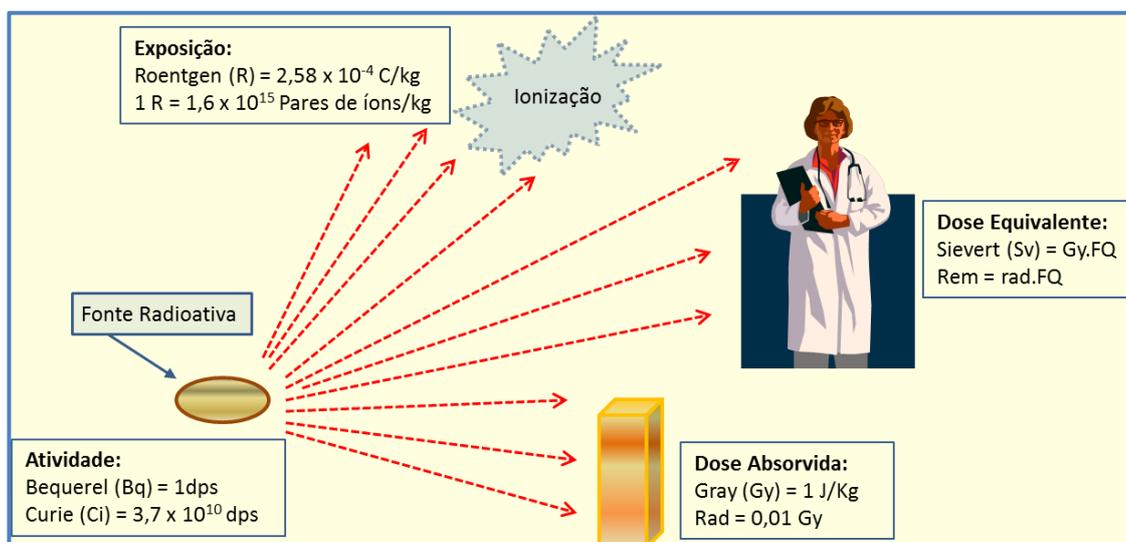
$$1 \text{ rem} = (1 \text{ rad}) \cdot (WR)$$

Posteriormente foi adotada, pelo SI, a unidade *Sievert* (Sv) em homenagem ao físico-médico sueco Rolf Maximilian Sievert, relacionada à unidade Gy e rem da seguinte forma:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \cdot WR = 100 \text{ rem}$$

As relações entre as unidades radiológicas podem ser vistas na Figura 13.

Figura 13 – Relação entre unidades radiológicas



Fonte: (Fonte própria)

Quando se utiliza equipamentos detectores para medição de atividade de uma amostra, é necessário introduzir mais uma unidade, a *Contagem Por Minuto* (CPM) e relacioná-la com a unidade de Desintegração Por Minuto (DPM).

Quando um equipamento fornece os resultados em CPM, a conversão de CPM em DPM pode ser calculada da forma:

$$DPM = CPM_a - \frac{CPM_b}{E_d}$$

Onde CPM_a representa a contagem por minuto da amostra medida, CPM_b representa a contagem por minuto da radiação de fundo (ruído ou background) do detector (normalmente fornecido pelo fabricante) e E_d representa a eficiência do detector que pode ser calculada da forma:

$$E_d = \frac{CPM_p}{DPM_p}$$

Onde CPM_p é a contagem por minuto de uma amostra padrão medida pelo detector e DPM_p é o valor da desintegração por minuto da amostra padrão.

A eficiência depende fundamentalmente das características construtivas do detector usado. Valores entre 70% a 90% podem ser encontrados.

3.3 VISÃO GERAL DOS DETECTORES DE PARTÍCULAS

O tipo de interação entre a radiação e as partículas provenientes de um determinado material radioativo com a matéria irá definir o método de detecção particularizada para cada tipo de detector.

Neste item trataremos das interações da radioatividade com a matéria sem considerar as interações com sistemas biológicos, que serão analisadas oportunamente no item relativo aos efeitos biológicos das radiações e as unidades de medidas comumente usadas.

De forma inicial, generalizada, podemos dizer que a interação das emissões radioativas com a matéria caracteriza-se pela ionização produzida no meio e podem ser classificadas como *diretamente ionizantes* e *indiretamente ionizantes*.

A radiação diretamente ionizante é devido às partículas com carga elétrica e podem ainda ser divididas em dois grupos: *partículas rápidas pesadas* e *partículas rápidas leves*.

As radiações indiretamente ionizantes também podem ser divididas em duas subcategorias: fótons e nêutrons.

Diferentemente das partículas diretamente ionizantes, as radiações eletromagnéticas, fótons de raios X e raios gama, interagem com a matéria comportando-se como partículas depositando energia e provocando ionização em três processos (efeitos) principais: *efeito fotoelétrico*, *efeito Compton* e *criação de par elétron-pósitron*.

O efeito fotoelétrico foi inicialmente observado 1887 por Heinrich Hertz durante suas experiências que confirmaram a existência de ondas eletromagnética. Hertz observou que a corrente elétrica originada na descarga entre dois eletrodos era facilitada quando radiação luminosa incidia sobre um dos eletrodos, isto é, elétrons eram emitidos da superfície do material. Esse fenômeno foi chamado de efeito fotoelétrico.

Em 1905, Einstein forneceu uma explicação para o efeito fotoelétrico propondo a hipótese da quantização da radiação eletromagnética em que esta comporta-se como pacotes concentrados de energia, chamados fótons. Por este estudo Einstein recebeu o Premio Nobel de Física em 1921.

A energia cinética máxima do elétron emitido do material corresponde à diferença entre a energia do fóton incidente menos a função trabalho W que corresponde à energia de ligação do elétron.

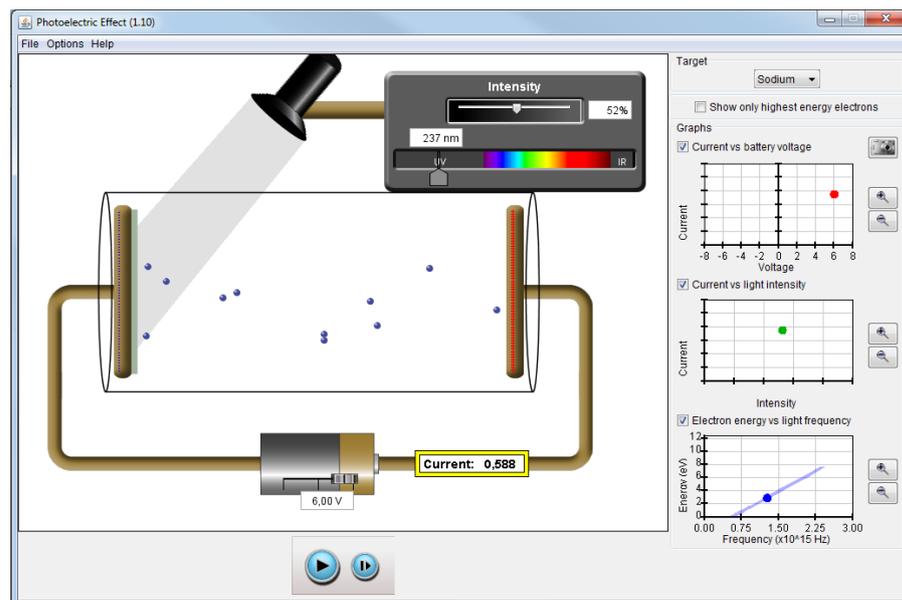
$$E_{cin} = hf - W$$

Se a diferença de potencial necessária para reduzir a corrente a um valor nulo for V_0 , o produto da carga elétrica do elétron por este potencial corresponderá à energia cinética máxima, na forma:

$$e \cdot V_0 = hf - W$$

Para o estudo do efeito fotoelétrico em sala de aula, uma interessante simulação (UNIVERSITY OF COLORADO, 2013) (Figura 14) pode ser utilizada pelos alunos onde poderão atuar em vários parâmetros como: a intensidade e a frequência da luz incidente, assim como a polaridade e o valor tensão fornecida às placas. O aluno poderá também, além de escolher em que material será a incidência, visualizar os gráficos: Corrente X Tensão, Corrente X Intensidade da luz e Energia do elétron X Frequência da luz.

Figura 14 - Simulador para o efeito fotoelétrico



Fonte: (<http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>).

No ano de 1922, Arthur Holly Compton, em seus estudos sobre a interação de radiação com a matéria, percebeu que um feixe de raios X, ao incidir sobre um alvo de carbono, sofria espalhamento e que a frequência dos raios X espalhados era sempre menor do que a frequência dos raios X incidentes, dependendo do ângulo de desvio.

A energia do fóton remanescente ($h \cdot f'$) depende do ângulo de espalhamento (θ):

$$h \cdot f' = \frac{hf}{1 + \frac{hf}{mc^2}(1 - \cos \theta)}$$

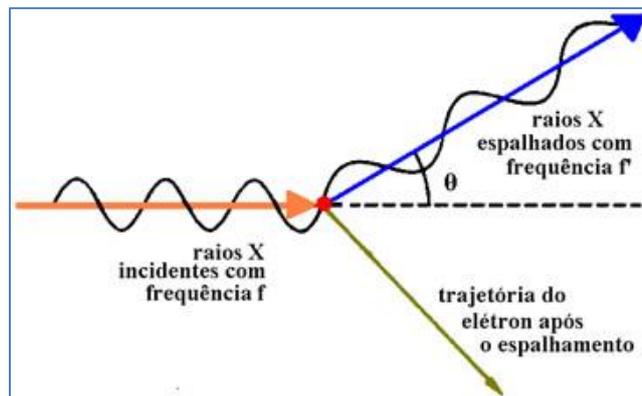
Onde mc^2 , é a energia correspondente à massa de repouso do elétron (511 keV).
A diferença entre os comprimentos de onda da onda incidente e espalhada é:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_e c} \cdot (1 - \cos \theta)$$

Onde $(h/m_e c)$ é chamada de comprimento de onda Compton do elétron.

A Figura 15, a seguir, ilustra o efeito Compton:

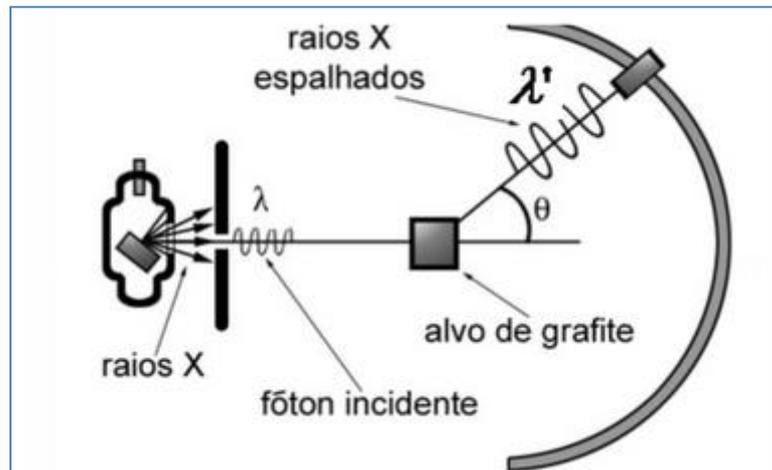
Figura 15 - O efeito Compton



Fonte: (<http://www.brasilecola.com/fisica/efeito-compton.htm>)

De forma simplificada, podemos dizer que Compton utilizou uma fonte de raios X para gerar o feixe que, após passar por colimadores, atinge um alvo de grafite onde o espalhamento pôde ser detectado por um anteparo, conforme a Figura 16:

Figura 16 - O arranjo de Compton

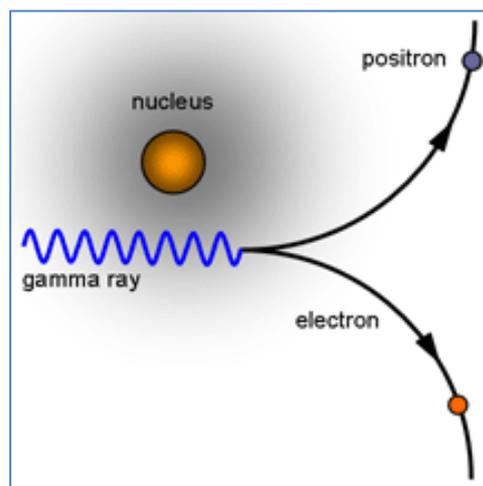


Fonte: (<http://web.if.usp.br/ifusp/files/compton.pdf>)

A criação de par elétron-pósitron, que não envolve diretamente a ionização dos átomos do meio, ocorre quando um feixe de alta energia interage com a matéria. Havendo a presença de um núcleo atômico em sua trajetória, um fóton com energia superior a $1,022 \text{ MeV}$, isto é o dobro da massa de repouso de ambas as partículas ($0,511 \text{ MeV}/c^2$) ocorrerá o fenômeno denominado “produção de par”.

A figura seguinte ilustra o fenômeno de criação elétron-pósitron.

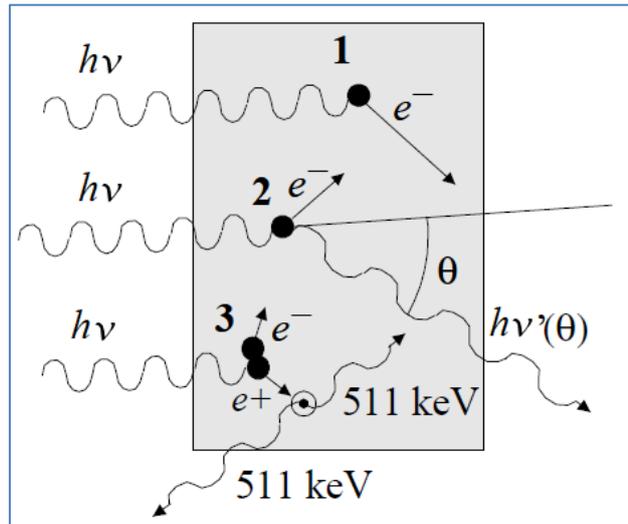
Figura 17 - Produção de par



Fonte: (<http://francisco-scientiaestpotentia.blogspot.com.br>)

A Figura 18 ilustra as três principais interações das radiações eletromagnéticas com a matéria.

Figura 18 - Interações da radiação eletromagnética

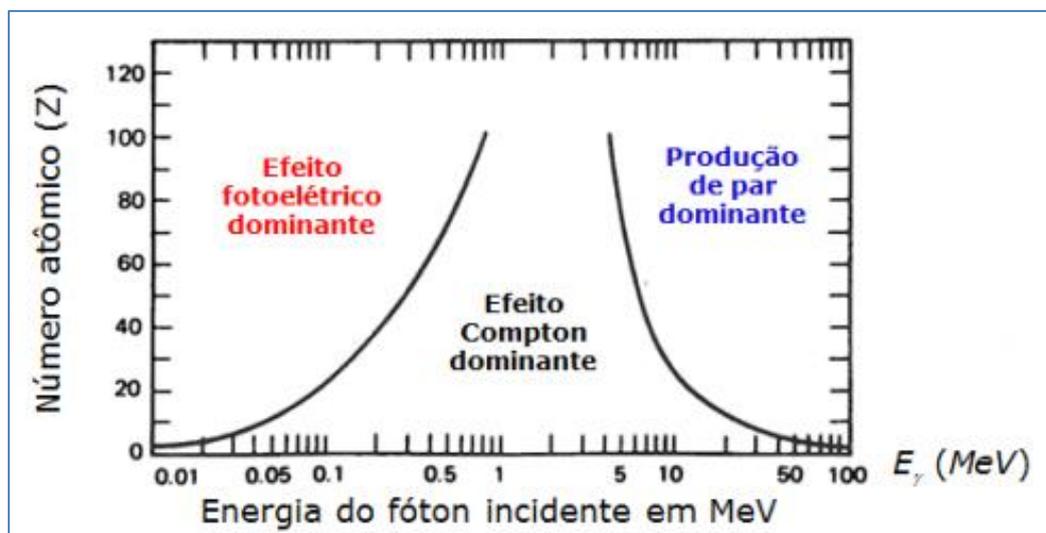


Fonte: (<http://web.if.usp.br/ifusp/files/compton.pdf>)

A probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico, Compton e produção de par elétron-pósitron variam com o número atômico e a energia de do fóton incidente.

O gráfico da figura abaixo apresenta este comportamento, assim como os valores de número atômico e de energia que tornam iguais as probabilidades de ocorrência dos efeitos fotoelétrico e Compton (curva à esquerda) e dos efeitos Compton e produção de par (curva à direita).

Figura 19 - Interação eletromagnética com a matéria



Fonte: (http://www.passo-a-passo.com/mec/7.1.9/05_teorias.htm)

As radiações ionizantes foram resumidas por Yoshimura (2009):

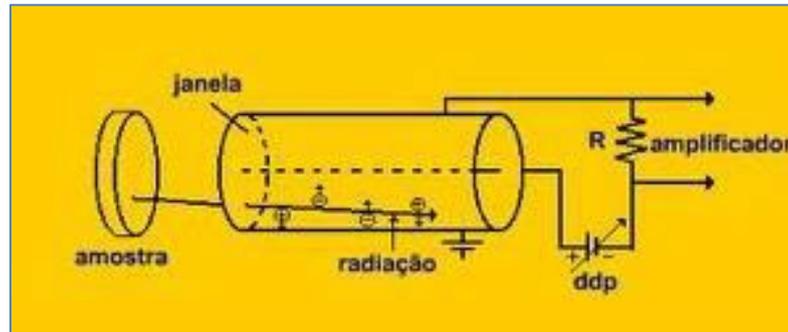
O conjunto das radiações ionizantes usualmente estudadas compreende: i. radiação eletromagnética com energia de fóton acima de 12 eV, que recebe várias denominações de acordo com a origem: raios X – originados de desexcitações atômicas (raios X característicos) e da desaceleração de partículas carregadas (Bremsstrahlung); raios gama – originados de desexcitações nucleares; fótons de aniquilação – originados da aniquilação de pares partícula-antipartícula; ii. partículas eletricamente carregadas e que possuem energia cinética bem maior que a energia térmica, e superior a energias de ligação de elétrons atômicos, chamadas Partículas Carregadas Rápidas. Suas origens podem ser a emissão por núcleos atômicos (partículas alfa e beta e os produtos de fissão nuclear, por exemplo), a emissão por átomos (elétrons Auger), feixes produzidos em aceleradores de partículas (elétrons, pósitrons, prótons, dêuterons, íons em geral, de qualquer número atômico ou número de massa), a radiação cósmica primária ou produtos de sua interação com a atmosfera (múons, píons etc.), produtos de reações nucleares, etc; iii. nêutrons livres com qualquer energia cinética e de qualquer origem. Essa classificação das radiações ionizantes tem fundamentação nas forças responsáveis pelas interações e na modelagem utilizada para descrevê-las. Fótons interagem pela ação de campos eletromagnéticos, atuando sobre partículas carregadas do meio; partículas carregadas têm sua ação em elétrons do meio aproximada por interações coulombianas consecutivas; já os nêutrons atuam sobre prótons e nêutrons de núcleos atômicos pela força nuclear forte. As áreas da Física que tratam dessas interações são a Eletrodinâmica Quântica para interações entre campos eletromagnéticos e cargas em movimento, e a Física Nuclear para as interações entre nucleons. (YOSHIMURA, 2009, p. 57)

Os equipamentos detectores de radiação utilizam um ou mais fenômenos descritos acima como princípio de detecção.

Um bom exemplo do uso dos fenômenos decorrentes da interação da radiação com a matéria para se detectar alguns tipos de radiações, são os detectores a gás. Seu princípio de funcionamento é baseado em manter um determinado gás submetido à baixa pressão num recipiente de forma geralmente cilíndrico onde em seu interior encontra-se também um eletrodo mantido em alta tensão acoplado a um circuito eletrônico externo que processará os pulsos gerados pela passagem de partículas carregadas ou radiação gama pelo efeito fotoelétrico no material que envolve o detector (Figura 20 e Figura 21).

Em alguns tipos de detectores a gás encontramos uma face, chamada de janela, que é feita de um material resistente à diferença de pressão, mas fino o suficiente para que as partículas carregadas possam entrar no detector para produzir a ionização a ser detectada pelo circuito eletrônico externo.

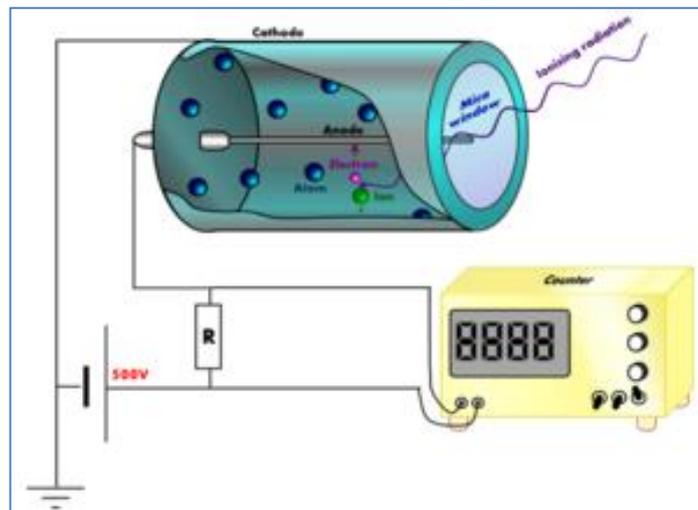
Figura 20 - Detector a gás



Fonte: (<http://www.mundoeducacao.com/fisica/detectores-particulas.htm>)

As ionizações, geradas a partir da passagem das radiações pelo gás, acarretará diferenças de potenciais entre os eletrodos, gerando pulsos elétricos que serão detectados e contados por um circuito eletrônico próprio.

Figura 21 – Contagem dos pulsos gerados

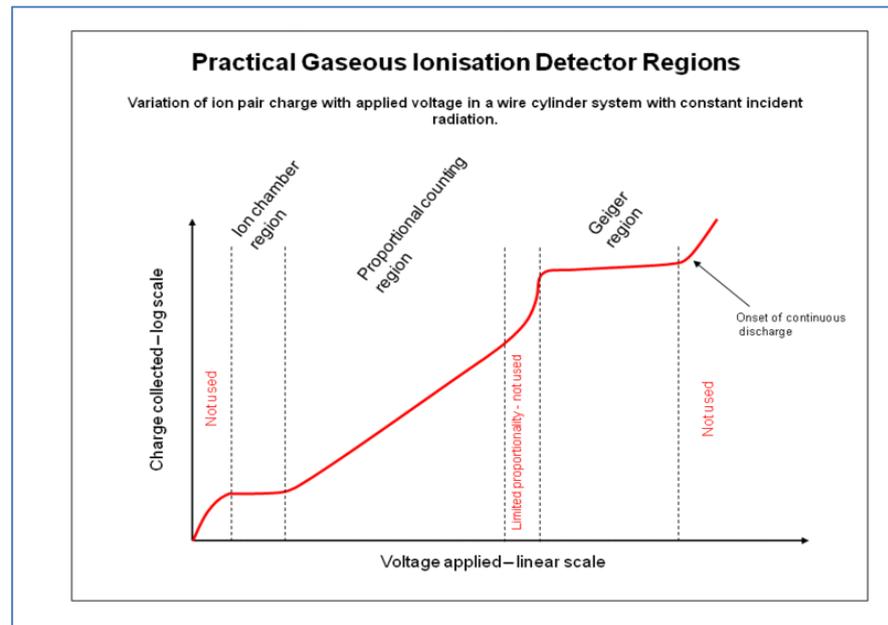


Fonte: (http://pt.wikipedia.org/wiki/Contador_Geiger)

Observa-se uma relação entre a tensão aplicada aos eletrodos e o número de pares elétrons-íons coletados, que por sua vez, determinam a altura do pulso coletado pelo circuito eletrônico do detector.

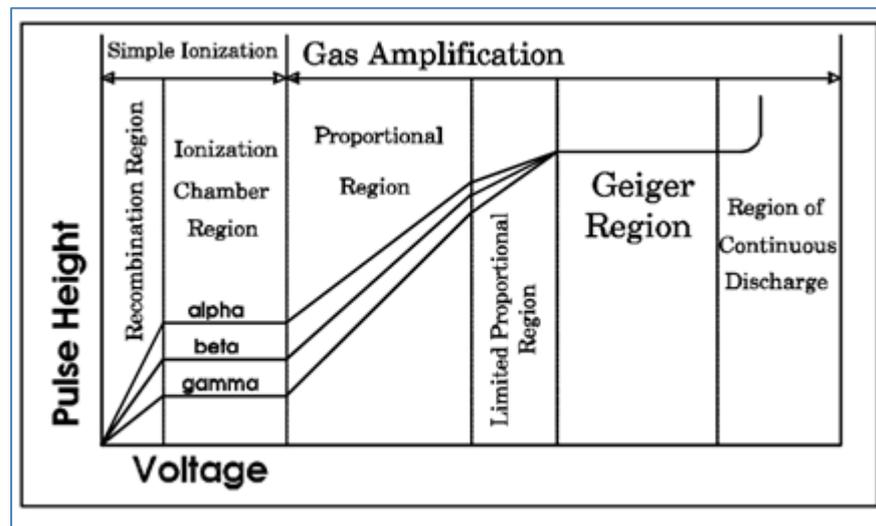
Analisando o gráfico (Figura 22 e Figura 23) da tensão aplicada versus número de íons coletados (ou a amplitude do pulso obtido) podemos discriminar regiões em que os detectores a gás irão operar e quais partículas poderão ser detectadas.

Figura 22 - Regiões de trabalho dos detectores a gás



Fonte: (http://pt.wikipedia.org/wiki/Contador_Geiger)

Figura 23 - Regiões de detecção à gás por amplitude de pulso



Fonte: (<http://web.if.usp.br/ifusp/files/compton.pdf>)

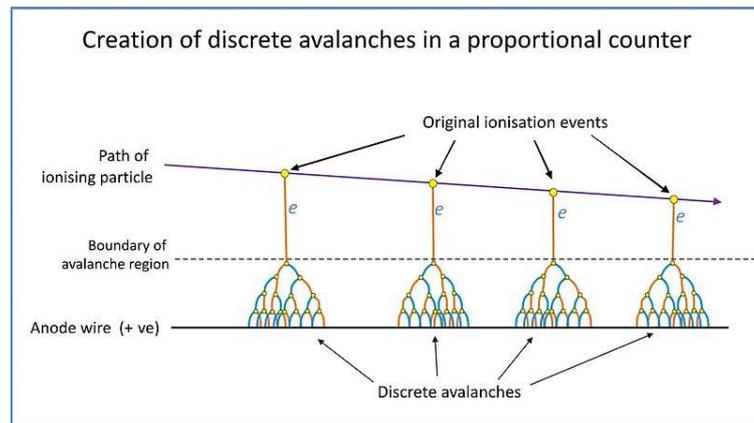
Como já mencionado, as características das regiões do gráfico determinam a forma de detecção pelos detectores a gás. Nota-se que algumas regiões não são convenientes para uso do desenvolvimento de detectores devido à não linearidade, ausência de pulsos detectáveis ou ainda devido à descargas contínuas.

Na *região de recombinação* os pares de íons recombina-se, não gerando, portanto pulsos detectáveis.

Na região das *Câmaras de Ionização*, a recombinações cessam e todos os pares de íons são detectados. A produção dos pulsos elétricos é aproximadamente independente da tensão aplicada e diretamente proporcional à energia da radiação incidente no detector.

Na região dos *Detectores Proporcionalis*, a energia dos elétrons dentro da câmara é aumentada devido ao aumento da voltagem aplicada. Quando esta energia atinge um determinado valor, os elétrons colidem com outros átomos e originam mais ionizações, de forma que, após inúmeros choques, estes elétrons são detectados pelo aparelho. Este processo é denominado de *Avalanche de Townsend* (Figura 24 e Figura 25).

Figura 24 - Avalanche de Townsend



Fonte: (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Proportional_counter_avalanches.jpg)

Figura 25 - Detector Proporcional



Fonte: (<http://www.higieneocupacional.com.br/download/detectores-daros.pdf>)

Observamos duas outras regiões que não são utilizadas. Na região acima da proporcional não há mais linearidade entre a tensão aplicada e os pares de íons gerados ou a altura do pulso elétrico obtido. Na região de descarga elétrica contínua o gás é totalmente ionizado pelo fenômeno de avalanche não controlada, sendo assim não utilizada como meio de detecção de radiações.

A última região a ser analisada é a região Geiger onde, devido ao potencial elétrico aplicado não é possível diferenciar a partícula detectada, sejam alfa, beta ou gama. Qualquer partícula penetrante, que deposite certa quantidade de energia no gás, fará com que um pulso relativamente grande seja gerado decorrente da avalanche provocada. Desta maneira, os pulsos oriundos da câmara são processados eletronicamente de maneira sempre igual, independente da partícula detectada, geralmente produzindo um sinal visual como a deflexão de uma agulha, display alfanumérico e luz juntamente com um sinal sonoro audível.

O *contador Geiger*, também conhecido por contador de *Geiger-Müller*, foi idealizado inicialmente pelo físico alemão Johannes Hans Wilhelm Geiger por volta de 1908-1913 utilizando uma ampola de Crookes modificada de maneira que um dos eletrodos fosse constituído de um fio fino. Posteriormente, em 1928, o aparelho foi aperfeiçoado em parceria com o também alemão e físico Walther Müller.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias de materiais e da eletrônica, o contador Geiger-Muller recebeu refinamentos adicionais e hoje é conhecido mundialmente por ser um dos melhores métodos para detectar radiações ionizantes em diversas situações de investigação e técnicas.

Seu princípio de funcionamento é o mesmo de uma câmara de ionização, constituído de um eletrodo central num recipiente cilíndrico condutor contendo em seu interior gás inerte como hélio, argônio e neon à baixa pressão. Entre o eletrodo central e o cilindro estabelece-se uma alta voltagem, de maneira que uma radiação ionizante, ao atravessar o gás, provoca o já mencionado efeito avalanche e conseqüentemente um pulso elétrico é gerado e detectado pelo sistema eletrônico acoplado ao conjunto (Figura 26).

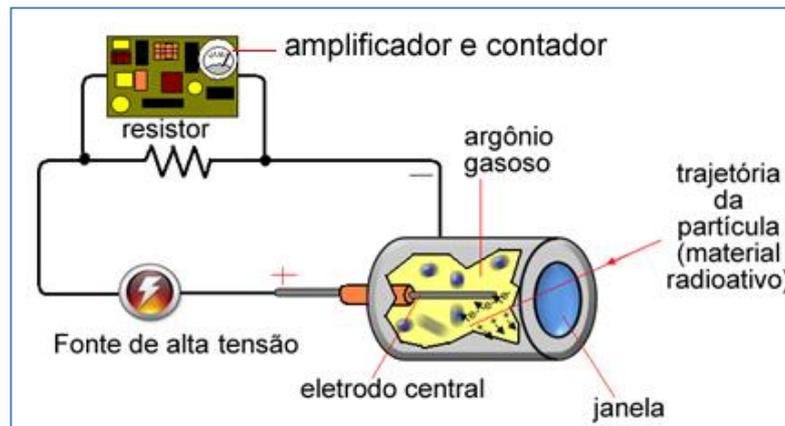
Atualmente, podemos encontrar o conjunto da câmara de ionização como unidades industrializadas, como sondas independentes, chamadas de ampolas Geiger ou tubos de Geiger.

Existe uma grande variedade de modelos industriais com diferentes especificações no que tange à voltagem de trabalho, gás utilizado, tamanho, etc. (Figura 27).

É possível então, a construção de detectores Geiger de forma artesanal, como descrito por Kakuno (2014):

Foi utilizado um tubo GM comercial, SBM19 que pode ser adquirido através da internet, em sites como “e-bay”, por exemplo. Um modelo semelhante (menor volume e metade do comprimento) e mais popular é o SBM20, que também deve funcionar de modo semelhante, porém com menor sensibilidade (de duas a quatro vezes menor) devido ao menor volume de gás (e área da parede externa) sensível. O tubo GM opera a um potencial de 400 V DC, que obtivemos a partir de um oscilador de alta tensão para disparo de “flash” integrado a máquinas fotográficas de aplicação simples (doméstica). (KAKUNO, V.36, n. 1, 2014).

Figura 26 - Esquema do detector Geiger-Muller



Fonte: (<http://www.alunosonline.com.br>)

Figura 27 - Ampolas Geiger-Muller



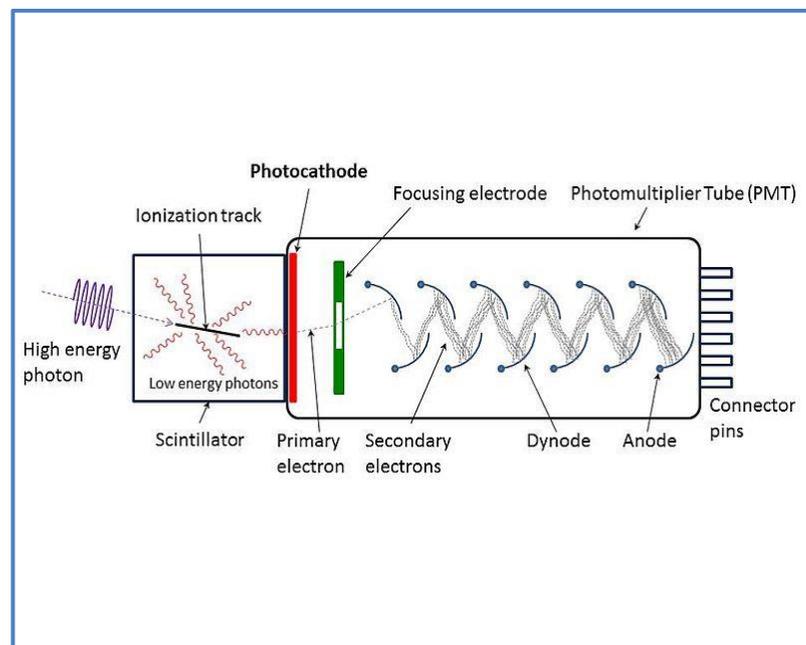
Fonte: (<http://www.lndinc.com/products/category/34/>)

Os *Detectores Cintiladores* têm seu princípio de funcionamento baseado em materiais que emitem luz quando excitados por radiações ionizantes. Estes materiais trabalham em conjunto com fotosensores para a transdução do sinal luminoso em pulsos elétricos.

Os materiais cintiladores, comumente empregados, podem ser divididos em duas categorias: *cintiladores orgânicos* como a Naftalina e Poliestireno e os *cintiladores inorgânicos* como NaI (iodeto de sódio), CsI (iodeto de céσιο) e BaF₂ (Fluoreto de Bário).

O fotosensor mais comumente usado é o chamado *fotomultiplicador* (Figura 28), onde a energia do fóton incidente é convertida em elétrons no fotocadodo e são acelerados em direção aos dinodos ocorrendo a liberação de mais elétrons pelo choque dos elétrons primários que, por sua vez, sucessivamente, atingem os outros dinodos dando origem a uma avalanche de elétrons que são, ao final, capturados pelo anodo do fotomultiplicador originando um pulso elétrico.

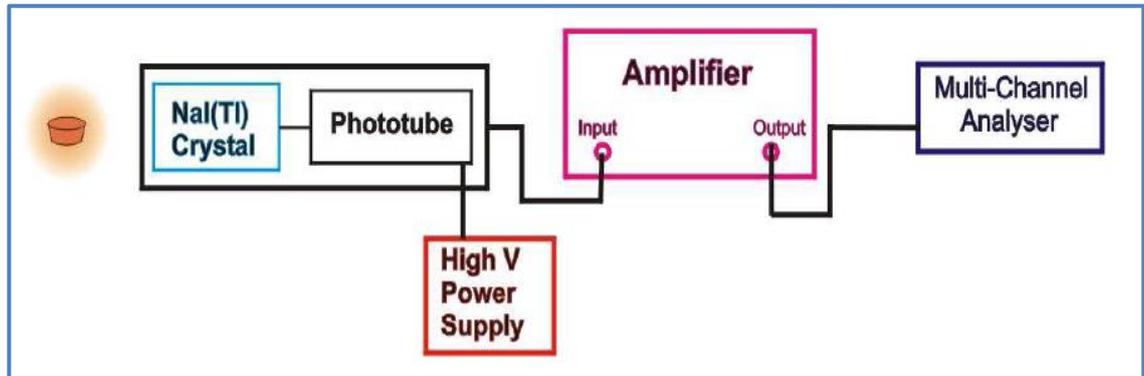
Figura 28 – Esquema do tubo fotomultiplicador



Fonte: (<http://www.peb.ufrj.br/cursos/eel710/SensorFotomultiplicador.pdf>)

Estes pulsos elétricos são proporcionais aos fótons absorvidos e podem ser processados com circuitos eletrônicos adequados (Figura 29).

Figura 29 – Diagrama de blocos de um contador cintilador



Fonte: (<http://nebm.ist.utl.pt/repositorio/download/2345>)

Estes detectores são considerados os mais eficientes na medida de raios gama, mas utilizados também para a medida das radiações alfa e beta.

Existem vários modelos comerciais, como o da Figura 30.

Figura 30 – LKB Wallac Gamma Counter 1282 Compugamma

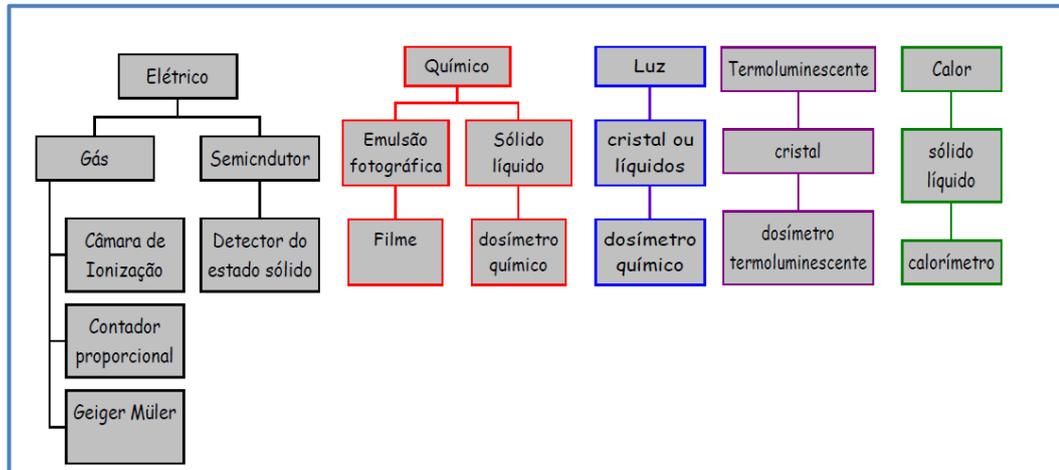


Fonte:

(http://www.akribis.co.uk/lkb_wallac_laboratory_gamma_counter_1282_compugamma.html)

Encontramos, além dos detectores citados, várias formas de detecção de partículas, tais como: emulsões fotográficas, dosímetros químicos, calorímetros, etc., cujas descrições fogem ao escopo deste trabalho. Um quadro geral dos detectores de partículas pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 – Quadro geral dos detectores de radiação



Fonte: (<http://www.higieneocupacional.com.br/download/detectores-daros.pdf>)

3.4 A CÂMARA DE NUENS DE WILSON E A CÂMARA POR DIFUSÃO

O nosso trabalho é essencialmente fundamentado nos aspectos fenomenológicos observados na *câmara de nuvens* de Charles Thomson Rees Wilson e na *câmara de difusão contínua* desenvolvida posteriormente por Alexander Langsdorf Jr..

O físico escocês Charles Thomson Rees Wilson, enquanto pesquisador no laboratório Cavendish em Cambridge visitou o observatório Ben Nevis em 1894, onde o seu interesse pela formação de nuvens foi despertado.

Durante sua visita, Wilson observou um fenômeno conhecido como “brockenspectre” que corresponde a um interessante efeito de arco-íris da luz do sol sobre as nuvens, em torno da sombra do observador (Figura 32).

T R Wilson spent two weeks there as a temporary observer, from the 8th to the 22nd September 1894. He noted while he was there that he saw a brockenspectre, or glory, a rainbow-like effect of sunlight on clouds, surrounding the observer’s shadow. (BOWLER, 2012)

Figura 32 – “Brocken spectre” observado por Wilson



Fonte: (http://i.telegraph.co.uk/multimedia/archive/01734/brocken-spectre_1734766i.jpg)

Durante sua estadia no observatório, Wilson pode entrar em contato com alguns instrumentos lá existentes, sendo que um deles lhe chamou a atenção, um Aitken Dustcounter, usado para investigar a condensação de vapor de água em torno de partículas de poeira, no qual uma quantidade de ar livre de poeira contendo vapor de água é misturada com certa quantidade de ar de amostra numa câmara de expansão e, durante uma rápida expansão, gotículas de água se formam em torno da poeira permitindo que sejam contadas (núcleos de condensação).

Inspirado por este instrumento, Wilson desenvolveu sua própria versão do equipamento: a câmara de nuvens (Figura 33).

Figura 33 – Câmara de nuvens de Wilson



Fonte: (<http://www.seara.ufc.br/donafifi/raioscosmicos/raioscosmicos2.htm>)

Seu princípio de funcionamento é, no geral, semelhante a um Aitken Dustcounter, isto é, quando ocorre uma expansão, gotículas de água se formam ao redor de partículas de poeira no seu interior e por ação da gravidade depositam-se no fundo, sendo aprisionadas em uma camada de gelatina.

Durante seus experimentos com sua câmara, Wilson percebeu que mesmo com a ausência de partículas no interior desta, ainda ocorria a formação de condensados. Para tal, providenciou que todo o interior da câmara fosse recobertos com gelatina e ao fundo a gelatina era enegrecida com tinta. Além disto, estabeleceu uma diferença de potencial elétrico entre o fundo e a tampa de maneira que qualquer partícula de poeira carregada fosse deslocada para cima ou para baixo.

Wilson percebeu que, independente do número de expansões realizadas, sempre havia a formação de condensação em torno de um “núcleo invisível”, que pareciam ser partículas carregadas. Esta suspeita viria a ser confirmada, por estudos e experimentações posteriores, que o que Wilson estava provavelmente vendo seriam raios cósmicos secundários.

Wilson chegou a suspeitar e mencionar que poderia haver uma fonte de íons, com alto poder penetrante, fora da atmosfera como nos descreve Bowler (2012):

He discovered that air appears to be spontaneously ionised, wherever he measured it. While staying with his brother in Peebles, he worked in the railway tunnel there and the results led him to suggest, in 1901, that there might be a source of ions with high penetrating power, outside the atmosphere. This was the first mention of the idea of cosmic rays in the literature, although he concluded at the time that such a source was unlikely: (BOWLER, 2012):

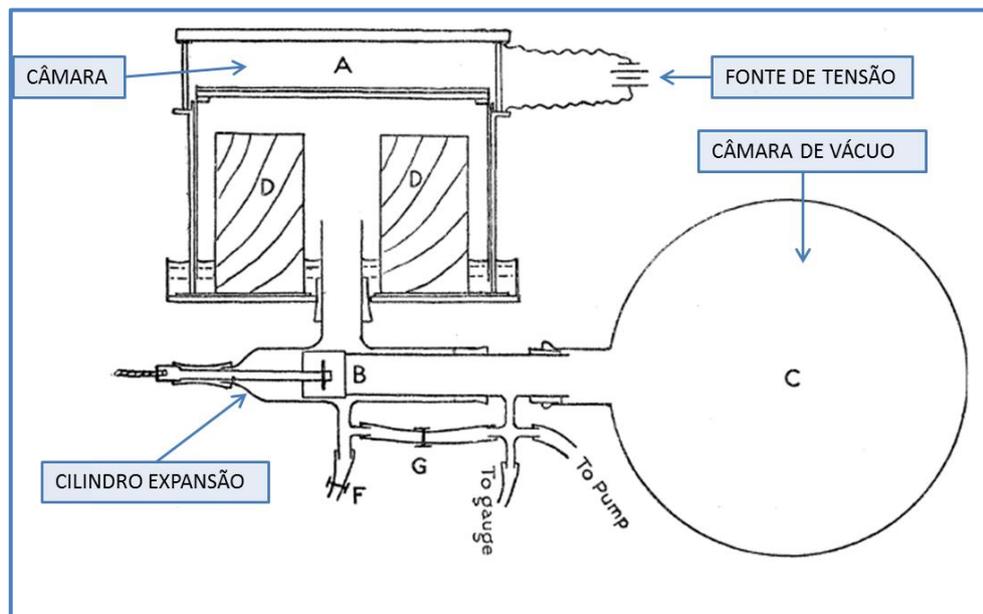
Trabalhando com fontes radioativas e expondo a câmara aos “raios de Roentgen”, Wilson disponibilizou, para a época, um instrumento que seria de grande importância para os estudos da atomística. Segundo Bowler (2012b) Ernest Rutherford teria referido à câmara de nuvens de Wilson como “*o mais original e maravilhoso instrumento na história científica (tradução nossa)*”.

A descrição de seu aparelho e resultados obtidos por ele foi tema de um artigo publicado na Proceedings of the Royal Society of London, em 1912, sob o título “On an Expansion Apparatus for Making Visible the Tracks of Ionising Particles in Gases and Some Results Obtained by Its Use”.

Neste artigo, encontramos a descrição de sua versão final de seu aparelho, Figura 34, descrita por Wilson (1912):

The cylindrical cloud chamber A is 16,5 cm. in diameter and 3,4 cm high; the roof, walls and floor are of glass, coated inside with gelatine, that on the floor being blackened by adding a little Indian ink.[...]The expansion is effected by opening the valve B and so putting the air space below the plunger in communication with the vacuum chamber C through wide glass connecting tubes of about 2 cm in diameter.[...]To reduce the volume of air passing through the connecting tubes at each expansion the wooden cylinder D was inserted within the air space below the plunger.” (WILSON, 1912)

Figura 34 – Esquema câmara de Wilson



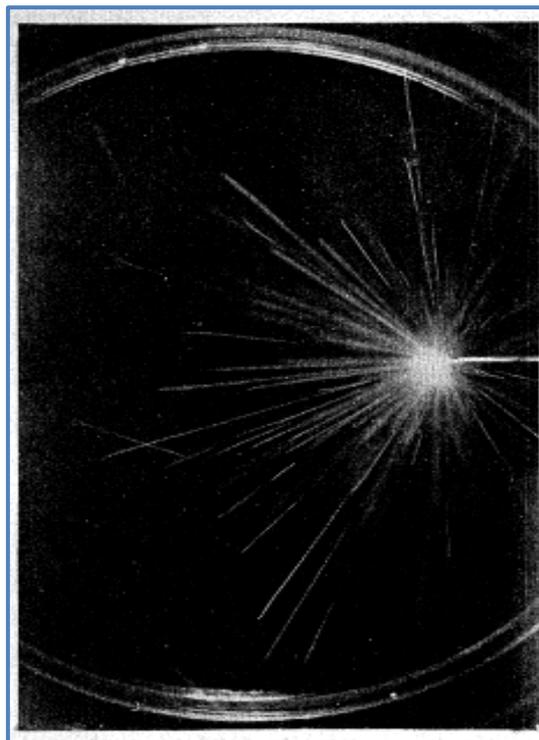
Fonte: (<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/87/595/277.full.pdf> - adaptado)

Neste mesmo artigo, Wilson (1912b) demonstra a viabilidade da câmara para visualização e registros fotográficos de vários traçados originados por radiações alfa, beta e raios X, como nos descreve:

...and it has now been found possible to photograph the tracks of even the fastest β -particles, the individual ions being rendered visible. In the photographs of the X-ray clouds the drops in many of the tracks are also individually visible; the clouds found in the α -ray tracks are generally too dense to be resolved into drops. The photographs are now free from distortion. (WILSON, 1912b)

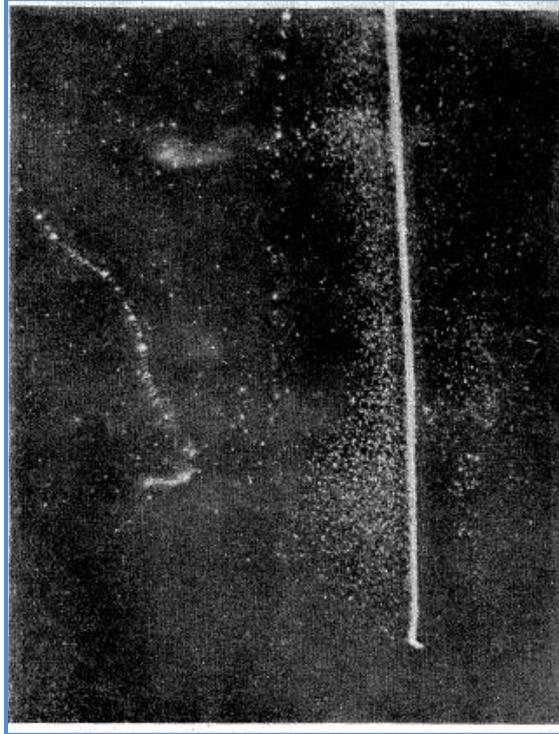
Encontramos, também neste artigo, uma excelente referência de registro fotográfico, realizado por Wilson, dos traçados das partículas que podem ser observadas. Na Figura 35 vemos o traçado de partículas alfa provenientes do rádio, na Figura 36 vemos os traçados simultâneos de alfa e beta provenientes do rádio e na Figura 37 as ionizações provocadas por raios X.

Figura 35 – Partículas α de radio



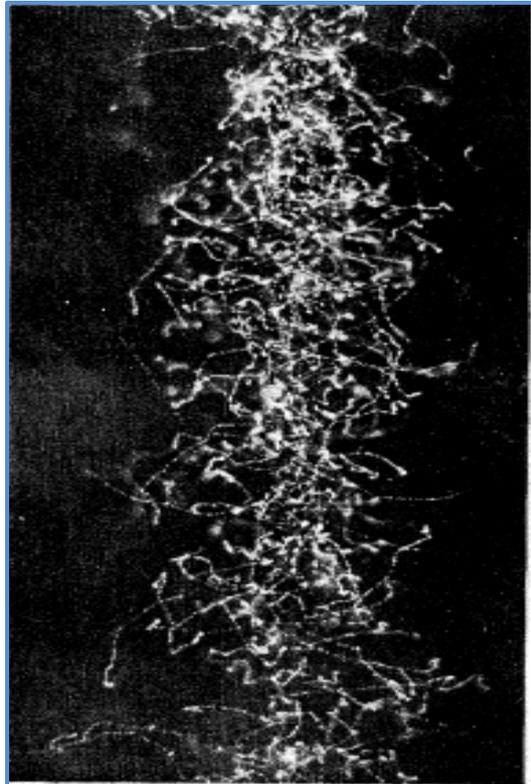
Fonte: (<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/87/595/277.full.pdf>)

Figura 36 – Traçados de partículas α e β de rádio



Fonte: (<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/87/595/277.full.pdf>)

Figura 37 – Ionização por raios X



Fonte: (<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/87/595/277.full.pdf>)

A câmara de Wilson foi, indubitavelmente, um instrumento valioso para muitos estudos e descobertas relativas à atomística. Ao obter experimentalmente as trajetórias dos fótons e dos elétrons espalhados, em colaboração com Arthur H. Compton, recebeu o prêmio Nobel em 1927.

Embora sendo um instrumento de grande utilidade, sua operação requeria paciência por parte do operador, pois eram necessárias constantes expansões e contrações e os traços eram visíveis, em média, apenas um décimo de segundo.

Para contornar este problema, Alexander Langsdorf, Jr, físico Americano, enquanto estudante do Instituto de Tecnologia de Massachusetts apresentou em sua tese de doutorado “um novo modelo de “câmara de nuvens” (tradução nossa)” denominada de *câmara de nuvens por difusão*, como escreve:

The principle topic of this thesis is the presentation of a new form of “cloud chamber” which is continuously supersaturated over extended periods of time. The operation and use of this cloud chamber, which hereafter will be called the “diffusion cloud chamber” are based upon the characteristics of supersaturated vapors in the same way as for the more familiar Wilson expansion cloud chamber. (LANGSDORF, 1937)

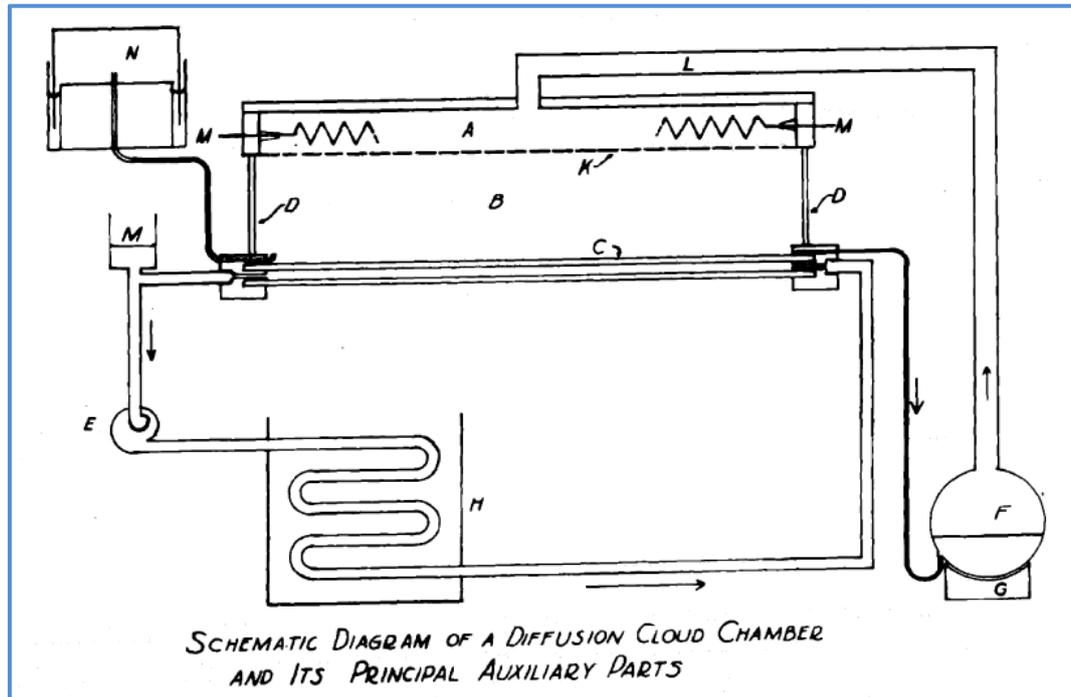
A câmara de difusão, proposta por Langsdorf, consiste de uma câmara em que no topo desta é colocada uma fonte de álcool metílico submetida a uma temperatura de 70 °C para difusão em direção à base que é mantida à -45 °C, de maneira a formar uma região intermediária suficiente supersaturada na qual ocorrerá o surgimento de traços decorrentes da ionização provocada pela passagem de partículas ou radiação eletromagnética. Como nos descreve:

When methyl alcohol vapor is supplied to the top of the chamber at 70 degrees centigrade and diffuses down to the bottom at -45 degrees, there is an intermediate region sufficiently supersaturated to show the characteristic tracks of cosmic ray primaries and secondaries as well as those due to secondary electrons from gamma radiation. (LANGSDORF, 1937b).

Posteriormente, na mesma publicação, Langsdorf sugere que a diferença de temperatura entre o topo da câmara e sua base seja de 100 °C e que ao se atingir - 35 °C na base, já se observa traçados por ionização, numa região de aproximadamente uma polegada (2,54 cm) acima da base, tornando-se mais estreita à medida que a temperatura abaixa e os traçados tornando-se mais definidos e claros.

O esquema da câmara por difusão de Langsdorf, apresentada em sua tese pode ser vista na Figura 38 e sua descrição de funcionamento é feita a seguir.

Figura 38 – Esquema da câmara de difusão de Langsdorf



Fonte: (<http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/10857/35319592.pdf>)

A câmara de difusão propriamente dita é o volume (B) correspondendo a uma caixa retangular de paredes de vidro (D). No topo da câmara existe uma placa de metal (K) com pequenos orifícios comunicando com o espaço (A). Vapor do álcool é introduzido no espaço (A) pela caldeira (F) e passa pelos pequenos orifícios em (K) atingindo o interior da câmara (B) onde é misturado com dióxido de carbono proveniente do reservatório de gás (N). A temperatura no interior do espaço (A) e a placa metálica (K) são mantidas altas por um aquecedor elétrico (M) montado no espaço (A).

A base da câmara é feita por duas placas de vidro (C) em que um líquido refrigerante proveniente de um reservatório, é circulado entre elas bombeado pela bomba (E), após passar por uma serpentina (H) resfriada por gelo comum ou gelo seco.

Como será visto adiante, a nossa câmara de nuvens eletrônica é baseada nos princípios de difusão e resfriamento encontrados na câmara de Langsdorf, mas o sistema de resfriamento será substituído por eletrônica de estado sólido, isto é, módulos de resfriamento por efeito peltier, dispensamos o aquecimento na parte superior e a difusão do álcool será livre no ar sob pressão atmosférica.

4. CONSTRUÇÃO DA CÂMARA DE WILSON ELETRÔNICA

A câmara de Wilson construída segue o princípio básico da Câmara por Difusão, mas com modificações de forma a permitir a sua mobilidade, isto é, que se possa levá-la à sala de aula e que também não necessite de materiais de difícil disponibilidade e aquisição como o dióxido de carbono sólido (popularmente, “gelo seco”).

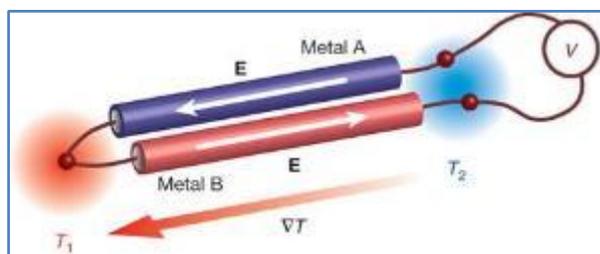
Para contornar o problema da aquisição e disponibilidade do dióxido de carbono, optou-se pela utilização de Módulos Termoelétricos, que são dispositivos de estado sólido construídos de maneira a otimizar os efeitos Seebeck e Peltier, apresentados no tópico seguinte.

Optamos também pelo álcool isopropílico (isopropanol) como elemento volátil dada a sua disponibilidade no mercado aliado ao seu baixo custo.

4.1 RESFRIAMENTO POR MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Em 1821 Thomas Johann Seebeck observou que em um circuito fechado formado por metais diferentes (cobre e bismuto) dava origem a uma corrente elétrica quando as junções destes metais eram submetidas a temperaturas diferentes. Fenômeno hoje denominado *efeito seebeck* (Figura 39). Na ocasião, Seebeck interpretou e relatou suas observações à Academia Prussiana de Ciências como sendo a polarização magnética de metais e minérios por diferença de temperatura, isto é, acreditava que um campo magnético era gerado pela junção e diferença de temperatura. Concluiu, erroneamente, que o campo magnético terrestre era gerado pela diferença de temperatura entre os polos e o equador.

Figura 39 – Efeito Seebeck



Fonte: (<http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAAgZKEAL-2.jpg>)

Atualmente, o efeito Seebeck é amplamente utilizado na medição de temperatura e a junção dos diferentes metais recebe o nome de termopares. A diferença de potencial elétrico

gerado na extremidade é utilizada para leitura eletrônica e conversão em escala de temperatura (Figura 40).

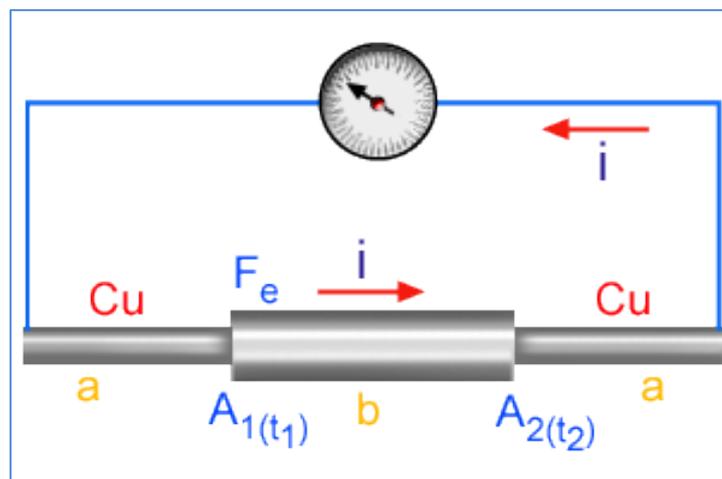
Figura 40 - Termopares



Fonte: (http://www.ecil.com.br/upload/produto/redimensionada_media/termopar-serie-ecilplast.jpg)

Posteriormente, em 1834, o físico francês Jean Charles Athanase Peltier descobriu que ao estabelecer uma corrente elétrica através de duas junções de metais diferentes (Figura 41), ocorria a liberação ou absorção de calor nas junções dependendo do sentido da corrente. Tal fenômeno ficou conhecido como *efeito Peltier*.

Figura 41 – Efeito Peltier

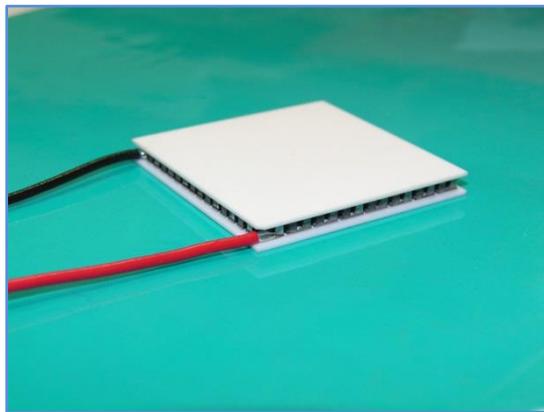


Fonte: (http://efisica.if.usp.br/electricidade/basico/termo/efeito_termoeletrico/)

No nosso projeto, temos particular interesse no *efeito peltier*, dado que vamos necessitar temperaturas na ordem de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ para obtermos vapor supersaturado do álcool que permitirá a visualização dos traçados das partículas.

O desenvolvimento de novos materiais permitiu obter-se o efeito peltier e seebeck de modo mais acentuado utilizando-se semicondutores. Estes novos dispositivos, *denominados módulos termoelétricos* (Figura 42) são encontrados em diversos equipamentos de uso militar, aeroespacial, computação e até domésticos com o propósito de refrigeração localizada, isto é, que o volume a ser refrigerado seja pequeno.

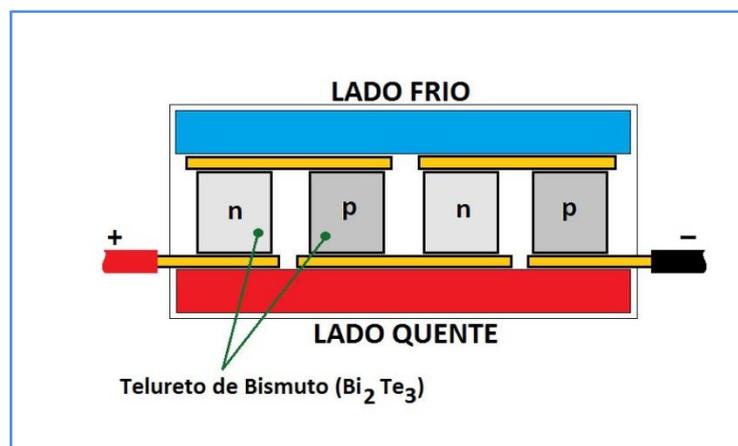
Figura 42 – Módulo termoelétrico



Fonte: (<http://www.thermoelectric.com/2005/images/te.jpg>)

O material semicondutor normalmente empregado é o telureto de bismuto (Bi_2Te_3) arranjado em forma de blocos interligados eletricamente em série e termicamente em paralelo de maneira que o fluxo de calor ocorra na mesma direção quando uma corrente elétrica é percorrida por estes (Figura 43).

Figura 43 – Blocos de Bi_2Te_3 ligados em série

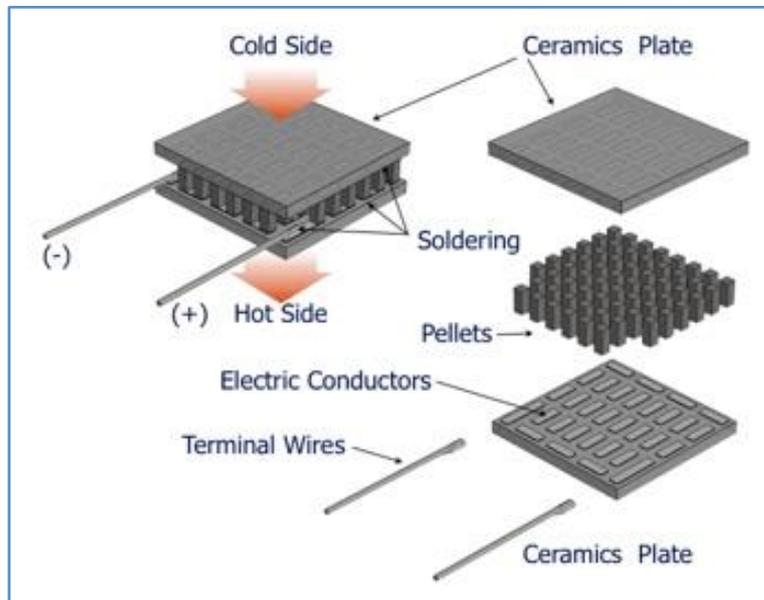


Fonte: (<http://dicasdozebio.wordpress.com/2013/12/01/1547/>)

A construção final de um módulo termoelétrico pode ser observada na vista explodida da Figura 44, onde o par de blocos semicondutores é unido por condutores elétricos no lado frio e no lado quente (chamados “elementos”).

Posteriormente, todos os elementos, ligados eletricamente em série, são acondicionados em forma de “sanduiche” entre duas placas cerâmicas, de maneira que o calor em uma das faces (lado frio) seja transferido para a outra face (lado quente) onde deverá ser difundido ao ambiente por um dissipador convenientemente dimensionado para tal. O conjunto recebe então um par de fios nos quais será estabelecida uma tensão elétrica para a correta operação do módulo.

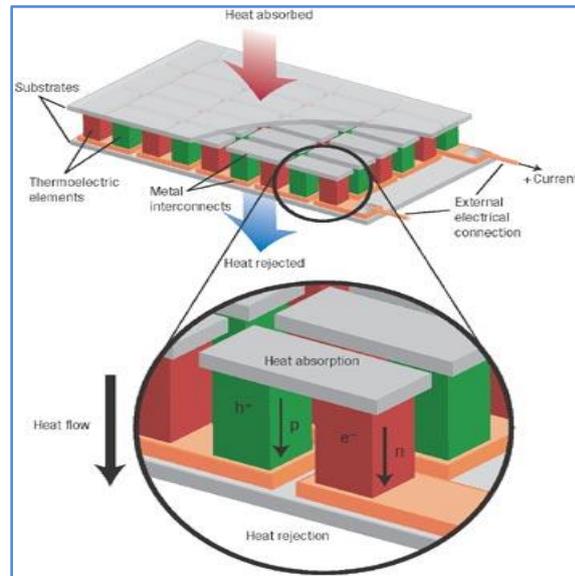
Figura 44 – Aspectos construtivos



Fonte: (<http://www.tec-microsystems.com/.../Construction.jpg>)

Um detalhe construtivo pode ser observado na Figura 45, mostrando a conexão elétrica entre os elementos.

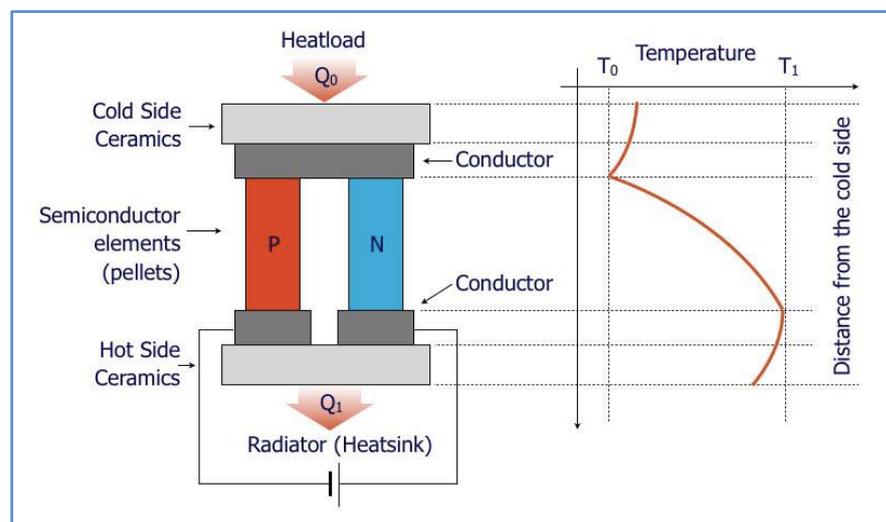
Figura 45 – Detalhe construtivo



Fonte: (<http://www.nature.com/nmat/journal/v7/n2/images/nmat2090-i1.jpg>)

Comercialmente, encontramos uma variedade considerável de modelos, tamanhos e especificações de módulos termoelétricos, e estes podem ser usados individualmente ou ligados eletricamente em série, paralelo e série-paralelo. Pode-se utilizá-los numa configuração em “cascata” ou multiestágios, onde os módulos são ligados termicamente em série, isto é, utiliza-se um módulo para resfriar o “lado quente” do outro. Isto acarreta um aumento na diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio (ΔT) altamente desejável em nosso projeto.

Figura 46 – Fluxo de calor entre os componentes



Fonte: (<http://www.tec-microsystems.com>)

Uma vez que vamos utilizar o resfriamento por módulos termoelétricos para se obter vapor supersaturado de álcool no interior da câmara, devemos dimensionar o(s) módulo(s) de maneira a atingir uma temperatura adequada para que ocorra os rastros de ionização originados pelas partículas emitidas do material radioativo.

4.2 DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Para nosso projeto, devemos considerar um conjunto de variáveis que relacionadas entre si, nos produza um produto final otimizado para custo, materiais de fácil acesso e desempenho final satisfatório.

Podemos afirmar que o elemento essencial do projeto são os módulos termoelétricos, encontrados no mercado a um preço bastante acessível, dado a variedade de equipamentos de uso doméstico existentes, como, por exemplo, bebedouros de água refrigerados.

Encontramos na internet, os módulos TEC1-12706 e TEC1-12708, produtos de fabricação chinesa (HB – Hebei I.T. (Shanghai) Co.,Ltd), sendo o módulo TEC1-12706 é indicado como substituto do módulo original em bebedouros refrigerados encontrados no mercado.

Como ponto de partida para o dimensionamento, consideramos que a temperatura na face fria do módulo deve chegar algo em torno de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e utilizando um bom radiador de calor, a temperatura na face quente deverá ficar em torno de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ de acordo com as especificações do fabricante.

Os módulos termoelétricos disponíveis consomem correntes que variam de 3A a 15A, isto é, devemos disponibilizar uma fonte de alimentação que seja capaz de fornecer estas magnitudes de corrente. Como nosso objetivo é disponibilidade de componentes e minimizar os custos, optamos pelo uso de uma fonte de computador pessoal (PC), cujas especificações, detalhamos no decorrer deste trabalho, satisfaz as condições de fornecimento de correntes e tensões.

Com base na necessidade de uma *diferença de temperatura do sistema* (ΔT_s) na ordem de $\Delta T_s = (27) - (-30) = 57\text{ }^{\circ}\text{C}$, e uma corrente elétrica na ordem 8A (50% da corrente máxima fornecida pela fonte), verificamos a possibilidade de se utilizar apenas um módulo termoelétrico. Para tal, encontramos no site indicado pelo fabricante (disponível em <http://peltiermodules.com/?p=product>), o módulo TEC1-12708 as seguintes especificações:

Figura 47 – Especificações TEC1-12708

Performance Specifications		
Hot Side Temperature (° C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	71	79
Delta Tmax (° C)	66	75
I_{max} (Amps)	8.5	8.4
V_{max} (Volts)	15.4	17.5
Module Resistance (Ohms)	1.50	1.80

Fonte: (<http://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12708.pdf>)

Encontramos também, o módulo TEC1-12706, com características semelhantes ao TEC1-12708, que embora possuindo o mesmo Delta $T_{\text{máx}}$, $Q_{\text{máx}}$ é inferior, conforme especificação:

Figura 48 - Especificações TEC1-12706

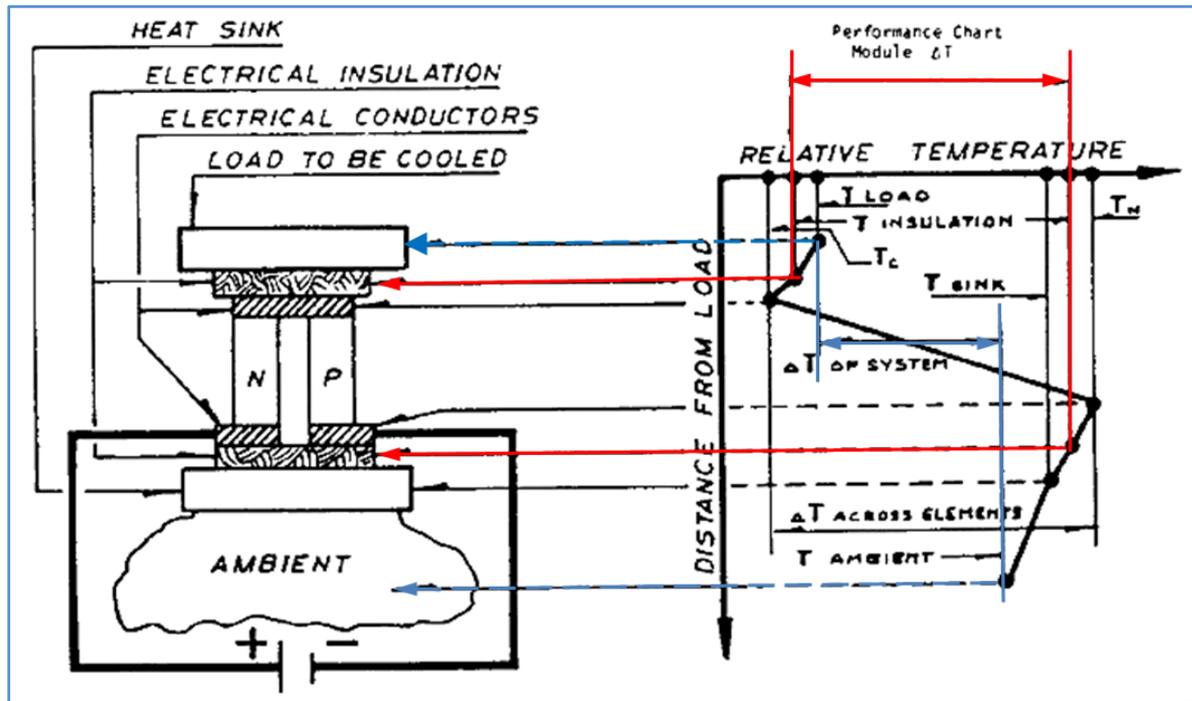
Performance Specifications		
Hot Side Temperature (° C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	50	57
Delta Tmax (° C)	66	75
I_{max} (Amps)	6.4	6.4
V_{max} (Volts)	14.4	16.4
Module Resistance (Ohms)	1.98	2.30

Fonte: (<http://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>)

Comparando as especificações dos módulos, escolhemos o módulo TEC1-12708 ($Q_{\text{máx}}$ maior) para determinar se apenas um módulo seria o suficiente para nosso projeto.

Observamos que Delta Tmax ($\Delta T_{\text{máx}}$) do módulo é 66 °C (a 25 °C na face quente) o que, teoricamente, nos atenderia em nossos objetivos. Mas, é importante salientar que o $\Delta T_{\text{máx}}$ fornecido pelo fabricante é *diferente* da diferença de temperatura que desejamos para nosso sistema (ΔT_s), conforme podemos verificar no gráfico da temperatura relativa, ao longo do caminho da face fria para a face quente de um módulo típico (Figura 49).

Figura 49 – Temperatura relativa num módulo termoelétrico



Fonte: (<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/007b/0900766b8007ba20.pdf> - adaptado)

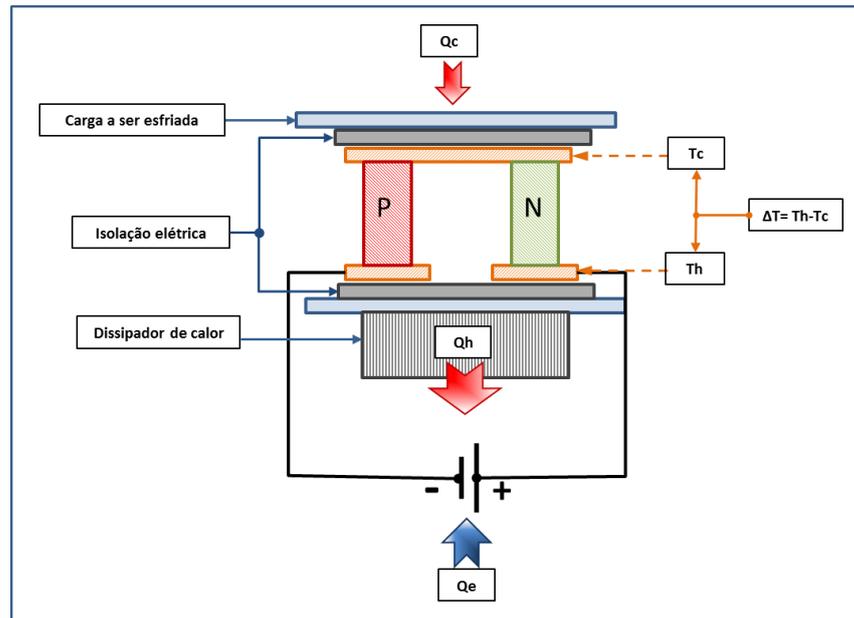
Os cálculos para o dimensionamento *preciso* de sistemas refrigerados com módulos termoelétricos demanda uma série de operações matemáticas sobre muitas variáveis. Para tal, os fabricantes disponibilizam programas de computador para facilitar este trabalho.

Com o conhecimento de parâmetros importantes, podemos utilizar estes softwares ou quando o sistema não demanda grande precisão, como é nosso caso, podemos ainda utilizar análises gráficas.

Os parâmetros que devemos considerar para análise por software ou gráfica são descritos a seguir (referenciar à Figura 50).

- . T_C - Cold Surface Temperature (Temperatura da face fria): É a temperatura medida nos condutores metálicos que unem eletricamente os semicondutores na face fria ($^{\circ}\text{C}$).
- . T_h - Hot Surface Temperature (Temperatura da face quente): É a temperatura medida nos condutores metálicos que unem eletricamente os semicondutores na face quente ($^{\circ}\text{C}$).
- . Q_c - Calor absorvido na face fria (W).
- . Q_h - Calor rejeitado ao ambiente pelo dissipador de calor (W).
- . Q_e - Potência elétrica fornecida pela fonte de alimentação (W).
- . C.O.P. – Coeficiente de Performance do módulo, dado pela relação (Q_c/Q_e) .
- . ΔT – Diferença de temperatura entre a junção quente e fria.

Figura 50 – Principais parâmetros para dimensionamento



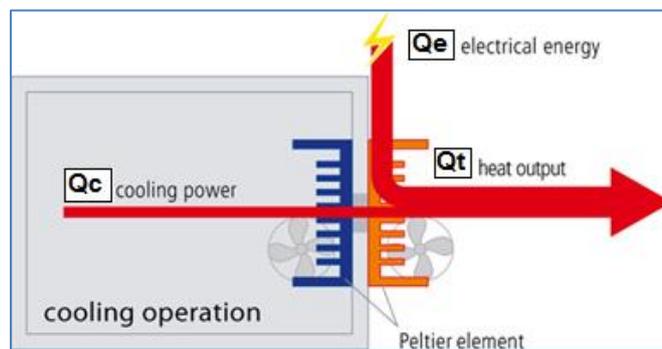
Fonte: (Autoria própria)

Uma especial atenção deve ser dada ao parâmetro Coeficiente de Performance do módulo (COP), uma vez que este relaciona a potência elétrica fornecida ao módulo (Q_e) e a efetiva potência de absorção de calor na face fria (Q_c).

$$COP = \frac{Q_c}{Q_e} \quad (1)$$

Significa que o calor total a ser irradiado pelo radiador de calor deve ser a soma do calor absorvido pela face fria mais o calor gerado por efeito joule (Figura 51):

Figura 51 – Coeficiente de Performance



Fonte: (<http://goo.gl/4MY7I1> - adaptado)

Iniciamos o nosso dimensionamento assumindo que a temperatura do vapor de álcool deveria ser na ordem de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ para obtermos uma camada de supersaturação aproximadamente 10mm a partir da base da câmara e que a temperatura no radiador de calor é próximo de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, determinamos que a diferença de temperatura do sistema (ΔT_s) será:

$$\Delta T_s = (27) - (-30) = 57\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

Observamos que a diferença de temperatura que desejamos obter já se aproxima do ΔT_{max} do módulo TEC1-12708 e do módulo TEC1-12706, nos levando a crer que deveremos utilizar uma combinação de módulos *em cascata*.

Para uma primeira tentativa de estimativa para a escolha do número de módulos, utilizando um software disponibilizado para cálculo de parâmetros “online”, (disponível em < <http://goo.gl/dNTfvS> >) fornecendo os parâmetros iniciais, conforme pode ser visto na Figura 52.

Figura 52 – Software para cálculo de parâmetros de módulos

Peltier – Thermoelectric Cooler Module Calculator

Enter Cooling Requirements

1 DTmax of module: °C

TIP! Need a starting point for DTmax?
70 °C is typical for an unpotted single-stage module
68 °C is typical for a potted module.

2 Heat Load (Q): watts **Estimado**

3 Hot-side Temperature: °C

4 Cold-side Temperature: °C

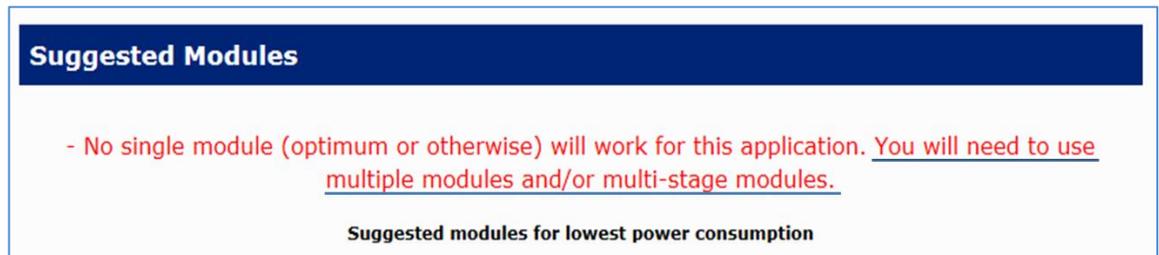
5 Potted:

Information on potted or sealed (terms are used interchangeably) modules can be found on the page [Moisture Protection & Ruggedizing](#)

Fonte: (<http://goo.gl/dNTfvS> - adaptado)

Com os parâmetros fornecidos, o programa não pôde especificar um módulo isolado que atendesse a necessidade proposta para o nosso sistema, conforme a Figura 53.

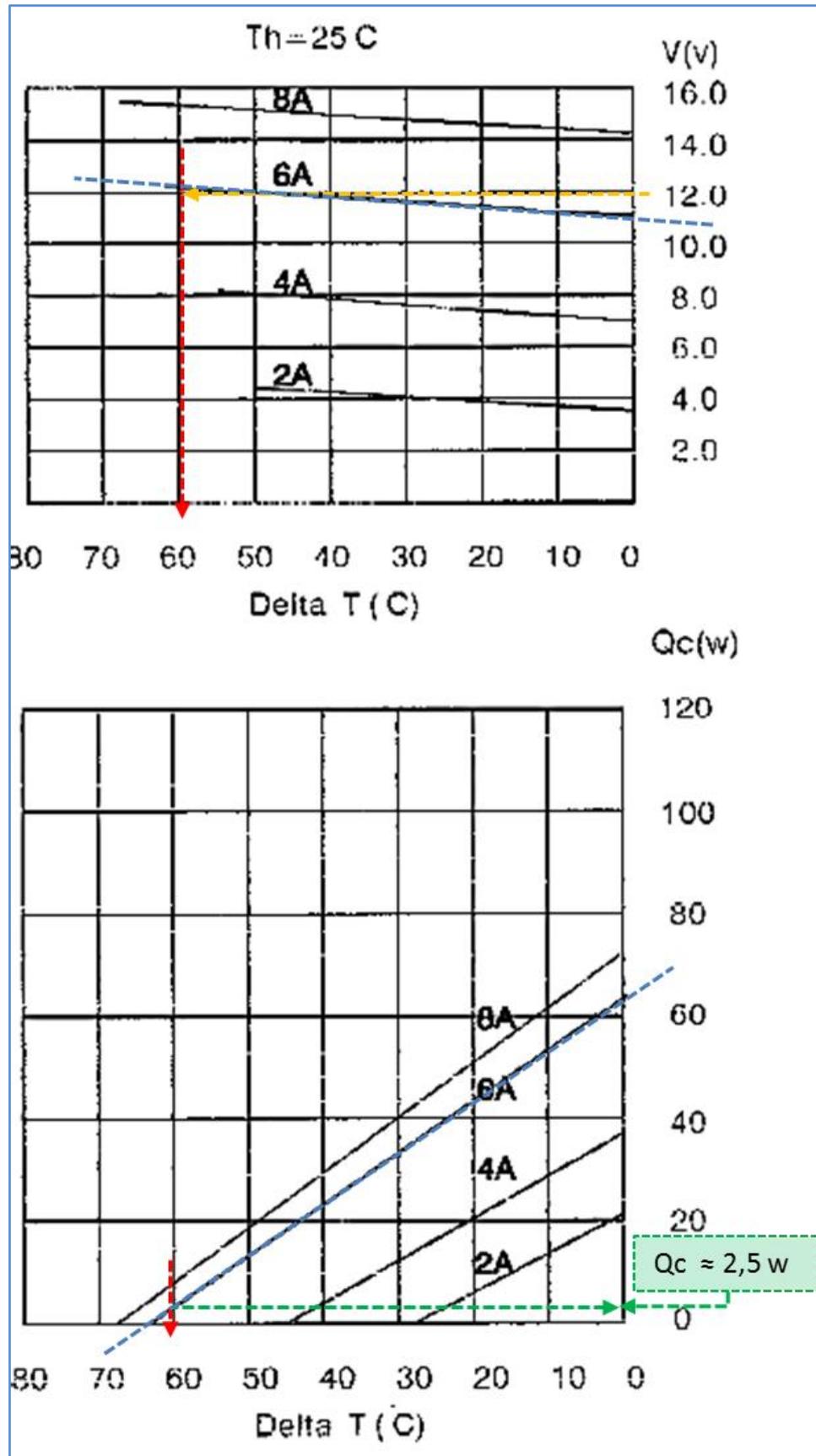
Figura 53 – Resultado apresentado pelo software



Fonte: (<http://totech.com/downloads/> - adaptado)

Com a intenção de utilizar os modelos de módulos citados, procuramos verificar a indicação do software, utilizando *análise gráfica* (Figura 54) para determinar se um módulo seria insuficiente.

Figura 54 – Análise gráfica para um módulo TEC1-12708



Fonte: (Curvas de performance disponibilizada pelo fabricante – modificada)

Utilizamos na análise os seguintes parâmetros:

. $V = 12$ volts (tensão disponível da fonte).

. $\Delta T = 60$ °C (consideramos 3 °C a mais do que a necessidade do sistema).

Traçando a linha correspondendo a $V = 12$ v (*linha amarela*) e a linha correspondente a $\Delta T = 60$ °C (linha vermelha) no gráfico superior, encontramos que o módulo irá operar com uma corrente de 6A (linha azul).

Traçando a linha correspondendo a $\Delta T = 60$ °C (*linha vermelha*) e a linha correspondente à corrente elétrica 6A (*linha azul*) encontramos que nestas condições o módulo irá trabalhar com apenas 2,5 W de absorção de calor na parte fria (Q_c – *linha verde e retângulo em verde*), o que nos leva a um coeficiente de performance (COP) muito baixo.

$$Q_e = V.I = 12.6 = 72 \text{ w} \quad (3)$$

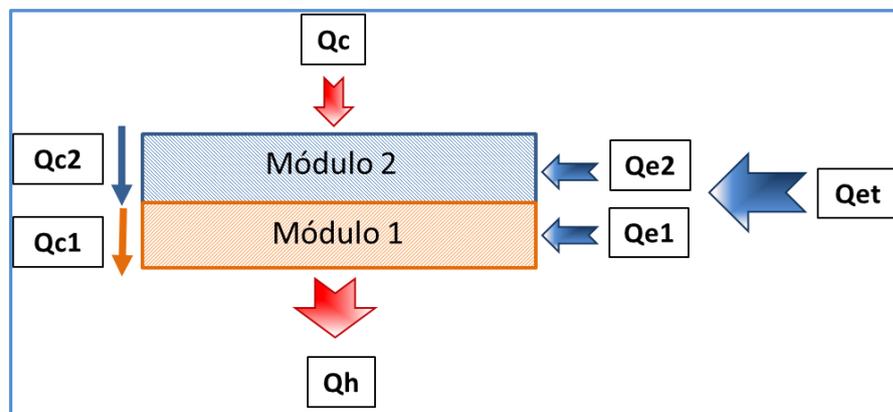
$$COP = \frac{Q_c}{Q_e} = \frac{2,5}{72} = 0,0347 \quad (4)$$

Analisando as informações disponíveis no manual de aplicações de fabricantes, encontramos que os valores típicos para Q_c variam de 30 w a 40 w e que valores típicos de COP variam de 0,3 a 0,7 *concluimos que é inviável o uso de apenas um módulo para o nosso objetivo*, dado que $Q_c = 2,5$ w e $COP = 0,0347$.

Teremos então que dimensionar o sistema para dois módulos trabalhando em *cascata*, isto é, termicamente em série (um sobre o outro), de forma que o calor gerado na face quente de um seja absorvido na face fria do outro.

O esquema de montagem pode ser visto na Figura 55.

Figura 55 – Montagem em cascata



Fonte: (Autoria própria)

Os parâmetros envolvidos no sistema em cascata (Figura 2) são:

- . Q_c - Potência térmica equivalente ao calor absorvido na face fria do módulo 1 (w).
- . Q_h - Potência térmica equivalente ao calor rejeitado pelo radiador de calor (w).
- . Q_{e1} - Potência elétrica, fornecida pela fonte, ao módulo 1 (w).
- . Q_{e2} - Potência elétrica, fornecida pela fonte, ao módulo 2 (w).
- . Q_{et} - Potência elétrica total fornecida ao sistema ($Q_{e1}+Q_{e2}$) (w).
- . Q_{c1} - Potência térmica equivalente ao calor fluindo no módulo 1 (w).
- . Q_{c2} - Potência térmica equivalente ao calor fluindo no módulo 2 (w).

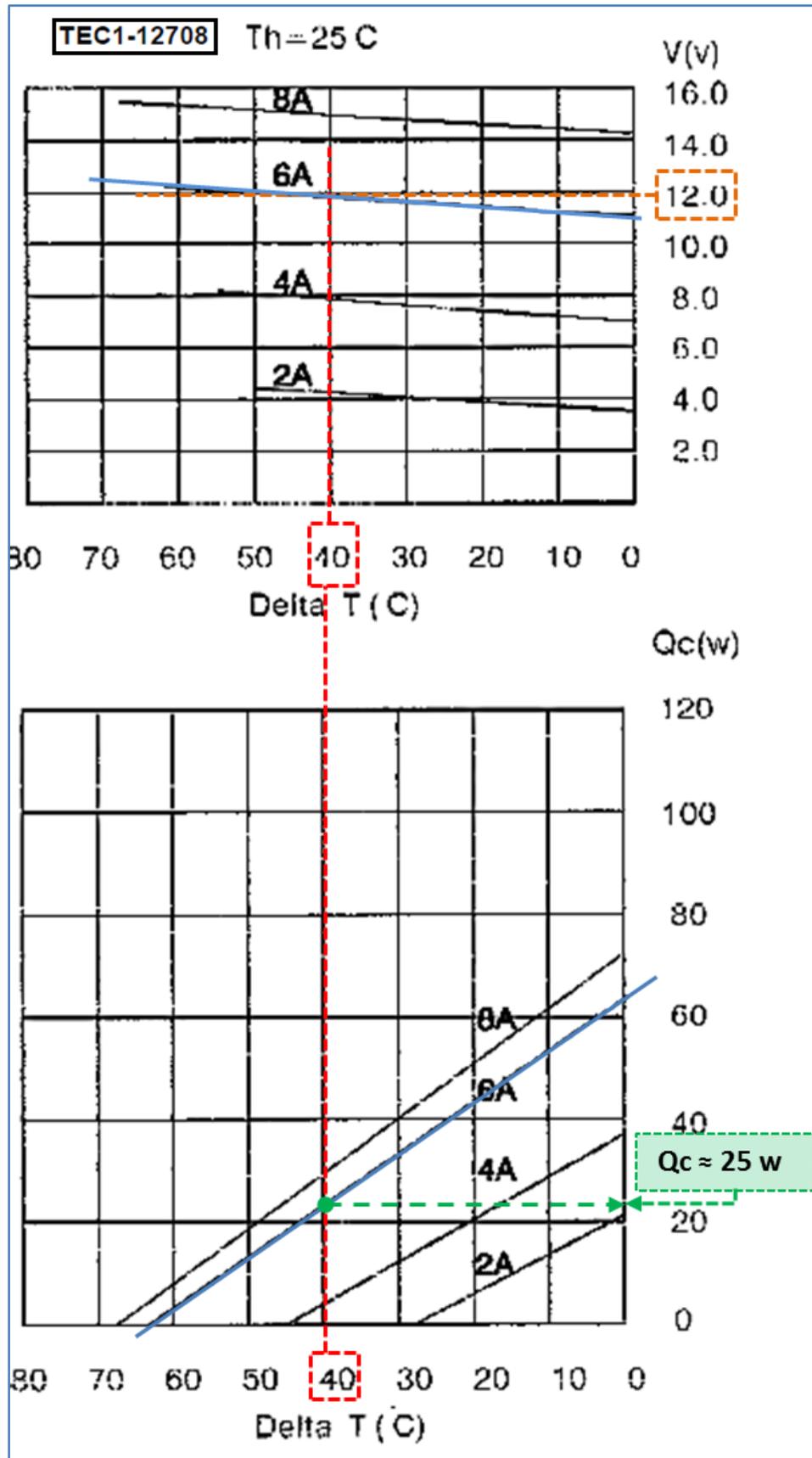
A diferença de temperatura desejada para o sistema (ΔT_s) é na ordem de $60\text{ }^\circ\text{C}$, então devemos dimensionar os módulos de maneira que a soma das diferenças das temperaturas nas faces quente e fria de cada um dos módulos seja $60\text{ }^\circ\text{C}$.

Como o módulo inferior (Módulo 1) deve resfriar a face quente do módulo superior, a diferença de temperatura através deste será maior que a do módulo superior e portanto deverá possuir maior potência térmica (Q_{c1}) e maior potência elétrica (Q_{e1}) entre os dois.

O módulo TEC1-12708, dadas suas especificações (Figura 47), atende a estas condições iniciais para ser o módulo inferior, enquanto que as especificações do módulo TEC1-12706 (Figura 48) indica este módulo para o módulo superior.

Análise gráfica (Figura 56):

Figura 56 – Análise gráfica para o módulo1



Fonte: (Curvas de performance disponibilizada pelo fabricante – modificada)

Com as condições iniciais $V_1 = 12 \text{ v}$ (linha laranja) e $\Delta T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (linha vermelha), encontramos no gráfico superior, na intersecção das duas linhas, que a corrente teórica de operação é $I_{T1} = 6 \text{ A}$ (linha azul).

No gráfico inferior, com $\Delta T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (linha vermelha) e a corrente $I_{T1} = 6 \text{ A}$ (linha azul), encontramos na intersecção o valor aproximado de $Q_{c1} \approx 25 \text{ w}$ (linha verde e retângulo verde).

Nestas condições, a potência elétrica (Pe_1) do módulo deverá ser:

$$Q_{e1} = V_1 \cdot I_{T1} = 12 \cdot 6 = 72 \text{ w} \quad (5)$$

Com o valor aproximado de Q_{c1} e Pe_1 podemos estimar o valor do Coeficiente de Performance (COP_1) do módulo:

$$COP_1 = \frac{Q_{c1}}{Q_{e1}} = \frac{25}{72} = 0,347 \approx \mathbf{0,35} \quad (6)$$

(Observamos que o COP se encontra na faixa típica de operação.)

Considerando que havíamos estimado a temperatura do sistema (interior da câmara) como $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ e a temperatura no dissipador de calor em $27 \text{ }^\circ\text{C}$, obtemos a variação do sistema (ΔT_s) sendo $\Delta T_s = (27) - (-30) = 57 \text{ }^\circ\text{C}$ e considerando que há uma diferença entre a temperatura da junção (T_c) e a temperatura que se deseja na *superfície fria na cascata*, vamos dimensionar o segundo módulo (módulo 2) para que a temperatura em sua superfície atinja algo próximo $-33 \text{ }^\circ\text{C}$ (admitindo uma perda de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ até o interior da câmara).

Desta maneira, a diferença de temperatura entre o *dissipador de calor* e a *superfície fria dos módulos em cascata* (ΔT_T) será $\Delta T_T = (27) - (-33) = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

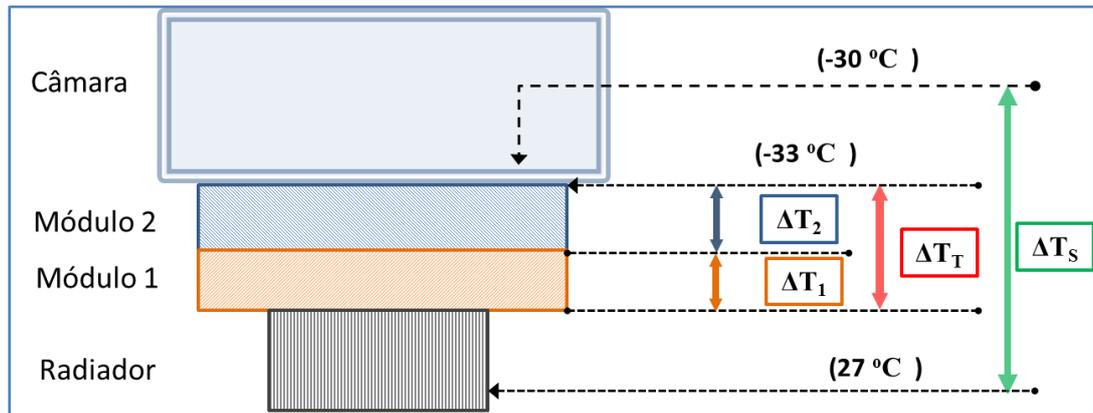
Como já determinamos que o módulo 1 deva proporcionar uma diferença de temperatura entre o dissipador de calor e sua superfície fria de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$), a diferença de temperatura no módulo 2 (ΔT_2) deverá ser:

$$\Delta T_2 = \Delta T_T - \Delta T_1 = 60 - 40 = 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (7)$$

Logo, necessitamos dimensionar o módulo 2 para $\Delta T_2 = 20^\circ\text{C}$.

As temperaturas e suas diferenças podem ser visualizadas na Figura 57.

Figura 57 – Diferenças de temperaturas no sistema



Fonte: (Autoria própria)

Analisando as especificações e as curvas características do módulo TEC1-12706 notamos que se o módulo trabalhar com 12 volts, demandaria uma corrente de 4,5 ampères correspondendo a um $\Delta T \approx 50^\circ\text{C}$ (linha vermelha no gráfico superior da Figura 58).

Com $\Delta T \approx 50^\circ\text{C}$ e $I = 4,5\text{ A}$ encontramos que $Q_c \approx 10\text{ w}$ (linha verde no gráfico inferior da Figura 58).

Se a potência elétrica é $Q_e = V.I = 12. 4,5 = 54\text{ W}$ e $Q_c = 10\text{ W}$ podemos, nestas condições, determinar o coeficiente de performance (COP) teórico:

$$COP = \frac{Q_c}{Q_e} = \frac{10}{54} \approx 0,18 \quad (8)$$

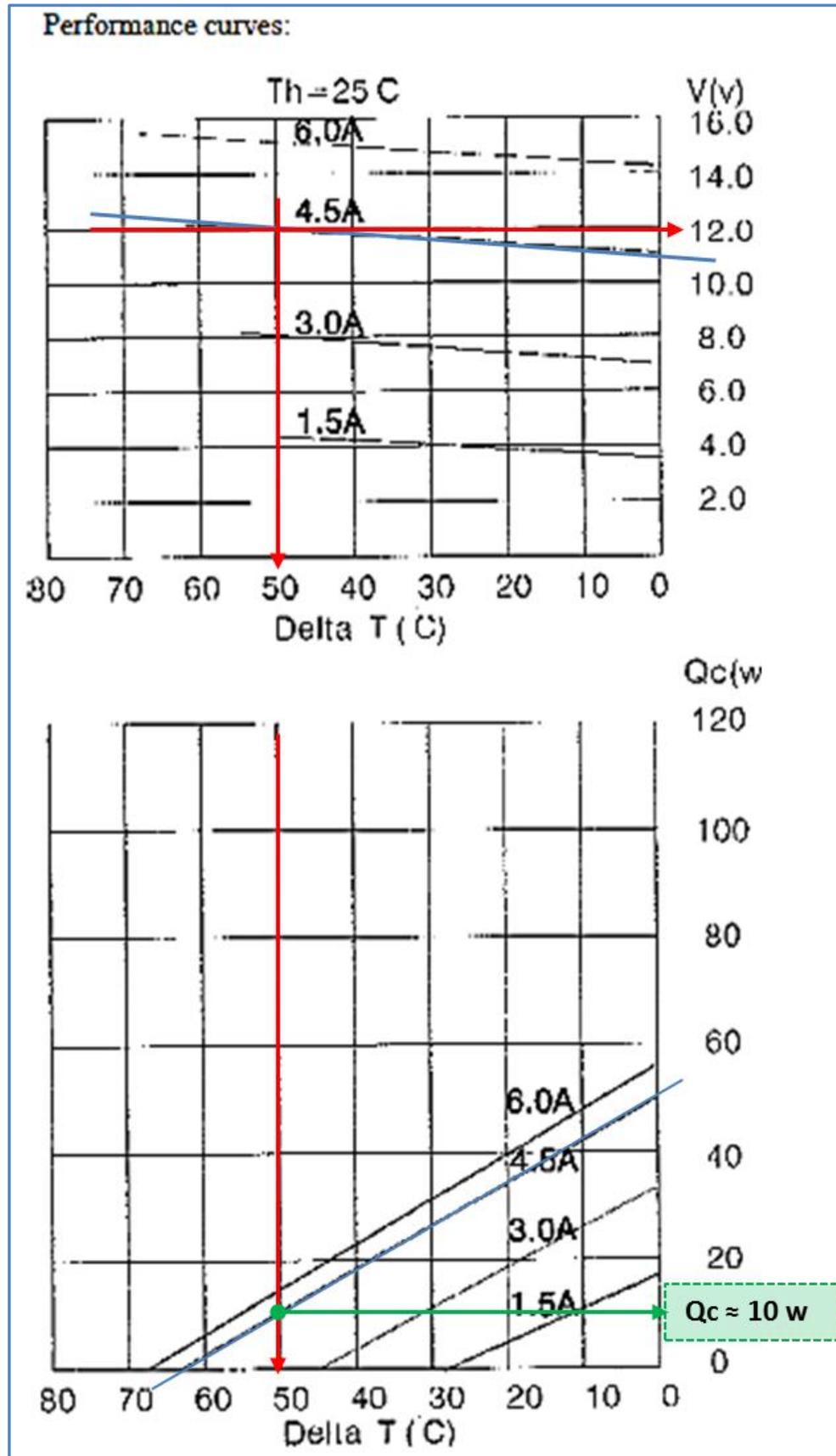
Notamos que o COP do módulo fica aquém do recomendado, isto é, entre 0,3 a 0,5.

Nesta situação, se trabalharmos com ambos os módulos em 12 V, a Potência elétrica total fornecida pela fonte (P_t) seria $P_t = 12.6 + 12.4,5 = 126\text{ W}$ e com a Potência térmica total (Q_{ct}) seria $Q_{ct} = 25 + 10 = 35\text{ W}$, verificamos que o COP do sistema (COPs) seria :

$$COP_s = \frac{Q_c}{P_e} = \frac{25}{126} \approx 0,2 \quad (9)$$

O que indica a *inviabilidade* de utilizarmos a mesma tensão para ambos os módulos.

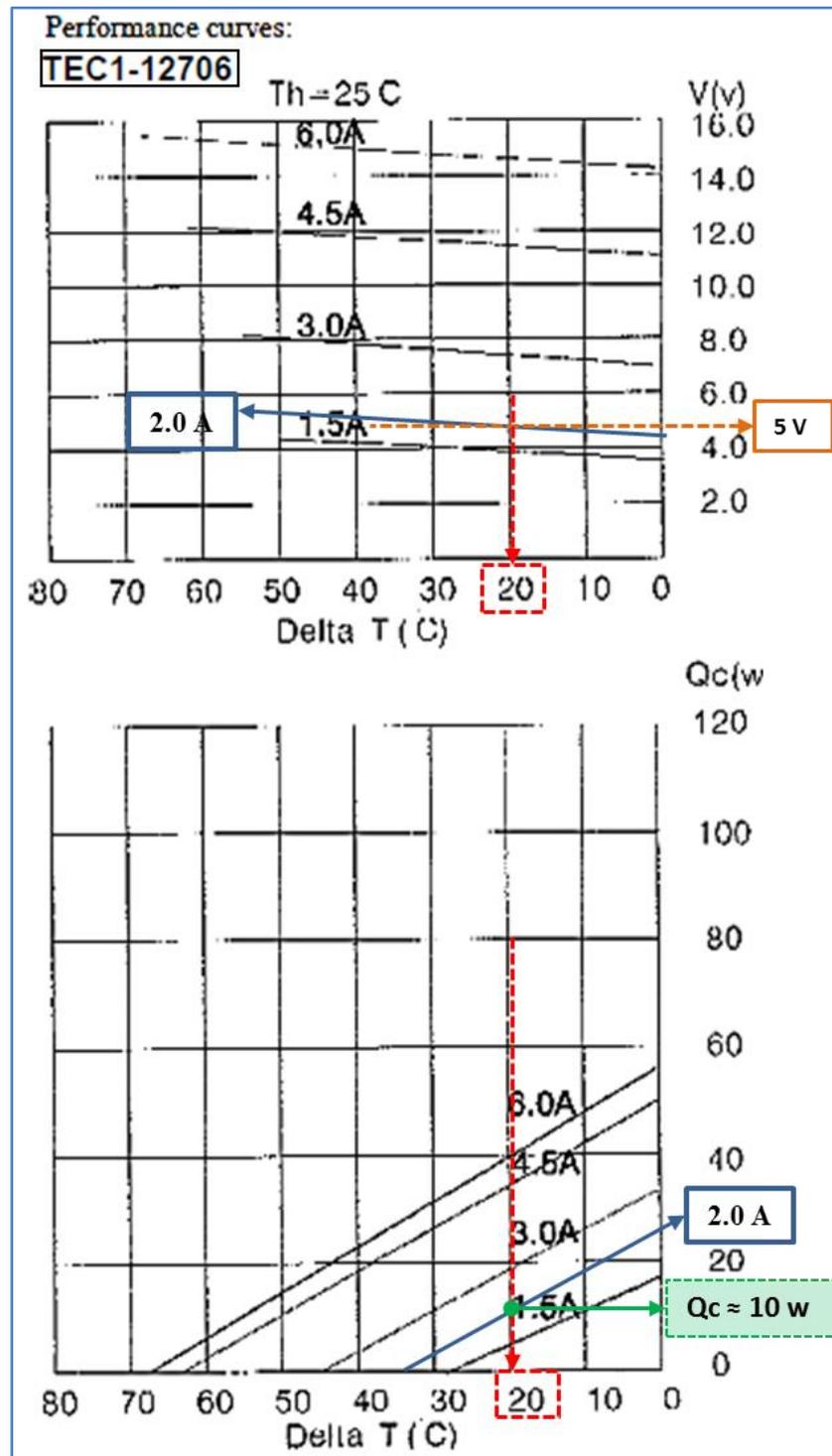
Figura 58 – Análise gráfica com 12 V no módulo TEC1-12706



Fonte: (Curvas de performance disponibilizada pelo fabricante – modificada)

Se fixarmos a voltagem do módulo em 5 volts (que temos disponível em nossa fonte de alimentação) e tendo em mente que se deseja $\Delta T_2 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (equação 7), podemos melhorar o coeficiente de performance, conforme nos mostra a análise gráfica da Figura 59.

Figura 59 – Análise gráfica TEC1-12706 com 5 V



Fonte: (Curvas de performance disponibilizada pelo fabricante – modificada)

Com os parâmetros $V_2 = 5$ v (linha laranja) e $\Delta T_2 = 20$ °C (linha vermelha) no gráfico superior da Figura 59, encontramos (por extrapolação) a corrente de operação do módulo (I_2) (linha azul) de aproximadamente 2 A.

No gráfico inferior da Figura 59, com $I_2 = 2$ A (linha azul) e $\Delta T_2 = 20$ °C (linha vermelha), encontramos que a potência equivalente ao calor absorvido $Q_{c2} \approx 10$ w.

Assim, a potência elétrica será:

$$Q_{e2} = V_2 \cdot I_2 = 5 \cdot 2 = 10 \text{ W} \quad (10)$$

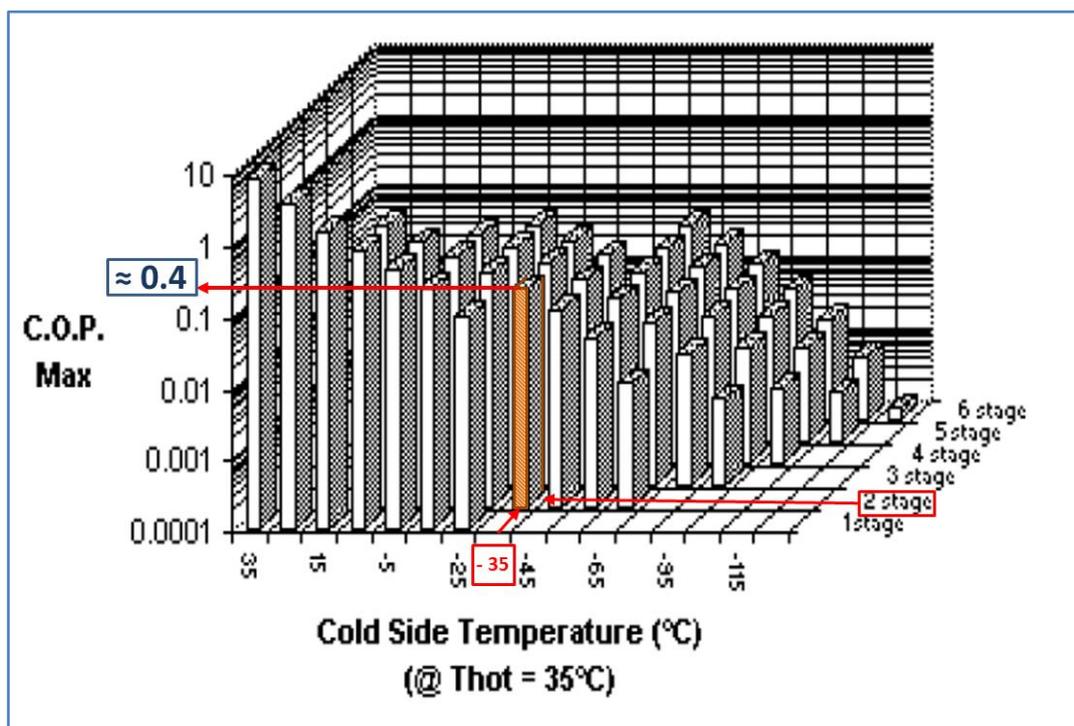
Nesta situação, podemos calcular o COP_2 :

$$COP_2 = \frac{Q_{e2}}{Q_{c2}} = \frac{10}{10} = 1,0 \quad (11)$$

O que indica um excelente valor, mas não corresponde ao Coeficiente de Performance do Sistema (COPs) correspondente ao *conjunto formado pelos dois módulos em cascata*.

Uma estimativa esperada pode ser vista na Figura 60.

Figura 60 – Estimativa do COP em cascata



Fonte: (<http://goo.gl/CifH23>)

Com a análise gráfica feita para os dois módulos, podemos determinar os parâmetros teóricos finais do conjunto (Figura 61).

A potência elétrica total do conjunto (Q_{et}) será:

$$Q_{et} = Q_{e1} + Q_{e2} = 72 + 10 = 82 \text{ w} \quad (12)$$

A potência térmica total do conjunto (Q_{ct}) será:

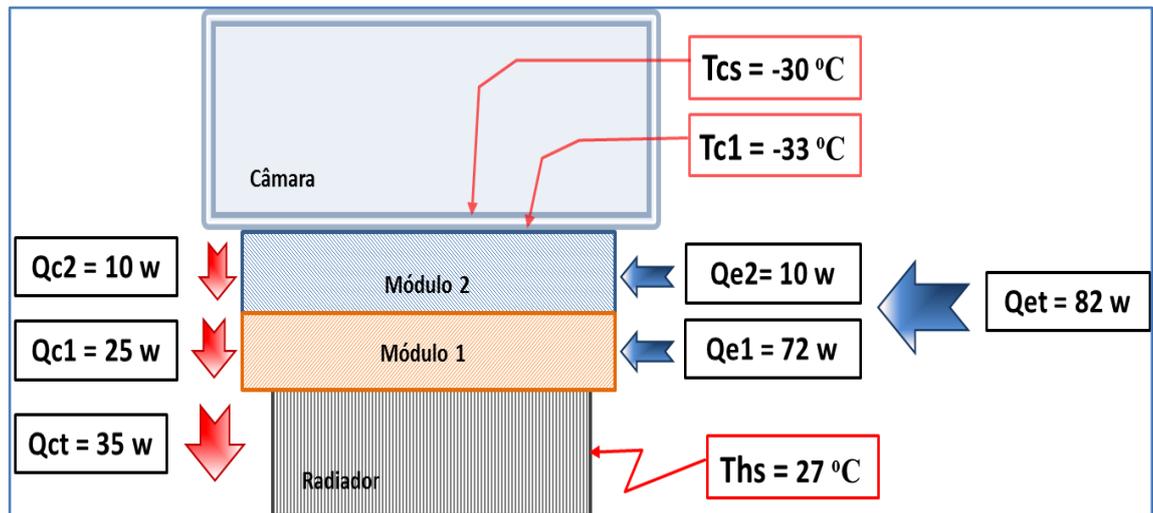
$$Q_{ct} = Q_{c1} + Q_{c2} = 25 + 10 = 35 \text{ w} \quad (13)$$

O Coeficiente de Performance do sistema (COP_s) será:

$$COP_s = \frac{Q_{ct}}{Q_{et}} = \frac{35}{82} \approx 0,427 \quad (14)$$

O que condiz com a estimativa apresentada na Figura 60.

Figura 61 – Parâmetros do sistema com módulos em cascata



Fonte: (Fonte própria)

Com o sistema montado e em funcionamento, pudemos verificar se os parâmetros determinados de forma teórica eram condizentes com os valores mensurados na prática.

As medições foram realizadas em temperatura ambiente de 24 °C , aguardando entre seis a sete minutos para que o sistema se estabilizasse. Assim, obtivemos as seguintes leituras:

- Voltagem medida no módulo 2 ($V_{m2} = 4,46 \text{ v}$):

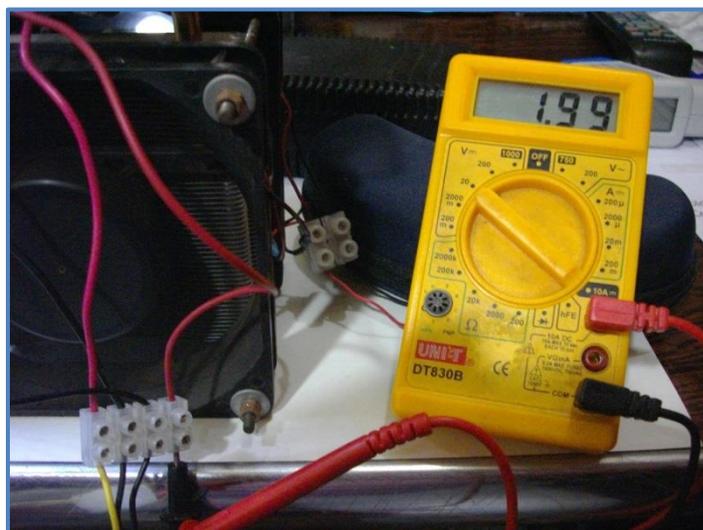
Figura 62 – Medição da voltagem no módulo2



Fonte: (Fonte própria)

- Corrente medida no módulo 2 ($I_{m2} = 1,99 \text{ A}$):

Figura 63 – Medida da corrente no módulo 2



Fonte: (Fonte própria)

Observamos que a tensão medida no módulo 2 é 0,4 volts menor do que a esperada, isto é, 5 volts, provavelmente pela carga imposta pelo módulo. A tensão “em vazio” medida foi de 5,17 volts.

Notamos também que a corrente elétrica é bem próxima do esperado (2A).

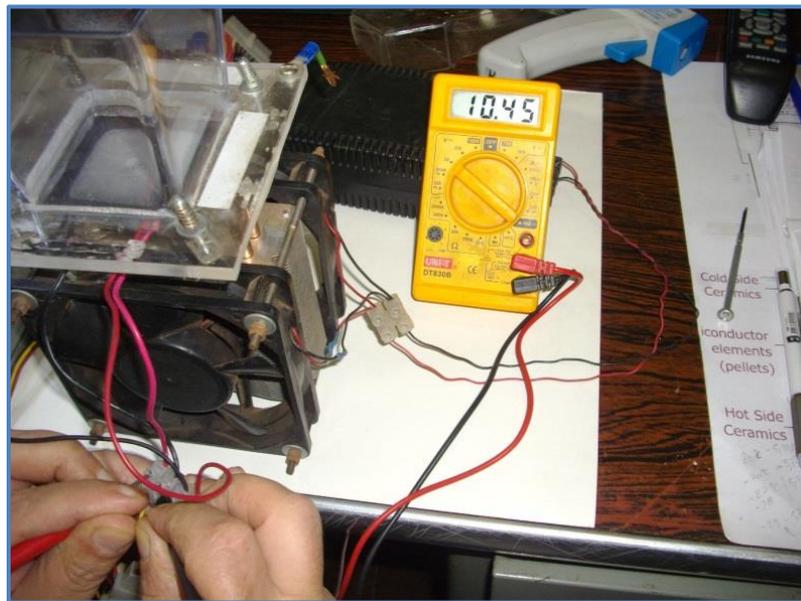
Desta maneira, podemos calcular a potência elétrica medida no módulo 2 (Q_{em2}):

$$Q_{em2} = V_{m2} \cdot I_{m2} = 4,46 \cdot 1,99 = 8,9 \text{ w} \quad (15)$$

Que é um resultado satisfatório frente ao resultado teórico (10 w).

- Voltagem medida no módulo 1 ($V_{m1} = 10,45 \text{ v}$):

Figura 64 – Voltagem medida no módulo1



Fonte: (Fonte própria)

De maneira semelhante ao módulo2, observamos que a tensão sob carga da fonte é 1,55 volts a menos que a esperada (12 v) no módulo 1. Medindo a tensão em vazio da fonte, encontramos 12,09 volts.

- Corrente medida no módulo 1 ($I_{m1} = 5,76 \text{ A}$):

Figura 65 – Corrente medida no módulo 1



Fonte: (Fonte própria)

Observamos que a corrente elétrica do módulo 1 aproxima-se satisfatoriamente da corrente elétrica estimada pela análise gráfica feita anteriormente (6 A).

Neste caso, a potência elétrica medida para o módulo 1 (Q_{em1}) será:

$$Q_{em1} = V_{m1} \cdot I_{m1} = 10,45 \cdot 5,76 = 60,19 \text{ W} \quad (16)$$

Apresentando, portanto, uma diferença de 11,81 watts com relação à estimativa por análise gráfica (72 W).

A potência elétrica total do sistema (Q_{emt}) pode ser calculada:

$$Q_{emt} = Q_{em1} + Q_{em2} = 60,19 + 8,9 = 69,09 \text{ W} \quad (17)$$

A diferença entre a estimativa por análise gráfica da potência elétrica total e o cálculo pelos dados obtidos por medição é 12,91 watts.

Como as grandezas Q_{c1} (potência térmica do módulo 1) e Q_{c2} (potência térmica do módulo 2) não podem ser mensuradas diretamente, podemos estimar a potência térmica do conjunto (cascata) (Q_{ct}), correspondente à soma $Q_{c1} + Q_{c2}$, assumindo que o coeficiente de performance do sistema (COP_s) esteja entre 0,4 e 0,5.

Assumindo $COP_S = 0,45$ (média) podemos estimar a potência térmica do conjunto em cascata (Q_{cmt}):

$$Q_{cmt} = COP_S \cdot Q_{emt} = 0,45 \cdot 69,09 = 31,09 \text{ W} \quad (18)$$

Que é um valor razoável frente à estimativa obtida pela análise gráfica e pelos cálculos feitos anteriormente (35 W).

Por outro lado, se admitirmos que a estimativa teórica anterior em que $Q_{ct} = 35 \text{ W}$ se aproxima da realidade, podemos estimar o coeficiente de performance do sistema com base nas medições realizadas (COP_{Sm}) com $Q_{emt} = 69,09 \text{ W}$.

Desta maneira:

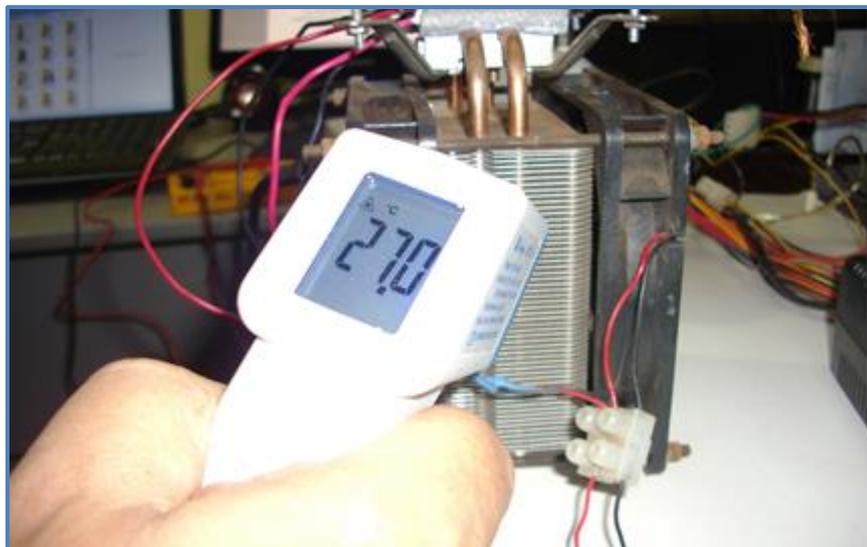
$$COP_{Sm} = \frac{35}{69,09} \approx 0,5 \quad (19)$$

O que também nos conduz a um resultado dentro da faixa esperada (0,4 a 0,5).

É evidente que as medições finais mais importantes referem-se às medidas de temperaturas, que irá corroborar ou não, se as análises e estimativas feitas anteriormente traduzem o resultado esperado.

- Temperatura no radiador de calor:

Figura 66 – Medida da temperatura no radiador de calor

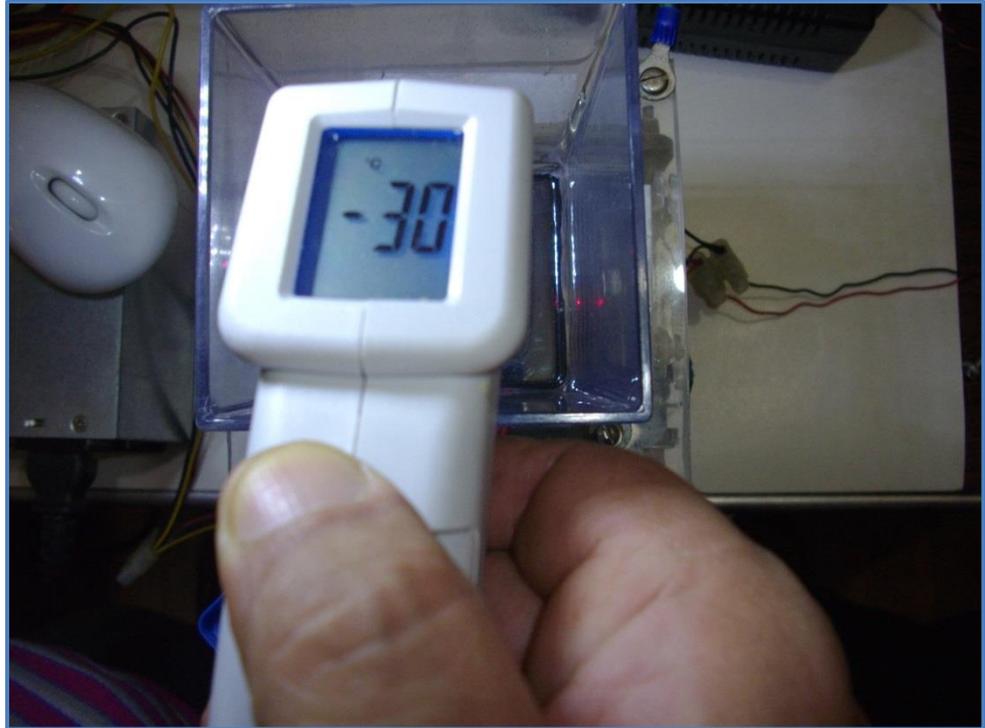


Fonte: (Fonte própria)

Observamos que a temperatura do lado quente do sistema, medida no radiador de calor (T_{hs}), corresponde à estimada anteriormente ($T_{hs} = 27\text{ °C}$).

- Medida da temperatura no interior da câmara:

Figura 67 – Medida de temperatura no lado frio do sistema



Fonte: (Fonte própria)

A medida da temperatura no lado frio do sistema (T_{cms}), no interior da câmara, é condizente com a temperatura prevista anteriormente ($T_{cs} = -30\text{ °C}$).

Com isto, podemos determinar a diferença de temperatura do sistema (ΔT_s):

$$\Delta T_s = (27) - (-30) = 57\text{ °C} \quad (20)$$

O resultado prático final demonstrou que as análises, aproximações e estimativas foram satisfatórias para dimensionar a câmara e fonte motivadora para a continuidade da execução da mesma.

4.3 ETAPAS DA CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Neste capítulo, apresentamos as etapas da construção da Câmara de Wilson Eletrônica na forma de guia, com a pretensão de que seja inspirador e motivador aos que gostariam de realizá-la.

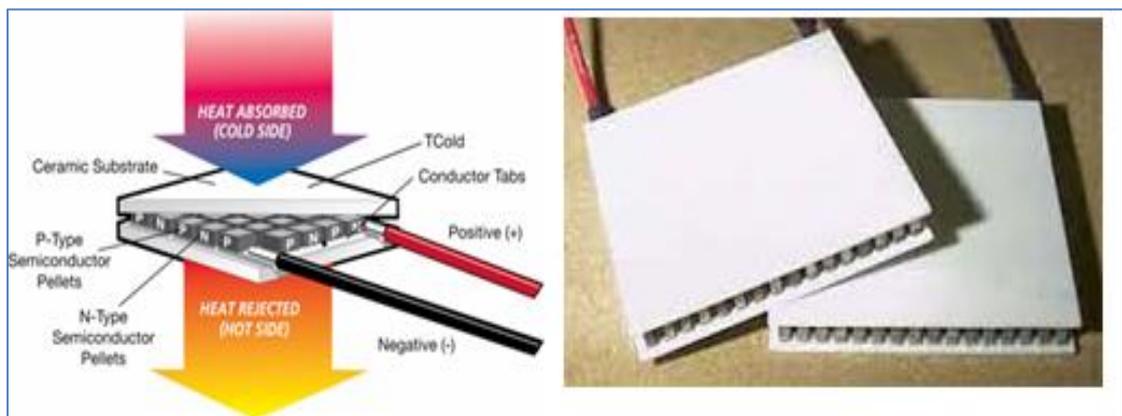
Os materiais utilizados para a construção do protótipo foram:

- 02 Módulos Termoelétricos
- 01 radiador de calor para computador pessoal.
- 02 ventiladores de 12 volts
- Fonte de alimentação para computador pessoal
- Recipiente de vidro ou acrílico
- Álcool Isopropílico (Isopropanol)
- Feltro
- Pasta térmica

Módulos Termoelétricos:

Os módulos termoelétricos (Figura 68) são formados por placas de cerâmica e que possuem em seu interior elementos semicondutores tipo P e tipo N onde se faz circular por estes uma corrente elétrica contínua. A passagem desta corrente produz o chamado efeito Peltier que é o surgimento de um gradiente de temperatura na junção de dois semicondutores. Portanto, teremos nas faces cerâmicas o surgimento de uma face “fria”, devido à absorção de calor e uma face “quente”, onde o calor é rejeitado e deve ser dissipado no ambiente por um dissipador (radiador) de calor.

Figura 68 – Módulos Termoelétricos



Fonte: (<http://edge.rit.edu/edge/P07440/public/Home>)

Radiador de calor:

O calor absorvido pela face “fria” e transferido para a face “quente” deve ser rejeitado ao ambiente. Para tal, utilizamos um radiador de calor usado comumente para refrigeração de microprocessadores nos computadores pessoais (Figura 69).

Figura 69 – Radiador de Calor



Fonte: (<http://www.misscompras.com/prolimatech-radiador-pc-megahalems-para-socket-775-y-1366-enfriamientos-de-prolimatech/>)

Ventiladores (ventoinhas):

Para auxiliar na dissipação do calor gerado na face quente dos módulos termoelétricos, utilizamos duas ventoinhas, montadas junto ao dissipador de calor, de forma a estabelecer um fluxo de ar unidirecional (Figura 70).

Figura 70 - Ventoinhas e radiador



Fonte: (wiki.lv11.org)

Recipiente de vidro ou acrílico:

A Câmara, em última análise, consiste de um recipiente em que ocorrerá a difusão e resfriamento do vapor do álcool. Para tal, utilizamos um recipiente de acrílico (porta escova de dente) (Figura 71), onde entre a base e a tampa fixamos um pedaço de feltro que será embebido com álcool isopropílico.

Figura 71 – Recipiente de acrílico



Fonte: (<http://www.compreacrilico.com.br>)

Fonte de alimentação:

Os módulos termoeétricos funcionam com tensões diferentes, sendo um módulo funcionando com +5 V e outro com +12 V e demandam correntes na ordem da 10 A. Para suprir estes valores, utilizamos uma fonte de alimentação chaveada retirada de um computador pessoal (Figura 72). Esta fonte irá fornecer a tensão de + 12 V para o funcionamento das ventoinhas.

Figura 72- Fonte de alimentação



Fonte: (<http://phinformix.blogspot.com.br/2011/08/componentes-do-pc-fonte-de-alimentacao.html>)

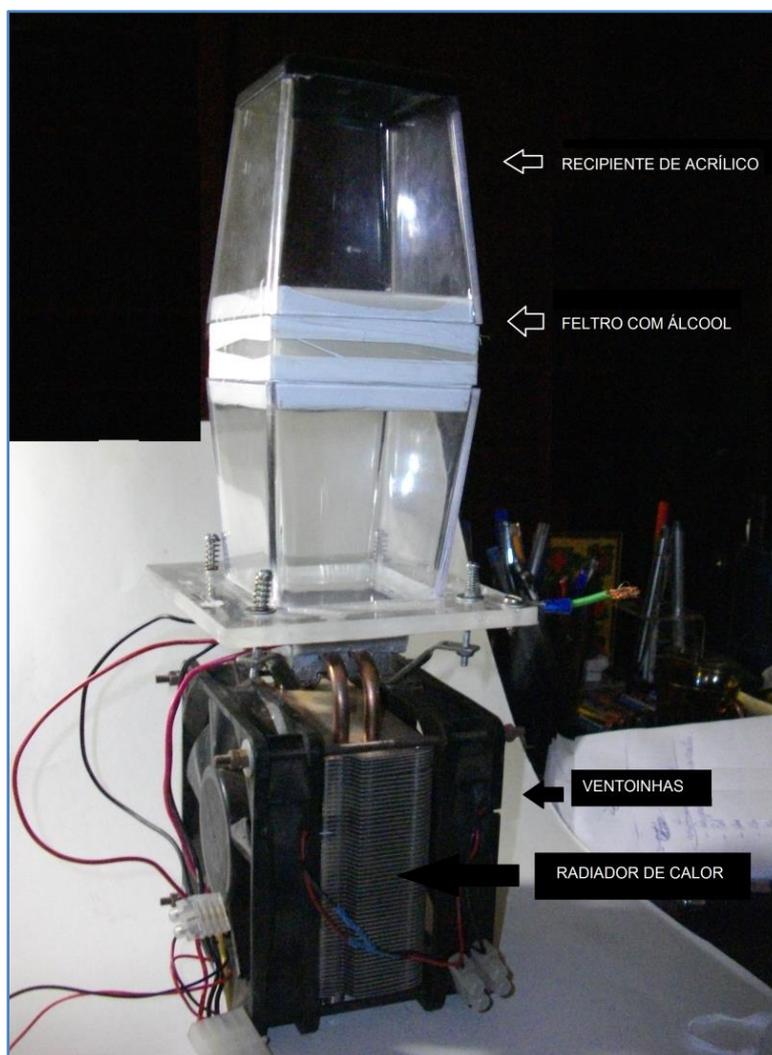
Montagem final:

Os módulos termoeletrônicos, montados em cascata, devem ficar entre a base do recipiente e o dissipador de calor, sendo que o contato entre eles se dá por pasta térmica (preferencialmente à base de prata) em todas as faces.

Para um bom contato entre as partes, o dissipador de calor e a câmara deverão ser fixados por parafusos e molas para melhor ajuste de pressão.

Desta maneira conseguimos retirar calor da base da câmara e difundi-lo no ambiente pelo dissipador e ventoinhas. Com esta montagem final (figura 7) conseguimos alcançar temperaturas na ordem de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ na base da câmara, tornando o vapor de álcool supersaturado de forma que as emissões radioativas possam ser detectadas pelos rastros deixados pela ionização (Figura 73).

Figura 73 – Montagem final



Fonte: (Fonte própria)

4.4 TESTES DE SENSIBILIDADE E DETECÇÃO

Conseguimos, por vários meios, amostras radioativas para testar nosso aparelho.

Através do site e_bay, conseguimos adquirir alguns fragmentos de cerâmica contendo óxido de urânio na composição do esmalte, dando-lhe uma coloração laranja-avermelhada (Figura 74). Sua produção foi suspensa em 1944.

Figura 74 – Cerâmica radioativa



Fonte: (Fonte própria)

Foi adquirido, também pelo site e_bay, uma manta para lampião a gás (conhecida também como “camisa” de lampião) contendo tório (Figura 75).

Figura 75 – Manta de lampião



Fonte: (fonte própria)

Adquirimos também um detector de fumaça por detecção por ionização (Figura 76) produzida por uma pequena amostra de amerício-241.

Figura 76 – Fonte de Amerício-241 de detector de fumaça



Fonte: (Fonte própria)

Da pequena coleção particular do autor, estavam disponíveis relógios despertadores antigos cujos ponteiros possuem rádio na composição da tinta (Figura 77).

Figura 77 – Ponteiro radioativo



Fonte: (<http://uhrforum.de/junghans-trivox-schnapp-vom-flohmarkt-t49474>)

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi adquirido também um detector Geiger comercial modelo GMC-300 (Figura 78), para testes do nível da atividade radioativas dos objetos adquiridos e também como um recurso didático para a sala de aula.

Figura 78 – Contador Geiger GMC-300E



Fonte: (Fonte própria)

As especificações, fornecidas pelo fabricante, são:

- Radiation detection: Beta, Gamma and X-Ray.
- Sensitivity to Gamma Radiation: 0.1~1 MeV
- Own Background: 0,2 Pulses/s
- Working Voltage: 6~9V
- LCD Display: Dot matrix with back light
- Working power: 0.045W - 0.2W
- Power: 9V battery / USB power

O fabricante também disponibiliza algumas referências de Contagem Por Minuto (CPM) obtidas com o detector.

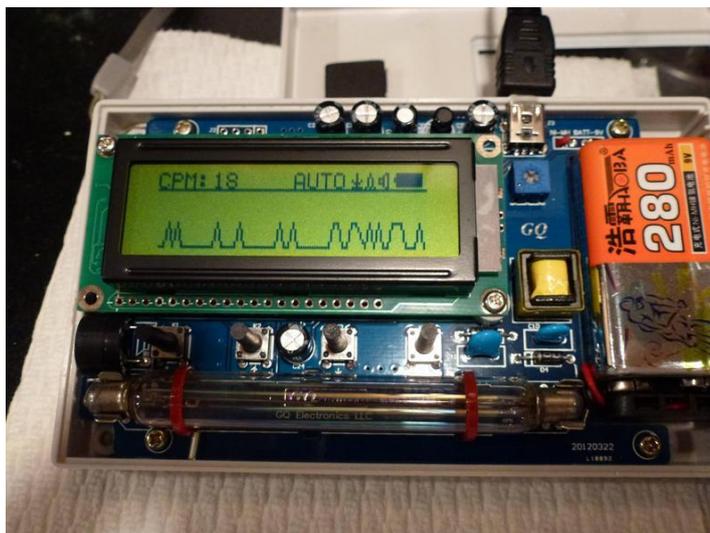
Tabela 5 – Referencias de CPM para o detector

Source	CPM reading
Background	20~40
Public park granite table	50~83
Uranium glass bead 238U	320
Uranium ore 238U	2905
Standard 5uCi radioactive source	26500

Fonte: (Manual do fabricante)

A visão interna do contador com seu tubo Geiger é ilustrado na (Figura 79).

Figura 79 – Visão interna do contador Geiger



Fonte: (Fonte própria)

Uma vez que nosso trabalho possui como foco principal a questão da fenomenologia das radiações, não nos preocupamos em análise quantitativa da radiação das amostras, mas as suas atividades relativas e o que esperar nas visualizações na câmara de Wilson eletrônica.

Determinamos que a amostra de amerício devesse apresentar uma maior quantidade de traçados na câmara devido à pequena área exposta (consequente maior concentração de radionuclídeos) do que os traçados oriundos da cerâmica e do ponteiro de relógio (maior área e menor concentração de radionuclídeo), o que viria a ser confirmar posteriormente.

Colocada em operação, a câmara atinge a temperatura desejada em aproximadamente 6,30 minutos (dependendo da temperatura ambiente), onde já se pode observar a condensação do álcool isopropílico e logo em seguida, a formação dos primeiros traçados.

O tempo de observação varia com concentração de álcool presente no feltro colocado na parte superior da câmara para ser difundido. Obtemos períodos de observação de 20 a 50 minutos.

O objeto educacional, aqui proposto e realizado, mostrou-se condizente com a nossa expectativa. Pudemos observar as emissões radioativas alfa (traços mais grossos) e beta (traços mais finos e irregulares) de alguns materiais colocados em seu interior, anteriormente citados: amerício 241 utilizado em detectores de fumaça (Figura 80), cerâmica com óxido de urânio em seu esmalte (Figura 81) e um ponteiro de relógio antigo contendo rádio em seus ponteiros e mostradores (Figura 82), conforme as ilustrações a seguir.

Amerício 241:

Figura 80 – Amerício-241 e traçados observados na câmara



Fonte: (Fonte própria)

Cerâmica com esmalte contendo Óxido de Urânio:

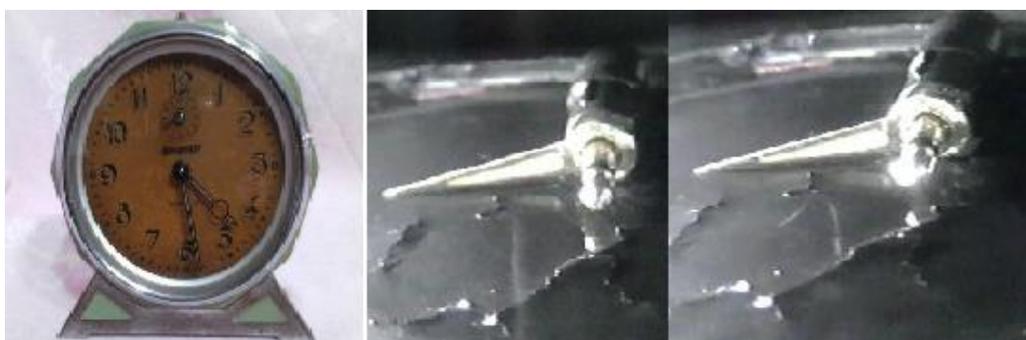
Figura 81 - Cerâmica com Óxido de Urânio e visualização



Fonte: (Fonte própria)

Ponteiro de relógio:

Figura 82 - Ponteiro de relógio com radioatividade



Fonte: (Fonte própria)

5. PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Como o nosso trabalho tem como objetivo ser um instrumento auxiliar no ensino de física moderna, notadamente sobre a questão do obstáculo fenomenológico envolvido no ensino de radioatividade, propomos uma sequência didática, nos moldes do portal do professor, apresentada a seguir.

Título: *Convivendo com a radioatividade*

Autoria: *Prof. Alexandre Dimas Queiroz D'Andrea*

Estrutura Curricular

Modalidade / Nível de Ensino	Componente Curricular	Tema
Ensino Médio	Física	Radioatividade

Dados da aula

O que o aluno poderá aprender com esta aula

Objetiva-se que o aluno tenha uma visão realista sobre o fenômeno “radioatividade” e como este pode estar presente em seu cotidiano sob diversos aspectos, seja através da radioatividade ambiental natural ou aquela produzida artificialmente.

O aluno deverá também adquirir noção sobre a história da radioatividade, fenômenos radioativos (decaimento, meia vida e séries radioativas naturais), as unidades de medida e efeitos biológicos causados pela radioatividade.

Duração das atividades: 04 aulas de 50 minutos

Conhecimentos prévios trabalhados pelo professor com o aluno

Acreditamos que uma investigação sobre o conhecimento prévio do aluno, com relação ao tema radioatividade, irá nortear os conteúdos a serem apresentados e explorados pelo professor assim como a escolha dos materiais, métodos e estratégias a serem adotados.

Para esta avaliação diagnóstica, propomos aqui um questionário adaptado de Kelecom e Gouveia (2002, p.79), através do qual o professor poderá avaliar as noções adquiridas pelos alunos fora do ambiente escolar.

Avaliação Diagnóstica.

Nome: _____ Turma: _____

1. Quando você ouve falar em radioatividade, seu primeiro pensamento é positivo, negativo ou Indiferente?

Positivo. Negativo. Indiferente.

Por quê? (Em uma frase):

2. Você saberia definir radioatividade?

SIM NÃO (Tente definir numa frase):

3. Existe radioatividade natural?

Sistema	Resposta	Onde?
Na terra	<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/> NÃO SEI	<input type="checkbox"/> Solo <input type="checkbox"/> Ar <input type="checkbox"/> Rios/Mares
No Sistema Solar	<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/> NÃO SEI	<input type="checkbox"/> Planetas <input type="checkbox"/> Espaço interestelar
No Cosmos	<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/> NÃO SEI	<input type="checkbox"/> Nossa galáxia <input type="checkbox"/> Outras Galáxias

4. A radioatividade é utilizada em inúmeras aplicações. Aponte na lista abaixo onde você acha que ela é usada:

<input type="checkbox"/> armamento	<input type="checkbox"/> produção de energia
<input type="checkbox"/> forno micro-ondas	<input type="checkbox"/> telecomunicações: (rádio, TV, celular)
<input type="checkbox"/> conservação de alimentos	<input type="checkbox"/> beneficiamento de pedras (semi)-preciosas
<input type="checkbox"/> telefone celular	<input type="checkbox"/> navegação espacial
<input type="checkbox"/> navegação marítima	<input type="checkbox"/> navegação submarina
<input type="checkbox"/> diagnóstico de doenças	<input type="checkbox"/> tratamento de doenças
<input type="checkbox"/> Raios-X ou Abreugrafia	<input type="checkbox"/> tomografia computadorizada
<input type="checkbox"/> relojoaria	<input type="checkbox"/> proteção como para-raios
<input type="checkbox"/> envelhecimento de objetos de arte	<input type="checkbox"/> beneficiamento de vinho
<input type="checkbox"/> análise laboratorial	<input type="checkbox"/> imunologia
<input type="checkbox"/> bioquímica	<input type="checkbox"/> física
<input type="checkbox"/> biologia	<input type="checkbox"/> química
<input type="checkbox"/> fisiologia	<input type="checkbox"/> indústrias metalúrgicas

Outros:

Com a panorâmica do conhecimento prévio dos alunos, o professor passa a definir o que é a radioatividade. Espera-se que o aluno já tenha algum conhecimento sobre isótopos adquiridos nas aulas de química, se não, uma breve revisão deve ser apresentada.

Para a questão “o que é a radioatividade”, sugerimos a leitura de algumas apostilas educativas no formato pdf disponibilizadas no site da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Dentre elas, destacamos a apostila educativa “*Energia Nuclear e suas aplicações – Aprendendo com o Nuclídeo*”, disponível em <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia_aplic.pdf> (CARDOSO, 2008).

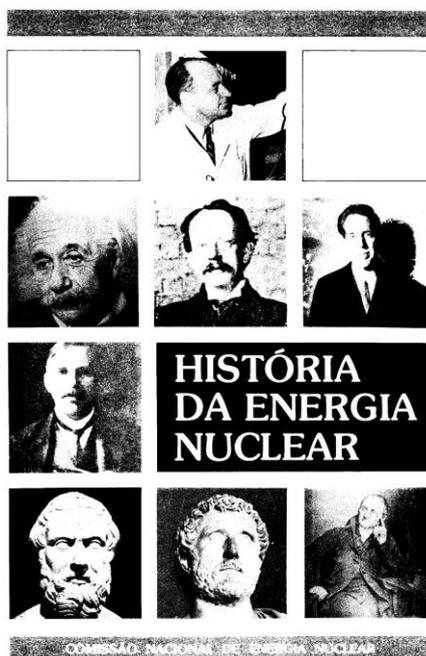


Para o uso desta apostila, sugerimos a leitura inicial do tópico “*Estrutura do núcleo e energia nuclear*” e “*Os Isótopos*” como elementos introdutórios e posteriormente o tópico “*Radioatividade*” para conceituar o fenômeno das emissões alfa, beta e gama pelos radioisótopos.

Com a grande disponibilidade de mídias educativas na internet, o professor poderá também utilizar aulas disponibilizadas em canais do YouTube para esta introdução. Dentre elas, encontramos uma aula de conteúdo introdutório, disponível no endereço eletrônico <<http://www.youtube.com/watch?v=P8tqZrXu9zA>> (STOODI, 2014).

Na sequencia, acreditamos que uma introdução sobre a história da radioatividade viria auxiliar o posicionamento do aluno frente ao tema “convivendo com a radioatividade”, levando-o à percepção de que a tentativa de explicar a estrutura da matéria remonta aos gregos e que ainda é tema das pesquisas científicas atuais.

Para tal, sugerimos outra apostila educativa disponibilizada no site da CNEN intitulada “*História da Energia Nuclear*” disponibilizada no endereço eletrônico <<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/historia.pdf>> (MARTINS, 1984).



Da mesma maneira, encontramos vários canais no YouTube que apresentam o tema “História da Radioatividade” em vídeo aulas , dentre os quais, destacamos:

<<http://www.youtube.com/watch?v=ah4dv21MLGA>> (CCEAD PUC-RIO & MEC, 2013)

<<http://www.youtube.com/watch?v=SIB6fAzPW64>> (PERDIGÃO, 2011)

O próximo passo para a construção dos conhecimentos prévios dos alunos será a apresentação dos conceitos de *decaimento*, *meia-vida* e *séries radioativas naturais*. Para tal, o professor tem à sua disposição grande variedade de mídias disponíveis na internet.

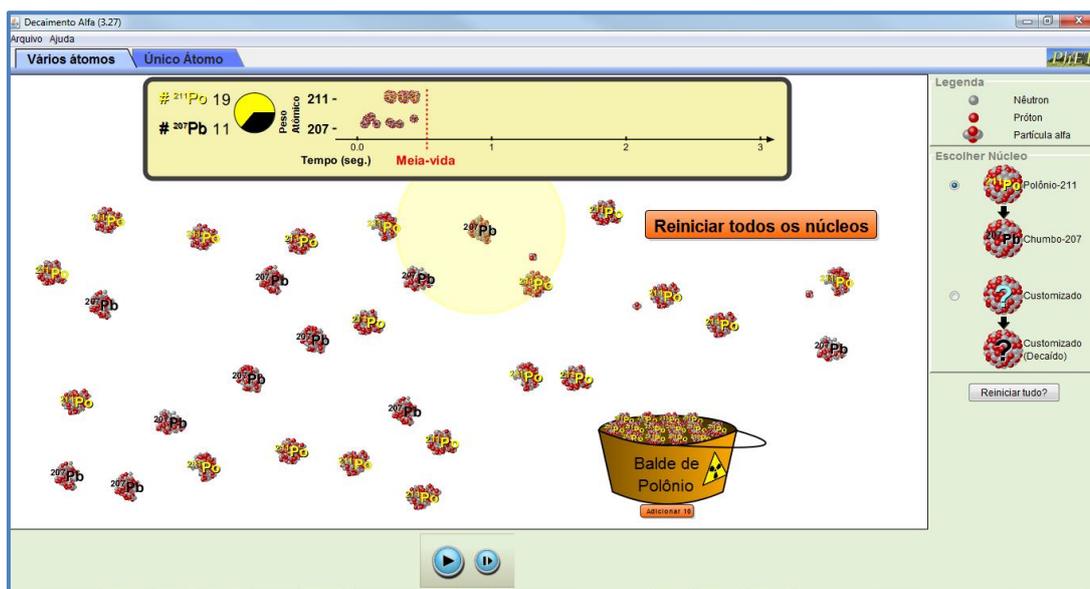
Sugerimos como texto de apoio a apostila, já mencionada, da Comissão Nacional de Energia Nuclear, “*Energia Nuclear e suas aplicações – Aprendendo com o Nuclídeo*”, onde encontramos os tópicos: “*Meia-vida*” e “*Radiação Natural – Séries Radioativas Naturais*”.

O professor poderá também utilizar os objetos virtuais de aprendizagem (simuladores) em parceria ao texto de apoio para auxílio da fixação dos conceitos apresentados. Assim, sugerimos os já consagrados simuladores Phet.

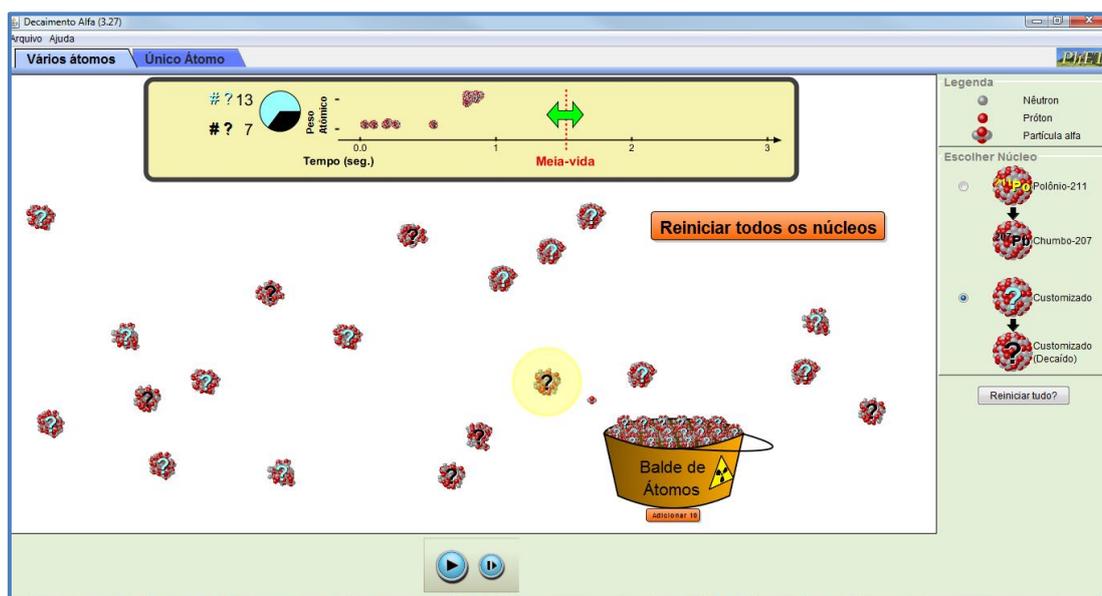
O simulador de *decaimento alfa* é fundamentado no decaimento do Polônio-211 até o núcleo estável do Chumbo-207, mas permitindo que o aluno e/ou professor possa customizar

o elemento químico atuando na barra de meia-vida do elemento customizado. Disponível em http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/alpha-decay (UNIVERSITY OF COLORADO, 2012).

Decaimento alfa do Polônio-211:



Decaimento alfa customizado:

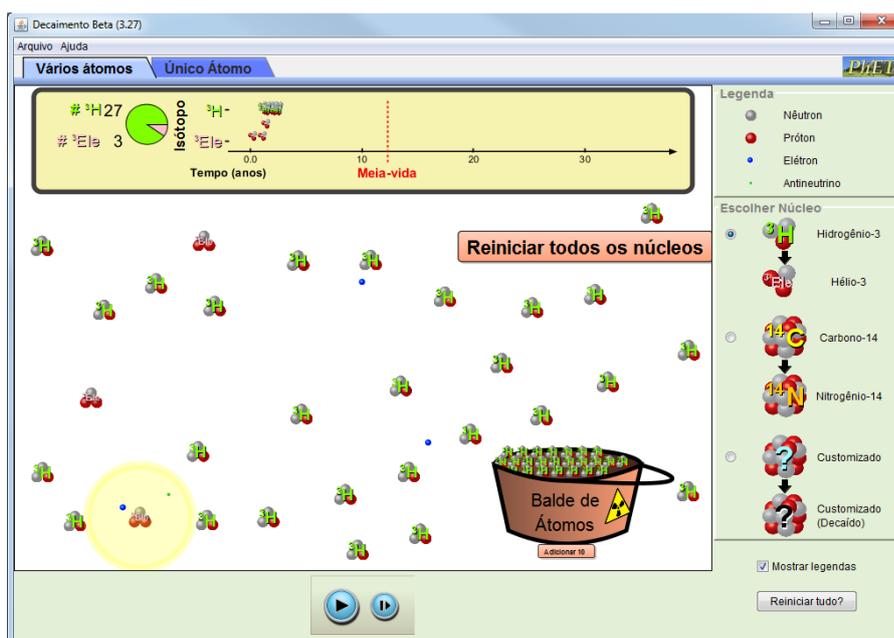


Em seguida, sugerimos também a utilização de um simulador Phet, similar ao de decaimento alfa, para a compreensão do mecanismo do decaimento beta. O simulador é

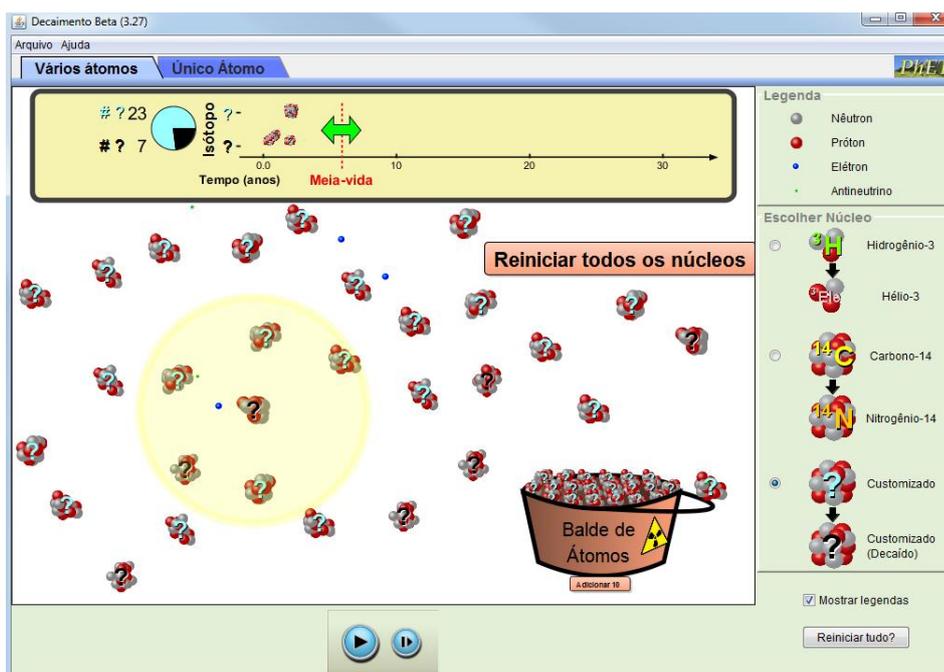
disponível em <http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/beta-decay> (UNIVERSITY OF COLORADO, 2012).

Neste simulador, o aluno e/ou o professor poderá utilizar dois radionuclídeos, hidrogênio-3 com decaimento em hélio-3 e carbono-14 com decaimento em nitrogênio-14, além de, como no simulador anterior, poder customizar o radionuclídeo.

Decaimento beta:



Decaimento beta customizado:



Recursos e estratégias da aula

Recursos

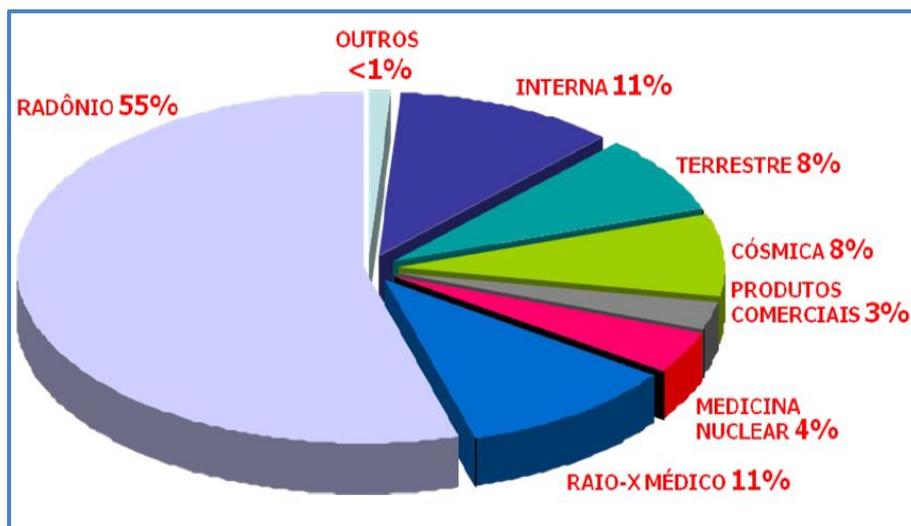
- Um computador para o professor;
- Sala com projetor multimídia;
- Sistema de som;
- Acesso à internet;
- Software para apresentação de slides;
- Software para leitura de arquivos em formato pdf;
- Software para leitura de arquivos em formato doc e docx;
- Software Java previamente instalado no computador;
- Contador geiger-muller;
- Câmara de Wilson Eletrônica;
- Amostras com baixa intensidade de radioatividade;

Estratégias

Após trabalhar os conceitos prévios com os alunos, o professor desenvolverá o tema “Convivendo Com a Radioatividade”.

Com a análise das respostas dadas pelos alunos no questionário anteriormente fornecido (avaliação diagnóstica), o professor deverá introduzir o assunto conduzindo os alunos a refletirem e opinarem sobre sua percepção da presença da radioatividade no cotidiano seja ela natural, ambiental ou artificial. Com as verbalizações, socializam-se as opiniões e conseqüentemente as fontes de informações individuais deverão aflorar no debate.

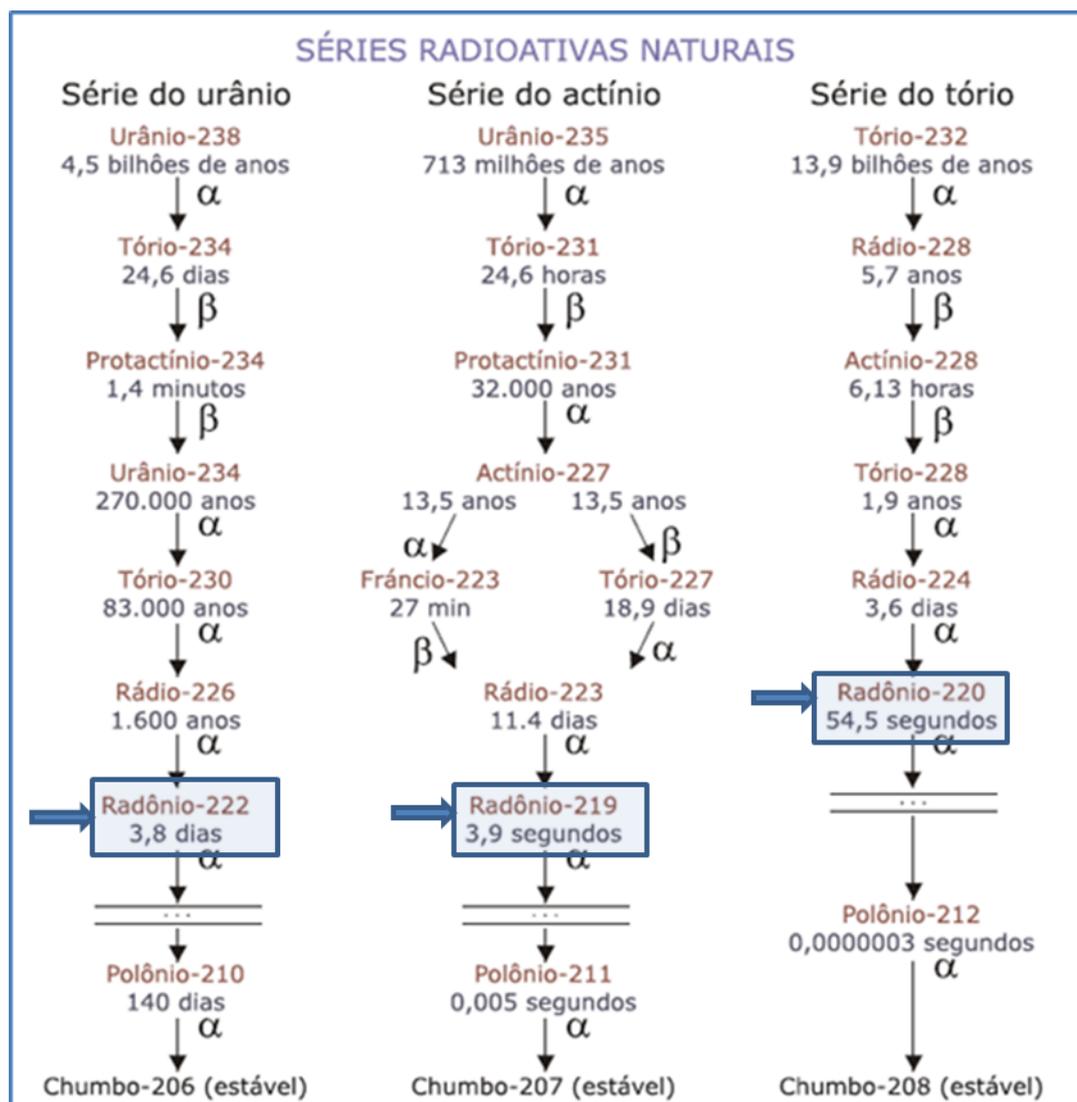
Sem um posicionamento prévio, o professor deverá apresentar então um quadro geral da radiação recebida pelo ser humano ao longo de sua vida oriundas das diversas fontes de radioatividade natural e artificial, como por exemplo, a disponível na cartilha “Consequências do Gás Radônio na Saúde Humana”, disponível em <<http://mail.geologia.ufrn.br/larana/downloads/cartilhalarana.pdf>> (CAMPUS, 2010).



Com este panorama, abrem-se novamente as discussões, inicialmente agrupando as radiações de origem natural (radônio, interna, terrestre e cósmica) daquelas produzidas ou manipuladas pelo homem (produtos comerciais, medicina nuclear e raio-x médico) e posteriormente, discutindo-as separadamente.

Começando com a fonte natural *radônio*, o professor deverá situar este gás como pertencente aos gases nobres da tabela periódica e que possuem como principal característica a baixa reatividade com outros elementos químicos. Posteriormente, deverá localizá-lo na série radioativa do urânio e do tório enfatizando que o gás provém dos depósitos naturais existentes nas rochas e solo.

O gás pode então se acumular nos cômodos de uma casa, podendo ser inalado pelos ocupantes, aderindo-se às vias pulmonares, decaindo aí. Como consequência, o gás radônio juntamente com os produtos dos decaimentos representa um grave risco à saúde.



O professor poderá comentar este fato citando fontes encontradas nas internet ou outros meios, como a publicada no site da Faculdade de Medicina da Universidade Federal de Minas Gerais (NOTÍCIAS,2014) no texto publicado em “Saiu na Imprensa”, disponível em <<http://www.medicina.ufmg.br/noticias/?p=38372>>, em que se considera o radônio como a segunda causa de câncer de pulmão no mundo e que o elemento é encontrado em 15% de 540 lares visitados em Belo Horizonte.

Inimigo oculto, gás radônio é segunda causa de câncer de pulmão no mundo

➤ Substância explica boa parte dos casos da doença em não fumantes; pesquisa mostra presença do elemento em 15% dos 540 lares visitados em BH

Renato Fonseca

rfonseca@hojeemdia.com.br

Há dois anos, a dona de casa Dalva Martins Oliveira Felipe, de 52 anos, recebeu o difícil diagnóstico do câncer. O mal estava alojado no pulmão. Não bastassem as dores e incertezas provocadas pela doença, o mais complicado era aceitar o fato, mesmo sem nunca ter colocado um cigarro na boca. Hoje, com um tratamento intensivo, à base da quimioterapia, a moradora de Santa Luzia, na Grande BH, mostra fé e esperança na busca da recuperação.

O drama vivido por Dalva Martins, que nunca foi fumante, mas desenvolveu a doença – 90% dos casos de câncer de pulmão estão as-

sociados ao tabagismo – não é um fato isolado. Para o oncologista André Márcio Murad, que acompanha o tratamento dela, tudo indica que o câncer foi desenvolvido graças à exposição ao gás radônio, elemento químico presente no ar e responsável por até 10% das mortes por câncer de pulmão no mundo.

Murad, que é pesquisador e coordenador do Serviço de **Oncologia do Hospital das Clínicas da UFMG**, participou recentemente do 17º Congresso Europeu de Oncologia, realizado em Amsterdã, na Holanda. Um dos principais temas debatidos no encontro foi o combate aos fatores de risco da exposição ao gás. Entre as medidas propostas

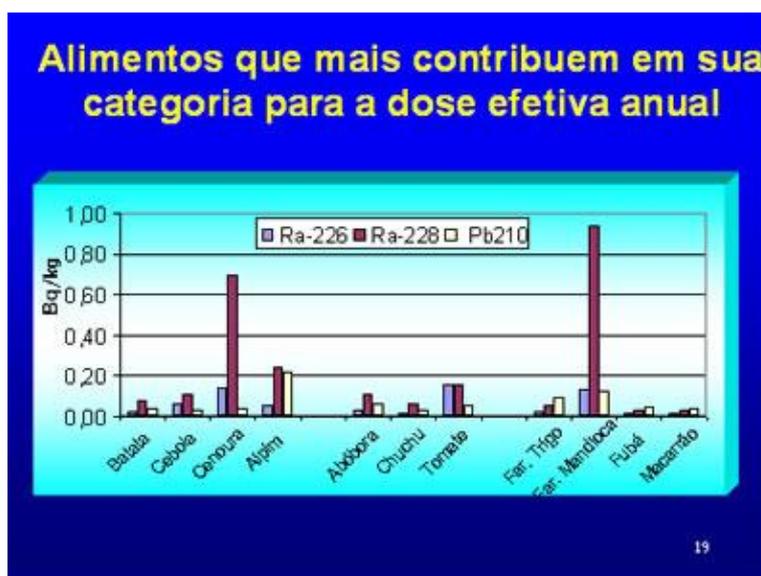
estão a adoção de normas para reduzir a concentração, medições constantes e campanhas educativas.

Segundo o médico, o radônio gera partículas radioativas que permanecem no ar e podem ser inaladas, depositando-se nas vias aéreas da pessoa. “Ao ar livre, o radônio não é um risco importante para a saúde, pois se dilui no ambiente. Contudo, em grandes concentrações, num ambiente fechado, apresenta perigo e pode resultar em um câncer de pulmão”, disse. ●

O professor poderá encerrar este tema propondo a discussão de propostas de prevenção e atitudes que poderiam minimizar a contaminação por este gás, como manter a casa arejada, por exemplo.

Ainda no conjunto das radiações de origem natural, o professor poderá discorrer sobre as radiações presentes no corpo humano proveniente dos alimentos e aquela proveniente da respiração (radônio-222 e carbono-14).

O professor poderá encontrar vários textos e tabelas referentes aos alimentos que possuem alguma atividade radioativa. Entre eles, sugerimos o texto do site *Canal Ciência* no *Portal de Divulgação Científica e Tecnológica*, (SANTOS, 2003) disponível em < <http://www.canalciencia.ibict.br/pesquisa/0107-Medicao-ingestao-atomos-radioativos-e-metais-pesados-em-alimentos.html>>.



Para despertar a curiosidade e o interesse do aluno, sugerimos a leitura do texto “*Os 10 alimentos mais radioativos*” (BRABO, 2014) disponível em < <http://portalnext.net/os-10-alimentos-mais-radioativos/>>, de onde elaboramos a tabela:

Tabela 6 – Os 10 alimentos mais radioativos

Alimento	Radionuclídeo(s)	Atividade (pCi/g)
Castanha do Pará	Rádio-226	6.600
Feijão	Potássio-40	4.640
Banana	Potássio-40	3.520
Cenoura	Potássio-40	3.400
Batatas	Potássio-40	3.400
Sal “Light”	Potássio-40	3.000
Carne Vermelha	Potássio-40	3.000
Cerveja	Potássio-40	390
Água Potável	Rádio-226	0,17
Manteiga de Amendoim	Potássio-40/ Rádio-226-228	0,12

Fonte: (<http://portalnext.net/os-10-alimentos-mais-radioativos/>)

Ainda sobre o tema alimentos, o professor deverá esclarecer a diferença entre *radiação nos alimentos* e *irradiação dos alimentos*, confusão comumente apresentada pelos alunos.

O professor deverá mostrar que, dentre os usos da radioatividade, encontra-se a *irradiação de alimentos* com os objetivos de desinfestação, inibição de brotamento, descontaminação, atraso de maturação e aumento do tempo de prateleira.

Uma tabela ilustrativa de como a irradiação ionizante pode prolongar o tempo útil dos alimentos (CAMARGO e WALDER, 2007) pode ser encontrada no endereço eletrônico <<http://www.cena.usp.br/irradiacao/efeitos.htm>>.

Tabela 7 – Prolongamento do tempo útil dos alimentos

Produto	Vida útil sem irradiação	Vida útil com irradiação
Alho	4 meses	10 meses
Arroz	1 ano	3 anos
Banana	15 dias	45 dias
Batata	1 mês	6 meses
Cebola	2 meses	6 meses
Farinha	6 meses	2 anos
Legumes e Verduras	5 dias	18 dias
Papaia	7 dias	21 dias
Manga	7 dias	21 dias
Milho	1 ano	3 anos
Frango refrigerado	7 dias	30 dias
Filé de pescada refrigerado	5 dias	30 dias
Morango	3 dias	21 dias
Trigo	1 ano	3 anos

Fonte: (<http://www.cena.usp.br/irradiacao/efeitos.htm>)

Quanto aos outros usos e aplicações das radiações, o professor deverá deixar a cargo do aluno, como será visto no tópico *avaliações*.

Acredita-se que a questão da *fenomenologia* deve substanciar os aspectos teóricos abordados anteriormente. Se o professor dispuser de alguns materiais ou objetos que possam ser analisados com um contador geiger-muller e a Câmara de Wilson Eletrônica, o professor poderá estimular as capacidades auditivas e visuais do aluno de forma a proporcionar a este um reforço cognitivo.

Alguns materiais podem ser encontrados com relativa facilidade, entre eles: areia Monazítica (contendo tório e urânio), algumas cerâmicas (possuem óxido de urânio no esmalte), ponteiros de relógios antigos (possuem rádio adicionado à tinta fosforescente),

algumas mantas para lampião (possuem tório), Amerício-241 presente em detectores de fumaça, entre outros.

Com um contador Geiger-Muller o professor poderá apresentar a transdução da radioatividade presente na cerâmica e na manta de lampião.



Medição de manta de lampião (contendo tório) com contador Geiger-Mulher.



Encontra-se fonte de amerício-241 em alguns detectores de fumaça:



Ao final, o professor poderá mostrar os fenômenos radioativos, utilizando a Câmara de Wilson Eletrônica, de nossa construção, de maneira que o aluno tenha uma percepção visual da radioatividade.

O professor deverá lembrar aos alunos que a radiação gama não é uma radiação diretamente ionizante, portanto, indetectável diretamente na câmara e que a radiação beta corresponde a traçados retos enquanto que a radiação alfa sofre muitos desvios.

O que os alunos poderão observar:

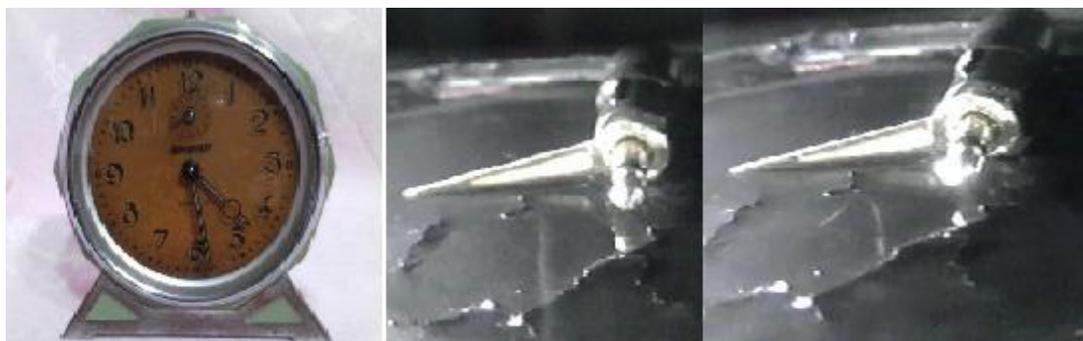
Amerício-241.



Cerâmica contendo rádio no esmalte.



Ponteiro de relógio contendo rádio



Caso o professor não consiga os materiais acima, disponibilizamos um canal no YouTube (D'ANDREA, 2014), onde os vídeos podem ser encontrados:

Emissões do amerício: < http://www.youtube.com/watch?v=S_3v86KSkis >

Emissões da cerâmica: < <http://www.youtube.com/watch?v=MyCStdnGF6c> >

Emissões do ponteiro: < <http://www.youtube.com/watch?v=Ipv-1WJgFos> >

Avaliação

- O professor poderá fazer considerações gerais sobre outros usos das radiações como na medicina (radioterapia e raios-x), na indústria, na arqueologia (datação por carbono -14), etc. e solicitar uma *pesquisa em grupo ou individual* sobre as áreas não cobertas pelas aulas em classe. Sugerimos como texto de apoio, a apostila educativa da CNEN (CARDOSO, 2008), intitulada “Aplicações da Energia Nuclear” disponível em < <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/aplica.pdf> >, assim como o texto “Radiações Ionizantes: Aplicações e Cuidados” (EDUARDO, 2000) disponível em < <http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/rad-ioniz-cuidados.pdf> >.
- Numa segunda fase avaliativa, o professor pode utilizar o mesmo questionário diagnóstico, apresentado em “conhecimentos prévios trabalhados pelo professor com o aluno”, para confrontar os conhecimentos atuais e os conhecimentos anteriores.
- Finalmente, o professor poderá aplicar uma avaliação discursiva relativa aos tópicos mais importantes como: conceituar a radioatividade, a radioatividade natural, radioatividade artificial e seus usos e aplicações.

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Os resultados obtidos com a Câmara de Wilson Eletrônica fez-nos concluir que a decisão e o empenho de concluí-la foi compensador.

O objetivo principal deste trabalho foi a proposta de construção, e sua construção efetiva, de um Instrumento Didático que viesse auxiliar na tarefa de ensinar os tópicos de física moderna e contemporânea no ensino médio, com a superação dos obstáculos epistemológicos relativos à fenomenologia, quando da transposição didática, do tema radioatividade, raios cósmicos e estrutura da matéria.

Além das indicações práticas de montagem, procuramos subsidiar o professor com tópicos relevantes e pertinentes ao tema radioatividade nos capítulos que precedem a construção da câmara, como os aspectos históricos, noções de decaimento radioativo e as unidades de medida de radiação, visão geral dos detectores de partículas, assim como uma sugestão de sequencia didática.

O tema é, por si, absolutamente extenso, de forma que com uma câmara de Wilson transportável, isto é, que possa ser utilizada em sala de aula, o professor poderá adaptar qualquer conteúdo que envolva ao tema radioatividade à sua necessidade pedagógica e ao tema que lhe convier (Figura 83), funcionando o Instrumento Didático com elemento comum e intermediador do tema.

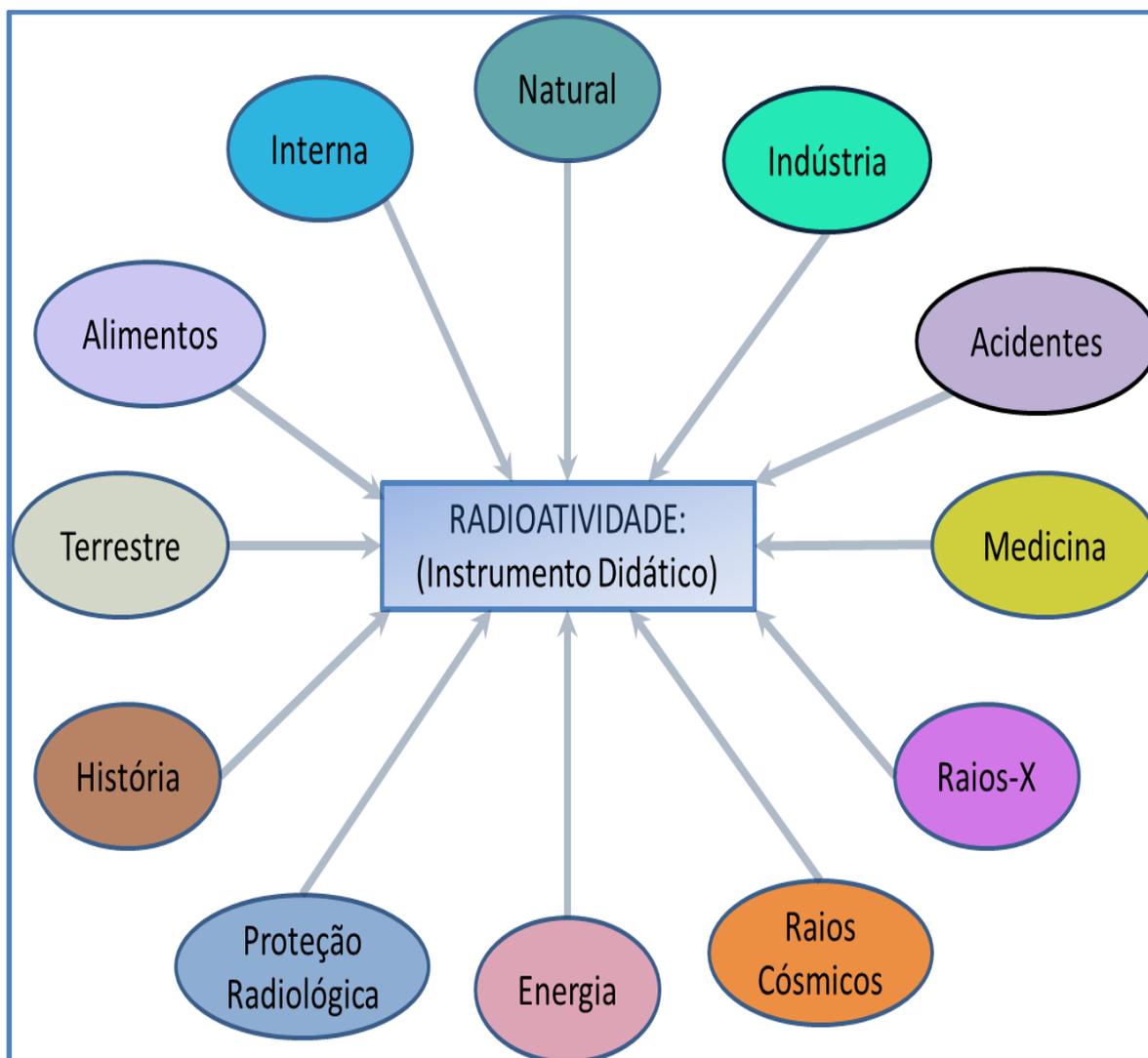
Ainda com relação à questão fenomenológica, estamos convencidos de que quando o fenômeno físico pode ser interiorizado, através dos sentidos dos alunos, isto irá substanciar as considerações teóricas envolvidas no assunto.

Assim, o fato de “ver” a radioatividade com os traçados existentes na Câmara Eletrônica e “ouvir” a radioatividade com um contador Geiger, contorna o imaginário necessário para a absorção dos aspectos teóricos propostos pelo professor. Daí também a breve proposição de um referencial teórico baseado no Construtivismo, Metodologia Investigativa e Experimentação.

Procuramos demonstrar que a construção de um instrumento didático auxiliar para o ensino da FMC é factível, embora demandando esforço e, principalmente, boa vontade por aqueles que se propõem a realizá-la.

Esperamos também que a classe docente do Ensino Médio, alunos de licenciatura e graduação sintam-se motivados para confeccionar uma câmara de Wilson eletrônica e, eventualmente, dar continuidade a esta aqui proposta, com aperfeiçoamentos.

Figura 83 – Intermediação didática do Instrumento Educacional



Fonte: (Fonte própria)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, M. S. T.; ABIB, M. L. V. Atividades Experimentais no Ensino de Física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 25, no. 2, p. 176-193, Junho 2003.
- BOWLER, S. **CTR Wilson, a Grest Scottish Physicist: His Life, Work and Legacy**. The Royal Society of Edinburgh Conference. Edinburgh: [s.n.]. 2012. p. 3.
- BRABO, L. L. Os 10 alimentos mais Radioativos. **Centro de Capacitação NEXT**, 2014. Disponível em: <<http://portalnext.net/os-10-alimentos-mais-radioativos/>>. Acesso em: 17 Outubro 2014.
- BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**. Ministério da Educação/Secretaria da Educação Média e Tecnológica. Brasília. 2000.
- CAMARGO, A. C. D.; WALDER, J. M. M. Efeitos nos Alimentos. **Divulgação Da Tecnologia De Irradiação De Alimentos e Outros Materiais**, 2007. Disponível em: <<http://www.cena.usp.br/irradiacao/efeitos.htm>>. Acesso em: 17 Outubro 2014.
- CAMPUS, T. F. D. C. **Consequências do gás Radônio na saúde humana**. Laboratório de Radioatividade Natural do Rio Grande do Norte da UFRN. Natal, p. 11. 2010.
- CARDOSO, E. D. M. **Apostila educativa: Radioatividade**. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Rio de Janeiro, p. 19. 2008.
- CARUSO, F.; OGURI, V. **A eterna busca do indivisível: do átomo filosófico aos quarks e léptons**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Rio de Janeiro, p. 324-334. 1996.
- CCEAD PUC-RIO & MEC. A descoberta da Radioatividade. **YouTube**, 2013. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=ah4dv2IMLGA>>. Acesso em: 17 Outubro 2014.
- COELHO, S. M.; NUNES, A. D. Formação continuada de professores numa visão contrutivista: contextos didáticos, estratégias e formas de aprendizagem no ensino experimental de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Porto Alegre-RS, v. 25, no.01, p. 7-34, Abril 2008.
- DA SILVA, F. C. V.; CAMPOS, A. F.; DE ALMEIDA, A. V. **O Ensino e aprendizagem de radioatividade**: análise de artigos em periódicos nacionais e internacionais. XVI Encontro Nacional de Ensino de Química (XVI ENEQ) e X Encontro de Educação Química da Bahia (X EDUQUI). Salvador: [s.n.]. 2012. p. 1-12.
- D'ANDREA, A. D. Q. AMERÍCIO 241 - Câmara de Wilson Eletrônica.. **YouTube**, 2014. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=S_3v86KSkis>. Acesso em: 17 Outubro 2014.

DE ARAÚJO, M. ; DICKMAN, A. G. **Energia nuclear e radioatividade**: Como estes tópicos são abordados pelos professores no ensino médio. Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – IX ENPEC. Águas de Lindóia: [s.n.]. 2013. p. 7.

EDUARDO, A. Radiações ionizantes: aplicações e cuidados. **Segurança e Trabalho**, 2000. Disponível em: <<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/rad-ioniz-cuidados.pdf>>. Acesso em: 17 Outubro 2014.

EICHLER, M. L.; CALVETE, M. H. H.; SALGADO, T. M. **Módulos para o ensino de radioatividade**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Instituto de Química; Área de Educação Química. Porto Alegre, p. 85. 1997.

HAINZENREDER, G. D. O.; SALGADO, T. D. M. Modelo Atômico de Dalton. **Evolução dos Modelos Atômicos**. Disponível em: <http://www.iq.ufrgs.br/ead/fisicoquimica/modelosatomicos/modelo_dalton.html>. Acesso em: 17 Outubro 2014.

KELECOM, A.; GOUVEA, R. D. C. D. S. A Percepção da Radioatividade por Estudantes de Nível Superior. **Mundo e Vida**, Niteroi, v. 3, p. 78-89, 2002.

LAGANÁ, C. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, p. 5, Setembro 2011.

LANGSDORF, A. S. The development of a Thermally Activated, Continuously Sensitive Cloud Chamber, and Its Use in Nuclear Physics Research. **Massachusetts Institute of Technology**, Washington, p. 146, 1937.

LIMA, R. D. S.; AFONSO, J. C.; PIMENTEL, L. C. F. Raios-x: fascinação, medo e ciência. **Química Nova**, Rio de Janeiro, p. 263-270, Dezembro 2008.

MARTINS, J. B. A história da Energia Nuclear. **Comissão Nacional de Energia Nuclear**, Rio de Janeiro, 1984.

MARTINS, R. D. A. Hipóteses e Interpretação experimental: a conjectura de Poincaré e a descoberta da hiperfosforescência por Becquerel eThompson. **Ciência e Educação**, v. 10, p. 501-516, 2004.

MUNFORD, D.; LIMA, E. C. D. C. Ensinar ciências por investigação: em quê estamos de acordo? **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 9, no.1, Julho 2007.

NELSON, O. R. Uma abordagem didática da natureza dos processos de aquecimento da atmosfera estelar. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Natal, v. 35, p. 1-14, Setembro 2013.

NOTÍCIAS. Inimigo oculto, gás radônio é segunda causa de câncer de pulmão no mundo. **Faculdade de Medicina da UFMG**, 2014. Disponível em: <<http://www.medicina.ufmg.br/noticias/?p=38372>>. Acesso em: 17 Outubro 2014.

NUNES, F. T.; DA SILVA, J. P.; DE CARVALHO, D. G. **Uma Investigação Sobre os Procedimentos Metodológicos de Professores do Ensino Básico no Processo de**

Transposição Didática de um Conceito Matemático. Encontro Regional dos Estudantes de Matemática da Região Sul. Porto Alegre: EDIPUCRS. 2010. p. 405-416.

OKUNO, E.; CHOW, C.; CALDAS, I. L. **Física Para Ciências Biológicas e Biomédicas.** SÃO PAULO: Harper & Row do Brasil, 1986.

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

OLIVEIRA, Ó. A.; FERNANDES, J. D. G. Aula 1: Arquitetura atômica e molecular. **Programa Universidade a Distância**, Natal, p. 280, 2006. ISSN ISBN 85-7273-278-0.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa: "Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio". **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 5, no.1, UFRGS, 2000.

PEDUZZI, L. O. Q.; CORDEIRO, M. D. Aspectos da natureza da ciência e do trabalho científico no período inicial de desenvolvimento da radioatividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 33, p. 3601-1/3601-11, Outubro 2011.

PERDIGÃO. Física Nuclear - 1/6 - A descoberta da radioatividade. **YouTube**, 2011. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=SIB6fAzPW64>>. Acesso em: 17 Outubro 2014.

PIETROCOLA, M. **Inovação Curricular em Física: Transposição Didática de Teorias Modernas e a Sobrevivência dos Saberes.** Fapesp-Projeto Temático. Faculdade de Educação - USP. São Paulo. 2008.

POLIDORO, L. D. F.; STIGAR, R. A Transposição Didática: a passagem do saber científico para o saber escolar. **Revista de Tecnologia e Cultura**, São Paulo, v. n. 27, p. 153-159, Fevereiro 2010.

PORTO, C. O atomismo grego e a formação do pensamento físico moderno. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, v. 35, p. 2-11, Outubro 2013.

SANTOS, E. E. D. Ingestão de átomos radioativos e metais pesados presentes em vegetais. **Canal Ciência - ibict - Portal de Divulgação Científica e Tecnológica**, 2003. Disponível em: <<http://www.canalciencia.ibict.br/pesquisa/0107-Medicao-ingestao-atomos-radioativos-e-metais-pesados-em-alimentos.html>>. Acesso em: 17 Outubro 2014.

SIQUEIRA, M. R. D. P. **Professores de física em contexto de inovação curricular: saberes docentes e superação de obstáculos didáticos no ensino de física moderna e contemporânea.** Universidade de São Paulo; Faculdade de Educação. São Paulo, p. 202. 2012.

STOODI. Química-Radioatividade. **YouTube**, 2014. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=P8tqZrXu9zA>>. Acesso em: 17 Outubro 2014.

UNIVERSITY OF COLORADO. Decaimento Alfa. **PhET - Interactive Simulations**, 2012. Disponível em: <http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/alpha-decay>. Acesso em: 17 Outubro 2014.

UNIVERSITY OF COLORADO. Decaimento Alfa. **PhET-Interactive Simulations**, 2012. Disponível em: <http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/alpha-decay>. Acesso em: 17 Outubro 2014.

UNIVERSITY OF COLORADO. Photoelectric Effect. **PhET - Interactive simulations**, 2013. Disponível em: <<http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>>. Acesso em: 17 Outubro 2014.

VIANA, H. E. B. **A Construção da Teoria ATômica de Dalton Como Estudo de Caso – e algumas reflexões para o ensino de química**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 1-106. 2007.

WILSON, C. T. R. On an Expansion Apparatus for Making Visible the Tracks of Ionising Particles in Gases and Some Results Obtained by Its Use. **Proceedings of The Royal Society of London**, Londres, v. 87, p. 277-292, Setembro 1912.

YOSHIMURA, E. M. Física das Radiações: interação da radiação com a matéria. **Revista Brasileira de Física Médica**, São Paulo, v. 3, p. 57-67, 2009.

ZÔMPERO, A. F.; LABURÚ, C. E. Atividades Investigativa no Ensino de Ciências: Aspectos Históricos e Diferente Abordagens. **Revista Ensaio**, Belo Horizonte, v. 13, no. 3, p. 67-80, Dezembro 2011.