

**UNIVERSIDADE DE LISBOA**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**A RADIOACTIVIDADE E O AMBIENTE NO ENSINO  
SECUNDÁRIO**

**Carmen Helena Carvalho Oliveira**

**MESTRADO EM FÍSICA PARA O ENSINO**

**Outubro de 2006**



**UNIVERSIDADE DE LISBOA**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**A RADIOACTIVIDADE E O AMBIENTE NO ENSINO  
SECUNDÁRIO**

**Carmen Helena Carvalho Oliveira**

**Dissertação orientada pelo Prof. Doutor Luís Peralta**

**MESTRADO EM FÍSICA PARA O ENSINO**

**Outubro de 2006**

**Aos meus filhos Pedro e Patrícia**

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Luís Peralta, meu orientador, agradeço a sua amizade, os seus ensinamentos, o seu apoio incondicional e disponibilidade demonstrados ao longo da elaboração deste trabalho.

À Professora Maria Luísa Carvalho pela utilização do Laboratório de Física Atómica da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

À Doutora Maria José Madruga por me ter recebido gentilmente no Departamento de Protecção e Segurança Nuclear do Instituto Tecnológico e Nuclear, onde me proporcionou uma visita guiada pelo respectivo Laboratório, local onde se faz a detecção da radioactividade das águas em Portugal.

À Professora Paula Neves e aos alunos de Física do 12.º ano de escolaridade da Escola Secundária de Casquilhos pela participação activa na aula experimental sobre a radioactividade e o ambiente.

À EDM (Empresa de Desenvolvimento Mineiro) pela disponibilidade em receber-nos numa visita guiada pelas Minas da Urgeiriça e possibilitar a recolha de rochas radioactivas para posteriores experiências.

Ao Professor Pedro Abreu por gentilmente oferecer a sua casa em Mangualde aquando da visita de estudo às Minas da Urgeiriça.

A todos os que participaram na visita de estudo às Minas da Urgeiriça.

Aos meus familiares, amigos e, em especial, ao meu marido e à minha irmã Patrícia pelo apoio e incentivo que sempre me transmitiram.

## **RESUMO**

O presente trabalho constitui a tese de dissertação do *Mestrado em Física para o Ensino realizada no Departamento de Física* da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Em virtude de ter sido introduzido nos novos programas de Física e Química assuntos relacionados com a radioactividade e o ambiente e o facto de ser professora de Ciências Físico-Químicas motivou a apresentação deste trabalho subordinado ao tema: *A Radioactividade e o Ambiente no Ensino Secundário*.

Em condições normais, existem no meio ambiente vestígios de nuclídeos radioactivos os quais contribuem para a dose total a que estamos submetidos. Mais de 50% dessa dose de radiação tem origem nas radiações emitidas pelo gás radão e seus descendentes.

Devido ao facto da Física e da Química serem ciências experimentais pretende-se com este trabalho possibilitar a exploração por professores e alunos de um conjunto de actividades práticas sobre radioactividade e ambiente fáceis de serem realizadas numa escola com ensino secundário.

As experiências apresentadas pretendem mostrar que o meio em que vivemos é radioactivo. Assim, são apresentadas experiências com o ar que respiramos, com rochas radioactivas, muitas das quais fazem parte dos materiais de construção, com a água que bebemos e com alimentos que comemos.

A maior parte destas experiências são realizadas utilizando um detector Geiger o qual não diferencia o tipo de radiações presentes numa amostra radioactiva. Por isso, se procedeu também neste trabalho à construção de um sistema de detecção de partículas carregadas, baseado num detector de silício, o qual permite detectar partículas alfa e beta emitidas pelos materiais radioactivos recolhidos.

**Palavras chave:** Radioactividade, Ambiente, Experiências, Ensino, Alunos

## **ABSTRACT**

The present work is a Master thesis in Teaching Physics carried out in the Physics Department of the Faculty of Sciences of the University of Lisbon.

The introduction, in the new curricula of Physics and Chemistry, of subjects related to radioactivity and environment allied to the fact that I am a Chemical Physical Sciences teacher, motivated the presentation of the present work, subordinated to the subject “Teaching Radioactivity and Environment subjects in the Secondary School”.

In a standard situation, vestigial amounts of radioactive radionuclides exist in the environment and contribute to the total dose of radiations, to which we are daily submitted. More than 50% of the radiation dose delivered to humans by natural sources is due to the radioactive radon gas and its descendants.

As Physics and Chemistry are experimental sciences, in this work it was proposed a set of practical activities, about Radioactivity and Environment that can be easily carried out by teachers and pupils, in a secondary school.

The presented experiences intend to show that we live in a radioactive environment. Thus, experiments with the air that surrounds us, water, food and radioactive rocks, which may be a part of the construction materials, are presented.

Most of these experiences are carried out using a Geiger detector. However, this type of detector does not allow us to distinguish the radiations types, which are present in a radioactive sample. Therefore, it is also developed, in the present work, a detection system, based on a silicon detector, able to detect massive particles and allowing the detection and identification of alpha and beta particles emitted by the different radioactive materials which were collected.

**Keywords:** Radioactivity, Environment, Experiences, Teaching, Students

## ÍNDICE

Introdução	1
<b>Capítulo 1 ANÁLISE DOS PROGRAMAS DE FQ DO ENSINO SECUNDÁRIO</b>	
1.1. Introdução	4
1.2. Física e Química A – 10º ano	4
1.2.1. Física - 10º ano	4
1.2.2. Química – 10º ano	6
1.3. Física e Química A – 11º ano	7
1.3.1. Física - 11º ano	7
1.3.2. Química – 11º ano	7
1.4. Física - 12º ano	8
1.5. Química – 12º ano	10
<b>Capítulo 2 FÍSICA DAS RADIAÇÕES</b>	
2.1. Radiações	13
2.2. Fontes de radiação	15
2.2.1. Fontes naturais	15
2.2.1.1. Radiação Terrestre	15
2.2.1.2. Radiação cósmica	18
2.2.1.3. Alimentação	20
2.2.2. Radiação artificial	22
2.3. Exposição média da população	23
2.4. Radiações ionizantes	24
2.5. Radioactividade	28
2.6. O Núcleo Atómico	29
2.6.1. Breve referência sobre algumas propriedades dos átomos	29
2.6.2. Energia de Ligação	29
2.6.3. Estabilidade dos núcleos	31
2.7. Decaimento radioactivo	33



2.7.1.	Decaimento alfa	33
2.7.2.	Decaimento Beta	35
2.7.2.1.	Decaimento $\beta^-$	35
2.7.2.2.	Decaimento $\beta^+$	36
2.7.2.3.	Captura electrónica	37
2.7.3.	Fissão espontânea	38
2.7.4.	Decaimento gama	38
2.8.	Lei do decaimento radioactivo	39
2.8.1.	Cadeias de desintegração	41
2.9.	Reacções nucleares	44
2.9.1.	Fissão nuclear	44
2.9.2.	Fusão nuclear	46
2.10.	Efeitos Biológicos da Radiação	46
2.10.1.	Efeitos biológicos em função do LET	47
2.10.2.	Fases da produção do efeito biológico pela radiação	48
2.10.3.	Classificação dos efeitos biológicos	50
2.10.3.1.	Efeitos estocásticos e determinísticos	50
2.10.3.2.	Efeitos somáticos e hereditários	51
2.10.3.3.	Efeitos imediatos e tardios	51
2.11.	Grandezas e unidades dosimétricas	52
2.11.1.	Dose absorvida ou dose, D	52
2.11.2.	Dose equivalente, H	53
2.12.	Aplicações das radiações ionizantes	53
2.12.1.	Medicina	54
2.12.2.	Indústria	55
2.12.3.	Agricultura	55
2.12.4.	Arqueologia	56
2.13.	Detectores de radiação ionizante	57
2.13.1.	Detector Geiger-Müller	58

### **Capítulo 3 O RADÃO E O AMBIENTE**

3.1.	O Radão	60
------	---------	----

3.2. Exposição e risco radiológico	61
3.3. Factores que afectam a libertação de radão	62
3.4. O radão nos edifícios	64
3.5. Como reduzir a concentração de radão no interior dos edifícios	66
3.6. O radão nas águas	67
3.7. Como reduzir a concentração de radão nas águas	68
a. Carvão activado	69

#### **Capítulo 4 A RADIOACTIVIDADE NAS ÁGUAS**

4.1. Introdução	71
4.2. Águas dos mares	71
4.3. Águas doces	73
4.4. Breve referência às águas para consumo humano em Portugal	73

#### **Capítulo 5 CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE DETECÇÃO DE PARTÍCULAS CARREGADAS**

5.1. Construção de um sistema de detecção de partículas carregadas utilizando um detector de silício.	77
5.2. Calibração do sistema	81
5.3. Experimentação	83

#### **Capítulo 6 ACTIVIDADES EXPERIMENTAIS**

6.1. Deflexão da radiação emitida por uma fonte radioactiva num campo electromagnético.	85
6.2. Estudo da taxa de contagens com a distância	90
6.3. Estudo da atenuação da radiação gama na matéria	93
6.4. Determinação do tempo de meia-vida do protactínio-234 (metaestável)	97
6.5. Radioactividade em rochas	100
a. Detector Geiger-Müller	100
b. Espectroscopia gama com detector de NaI(Tl)	101
6.6. Presença de gases radioactivos na atmosfera	107

6.7. Balões radioactivos	111
6.8. Amostras de materiais retirados de um gerador de radão	114
6.9. Radioactividade do potássio ( $^{40}\text{K}$ )	118
a. Detector Geiger-Müller	118
b. Detector NaI(Tl)	119
6.10. Radioactividade do tomate	122
6.11. Fluorescência de raios X	124
6.12. Radioactividade nas águas	129
a. Medidas com Detector Geiger	129
b. Detector de NaI(Tl)	135

## **Capítulo 7 AULA SOBRE RADIOACTIVIDADE E AMBIENTE NA ESC**

7.1. Introdução	138
7.2. Experiências realizadas	138
7.2.1. Experiência 1 - Radiação de fundo	138
7.2.2. Experiência 2 - Radioactividade em rochas	140
7.2.3. Experiência 3 - Radioactividade do potássio ( $^{40}\text{K}$ )	141
7.2.4. Experiência 4 - Presença de gases radioactivos na atmosfera	142

## **Capítulo 8 KIT DIDÁCTICO**

8.1. Construção de um kit didáctico	145
8.2. Visita de estudo às Minas da Urgeiriça	146
Conclusões	148
Referências Bibliográficas	151
Anexo 1 - Protocolos das experiências realizadas numa aula na ESC	158
Anexo 2 - Protocolos de outras experiências	171

## INTRODUÇÃO

A radioactividade existe desde a formação do Universo e os seres humanos viveram sempre num ambiente radioactivo, embora não o soubessem até finais do século XIX.

Mais de 50% da dose de radiação a que estamos sujeitos tem origem no gás radão e seus descendentes que se encontram presentes na atmosfera, na água que consumimos, nas rochas, nos solos, entre outros.

Com a Reforma do Ensino Secundário, que entrou em vigor no ano lectivo 2003/04, foram introduzidos alguns assuntos relacionados com a Física Moderna, os quais são leccionados nas disciplinas quer de Física quer de Química.

O programa curricular de Física do 12.º ano que entrou em vigor no ano lectivo 2005/06 contempla um capítulo sobre o tema da radioactividade, denominado “Núcleos atómicos e radioactividade”. Segundo os autores do programa de Física, o estudo da radioactividade na disciplina de Física do 12.º ano justifica-se pelo seu interesse e pela sua actualidade.

No programa curricular de Química do 12.º ano, o qual entrou também em vigor no ano lectivo 2005/06 foram introduzidos igualmente assuntos relacionados com a radioactividade.

Tendo a ligação entre a radioactividade e o ambiente um forte impacto, quer na saúde humana, quer social, um trabalho que permita desenvolver técnicas de ensino destas matérias reveste-se de extrema importância.

Assim, uma perspectiva do ensino das ciências, da Física e da Química em particular, que ponha em destaque as suas relações com a tecnologia e com o ambiente, com as suas aplicações na sociedade e com os desenvolvimentos científicos é inevitável. Os novos programas tornam obrigatória esta relação com o mundo real.

Por outro lado, sendo a Física e a Química ciências experimentais, a prática laboratorial tem lugar de destaque nos novos programas.

É neste contexto que se propõe a realização de várias experiências dirigidas aos alunos do ensino secundário que frequentam as disciplinas de Física e de Química. A maior parte destas experiências exigem recursos modestos e são de fácil realização.

Trata-se de um conjunto de experiências que permitirá explorar a presença de núclídeos radioactivos no ar, em materiais rochosos e na água.

Com o objectivo de observar a reacção dos alunos a algumas das experiências propostas neste trabalho torna-se imperativo testá-las em situação de sala de aula (Laboratório). Assim, realizou-se uma aula experimental com alunos que se encontravam a frequentar a disciplina de Física do 12.º ano na Escola Secundária de Casquilhos onde sou professora. Nesta aula os alunos puderam realizar experiências utilizando um detector Geiger, o mais acessível em termos económicos para as escolas com ensino secundário sendo também um detector de fácil manuseamento.

O detector Geiger apenas permite detectar a presença de radiações ionizantes não fazendo a distinção entre os diferentes nuclídeos. Daí propor-se neste trabalho a construção de um sistema de detecção de partículas carregadas, baseado num detector de silício o qual permitirá detectar partículas alfa e beta emitidas por materiais radioactivos. A construção deste sistema de detecção tem também como objectivo mostrar que é possível a obtenção de um sistema deste tipo com custos mais acessíveis às escolas com ensino secundário.

Este trabalho está estruturado em 8 capítulos.

No capítulo 1 é feita uma breve análise aos programas curriculares de Física e de Química do ensino secundário.

O capítulo 2 aborda os itens leccionados no capítulo “Núcleos atómicos e radioactividade” que constam do programa de Física do 12.º ano e que também são abordados no programa de Química do 12.º ano.

Devido ao grande contributo do radão para a dose de radiação de exposição humana o capítulo 3 é dedicado a este assunto. O radão é também um assunto abordado no programa de Física do 12.º ano.

Recentemente têm vindo a público notícias sobre a radioactividade de algumas águas de consumo doméstico daí que este assunto tenha despertado interesse e seja abordado no capítulo 4.

O capítulo 5 mostra as diferentes fases de construção de um sistema de detecção de partículas carregadas bem como a electrónica a ele associada e também a sua utilização na realização de experiências.

O capítulo 6 é dedicado às experiências realizadas no Laboratório de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e também na Escola Secundária de Casquilhos, as quais poderão ser exploradas em situação de sala de aula com os alunos de Física e de Química do ensino secundário.

No capítulo 7 apresenta-se uma aula laboratorial com alunos que frequentaram a disciplina de Física do 12.º ano na Escola Secundária de Casquilhos (ano lectivo 2005/06), a qual teve a duração de 90 minutos e onde os alunos realizaram algumas das experiências propostas neste trabalho.

O capítulo 8 tem como objectivo mostrar que é relativamente fácil adquirir um conjunto de materiais (kit didáctico) possíveis de serem utilizados em experiências sobre radioactividade e ambiente. Neste capítulo é apresentada ainda uma visita de estudo às Minas da Urgeiriça a qual possibilitou a recolha de rochas radioactivas para a realização de experiências.

## **Capítulo 1 - Análise dos Programas de FQ do Ensino Secundário**

### **1.1. Introdução**

Os novos programas curriculares de Física e de Química para o Ensino Secundário foram elaborados segundo uma perspectiva CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente). Trata-se de uma perspectiva do ensino das ciências que põe em destaque as suas relações com a tecnologia e com o ambiente, com as suas aplicações na sociedade e com os desenvolvimentos científicos. Uma vez que a Física e a Química são ciências experimentais, a prática laboratorial tem lugar de destaque nos novos programas.

Verificam-se alterações significativas nos novos programas, nomeadamente a introdução de assuntos relacionados com a Física Moderna.

É apresentado de seguida uma síntese dos Programas Curriculares de Física e Química do Ensino Secundário com o objectivo de fazer uma análise sobre a existência de assuntos relacionados com a Física Moderna e, principalmente, com a radioactividade e ambiente.

### **1.2. Física e Química A – 10º ano**

#### **1.2.1. Física - 10º ano**

O programa de Física e Química A do 10º ano que entrou em vigor no ano lectivo 2003/04 é constituído por três unidades de Física e três unidades de Química que a seguir se transcreve [1]:

#### **Unidade inicial: Das Fontes de Energia ao Utilizador**

- Situação energética mundial e degradação de energia (Fontes de energia e estimativas de “consumos” energéticos nas principais actividades humanas; Transferências e transformações de energia; Degradação de energia. Rendimento; Uso racional das fontes de energia.)

- Conservação de energia (Sistema, fronteira e vizinhanças. Sistema isolado; Energia mecânica; Energia interna. Temperatura; Calor, radiação, trabalho e potência; Lei da Conservação da Energia.)

O termo radiação é abordado nesta unidade apenas como um processo de transferência de energia.

### **Unidade 1: Do Sol ao aquecimento**

- Energia – do Sol para a Terra  
Balanço energético da Terra (Emissão e absorção de radiação. Lei de Stefan-Boltzmann; Deslocamento de Wien; Sistema termodinâmico; Equilíbrio térmico. Lei zero da Termodinâmica).  
A radiação solar na produção de energia eléctrica – painel fotovoltaico
- A energia no aquecimento/arrefecimento de sistemas (Mecanismos de transferência de calor: condução e convecção; Materiais condutores e isoladores do calor. Condutividade térmica; 1ª Lei da Termodinâmica; Degradação da energia. 2ª Lei da Termodinâmica; Rendimento.)

À semelhança do que acontece na unidade anterior também aqui o termo radiação é abordado nesta unidade como um processo de transferência de energia.

### **Unidade 2: Energia e Movimentos**

- Transferências e transformações de energia em sistemas complexos – aproximação ao modelo da partícula material (Transferências e transformações de energia em sistemas complexos; Sistema mecânico. Modelo da partícula material; Validade de representação de um sistema pelo respectivo centro de massa; Trabalho realizado por forças constantes que actuam num sistema em qualquer direcção; A acção das forças dissipativas).
- A energia de sistemas em movimento de translação (Teorema da energia cinética; Trabalho realizado pelo peso; Peso como força conservativa; Energia potencial gravítica; Acção das forças não conservativas; Rendimento. Dissipação de energia).



Como se pode concluir a partir da análise dos conteúdos de Física apresentados não existe qualquer referência a assuntos relacionados com a Física Moderna.

### **1.2.2. Química – 10º ano**

#### **Unidade inicial: Materiais: diversidade e constituição**

- Materiais
- Soluções
- Elementos químicos

#### **Unidade 1: Das estrelas ao átomo**

- Arquitectura do Universo
- Espectros, radiações e energia
- Átomo de Hidrogénio e estrutura atómica
- Tabela Periódica – organização dos elementos químicos

Nesta unidade são introduzidos alguns conceitos relacionados com a Física das partículas, com a Física Nuclear e radiações. Neste âmbito faz-se o estudo de algumas partículas elementares; estudam-se reacções de Fusão Nuclear e de Cisão Nuclear; as radiações emitidas pelas estrelas; a interacção radiação-matéria e as suas aplicações.

#### **Unidade 2: Na atmosfera da Terra: radiação, matéria e estrutura**

- Evolução da atmosfera - breve história
- Atmosfera: temperatura, pressão e densidade em função da altitude
- Interacção radiação-matéria
- O ozono na estratosfera
- Moléculas na troposfera

O tema radiação é novamente abordado nesta unidade mas numa perspectiva Química.

### **1.3. Física e Química A – 11º ano**

#### **1.3.1. Física - 11º ano**

O programa de Física e Química A do 11.º ano que entrou em vigor no ano lectivo 2004/05 é constituído por três unidades de Física e três unidades de Química que a seguir se transcreve [2]:

##### **Unidade 1 – Movimentos na Terra e no Espaço**

- Viagens com GPS (Funcionamento e aplicações do GPS; Posição – coordenadas geográficas e cartesianas; Tempo; Trajectória; Velocidade).
- Da Terra à Lua (Interacções à distância e de contacto; 3ª Lei de Newton; Lei da gravitação universal; Movimentos próximos da superfície da Terra; Movimentos de satélites geoestacionários).

##### **Unidade 2 – Comunicações**

- Comunicação de informação a curtas distâncias (Transmissão de sinais; Som; Microfone e Altifalante).
- Comunicação de informação a longas distâncias (A radiação electromagnética na comunicação).

Como se pode verificar a partir da análise dos conteúdos de Física apresentados existem assuntos relacionados com a Física Moderna, no entanto, não é abordado qualquer assunto relacionado com radiação.

#### **1.3.2. Química – 11º ano**

##### **Unidade 1 – Química e Indústria: Equilíbrios e Desequilíbrios**

- Produção e controlo – a síntese industrial do amoníaco (O amoníaco como matéria-prima; O amoníaco, a saúde e o ambiente; Síntese do amoníaco e balanço energético; Produção industrial do amoníaco; Controlo da produção industrial)

## **Unidade 2: Da atmosfera ao Oceano: Soluções na Terra e para a Terra**

- Água da chuva, água destilada e água pura
- Águas minerais e de abastecimento público: a acidez e a basicidade das águas
- Chuva ácida
- Mineralização e desmineralização de águas

Como se pode verificar a partir da análise dos conteúdos apresentados de Química não existe qualquer referência a assuntos relacionados com a Física Moderna.

### **1.4. Física – 12.º ano**

O programa de Física do 12.º ano que entrou em vigor no ano lectivo 2005/06 é constituído por três Unidades que a seguir se transcreve [3]:

#### **Unidade I – Mecânica**

- Mecânica da partícula
- Movimentos oscilatórios
- Centro de massa e momento linear de um sistema de partículas
- Mecânica de fluidos
- Gravitação

#### **Unidade II – Electricidade e Magnetismo**

- Campo e potencial eléctrico
- Circuitos eléctricos
- Acção de campos magnéticos sobre cargas em movimento e correntes

#### **Unidade III – Física Moderna**

- Relatividade
- Introdução à física quântica
- Núcleos atómicos e radioactividade

Como se pode verificar foi introduzido uma unidade de ensino dedicado à Física Moderna (Unidade III).

Segundo os autores do programa do 12.º ano de Física, a inclusão da Unidade III justifica-se por vários motivos. “Por um lado, permite dar uma visão mais realista ao aluno do que é a física neste início do século XXI. Por outro lado, o ensino da física moderna permite destacar aspectos essenciais da construção do conhecimento científico, ao apresentar e confrontar ideias e teorias científicas que revolucionaram a física e a própria ciência. Finalmente, as inúmeras aplicações da física moderna que deram origem a, por exemplo, telemóveis, computadores, leitores de CD-ROM, etc.” e “O estudo da radioactividade justifica-se pelo seu interesse e pela sua actualidade”.

No item “Introdução à física quântica”, da Unidade III são abordados os assuntos:

- A quantização da energia de Planck
- A teoria dos fotões de Einstein
- Dualidade onda-corpúsculo para a luz
- Radiação ionizante e não ionizante
- Interação da radiação: efeito fotoeléctrico, efeito de Compton, produção de pares e aniquilação de pares
- Raios X
- Dualidade onda-corpúsculo para a matéria. Relação de De Broglie
- Princípio de Incerteza e Mecânica Quântica
- Física em acção

No item “Núcleos atómicos e radioactividade” (unidade III) são abordados os assuntos:

- Energia de ligação nuclear e estabilidade dos núcleos
- Processos de estabilidade dos núcleos: decaimento radioactivo
- Propriedades das emissões radioactivas (alfa, beta e gama)
- Lei do decaimento radioactivo

- Período de decaimento (tempo médio de vida)<sup>1</sup>
- Actividade de uma amostra radioactiva
- Fontes naturais e artificiais de radioactividade
- Efeitos biológicos da radioactividade
- Dose de radiação absorvida e dose equivalente biológica
- Detectores de radiação ionizante
- Aplicações da radiação ionizante
- Reacções nucleares: a fusão e a fissão (cisão) nuclear
- Física em acção

Segundo as indicações metodológicas do programa o professor pode utilizar um contador Geiger-Müller para detectar a radiação natural de fundo ou de fontes radioactivas. No caso de existirem fontes radioactivas nas escolas pode-se fazer variar a distância entre o detector ou interpor diferentes materiais entre a fonte e o detector e verificar o efeito no detector (número de contagens).

Em “Física em acção” é sugerido investigar os motivos de perigosidade para a saúde pública da acumulação de radão em edifícios.

### **1.5. Química – 12.º ano**

O programa de Química do 12.º ano que entrou em vigor também no ano lectivo 2005/06 é constituído por três Unidades que a seguir se transcreve [4]:

#### **Unidade 1 – Metais e Ligas Metálicas**

- Metais e Ligas Metálicas, a importância dos metais na sociedade actual
- Degradação dos metais
- Metais, Ambiente e Vida

---

<sup>1</sup> Estes não são os termos habitualmente usados na literatura portuguesa. Os termos usados são “período de semi-desintegração”, “tempo de semi-vida” ou “tempo de meia-vida”. Aliás, o termo “tempo médio de vida” entra em colisão com o termo “tempo de vida média” que fisicamente tem um significado distinto do período de semi-desintegração.

## **Unidade 2 - Combustíveis, Energia e Ambiente**

- Combustíveis fósseis: o carvão, o crude e o gás natural
- De onde vem a energia dos combustíveis (neste item é abordado a equivalência massa-energia: um assunto nuclear)

## **Unidade 3 – Plásticos, Vidros e Novos Materiais**

- Os plásticos e os estilos de vida das sociedades actuais
- Os plásticos e os materiais poliméricos
- Os plásticos como substitutos de vidros
- Os polímeros sintéticos e a indústria dos polímeros
- Novos materiais: os biomateriais, os compósitos e os materiais de base sustentada

Verifica-se a existência de assuntos relacionados com a radioactividade na Unidade 2 – Combustíveis, Energia e Ambiente, item “Equivalência massa-energia: um assunto nuclear”.

Neste ponto são abordados assuntos tais como:

- Energia de ligação nuclear e estabilidade dos núcleos
- A estabilidade/instabilidade nuclear e o decaimento radioactivo
- Emissões radioactivas: partículas alfa e beta e radiações gama
- Período de decaimento ou tempo de meia vida<sup>2</sup>
- Fontes naturais e artificiais de radioactividade
- Datação e radioactividade
- Medidores (detectores) de radioactividade
- Reacções nucleares: a fusão e a fissão (cisão) nuclear
- Equivalência massa-energia e as reacções nucleares

Segundo os autores do programa de Química do 12º ano, “Devido à inexorável extinção dos recursos naturais e aos problemas ambientais suscitados pelo seu uso desmesurado, a ciência e a tecnologia investem em combustíveis alternativos como o

---

<sup>2</sup> O termo “período de decaimento” não é o termo habitualmente usado na literatura portuguesa. Os termos usados são “período de semi-desintegração”, “tempo de semi-vida” ou “tempo de meia-vida”.

biogás e nas alternativas aos combustíveis, como as pilhas de combustível, as energias nuclear, eólica, das marés e geotérmica, na busca de um futuro sustentável para a espécie humana. Este contexto revela-se, assim, adequado ao estudo de tópicos de Química como os que respeitam à energia envolvida nas reacções químicas e nas reacções nucleares ...” [4], justificando-se assim a introdução dos assuntos acima referidos.

Atendendo aos programas curriculares de Física e de Química do ensino secundário pode-se dizer que a radioactividade e o ambiente pode ser introduzido no 10.º ano quando se aborda a Unidade: Das Estrelas ao Átomo - A estabilidade dos átomos e desenvolvido no 12.º ano, nas disciplinas de Física e de Química.

## **Capítulo 2: Física das Radiações**

### **2.1. Radiações**

A população humana está continuamente exposta a radiações de origem natural existentes no ambiente, tais como radiação cósmica, radiação emitida pela crosta terrestre, radiação emitida por materiais de construção, etc.. Depois de 1985, a humanidade ficou exposta também a radiações de fontes artificiais [5]. Estas radiações quer naturais quer artificiais a que se está sujeito continuamente são designadas de radiação de fundo.

Por radiações entendemos os fotões ou outras partículas com massa que se propagam com elevada velocidade e que ao interagirem podem produzir diversos efeitos sobre a matéria [6].

As radiações electromagnéticas mais conhecidas são: a luz visível, microondas, ondas de rádio, radar, raios X e radiação gama.

As radiações sob a forma de partículas com massa mais comuns são feixes de electrões, feixes de protões, radiação beta, radiação alfa e neutrões.

Ao interagir com a matéria, os diferentes tipos de radiação podem produzir diferentes efeitos, os quais podem ser simplesmente a sensação de calor, a percepção de uma mensagem codificada e manipulada em áudio e vídeo numa televisão, a sensação de calor provocada por feixes de laser, o aquecimento de alimentos num forno de microondas, uma imagem obtida numa chapa radiográfica ou a produção de iões e electrões livres devido à ionização.

As radiações podem ser classificadas em ionizantes e não ionizantes. As radiações ionizantes possuem energias de valores acima de 10 eV (ionização das moléculas presentes no ar) enquanto que as radiações não ionizantes possuem energia de valores abaixo dos 10 eV [7].

Radiações ionizantes são as radiações com energia suficiente para ionizar ou excitar átomos. São exemplos de radiações ionizantes partículas carregadas, tais como, partículas alfa e beta, protões, electrões, partículas não carregadas como o neutrão e ondas electromagnéticas, tais como os raios gama e raios-X e UV.

As radiações não ionizantes não possuem energia suficiente para ionizar um átomo, podendo apenas deixar o átomo excitado.



As radiações não ionizantes estão sempre presentes no nosso dia-a-dia quando vemos um programa de TV, quando utilizamos um microondas para cozinhar, etc.. São também exemplos de radiação não ionizante a luz visível, infravermelho, microondas, etc., as quais fazem parte do espectro electromagnético [8]. A figura 2.1 mostra os diversos comprimentos de onda do espectro electromagnético, as fontes geradoras e objectos que podem ser observados através dessas radiações.

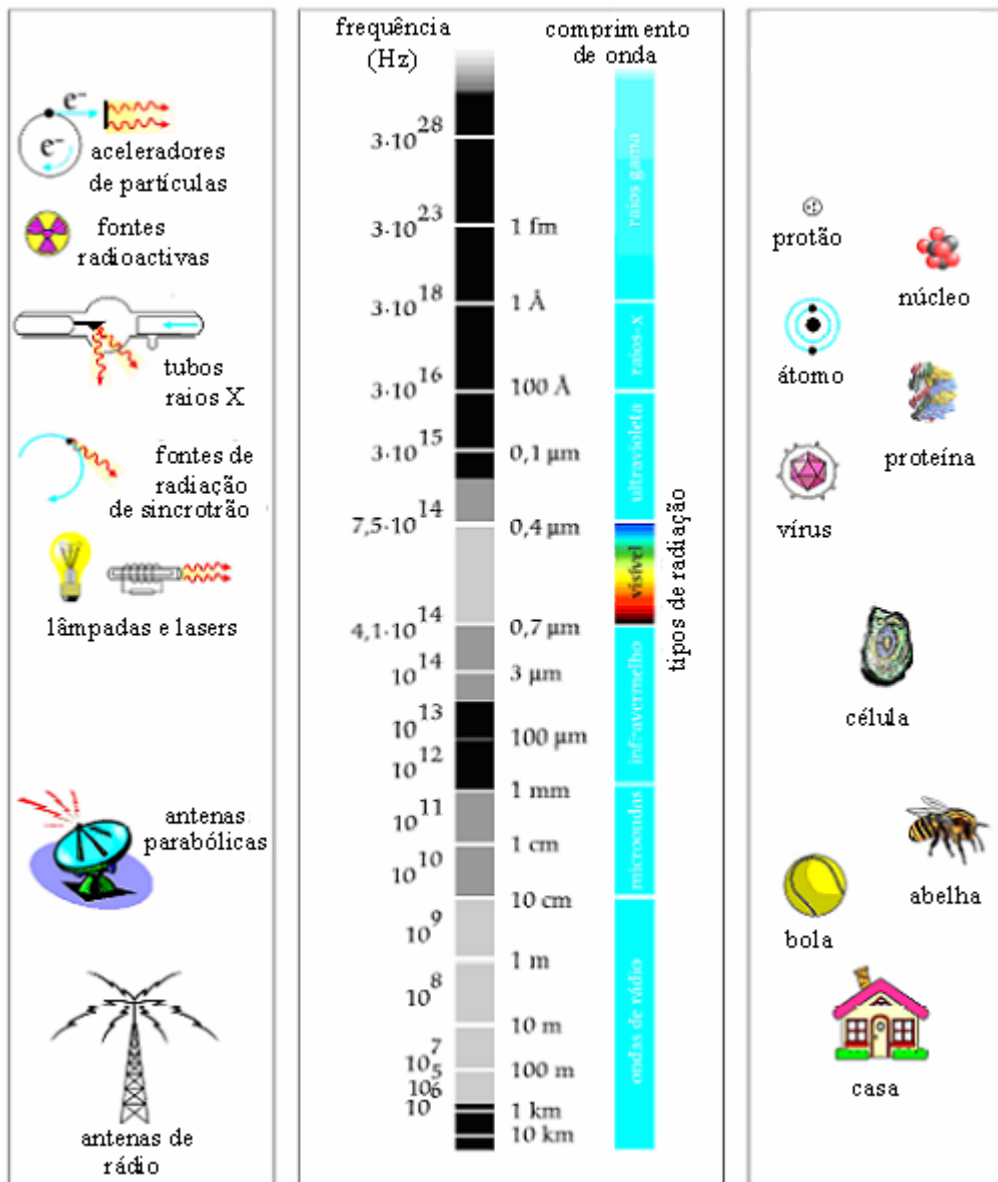


Figura 2.1: Espectro electromagnético (figura retirada de [9]).

## 2.2. Fontes de radiação

### 2.2.1. Fontes naturais

A radiação natural tem origem fundamentalmente na radiação terrestre, radiação cósmica e ainda na alimentação.

#### 2.2.1.1. Radiação Terrestre

A partir do Big-Bang até à formação do sistema solar (aproximadamente há  $4,5 \times 10^9$  anos), o hidrogénio e o hélio deram origem a elementos mais pesados no interior das estrelas novas e supernovas. Muitos dos nuclídeos então formados eram radioactivos, os quais foram decaindo desde sempre para núcleos estáveis. Alguns dos nuclídeos radioactivos têm tempos de meias-vida longos quando comparados com a idade da terra, daí que se possam observar ainda hoje. Esta radioactividade forma a maior parte da nossa radioactividade natural ambiente e é também, provavelmente, responsável pelo aquecimento interior dos planetas telúricos.

Existem elementos radioactivos naturais que não tem quaisquer isótopos estáveis como, por exemplo, o urânio. Estes nuclídeos decaem por emissão alfa e beta, variando  $Z$  (número atómico) e  $A$  (número de massa) – no caso do declínio  $\alpha$  - até ser alcançado um núcleo estável mais leve, constituindo uma cadeia ou sequência radioactiva.

Existem quatro cadeias ou sequências de decaimento naturais independentes, as quais estão referidas na tabela 2.1.

**Tabela 2.1: Algumas características das séries de desintegração das séries dos elementos pesados (retirado de [10]).**

Nome da série	Núcleo final (estável)	Membro longa-vida	
		Núcleos	Meia-vida (anos)
Tório	$^{208}\text{Pb}$	$^{232}\text{Th}$	$1,41 \times 10^{10}$
Neptúnio	$^{209}\text{Bi}$	$^{237}\text{Np}$	$2,14 \times 10^6$
Urânio	$^{206}\text{Pb}$	$^{238}\text{U}$	$4,47 \times 10^9$
Actínio	$^{207}\text{Pb}$	$^{235}\text{U}$	$7,04 \times 10^8$

Todas estas cadeias, excepto a do Neptúnio, são encontradas na natureza. A cadeia do Neptúnio não existe naturalmente uma vez que o  $^{237}\text{Np}$  tem um tempo de meia-vida muito inferior à idade da Terra. Assim, todo o  $^{237}\text{Np}$  que existia quando a Terra se formou já decaiu há muito tempo [5, 11].

As figuras 2.2, 2.3 e 2.4 mostram as séries de decaimento radioactivas naturais do Urânio, Actínio e Tório, respectivamente.

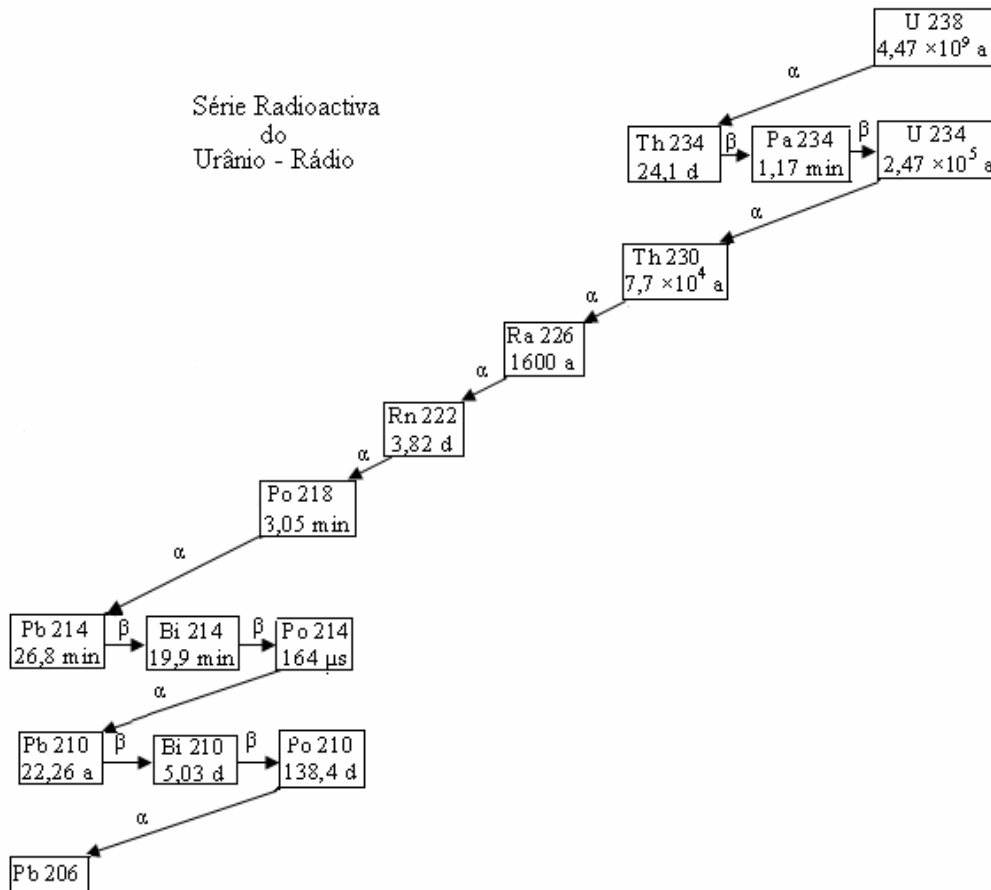


Figura 2.2: Série radioactiva do Urânio – Rádío.

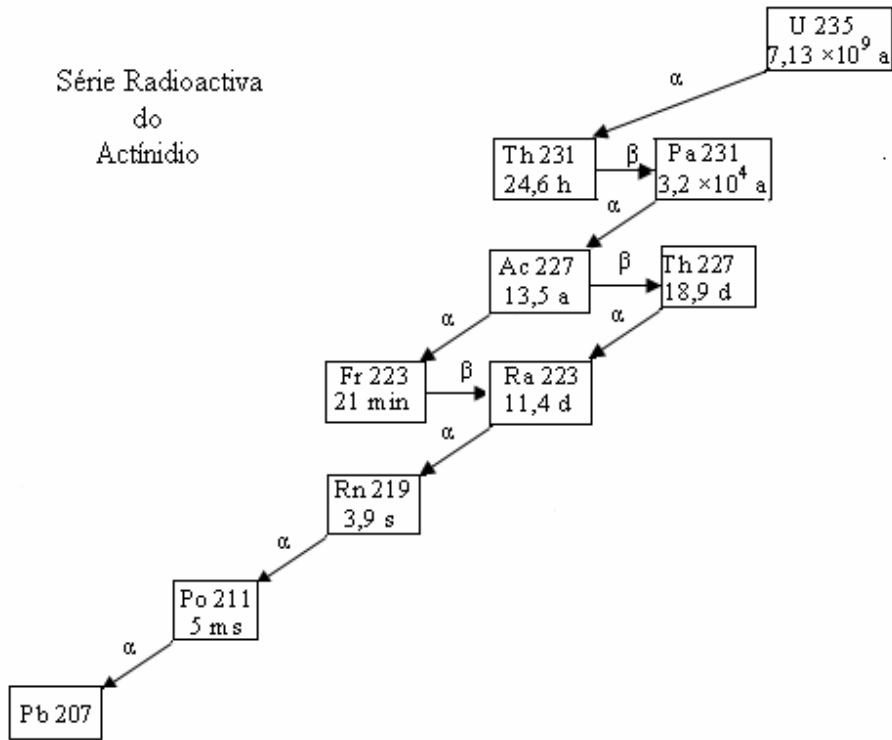


Figura 2.3: Série radioactiva do Actínio.

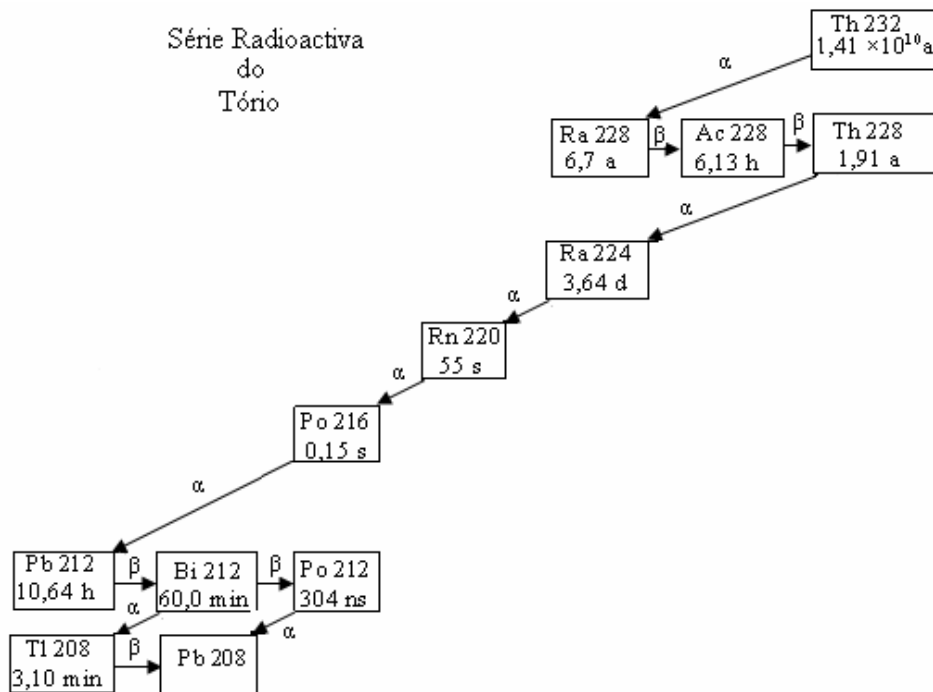


Figura 2.4: Série radioactiva do Tório.

Os nuclídeos radioactivos de longa-vida estão presentes nos materiais que nos rodeiam, especialmente nas rochas e minerais que se formaram com a terra há  $4,5 \times 10^9$  anos. (De facto, o seu decaimento proporciona uma técnica para determinar o tempo decorrido desde a formação das rochas e, conseqüentemente, a idade da Terra).

Em geral, os elementos radioactivos estão fortemente ligados aos minerais e não são perigosos para a nossa saúde mas envolvem a emissão de elementos gasosos radioactivos como, por exemplo, o radão. Este elemento, é formado no interior das rochas, normalmente tem poucas hipóteses de migrar para a superfície e para o ar antes de decair. Todavia, quando as rochas estão fracturadas o radão pode escapar (de facto, a presença de radão tem recentemente sido observado como um precursor dos sismos). Também existe a possibilidade do radão se escapar da superfície dos minerais, e particularmente, dos que são usados na construção de casas [10]. Os radionuclídeos de origem natural presentes no planeta desde a sua formação como, por exemplo,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{226}\text{Ra}$  são designados por radionuclídeos primordiais [12].

Existem também fontes naturais de radioactividade de meias vidas relativamente curtas (dias ou anos) que estão continuamente a ser formados, como por exemplo, o  $^3\text{H}$  e do  $^{14}\text{C}$ . Estes radionuclídeos designados por cosmogénicos [12] são formados na atmosférica superior quando os raios cósmicos (protões de alta energia) atingem átomos da atmosfera e causam reacções nucleares [10].

### 2.2.1.2. Radiação cósmica

A radiação cósmica é constituída por um fluxo primário de partículas de alta energia que incide continuamente sobre a Terra provenientes do espaço interestelar e também por radiações secundárias originadas a partir das interacções das partículas primárias com a atmosfera [13].

A radiação cósmica primária é constituída por partículas com energias extremamente altas (cerca de  $10^{20}$  eV), são elas os protões (87%), partículas alfa (11%), cerca de 1% de núcleos com número atómico entre 4 e 26 e cerca de 1% de electrões com energia muito elevada. Uma larga percentagem da radiação vem do exterior do nosso sistema solar. Alguma da radiação cósmica primária provém do sol, produzida durante erupções solares. A radiação cósmica primária predomina na estratosfera a uma altitude acima dos 25 km [14]. Pouca radiação cósmica primária atinge a superfície da

terra uma vez que a maioria dela interage com a atmosfera. Quando interage produz a radiação cósmica secundária ou o que nós actualmente vemos na Terra.

Estas reacções produzem outras radiações de menor energia na forma de raios gama (fotões), electrões, neutrões e muões os quais atingem a superfície terrestre.

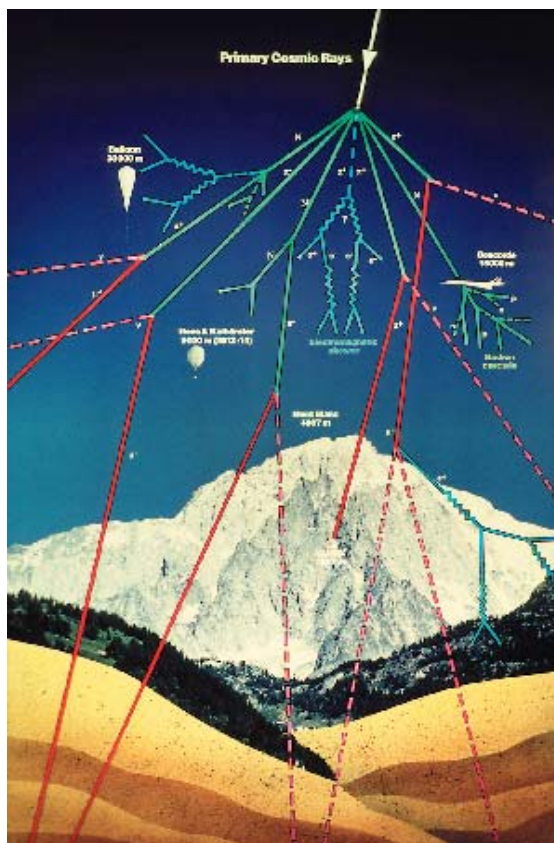


Figura 2.5: Raios cósmicos (cortesia do CERN).

A radiação cósmica através da interacção com a nossa atmosfera produz radionuclídeos cosmogénicos. Em termos de contribuição à exposição do ser humano, os mais importantes são o  $^3\text{H}$ , o  $^{14}\text{C}$  e o  $^7\text{Be}$  [12, 15].

A atmosfera e o campo magnético da terra também funcionam como escudo contra as radiações cósmicas, reduzindo a quantidade de radiações que atinge a superfície terrestre.

A dose anual de radiação cósmica a que estamos sujeitos depende da altitude e da latitude a que nos encontramos.

Os raios cósmicos ao atravessar a atmosfera chocam com ela e perdem energia. Assim, quanto maior for a altitude maior é a quantidade de radiação a que estamos sujeitos uma vez que a camada de ar que actua como protecção é menos

espessa. Por exemplo, viajar de avião contribui para o aumento da dose de radiação que uma pessoa recebe.

A radiação cósmica decresce à medida que nos deslocamos do pólo para o equador devido ao efeito do campo geomagnético da Terra e do Sol sobre os raios cósmicos primários [16]. Na Figura 2.6 pode observar-se a distribuição da dose anual de radiação cósmica em função da altitude.

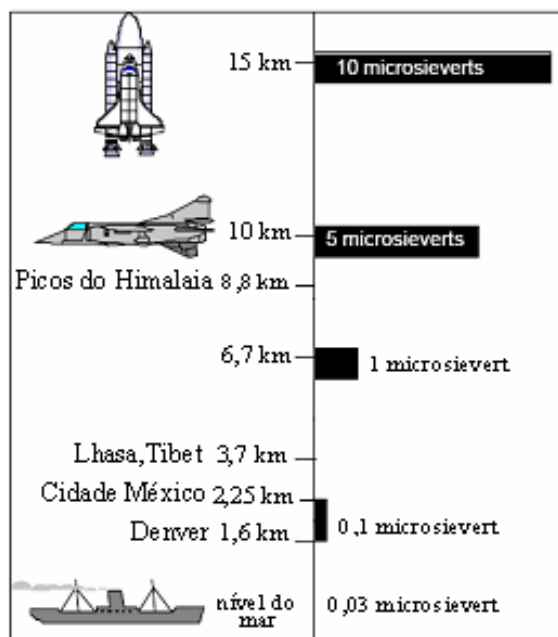


Figura 2.6: Distribuição da dose anual de radiação cósmica em função da altitude (figura retirada de [17]).

### 2.2.1.3. Alimentação

Tudo o que comemos e bebemos é ligeiramente radioactivo uma vez que os núclídeos naturais radioactivos que se encontram na crosta terrestre são absorvidos por plantas e animais e dissolvidos na água entrando, conseqüentemente, na cadeia alimentar dos seres humanos.

Por exemplo, o  $^{14}\text{C}$  nas altas camadas da atmosfera distribui-se pela atmosfera, oceanos e biosfera tal como se exemplifica na figura 2.7 [18]. A distribuição do  $^{14}\text{C}$  pelo oceano é consequência da reacção reversível de  $\text{CO}_2$  atmosférico com a água,  $\text{H}_2\text{O}$ , a qual dá origem aos iões bicarbonatado e carbonatado. A distribuição de  $^{14}\text{C}$  pela biosfera deve-se às reacções do  $\text{CO}_2$  com as plantas, de acordo com o processo de

fotossíntese, às reacções que promovem o metabolismo do carbono nos animais e também às reacções ligadas à respiração de animais e plantas que levam à produção de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ .

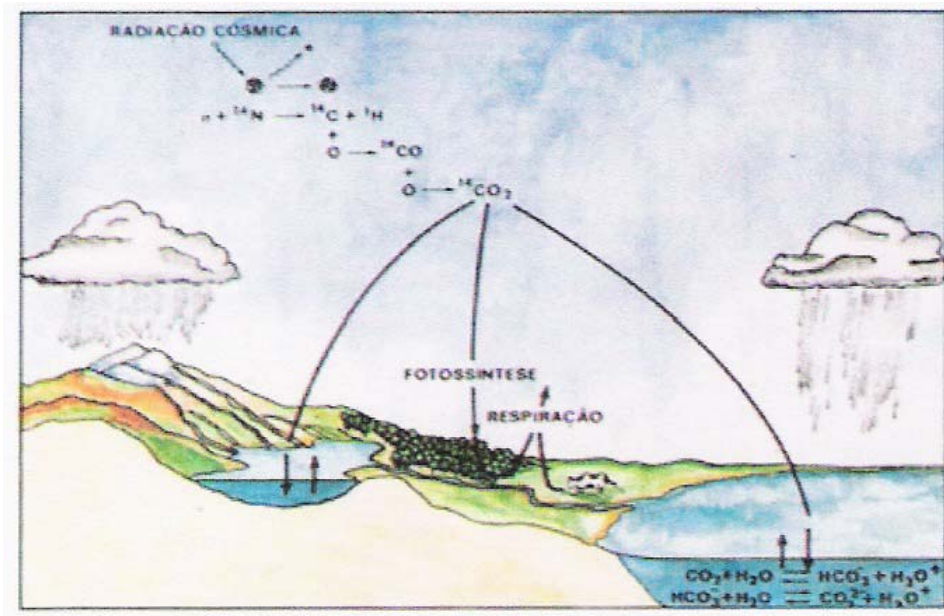


Figura 2.7: O  $^{14}\text{C}$  produzido nas altas camadas da atmosfera distribui-se pela atmosfera, oceanos e biosfera sendo continuamente permutado com esses sistemas (figura retirada de [18]).

Assim, qualquer alimento contém uma pequena quantidade de radioactividade. Os radionuclídeos mais comuns nos alimentos são o  $^{40}\text{K}$ , o  $^{226}\text{Ra}$  e o  $^{238}\text{U}$  e os seus descendentes. Na tabela 2.2 são referidos os níveis de radioactividade do  $^{40}\text{K}$  e do  $^{226}\text{Ra}$  em alguns alimentos e bebidas.

Tabela 2.2: Radioactividade natural nos alimentos e bebidas (retirado de [19]).

Alimento/Bebida	$^{40}\text{K}$ (pCi/kg)	$^{226}\text{Ra}$ (pCi/kg)
Banana	3520	1
Noz do Brasil	5600	1000 – 7000
Cenoura	3400	0,6 – 2
Batata branca	3400	1 - 2,5
Carne vermelha	3000	0,5
Cerveja	390	---
Água de beber	---	0 – 0,17

Como consequência o corpo humano contém pequenas quantidades de radionuclídeos alguns dos quais são adquiridos diariamente por ingestão de alimentos e bebidas.



### 2.2.2. Radiação artificial

A radiação artificial tem origem nas explosões de armas nucleares, centrais nucleares, acidentes em reactores nucleares, tratamento de resíduos, queima de fósseis, uso de radioisótopos na medicina, na indústria e na pesquisa, uso de raios X, aceleradores no radiodiagnóstico e na radioterapia, etc.

Radionuclídeos artificiais têm sido criados desde a descoberta da fissão atômica nuclear e o subsequente desenvolvimento da energia nuclear e das tecnologias das armas nucleares.

Desde os anos 40 até ao princípio dos anos 70, os testes com armas nucleares foram efectuados principalmente na atmosfera. Os subsequentes produtos da fissão e detritos das armas destes testes são a principal fonte de radionuclídeos artificiais no ambiente [20], sendo os mais importantes os de longa-vida, tais como o  $^{137}\text{Cs}$  e o  $^{90}\text{Sr}$ .

Os radionuclídeos originados pela acção humana são designados radionuclídeos antropogénicos [12].

Desde os anos 80 acidentes nucleares e radiológicos têm sido a principal fonte de radionuclídeos artificiais libertados no ambiente [21].

Com o acidente de Chernobyl o medo das populações concentrou-se nas fontes de radiação artificiais, especialmente nas instalações nucleares. A tabela 2.3 faz referência a alguns radionuclídeos produzidos pela acção humana.

**Tabela 2.3: Radionuclídeos artificiais e a sua origem (retirado de [14]).**

Nuclídeo	Símbolo	Tempo de meia-vida	Fonte
Trítio	$^3\text{H}$	12,3 anos	Produzido a partir dos testes nucleares, nos reactores de fissão nuclear; produção de armamento nuclear.
Iodo-131	$^{131}\text{I}$	8,04 dias	Produto de fissão produzido a partir dos testes armas nucleares e reactores de fissão, usado no tratamento médico de problemas da tiróide.
Iodo-129	$^{129}\text{I}$	$1,57 \times 10^7$ anos	Produto de fissão produzido a partir dos testes de armas nucleares e reactores de fissão.
Césio-137	$^{137}\text{Cs}$	30,17 anos	
Estrôncio-90	$^{90}\text{Sr}$	28,78 anos	
Tecnécio-99	$^{99}\text{Tc}$	$2,11 \times 10^5$ anos	Produto de decaimento do $^{99}\text{Mo}$ , usado no diagnóstico médico.
Plutónio-239	$^{239}\text{Pu}$	$2,41 \times 10^4$ anos	Produzido a partir do bombardeamento do $^{238}\text{U}$ com neutrões.

### 2.3. Exposição média da população

Tem sido dado particular realce à contaminação radioactiva causada pelo funcionamento de centrais nucleares e pela realização de testes militares. Contudo, a exposição média do Homem a estas fontes de radiação é diminuta. Mais importantes revelam-se os exames médicos, designadamente os de diagnóstico que recorrem a raios X, os quais são responsáveis por cerca de 18% da dose média anual. Os restantes cerca de 82% da dose média anual é atribuída a factores naturais, como sejam a radiação cósmica proveniente do espaço extraterrestre, a radiação gama emitida por rochas e materiais de construção e, mais importante, ao gás radioactivo radão, o qual é responsável por mais de 50% desse valor [22]. A figura 2.8 apresenta a dose média de radiação externa em Portugal [23].

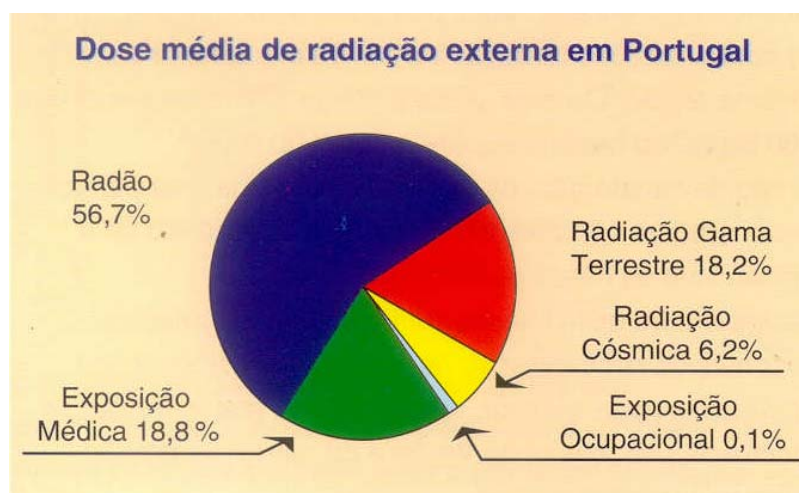


Figura 2.8: Distribuição percentual das fontes de radiação (figura retirada de [23]).

Face a estes números é importante que seja dada particular atenção ao radão no âmbito da radioactividade natural, até porque, função das características geológicas locais, a sua concentração nas habitações pode variar significativamente.

## 2.4. Radiações ionizantes

Do ponto de vista dos sentidos humanos, as radiações ionizantes são inodoras, inaudíveis, insípidas e indolores [6].

Ao atravessar a matéria, as radiações ionizantes transmitem a sua energia cinética aos electrões podendo provocar a ionização ou excitação dos átomos.

No processo de ionização um ou mais electrões são arrancados do átomo transformando-o num ião positivo.

A ionização pode ser directa ou indirecta. No primeiro caso uma partícula carregada ao deslocar-se na matéria vai perdendo energia ao provocar ionização local, quebras de ligações químicas ou excitação dos átomos vizinhos.

No caso da ionização indirecta a primeira interacção da partícula (fotão, neutrão etc.) não é o arranque de um electrão ou excitação do átomo, mas sim, a transferência de toda ou parte da sua energia para partículas carregadas (electrões ou prótons) que por sua vez vão provocar ionização directa [24].

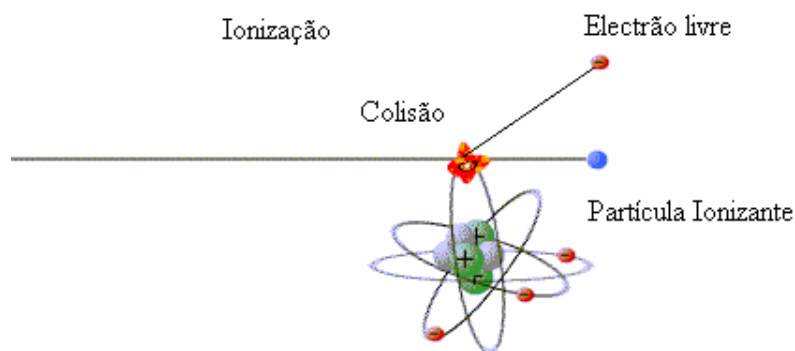


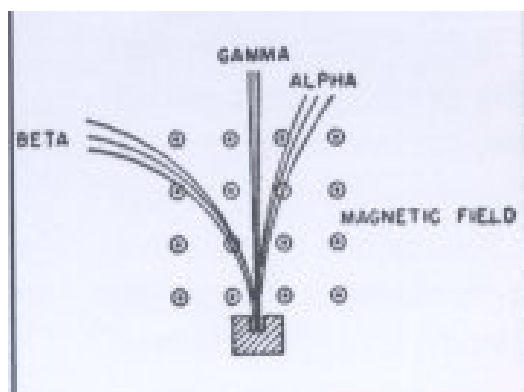
Figura 2.9: Processo de ionização de um átomo.

A tabela 2.4 mostra algumas propriedades e características de radiações ionizantes.

**Tabela 2.4: Propriedades e características das radiações ionizantes (retirado de [6, 7, 16, 25]).**

Radiação	Símbolo	Carga Eléctrica	Massa (u)	Energia (MeV)	Velocidade (m/s)	Poder penetrante	Poder Ionizante
Directamente ionizante							
Partículas $\alpha$	$\alpha$	+2	4,0	1 a 4	$7,0 \times 10^6$ a $1,4 \times 10^7$	Pequeno	Grande
Protão	P	+1	1,0	1	$1,4 \times 10^8$	Pequeno	Muito Grande
Electrão	$\beta^-, e^-$	-1	$5,5 \times 10^{-4}$	0,1 a 1	$1,6 \times 10^8$ a $2,8 \times 10^8$	Médio	Médio
Positrão	$\beta^+, e^+$	+1	$5,5 \times 10^{-4}$	0,1 a 1	$1,6 \times 10^8$ a $2,8 \times 10^8$	Médio	Médio
Indirectamente ionizante							
Raios X	X	0	0	Qualquer	$3,0 \times 10^8$	Muito grande	Muito Fraco
Raios $\gamma$	$\gamma$	0	0	Qualquer	$3,0 \times 10^8$	Muito grande	Muito Fraco
Neutrão	N	0	1,0	$2,5 \times 10^8$ a 0,1	$2,2 \times 10^3$ a $1,4 \times 10^7$	Muito grande	Variável

As radiações têm um comportamento diferente ao passar por um campo electromagnético. Quando uma partícula com carga eléctrica atravessa um campo electromagnético ela é desviada enquanto que partículas neutras ou radiação  $\gamma$  ou X não é desviada, tal como se pode ver na figura 2.10.



**Figura 2.10: Desvio de partículas  $\alpha$  e  $\beta$  provocado por um campo electromagnético; a radiação  $\gamma$  não sofre desvio (figura tirada da tese de doutoramento de Marie Slodowska-Curie, Paris, França, 1903).**

Cada radiação tem características próprias as quais têm como consequência comportamentos físicos diferentes.

Todas as radiações ionizantes, quer sejam partículas quer sejam fótons, perdem energia nas interações com a matéria. Quanto maior for a energia da radiação mais interações é capaz de produzir.

Para a mesma energia o poder de penetração depende do tipo de radiação, como se pode observar na figura 2.11.

O poder de penetração das radiações ionizantes varia da seguinte forma:

partículas  $\alpha$  < partículas  $\beta$  (electrões e positrões) < fótons ( $\gamma$  e X) < neutrões

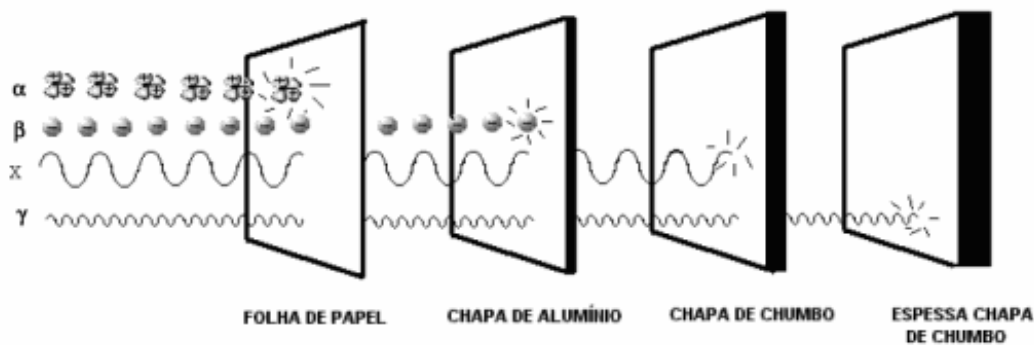


Figura 2.11: Poder penetrante das radiações alfa, beta, raios X e gama.

### Radiação $\alpha$

As partículas  $\alpha$  perdem energia fundamentalmente por excitação e por ionização de átomos e moléculas [16, 25].

As partículas alfa são as mais pesadas e, por isso, as mais lentas e pouco penetrantes. As partículas  $\alpha$  são pouco deflectidas, nas suas interações com os átomos e moléculas da matéria que atravessam, daí que as suas trajectórias num dado meio sejam, em geral, rectilíneas.

Um factor que contribui para o elevado poder de ionização é a velocidade relativamente pequena das partículas  $\alpha$ , o que determina um tempo de interacção razoavelmente grande. Como a cada ionização a partícula  $\alpha$  perde uma parte da sua energia, a sua velocidade diminui muito rapidamente o que explica o seu baixo poder de penetração.

O alcance das partículas alfa é muito pequeno o que faz com que sejam facilmente blindadas. Uma folha de papel é suficiente para as barrar. No ar o seu percurso não excede 5 cm. No corpo humano a penetração é tão pequena que não consegue atravessar a nossa pele. Têm poder ionizante forte pelo que podem provocar danos graves nas células vivas. A inalação ou ingestão de emissores de partículas alfa é muito perigosa uma vez que as partículas alfa irão directamente danificar os tecidos.

### **Radiação $\beta$**

Os electrões podem interagir com a matéria fundamentalmente por duas maneiras distintas, por ionização e por radiação de travagem (“bremsstrahlung”)[16,25].

Devido ao facto de apresentar maior velocidade e menor carga que as partículas  $\alpha$ , a ionização é menor que a produzida por estas e o poder de penetração é maior. Como são relativamente leves os electrões sofrem colisões com os núcleos com pouca perda de energia pelo que as trajectórias ao longo da matéria são irregulares.

Para fontes de fraca intensidade uma folha de alumínio com alguns milímetros de espessura é suficiente para absorver os electrões impedindo a sua passagem.

### **Radiação $\gamma$ e X**

Devido à ausência de carga e massa as radiações electromagnéticas ionizantes (radiação X e gama) podem penetrar num material e percorrer grandes distâncias antes de sofrer a primeira interacção.

A interacção da radiação electromagnética ionizante com a matéria produz-se basicamente por três processos: efeito fotoeléctrico, efeito de Compton e produção de Pares [7,16].

Os raios  $\gamma$  e X são radiações electromagnéticas com propriedades idênticas distinguindo-se apenas pela sua origem. Estas radiações são muito mais penetrantes que as partículas  $\alpha$  e  $\beta$ , não tendo um alcance definido. Os raios X produzidos por fontes naturais são, em geral, menos penetrantes que os raios  $\gamma$ . O corpo humano é facilmente atravessado por estes raios. A blindagem para estas radiações faz-se com materiais densos como chumbo ou tipos especiais de cimento. Têm poder ionizante fraco.

## 2.5. Radioactividade

Em 1896, Becquerel levava a cabo estudos sobre a fluorescência de sais de urânio excitados pela luz. No decurso das suas experiências observou que as radiações fluorescentes eram capazes de reproduzir as silhuetas de certos objectos opacos colocados sobre placas fotográficas mesmo quando estas estavam protegidas com papel negro. A interpretação de Becquerel era a de que o composto emitia algum tipo de radiação capaz de atravessar o papel e actuar sobre a chapa. Essa propriedade era semelhante à dos raios X descobertos um ano antes por Röntgen.

Este processo de emissão espontânea de radiação por parte do urânio passou a ser denominado por **radioactividade** e, mais tarde, foi identificada como resultante da desintegração dos núcleos de urânio.

Ainda no mesmo ano, Becquerel demonstrou que as radiações emitidas pelos sais de urânio podiam ser desviados por um campo magnético e que ionizava gases tornando-os condutores de corrente eléctrica. Esta última descoberta levou à utilização de câmaras de ionização e à medida quantitativa da radiação – a actividade [13].

Anos mais tarde, o Alemão Hans Geiger utilizava essa propriedade para criar o famoso contador Geiger.

No final de 1897, Pierre e Marie Curie investigaram a possível emissão radioactiva de outros elementos acabando por descobrir que o tório também emitia radiações.

Em 1898, teve lugar a descoberta de dois novos elementos radioactivos. O polónio e o rádio [26].

Ainda no ano de 1898, Ernest Rutherford investigou o poder penetrante das radiações emitidas por substâncias radioactivas comprovando a existência de dois tipos de radiação a que chamou alfa e beta.

Em 1900, Paul Villard identificou um terceiro tipo de radiação a qual foi designada por radiação gama.

Actualmente sabe-se que as radiações estudadas por Becquerel eram electrões rápidos emitidos pela desintegração beta dos descendentes do  $^{238}\text{U}$  [13].

A radioactividade é a propriedade que certos núcleos têm de emitirem radiações espontaneamente. Os nuclídeos que apresentam essas propriedades são designados de nuclídeos radioactivos [27].

## 2.6. O Núcleo Atómico

### 2.6.1. Breve referência sobre algumas propriedades dos átomos

Os núcleos dos átomos são constituídos por protões e neutrões os quais são designados de nucleões. Ao número de protões chama-se número atómico,  $Z$ , e à soma do número de protões com o número de neutrões chama-se número de massa,  $A$ .

Cada tipo de átomos, caracterizado por um número atómico e um número de massa é designado por **nuclídeo**. Os nuclídeos são representados por um símbolo químico  $X$ , pelo número atómico e pelo número de massa da seguinte forma:  ${}^A_Z X$ .

Nuclídeos com o mesmo número atómico,  $Z$  chamam-se isótopos. Nuclídeos com o mesmo número de neutrões,  $N$ , chamam-se **isótonos** enquanto que nuclídeos com o mesmo número de massa são conhecidos como **isóbaros** [11].

### 2.6.2. Energia de Ligação

A massa de um átomo,  $M_A$ , pode ser calculada de acordo com a equação 2.1.

$$M_A c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 + Zm_e c^2 - B - \sum_{e=1}^Z B_e \quad (2.1)$$

Onde  $m_p$  é a massa do protão,  $m_n$  a massa do neutrão,  $m_e$  a massa do electrão,  $B$  a energia de ligação nuclear e  $\sum_{e=1}^Z B_e$  a energia de ligação dos electrões. Como as energias de ligação dos electrões são da ordem dos keV (10 - 100 keV), muito menores que as energias de ligação nucleares, que são da ordem dos MeV, em primeira aproximação elas podem ser desprezadas para efeito de cálculos [10].

A energia de ligação de um núcleo é a diferença em massa-energia entre o núcleo,  $M_N$ , e os seus constituintes,  $Z$  protões e  $N$  neutrões:

$$B = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - M_N c^2 \quad (2.2)$$



Como a massa de um átomo é praticamente igual à soma das massas do núcleo e dos electrões, a energia de ligação nuclear é dada aproximadamente por:

$$B = Zm_Hc^2 + Nm_n c^2 - M_A c^2 \quad (2.3)$$

Onde  $m_H$  é a massa de um átomo de hidrogénio.

Como se pode observar a partir da equação 2.3 a massa total do núcleo é inferior à soma das massas dos nucleões. Essa diferença  $\Delta m$  é conhecida como defeito de massa.

Essa massa converte-se em energia de acordo com a equação de Einstein:

$$B = \Delta m c^2 \quad (2.4)$$

A energia de ligação do núcleo representa a energia libertada no momento da formação do núcleo ou, de uma forma equivalente, a energia que seria necessário fornecer ao núcleo para o decompor completamente nos seus constituintes [27].

A figura 2.12 mostra a energia de ligação por nucleão,  $B/A$ , em função do número de massa,  $A$ .

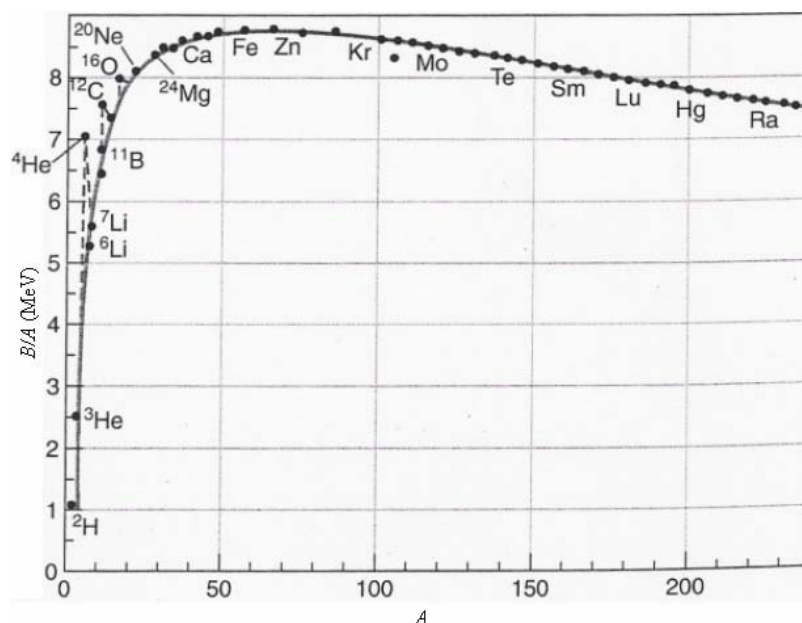


Figura 2.12: Energia de ligação por nucleão,  $B/A$ , em função do número de massa,  $A$  (figura retirada de[11]).

Algumas observações podem ser feitas relativamente à curva. A curva é relativamente constante excepto para núcleos leves. O valor médio da energia de ligação para a maior parte dos núcleos é aproximadamente 8 MeV por nucleão. O pico do valor máximo de energia de ligação média é atingido para  $A$  igual a 56, aonde os núcleos estão fortemente ligados. Isto sugere que podemos “ganhar” (ou seja, libertar) energia de duas formas – abaixo de  $A = 56$  juntando núcleos leves e transformando-os em núcleos pesados, ou acima de  $A = 56$  partindo núcleos grandes transformando-os em núcleos leves.

Nos dois casos há a libertação de energia. O primeiro caso é conhecido por fusão nuclear e o segundo por fissão nuclear.

Quanto maior a energia de ligação nuclear média, maior a estabilidade de um núcleo. Os valores maiores de energia de ligação nuclear média para valores de  $A$  entre 50 e 60 reflectem a maior abundância desses elementos no Universo [10, 28].

### 2.6.3. Estabilidade dos núcleos

Dos mais de 3000 nuclídeos conhecidos, existem apenas 266 cujos estados fundamentais são estáveis. Todos os outros possuem estados fundamentais instáveis, sofrendo, por isso, decaimento transformando-se noutros nuclídeos mais estáveis [11].

A estabilidade dos núcleos atómicos pode ser interpretada à luz das propriedades das forças nucleares [27].

A figura 2.13 apresenta um gráfico do número de neutrões,  $N$ , em função do número de prótons,  $Z$ , dos nuclídeos conhecidos.

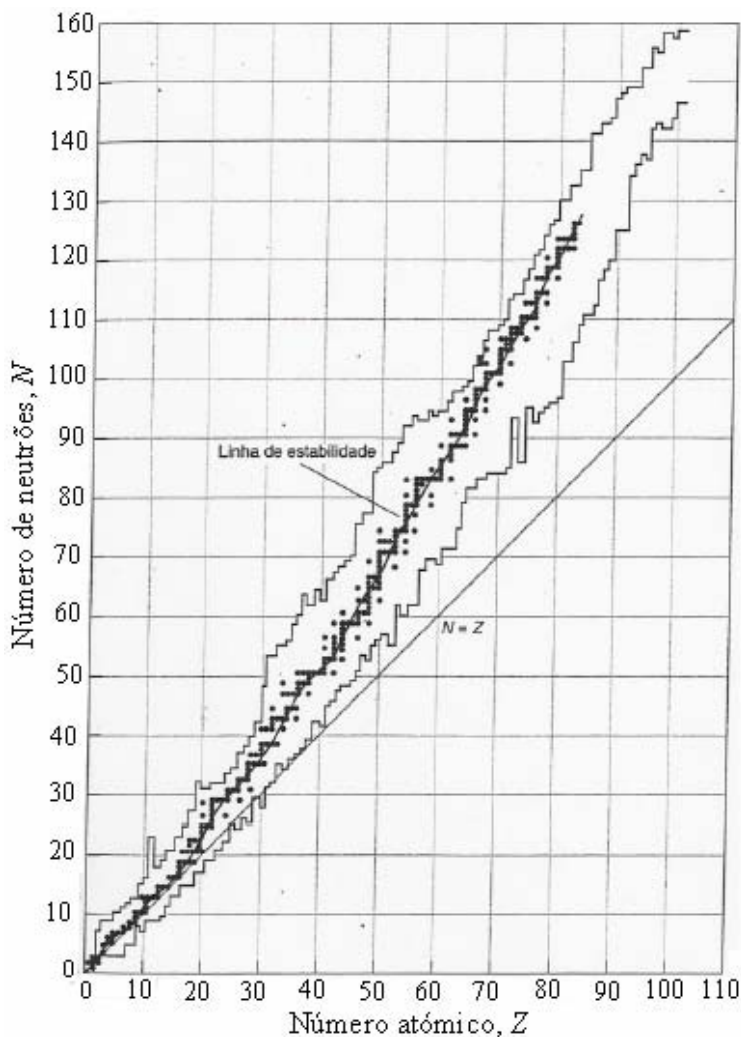


Figura 2.13: Gráfico do número de neutrões,  $N$ , em função do número de prótons,  $Z$  (figura retirada de [11]).

A linha recta corresponde a  $N = Z$ . Contudo para núcleos “pesados” a linha de estabilidade afasta-se desta recta.

Devido ao facto dos prótons possuírem carga eléctrica existe uma repulsão electrostática entre eles cuja dependência é basicamente proporcional a  $Z^2$ .

Havendo um número de neutrões superior ao de prótons, os neutrões compensam o aumento relativo da repulsão electrostática entre os prótons através da interacção neutrão-próton [27].

Daí que os núclídeos estáveis mais pesados tenham sempre um número de neutrões superior ao número de prótons [29].

Existe também uma tendência dos nucleões idênticos emparelharem em configurações estáveis.

Dos 266 núclídeos que são estáveis, 159 têm um número par de neutrões e protões, 50 têm um número ímpar de protões e um número par de neutrões e apenas 4 têm um número ímpar de neutrões e protões.

Admitindo que os nucleões se distribuem de uma maneira análoga à dos electrões no átomo consegue-se interpretar a grande estabilidade dos núcleos com  $N = 2, 8, 20, 50, 82$  ou  $126$ . Estes números são conhecidos como *números mágicos*. Os núclídeos de estabilidade nuclear elevada têm um número de isótopos maior que a média (média = 2,6 isótopos estáveis por elemento).

Os núclídeos que estão entre as duas linhas irregulares da figura 2.13, mas que não foram indicados por pontos, são radioactivos [11].

## 2.7. Decaimento radioactivo

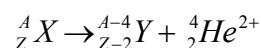
Existem diversos tipos de decaimento dos núcleos com emissão de partículas ou de radiação electromagnética, tais como, decaimentos  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  e  $\gamma$ , captura electrónica, fissão, emissão de neutrões, os quais têm como consequência uma maior estabilidade dos núcleos .

### 2.7.1. Decaimento alfa

Neste processo, o núcleo emite uma partícula alfa,  $\alpha$ , que Rutherford mostrou ser um núcleo de hélio ( ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ).

O novo núcleo tem menos dois neutrões e dois protões que o núcleo progenitor.

O processo de decaimento pode ser expresso através da equação:



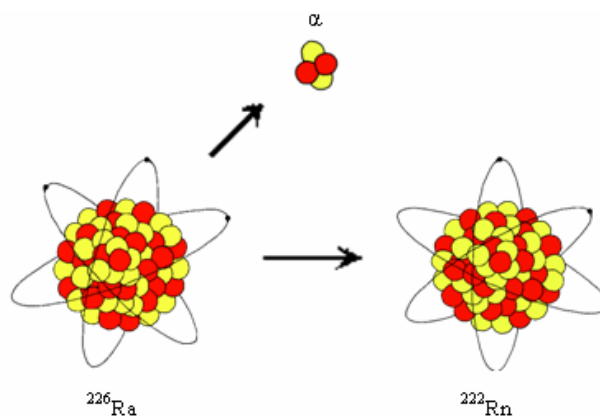
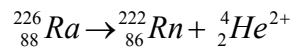
Este declínio ocorre nos elementos de número atómico elevado, onde a repulsão coulombiana entre os protões é muito grande.

A energia disponível no decaimento  $\alpha$  é dada por:

$$Q_{\alpha} = [M(A, Z) - M(A - 4, Z - 2) - M(^4\text{He})]c^2 \quad (2.5)$$

A energia das partículas  $\alpha$  situa-se entre os 4 e 9 MeV.

Um exemplo de um processo de decaimento  $\alpha$  é o do  $^{226}\text{Ra}$ :



**Figura 2.14: Decaimento  $\alpha$  do  $^{226}\text{Ra}$ .**

O tempo de meia-vida do  $^{226}\text{Ra}$  é de 1600 anos e a energia cinética da partícula é aproximadamente 4,8 MeV [10].

Um mesmo tipo de núcleo pode emitir partículas  $\alpha$  com diferentes energias uma vez que o núcleo descendente pode estar no estado fundamental ou no estado excitado. No caso em que o núcleo descendente está no estado excitado passará, posteriormente, ao estado fundamental por emissão de radiação gama,  $\gamma$ .

A figura 2.15 mostra o esquema de decaimento do  $^{226}\text{Ra}$ .

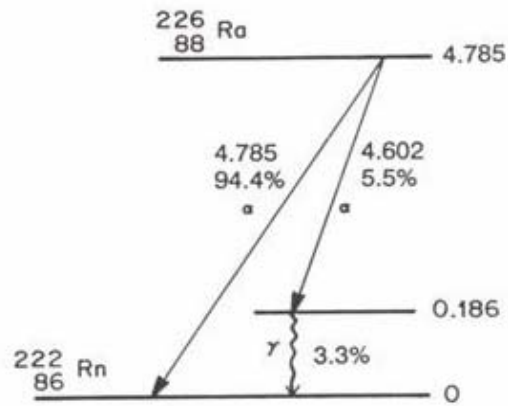


Figura 2.15: Esquema de decaimento do  $^{226}\text{Ra}$  (retirado de [5]).

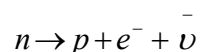
### 2.7.2. Decaimento Beta

Existem três processos de decaimento radioactivo beta nos quais o número de massa  $A$  permanece constante enquanto  $Z$  e  $N$  variam de uma unidade: a emissão  $\beta^-$ , a emissão  $\beta^+$  e a captura electrónica.

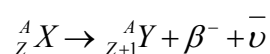
Os núcleos que contêm um grande número de neutrões quando comparado com o número de protões tendem a decair por emissão  $\beta^-$ , enquanto que os núcleos que contêm um excesso de protões quando comparado com o número de neutrões tendem a decair por emissão  $\beta^+$  ou captura electrónica [11].

#### 2.7.2.1. Decaimento $\beta^-$

Neste processo há a emissão de um electrão do interior do núcleo, com origem na transformação de um neutrão em protão e a emissão de um anti-neutrino [10].



O processo de decaimento pode ser expresso através da equação:



A energia disponível no decaimento  $\beta^-$  é dada por:

$$Q_{\beta^-} = [M(A, Z) - M(A, Z + 1)]c^2 \quad (2.6)$$

O decaimento apresenta um espectro contínuo de energia cinética do electrão que pode variar entre zero e a energia máxima disponível (a energia máxima varia entre alguns keV e 3 MeV aproximadamente).

O exemplo mais simples de emissão  $\beta^-$  é a do neutrão livre que decai num protão e num electrão. A sua vida média é de  $885,7 \pm 0,8$  s (<http://pdg.lbl.gov>).

O decaimento do  $^{60}\text{Co}$  também é exemplo de um decaimento  $\beta^-$ .

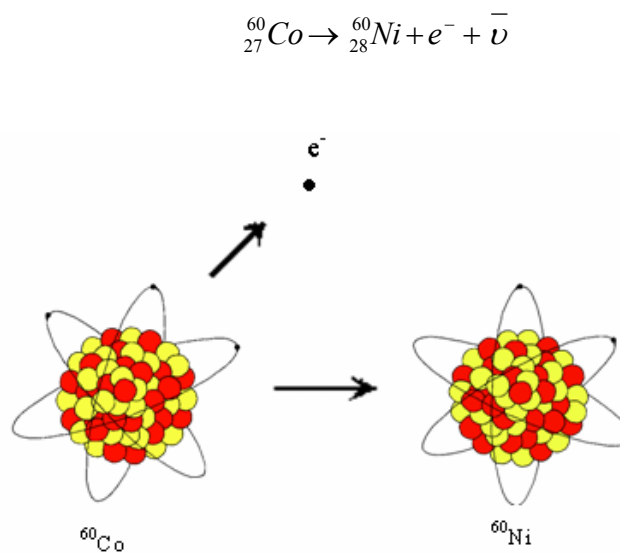


Figura 2.16: Decaimento  $\beta^-$  do  $^{60}\text{Co}$ .

### 2.7.2.2. Decaimento $\beta^+$

Consiste na emissão de um positrão do interior do núcleo, com origem na transformação de um protão em neutrão e a emissão de um neutrino [10].

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu$$

O processo de decaimento pode ser expresso através da equação:

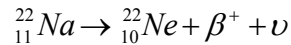
$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu$$

A energia disponível no decaimento  $\beta^+$  é dada por:

$$Q_{\beta^+} = [M(A, Z) - M(A, Z - 1) - 2m_e]c^2 \quad (2.7)$$

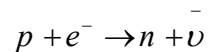
Tal como o electrão no decaimento  $\beta^-$ , o positrão tem um espectro contínuo de energia cinética.

Um exemplo de um processo de decaimento  $\beta^+$  é:



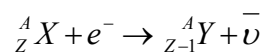
### 2.7.2.3. Captura electrónica

Na captura electrónica, um protão no interior do núcleo captura um electrão atómico e transforma-se num neutrão [10]:



Deste processo resulta um novo núcleo com um número atómico diminuído de uma unidade.

O processo de decaimento pode ser expresso através da equação:

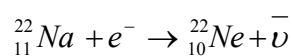


A probabilidade de captura electrónica é significativa apenas para os electrões 1s da camada K. Para os electrões 2s da camada L essa probabilidade é muito menor.

A energia disponível na captura electrónica é dada por:

$$Q_{CE} = [M(A, Z) - M(A, Z - 1)]c^2 \quad (2.8)$$

Um exemplo de um processo de captura electrónica é:





### 2.7.3. Fissão espontânea

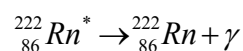
Normalmente pensamos na fissão como sendo um processo não natural que ocorre em condições artificiais como, por exemplo, num reactor nuclear. No entanto, existem fissões espontâneas de núcleos como uma forma de decaimento radioactivo. Este processo é similar à fissão induzida por neutrões que ocorre nos reactores com excepção que não é necessária a captura prévia do neutrão para iniciar a fissão. No processo um núcleo pesado com excesso de neutrões divide-se em dois núcleos mais leves. Os núcleos finais não estão rigidamente determinados como acontece nos decaimentos  $\alpha$  e  $\beta$  mas estão estatisticamente distribuídos num intervalo de pesos médios de núcleos.

A fissão espontânea é pouco frequente. Exemplos de fissão espontânea são:  $^{256}\text{Fm}$  ( $t_{1/2} = 2,6 \text{ h}$ ) e  $^{254}\text{Cf}$  ( $t_{1/2} = 60,5 \text{ dias}$ ) [10].

### 2.7.4. Decaimento gama

Após um declínio radioactivo o núcleo pode ficar num estado excitado. Um processo de desexcitação é a emissão de fotões gama. Estes fotões têm tipicamente energias muito elevadas (valores de energia entre 0,1 e 10 MeV). A emissão de radiação gama é semelhante à emissão atómica de radiação como as transições de raios X ou luz visível. Um estado excitado decai para um estado de menor energia ou, possivelmente, para o estado zero de energia acompanhado da emissão de um fotão de radiação gama de energia igual à diferença de energias entre os dois estados. O decaimento gama é observado em todos os núcleos que foram excitados. O tempo de meia-vida destas emissões é normalmente muito pequeno, em geral menor que  $10^{-9}$  s.

Um fotão tem massa nula e carga também nula, de modo que a emissão de um fotão  $\gamma$  por um núcleo não tem efeito sobre o número atómico nem sobre o número de massa [10]. Um exemplo do decaimento  $\gamma$  é dado pela equação:



$\text{Rn}^*$  representa um núcleo de radão no estado excitado.

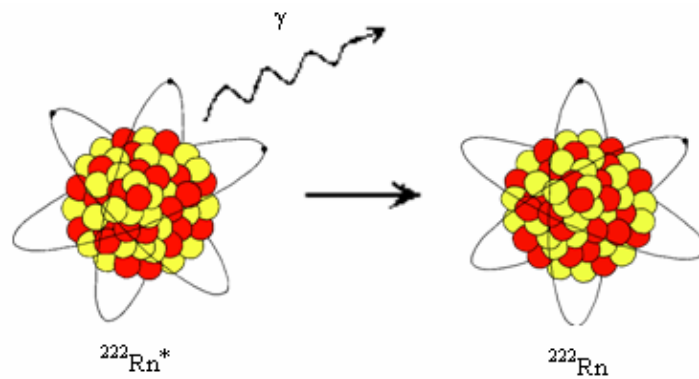


Figura 2.17: Decaimento  $\gamma$ .

## 2.8. Lei do decaimento radioactivo

Em 1900, Rutherford descobriu que a taxa de emissão de radiação não era constante, mas diminuía exponencialmente com o tempo. Trata-se de um processo estatístico uma vez que não se mede o tempo que um núcleo demora a decair mas sim a probabilidade de um núcleo decair por unidade de tempo.

No caso de um decaimento estatístico, o número de núcleos  $dN$  que decaem é proporcional ao intervalo de tempo  $dt$  e ao número de núcleos presente, logo:

$$\frac{dN}{Ndt} = -\lambda \quad (2.9)$$

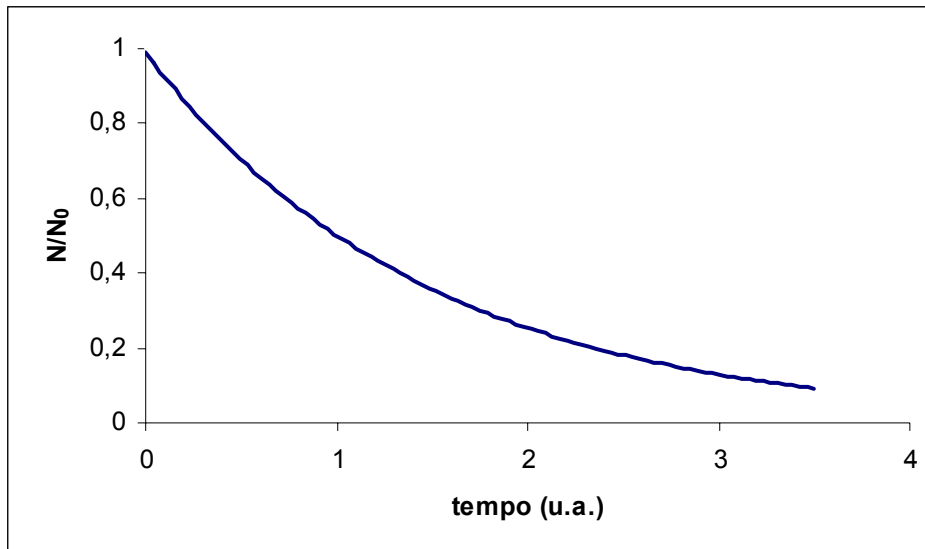
em que  $N$  é o número de radionuclídeos no instante  $t$  e  $\lambda$  a constante de decaimento.  $\lambda$  é uma propriedade nuclear característica de cada nuclide e representa a probabilidade de um núcleo decair por unidade de tempo. O sinal negativo provém do facto do número de núcleos diminuir ao longo do tempo [10, 11].

A integração da equação anterior conduz à **Lei do decaimento radioactivo**:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2.10)$$

onde  $N_0$  é o número de núcleos no instante  $t = 0$ .

A lei do decaimento radioactivo pode ser representada graficamente como se pode observar na figura 2.18.



**Figura 2.18: Lei do decaimento radioativo.**

O tempo de meia-vida,  $t_{1/2}$ , é definido como o tempo necessário para que o número de núcleos radioativos se reduza a metade do seu valor inicial [11].

Substituindo  $N = \frac{N_0}{2}$  na equação 2.10 obtém-se:

$$0,5 = e^{-\lambda t} \Leftrightarrow t = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Logo, o tempo de meia-vida é dado pela expressão:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \tag{2.11}$$

O tempo médio de vida ou vida média,  $\tau$ , do núcleo define-se como o tempo médio que o núcleo é capaz de sobreviver antes de decair [10].

O número de núcleos que sobrevive no tempo  $t$  é  $N(t)$  e o número de núcleos que decaem entre  $t$  e  $t + dt$  é  $|dN/dt| dt$ . A vida média é então dado por:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t |dN/dt| dt}{\int_0^{\infty} |dN/dt| dt} \Leftrightarrow \tau = \frac{1}{\lambda} \tag{2.12}$$

Como se pode observar, a vida média é simplesmente o inverso da constante de decaimento. O tempo de vida média relaciona-se com o tempo de meia-vida através da expressão:

$$t_{1/2} = (\ln 2) \tau \Leftrightarrow t_{1/2} = 0,693 \tau \quad (2.13)$$

A actividade de uma amostra radioactiva é definida como o número de decaimentos por unidade de tempo [10], de acordo com a expressão:

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.14)$$

A **unidade SI** que mede a actividade de uma amostra radioactiva é o **becquerel (Bq)**, que é igual a um decaimento por segundo ( $1 \text{ Bq} = 1 \text{ decaimento/s}$ ).

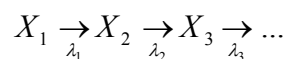
A unidade antiga, *curie*, é ainda utilizada com frequência. A relação entre ambas é [11]:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 3,7 \times 10^{10} \text{ decaimentos/s}$$

1 Ci corresponde à actividade de 1 g de  $^{226}\text{Ra}$ .

### 2.8.1. Cadeias de desintegração

Uma situação comum ocorre quando o decaimento radioactivo resulta na produção de um núcleo que também é radioactivo. É então possível ter cadeias de decaimentos radioactivos [10]:



As actividades dos diversos nuclídeos da cadeia radioactiva obedecem a um sistema de equações designadas por *equações de Bateman* [10]. A obtenção das soluções deste sistema de equações é grandemente facilitada quando é possível assumir as seguintes hipóteses:

- i) No instante  $t = 0$  existe  $N_0$  átomos do progenitor (pai):

$$N_1(t=0) = N_0$$

ii) Não há átomos de descendentes (filhos) presentes:

$$N_2(t=0) = N_3(t=0) = \dots = 0$$

O número de núcleos pai decresce no tempo como resultado do seu decaimento enquanto que o número de núcleos filho aumenta como resultado do decaimento dos núcleos pai e diminui devido ao seu próprio decaimento.

Existem dois casos especiais de interesse de estudo, nomeadamente o equilíbrio secular e o equilíbrio transitório.

### Equilíbrio Secular

Ocorre quando a meia-vida do pai é muito maior que a do filho ( $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ).

Para tempos muito menores que a meia-vida do pai, o número de núcleos pai que decai é praticamente constante, face ao número de decaimento do núcleo descendente.

Para tempos no intervalo  $\tau_2 \ll t \ll \tau_1$ , o número de núcleos filho decai à mesma razão que é formado:  $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$ . Esta situação é conhecida como *equilíbrio secular*.

A figura 2.19 mostra graficamente um caso de equilíbrio secular.

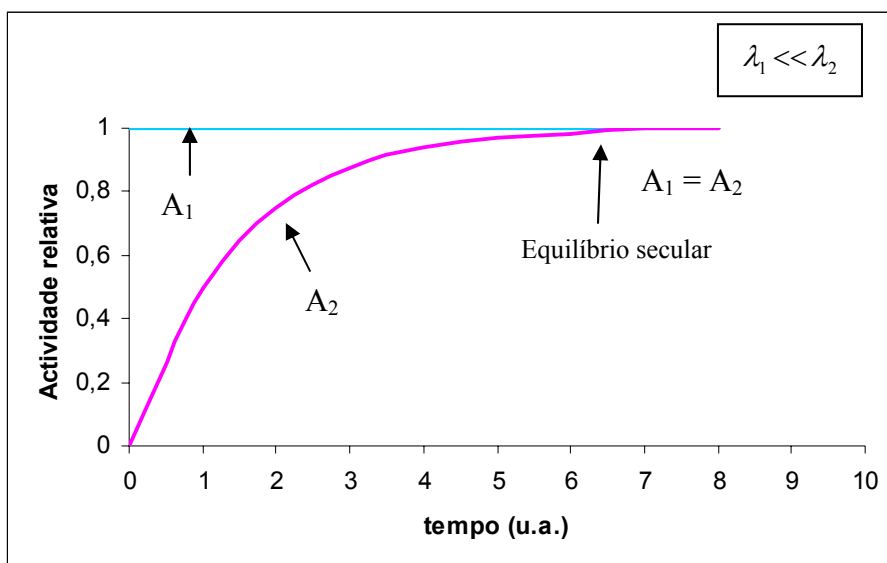


Figura 2.19: Equilíbrio secular.

### Equilíbrio transitório

Ocorre quando a meia-vida do pai é maior (mas não necessariamente muito maior) que a do filho ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ).

Após decorrido um tempo suficientemente longo, a taxa de decaimento do nuclídeo filho torna-se igual à do nuclídeo pai. Esta situação é conhecida como *equilíbrio transitório*.

A figura 2.20 mostra graficamente um exemplo de equilíbrio transitório.

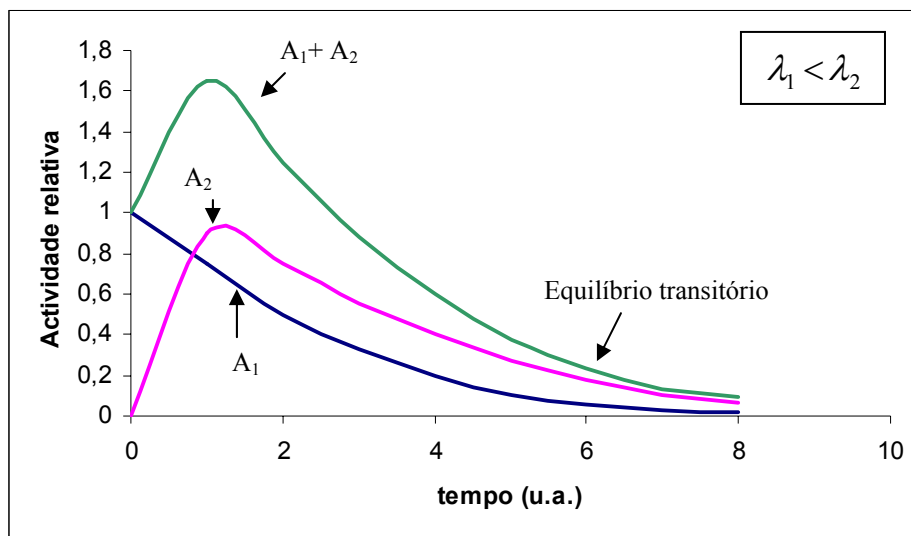


Figura 2.20: Equilíbrio transitório.

No caso em que  $\lambda_1 > \lambda_2$ , o nuclídeo pai decai rapidamente e o nuclídeo filho atinge um máximo decaindo de seguida com a sua constante de decaimento característica.

Quando isto acontece o número de núcleos pai é quase insignificante. Quando o tempo é grande o nuclídeo filho decai aproximadamente de acordo com a lei exponencial. Neste caso não existe equilíbrio tal como se pode observar na figura 2.21.

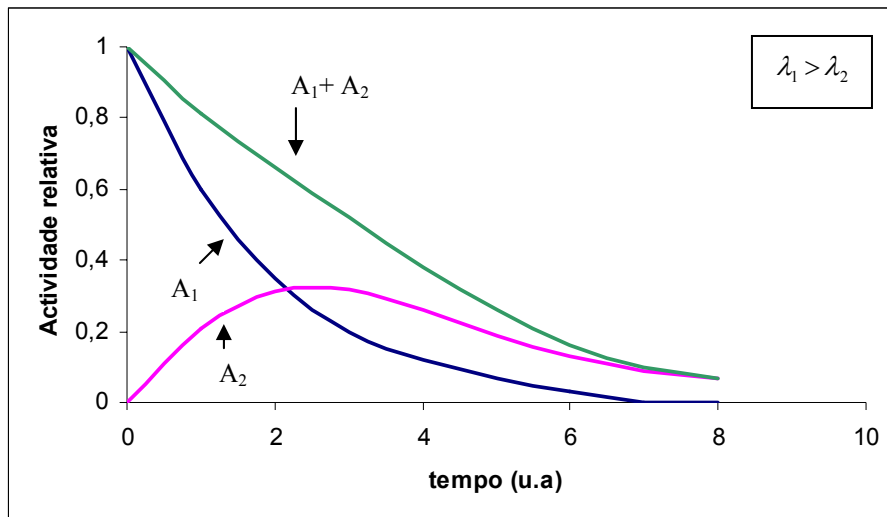


Figura 2.21: Exemplo de um decaimento quando a vida média do filho é maior que a do pai.

## 2.9. Reacções nucleares

Reacções nucleares são aquelas em que ocorrem alterações nos núcleos atómicos. Estas reacções envolvem grandes quantidades de energia.

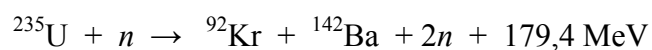
Duas reacções nucleares particularmente importantes são a fissão nuclear e a fusão nuclear.

### 2.9.1. Fissão nuclear

A fissão (cisão) nuclear é a divisão do núcleo de um átomo em dois ou mais núcleos menores com libertação de elevada quantidade de energia e de zero ou mais neutrões.

A fissão do  $^{235}\text{U}$  é exemplo deste tipo de reacção. Nesta reacção o núcleo de urânio é excitado pela captura de um neutrão e fragmenta-se em dois núcleos.

Uma reacção típica da fissão do  $^{235}\text{U}$  é representada pela equação seguinte [11]:



O mesmo núcleo pode fissionar de formas diferentes produzindo fragmentos de tamanhos diferentes. O número médio de neutrões emitidos na reacção de fissão do  $^{235}\text{U}$  induzida por neutrões térmicos é de 2,4.

Na cisão os fragmentos são projectados com energia cinética elevada. Esta energia é, em grande parte, degradada sob a forma de calor por interacção dos produtos de fissão com os átomos dos meios materiais envolventes.

Neste tipo de reacção liberta-se cerca de 200 MeV por núcleo.

No processo de fissão nuclear, a massa dos núcleos descendentes é inferior à massa dos núcleos progenitores sendo a diferença convertida em energia de acordo com a equação de Einstein:  $E = \Delta m c^2$ . Por exemplo, a fissão de 1 kg de  $^{235}\text{U}$  liberta aproximadamente  $5 \times 10^{26}$  MeV [11, 30]. Os neutrões emitidos poderão dar origem a novas cisões ocorrendo uma reacção em cadeia (figura 2.22).

Este é o princípio usado no funcionamento dos reactores nucleares e na bomba atómica.

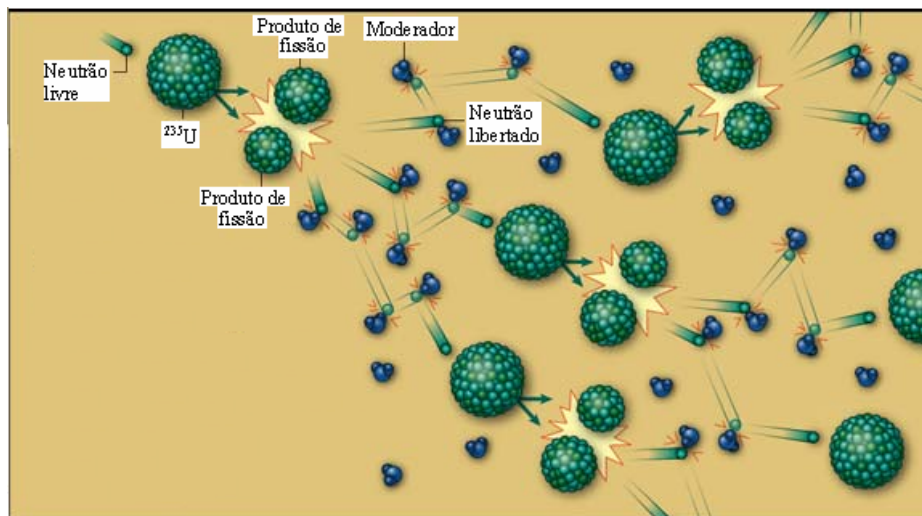


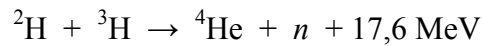
Figura 2.22: Reacção em cadeia.

Devido ao facto do urânio existente na natureza ser constituído por 99,3% de  $^{238}\text{U}$  e 0,7% de  $^{235}\text{U}$  e somente o  $^{235}\text{U}$  ser fissionável com neutrões térmicos é necessário proceder ao enriquecimento do urânio de forma a aumentar a percentagem de  $^{235}\text{U}$  em relação ao  $^{238}\text{U}$  [11].



### 2.9.2. Fusão nuclear

Na fusão dois núcleos leves juntam-se para formar um núcleo mais pesado. Um exemplo deste tipo de reacção ocorre entre o deutério ( ${}^2\text{H}$ ) e o trítio ( ${}^3\text{H}$ ) os quais se fundem para originar um núcleo pesado de  ${}^4\text{He}$ , de acordo com a equação [11]:



Este processo liberta 4,3 vezes mais energia por quilograma que uma reacção típica de fissão, no entanto, a tecnologia necessária para fazer da fusão uma fonte prática de energia ainda não está disponível.

Por causa da repulsão electrostática, os núcleos de  ${}^2\text{H}$  e de  ${}^3\text{H}$  só se aproximam o suficiente para que as forças nucleares predominem e promovam a fusão se tiverem uma energia cinética extremamente elevada, da ordem de 1 MeV.

Para obter energia a partir da fusão, é preciso aquecer os nuclídeos a uma temperatura muito elevada, da ordem dos milhões de graus, daí que estas reacções sejam difíceis de se realizar. Temperaturas desta ordem ocorrem no interior das estrelas, onde as reacções de fusão são comuns. Nestas temperaturas, a matéria existe na forma de um gás de electrões e iões positivos conhecido como plasma. Um dos maiores problemas dos reactores nucleares é manter o plasma confinado por um tempo suficiente para que as reacções ocorram [11].

No caso da bomba de hidrogénio existe uma bomba atómica no seu interior que quando explode produz uma temperatura suficiente para ocorrer a reacção de fusão nuclear, conseguindo uma explosão de 500 megatons ( $5 \times 10^8$  toneladas de TNT).

### 2.10. Efeitos Biológicos da Radiação

Designa-se por efeitos biológicos da radiação o conjunto dos danos nos tecidos ou órgãos provocados pela penetração e consequente absorção de energia ionizante [31].

Os efeitos biológicos da radiação são devidos principalmente à ionização [11].

O processo de ionização, ao alterar os átomos, pode alterar a estrutura das moléculas que os contêm. Se as moléculas alteradas compõem uma célula esta pode sofrer as consequências dessas alterações, directa ou indirectamente, com a produção de

radicais livres, iões e electrões. Os efeitos da radiação dependem da dose, taxa de dose, do fraccionamento, do tipo da radiação, do tipo de célula ou tecido. Tais alterações nem sempre são nocivas ao organismo humano. Se a substância alterada possui um papel crítico para o funcionamento, pode resultar na alteração ou na morte da célula. As alterações mais importantes estão relacionadas com a molécula do DNA.

Os efeitos das radiações sobre os seres vivos são, pois, muitos e complexos. Diferentes tecidos reagem de forma diferente às radiações. Alguns tecidos são mais sensíveis que outros. Os mais sensíveis são os tecidos da medula óssea, dos órgãos genitais, os do sistema gastro-intestinal e do baço. A pele e os pulmões mostram sensibilidade média enquanto que os músculos são os menos sensíveis [31].

### 2.10.1. Efeitos biológicos em função do LET

Os danos biológicos criados pela radiação ionizante são detectáveis pela alteração química das moléculas biológicas que são influenciadas pela ionização ou excitação causada pela radiação. A gravidade e a permanência destas alterações estão directamente relacionadas com a taxa de deposição de energia ao longo do percurso da partícula, conhecido como transferência de energia linear LET ou, simplesmente, L. As radiações com grandes valores de LET resultam em danos biológicos maiores que as com LET mais baixo, mesmo que a quantidade total de energia depositada por unidade de massa seja a mesma [10].

A radiação com um valor elevado de transferência de energia linear, LET, interacciona mais causando, por isso, danos maiores nos sistemas biológicos.

O LET é definido para radiações constituídas por partículas carregadas. A inclusão dos raios X e  $\gamma$  deve-se ao facto de que, após a primeira interacção com a matéria, aparecem electrões por efeito fotoeléctrico, por efeito de Compton ou por produção de pares (radiações indirectamente ionizantes).

As radiações consideradas de baixo LET são: raios X, raios  $\gamma$ , partículas  $\beta^+$  e partículas  $\beta^-$ . As radiações de alto LET são aquelas que possuem um alto poder de ionização e uma alta taxa de transferência de energia num meio. Para o mesmo valor da dose absorvida, são as que induzem maiores danos biológicos.

Partículas  $\alpha$ , iões pesados e protões são classificadas como radiações de alto LET [10]. Estas partículas interagem com os átomos situados ao seu redor devido à carga e massa (radiações directamente ionizantes).

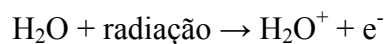
### 2.10.2. Fases da produção do efeito biológico pela radiação

A energia de uma radiação ionizante pode ser transferida directamente para o DNA provocando alterações no material genético devido, por exemplo, à quebra das ligações químicas. A radiação também pode ser transferida para as moléculas da água que constituem cerca de 80% do corpo humano produzindo radicais livres e moléculas como o peróxido de hidrogénio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), os quais são altamente reactivos sendo capazes de produzir danos biológicos ao estabelecerem ligações importantes para o metabolismo celular. São os efeitos indirectos.

A seguir apresentam-se as várias fases da produção do efeito biológico pela radiação [16].

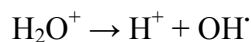
A primeira fase é a **fase física** que ocorre logo após a incidência da radiação e tem uma duração da ordem dos  $10^{-15}$  s. Nesta fase a energia é depositada na célula causando ionização.

Assim, quando uma pessoa é exposta à radiação ionizante aparecem muitos electrões e iões livres e também radicais livres produzidos a partir da quebra das ligações químicas. Como o corpo humano é constituído por cerca de 80% de água é muito provável que a radiação produza a ionização da água (radiólise) de acordo com a equação:

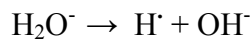
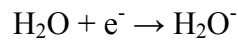


A **fase físico-química** tem uma duração de cerca de  $10^{-6}$  s, as ligações químicas das moléculas são rompidas com formação de radicais livres.

No caso da água, o ião  $\text{H}_2\text{O}^+$  dissocia-se:



e o electrão livre ataca uma molécula neutra de água dissociando-a:



Em cada caso, os produtos da reacção são iões ( $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ) e radicais livres ( $\text{H}^\cdot$ ,  $\text{OH}^\cdot$ ). Como os radicais livres são muito reactivos pode ocorrer a formação do peróxido de hidrogénio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), o qual é um agente oxidante forte.



A **fase química** dura poucos segundos. Nesta fase os radicais livres, iões e agentes oxidantes podem atacar moléculas importantes da célula, como por exemplo, as moléculas que formam os cromossomas.

A **fase biológica** varia de dezenas de minutos a dezenas de anos. As alterações químicas podem danificar a célula de várias maneiras, provocando a morte prematura, impedindo a divisão celular e, em alguns casos, mutação genética.

O surgimento destes efeitos não significa uma doença. Quando a quantidade de efeitos biológicos é pequena, o organismo pode recuperar, sem que a pessoa se aperceba.

Quando a quantidade ou a frequência de efeitos biológicos produzidos pela radiação começa a desequilibrar o organismo humano ou o funcionamento de um órgão, surgem sintomas clínicos da incapacidade do organismo de superar ou reparar tais danos: são as doenças.

A reacção de um indivíduo à exposição de radiação depende de diversos factores tais como:

- Tipo de radiação
- Quantidade total de radiação recebida
- Quantidade total de radiação recebida anteriormente pelo organismo, sem recuperação
- Textura orgânica individual
- Dano físico recebido simultaneamente com a dose de radiação (por exemplo, queimadura)
- Intervalo de tempo durante o qual a quantidade total de radiação foi recebida.

### 2.10.3. Classificação dos efeitos biológicos

Os efeitos biológicos podem receber denominações em função do valor da dose e forma de resposta, em função do tempo de manifestação e do nível orgânico atingido [31].

#### 2.10.3.1. Efeitos estocásticos e determinísticos

**Efeitos estocásticos (B)** são efeitos em que a probabilidade de ocorrência é proporcional à dose de radiação recebida, sem a existência de limiar. Isto significa, que doses pequenas, abaixo dos limites estabelecidas por normas e recomendações de radioproteção, podem induzir tais efeitos. Entre estes efeitos destaca-se o cancro.

**Efeitos determinísticos (A)** são os efeitos causados por irradiação total ou localizado de um tecido, causando um grau de severidade de morte celular não compensado pela reposição ou reparação, com prejuízos detectáveis no funcionamento do tecido ou órgão. Existe um limiar de dose, abaixo do qual a perda de células é insuficiente para prejudicar o tecido ou órgão de um modo detectável. Isto significa que os efeitos determinísticos são produzidos por doses elevadas, acima do limiar, onde a severidade ou a gravidade do dano aumenta com a dose aplicada. A radiodermite é um exemplo de efeitos determinísticos.

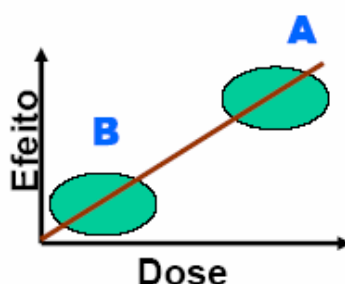


Figura 2.23: Relação entre a dose de radiação recebida e os efeitos produzidos A, determinístico e B, estocástico (figura retirada de [32]).

### 2.10.3.2. Efeitos somáticos e hereditários

Os **efeitos somáticos** surgem de danos nas células do corpo e apresentam-se apenas nas pessoas que sofreram a irradiação, não interferindo nas gerações posteriores. Dependem da dose absorvida, da taxa de absorção da energia da radiação, da região e da área do corpo irradiada.

Os **efeitos hereditários** ou genéticos surgem somente no descendente da pessoa irradiada, como resultado de danos por radiações em células dos órgãos reprodutores. Têm carácter cumulativo e é independente da taxa de absorção da dose.

### 2.10.3.3. Efeitos imediatos e tardios

Os efeitos que ocorrem num período de poucas horas a algumas semanas após a exposição são denominados de **efeitos imediatos** (exemplo: radiodermite). Os efeitos que aparecem depois de anos ou décadas são chamados **efeitos a longo prazo** ou tardios (exemplo: câncer).

Se as doses forem muito altas, predominam os efeitos imediatos e as lesões serão severas ou até letais. Para doses intermédias predominam os efeitos imediatos com grau de severidade menor e não necessariamente permanentes.

Poderá haver, entretanto, uma probabilidade grande de lesões severas a longo prazo. Para doses baixas, não haverá efeitos imediatos mas há possibilidades de lesões a longo prazo.

A figura seguinte ilustra de uma forma resumida as diferentes fases do efeito biológico produzido pela radiação ionizante.

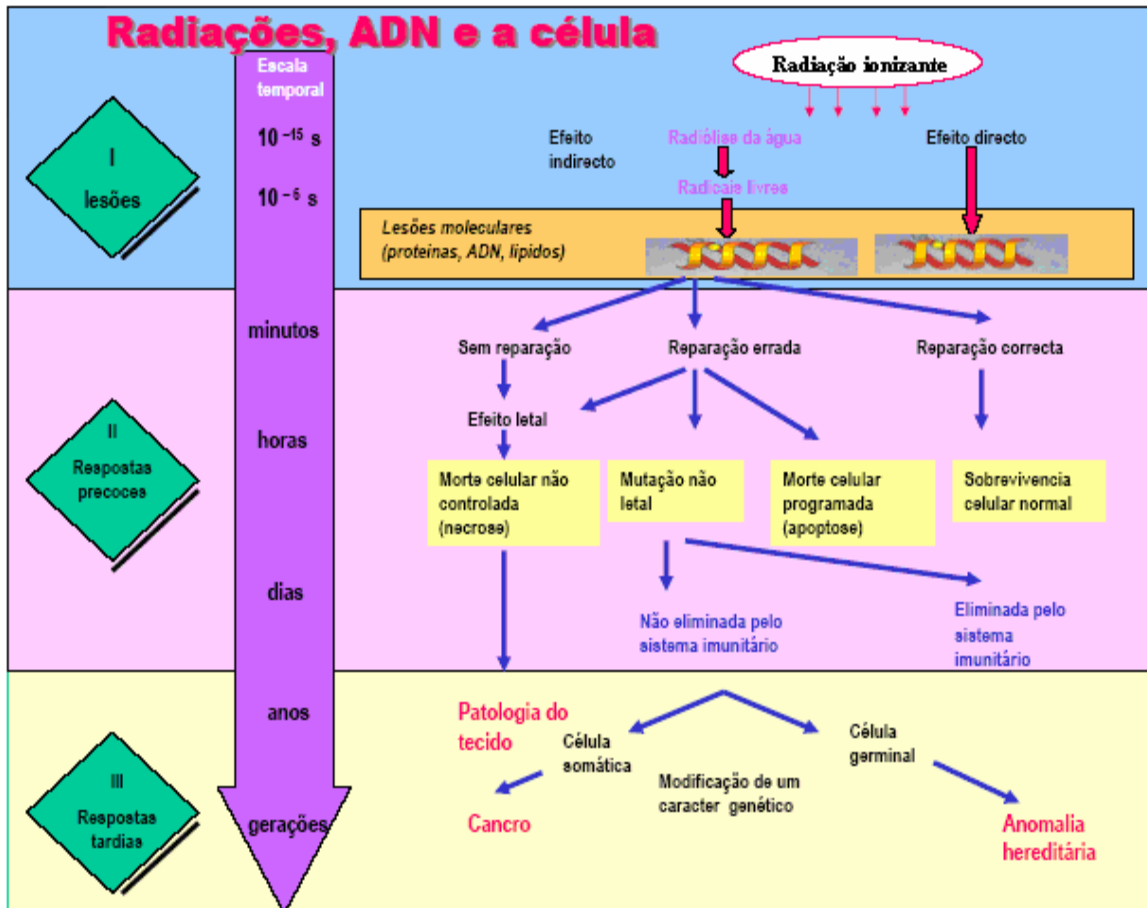


Figura 2.24: Interação da radiação ionizante com o organismo humano (figura retirada de [32]).

## 2.11. Grandezas e unidades dosimétricas

### 2.11.1. Dose absorvida ou dose, D

Para a protecção é importante a dose de radiação absorvida ou a quantidade de energia depositada na matéria por qualquer tipo de radiação ionizante em qualquer tipo de material.

Assim, define-se *dose absorvida* como a energia absorvida,  $dE$ , proveniente de qualquer tipo de radiação, por unidade de massa do material absorvente,  $dm$  [7]:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.15)$$

A unidade SI de dose é o *gray* (Gy) e corresponde à absorção de um joule por um quilograma de material.

### 2.11.2. Dose equivalente, $H$

Quando são avaliados os efeitos da radiação nos organismos vivos, a absorção de quantidades de radiação equivalentes de energia por unidade de massa em condições de irradiação diferentes não garantem o mesmo efeito biológico. De facto a extensão dos efeitos pode diferir por uma ordem de magnitude consoante a energia é depositada sob a forma de partículas carregadas pesadas ou electrões.

O conceito de dose equivalente foi então introduzido para quantificar de uma forma mais adequada os prováveis efeitos biológicos de uma dada exposição. A dose equivalente,  $H$ , é o produto entre a dose absorvida,  $D$ , e o factor qualidade,  $Q$ , que caracteriza a radiação [7]:

$$H = D \times Q \quad (2.16)$$

A unidade SI da dose equivalente é o sievert ( Sv).

O factor de qualidade,  $Q$ , é adimensional e depende do LET. O factor de qualidade,  $Q$ , aumenta com a transferência de energia linear, LET.

A tabela 2.5 mostra a dependência de  $Q$  com o LET.

**Tabela 2.5: Dependência de  $Q$  com o LET, em água (retirado de [33]).**

LET keV $\mu\text{m}^{-1}$ em H <sub>2</sub> O	Q
< 10	1
10 – 100	0,32 L – 2,2
> 100	300/ $\sqrt{L}$

### 2.12. Aplicações das radiações ionizantes

A radiação ionizante tornou-se há muitos anos parte integrante da vida do homem. A sua aplicação dá-se, por exemplo, na área da medicina, indústria, agricultura, arqueologia e produção de energia.



### 2.12.1. Medicina

O uso de materiais radioactivos no campo do diagnóstico e também no tratamento do cancro tem sido de extrema importância.

O **raio X** é uma técnica muito utilizada no diagnóstico de doenças. As imagens obtidas com raios X resultam da diferença na densidade dos materiais expostos à radiação e, portanto, na diferente absorção que a radiação vai sofrer ao atravessar o corpo.

Os raios X são a maior fonte artificial usados em exames médicos. A dose varia enormemente de acordo com o tipo de aparelho e a sensibilidade do filme. Quando as melhores técnicas são utilizadas a dose necessária para tirar uma radiografia ao tórax pode ser menor que  $6 \times 10^{-5}$  Sv [11].

A **mamografia** é um instrumento poderoso para a detecção do cancro da mama. A mamografia possibilita o diagnóstico do cancro da mama uma vez que detecta pequenas diferenças de densidade e texturas dos seus componentes como o tecido adiposo e fibroglandular [6].

Os **marcadores** são usados em Medicina como meio de diagnóstico. A trajectória do fluxo sanguíneo pode ser seguida usando sódio-24 (um emissor  $\beta$  com um período de 14,8 horas) injectado no fluxo como uma solução salina, tornando possível a detecção de possíveis constricções ou obstruções no sistema circulatório. O iodo-131 (um emissor  $\beta$  com um período de 8 dias) tem sido usado para testar a actividade da glândula tiróide. É possível detectar um mau funcionamento da tiróide administrando ao doente uma solução contendo uma quantidade conhecida de  $\text{Na}^{131}\text{I}$  e medindo a radioactividade logo acima da tiróide para ver se o iodo é absorvido a uma velocidade normal. Um outro isótopo radioactivo do iodo, o iodo-123 (um emissor  $\gamma$ ), é usado para visualizar o cérebro. O tecnécio é um dos elementos mais úteis em medicina nuclear. O tecnécio-99 no estado nuclear excitado ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) tem um período de cerca de 6 horas e decai para o tecnécio-99 ( $^{99}\text{Tc}$ ). O doente bebe ou é injectado com uma solução contendo  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Os médicos podem obter imagens de órgãos como o coração, fígado e pulmões, detectando os raios  $\gamma$  emitidos pelo  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  [34].

A **tomografia por emissão de positrões (PET)** é uma técnica que permite detectar doenças ou alterações nos órgãos na fase inicial de uma doença. É administrado no paciente um radioisótopo emissor de positrões. Quando os positrões são emitidos no corpo do paciente, estes aniquilam-se com os electrões convertendo-se em dois fotões gama os quais são detectados por detectores. Um dos factores que limitam do ponto de vista económico esta técnica é a necessidade de um ciclotrão para a produção de radioisótopos já que os emissores de positrões mais interessantes para pesquisas biológicas, o  $^{11}\text{C}$ , o  $^{13}\text{N}$ , o  $^{15}\text{O}$  e o  $^{18}\text{F}$ ) têm meias-vida de apenas 20 min, 10 min, 2 min e 110 min, respectivamente, e portanto devem ser constantemente substituídos [11].

Uma das aplicações mais conhecidas da radiação ionizante na terapia é a **radioterapia** a qual consiste em eliminar tumores malignos utilizando radiação gama, raios X ou fontes de electrões. O princípio básico é eliminar as células cancerígenas e evitar a sua proliferação [6].

### 2.12.2. Indústria

Na indústria, os materiais radioactivos são aplicados no controle de processos e produtos, controle de qualidade de soldas e esterilização.

Por exemplo, o controlo de qualidade de soldas baseia-se na impressão de chapas fotográficas por raios gama mostrando a estrutura interna da solda e eventuais defeitos. As empresas de aviação fazem inspecções frequentes nos aviões para verificar se há “fadiga” nas partes metálicas e soldas essenciais sujeitas a maior esforço como, por exemplo, nas asas e turbinas, usando esta técnica.

Fontes radioactivas de alta actividade são utilizadas para esterilização de materiais cirúrgicos e de alimentos [35].

### 2.12.3. Agricultura

Na agricultura os materiais radioactivos são utilizados para controlo de pragas e pestes, hibridação de sementes, preservação de alimentos, estudos para aumento de

produção. Por exemplo, a procura da semente ideal para a obtenção de boas colheitas é conseguida pela exposição das sementes às radiações de alguns isótopos [35].

#### 2.12.4. Arqueologia

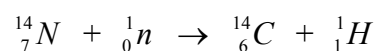
Antropólogos, arqueólogos e geólogos recorrem rotineiramente às propriedades de decaimento de certos radioisótopos para determinar a idade de fósseis, artefactos e rochas.

Os isótopos de meia-vida muito grande, como o  $^{40}\text{K}$  e o  $^{232}\text{Th}$ , são usados para determinar a idade de rochas “antigas” enquanto que os isótopos de meia-vida um pouco menor são usados para determinar a idade de rochas mais “novas”, de outros materiais inorgânicos e de amostras arqueológicas contendo carbono, como pedaços de carvão.

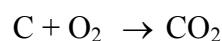
A técnica usada para determinar a idade de uma amostra de nuclídeos radioactivos consiste em medir as abundâncias de dois isótopos, sendo pelo menos um deles radioactivo ou o produto final estável de uma cadeia de decaimentos, e compará-las com as abundâncias conhecidas.

Uma técnica muito usada para determinar a idade de amostras arqueológicas que contenha carbono, como pedaços de ossos, carvão, sedimentos orgânicos, conchas marinhas, etc., baseia-se na medida da relação entre o número de átomos de  $^{14}\text{C}$  e o número de átomos de  $^{12}\text{C}$  existente na amostra.

O  $^{14}\text{C}$  é produzido continuamente na atmosfera pela reacção entre o azoto e neutrões térmicos produzidos por raios cósmicos, de acordo com a equação:

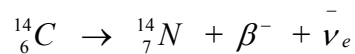


O  $^{14}\text{C}$  resultante dessa reacção combina-se com o oxigénio do ar e forma dióxido de carbono de acordo com a equação:



O dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , assim produzido comporta-se quimicamente da mesma forma que o dióxido de carbono produzido a partir de átomos de  $^{12}\text{C}$  [18].

Ao mesmo tempo que é produzido o  $^{14}\text{C}$  decai novamente para  $^{14}\text{N}$ . Esta reacção é acompanhada pela emissão de uma partícula  $\beta^-$  (um electrão) e de um antineutrino, de acordo com a equação:



O radiocarbono está, portanto, a ser continuamente produzido na Terra. Por outro lado, em virtude de ser radioactivo, está a ser sistematicamente transformado em  $^{14}\text{N}$ . Assim, a quantidade de  $^{14}\text{C}$  existente na Terra permanece praticamente constante, em resultado do equilíbrio que se estabelece entre o ritmo da sua produção e a taxa do seu declínio radioactivo. Como os organismos vivos trocam  $\text{CO}_2$  continuamente com a atmosfera, a razão  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  nos organismos vivos é igual à relação de equilíbrio na atmosfera, que actualmente é igual a  $1,35 \times 10^{-12}$ .

Quando um organismo morre terminam as trocas de carbono entre ele e o ambiente pelo que o teor de  $^{14}\text{C}$  começa a diminuir de acordo com o período característico do declínio desta espécie radioactiva ( $t_{1/2} = 5730 \text{ anos}$ ).

A taxa de decaimento do  $^{14}\text{C}$  por grama de carbono pode ser usado para estimar quanto tempo se passou desde a morte do organismo [11].

### 2.13. Detectores de radiação ionizante

Existem vários tipos de detectores de radiação como, por exemplo, detectores Geiger-Müller, detectores de cintilação, detectores de silício do tipo barreira de superfície (SSB), entre outros.

Os detectores Geiger-Müller foram introduzidos por Geiger e Müller em 1928. A sua simplicidade, baixo custo e fácil manuseamento fazem com que sejam utilizados até hoje. Estes detectores são os mais utilizados nas escolas portuguesas com ensino secundário.

### 2.13.1. Detector Geiger-Müller

O detector Geiger-Müller permite detectar a presença de radiações ionizantes, tais como partículas alfa e beta e radiação X e gama [36]. Não permite, no entanto, medir a energia das partículas.

O detector Geiger-Müller é constituído por um cilindro metálico que encerra no seu interior uma mistura de gases, (por exemplo, árgon ou hélio) e um eléctrodo positivo, o ânodo, que está ligado a um circuito exterior. O invólucro metálico serve de eléctrodo a potencial zero (cátodo). Entre o ânodo e o cátodo é aplicada uma diferença de potencial (da ordem das centenas de volt).

Uma das extremidades do cilindro é fechada com uma película fina de um material menos absorvente (mica, grafite, etc.) constituindo a janela do detector. A janela do detector é a zona por onde deverão entrar as partículas a detectar, por isso, deve estar virada para a fonte radioactiva.

Quando uma radiação entra no detector provoca a ionização do gás, isto é, arranca um electrão ao átomo, transformando-o numa carga positiva. O electrão é então atraído para o ânodo e o ião para o cátodo, embora mais lentamente uma vez que é mais pesado que o electrão. Neste processo os electrões podem ganhar energia cinética suficiente para provocarem ionizações secundárias durante o seu trajecto até ao ânodo.

Produz-se um sinal eléctrico porque os electrões ao atingirem o eléctrodo positivo provocam um abaixamento do potencial deste. O sinal desaparece quando o ião atinge o cátodo, uma vez que a diferença de potencial é restabelecida.

O tempo típico do sinal é de  $2 \times 10^{-4}$  s. Este sinal eléctrico permite assim a detecção da radiação que atravessa o detector. O valor da diferença de potencial define o tipo de detector. Só se obtém um detector Geiger quando a amplitude do sinal é independente da diferença de potencial aplicada ao ânodo.

Se a diferença de potencial for muito elevada pode entrar-se numa região de descarga contínua, o que pode danificar de forma permanente o detector.

Um sistema completo de detecção Geiger-Müller é constituído pelo detector, uma fonte de alta tensão para polarizar o ânodo a um potencial conveniente e um sistema de contagem, tal como se pode ver na figura 2.25.

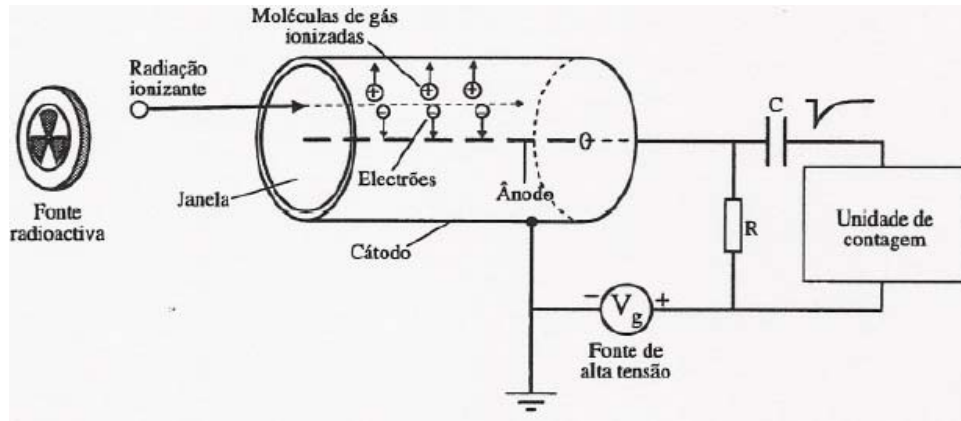


Figura 2.25: Detector Geiger-Müller (figura retirada de [36]).

## Capítulo 3: O Radão e o Ambiente

### 3.1. O Radão

O radão é um gás radioactivo natural que ocorre nas rochas, nos solos, no ar e na água e cujos átomos se desintegram originando outros elementos, também radioactivos, tendo como consequência a exposição do Homem às radiações ionizantes.

Nas condições normais de temperatura e pressão é um gás incolor e inodoro e, por isso, não detectável pelos nossos sentidos, daí que não se torne óbvio o risco a ele associado, em particular nas casas de habitação onde tende a concentrar-se [37].

O radão é um elemento químico do grupo dos gases raros. O ponto de fusão é 202 K (-71 °C) e o ponto de ebulição é 211 K (-62 °C), o raio atómico é de 1,34 Å. Dos gases conhecidos o radão é o mais denso (9,73 g L<sup>-1</sup>) [38], sendo nove vezes mais denso que o ar. O radão é solúvel em água e em solventes orgânicos.

Uma vez que é um gás monoatômico penetra facilmente em muitos materiais comuns tais como o papel, o plástico de que são feitos os vulgares sacos de plástico, painéis de madeira e mesmo algumas peças de betão [39].

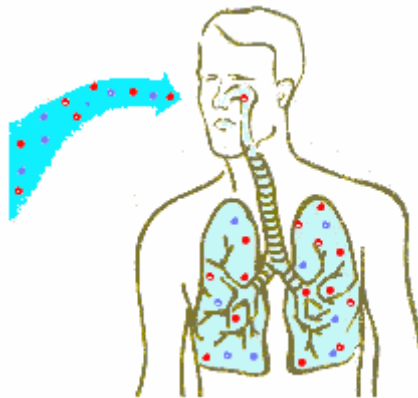
O radão apresenta vários isótopos sendo os três principais produzidos naturalmente a partir do decaimento radioactivo do <sup>238</sup>U (série do urânio), <sup>235</sup>U (série do actínio) e <sup>232</sup>Th (série do tório). Os isótopos que ocorrem em cada uma das séries são o <sup>222</sup>Rn, o <sup>219</sup>Rn e o <sup>220</sup>Rn, respectivamente. A abundância do <sup>235</sup>U na natureza é apenas de cerca de 0,7%, consequentemente, o isótopo <sup>219</sup>Rn cuja meia-vida é de 4 s não é muito importante para o ambiente. O isótopo <sup>220</sup>Rn é também de relativa pouca importância no meio ambiente devido à sua meia-vida ser pequena, 55 s.

O radão <sup>222</sup>Rn, um dos produtos da cadeia de decaimento do <sup>238</sup>U, o qual constitui mais de 99% do urânio que está geralmente presente nas rochas e nos solos tem uma meia-vida de 3,82 dias [39]. Devido ao facto da sua meia-vida ser de alguns dias tem tempo suficiente para se difundir através das microfendas das rochas e através do solo acabando por entrar na atmosfera, tornando-se assim o maior contribuinte (mais de 50%) para a radioactividade natural da atmosfera junto à superfície da Terra, justificando que sobre ele se centre alguma atenção [40].

O  $^{222}\text{Rn}$  decai por emissão de partículas  $\alpha$ . Este decaimento é seguido por outros decaimentos  $\alpha$  e  $\beta$  que resultam na formação de  $^{210}\text{Pb}$  cuja meia-vida é de 22,3 anos.

### 3.2. Exposição e risco radiológico

O risco radiológico associado ao radão, deve-se sobretudo aos seus descendentes sólidos, tais como: polónio, bismuto e chumbo, formados no ar e que ao serem inalados irradiam os tecidos dos pulmões. Devido ao facto das meias-vida destes isótopos serem pequenas (não excedem alguns minutos) produz-se uma irradiação contínua nos pulmões em reduzido intervalo de tempo até ser atingida o nuclídeo estável  $^{206}\text{Pb}$ . Os danos provocados nos tecidos pulmonares pelas radiações emitidas por estes radionuclídeos podem induzir o desenvolvimento do cancro. A Agência de Protecção Ambiental dos EUA (EPA) estima que 1 a 2 em cada 100 pessoas que, durante a vida inalem ar com concentrações de radão não inferiores a  $150 \text{ Bq/m}^3$  incorrem no risco de contrair cancro do pulmão; este risco é significativamente incrementado no caso dos fumadores, dado ocorrer uma sinergia entre estes dois factores [10, 34].



**Figura 3.1: Irradiação dos tecidos pulmonares por exposição ao radão e seus descendentes (figura retirada de [23]).**

O principal risco de exposição a este gás ocorre, fundamentalmente, a partir do solo. Embora apresentando concentrações geralmente baixas no exterior, ao infiltrar-se nas casas através de fissuras nos pavimentos, fendas nas fundações e paredes, juntas de



construção ou espaços não preenchidos na base das edificações pode atingir, no interior, concentrações de várias ordens de grandeza superiores às que se observam no exterior.

Esta infiltração é devida à diferença de pressão como resultado da temperatura mais elevada no interior dos edifícios [40]. Em virtude da sua elevada densidade concentra-se sobretudo no ar do interior dos pisos inferiores, em caves e rés-do-chão, em particular, se a ventilação desses espaços é deficiente [39].



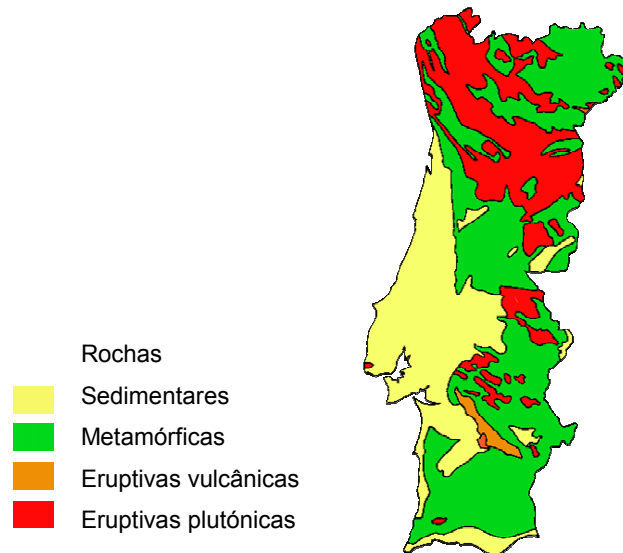
Figura 3.2: Infiltração do radão em habitações (figura retirada de [23]).

### 3.3. Factores que afectam a libertação de radão

A exposição ao radão é condicionada por diversos factores geológicos. A produção de radão apenas depende da concentração de urânio e a distribuição do urânio nos solos e rochas não é uniforme. As concentrações mais elevadas ocorrem, normalmente, em rochas graníticas (plutónicas) sendo mais baixas em rochas sedimentares como os calcários [41].

Na figura 3.3 pode ver-se a carta geológica simplificada de Portugal, a qual mostra a distribuição dos diferentes tipos de rochas predominantes em cada região do País [23].

Como se pode observar é na região norte que se verifica existir predominância de rochas graníticas.

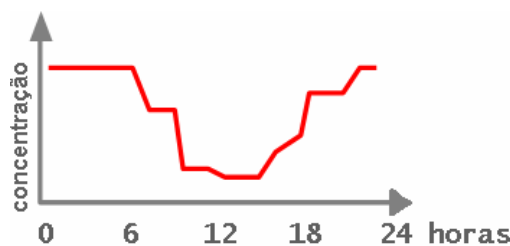


**Figura 3.3: Carta geológica simplificada (figura retirada de [23]).**

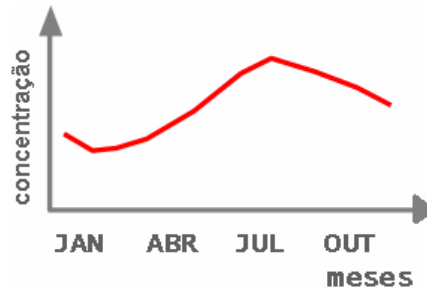
A libertação de radão para a atmosfera (exalação) está condicionada pela permeabilidade e porosidade dos solos e rochas. Em meios de permeabilidade reduzida a moderada (até 10-12 m<sup>2</sup>) o fluxo de radão é efectuado por difusão, sendo a distância máxima de transportes de 5 cm em água e 5 m no ar. Para permeabilidades superiores o transporte convectivo torna-se dominante, podendo a distância de migração do radão ascender a algumas dezenas ou mesmo centenas de metros [40].

Parâmetros meteorológicos, como a pressão atmosférica, humidade dos solos e temperatura, também influenciam a libertação de radão para a atmosfera (exalação).

Num mesmo local, verificam-se variações das concentrações de radão, quer diárias (figura 3.4) quer sazonais (figura 3.5). Verifica-se uma marcada ciclicidade diurna, registando-se os valores mais altos quando o sol se encontra sobre o zénite do local, altura em que a turbulência atmosférica é elevada maximizando a diluição do radão na atmosfera e os valores mínimos quando o sol se encontra no nadir (ponto diametralmente oposto ao zénite), em que a turbulência é mínima dificultando o fluxo litosfera-atmosfera [40], sendo comum os níveis mais elevados duplicarem os valores mínimos [23].



**Figura 3.4: Variação da concentração diária do radão no ar exterior.**



**Figura 3.5: Variação da concentração sazonal do radão no ar exterior no hemisfério Norte.**

No ar exterior o radão dispersa-se sendo os níveis geralmente baixos, inferiores a  $10 \text{ Bq/m}^3$  [40].

### 3.4. O radão nos edifícios

As concentrações do gás radão em edifícios são influenciados por factores geológicos e meteorológicos, bem como pela tipologia construtiva [42]. Assim, a natureza do solo e dos materiais de construção, a temperatura ambiente, a pressão atmosférica e a ventilação são factores que afectam a concentração dentro de uma habitação [43].

As concentrações mais elevadas de radão tendem a ocorrer durante a noite, período em que a ventilação é reduzida e que coincide com a maior ocupação das habitações [40].

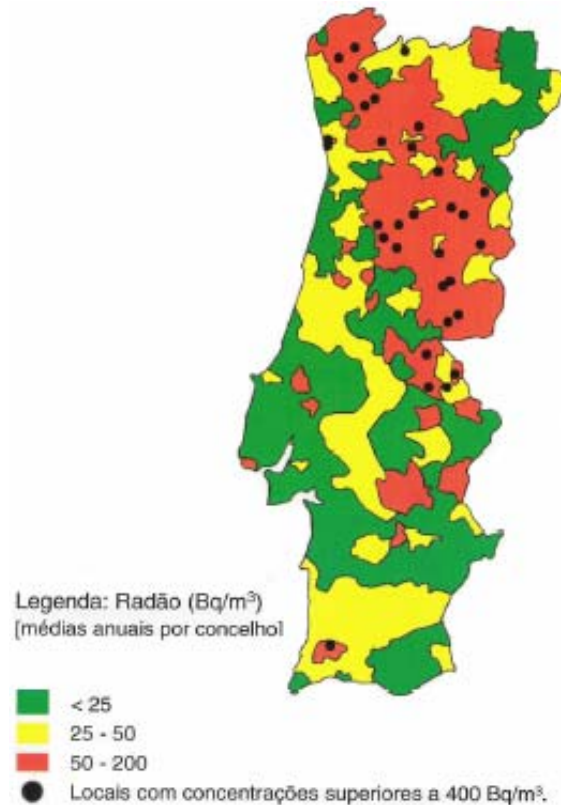
No interior de edifícios ocorrem igualmente variações sazonais da concentração de radão, mas inversas das verificadas no ar exterior, resultantes da maior ventilação efectuada nos meses de Verão e da menor ventilação durante o Inverno [23].

É talvez irónico que a tentativa de isolar e selar as construções para conservar a energia possa ser responsável pelo aumento da concentração de radão no interior de um edifício [10].

Embora não exista legislação nacional sobre a exposição de radão no interior de habitações, a Comissão das Comunidades Europeias publicou, em 1990, uma recomendação (90/143/EURATOM), indicando como valores limite para a concentração de radão no interior de habitações,  $400 \text{ Bq/m}^3$  para casas já existentes e  $200 \text{ Bq/m}^3$  para casas a construir.

Um estudo efectuado por investigadores do Departamento de Segurança e Protecção Radiológica do Ministério do Ambiente, tomando como amostra 4200 habitações do território nacional, verificou que cerca de 60% das concentrações de radão se situam abaixo dos 50 Bq/m<sup>3</sup>, em 3% dos casos as concentrações de radão são superiores a 400 Bq/m<sup>3</sup>.

A figura 3.6 mostra a actividade média anual de radão por concelho de Portugal.



**Figura 3.6: Cartografia do radão em Portugal (figura retirada de [23]).**

Os distritos da Guarda e de Viseu são os que, de todo o mapa nacional, apresentam os valores médios mais elevados deste gás radioactivo. Este fenómeno pode ser explicado pelo facto do subsolo ser maioritariamente constituído por granitos e estas rochas serem, em geral, das que possuem na sua constituição maiores quantidades de urânio, elemento a partir do qual se gera o radão. Acresce que, nestas regiões, são frequentes os fenómenos mineralizantes no que respeita ao urânio, registando-se a presença de muitas dezenas de antigas explorações deste elemento químico [37].

### 3.5. Como reduzir a concentração de radão no interior dos edifícios

Acima dos valores limite da recomendação (90/143/EURATOM), torna-se necessário proceder a acções de mitigação (redução) do radão que podem incluir medidas simples, tais como [23, 40]:

- selar (tapar) todas as fendas existentes no pavimento ou juntas de tubagens, de modo a impedir as entradas de radão para a zona ocupacional;
- favorecer a ventilação natural; a maior ventilação das habitações em condições de Verão propicia uma redução acentuada nos níveis de radão no interior das casas.

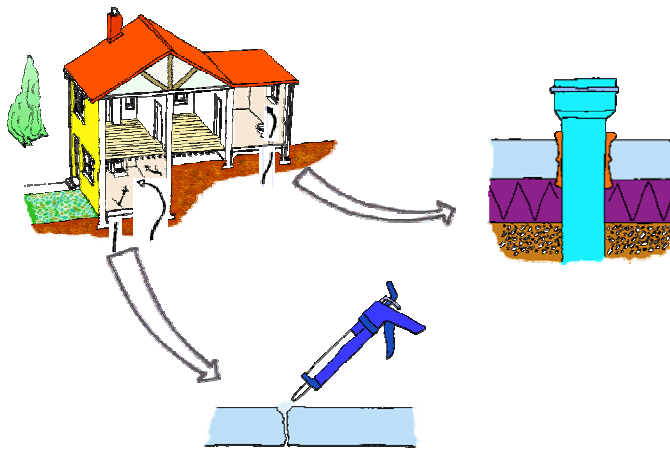


Figura 3.7: Acções simples de redução do radão numa habitação (figura retirada de [23]).

Se estas medidas não forem suficientes, poder-se-ão adoptar medidas correctivas baseadas em:

- colocação no pavimento de membranas que sejam impermeáveis ao ar (radão);
- ventilação mecânica de modo a diminuir a pressão existente no espaço subjacente à construção.

As medidas preventivas na construção de novas habitações apenas se justificam em áreas de risco moderado ou elevado.

No primeiro caso, a aplicação de telas específicas impermeáveis a gases ao nível das fundações (e paredes quando existam caves) será suficiente para uma adequada prevenção. No segundo caso, para além das referidas telas deverá ser prevista uma caixa-de-ar ventilada ao nível da laje de fundação ou, quando tal não seja possível, ser instalada uma camada drenante de material grosseiro, com colectores que permitam a sucção mecânica do ar. Em princípio, as técnicas de remediação possibilitam a

construção na maioria das situações, sendo raros os casos em que se justifica a interdição de construir; esta poderá ser a situação quando estejam presentes mineralizações em teor e volume relevante, constituindo recursos geológicos susceptíveis de aproveitamento económico futuro, onde os níveis de radiação e de radão sejam extremos [40].

Por último, é de referir que é recomendável que, na selecção dos locais de extracção de materiais geológicos, sejam tidas em conta as concentrações de U e Th nas rochas, com o objectivo de ser evitada a disseminação de materiais radioactivos [41].

### **3.6. O radão nas águas**

A exposição do ser humano ao radão pode ocorrer por inalação do gás e seus descendentes, ou por ingestão, neste último caso por via do consumo de água onde os radionuclídeos se encontram dissolvidos. Embora o risco atribuído à exposição por ingestão seja consideravelmente mais reduzido do que o risco que resulta da inalação [44] aquele não deve ser ignorado, especialmente se as águas utilizadas para consumo humano contiverem quantidades elevadas de radão e seus descendentes.

A exposição ao radão por ingestão tem como consequência a exposição do sistema digestivo e também dos pulmões uma vez que o radão dissolvido na água vai-se libertando para a atmosfera irradiando assim os pulmões.

É muito importante ter-se em consideração que o radão é solúvel nos fluidos do corpo humano e nas gorduras, apresentando pois um perigo potencial para o corpo inteiro [45].

As concentrações de radão nas águas freáticas estão relacionadas com a concentração de rádio da rocha que ela atravessa, a taxa de percolação, a porosidade da rocha entre outros factores. Em geral, as concentrações mais baixas ocorrem em rochas sedimentares e as mais altas ocorrem em águas que atravessam ou são colectadas em rochas graníticas ou em rochas sedimentares que sofreram consideráveis alterações metamórficas [31].

O radão liberta-se facilmente da água onde está dissolvido quando, por exemplo, se abre a torneira de água, nas máquinas de lavar e em chuveiros. Como consequência diminui a exposição ao radão por ingestão mas aumenta por inalação [46].

### 3.7. Como reduzir a concentração de radão nas águas

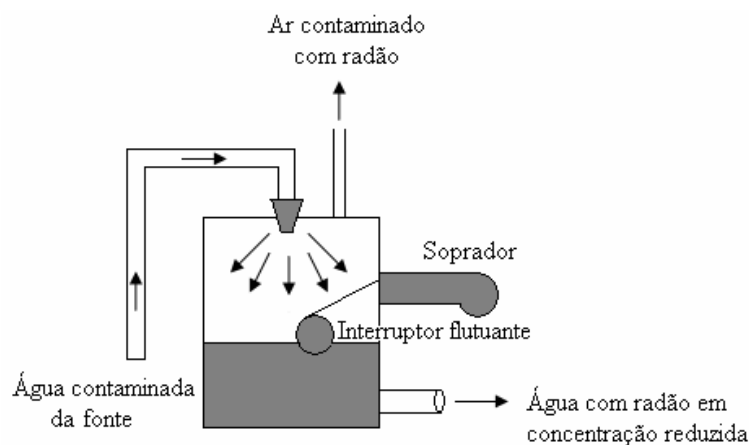
A Recomendação Europeia (2001/928/Euratom) indica como valor máximo para o radão  $1000 \text{ Bq L}^{-1}$ .

Considerando a ingestão e a inalação, a dose anual provocada pela água contendo um teor de radão de  $1000 \text{ Bq L}^{-1}$  é muito comparável à provocada por uma concentração de radão em recinto fechado de  $200 \text{ Bq L}^{-1}$ , o nível de concepção máximo para construções futuras definido na Recomendação Europeia (90/143/Euratom).

Quando a concentração de radão nas águas é elevada torna-se necessário recorrer a medidas correctivas ou de prevenção que podem passar pelo arejamento da água ou a utilização de carvão activado granular (GAC). Estas técnicas podem remover o radão com uma eficiência até 99% [47].

A EPA considerou o arejamento como a melhor tecnologia disponível para remover o radão das águas.

Os arejadores domésticos expõem a água a uma quantidade de ar suficiente de forma a que o radão escape para o ar antes que a água chegue aos locais de consumo [46]. A figura 3.8 mostra um possível sistema de arejamento da água.



**Figura 3.8: Sistema de arejamento com spray (figura adaptada de [46]).**

A outra técnica utiliza unidades de carvão activado granular (GAC). Existe uma grande variedade de modelos, tipos e tamanhos de unidades de carvão activado granular (GAC), mas o princípio de funcionamento é basicamente o mesmo [46].

Geralmente são construídas por um tanque de fibra de vidro contendo carvão activado, um material fino que adsorve o radão. Devido ao tamanho das partículas do carvão activado facilmente retém sedimentos e outros contaminantes presentes na água.

Por isso, algumas unidades vêm com um filtro para estes sedimentos os quais podem fazer reduzir a remoção de radão pelo carvão activado granular. O filtro será colocado no tanque antes do carvão activado granular.

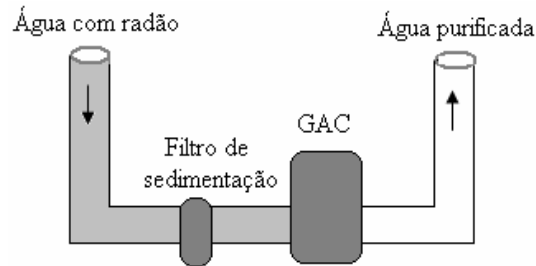


Figura 3.9: Tratamento por GAC (figura adaptada de [46]).

Os Estados Unidos [48] e a Finlândia são países onde a concentração de radão é particularmente elevada [49].

Em Portugal não estão regulamentados os valores máximos de concentração de radão em águas, seguindo-se os níveis de referência propostos na Recomendação Europeia (2001/928/Euratom),  $1000 \text{ Bq L}^{-1}$ .

Os níveis de radão existentes em Portugal parecem não exceder largamente os níveis recomendados pelo que não se tem verificado medidas correctivas ou preventivas.

#### a. Carvão activado

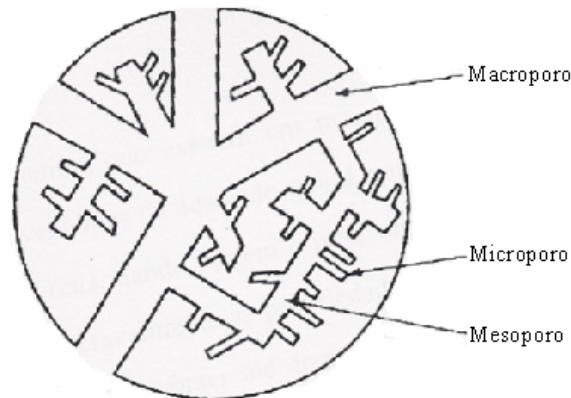
Os carvões activados são materiais que podem ser preparados por carbonização de uma grande variedade de materiais como a madeira, o carvão, casca de amêndoa, casca de coco, turfa, etc. [50]. Os carvões activados são caracterizados por apresentarem uma estrutura porosa e elevada área superficial interna.

A distribuição do tamanho dos poros na estrutura porosa do carvão activado não é uniforme. Estes podem ser divididos, de acordo com a nomenclatura IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), em três grupos principais, em função do seu diâmetro médio [50, 51, 52]:

- microporos com diâmetros  $< 2 \text{ nm}$
- mesoporos com diâmetros entre  $2 \text{ nm}$  e  $50 \text{ nm}$
- macroporos com diâmetros  $> 50 \text{ nm}$



A figura 3.10 mostra uma representação esquemática da estrutura porosa de um grão de carvão activado.



**Figura 3.10: Esquema da estrutura porosa de um carvão activado.**

Os carvões activados são materiais com grande importância prática. São essencialmente aplicados como adsorventes em processos de limpeza de gases e de líquidos [50]. As propriedades de adsorção são determinadas pela estrutura porosa e pela sua composição química.

O processo de adsorção depende dos seguintes factores [53]:

- Propriedades físicas do carbono activado tais como a distribuição de poros e a área superficial.
- A natureza química da fonte de carbono, a quantidade de oxigénio e hidrogénio associado
- A composição química e concentração do contaminante
- A temperatura e o pH da água.
- O caudal ou o tempo de exposição do carvão activado à água.

## **Capítulo 4: A Radioactividade nas Águas**

### **4.1. Introdução**

Os oceanos cobrem cerca de 70% da superfície terrestre contendo cerca de  $1,37 \times 10^{21}$  L de água com sais dissolvidos. A quantidade de água doce é muito mais pequena, cerca de 3% da água do Planeta ( $3,6 \times 10^{21}$  L) [54].

Toda a água da Terra contém alguns radionuclídeos, quer sejam de origem natural quer sejam artificiais.

Os radionuclídeos artificiais atingiram o meio aquático à escala mundial a partir da detonação de armas nucleares na atmosfera e também de testes nucleares submarinos. A nível local e regional as descargas de resíduos líquidos das indústrias nucleares aumentaram consideravelmente as concentrações ambientais em determinadas áreas, as outras fontes incluem o armazenamento de lixo acondicionado em mar profundo, material militar perdido e mais recentemente acidentes de centrais nucleares. As centrais nucleares, em operação normal, descarregam apenas pequenas quantidades de radionuclídeos, dependendo a composição isotópica do tipo de reactor e da gestão dos efluentes. Os nuclídeos dominantes nestes efluentes são:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e  $^3\text{H}$ .

Outra potencial fonte de radionuclídeos artificiais provém da mineiração, enriquecimento do urânio e o reprocessamento do combustível utilizado [55].

Os radionuclídeos distribuíram-se nos mares, lagos e rios em função do seu comportamento químico e da natureza do ambiente receptor. A sua acumulação nas cadeias alimentares aquáticas e, particularmente, o trajecto que conduz aos humanos pode ser bastante complexo [31].

### **4.2. Águas dos mares**

Os oceanos contêm sais dissolvidos e sólidos em suspensão. Como seria de esperar contém radionuclídeos de origem primordial e cosmogénica. Os nuclídeos mais abundantes na água do mar são o  $^{40}\text{K}$  e o  $^{87}\text{Rb}$ , tal como se pode observar na tabela 4.1.

A concentração deste nuclídeos assim como a do urânio são praticamente constantes ao longo dos oceanos.

Tabela 4.1: Radioatividade natural nos mares (retirado de [31]).

Radionuclídeo	Actividade (Bq L <sup>-1</sup> )
<b>Primordial</b>	
<sup>40</sup> K	12
<sup>87</sup> Rb	0,110
<sup>234</sup> U	0,046
<sup>238</sup> U	0,040
<sup>226</sup> Ra	0,0035
<sup>210</sup> Pb	0,0030
<sup>235</sup> U	0,0022
<sup>210</sup> Po	0,0020
<b>Cosmogénico</b>	
<sup>14</sup> C	0,006*
<sup>3</sup> H	0,1*

\* Valores à superfície da água

O tório é praticamente insolúvel e os seus isótopos são removidos da água por adsorção de partículas em suspensão. O protactínio também é insolúvel na água do mar e os isótopos de chumbo e de polónio também são adsorvidos por partículas em suspensão. Por outro lado, o rádio é mais solúvel e o radão prontamente se difunde de um meio para outro.

A distribuição no ambiente dos vários nuclídeos depende do seu comportamento químico, dos precursores imediatos na cadeia de decaimento, das suas meias-vida e das suas fontes de origem. As concentrações no meio ambiente poderão então variar consideravelmente entre as zonas costeiras e as zonas de alto mar, entre a superfície marítima e junto ao fundo do mar [54, 56].

Dos principais radionuclídeos cosmogénicos, 65% do <sup>3</sup>H e 90% do <sup>14</sup>C residem nos oceanos [57].

Os sedimentos marinhos também contêm uma considerável quantidade de radionuclídeos de origem natural sendo essas quantidades dependentes da profundidade. Estes são mais frequentes em águas profundas que nas zonas costeiras.

Os depósitos de argila vermelha poderão conter concentrações até 2000 Bq kg<sup>-1</sup> de <sup>230</sup>Th, 1500 Bq kg<sup>-1</sup> de <sup>226</sup>Ra e 100 Bq kg<sup>-1</sup> de <sup>232</sup>Th [58].

Apesar destas variações os mares são um meio relativamente homogêneo no que diz respeito aos seus principais constituintes químicos.

### 4.3. Águas doces

As águas doces são diferentes. Os constituintes dissolvidos nas águas freáticas variam consideravelmente, dependendo das rochas e dos solos através dos quais elas fluem.

A quantidade de carbonatos e bicarbonatos dissolvidos, que determinam a dureza da água afecta consideravelmente as quantidades de muitos elementos em solução e as suas taxas de remoção e co-precipitação. A presença de matéria orgânica também determina as concentrações presentes na fase dissolvida. As águas doces podem variar muito em pH, poderão ser estáticas ou fluidas, poderão experimentar consideráveis variações em temperatura e estar sujeitas a variações sazonais extremas em actividade biológica e geotérmica. Por exemplo, as grandes quantidades de água doce como os Grandes Lagos são relativamente estáveis e tem as características de pequenos mares.

As águas dos rios, em geral, contêm menos urânio que a água do mar. As concentrações de rádio e radão também variam muito.

A concentração de <sup>226</sup>Ra poderá aumentar no estuário em resultado da dessorção da matéria em suspensão nas águas dos rios à medida que a salinidade aumenta [59].

Por outro lado, o <sup>40</sup>K que é a fonte dominante de radioactividade nos mares tem uma contribuição muito pequena nas águas doces [60].

### 4.4. Breve referência às águas para consumo humano em Portugal

Vastas regiões do País são abastecidas por captações de águas de superfície, sobretudo albufeiras, cuja qualidade e vulnerabilidade são variáveis. No que respeita aos parâmetros radiológicos, geralmente as águas de superfície não excedem os valores recomendados para a radioactividade alfa total, beta total, trítio e dose indicativa total,

estando em conformidade com a Directiva Europeia n.º 98/83/CE e com o Decreto-Lei n.º 243/2001 [61]. Os valores máximos recomendáveis para a actividade alfa total, beta total, trítio e dose indicativa total, na água destinada ao consumo humano encontram-se registados na tabela 4.2.

**Tabela 4.2: Valores máximos recomendáveis para a actividade alfa total, beta total, trítio e dose indicativa total, na água destinada ao consumo humano de acordo com o Decreto-Lei n.º 243/2001.**

Parâmetro radioactivo	Valor paramétrico
$\alpha$ -total	0,1 Bq L <sup>-1</sup>
$\beta$ -total	1 Bq L <sup>-1</sup>
Trítio	50 Bq L <sup>-1</sup>
Dose individual total	0,10 mSv a <sup>-1</sup>

As disposições deste diploma não se aplicam às águas minerais naturais, abrangidas pelo disposto na legislação específica em vigor, às águas de nascente e às águas termais [62].

O recurso a fontes subterrâneas, em particular a aquíferos profundos, para abastecimento da população é mais comum em abastecimentos locais ou regionais sobretudo quando faltam, ou são de má qualidade, as águas da região. Algumas das captações profundas proporcionam águas de melhor qualidade no que diz respeito à contaminação microbiana, resíduos de fertilizantes, pesticidas, metais pesados, mas, por vezes apresentam concentrações de radionuclídeos em solução mais elevadas que as águas superficiais, excedendo os limites recomendáveis. Estes radionuclídeos são de origem natural e resultam da interacção hidroquímica com a rocha no aquífero. Uma grande percentagem da população Portuguesa é abastecida com água de captações subterrâneas e, no geral, consome água cuja qualidade radiológica não é conhecida e controlada [61].

Como já foi referido, as águas de consumo contêm vários radionuclídeos das famílias naturais do urânio, do tório e do actínio e, ainda, potássio-40. São esses radionuclídeos naturais, emissores alfa e beta que, uma vez ingeridos, são responsáveis pela dose de radiação devida a fontes internas. Da família natural do urânio, um dos isótopos mais importante é o <sup>226</sup>Ra devido à sua rádio-toxicidade.

As águas das redes do abastecimento público estão também vulneráveis à contaminação de radionuclídeos de origem artificial provenientes de centrais nucleares, acidentes radiológicos e actividades humanas como, por exemplo, explorações mineiras.

O trítio ( $^3\text{H}$ ), é um isótopo radioactivo do hidrogénio que está presente no ambiente devido não só a processos naturais, mas principalmente, como produto da libertação de efluentes da indústria nuclear e dos testes de armas nucleares. Uma vez libertado é incorporado rapidamente na composição da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e no ciclo hidrológico, dispersando-se assim no ambiente [62].

Sobressaem diferenças nas características radioactivas das águas de superfície e das águas subterrâneas [61].

Geralmente, as concentrações dos radionuclídeos emissores alfa e beta em solução em **águas de superfície** são baixas.

O  $^{222}\text{Rn}$  nas águas superficiais está presente em concentrações muito baixas, geralmente abaixo dos limites de detecção, isto é  $< 0,2 \text{ Bq L}^{-1}$ . As águas de consumo provenientes de fontes de abastecimento superficiais têm, geralmente, concentrações muito baixas de radão pois este gás radioactivo, quimicamente inerte, escapa-se facilmente para a atmosfera. A exploração destas águas de superfície leva a que durante o tratamento na ETA (Estação de Tratamento de Águas), com o arejamento da água, mais radão seja libertado chegando à torneira do consumidor já em concentrações vestigiais.

Nas águas de **fontes subterrâneas**, as concentrações de radioactividade alfa e beta totais atingem mais frequentemente valores próximos ou mesmo superiores aos limites recomendados para as águas destinadas ao consumo humano.

A análise por espectrometria alfa de algumas águas subterrâneas indica que se, nalguns casos são o rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ), o radão ( $^{222}\text{Rn}$ ) e o chumbo ( $^{210}\text{Pb}$ ) que estão em concentrações elevadas, noutros casos é sobretudo o urânio dissolvido que contribui para os valores de radioactividade alfa e beta total.

Nas águas subterrâneas profundas, especialmente, as **gasocarbónicas**, é frequente encontrar elevadas concentrações de  $^{226}\text{Ra}$  e de radão dissolvidos. Nestas águas as concentrações de  $^{226}\text{Ra}$  podem exceder  $1 \text{ Bq L}^{-1}$  e as concentrações de radão podem exceder  $1000 \text{ Bq L}^{-1}$ . As concentrações de  $^3\text{H}$  nas águas subterrâneas são baixas.

A avaliação da radioactividade em água para consumo humano é muito importante por esta constituir um bem vital para o Homem, podendo a ingestão de água

vir a tornar-se uma via crítica, após um acidente nuclear e/ou regiões de elevado fundo radiológico [63].

O relatório apresentado pelo Departamento de Protecção Radiológica e Segurança Nuclear (DPRSN) do Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN) relativo ao ano 2004 refere que as concentrações medidas para os radionuclídeos de origem artificial ( $^3\text{H}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) são muito baixas.

Os valores de radioactividade em amostras de água para consumo humano recolhidas mensalmente em vários locais do país variam entre um valor inferior à actividade mínima detectável ( $0,015 \text{ Bq L}^{-1}$ ) e  $0,184 \pm 0,030 \text{ Bq L}^{-1}$  para a medida alfa total e entre  $0,026 \pm 0,003 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $0,281 \pm 0,026 \text{ Bq L}^{-1}$  para a medida beta total. Constata-se que os valores dos parâmetros radioactivos situam-se abaixo do estipulado por Lei excepto, para a medida alfa total, para as águas recolhidas na Figueira da Foz, Barca d'Alva, Santarém e Reguengos.

Também em Vila Velha de Ródão se verifica que o valor obtido para a medida alfa total se encontra acima do estipulado pelo Decreto-Lei n.º 243/2001, o que é explicável pelo facto desta água ter origem em captação própria situada numa zona granítica, sendo expectável poderem existir radionuclídeos das famílias naturais do urânio, emissores alfa, em concentrações elevadas.

Os valores para a dose devida à ingestão de água de consumo situam-se abaixo dos estipulados por Lei (valores entre  $0,081 \mu\text{Sv a}^{-1}$  e  $0,085 \mu\text{Sv a}^{-1}$ ).

Perante estes dados somos levados a concluir que as águas para consumo humano, salvo raras excepções, estão dentro dos parâmetros recomendáveis por Lei.

## **Capítulo 5: Construção de um Sistema de Detecção de Partículas Carregadas**

### **Carregadas**

#### **5.1. Construção de um sistema de detecção de partículas carregadas utilizando um detector de silício.**

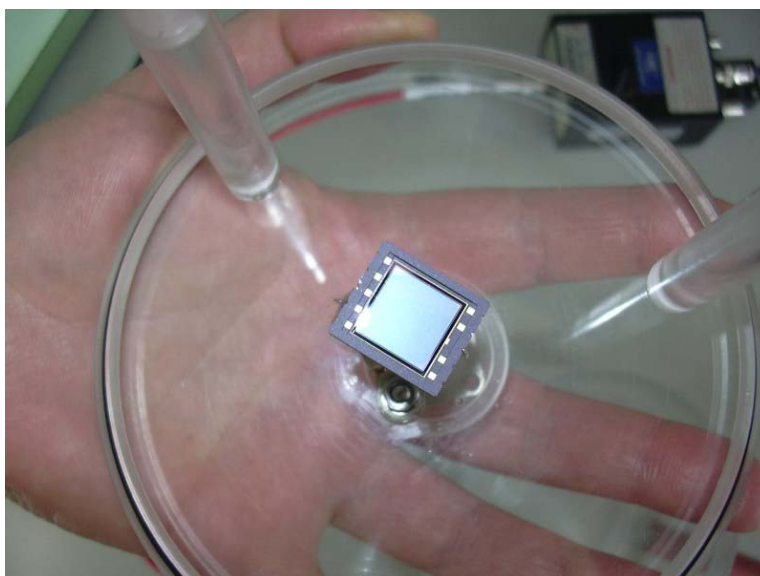
Os detectores de silício do tipo barreira de superfície (SSB) ou PIPS (*Passivated Implanted Planar Silicon*) permitem obter espectros de energia de partículas carregadas, partículas alfa e electrões, possibilitando a identificação de alguns núclídeos presentes numa amostra radioactiva fornecendo, assim, mais informação que um detector Geiger.

No entanto, a aquisição deste tipo de detectores bem como da electrónica associada, por parte da maioria das escolas de ensino secundário, não é fácil por ser dispendioso.

A construção de um sistema baseado num detector planar de silício tem como objectivo mostrar que é possível adquirir um detector deste tipo mas menos dispendioso.

O detector usado é um díodo de silício polarizado inversamente, da *Detection Technology*, o qual tem as dimensões ( $5 \times 5$ ) mm.

A figura 5.1 mostra o detector de silício usado.



**Figura 5.1: Detector de silício.**



O detector encontra-se dentro de uma câmara onde se produz o vácuo, a fim de evitar a perda de energia das partículas no ar entre a fonte e o detector. O detector envia o sinal para o pré-amplificador (CANBERRA, modelo 2004) que o converte em sinal eléctrico. Este sinal é enviado para o amplificador (ORTEC 575A) que o amplifica e o envia por sua vez para o discriminador (ORTEC 550A).

O sinal de entrada no discriminador é comparado com dois níveis de discriminação. Caso a amplitude do sinal de entrada esteja entre os níveis de discriminação existe um sinal de saída, o qual é enviado para a porta do multicanal (CANBERRA, modelo ASA-100). A utilização do discriminador permite uma redução apreciável do ruído de baixa amplitude.

O analisador multicanal (MCA) permite fazer a análise da amplitude dos sinais e o armazenamento do resultado possibilitando a sua posterior análise.

O osciloscópio (HAMEG 20 MHz) é utilizado para ver se os 2 sinais estão em coincidência. A figura 5.2 mostra o esquema de montagem do sistema de detecção usado.

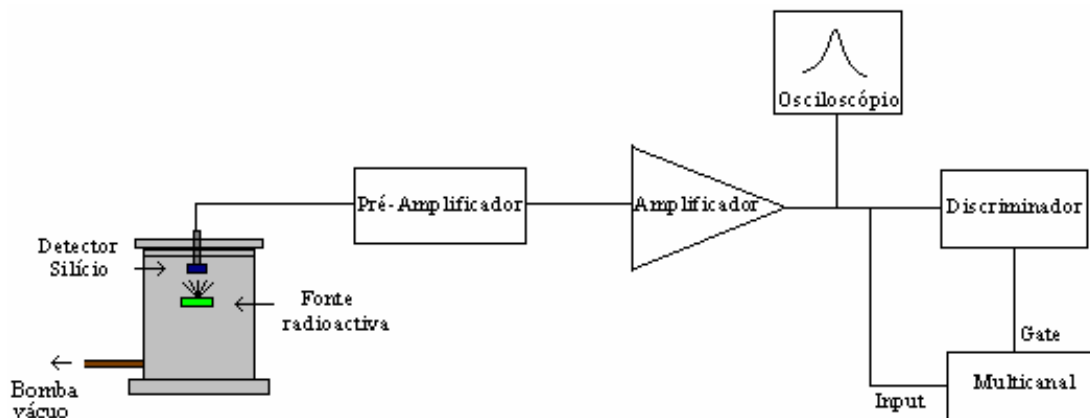
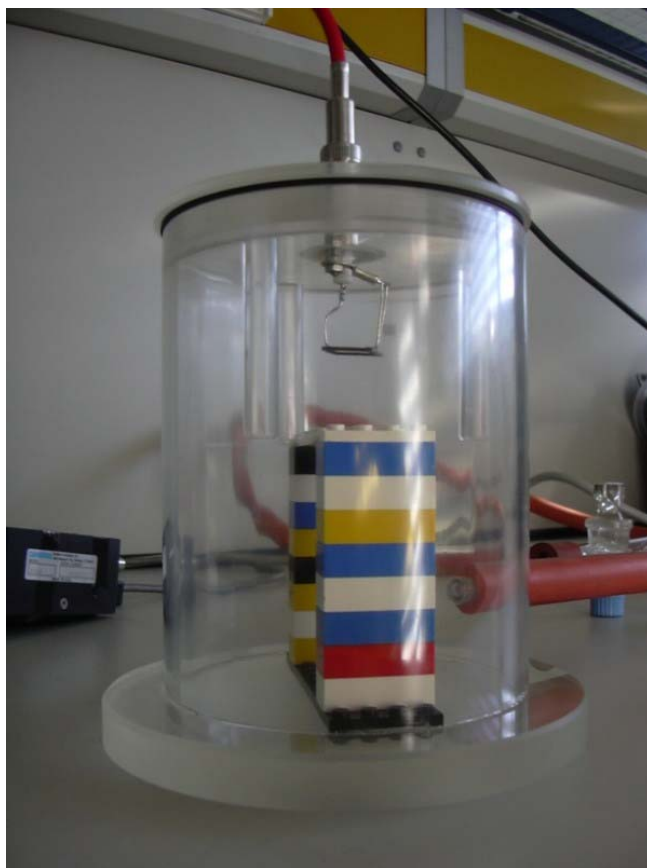


Figura 5.2: Esquema de montagem do dispositivo experimental.

As figuras seguintes são referentes a diferentes fases da construção do detector.



**Figura 5.3:** Câmara de vácuo em material acrílico, detector e suporte para a fonte radioactiva (peças de lego).



**Figura 5.4:** Ligação do detector ao cabo USB.



**Figura 5.5: Torneira em vidro para vácuo.**



**Figura 5.6: Bomba de vácuo.**



**Figura 5.7: Detector, sistema de vácuo e pré-amplificador.**

Verificou-se que o detector era sensível à luz daí ter sido necessário tornar a câmara opaca à luz. Para tal, pintamos a câmara de cor preta como se pode ver na figura 5.8.



**Figura 5.8: Câmara pintada de cor preta.**

## 5.2. Calibração do sistema

Após a construção do sistema de detecção passou-se à sua calibração com o objectivo de verificar o seu correcto funcionamento. Verificou-se que o detector funcionava melhor sem aplicação de tensão. Começou-se por utilizar uma fonte alfa de  $^{241}\text{Am}$ , tendo-se obtido o espectro, com fundo, apresentado na figura 5.9. O espectro obtido é característico do  $^{241}\text{Am}$  pelo que podemos concluir que o detector é eficiente uma vez que detecta bem as partículas.

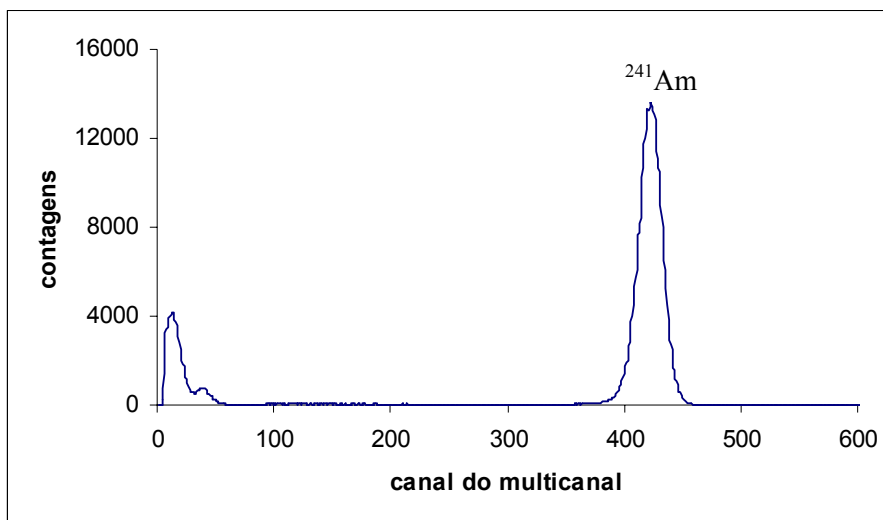


Figura 5.9: Espectro do  $^{241}\text{Am}$ .

Procedeu-se à calibração em energia do sistema de detecção recorrendo à fonte radioactiva alfa conhecida de  $^{232}\text{U}$ . O gráfico da figura 5.10 representa o espectro do  $^{232}\text{U}$  com fundo.

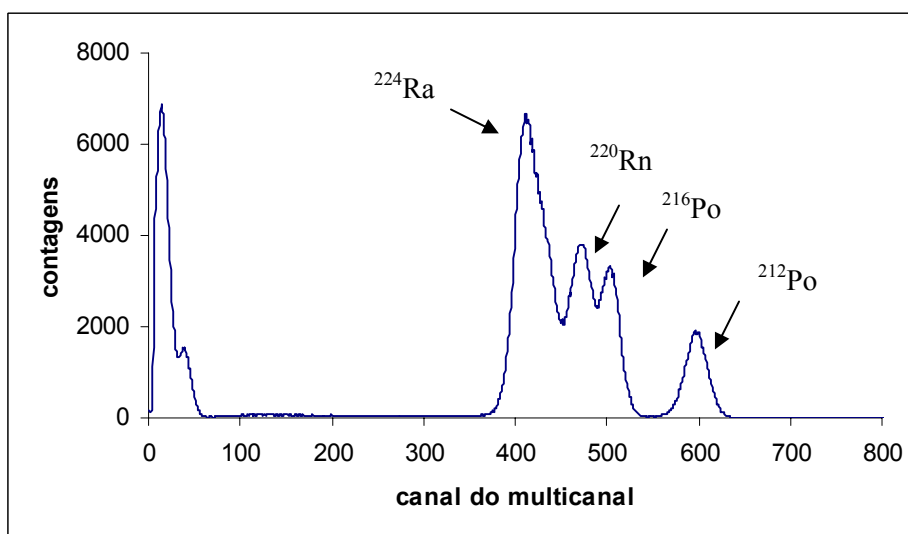
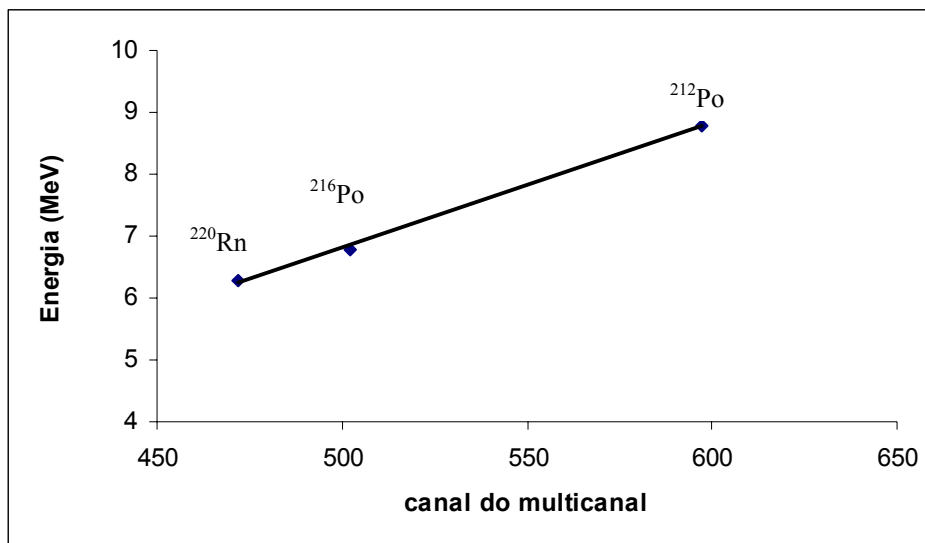


Figura 5.10: Espectro do  $^{232}\text{U}$ .

A partir da análise do espectro e recorrendo a uma tabela de isótopos [64] obtiveram-se os valores constantes na tabela 5.1, com os quais se fez a recta de calibração (figura 5.11). O pico assinalado no gráfico da figura 5.10 como sendo  $^{224}\text{Ra}$  corresponde a vários picos muito próximos com vários valores de energia, daí que não tenha sido utilizado para a calibração do sistema.

**Tabela 5.1: Dados referentes ao  $^{232}\text{U}$  necessários para o traçado da recta de calibração.**

Espectro do $^{232}\text{U}$		
Fonte	Energia (MeV)	Canal
$^{220}\text{Rn}$	6,287	472
$^{216}\text{Po}$	6,777	502
$^{212}\text{Po}$	8,785	597



**Figura 5.11: Recta de calibração.**

A equação da recta de calibração é:

$$\text{Energia} = (0,02026 \pm 0,00005) \times \text{canal} - (3,32 \pm 0,04) \quad (\text{MeV})$$

### 5.3. Experimentação

Após a calibração do sistema, retirámos do gerador de radão (figura 5.12) um pedaço de uma folha de alumínio a qual foi colocada de seguida dentro da câmara de vácuo.



**Figura 5.12: Gerador de radão.**

Iniciou-se o vácuo e a aquisição de dados tendo-se obtido o espectro de energia de partículas alfa, com fundo, representado na figura 5.13.

A partir da consulta da tabela de isótopos [64] chegamos à identificação dos isótopos que estão presentes na folha de alumínio:  $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Po}$ .

**Tabela 5.2: Identificação dos nuclídeos presentes na folha de alumínio.**

Folha de alumínio			
Canal	Valor experimental Energia (MeV)	Valor tabelado Energia (MeV)	Isótopo
441	$5,64 \pm 0,08$	6,002	$^{218}\text{Po}$
545	$7,72 \pm 0,09$	7,686	$^{214}\text{Po}$

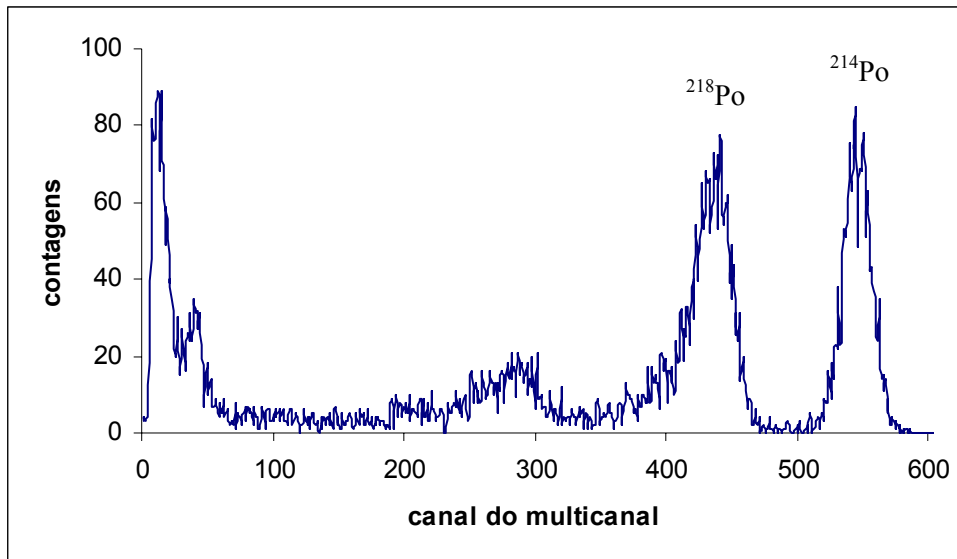


Figura 5.13: Espectro da folha de alumínio.

Pode-se concluir que o detector é eficiente pois detecta bem as partículas.

Como se verificou que o detector tinha ruído optou-se por não se fazer a detecção de electrões uma vez que a sua energia é pequena e, conseqüentemente, o seu sinal também ser pequeno.

## **Capítulo 6: Actividades Experimentais**

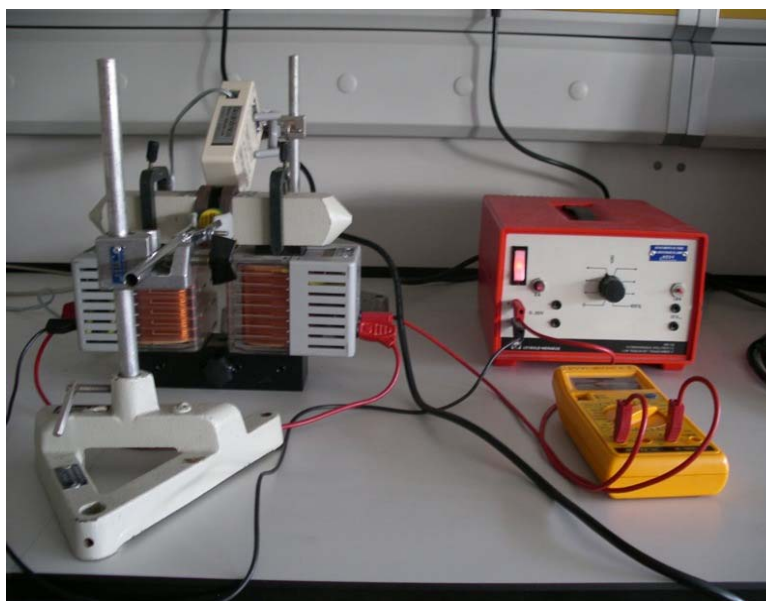
Neste capítulo apresenta-se um conjunto de experiências possíveis de serem realizadas em escolas com ensino secundário. Na maior parte destas experiências é utilizado o detector Geiger, o mais acessível às escolas em termos económicos. Nos anexos 1 e 2 encontram-se protocolos de experiências onde é utilizado o detector Geiger.

### **6.1. Deflexão da radiação emitida por uma fonte radioactiva num campo electromagnético.**

Esta experiência tem como objectivo verificar a existência ou não de deflexão (desvio) de diferentes tipos de radiação num campo magnético.

Para a realização desta experiência foram utilizadas as fontes radioactivas  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{204}\text{Tl}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{241}\text{Am}$ , a qual está blindada a alfas, um sistema de aquisição automática do contador Geiger, um electroímã e um amperímetro.

Nesta experiência colocou-se o detector em três posições diferentes relativamente à fonte radioactiva, nomeadamente, a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  e procedeu-se à aquisição das contagens para as diferentes fontes radioactivas referidas. O tempo de aquisição para cada situação foi de 1 minuto. O fundo é de 15 contagens por minuto.



**Figura 6.1: Fotografia da montagem experimental.**



As figuras 6.2 à 6.5 mostram os gráficos, em escala semi-logarítmica, do número de contagens por minuto em função da intensidade de corrente no electroíman, com o fundo subtraído, para cada uma das fontes de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{204}\text{Tl}$  e  $^{241}\text{Am}$ , respectivamente, e para os três ângulos referidos.

O erro do número de contagens,  $\sigma_x$ , foi determinado a partir da seguinte equação:

$$\sigma_x = \sqrt{x_i} \quad (6.1)$$

sendo  $x_i$  o número de contagens durante 1 minuto.

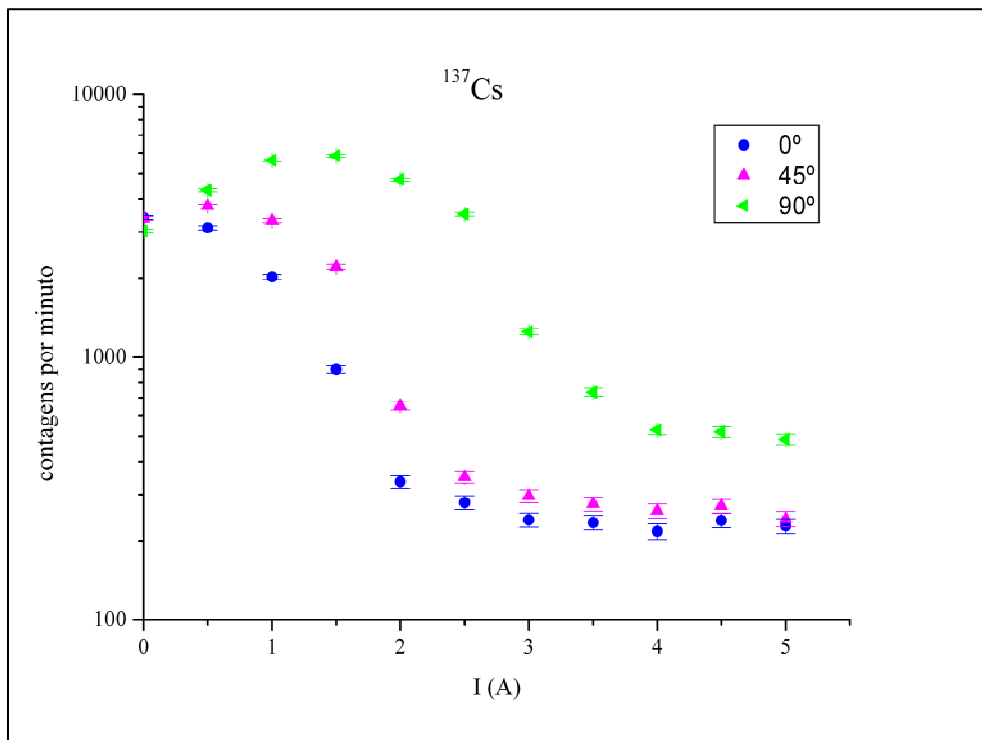


Figura 6.2: Contagens por minuto de  $^{137}\text{Cs}$  em função da intensidade de corrente no electroíman para diferentes ângulos entre a fonte e o detector.

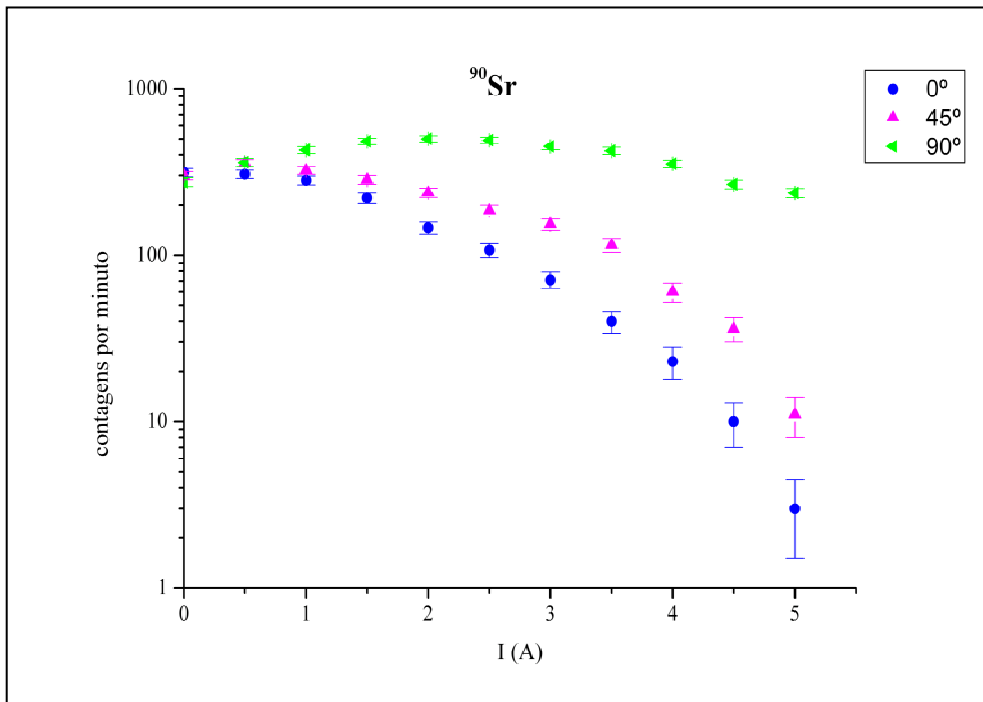


Figura 6.3: Contagens por minuto de  $^{90}\text{Sr}$  em função da intensidade de corrente no electroímã para diferentes ângulos entre a fonte e o detector.

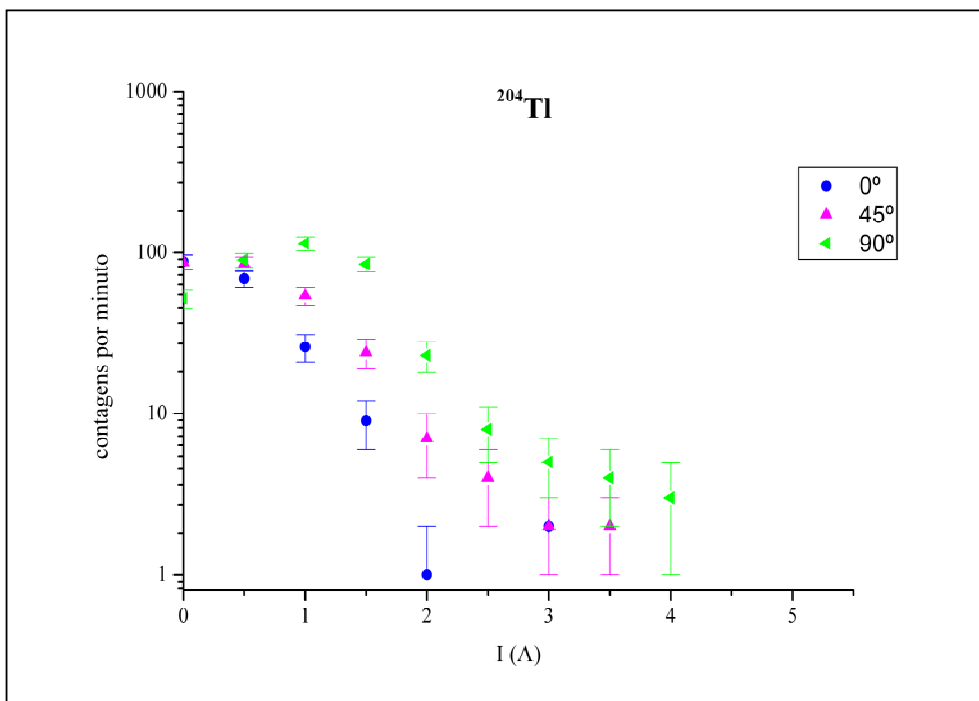
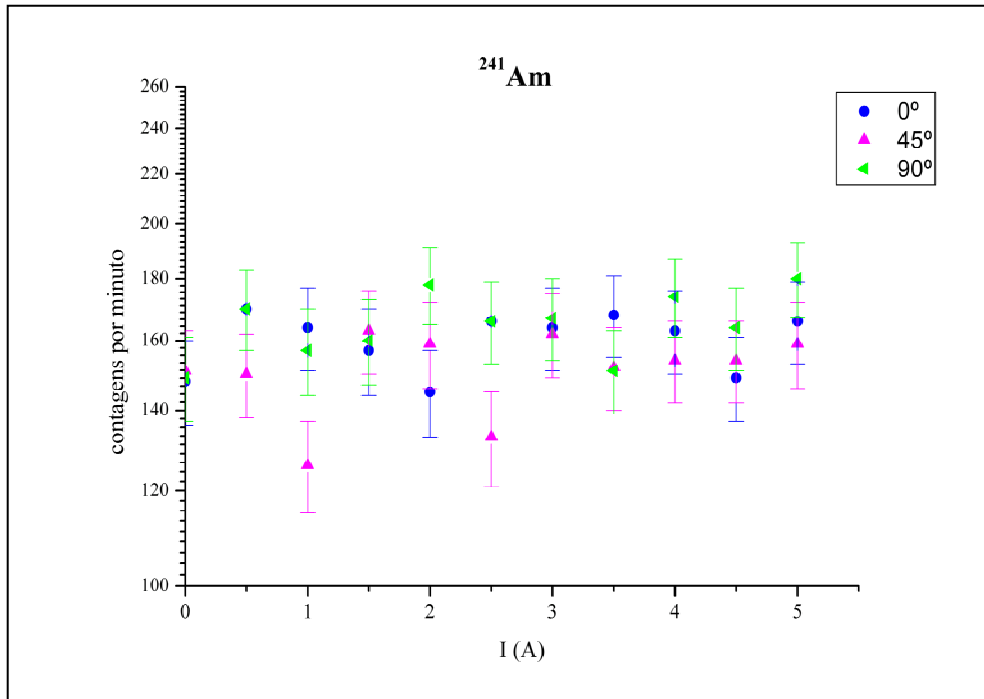


Figura 6.4: Contagens por minuto de  $^{204}\text{Tl}$  em função da intensidade de corrente no electroímã para diferentes ângulos entre a fonte e o detector.



**Figura 6.5:** Contagens por minuto de  $^{241}\text{Am}$  em função da intensidade de corrente no electroímã para diferentes ângulos entre a fonte e o detector.

A partir da análise dos diferentes gráficos podemos concluir que as radiações de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{204}\text{Tl}$  sofrem deflexão (desvio) ao atravessar o campo magnético enquanto que a radiação de  $^{241}\text{Am}$  não sofre. A radiação de  $^{204}\text{Tl}$  é a que sofre maior deflexão (a partir de  $I = 2,5$  A o número de contagens por minuto é praticamente zero) enquanto que a de  $^{90}\text{Sr}$  é a que sofre menos deflexão, o que é explicável pelo facto da energia das radiações das fontes ser diferente; quanto maior for a energia da fonte radioactiva menor é a deflexão. A energia da radiação  $\beta^-$  destas fontes variam da seguinte forma:

$^{90}\text{Sr}$  (546 keV) em equilíbrio com o  $^{90}\text{Y}$  (2280 keV) >  $^{137}\text{Cs}$  (1176 keV) >  $^{204}\text{Tl}$  (764 keV)

No caso das fontes de  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{204}\text{Tl}$  verifica-se que à medida que a intensidade de corrente no electroímã aumenta o número de contagens por minuto diminui enquanto que no caso da fonte de  $^{137}\text{Cs}$  tal não acontece. A partir de  $I = 3,0$  A verifica-se que o número de contagens por minuto é praticamente constante o que significa que existem dois tipos de radiação:  $\gamma + \beta$ .

As fontes utilizadas são isotrópicas o que significa que emite em todas as direcções. Apesar disso, verifica-se que quando o electroímã é atravessado por

corrente e quando o detector se encontra a  $45^\circ$  relativamente à fonte o número de contagens por minuto das diferentes radiações  $\beta$  é maior do que quando o detector se encontra a  $0^\circ$ , o que é indicador da maior deflexão dos electrões numa trajectória curvilínea.

Quando o detector se encontra a  $90^\circ$ , relativamente à fonte, verifica-se que o número de contagens das diferentes radiações  $\beta$  ainda é maior o que confirma mais uma vez a deflexão dos electrões descrevendo estes uma trajectória curvilínea.

Em ambos os casos a deflexão das radiações faz-se até um valor máximo de corrente eléctrica a partir do qual há uma diminuição brusca na detecção dos electrões o que pode ser explicado se atendermos ao facto de que o aumento da intensidade de corrente eléctrica provoca um aumento do valor do campo magnético tendo como consequência uma deflexão ainda maior não permitindo ser detectado pelo detector na posição em que está.

Nesta experiência não foram utilizadas fontes alfa uma vez que estas são facilmente absorvidas pelo ar.

## 6.2. Estudo da taxa de contagens com a distância

Esta experiência tem como objectivo verificar experimentalmente a relação inversa entre a taxa de contagens e o quadrado da distância da fonte radioactiva ao detector Geiger.

Fez-se o estudo da taxa de contagem para diferentes distâncias entre a fonte e o detector tendo sido utilizada uma fonte de radiação gama:  $^{60}\text{Co}$ .

A figura 6.6 mostra a fotografia da experiência realizada no laboratório para duas distâncias diferentes entre a fonte e o detector. Nesta experiência foi utilizado um sistema de aquisição automática do contador Geiger.

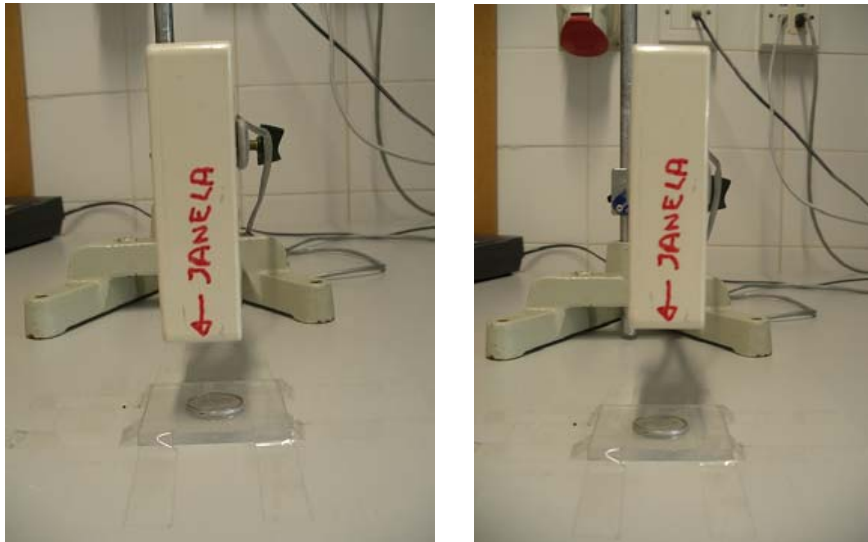


Figura 6.6: Aquisição de contagens para distâncias diferentes entre a fonte e o detector.

Fez-se a aquisição durante 5 minutos para cada distância entre a fonte e o detector. Na tabela 6.1 estão registadas as distâncias estudadas e os respectivos valores médios das taxas de contagens subtraída do fundo, cujo valor é de 16 contagens por minuto. Estes valores estão representados no gráfico da figura 6.7. A tabela 6.1 apresenta ainda o resultado dos cálculos efectuados para o inverso da distância ao quadrado ( $1/d^2$ ) necessários para o traçado do gráfico da figura 6.8.

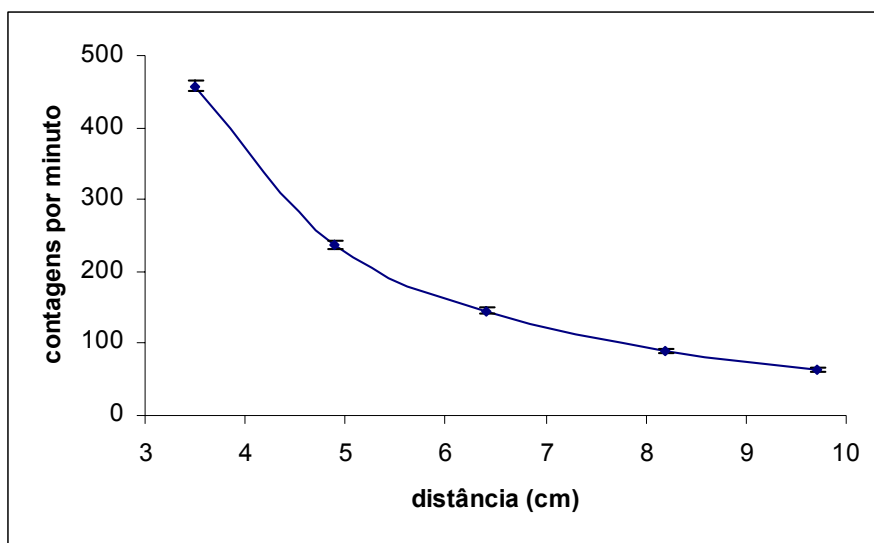
O erro da taxa de contagens,  $\sigma_x$  (contagens/min), foi determinado a partir da seguinte equação:

$$\sigma_x = \frac{1}{t} \sqrt{x_i} \quad (6.2)$$

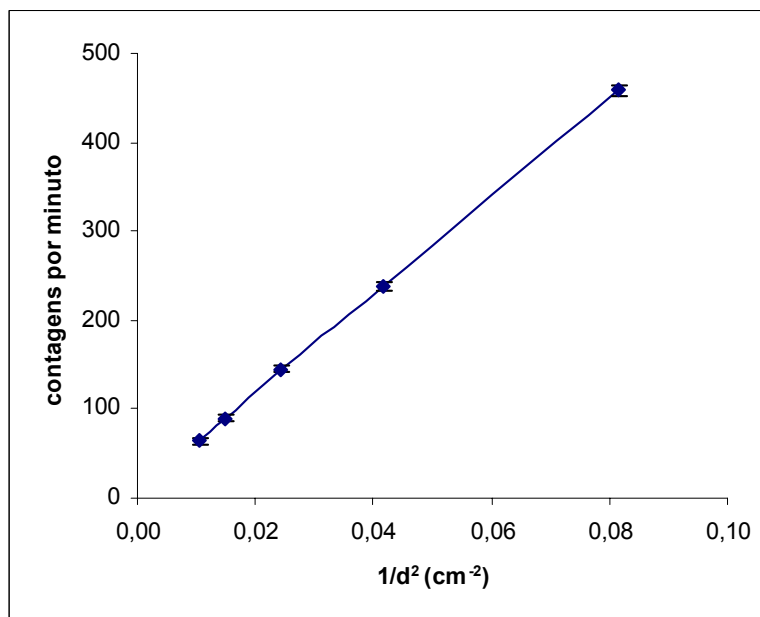
sendo  $t$  o tempo ( $t = 5$  minutos) e  $x_i$  o número de contagens em 5 minutos.

**Tabela 6.1:** Valor médio da taxa de contagens de  $^{60}\text{Co}$  em função da distância da fonte ao detector e valores do inverso do quadrado da distância ( $1/d^2$ ).

Distância fonte-detector (cm)	Valor médio da taxa de contagem (contagens por minuto)	$1/d^2$ ( $\text{cm}^{-2}$ )
3,5	$458 \pm 7$	0,082
4,9	$237 \pm 5$	0,042
6,4	$145 \pm 4$	0,024
8,2	$90 \pm 3$	0,015
9,7	$64 \pm 3$	0,011



**Figura 6.7:** Valor médio da taxa de contagens de  $^{60}\text{Co}$  em função da distância.



**Figura 6.8:** Valor médio da taxa de contagem de  $^{60}\text{Co}$  em função do inverso do quadrado da distância.

Como se pode observar a partir da análise do gráfico da figura 6.7, a representação é típica da proporcionalidade inversa, o que é confirmado pela representação do gráfico da figura 6.8. Os resultados obtidos permitem verificar experimentalmente a **Lei do Inverso do Quadrado da Distância**.

Verificou-se experimentalmente que para distâncias muito pequenas o detector GM satura e que para distâncias muito grandes começa a ter problemas de ruído (fundo).

Nesta experiência utilizou-se uma fonte de radiação gama uma vez que as fontes de radiação alfa e beta são facilmente paradas pelo ar, alterando o resultado final.

### 6.3. Estudo da atenuação da radiação gama na matéria

Esta experiência tem como objectivo verificar o efeito do aumento da espessura de folhas de diferentes materiais na atenuação da radiação gama. Outro objectivo é concluir sobre qual será o melhor material a utilizar quando for necessário proteger-nos de radiação gama.

Nesta experiência foram utilizadas folhas de alumínio e de chumbo com diferentes espessuras e um sistema de aquisição automática do contador Geiger, tal como se pode observar nas figuras seguintes.

A fonte de radiação gama utilizada foi a de  $^{137}\text{Cs}$ . O  $^{137}\text{Cs}$  apresenta duas riscas com energias de 32 keV e 662 keV, as quais apresentam atenuações diferentes. Os fotões de 32 keV são atenuados mais facilmente que os fotões de 662 keV.



**Figura 6.9: Folha de alumínio.**



**Figura 6.10: Folha de chumbo.**



**Figura 6.11: Fotografia da montagem.**



Foi feita a aquisição de contagens durante 5 minutos para cada folha de espessura diferente. Subtraiu-se o fundo cujo valor é de 16 contagens por minuto e calculou-se o valor médio das contagens.

O erro da taxa de contagens,  $\sigma_x$ , foi determinado tal como na experiência anterior.

As folhas de alumínio e de chumbo utilizadas estão calibradas em  $(x \times \rho)$ , em que  $x$  é o comprimento e  $\rho$  a densidade.

Para a determinação da espessura das folhas utilizaram-se as respectivas densidades:

$$\rho_{\text{alumínio}} = 2,7 \text{ g/cm}^3 ; \rho_{\text{chumbo}} = 11,3 \text{ g/cm}^3$$

Exemplo para o alumínio:

$$\text{espessura da folha de alumínio} = \frac{65 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2}{2,7 \text{ g/cm}^3} = 0,02 \text{ cm}$$

Exemplo para o chumbo:

$$\text{espessura da folha de chumbo} = \frac{0,6 \text{ g/cm}^2}{11,3 \text{ g/cm}^3} = 0,05 \text{ cm}$$

As figuras 6.12 e 6.13 mostram a representação gráfica do valor médio da taxa de contagens de  $^{137}\text{Cs}$  em função da espessura das folhas de alumínio e de chumbo, respectivamente.

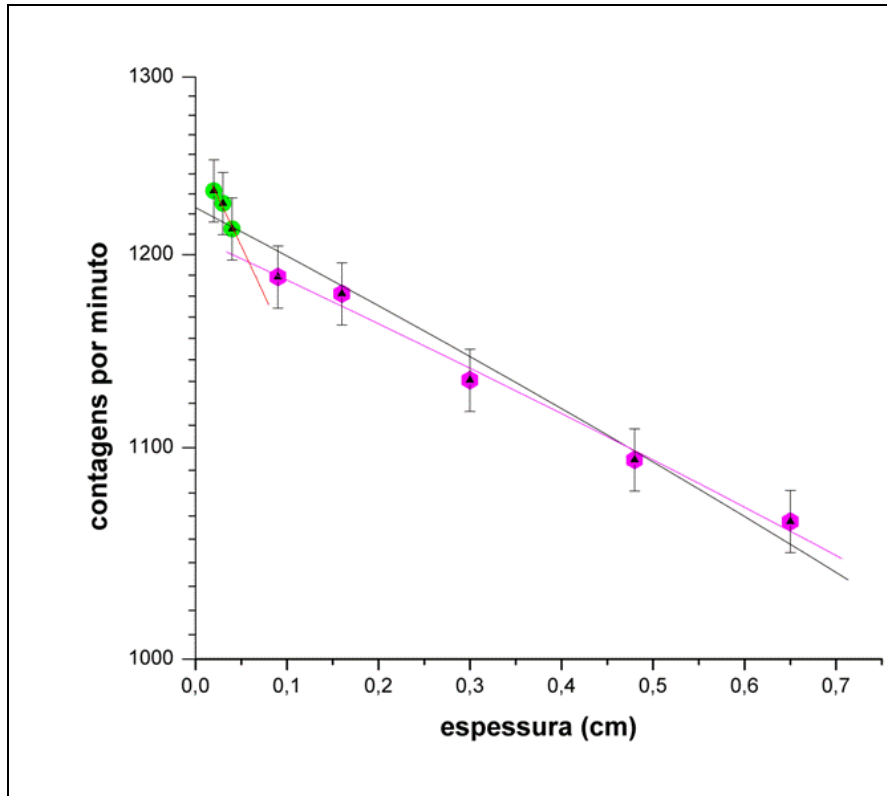


Figura 6.12: Valor médio da taxa de contagens de  $^{137}\text{Cs}$  em função da espessura de folhas de alumínio.

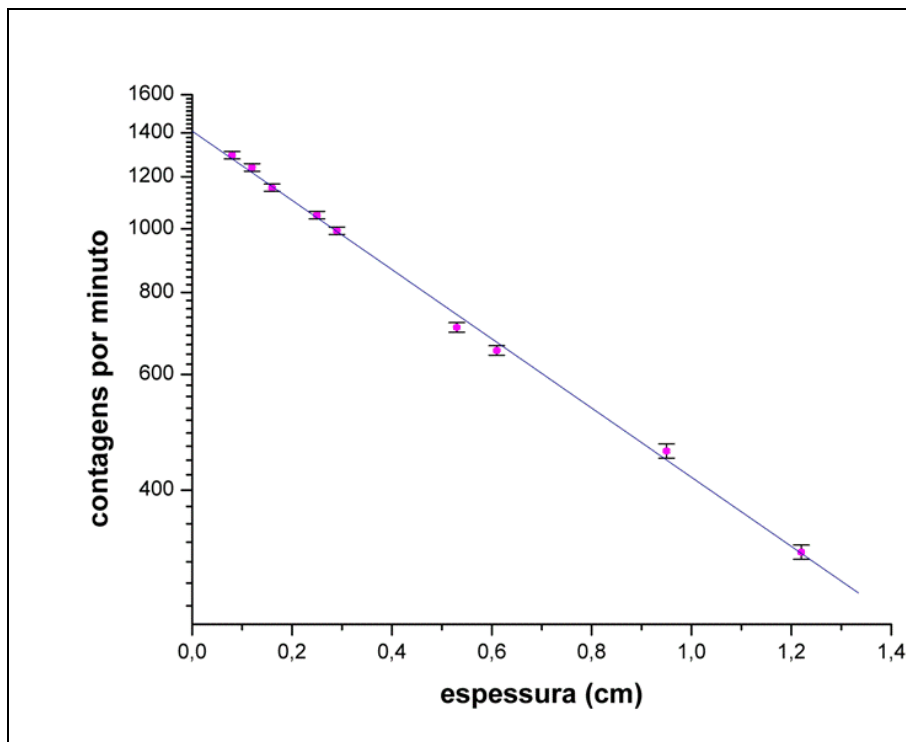


Figura 6.13: Valor médio da taxa de contagens de  $^{137}\text{Cs}$  em função da espessura de folhas de chumbo.

Como se pode observar em ambos os gráficos verifica-se a atenuação da radiação gama ao colocarmos folhas, quer de alumínio quer de chumbo, de diferentes espessuras entre a fonte e o receptor. É de referir que as folhas de alumínio foram colocadas a uma distância ligeiramente maior que as folhas de chumbo em relação ao detector.

Verifica-se que à medida que a espessura das folhas dos diferentes materiais aumenta a atenuação também aumenta. Nos gráficos em representação semi-logarítmica é bem patente o decrescimento exponencial da intensidade dos fótons que conseguem atravessar a folha.

O facto do  $^{137}\text{Cs}$  ter duas riscas tem como consequência o gráfico apresentar duas exponenciais com declives diferentes. A exponencial correspondente à energia de 32 keV é atenuada mais depressa que a correspondente à de 662 keV. Também se observa que a atenuação é mais rápida no caso do chumbo que no alumínio.

Atendendo aos resultados obtidos pode-se concluir que o melhor material para efeitos de radioprotecção da radiação gama é o chumbo.

#### 6.4. Determinação do tempo de meia-vida do protactínio-234 (metaestável)

Nesta experiência pretende-se determinar o tempo de meia-vida de um nuclídeo radioactivo. No caso em que a vida média de um nuclídeo radioactivo é da ordem de alguns minutos, torna-se possível fazer a sua determinação no Laboratório, desde que seja possível produzir o isótopo radioactivo. O protactínio-234 metaestável ( $^{234m}\text{Pa}$ ) é um isótopo que se encontra nestas condições. O  $^{234m}\text{Pa}$  pertence à série do urânio-rádio, desintegra-se por via  $\beta^-$  sendo o tempo de meia-vida do estado metaestável apenas de 1,17 minuto (70,7 s).

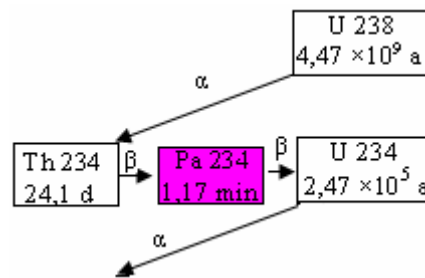


Figura 6.14: Extracto da série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ .

Nesta experiência utilizou-se um gerador de protactínio o qual é constituído por dois líquidos não miscíveis. No líquido mais denso encontra-se dissolvido um sal de urânio. O segundo líquido é um solvente dos sais do protactínio. Agitando o frasco que contém as duas soluções, o segundo líquido vai dissolver os sais de protactínio (mas não os de urânio ou tório). Quando o gerador é colocado de novo na posição vertical, uma parte dos sais de protactínio passaram para o segundo soluto, que agora se encontra na parte superior do gerador. Consegue-se assim fazer a separação entre o urânio-tório e o protactínio. Dado que as radiações  $\alpha$  e  $\beta$  emitidas pelo urânio e tório respectivamente, não são suficientemente penetrantes para poderem atravessar a camada de líquido, o detector vai apenas registar as desintegrações devidas ao protactínio [65].

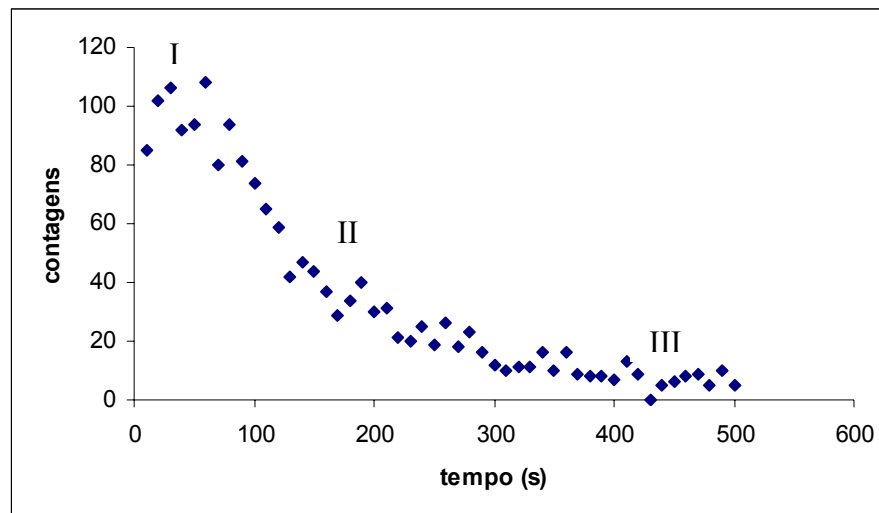
Nesta experiência foi usado um sistema de aquisição automática do contador Geiger tendo sido escolhido um intervalo de tempo de acumulação de contagens de 10 segundos.

Começou-se por agitar o gerador durante alguns segundos sendo posteriormente colocado na vertical debaixo da janela do detector GM, tal como se pode observar na figura 6.15. Após cerca de 30 segundos iniciou-se o sistema de aquisição durante cerca de 8 minutos. Foram realizados 3 ensaios.



**Figura 6.15: Fotografia da montagem experimental.**

O gráfico da figura 6.16 regista o número de contagens com fundo em função do tempo para o 1.º ensaio. Como se pode observar existem três regiões distintas: a região I onde se verifica existir alguma instabilidade do número de contagens, a região II, a designada região de interesse onde se observa uma curva exponencial decrescente e a região III onde os valores das contagens são, em média, aproximadamente constantes (fundo). Estima-se o valor do fundo determinando o valor médio das contagens nesta região do espectro.



**Figura 6.16: Espectro temporal do  $^{234m}\text{Pa}$ .**

O gráfico da figura 6.17 representa o número de contagens, com o fundo subtraído, em função do tempo para a região II (região de interesse) e os respectivos erros (1.º ensaio). O valor médio do fundo é de 6 contagens por minuto.

O erro do número de contagens foi determinado a partir equação 6.1.

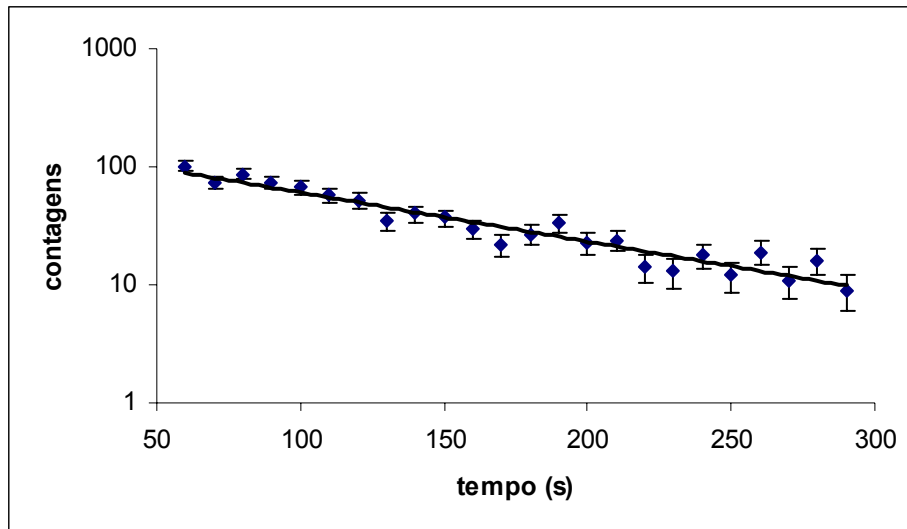


Figura 6.17: Espectro temporal do  $^{234m}\text{Pa}$  para a região de interesse, com o eixo dos yy em escala logarítmica.

Recorrendo a um programa que utiliza o método dos mínimos quadrados obteve-se o tempo de meia-vida do  $^{234m}\text{Pa}$  para os 3 ensaios realizados, os quais se encontram registados na tabela 6.2.

Tabela 6.2: Tempo de meia-vida do  $^{234m}\text{Pa}$  para 3 ensaios.

Ensaio	Tempo de meia-vida do $^{234m}\text{Pa}$ (s)
1	$70,7 \pm 3,6$
2	$72,1 \pm 5,1$
3	$72,1 \pm 3,0$

O valor estimado para o tempo de meia-vida do  $^{234m}\text{Pa}$  está registado na tabela 6.3.

Tabela 6.3: Tempo de meia-vida do  $^{234m}\text{Pa}$  estimado experimentalmente.

Tempo de meia-vida do $^{234m}\text{Pa}$ (s)
$71,6 \pm 2,1$

O valor do tempo de meia-vida do  $^{234m}\text{Pa}$  estimado experimentalmente encontra-se próximo do valor tabelado, 70,7 s [64], pelo que se pode concluir que a experiência atingiu o objectivo proposto.

## 6.5. Radioactividade em rochas

### a. Detector Geiger-Müller

Muitos materiais da crosta terrestre são radioactivos pois possuem concentrações de variadíssimos radionuclídeos como, por exemplo, urânio e os seus descendentes ou tório e os seus descendentes. Os isótopos radioactivos de longa-vida, como o urânio e o tório, estão presentes nos materiais que nos rodeiam e que se formaram com a Terra há  $4,5 \times 10^9$  anos, como é o caso das rochas.

Esta experiência tem como objectivo estudar a radioactividade natural, neste caso em rochas. A rocha utilizada foi recolhida na zona centro do País onde se sabe existirem rochas graníticas com elevado nível de radioactividade. As figuras 6.18 (a) e (b) mostram a experiência realizada no laboratório, a primeira mostra um pedaço de rocha e a segunda a mesma rocha mas reduzida a pó.

Nesta experiência foi usado um sistema de aquisição automática do contador Geiger. A aquisição foi feita em intervalos de 1 minuto durante 10 minutos.



(a) (b)  
Figura 6.18: Fotografia da experiência – a) rocha; b) rocha em pó.

Na tabela 6.4 encontram-se registados o valor médio da taxa de contagens para o fundo, para a rocha e para a rocha reduzida a pó subtraído do fundo. O erro da taxa de contagens foi determinado a partir da equação 6.2.

**Tabela 6.4: Valor médio das contagens por minuto para o fundo, para a rocha e para a rocha reduzida a pó subtraído do fundo.**

Valor médio das contagens por minuto do fundo	Valor médio das contagens por minuto da rocha	Valor médio das contagens por minuto da rocha em pó
$15 \pm 1$	$301 \pm 5$	$295 \pm 5$

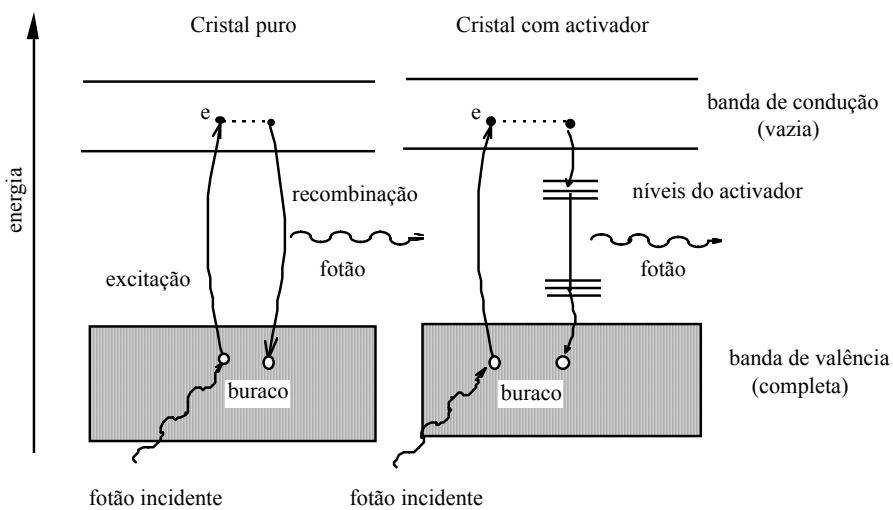
Como se pode observar a partir dos valores registados na tabela 6.4 o número de contagens da rocha utilizada no nosso estudo é bastante superior ao do fundo pelo que se pode concluir que a rocha é radioactiva. O facto de ter sido reduzida a pó não alterou significativamente o número de contagens por minuto.

A utilização do detector GM permite-nos concluir sobre a radioactividade da rocha mas não sobre a possível existência de diferentes tipos de radiação.

**b. Espectroscopia gama com detector de NaI(Tl)**

Como foi referido na experiência anterior o detector Geiger-Müller apenas detecta a existência de isótopos radioactivos não fazendo a distinção dos diferentes tipos de radiação. O detector de NaI(Tl) permite detectar e distinguir pequenas percentagens de nuclídeos radioactivos.

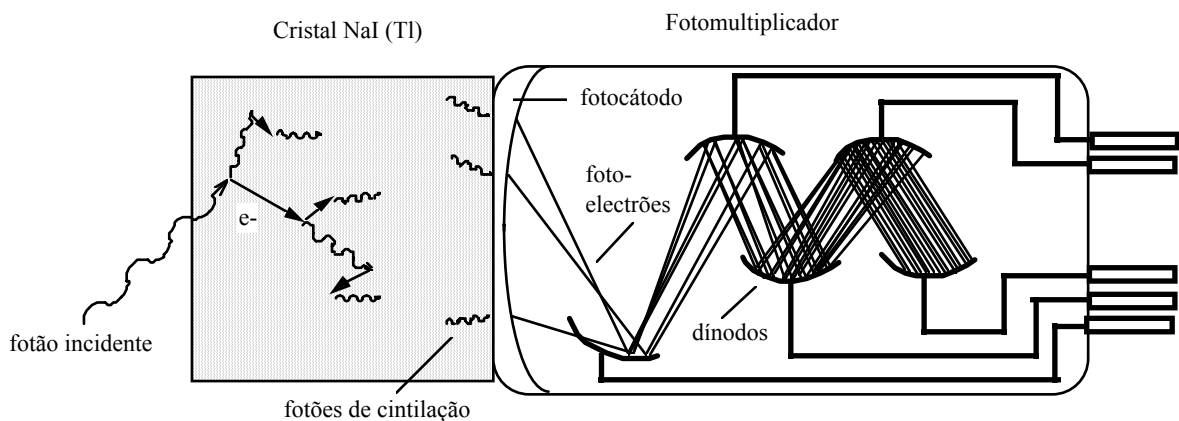
O iodeto de sódio é um material que se pode apresentar na forma cristalina e que ao absorver radiações ionizantes emite fotões de cintilação. Na figura 6.19 está representado esquematicamente a situação de absorção de um fotão de energia elevada ( $E > 10 \text{ keV}$ ).



**Figura 6.19: Esquematisação da absorção de um fotão de energia elevada (adaptado de [10]).**



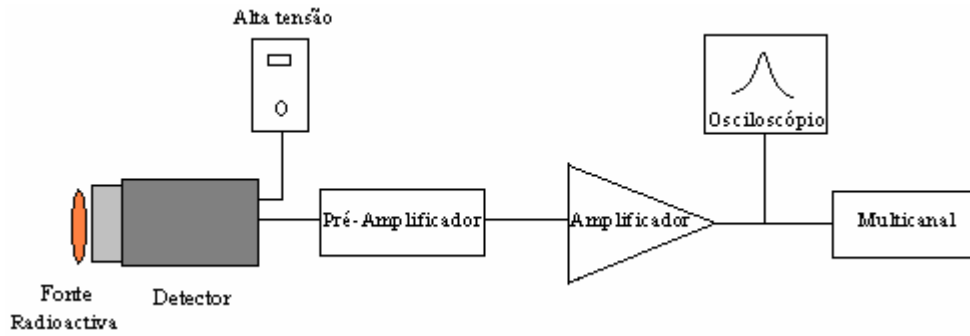
Num cristal puro, a energia da radiação incidente absorvida é cedida aos electrões da banda de valência, sendo estes excitados para a banda de condução (que inicialmente se encontra vazia). Quando os electrões da banda de condução se desexcitam emitem um fóton. Este fóton (de cintilação) tem uma energia que é igual à energia perdida pelo electrão quando transitou da banda de condução para a banda de valência. Por esse motivo pode ser absorvido por um electrão da banda de valência, que passará para a banda de condução. Desta forma o cristal torna-se opaco à sua radiação de cintilação sendo pequena a quantidade de luz que sai. Para contornar esta situação utilizam-se pequenas quantidades de um material, chamado activador que no caso do NaI é o tálio. A função do activador é o de criar níveis de energia ligeiramente acima da banda de valência e ligeiramente abaixo da banda de condução. Normalmente estes níveis de energia encontram-se vazios, mas quando um electrão é promovido para a banda de condução, pode agora passar em primeiro lugar para um dos níveis abaixo da banda de condução. De seguida o electrão pode passar para os níveis acima da banda de valência emitindo o fóton de cintilação e, finalmente, regressar à banda de valência. Agora o fóton de cintilação não possui energia suficiente para fazer a transição de um electrão da banda de valência para a de condução, não podendo ser absorvido por esse processo. O cristal é transparente para estes fótons, que assim conseguem atravessá-lo chegando ao fotomultiplicador. No caso do NaI(Tl) o comprimento de onda dos fótons emitidos situa-se numa banda com o máximo nos 410 nm. [10]



**Figura 6.20: Esquema de operação do fotomultiplicador (adaptado de [10]).**

À saída do fotomultiplicador o sinal em corrente é convertido num sinal em tensão.

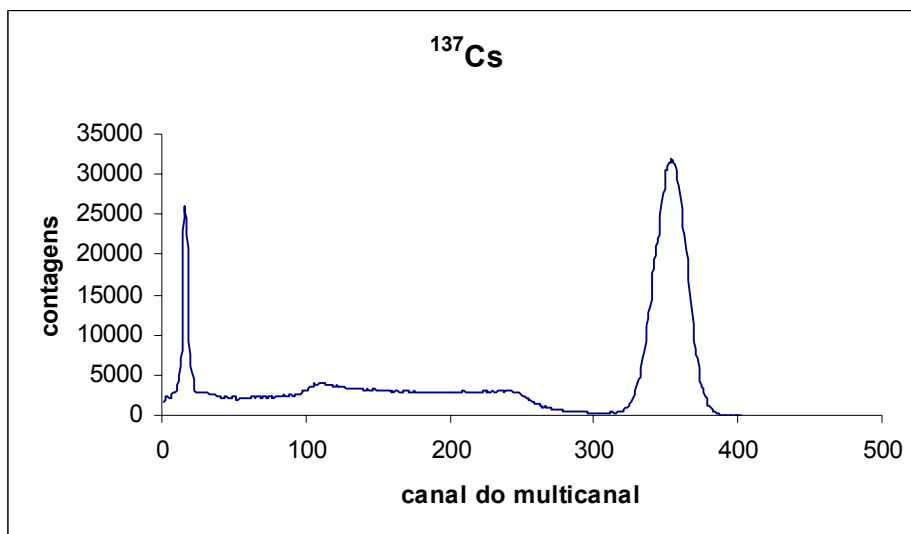
A figura 6.21 mostra o esquema de montagem do detector NaI(Tl).



**Figura 6.21: Esquema de montagem do detector NaI(Tl).**

Nesta experiência utilizou-se a rocha reduzida a pó da experiência anterior.

Começou-se por calibrar em energia o sistema de detecção. Para tal recorreu-se a fontes radioactivas conhecidas, tais como  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ . As figuras 6.22 e 6.23 representam os espectros do  $^{137}\text{Cs}$  e do  $^{60}\text{Co}$ , com o fundo subtraído, respectivamente.



**Figura 6.22: Espectro do  $^{137}\text{Cs}$ .**

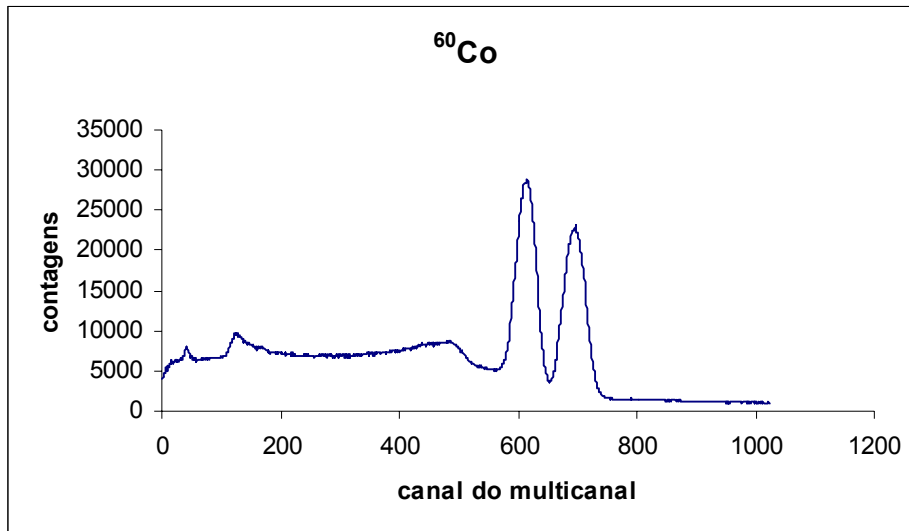


Figura 6.23: Espectro do  $^{60}\text{Co}$ .

A partir da análise dos referidos espectros e recorrendo à tabela de isótopos [64] obtiveram-se os valores constantes na tabela 6.5, com os quais se fez a recta de calibração (figura 6.24).

Tabela 6.5: Calibração do sistema de detecção.

Calibração do sistema de detecção		
Fonte	Energia (MeV)	Canal
$^{137}\text{Cs}$	0,032	16
$^{137}\text{Cs}$	0,662	354
$^{60}\text{Co}$	1,173	618
$^{60}\text{Co}$	1,333	697

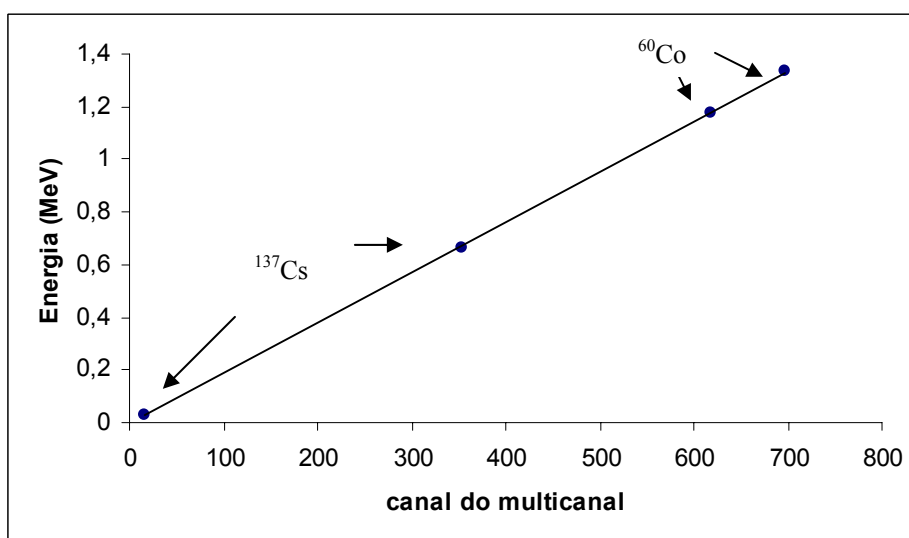


Figura 6.24: Recta de calibração.

A equação da recta de calibração é:

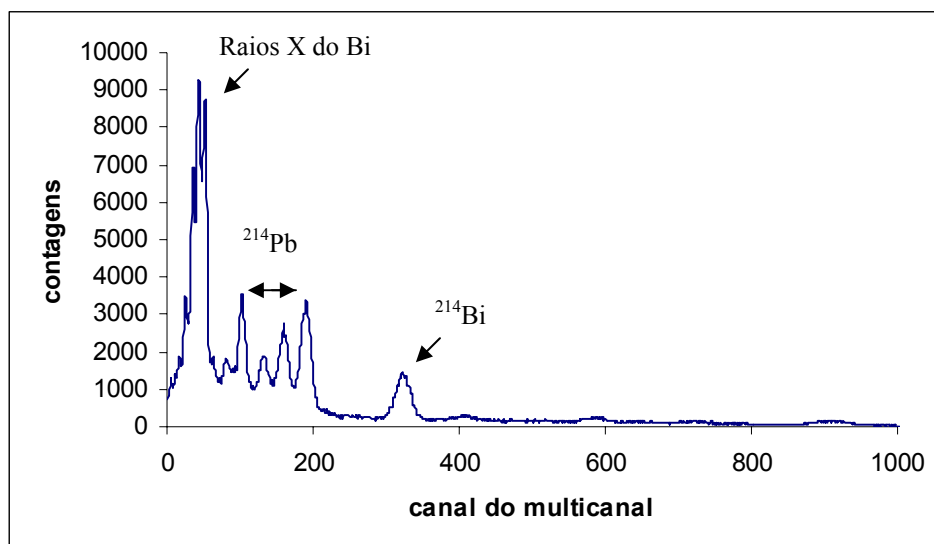
$$\text{Energia} = (191079 \times 10^{-7} \pm 2 \times 10^{-7}) \times \text{canal} - (368 \times 10^{-5} \pm 8 \times 10^{-5}) \quad (\text{MeV})$$

A partir da consulta de uma tabela de isótopos [64] chegamos à identificação dos isótopos que estão presentes na rocha.

**Tabela 6.6: Isótopos presentes na rocha radioactiva.**

Rocha radioactiva em pó			
Canal	Valor experimental Energia (MeV)	Valor tabelado Energia (MeV)	Isótopo
44	$0,080 \pm 0,002$	0,077	Raios X do Bi
132	$0,248 \pm 0,002$	0,242	$^{214}\text{Pb}$
159	$0,300 \pm 0,002$	0,295	$^{214}\text{Pb}$
189	$0,357 \pm 0,002$	0,352	$^{214}\text{Pb}$
321	$0,609 \pm 0,002$	0,609	$^{214}\text{Bi}$

A figura 6.25 representa o espectro da rocha em pó obtido com o fundo subtraído. O tempo de aquisição quer para a amostra quer para o fundo foi de 1 hora.

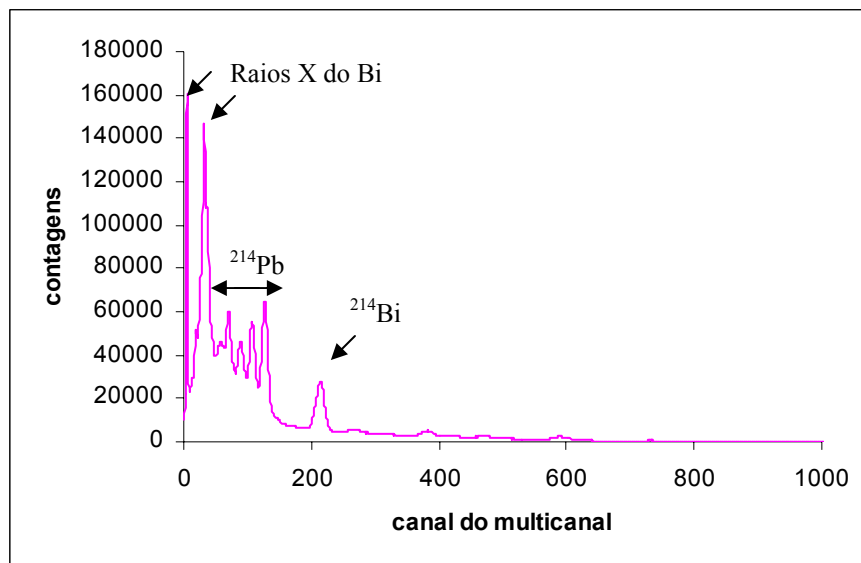


**Figura 6.25: Espectro da rocha em pó.**

Desta forma identificou-se três isótopos radioativos de  $^{214}\text{Pb}$ , o isótopo  $^{214}\text{Bi}$  e, ainda, raios X do Bismuto.

Com o detector de NaI(Tl) foi possível identificar os nuclídeos radioativos presentes na rocha estudada.

Repetiu-se o procedimento anterior quer para a calibração quer para a identificação dos nuclídeos presentes numa rocha recolhida na Mina da Cunha Baixa (Minas da Urgeiriça). A figura 6.26 mostra os nuclídeos identificados na rocha da Mina da Cunha Baixa.



**Figura 6.26: Espectro da rocha da Mina da Cunha Baixa.**

Ao observarmos os dois espectros verificamos que ambos identificam os mesmos nuclídeos descendentes do radão. No entanto, verifica-se que o espectro da rocha da Mina da Cunha Baixa apresenta um outro pico muito intenso (canal 5) correspondente ao raio X do Bismuto de menor energia (aproximadamente 10 keV).

Uma possível explicação poderá ser a existência de um afloramento do minério à superfície na rocha da Mina da Cunha Baixa tendo como consequência uma menor atenuação para efeitos de identificação.

## 6.6. Presença de gases radioactivos na atmosfera

O objectivo desta experiência é o de detectar a existência de gases radioactivos na atmosfera do interior de um edificio. Para tal utilizou-se um aspirador de uso corrente em nossas casas e um sistema automático do contador Geiger.

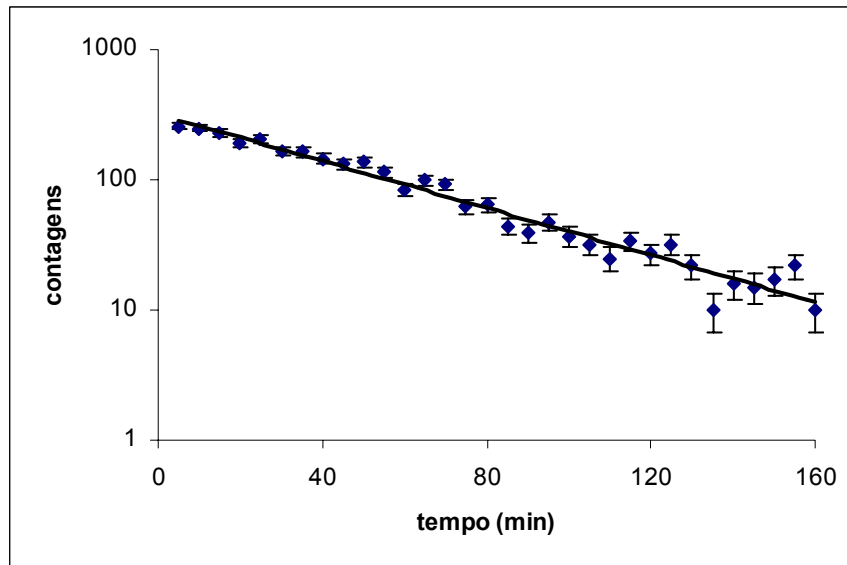
A experiência foi realizada numa sala anexa ao Laboratório de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL). O aspirador esteve a aspirar o ar durante 30 minutos com um lenço preso ao tubo de sucção. Após esse período de tempo colocou-se o lenço em frente à janela do detector, tal como se pode ver na figura 6.27.



**Figura 6.27:** Detecção da radioactividade num lenço de papel após 30 minutos de aspiração-FCUL.

A aquisição foi feita em intervalos de 1 minuto. O número de contagens ao fim do primeiro minuto foi de 65. Para cada contagem fez-se a subtracção do fundo cujo valor é 16 contagens por minuto. As contagens foram posteriormente agrupadas em intervalos de 5 minutos.

O gráfico da figura 6.28 representa as contagens agrupadas em intervalos de 5 minutos com o fundo subtraído e os respectivos erros. O erro do número de contagens foi calculado a partir da equação 6.1.



**Figura 6.28:** Curva de decaimento dos nuclídeos presentes no lenço de papel – FCUL, para aquisições de 5 minutos.

Esta experiência foi repetida na Escola Secundária de Casquilhos (ESC). O aspirador esteve a funcionar durante 15 minutos numa arrecadação da Escola. O número de contagens ao fim do primeiro minuto de aquisição foi de 849. O número de contagens do fundo nesta sala é de 18 contagens por minuto. Este valor é superior ao verificado nos Laboratórios de Física e de Química da ESC (15 contagens por minuto).



**Figura 6.29:** Aspirador e lenço utilizado na aspiração - ESC.

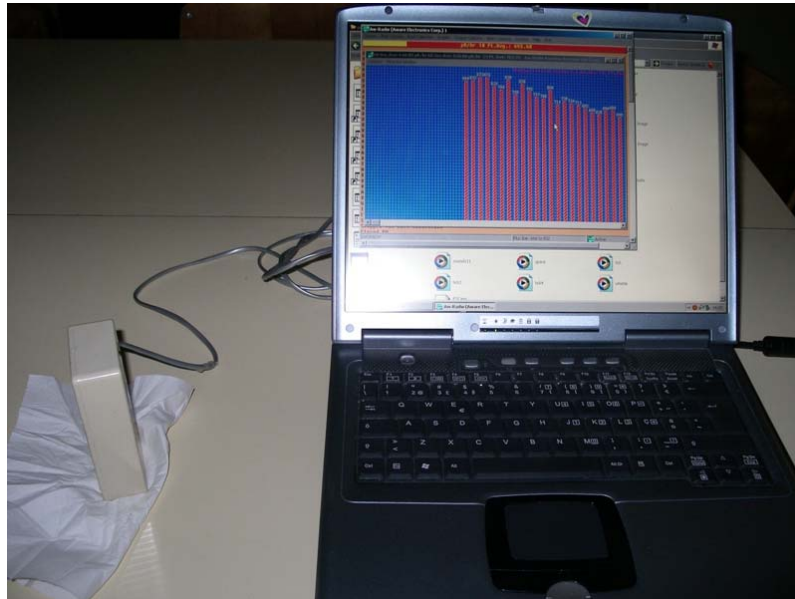


Figura 6.30: Detecção da radioactividade num lenço de papel após 15 minutos de aspiração - ESC.

O gráfico da figura 6.31 representa o número de contagens, agrupadas em intervalos de 5 minutos, em função do tempo e respectivos erros, na arrecadação da ESC.

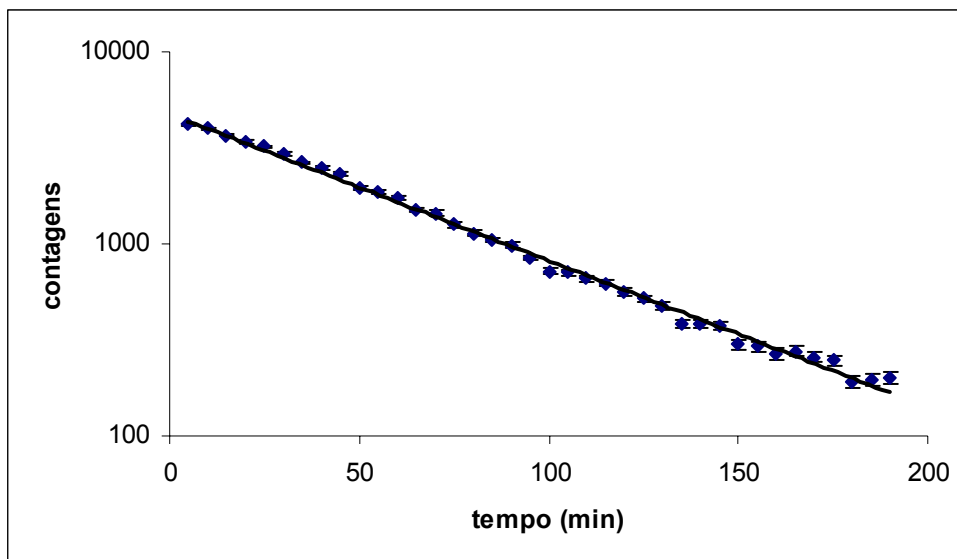
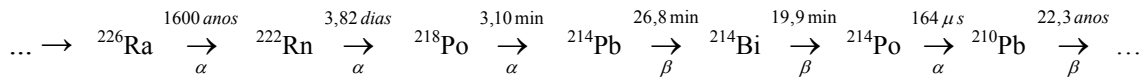


Figura 6.31: Curva de decaimento dos núclídeos presentes no lenço de papel – ESC, para aquisições de 5 minutos.

Tal como se pode observar no esquema seguinte, dois dos descendentes do radão decaem por emissão de radiação alfa ( $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Po}$ ) enquanto que outros dois decaem por emissão beta ( $^{214}\text{Pb}$  e  $^{214}\text{Bi}$ ).



O tempo de meia-vida do  $^{218}\text{Po}$  é de 3,10 min enquanto que o do  $^{214}\text{Pb}$  é de 26,8 min. O descendente  $^{214}\text{Pb}$  será o que contribui grandemente para a representação gráfica obtida.



Como se pode observar a representação gráfica (escala semi-logarítmica) traduz o decaimento radioactivo dos descendentes do radão cujo gás se encontra na atmosfera do interior do edificio (decaimento composto). Isto verifica-se porque quando se coloca o lenço debaixo do detector Geiger deixa de existir equilíbrio entre o radão e os seus descendentes ocorrendo assim o decaimento dos seus descendentes.

O número de contagens na ESC é muito superior ao verificado no Laboratório de Física da FCUL. A explicação poderá estar no facto da porta da arrecadação estar fechada na maior parte do tempo e de não existir qualquer abertura na mesma.

Como se sabe, em espaços abertos, o nível de concentração do radão é reduzido mas em espaços fechados, o radão libertado pelo solo e/ou materiais de construção atravessa as fendas nos pavimentos e paredes e acumula-se no ar podendo atingir níveis mais elevados e ser assim detectado através desta simples experiência.

O arejamento das casas é, pois, um procedimento importante a seguir a fim de evitar concentrações elevadas de radão no interior das casas.

### 6.7. Balões radioactivos

Esta experiência permite detectar a radioactividade dos descendentes do radão na atmosfera de um edifício, tal como a experiência anterior.

Para isso, utilizámos um balão de borracha o qual foi cheio com ar e friccionado com um pano do tipo pêlo de gato (figura 6.32). O balão electrizado foi posteriormente suspenso por um fio durante 1 hora dentro de uma sala anexa ao Laboratório de Física na FCUL.

Após esse período de tempo o balão foi esvaziado e colocado em frente à janela do detector Geiger (figura 6.33).



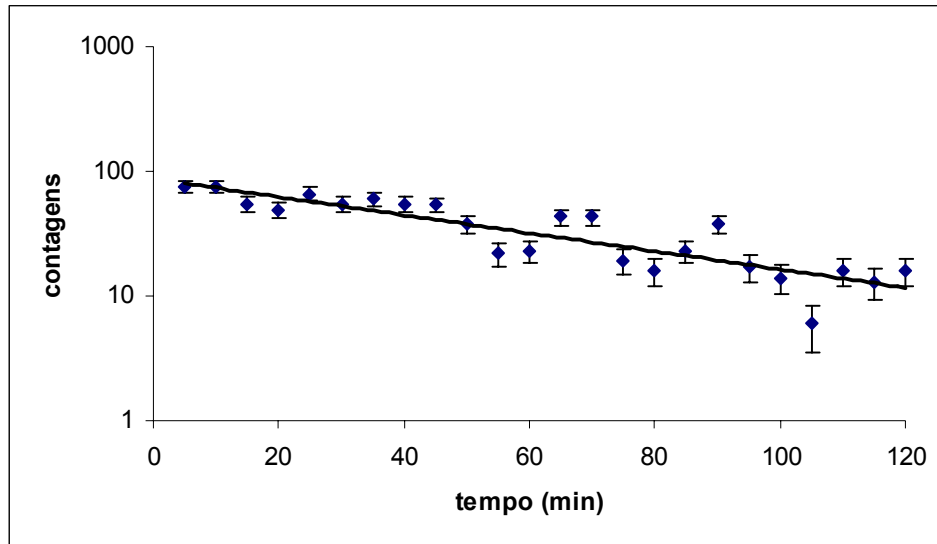
**Figura: 6.32:** Fotografia do balão cheio de ar e friccionado com um pano do tipo pêlo de gato, FCUL.



**Figura 6.33:** Fotografia da experiência - FCUL.

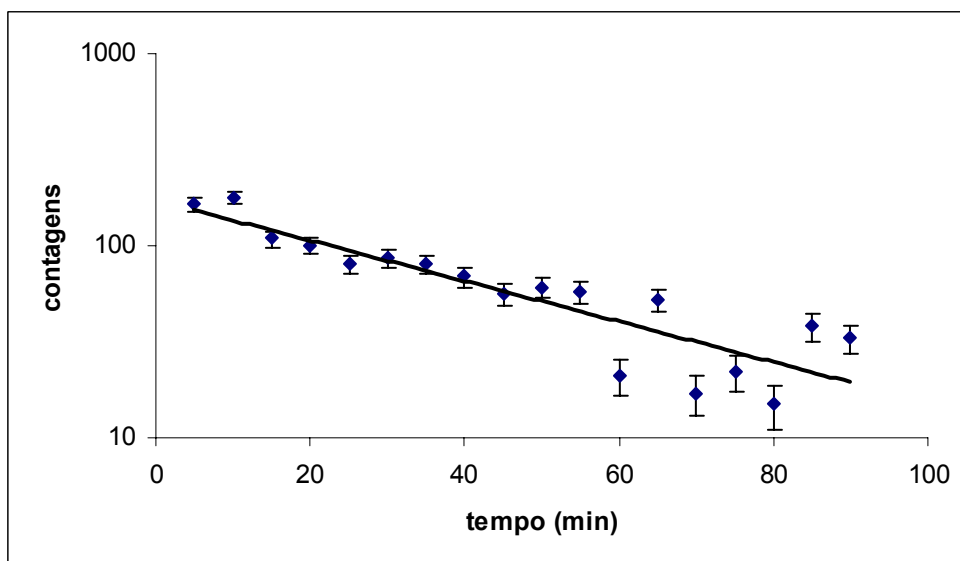
O número de contagens ao fim do primeiro minuto de aquisição foi de 22. O valor do fundo é de 15 contagens por minuto.

O gráfico seguinte representa as contagens agrupadas em intervalos de 5 minutos com o fundo subtraído e os respectivos erros os quais foram calculados a partir da equação 6.1.



**Figura 6.34:** Curva de decaimento dos nuclídeos presentes no “balão radioactivo” - FCUL, para aquisições de 5 minutos.

A experiência foi repetida na arrecadação da ESC referida na experiência anterior tendo-se verificado 52 contagens ao fim de 1 minuto de aquisição. O valor do fundo é de 15 contagens por minuto.



**Gráfico 6.35:** Decaimento dos nuclídeos presentes no “balão radioactivo”- ESC, para aquisições de 5 minutos.

Tal como na experiência anterior a representação gráfica, em escala semi-logarítmica, que se observa nas figuras 6.34 e 6.35 traduzem o decaimento de nuclídeos radioactivos descendentes do radão cujo gás se encontra na atmosfera do interior do edifício (decaimento composto).

O número de contagens na ESC é superior ao verificado na FCUL, o que pode ser explicado, tal como já foi referido na experiência anterior, pelo facto de tratar-se de uma arrecadação cuja porta é completamente fechada além de estar fechada a maior parte do tempo.

Com esta experiência consegue-se demonstrar a existência de radioactividade no balão e, conseqüentemente, na atmosfera das referidas salas.

Parece tratar-se de uma boa ideia para uma experiência a ser realizada numa escola secundária uma vez que alia o lado lúdico (balão de borracha) aos conceitos da radioactividade.

### 6.8. Amostras de materiais retirados de um gerador de radão

Esta experiência, tal como as experiências 6.6 e 6.7, permite estudar o decaimento dos descendentes do  $^{222}\text{Rn}$ .

Nesta experiência utilizou-se um “gerador de radão” que é um caixa fechada com “rochas radioactivas” as quais foram recolhidas na zona centro do País. Colocou-se dentro da caixa alguns materiais, tais como: folhas de alumínio e carvão activado, onde ficaram mais de uma semana com o objectivo de se estabelecer o equilíbrio entre o radão e os seus descendentes (figura 6.36).

Após esse período de tempo retirou-se uma folha de alumínio e colocou-se em frente à janela do detector GM, tal como se pode observar na figura 6.37.



Figura 6.36: Gerador de radão.

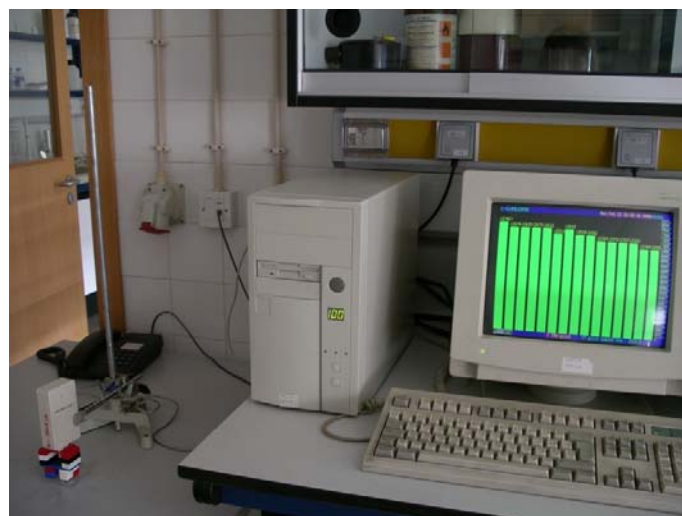
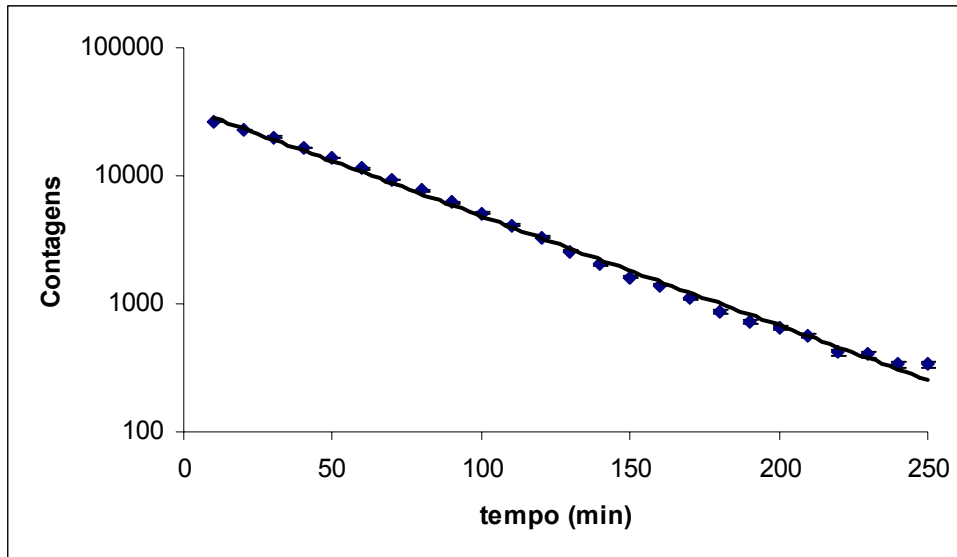


Figura 6.37: Fotografia da experiência com a folha de alumínio.

O número de contagens ao fim do primeiro minuto foi de 2769. O gráfico da figura 6.38 representa o número de contagens agrupadas em intervalos de 10 minutos com o fundo subtraído e os respectivos erros calculados a partir da equação 6.1. O valor do fundo é de 15 contagens por minuto.



**Figura 6.38:** Curva de decaimento dos núcleos presentes na folha de alumínio, para aquisições de 10 minutos.

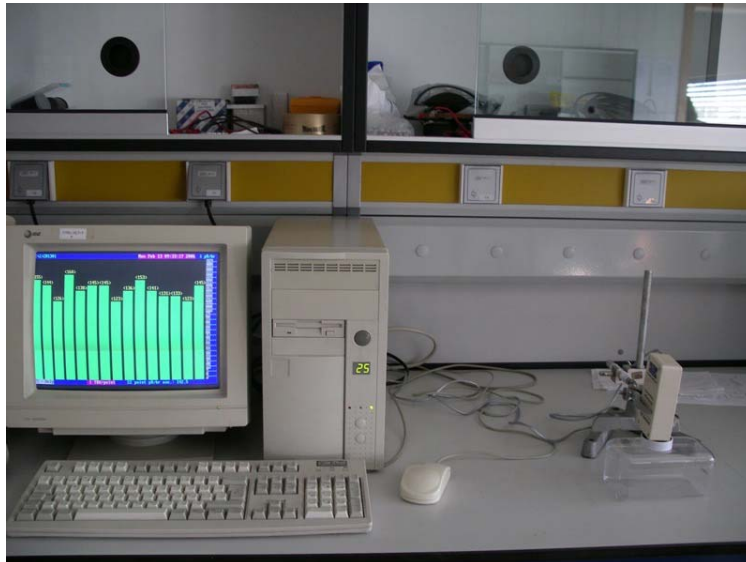
Repetiu-se o procedimento anterior utilizando carvão ativado inespecífico e carvão ativado Norit RB3 (Figuras 6.39 e 6.40).



**Figura 6.39:** Carvão ativado inespecífico.

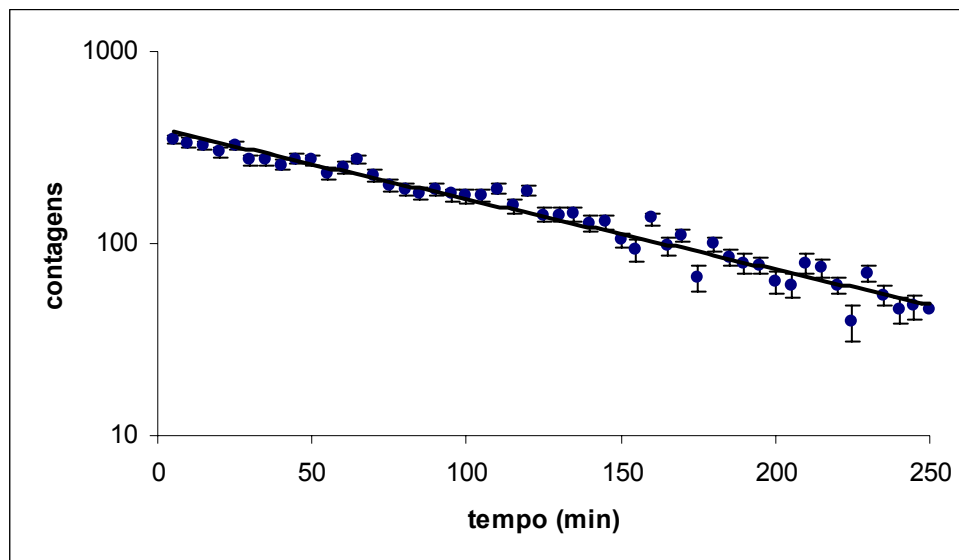


**Figura 6.40:** Carvão ativado Norit RB3.



**Figura 6.41: Fotografia da experiência com o carvão activado.**

No caso do carvão activado inespecífico o número de contagens ao fim do primeiro foi de 71 enquanto que no caso do carvão Norit foi de 129. Os gráficos, em escala semi-logarítmica, das figuras 6.42 e 6.43 representam o número de contagens agrupadas em intervalos de 5 minutos com o fundo subtraído para o carvão inespecífico e o carvão Norit, respectivamente. O valor do fundo é de 16 contagens por minuto para o carvão inespecífico e 15 contagens por minuto para o carvão Norit.



**Figura 4.42: Curva de decaimento dos nuclídeos adsorvidos à superfície do carvão activado inespecífico, para aquisições de 5 minutos.**

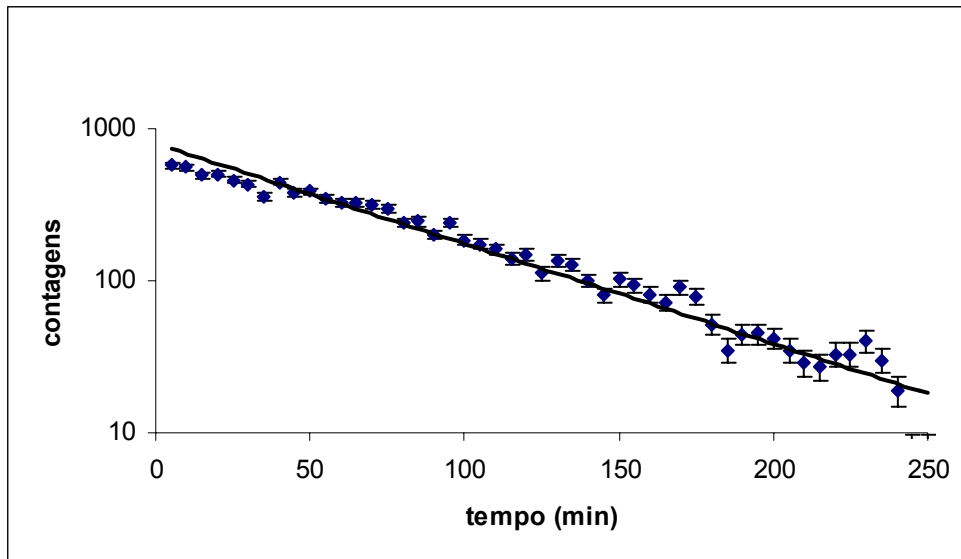


Figura 6.43: Curva de decaimento dos núcleos adsorvidos à superfície do carvão ativado Norit, para aquisições de 5 minutos.

No processo de decaimento alfa do  $^{222}\text{Rn}$ , a energia de recuo do descentente  $^{218}\text{Po}$  é suficiente para implantar núcleos nas superfícies vizinhas. Este facto pode ser usado para produzir fontes radioactivas contendo radionuclídeos filhos do  $^{222}\text{Rn}$ . No caso do carvão ativado o radão e os seus descendentes são adsorvidos à sua superfície.

Quando se retiram a folha de alumínio e os carvões activados do gerador de radão deixa de existir equilíbrio entre o radão e os seus descendentes ocorrendo o decaimento dos radionuclídeos descendentes do radão (decaimento composto).

Pode-se dizer ainda que a deposição dos núclídeos não dependem do material onde ficam depositados.



## 6.9. Radioactividade do potássio ( $^{40}\text{K}$ )

### a. Detector Geiger-Müller

Nesta experiência utilizaram-se dois reagentes comuns nos laboratórios de Química das escolas secundárias, o cloreto de potássio (figura 6.44) e o cloreto de sódio (figura 6.45), com o objectivo de mostrar a radioactividade do potássio, mais concretamente do  $^{40}\text{K}$ . Foram utilizadas 20 g de ambos os reagentes e um sistema de aquisição automático do contador Geiger.

A aquisição foi feita durante 30 minutos em intervalos de 1 minuto.

O erro da taxa de contagens foi determinado a partir da equação 6.2.



Figura 6.44: Cloreto de potássio (KCl).



Figura 6.45: Cloreto de sódio (NaCl).



Figura 6.46: Detecção da radioactividade do potássio.

Na tabela 6.7 estão registados os valores médios da taxa de contagens do fundo, do cloreto de potássio e do cloreto de sódio com fundo, respectivamente.

**Tabela 6.7: Valor médio da taxa de contagens do fundo, do cloreto de potássio (KCl) e do cloreto de sódio (NaCl) com fundo.**

Valor médio das contagens por minuto do fundo	Valor médio das contagens por minuto do KCl	Valor médio das contagens por minuto do NaCl
$15 \pm 1$	$27 \pm 1$	$15 \pm 1$

Como se pode observar a partir da tabela 6.7 o valor médio das contagens do cloreto de potássio (com fundo) situa-se muito acima do valor médio das contagens do fundo. Por outro lado, verifica-se que o valor médio das contagens do cloreto de potássio (com fundo) e do fundo são iguais. Como na constituição dos sais o que difere são os iões positivos,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , somos levados a concluir que a radioactividade está associada ao potássio.

A radioactividade do potássio é proveniente do nuclídeo  $^{40}\text{K}$  cuja meia-vida é  $1,26 \times 10^9$  anos. Este nuclídeo constitui cerca de 0,0117% de todo o potássio natural existente na Terra. Como já foi referido, o potássio é um elemento muito comum em solos, minerais e, conseqüentemente, nos alimentos. Alimentos como por exemplo, a banana, a ameixa ou o tomate são ligeiramente radioactivos devido à presença em quantidades vestigiais do  $^{40}\text{K}$ .

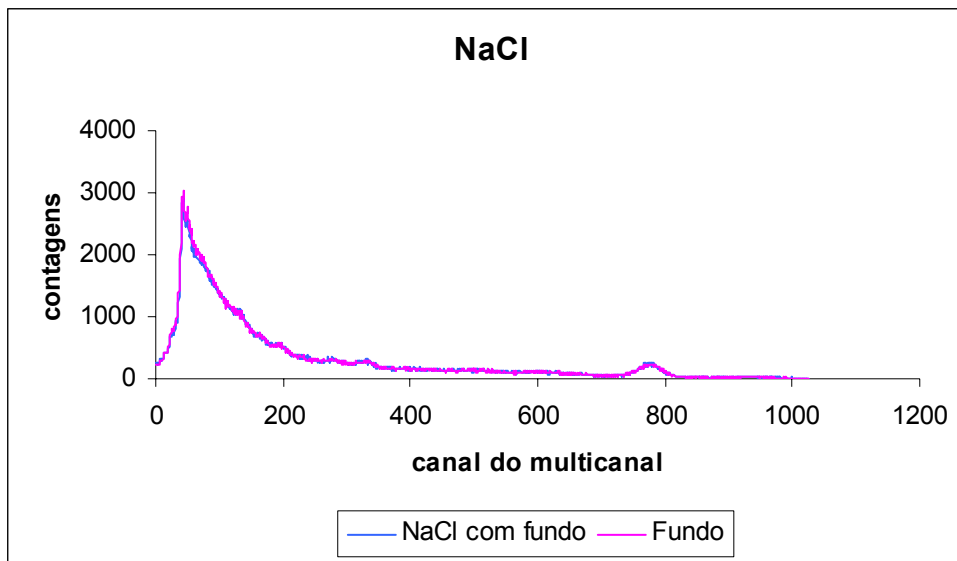
#### **b. Detector NaI(Tl)**

Nesta experiência utilizaram-se as mesmas amostras de cloreto de potássio e de cloreto de sódio referidas na experiência anterior. Fez-se a aquisição durante 1 hora para o fundo, o cloreto de potássio e o cloreto de sódio com o detector de NaI(Tl), respectivamente, e visualizou-se o pico correspondente ao  $^{40}\text{K}$ .



(a) (b)  
**Figura 6.47:** (a) Detector NaI(Tl) com a amostra de cloreto de potássio e (b) respectivo espectro com fundo.

O gráfico da figura 6.48 representa as contagens do cloreto de sódio com fundo em função do canal do multicanal e também as contagens do fundo em função do canal do multicanal.



**Figura 6.48:** Contagens do cloreto de sódio com fundo e contagens do fundo em função do canal do multicanal.

O gráfico da figura 6.49 representa as contagens de cloreto de potássio com fundo em função do canal do multicanal e as contagens do fundo em função do canal do multicanal.

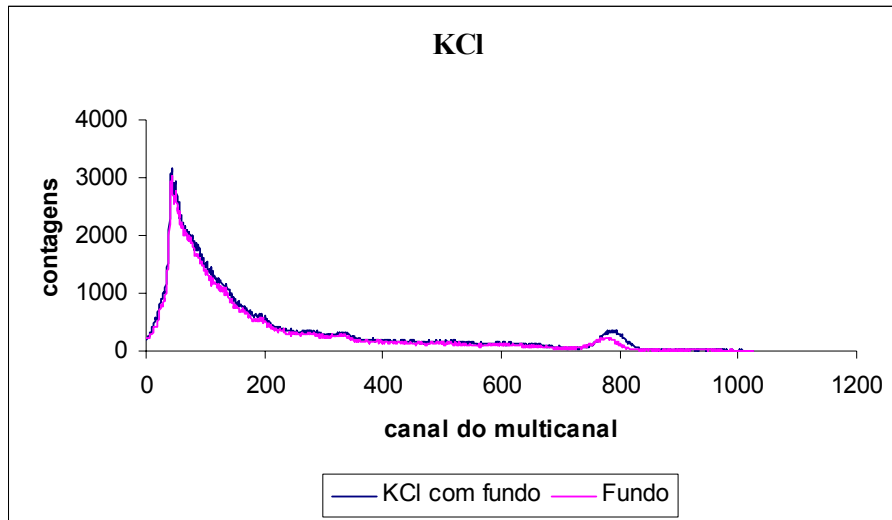


Figura 6.49: Contagens do cloreto de potássio com fundo e contagens do fundo em função do canal do multicanal.

O gráfico da figura 6.50 representa as contagens de cloreto de potássio com fundo e as contagens do fundo em função do canal do multicanal para a região de interesse. Este gráfico permite visualizar o pico correspondente ao  $^{40}\text{K}$ .

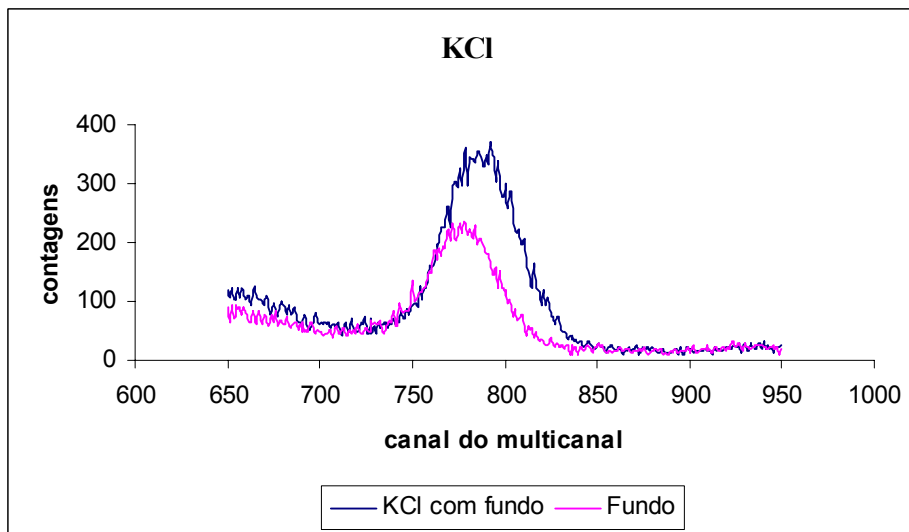


Figura 6.50: Contagens do cloreto de potássio com fundo e contagens do fundo em função do canal do multicanal para a região de interesse.

O  $^{40}\text{K}$  decai por emissão beta ou captura eletrônica. Na captura de elétrons a qual ocorre 11% das vezes, o núcleo de  $^{40}\text{Ar}$  é deixado num estado excitado, prosseguindo a desexcitação por emissão de um fóton gama de 1,46 MeV quando decai para o estado fundamental. Este pico de 1,46 MeV é uma fonte de radiação gama de fundo que pode ser visualizado utilizando um detector de NaI(Tl).

### 6.10. Radioatividade do tomate

O objectivo desta experiência é o de verificar a existência de radioactividade no tomate devido ao potássio ( $^{40}\text{K}$ ). Para tal utilizou-se concentrado de tomate comercial (polpa de tomate), uma solução de cloreto de potássio preparada no Laboratório como padrão de comparação e água para aquisição do fundo tal como se pode ver na figura 6.51.



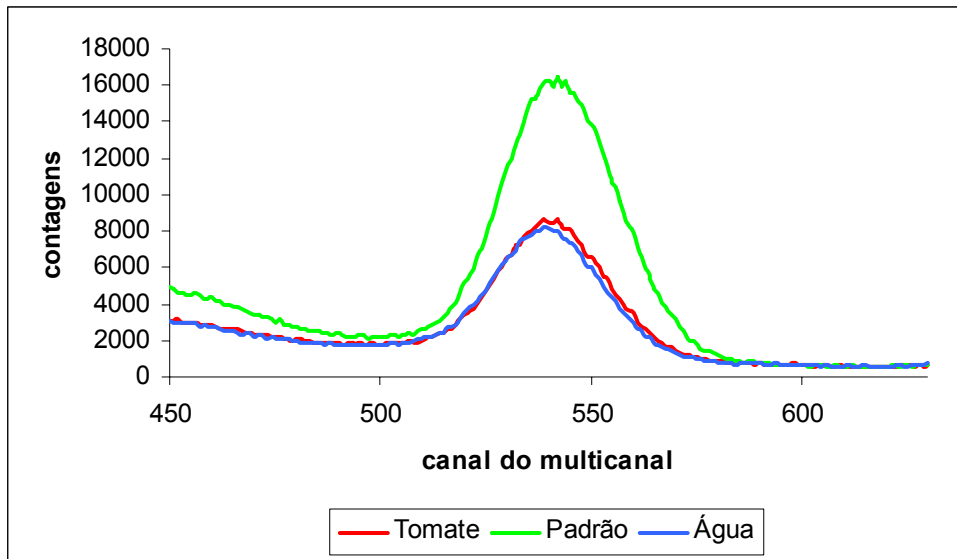
Figura 6.51: Água, padrão e concentrado de tomate, respectivamente.

Na tabela 6.8 estão registados os dados relativos ao concentrado de tomate, ao padrão e à água. O detector utilizado foi o de NaI(Tl). O tempo de aquisição foi de 1 dia para cada situação.

Tabela 6.8: Dados relativos ao concentrado de tomate, padrão e água utilizados na experiência.

Massa de concentrado de tomate (g)	Solução de cloreto de potássio (g L <sup>-1</sup> )	Volume de água (L)
931	200	1

O gráfico da figura 6.52 mostra o número de contagens em função do canal do multicanal para os três casos.



**Figura 6.52:** Número de contagens em função do canal do multicanal para o concentrado de tomate, o padrão e a água.

O número de contagens ao fim de 1 dia para o concentrado de tomate, o padrão e a água encontra-se registado na tabela 6.9.

**Tabela 6.9:** Número de contagens ao fim de 1 dia para o concentrado de tomate, o padrão e a água.

Contagens		
Concentrado de tomate	Solução de Cloreto de Potássio	Água
328745	984825	314145

A tabela 6.10 mostra o número de contagens de concentrado de tomate e de solução de cloreto de potássio sem fundo.

**Tabela 6.10:** Número de contagens de concentrado de tomate e do padrão sem fundo.

Contagens sem fundo	
Concentrado de tomate	Solução de Cloreto de Potássio
14600	670680

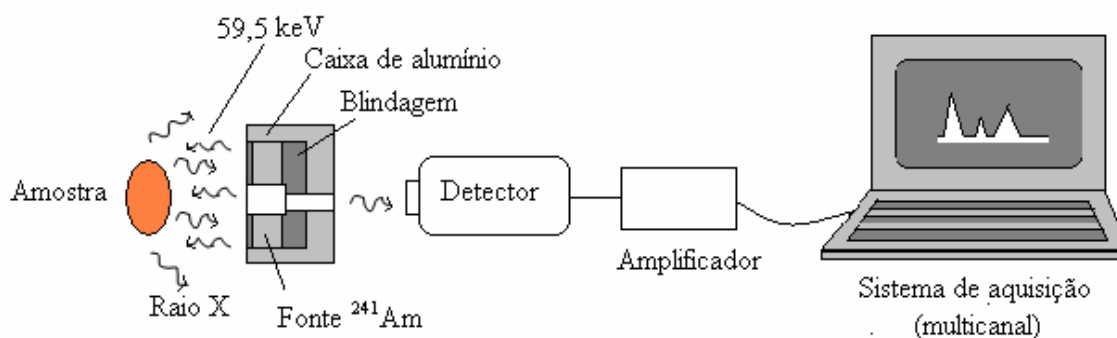
A massa de potássio determinada é de  $2,4 \text{ g kg}^{-1}$  de polpa de tomate (concentrado) o que nos permite considerar que a radioatividade do tomate é relativamente pequena.

### 6.11. Fluorescência de raios X

A fluorescência de raios X é uma técnica não destrutiva que permite identificar elementos químicos presentes numa amostra. Esta técnica também permite fazer uma análise quantitativa estabelecendo a proporção em que cada elemento se encontra presente na amostra.

Na fluorescência de raios X usa-se uma fonte de radiação gama (ou radiação X de elevada energia) para provocar a excitação dos átomos da substância a analisar. Os fótons gama emitidos pela fonte são absorvidos pelos átomos da substância através do efeito fotoelétrico, deixando esses átomos em estados excitados. Quando o átomo se desexcita, podemos observar fótons X correspondentes às várias transições electrónicas. O espectro de energia correspondente a essas transições é característico de cada elemento, o que possibilita a sua identificação.

O tipo de fonte excitadora depende da região do espectro que se pretende analisar. Uma fonte muito usada é a de  $^{241}\text{Am}$  que apresenta, entre outros, um fóton de 59,5 keV, permitindo o seu uso numa larga região do espectro de raios X. A figura 6.53 mostra o esquema da montagem do detector de fluorescência de raios X utilizado no Laboratório [66].



**Figura 6.53:** Esquema da montagem do detector de fluorescência de raios X.

Nesta experiência procedeu-se à identificação dos elementos constituintes de uma rocha existente no Laboratório de Física da FCUL e de uma rocha recolhida na Mina da Cunha Baixa.

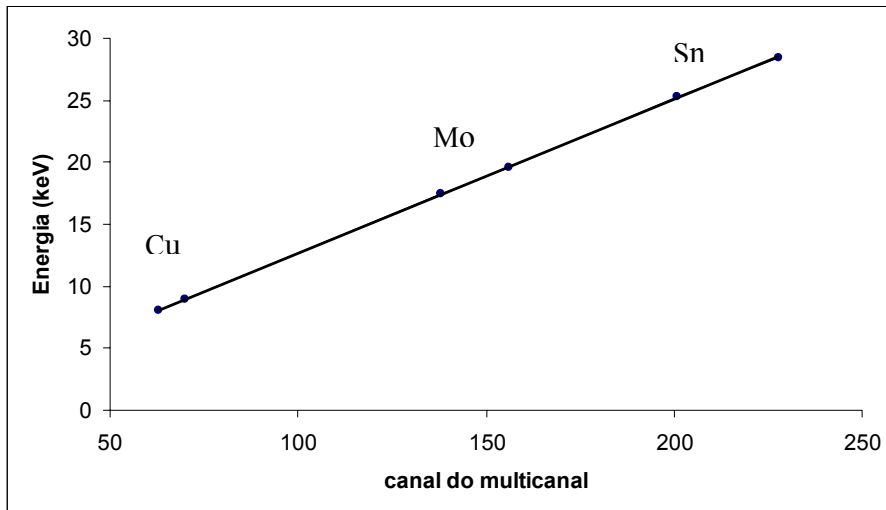
As experiências foram realizadas com os alunos que participaram na acção “Radioactividade e Ambiente” na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa em colaboração com o Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas

(FCUL/ LIP), no âmbito da Ocupação Científica de Jovens nas Férias 2006, do Projecto Ciência Viva.



**Figura 6.54:** Alunos da Ocupação Científica de Jovens nas Férias 2006, do Projecto Ciência Viva durante o trabalho prático.

Começou-se por calibrar o sistema em energia com fontes de estanho (Sn), cobre (Cu) e molibdénio (Mo). A partir da análise dos referidos espectros e recorrendo à tabela de isótopos [64] fez-se a recta de calibração (figura 6.55).



**Figura 6.55:** Recta de calibração.

A equação da recta de calibração é:

$$\text{Energia} = (0,12429 \pm 0,00004) \times \text{canal} - (0,229 \pm 0,006) \quad (\text{keV})$$



### **Rocha existente no Laboratório de Física da FCUL**

Colocou-se a rocha em frente da fonte de amerício (figura 6.56) e fez-se a aquisição durante 30 minutos.



**Figura 6.56: Rocha do Laboratório de Física da FCUL.**

A partir da recta de calibração e recorrendo à tabela de isótopos [64] (figura 6.57) identificou-se os principais constituintes da amostra, tal como se pode ver na figura 6.58.



**Figura 6.57: Identificação dos elementos constituintes da rocha com recurso à tabela de isótopos.**

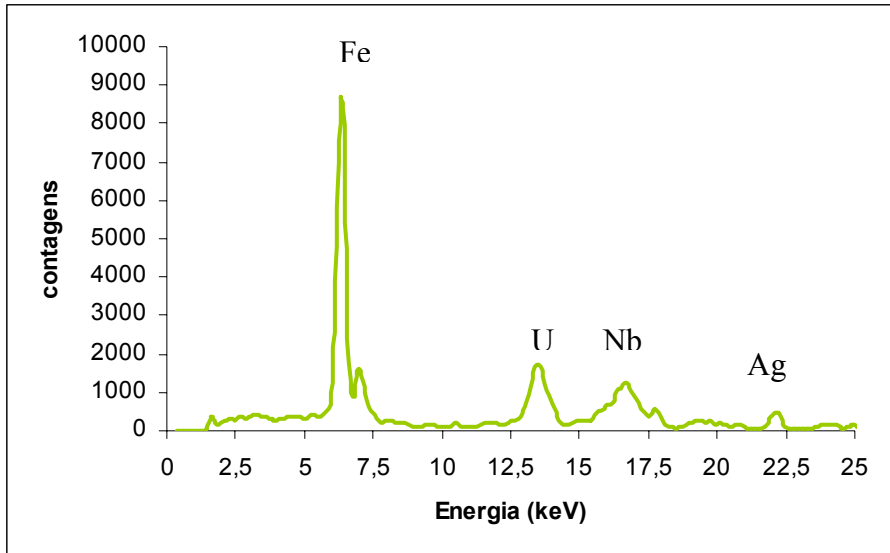


Figura 6.58: Principais elementos constituintes da rocha existente no Laboratório de Física da FCUL.

### Rocha da Mina da Cunha Baixa

Repetiu-se o mesmo procedimento utilizando uma rocha recolhida na Mina da Cunha Baixa (Minas da Urgeiriça).

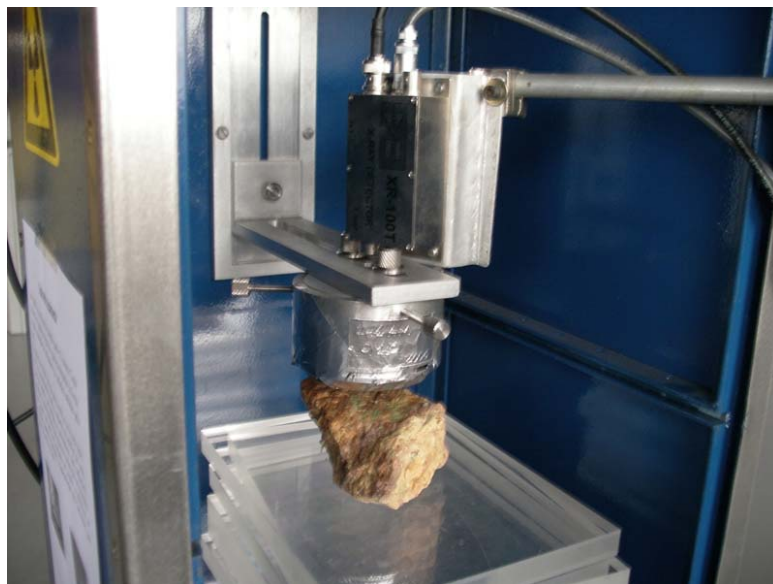
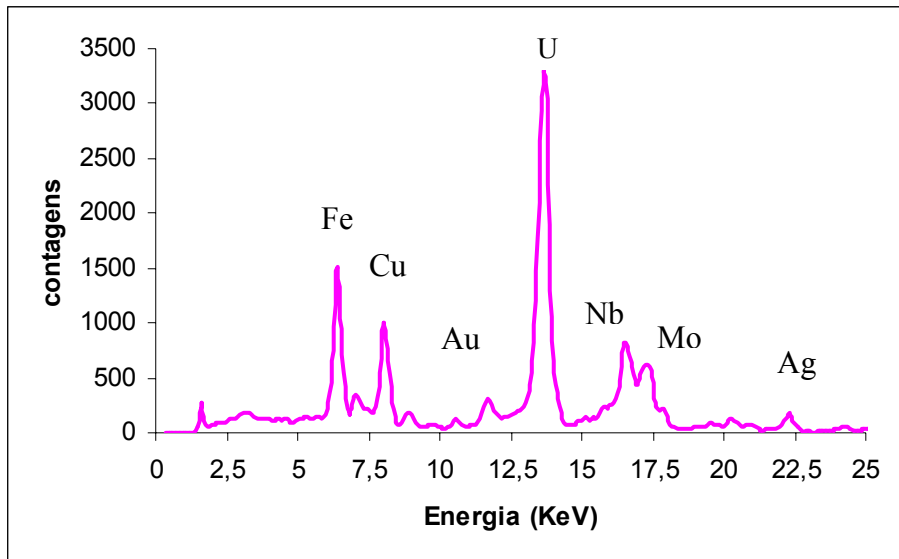


Figura 6.59: Rocha da Mina da Cunha Baixa.



**Figura 6.60: Principais elementos constituintes da rocha da Mina da Cunha Baixa.**

A partir da análise dos gráficos das figuras 6.58 e 6.60 verifica-se que a rocha da Mina da Cunha Baixa tem mais elementos químicos na sua composição que a rocha existente no Laboratório de Física da FCUL. Por outro lado, verifica-se que o elemento que existe em maior proporção na rocha da Mina da Cunha Baixa é o urânio enquanto que na rocha do Laboratório de Física da FCUL é o ferro.

## 6.12. Radioactividade nas águas

### a. Medidas com Detector Geiger

Com o objectivo de estudar experimentalmente a radioactividade em águas fizeram-se algumas experiências utilizando-se algumas amostras de águas de diferentes origens.

As experiências foram realizadas após uma visita ao Departamento de Protecção Radiológica e Segurança Nuclear (DPRSN) do Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN), local onde se efectua a determinação da radioactividade das águas.

As experiências realizadas basearam-se nas normas portuguesas NP 4330 e NP 4332 com as devidas adaptações à realidade de um Laboratório de uma escola com ensino secundário. Normalmente estas escolas têm material de uso corrente, tais como, placas de aquecimento, material de vidro, pipetas e também os reagentes necessários a este tipo de experiências.

De acordo com as Normas Portuguesas referidas a amostra de água a ser analisada é estabilizada por acidificação, evaporada até à secura quase total, transformada em sulfato e depois calcinada a 350 °C. O resíduo é transferido para um porta-amostra sendo a actividade medida com um sistema de contagem adequado. Todos os reagentes devem ser de qualidade analítica reconhecida e ter uma actividade de fundo mínima [67, 68].

Tendo em atenção as referidas Normas Portuguesas e a informação recolhida no ITN o procedimento seguido na detecção da radioactividade das águas consistiu basicamente em:

- Transferir para um copo de precipitação 0,5 L da amostra de água (no caso de águas muito pouco mineralizadas, o volume de água deve ser maior).
- Evaporar cuidadosamente numa placa de aquecimento até redução do volume a cerca de 50 mL; deixar arrefecer.
- Transferir a solução concentrada para uma cápsula de sílica (ou porcelana vidrada). Lavar cuidadosamente o copo de precipitação com o mínimo de água destilada e transferir as águas de lavagem para a cápsula.
- Verificar se as águas de lavagem contidas na cápsula arrefeceram, juntar 1 mL de ácido sulfúrico ( $\rho = 1,84 \text{ g mL}^{-1}$ ) e homogeneizar a amostra. Algumas águas,

durante a evaporação e a secagem, podem produzir resíduos impróprios para a medida da radioactividade, devido a serem higroscópicos ou de difícil dispersão. Este processo de sulfatação é um tratamento adequado para muitas destas amostras.

- Proceder cuidadosamente à evaporação até à secura do conteúdo da cápsula. Para evitar projecções, expõe-se a cápsula ao calor por cima utilizando uma lâmpada de infravermelhos, e aquece-se até à libertação de vapores de ácido sulfúrico. Colocar a cápsula numa placa de aquecimento e continuar a aquecer até à libertação total dos vapores.
- O resíduo da cápsula deverá ser aquecido a uma temperatura elevada (ou se possível calcinada a 350 °C) durante alguns minutos para transformar os sais higroscópicos.
- Deixar arrefecer a cápsula e proceder à medida do número de contagens com um detector Geiger.

Foi feito o tratamento de várias amostras de água, nomeadamente: Água das Pedras, água da torneira (FCUL), água da Ladeira (Belverde), água de Mangualde e para comparação água destilada.

Partiu-se de 0,5 L de água de cada amostra. A evaporação deste volume de água leva cerca de 2 horas.

As figuras seguintes são referentes às diferentes fases do processo de tratamento das águas.



**Figura 6.61: Evaporação de 0,5 L de Água das Pedras.**



**Figura 6.62: Água concentrada.**



**Figura 6.63: Evaporação da água até à secura numa cápsula de porcelana, realizada na hotte após adição de 1 mL de ácido sulfúrico.**



**Figura 6.64: Resíduo de água obtido.**

Depois de arrefecida à temperatura ambiente a cápsula de porcelana foi colocada debaixo da janela do detector Geiger, tal como se pode observar na figura 6.65.



**Figura 6.65: Aquisição de contagens.**

A aquisição foi feita durante 30 minutos. Fez-se a aquisição do fundo durante o mesmo tempo. O erro do valor do número de contagens foi calculado a partir da equação 6.2.

Na tabela 6.11 estão registados os valores médios de contagens por minuto para cada amostra.

**Tabela 6.11: Valor médio das contagens para várias amostras de águas, obtidos com o contador Geiger.**

Água	Valor médio de contagens por minuto	
	Água	Fundo
Destilada	$15,0 \pm 0,7$	$14,8 \pm 0,7$
Pedras	$18,3 \pm 0,8$	$15,9 \pm 0,7$
Mangualde	$17,8 \pm 0,8$	$16,0 \pm 0,7$
Ladeira	$16,6 \pm 0,7$	$14,5 \pm 0,7$
Torneira	$16,3 \pm 0,7$	$16,3 \pm 0,7$

Alguns radionuclídeos perdem-se por volatilização quando se usa este método. Entre os radionuclídeos da família do urânio, o  $^{222}\text{Rn}$  desaparece durante o processo mas cresce imediatamente na fonte analisada, a partir de algum  $^{226}\text{Ra}$  presente, com os seus descendentes emissores alfa e beta [67, 68].

Com o objectivo de verificar a existência (ou não) do crescimento da actividade de alguns radionuclídeos presentes nas águas repetiu-se o procedimento anterior para amostras de água destilada, água da torneira e Água das Pedras. Foram feitas aquisições de semana a semana durante 3 semanas.

Uma vez que os radionuclídeos presentes na amostra estão em equilíbrio (a cápsula está tapada) optou-se por fazer a aquisição durante 15 minutos.

Nos gráficos das figuras 6.66, 6.67 e 6.68 estão registados os valores médios da taxa de contagens por minuto medidos em intervalos de 1 semana para a água destilada, a água da torneira e a Água das Pedras, respectivamente.

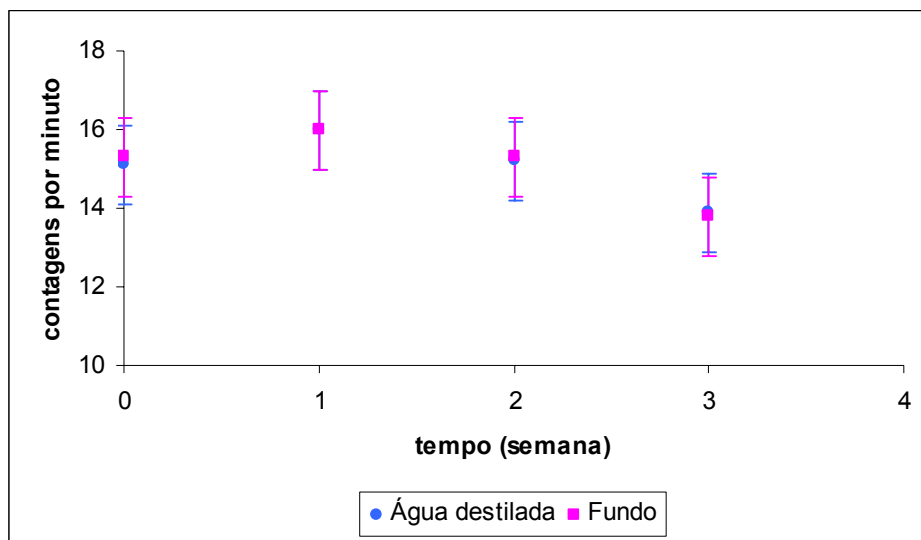


Figura 6.66: Valor médio da taxa de contagens para o resíduo de água destilada e para o fundo em intervalos de 1 semana.

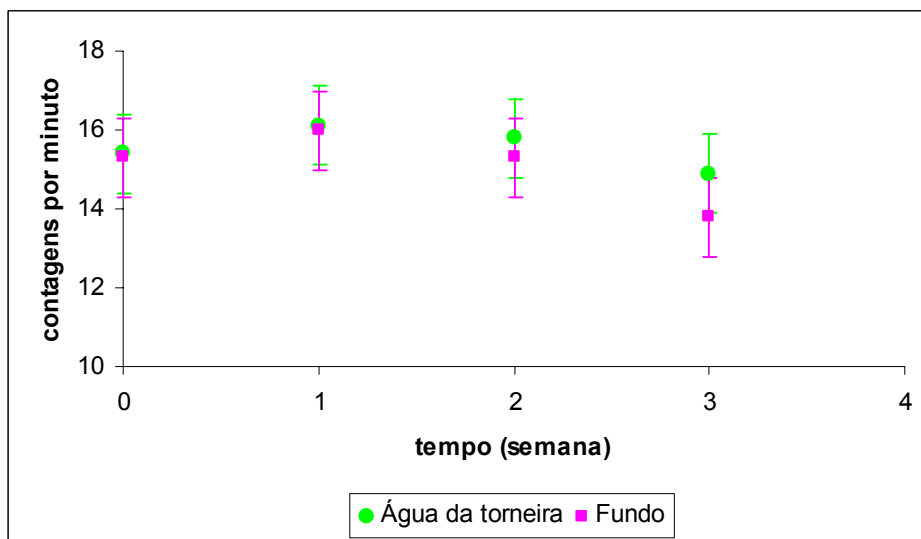
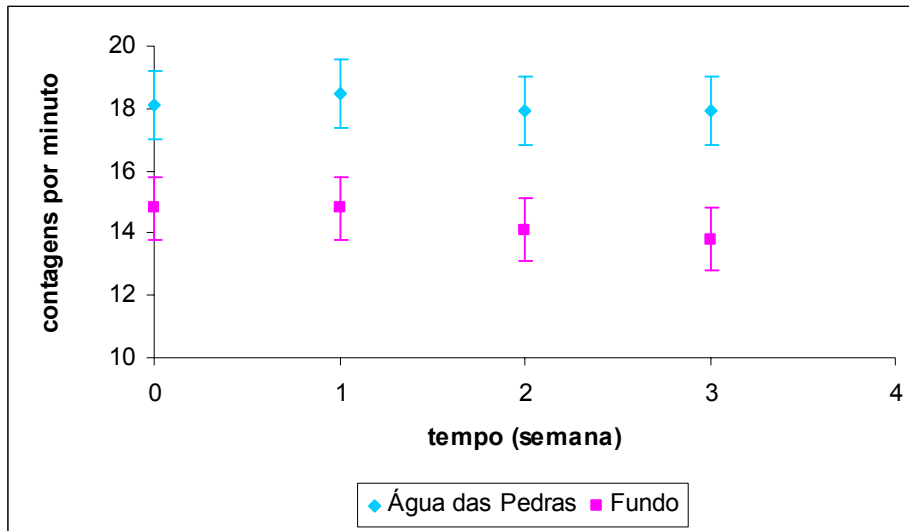


Figura 6.67: Valor médio da taxa de contagens para o resíduo de água da torneira e para o fundo em intervalos de 1 semana.

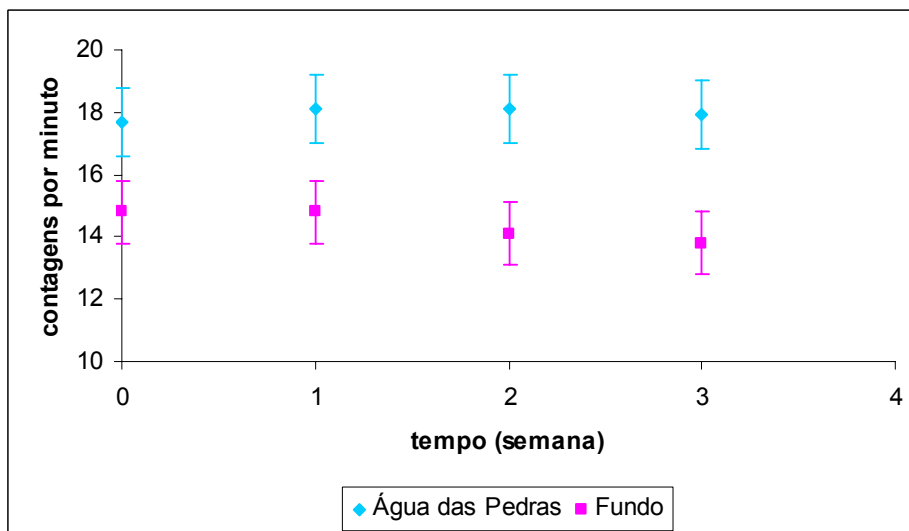




**Figura 6.68:** Valor médio da taxa de contagens para o resíduo de Água das Pedras e para o fundo em intervalos de 1 semana, numa cápsula de porcelana.

Com o objectivo de verificar a influência da homogeneização da amostra procedeu-se à transferência de uma amostra de águas das pedras da cápsula para um porta-amostra e fez-se a aquisição durante 15 minutos.

No gráfico da figura 6.69 estão registados os valores médios da taxa de contagens por minuto para aquisições feitas de semana a semana para a Água das Pedras num porta-amostra.



**Figura 6.69:** Valor médio da taxa de contagens para o resíduo de Água das Pedras e para o fundo em intervalos de 1 semana, num porta-amostra.

A partir da análise da tabela 6.11 pode-se dizer que a água destilada e a água da torneira não são radioactivas enquanto que a Água das Pedras e a água de Mangualde poderá indicar a existência de ligeira radioactividade.

As figuras 6.66 e 6.67 confirma a não radioactividade da água destilada (o que já era esperado) e da água da torneira, respectivamente.

A partir da análise da figura 6.68 pode-se dizer que houve um ligeiro crescimento da actividade sugerindo assim a existência de  $^{226}\text{Ra}$  na água, a partir do qual crescem os descendentes alfa e beta.

O facto de se ter utilizado a amostra em partículas finamente divididas (homogeneizada) num porta-amostra não alterou significativamente os resultados obtidos anteriormente (figura 6.69).

#### b. Detector de NaI(Tl)

Com o objectivo de confirmar a existência de radioactividade na Água das Pedras utilizou-se o detector de NaI(Tl) e um resíduo da referida água tapado há mais de 1 mês num porta-amostra.

Começou-se por calibrar o sistema em energia tal como na experiência 6.5.b.

Pelo facto de constatarmos que a radioactividade desta água era muito ligeira fez-se a aquisição durante 2 dias quer para a água quer para o fundo. Os resultados obtidos estão representados na figura 6.70.

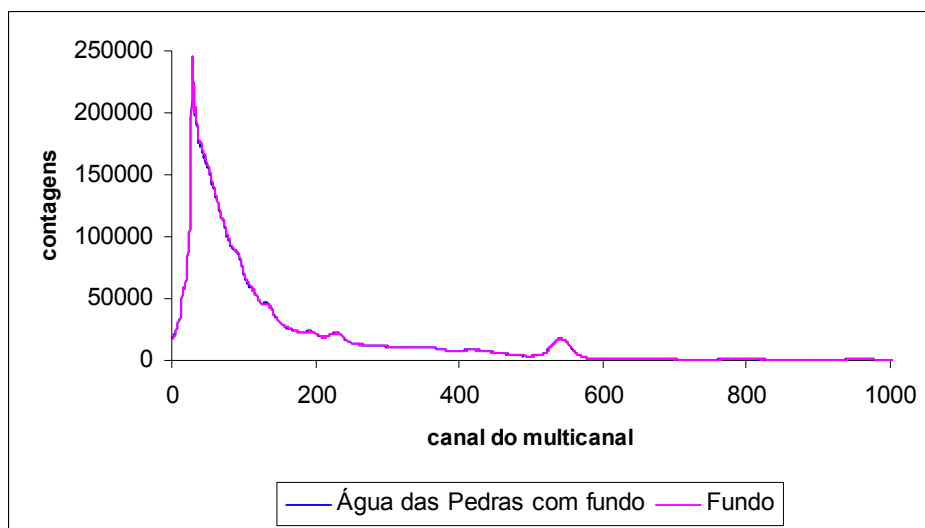
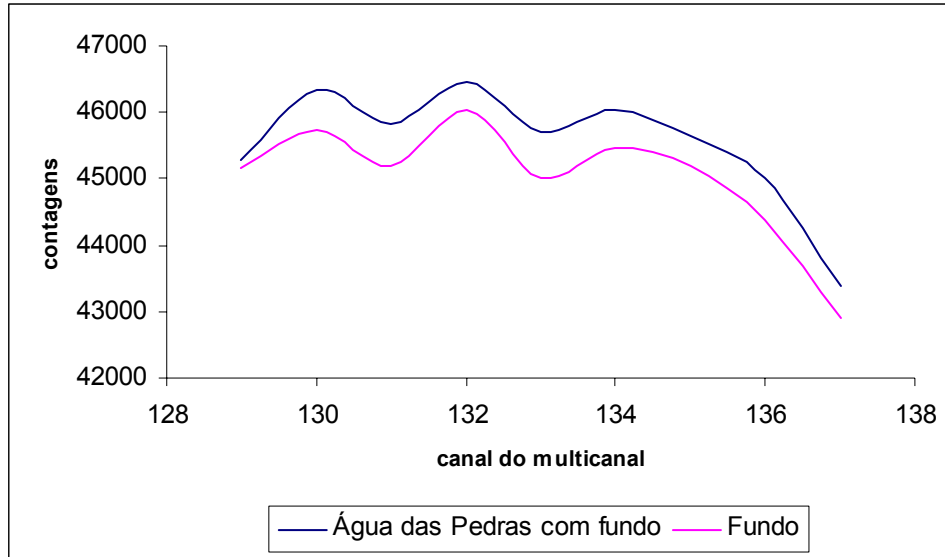


Figura 6.70: Contagens da Água das Pedras com fundo e contagens do fundo em função do canal do multicanal.

A partir da observação da figura 6.70 seríamos levados a dizer que não existe qualquer diferença entre o número de contagens da água com fundo e o número de contagens de fundo. No entanto, uma observação mais cuidadosa leva-nos a uma região em que existe alguma diferença. Essa região de interesse está representada na figura seguinte.



**Figura 6.71:** Contagens da Água das Pedras com fundo e contagens do fundo em função do canal do multicanal para a região de interesse.

Determinámos a energia correspondente ao canal 132 (média do máximo dos 3 canais, 130, 132 e 134). Esta zona do espectro corresponde aos picos do  $^{214}\text{Pb}$ .

**Tabela 6.12:** Identificação do nuclídeo presente na Água das Pedras.

Resíduo de água das Pedras			
Canal	Valor experimental Energia (MeV)	Valor tabelado Energia (MeV)	Isótopo
132	$0,290 \pm 0,003$	0,295	$^{214}\text{Pb}$

A partir da análise dos resultados obtidos nestas experiências poder-se-á dizer que algumas águas têm ligeira radioactividade, confirmando a informação recolhida no ITN de que apenas na Água das Pedras seria possível detectar alguma radioactividade.

Estas experiências poderão não ser as melhores para serem realizadas numa escola devido ao facto de se detectar apenas vestígios muito ligeiros de radioactividade.

## **Capítulo 7: Aula Experimental sobre Radioactividade e Ambiente na ESC**



**Figura 7.1: Escola Secundária de Casquilhos (ESC).**



**Figura 7.2: Alunos do 12.º ano com a disciplina de Física da ESC.**

## **7.1. Introdução**

Com o objectivo de verificar a adequação das experiências sobre radioactividade e ambiente apresentadas no capítulo 6 foram realizadas algumas experiências por alunos de Física do 12.º ano da Escola Secundária de Casquilhos.

Foram realizadas 4 experiências num bloco de 90 minutos. Para estas experiências foram elaborados os respectivos protocolos, os quais se encontram no anexo I.

Como se pode observar na figura 7.2 a turma é constituída apenas por 4 alunos os quais foram acompanhados pela respectiva professora da disciplina.

Quando se realizou esta aula os alunos já tinham conhecimento sobre o que são radiações e os diferentes tipos de radiação existente (radiação  $\alpha$ ,  $\beta$ , e  $\gamma$ ).

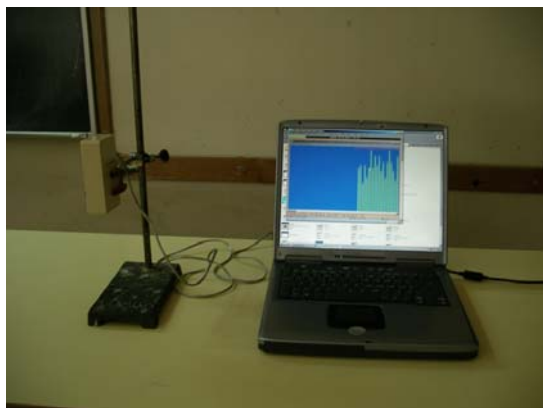
## **7.2. Experiências realizadas**

### **7.2.1. Experiência 1 - Radiação de fundo**

A primeira experiência realizada teve como objectivo investigar a radiação de fundo.

Ao mesmo tempo que era feita a aquisição foi explicado aos alunos que a radiação de fundo tem o contributo de radiações naturais e artificiais. Foi também explicado o funcionamento do detector Geiger.

Os alunos registaram os resultados obtidos durante 10 minutos, calcularam o valor médio das contagens e responderam às questões propostas no protocolo (figuras 7.3 e 7.4). O respectivo erro foi calculado posteriormente uma vez que não faz parte do programa de física do 12.º ano.



(a)



(b)

Figura 7.3: Aquisição de contagens (a) e reflexão (b) sobre radiação de fundo.



Figura 7.4: Tratamento dos dados adquiridos experimentalmente.

Na tabela 7.1 está registado o valor médio das contagens do fundo obtido no Laboratório de Física da ESC.

Tabela 7.1: Valor médio das contagens do fundo.

Valor médio das contagens por minuto do fundo
$15 \pm 1$

### 7.2.2. Experiência 2 - Radioatividade em rochas

Para a realização desta experiência foi utilizado um fragmento de uma rocha recolhida nas proximidades das minas da Urgeiriça. A aquisição foi feita durante 5 minutos. Os alunos puderam observar que o número de contagens por minuto quando se colocava a rocha debaixo da janela do detector era muito superior ao do fundo. Por mera curiosidade dos alunos estes também adquiriram dados com a rocha dentro da caixa e verificaram que o número de contagens por minuto era inferior ao obtido anteriormente mas muito acima das contagens do fundo. Concluíram que quando a fonte radioactiva está mais afastada do detector e/ou dentro de um recipiente o número de contagens é menor. Concluíram também que sendo o número de contagens relativas à rocha muito superior ao do fundo que esta é radioactiva tendo na sua constituição nuclídeos radioactivos.

**Tabela 7.2: Valor médio das contagens do fundo, da rocha fora da caixa e da rocha dentro da caixa.**

Valor médio das contagens por minuto do fundo	Valor médio das contagens por minuto da rocha	Valor médio das contagens por minuto da rocha dentro da caixa
$15 \pm 1$	$192 \pm 6$	$57 \pm 3$



**Figura 7.5: Aquisição de dados sobre a rocha.**

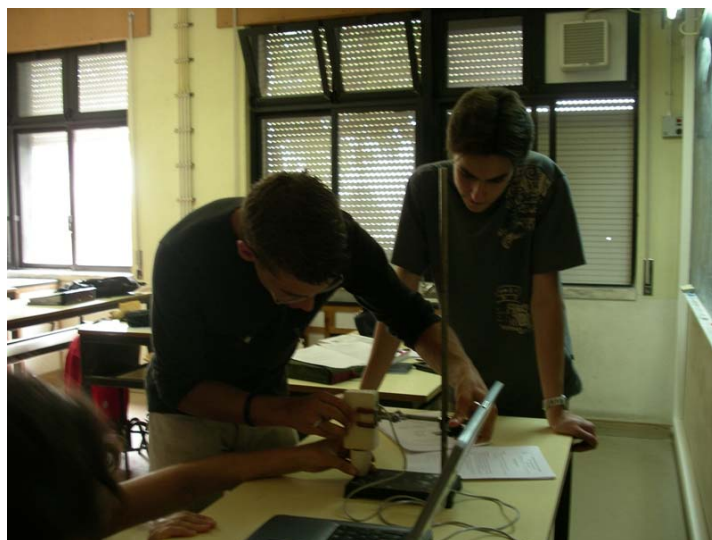


**Figura 7.6: Discussão dos resultados obtidos experimentalmente.**

A figura 7.6 mostra um momento de reflexão sobre os resultados obtidos e também sobre os perigos inerentes à utilização de rochas radioativas nos materiais de construção.

### **7.2.3. Experiência 3 - Radioatividade do potássio ( $^{40}\text{K}$ )**

Nesta experiência utilizaram-se 50 g de cloreto de sódio e 50 g cloreto de potássio.



**Figura 7.7: Amostra do sal colocada debaixo da janela do detector.**



Nesta experiência os alunos observaram que o número de contagens relativas ao cloreto de potássio é superior ao do fundo enquanto que o número de contagens do cloreto de sódio é idêntico ao do fundo. Desta forma concluíram que o potássio é radioactivo enquanto que o sódio não é.

**Tabela 7.3: Valor médio das contagens do fundo, do cloreto de potássio e do cloreto de sódio com fundo.**

Valor médio das contagens por minuto do fundo	Valor médio das contagens por minuto do cloreto de potássio	Valor médio das contagens por minuto do cloreto de sódio
15 ± 1	32 ± 2	15 ± 1

Num período de reflexão foi explicado aos alunos que a radioactividade do potássio se deve ao isótopo  $^{40}\text{K}$  e que alguns alimentos como, por exemplo, a banana, ameixa e o tomate têm na sua constituição esse isótopo. Um aluno questionou sobre o facto de o corpo humano necessitar de potássio para o seu normal funcionamento. Os alunos ficaram sensibilizados para esta problemática concluindo ainda que o corpo humano é ligeiramente radioactivo.

#### 7.2.4. Experiência 4 - Presença de gases radioactivos na atmosfera

A última experiência a ser realizada teve como objectivo verificar a presença de gases radioactivos na atmosfera. Nesta experiência fez-se a aspiração do ar de uma arrecadação da escola durante 15 minutos.

Enquanto decorria a aspiração foram apresentados e discutidos alguns assuntos como, por exemplo, as cadeias de decaimento naturais e o tempo de meia-vida.

Após 15 minutos de aspiração retirou-se o lenço do bocal do aspirador e procedeu-se à aquisição em intervalos de 1 minuto, durante 30 minutos.



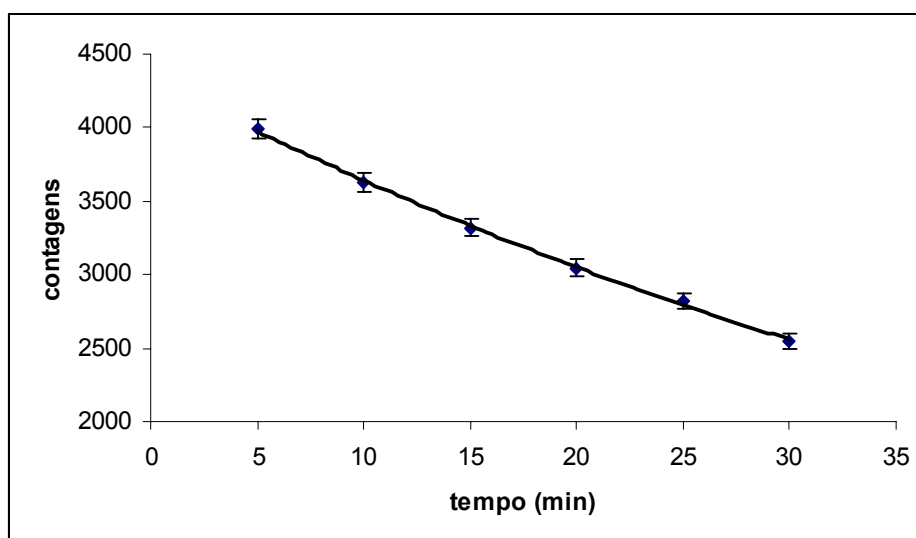
**Figura 7. 8: Aquisição de dados experimentais.**

A figura 7.8 mostra os momentos iniciais da aquisição das contagens e a perplexidade dos alunos perante os valores obtidos.

O número de contagens ao fim do primeiro minuto foi de 873.

Durante o período de aquisição reflectiu-se sobre a presença de gases radioactivos, nomeadamente, do gás radão e os perigos inerentes à sua presença num compartimento e também a necessidade de arejar as casas.

Agrupou-se as contagens em intervalos de 5 minutos e fez-se o gráfico do número de contagens em função do tempo numa folha de cálculo. O erro do número de contagens foi feito posteriormente utilizando a equação 6.1.



**Figura 7.9: Curva de decaimento dos núclídeos presentes no lenço de papel – arrecadação da ESC para aquisições de 5 minutos.**

Os alunos concluíram que a curva apresentava um comportamento de uma exponencial decrescente típica do decaimento de nuclídeos radioativos. Foi explicado aos alunos que se tratava de um decaimento composto.

Seria interessante continuar a aquisição durante mais tempo, no entanto, o tempo estava limitado a um bloco de 90 minutos o que se concluiu ser pouco para a realização das experiências propostas.

No entanto, esta aula permitiu concluir que os protocolos estão adequados ao nível de ensino ao qual é dirigido e ainda que estas experiências são fáceis de serem realizadas numa sala de aula de uma escola com ensino secundário.

Constatou-se também que os conceitos relativos à radioatividade e ambiente do programa de física são facilmente introduzidos à medida que as experiências são realizadas.

## **Capítulo 8 - Kit Didáctico**

### **8.1. Construção de um kit didáctico**

A aquisição de detectores, equipamento e sistema de aquisição, fontes radioactivas, folhas de material absorvente envolve verbas que, por vezes, são pouco acessíveis para uma escola com ensino secundário. Assim, neste capítulo pretende-se mostrar que podemos obter de uma forma simples, divertida, autodidacta e com baixos custos um kit didáctico.

O kit didáctico que se apresenta é constituído por uma caixa de plástico contendo rochas radioactivas.



**Figura 8.1: Kit didáctico**

Se colocarmos, por exemplo, algumas folhas de alumínio, carvão activado e/ou outros materiais e utilizarmos um detector Geiger podem ser realizadas algumas das experiências apresentadas no capítulo 6, como por exemplo:

- Estudo da taxa de contagens com a distância
- Radioactividade das rochas
- Amostras de materiais retirados de um gerador de radão (descendentes do radão)

e explorar alguns dos conceitos sobre radioactividade e ambiente que fazem parte dos currículos de Física e Química do ensino secundário.

## 8.2. Visita de estudo às Minas da Urgeiriça

Para a recolha das rochas que fazem parte do kit didáctico fez-se uma visita de estudo às Minas da Urgeiriça, ficando-se aí a conhecer um pouco da história destas Minas e o seu meio envolvente. As rochas foram recolhidas na Mina da Cunha Baixa (uma das Minas da Urgeiriça) já desactivada.

As fotografias que se apresentam a seguir são referentes à visita, na qual participaram alunos do ensino secundário que frequentaram a acção sobre “Radioactividade e Ambiente”, no âmbito da Ocupação Científica de Jovens nas Férias 2006, do Projecto Ciência Viva na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Laboratório de Investigação de Partículas de Lisboa e Universidade do Algarve, professores responsáveis pelas referidas instituições e ainda professoras do ensino secundário.



Figura 8.2: Óxido de urânio ( $U_3O_8$ ).



**Figura 8.3: Recolha de rochas na Mina da Cunha Baixa.**

Um kit didático assim construído pode não apresentar quaisquer custos uma vez que a visita de estudo poderá fazer parte do Plano de Actividades da Escola. Alia-se, assim, as actividades extracurriculares (visita de estudo) com as actividades curriculares (experiências com as rochas recolhidas).

## CONCLUSÕES

Um dos objectivos deste trabalho era o da construção de um sistema de detecção de partículas carregadas bem como da electrónica a ele associado. Utilizou-se um díodo de silício polarizado inversamente como detector. Após a calibração do sistema verificou-se que o mesmo é eficiente uma vez que detecta bem as partículas. Uma dificuldade encontrada foi a da electrónica associada ao sistema de detecção. Embora a maior parte das escolas já possuam osciloscópio e bomba de vácuo será sempre necessário adquirir o pré-amplificador de custo relativamente elevado e de mais electrónica pelo que somos levados a concluir que um sistema de detecção deste tipo não será facilmente reproduzível nas escolas com ensino secundário.

Outro dos objectivos deste trabalho era o da apresentação de várias experiências possíveis de serem realizadas nas escolas com ensino secundário, o que foi conseguido com sucesso.

Assim, no capítulo 6 encontramos um conjunto de experiências possíveis de serem realizadas nas escolas com ensino secundário. Para a realização da maior parte destas experiências é necessário um detector Geiger. Algumas destas experiências permitem abordar os assuntos relacionados com a radioactividade, nomeadamente, radiação de fundo, radiação  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , a influência da distância entre o detector e a fonte, o poder de penetração da radiação, tempo de meia-vida e a lei do decaimento radioactivo. Outras experiências permitem mostrar que o mundo em que vivemos é ligeiramente radioactivo. É o caso das experiências que utilizam as rochas radioactivas, o ar que respiramos, os alimentos que comemos como, por exemplo, o tomate, ou a água que bebemos, como a água das Pedras.

Relativamente às águas utilizadas nas experiências somos levados a concluir que contêm um nível de radioactividade muito reduzida, o que confirma a informação recolhida no ITN.

Somente a Água das Pedras apresenta níveis de radioactividade ligeiramente acima do fundo. A utilização do detector de NaI(Tl) permitiu detectar apenas vestígios do nuclide  $^{214}\text{Pb}$ , um dos descendentes do radão da cadeia de decaimento do urânio-238.

Devido aos baixos níveis de radioactividade detectados somos levados a concluir que estas experiências não serão as melhores para serem realizadas numa aula prática de laboratório. No entanto, também podemos concluir que a água da rede pública que consumimos não oferece problemas do ponto de vista radioactivo para a saúde pública.

Nalgumas destas experiências utilizou-se um detector de NaI(Tl) o qual permite identificar os nuclídeos presentes nas amostras radioactivas estudadas. Devido ao seu elevado custo poderá ser de difícil aquisição por parte das escolas. Este problema poderá ser ultrapassado optando-se por fazer, por exemplo, uma visita de estudo a uma Faculdade que possua um Laboratório com este tipo de equipamento, como é o caso da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, local onde poderão também ser realizadas experiências envolvendo a fluorescência de raios X.

A aula de 90 minutos realizada na Escola Secundária de Casquilhos com alunos que frequentam a disciplina de Física do 12.º ano de escolaridade permitiu concluir que as experiências apresentadas se adequam ao nível de ensino secundário ao qual é dirigido. Foram escolhidas 4 das experiências apresentadas neste trabalho, as quais permitam abordar alguns conceitos sobre radioactividade e debater um pouco a interligação entre a radioactividade e o ambiente. Durante a aula os alunos mostraram-se muito interessados, participando activamente quer nas experiências, quer no tratamento e discussão dos resultados.

A visita de estudo às Minas da Urgeiriça foi a forma encontrada para obter materiais necessários para a realização de algumas das experiências apresentadas. Como se pode verificar no capítulo 8 construiu-se um Kit didáctico com as rochas recolhidas nesta visita. Esta visita será uma sugestão para todas as escolas que possuam poucos recursos materiais e /ou financeiros para os obter.

É de salientar ainda que sendo este trabalho predominantemente de carácter experimental apresenta também um suporte teórico fundamental acerca dos conceitos sobre a radioactividade e o ambiente que integram os programas curriculares de Física e de Química do 12.º ano.



Como conclusão final poder-se-á dizer que este trabalho apresenta um conjunto de experiências possíveis de serem realizadas nas escolas com ensino secundário, de acordo com os recursos que cada uma possui e também com o número de aulas disponíveis para as actividades experimentais. Não nos podemos esquecer que, por exemplo, o programa de Física do 12.º ano apresentado pelo Ministério de Educação recomenda a utilização de 6 aulas de 90 minutos para o tema “Radioactividade e Núcleos Atómicos” pelo que o número de aulas experimentais é muito reduzido.

Por outro lado, sendo o ano lectivo 2005/06 o primeiro ano em que os novos programas de Física e de Química do 12.º ano foram leccionados alguns professores que tiveram a seu cargo a sua leccionação podem ter sentido algumas dificuldades em o implementar, nomeadamente sobre o tema em questão. Este trabalho poderá ser um contributo para superar algumas das dificuldades encontradas.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] EDUCAÇÃO, M. (2001), Departamento do Ensino Secundário, *Programa de Física e Química A -10º ano*.
- [2] EDUCAÇÃO, M. (2003), Departamento do Ensino Secundário, *Programa de Física e Química A -11º ano*.
- [3] EDUCAÇÃO, M. (2004), *Programa de Física 12º ano*.
- [4] EDUCAÇÃO, M. (2004), *Programa de Química 12º ano*.
- [5] TURNER, J. (1995), *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*, Second Edition, John Wiley & Sons, INC, New York.
- [6] Radiações Ionizantes (2006). ( [http://www.cnen.gov.br/cnen\\_99/news/radiacoes.pdf](http://www.cnen.gov.br/cnen_99/news/radiacoes.pdf))
- [7] KNOLL, G. F. (1998), *Radiation Detection and Measurement*, Second Edition, John Wiley & Sons, New York.
- [8] Radiação (2006).  
([http://www.fiocruz.br/biosseguranca/Bis/lab\\_virtual/radiacao.html](http://www.fiocruz.br/biosseguranca/Bis/lab_virtual/radiacao.html))
- [9] STUDART, N. (2001), *Física na Escola*, V. 2, n.1.  
([http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol2/Num1/caetano\\_planck.pdf](http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol2/Num1/caetano_planck.pdf))
- [10] KRANE, S. K. (1988), *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley & Sons.
- [11] TIPLER, P., LLEWELLYN, R. (2001), *Física Moderna*, 3ª edição, LTC Editora.
- [12] Radioactivity in Nature (2006), American Journal of Physics.  
(<http://www.physics.isu.edu/radinf/natural.html>)

- [13] BURCHAM, W. E. (1974), *Física Nuclear*, Editorial Reverté, S.A.
- [14] MERRIL, E. (1987), *Environment Radioactivity*, Academic Press, Inc, Third Edition, New York.
- [15] UNSCEAR (1993) - United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, ANNEX A. *Exposure From Natural Sources of Radiation*. Report to the General Assembly With Scientific Annexes, United States, New York.
- [16] MARTIN, A., HARBISON, S. (1979), *An Introduction to Protection*, Second Edition, John Wiley & Sons, New York.
- [17] International Atomic Energy Agency – IAEA, *Radiation Safety*, Austria, Abril/96.
- [18] Cabral, J. M. P. (2004), *Arqueometria*, Colóquio/Ciências N° 9, pp. 58-78.
- [19] FAWLOR, E. (1965), *Radioactive Fallout, Soils, Plants, Foods, Man*, Elsevier Published Company, New York.
- [20] DEST (2002), *Draft Environmental Impact Statement for the National Repository Project – Main Report* (Australia: Department of Education, Science and Training).
- [21] ANJOS, R. M., FACURE A., LIMA, E. L. M., GOMES, P. R. S., SANTOS, M. S., BRAGE, J. A. P., OKUNO, E., YOSHIMURA, E. M., UMISEDÓ, N. K. (2001), *Radioactivity Teaching: Environmental Consequences of the Radiological Accident in Goiânia (Brasil)*, Am. J. Phys., **69**, 377- 81.
- [22] A Radioatividade Natural (2006). (<http://www.uc.pt/cienterra/lrn/rn.html>)
- [23] *Radão – Um Gás Radioactivo de Origem Natural* (2002). Instituto Tecnológico e Nuclear, Departamento de Protecção Radiológica e Segurança Nuclear.
- [24] ICRU Report 19 (1971), *International Commission on Radiation Units and Measurement*.

- [25] MOREIRA, J. A. (2005), *Física Básica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- [26] SEMAT, H. (1971), *Física Atômica y Nuclear*, Aguilar.
- [27] MARTINHO, E., OLIVEIRA, J. (1980), *Reactores Nucleares de Cisão*, Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Sacavém.
- [28] ELIZABETH, P., FRANCISCO, A., OSCAR, S. (1978), *Introdução à Física Nuclear*, Editora McGraw-Hill do Brasil Lta.
- [29] KRANE, S. K. (1996), *Modern Physics*, Second Edition, Holt, Rinehart and Winston, Inc.
- [30] OREY, J. (1982), *Fundamentos da Física*, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.
- [31] CARTER, M. W., HARLEY, J. H., SCHMIDT, G. D., SILINI, G. (1988), *Radionuclides in the Food Chain*, Springer-Verlag, New York.
- [32] CARVALHO, F. (2006), *A Radioactividade e os Seres Vivos*, Instituto Tecnológico e Nuclear, Departamento de Protecção Radiológica e Segurança Nuclear.
- [33] ICRP Publication 60 (1990), *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Pergamon, Oxford.
- [34] RAYMOND, C. (1994), *Química*, 5.<sup>a</sup> Edição, McGraw-Hill.
- [35] BELLINTANI, S., NEVES, F. (2002), *Noções Básicas de Protecção Radiológica*, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.  
(<http://www.ipen.br/np/apostila30horas.pdf>)
- [36] ABREU, M. C., MATIAS, L., PERALTA, L. F. (1994), *Física Experimental*, 1.<sup>a</sup> edição, Editorial Presença, Lisboa.

[37] PEREIRA, A., NEVES, L. (2003), *Geologia e Radioactividade Natural na Região das Beiras*, XXIII Curso de Actualização de Professores de Geociências, Coimbra.

[38] <http://www.chemicalelements.com/>

[39] GODINHO, M. M., NEVES, L. J. P.F., PEREIRA, A. J. S. C. (1999), *O gás Radão – Um Inimigo Público ... Mas Não na Cidade de Coimbra*. Actas do II Colóquio de Geografia de Coimbra, Coimbra, 65-69.

[40] NEVES, L. F., PEREIRA, A. C. (2004), Radioactividade natural e ordenamento do território: o contributo das Ciências da Terra. GEONOVAS n.º 18, 103 - 114.

[41] NEVES, L. J. P. F., PEREIRA, A. J. S. C., GODINHO, M. M., DIAS, J. M. (1996), *A Radioactividade das Rochas Como um Factor de Risco Ambiental no Território Continental Português: Uma Síntese*. V Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente, 1, 641- 649.

[42] NEVES, L. J. P. F., AVELANS, S. C. C., PEREIRA, A. J. S. C. (2003), *Variação Sazonal do Gás Radão em Habitações da Área Urbana da Guarda (Portugal Central)*. IV Congresso Ibérico de Geoquímica e XIII Semana de Geoquímica, Coimbra, 307-309.

[43] NEVES, L. J. P. F., PEREIRA, A. J. S. C., GODINHO, M. M., DIAS, J. M. (1999), *O Gás Radão em Solos da Região Central de Portugal: Um Factor a Considerar para o Ordenamento do Território*, Actas da VI Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente, 763-772.

[44] UNSCEAR (2000) – Report to the General Assembly with Scientific Annexes. *United Nations Scientifics Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation*.

[45] Algumas Considerações sobre Radioactividade em águas (2006).

(<http://www.sppcr.online.pt/agua.htm>)

- [46] ROBILLARD, P. A., SHARPE, W. E., SWISTOCK, B. R. (2006), *Reducing Radon in Drinking Water*, College of Agricultural Sciences.  
(<http://www.resources.cas.psu.edu/WaterResources/pdfs/radon.pdf>)
- [47] NAZAROFF, W., NERO, A. (1988), *Radon and Its Products in Indoor Air*, A Wiley – Interscience Publication, John Wiley.
- [48] PRICHARD, H. M., GESELL, T. F. (1981), *An Estimate of Population Exposures due to Radon in Public Water Supplies in the Área of Houston*, Texas, *Health Physics*, **41**, 599.
- [49] KALHOS, H., ASIKAINEM, M. (1980), *International Radiation Doses from Radioactivity of Drinking Water in Finland*, *Health Physics*, **30**, 109.
- [50] RODRIGUEZ, F., Marsh, H. (1997), *Introducion to Carbon Technologies*, Universidade de Alicante, Secretariado de Publicaciones.
- [51] RODRIGUEZ, F., FIGUEIREDO, J. L. (1986), *Carbon and Coal Gasification*, NATO ASI Séries, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- [52] BANSAL, R. C., DONNET, B., STOECKLI, F. (1988), *Active Carbon*, Marcel Dekker, Nova Iorque.
- [53] SEELING, B., BERGSGRUND, F., DERICKSON, R. (1992), *Treatment Systems for Houshold Water Supplies Actived Carbon Filtration*, University of Minnesota  
(<http://www.extension.umn.edu/distribution/naturalrecources/DD5939.html>)
- [54] BROECKER, W. S., PENG, T-H. (1982), *Tracers in the Sea*, Eldigio Press, Columbia University, New York.
- [55] PENTREATH, R. J. (1988), *Sources of Artificial Radionuclides in the Marine Environment*. In: *Radioactivity and Oceanography*, Elsevier London.

- [56] IVANOVICH, M., HARMON R. S. (1982), *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Environment Problems*, Oxford University Press, Oxford.
- [57] UNESCEAR (1982), Report to the General Assembly, with annexes. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York.
- [58] WOODHEAD, D. S., PENTREATH R.J. (1983), *A Provisional Assessment of Radiation Regimes in Deep Ocean Environments*. In: Park P.K., KESTER, D.R., DUEDALL I. W., KETCHUM B. H., *Wastes in the Ocean*, Volume 3: *Radioactive Wastes and the Ocean*, John Wiley & Sons, New York, p 133.
- [59] SCOTT, M. R. (1982), *The Chemistry of U- and Th- Series in Rivers*. In: IVANOVICH, M., HARMON R. S. (1982), *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Environment Problems*, Oxford University Press, Oxford, p 181.
- [60] REVELLE, R, FOLSOM, T. R., GOLDBERG, E. D., ISAACS, J. D. (1956), *Nuclear Science and Oceanography*, Proc. Internat. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, **13**, 371.
- [61] CARVALHO, P., MADRUGA, M. J., OLIVEIRA, J., LOPES, I., SEQUEIRA, M., FERRADOR, G. (2004), *Qualidade Radiológica da Água para Consumo em Portugal: Águas de Superfície e Águas Subterrâneas*, Instituto Tecnológico e Nuclear, DPRSN.
- [62] CARVALHO, P., MADRUGA, M. J., OLIVEIRA, J., LOPES, I., SEQUEIRA, M., FERRADOR, G. (2004), *Qualidade da Água para Consumo: Monitorização dos Parâmetros Radiológicos*, Instituto Tecnológico e Nuclear, DPRSN.
- [63] MADRUGA, M. J., CARVALHO, P., e outros (2004), *Vigilância Radiológica a Nível Nacional*, Relatório DPRSN, Série A, n.º 28.
- [64] (<http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/>)

[65] Radioactivity Decay of Protactinium-234 (2006).

([http://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/nat\\_Fak\\_IV/Organische\\_Chemie/](http://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/nat_Fak_IV/Organische_Chemie/))


[66] (<http://www.lip.pt/~luis>)

[67] Norma Portuguesa – NP 4330, Qualidade da Água, Medida da Actividade Beta Total em Águas não Salinas, Método por Fonte Concentrada, Instituto Português da Qualidade, Setembro de 1996.

[68] Norma Portuguesa – NP 4332, Qualidade da Água, Medida da Actividade Alfa Total em Águas não Salinas, Método por Fonte Concentrada, Instituto Português da Qualidade, Janeiro de 1997.



**ANEXO 1 - Protocolos das experiências realizadas numa aula na ESC**

	<b>ESCOLA SECUNDÁRIA DE CASQUILHOS</b>	
	Ficha de trabalho laboratorial	
	<b>12.º ano de Física</b>	<b>Ano lectivo: 2005/06</b>
	Nome: _____	Nº: _____ Tª: _____

## Radiação de fundo

### Objectivo

- Investigar a radiação de fundo.

### Fundamentação teórica

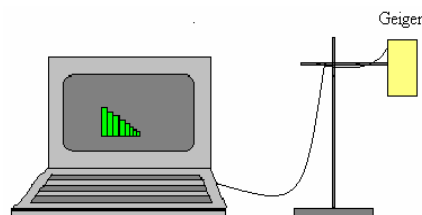
Todos nós estamos constantemente expostos a uma grande variedade de radiações naturais. Estas radiações provêm do espaço exterior à Terra (radiação cósmica) e dos átomos radioactivos que existem um pouco por todo o lado, por exemplo, no solo que pisamos, nos materiais de construção das nossas casas, no nosso próprio corpo. Nesta experiência, vamos avaliar a radiação de fundo natural com um detector Geiger-Müller.

### Material e equipamento

- Detector Geiger-Müller (GM)
- Sistema de aquisição (Computador)
- Suporte do detector

### Procedimento experimental

- Ligue o sistema de aquisição automático (figura 1).
- Faça uma aquisição com o contador GM durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (por exemplo, 10 minutos), sem que exista alguma fonte radioactiva nas proximidades. Registe os resultados obtidos na tabela 1.



**Figura 1: Sistema de aquisição automático.**

## Registo dos resultados

**Tabela 1**

Tempo (min)	Contagens Fundo

## Tratamento dos dados


- Calcule o valor médio do número de contagens do fundo e registe o resultado na tabela 2.

**Tabela 2**

Valor médio das contagens por minuto do fundo

## Questões

1. O número total de contagens durante um minuto varia ao longo do tempo. Porquê?
2. Que conclusão pode tirar quanto ao número de contagens por minuto? Parece-lhe elevado ou pequeno?

	<b>ESCOLA SECUNDÁRIA DE CASQUILHOS</b>
	Ficha de trabalho laboratorial <b>12.º ano de Física</b> <b>Ano lectivo: 2005/06</b> Nome: _____ N.º: _____ T.º: _____

## Radioactividade em rochas

### Objectivos:

- Investigar a existência de fontes naturais de radiação ionizante.
- Detectar a existência de radiação emitida por rochas.
- Concluir sobre os perigos da utilização de “rochas radioactivas” em materiais de construção.

### Fundamentação teórica

Os nuclídeos radioactivos de longa-vida estão presentes normalmente em pequenas concentrações nos materiais que nos rodeiam, nomeadamente, nas rochas que se formaram com a terra há  $4,5 \times 10^9$  anos. A radioactividade depende do tipo de nuclídeos presentes nas rochas sendo em regra mais elevada nas rochas graníticas do que nas sedimentares.

É possível detectar as radiações emitidas pelas “rochas radioactivas” utilizando um simples contador Geiger-Müller. Este apenas detecta a existência de nuclídeos radioactivos não fazendo a distinção dos diferentes tipos de radiação.

### Material e equipamento

- Contador Geiger-Müller (GM)
- Rocha radioactiva
- Sistema de aquisição (Computador)
- Suporte para o detector
- Suporte para a amostra

## Procedimento experimental

- Ligue o sistema de aquisição automático (figura 1).
- Faça uma aquisição com o contador GM durante 5 minutos, sem que exista alguma fonte radioactiva nas proximidades. Faça aquisições em intervalos de tempo de 1 minuto.
- Coloque em frente à janela do contador GM uma amostra de uma "rocha radioactiva". Repita a aquisição durante igual intervalo de tempo.
- Registe os resultados na tabela 1.

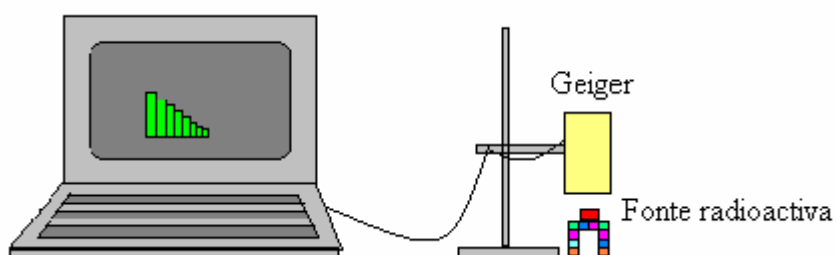


Figura 1: Sistema de aquisição automático.

## Registo dos resultados

Tabela 1

Tempo (min)	Contagens Fundo	Contagens Rocha

### Tratamento dos resultados


- Determine o valor médio das contagens para as duas situações e preencha a tabela 2.

**Tabela 2**

Valor médio das contagens por minuto do fundo	Valor médio das contagens por minuto da rocha

### Questões

1. Compare os valores obtidos experimentalmente nas duas situações.
2. O que pode concluir sobre a radioactividade da rocha utilizada?
3. A rocha em estudo poderia trazer alguns problemas em termos de saúde caso fosse utilizada como matéria-prima de materiais de construção?

	<b>ESCOLA SECUNDÁRIA DE CASQUILHOS</b>
	Ficha de trabalho laboratorial
	<b>12º. Ano de Física</b> <b>Ano lectivo: 2005/06</b>
	Nome: _____ Nº: _____ Tª: _____

## Radioactividade do potássio ( $^{40}\text{K}$ )

### Objectivos

- Detectar experimentalmente a radioactividade do potássio ( $^{40}\text{K}$ ).
- Alertar os alunos para o facto de que alguns alimentos que comemos contêm nuclídeos radioactivos.

### Fundamentação teórica

Uma significativa parte da radiação natural de fundo que nós recebemos vem do  $^{40}\text{K}$ . A radioactividade do potássio é proveniente do radioisótopo  $^{40}\text{K}$ . A sua meia-vida é de  $1,26 \times 10^9$  anos, decaindo por emissão beta para um nuclídeo estável.

O potássio é um elemento muito comum em solos, minerais e, consequentemente, nos alimentos.

O  $^{40}\text{K}$  constitui cerca de 0,0117% de todo o potássio natural que é abundante na Terra logo a sua contribuição para a radioactividade natural é grande.

### Material e equipamento

- Balança
- Cloreto de potássio
- Cloreto de sódio
- Detector Geiger-Müller (GM)
- Porta-amostras
- Sistema de aquisição (Computador)
- Suporte do detector
- Suporte do porta-amostra

## Procedimento experimental

- Ligue o sistema de aquisição automático (figura 1).
- Coloque num porta-amostras 50 g de cloreto de potássio.
- Faça aquisições durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (por exemplo, 10 minutos).
- Coloque num porta-amostras 50 g de cloreto de sódio.
- Faça aquisições durante o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ .
- Faça aquisições do fundo durante o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ .
- Registe os resultados na tabela 1.

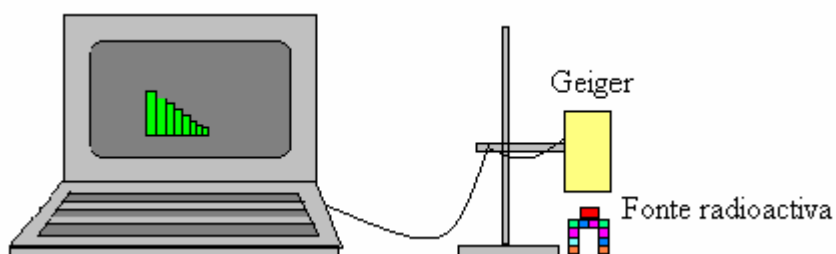


Figura 1: Sistema de aquisição automático.

## Registo dos resultados

Tabela 1

Tempo (min)	Contagens Fundo	Contagens Cloreto de potássio	Contagens Cloreto de sódio



### Tratamento dos resultados

- Determine o valor médio das contagens para as três situações e preencha a tabela 2.

**Tabela 2**

Valor médio das contagens por minuto do fundo	Valor médio das contagens por minuto do cloreto de potássio	Valor médio das contagens por minuto do cloreto de sódio

### Questões

1. Que conclusões pode tirar a partir dos resultados obtidos?
2. Faça uma pesquisa sobre os alimentos que contêm potássio.



## ESCOLA SECUNDÁRIA DE CASQUILHOS

Ficha de trabalho laboratorial

12.º ano de Física

Ano lectivo: 2005/06

Nome: \_\_\_\_\_ Nº: \_\_\_\_\_ Tª: \_\_\_\_\_

### Presença de gases radioactivos na atmosfera

#### Objectivos

- Verificar a presença de gases radioactivos na atmosfera do interior de um edifício.

#### Fundamentação teórica

Os nuclídeos radioactivos de longa-vida estão presentes nos materiais que nos rodeiam, especialmente nas rochas e minerais que se formaram com a terra há  $4,5 \times 10^9$  anos.

Em geral, os nuclídeos radioactivos que ocorrem naturalmente nos minerais não são perigosos para a nossa saúde. Uma importante excepção é o radão pois é um elemento gasoso o qual pode ser facilmente inalado.

O radão é um gás nobre não reactivo, inodoro e incolor mais denso que o ar. Apresenta três isótopos principais:  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{219}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$ , com meias-vidas de 3,82 dias, 55 s e 4 s, respectivamente, gerados nas cadeias naturais de decaimento.

Destes, o único nuclídeo que coloca problemas de segurança radiológica devido à sua longa meia-vida é o  $^{222}\text{Rn}$ .

Na figura 1 reproduz-se a cadeia de decaimento do  $^{238}\text{U}$ ; esta cadeia tem início com um isótopo de meia-vida muito longa ( $4,5 \times 10^9$  anos) e termina com o nuclídeo  $^{206}\text{Pb}$  que é estável. É de assinalar dois factos relevantes relativamente a esta cadeia: 1) todos os isótopos são sólidos, à excepção do  $^{222}\text{Rn}$ ; 2) ao  $^{222}\text{Rn}$  sucedem-se vários isótopos com meia-vida muito curta, designadamente, o  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  e o  $^{214}\text{Po}$ . Da combinação destes dois factos resulta que, por ser um gás, parte do radão pode libertar-se dos materiais geológicos e entrar em contacto com o Homem através da inalação; o decaimento nos pulmões gera descendentes sólidos, os quais ficam implantados nos tecidos. Por outro lado, os referidos descendentes tendem a ligar-se a poeiras e aerossóis presentes na atmosfera, quando são gerados por decaimento de radão

exteriormente ao organismo, podendo de seguida ser inalados e fixarem-se nos tecidos pulmonares. Este efeito será mais acentuado em meios fechados.

Em espaços abertos, o nível de concentração do radão é reduzido mas em espaços fechados, o radão libertado pelo solo ou materiais de construção atravessa as fendas nos pavimentos e paredes e pode atingir níveis mais elevados.

A concentração de radão no interior de uma habitação depende de muitos factores, tais como a sua localização no terreno, o tipo de materiais de construção, a ventilação o andar, etc..

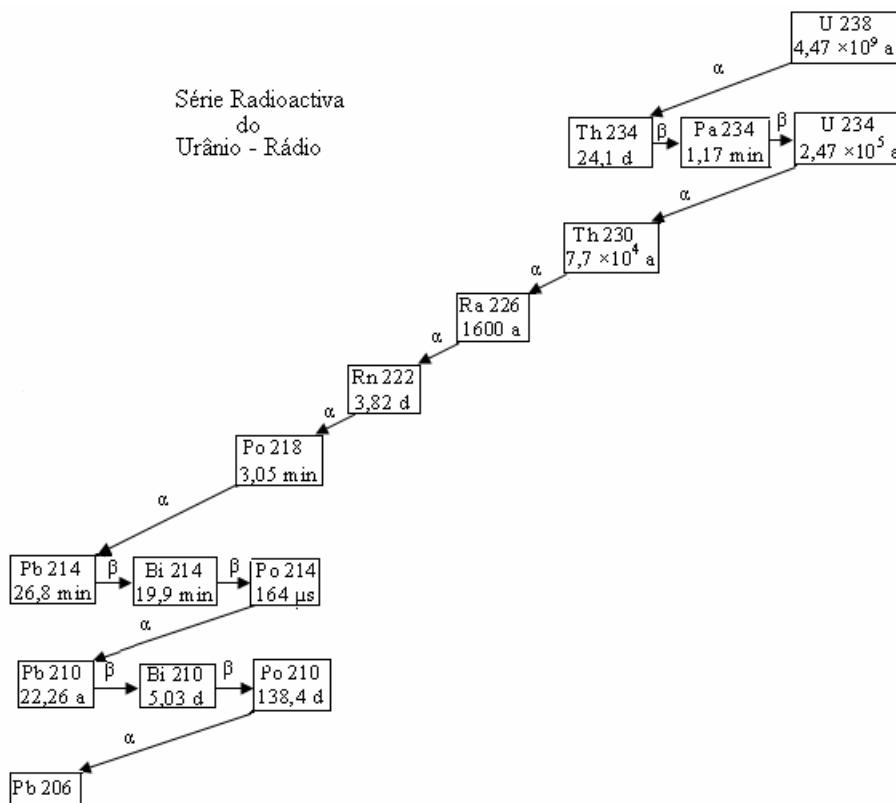


Figura 1: Série de decaimento do Urânio – Rádío.

### Material e equipamento

- Aspirador
- Contador Geiger-Müller (GM)
- Elástico
- Lenço de papel
- Sistema de aquisição (Computador)
- Suporte para o detector
- Suporte para o lenço

## Procedimento experimental

- Ligue o sistema de aquisição automático (figura 2)
- Faça uma contagem prévia do fundo durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (por exemplo, 5 min) sem qualquer fonte radioactiva nas proximidades.
- Coloque um lenço de papel no tubo de sucção do aspirador e prenda-o com um elástico.
- Ligue o aspirador durante cerca de 15 minutos.
- Retire o lenço do tubo do aspirador e coloque-o em frente à janela do contador GM.
- Faça aquisições durante 30 a 60 minutos, em intervalos de tempo de 1 minuto. Registe os resultados obtidos na tabela 1.

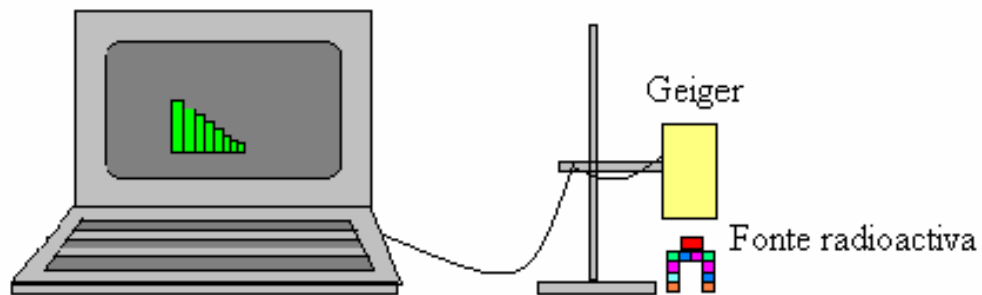


Figura 2: Sistema de aquisição automático.

## Registo dos resultados

**Tabela 1**

Tempo (min)	Contagens

Tempo (min)	Contagens

Tempo (min)	Contagens

**Fundo = \_\_\_\_\_ contagens por minuto**

## Tratamento dos resultados

- Agrupe as contagens em intervalos de tempo de 5 minutos.
- Faça o gráfico do número de contagens em função do tempo. Utilize uma folha de cálculo.

## Questões

1. Que conclusões pode tirar a partir da análise do gráfico?
2. Que perigos podem trazer os gases radioactivos para a saúde pública?

## **ANEXO 2 - Protocolos de outras experiências**

## Protocolo 1 - Deflexão da radiação emitida por uma fonte radioactiva num campo electromagnético.

### Objectivo

- Verificar experimentalmente a existência ou não de deflexão (desvio) da radiação de diferentes fontes radioactivas.

### Fundamentação teórica

O sistema experimental da figura 1 permite criar um campo magnético entre os pólos de um electroímã.

Ao fazer passar diferentes tipos de radiação num campo magnético pode verificar-se que a radiação que possui carga sofre deflexão enquanto que a radiação sem carga não sofre.

Uma partícula com a carga ( $q$ ) fica sujeita a uma força magnética ( $\vec{F}_m$ ) dada pela expressão:

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow F_m = qvB \sin\theta$$

sendo  $\vec{v}$  o vector velocidade da carga ( $q$ ). A radiação com carga é deflectida, sempre que a sua velocidade não é colinear com o campo magnético  $\vec{B}$ .

Podemos concluir sobre a existência ou não de carga de diferentes tipos de radiação comparando o número de contagens registadas num detector Geiger-Müller, quando o campo magnético está ligado com a situação em que não existe campo  $\vec{B}$ .

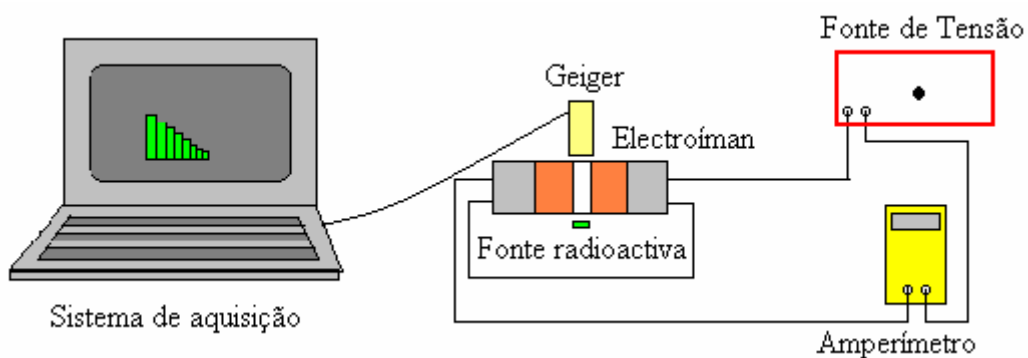


Figura 1: Esquema de montagem do contador GM, electroímã e sistema de aquisição.

## Material

- Detector Geiger-Müller (GM)
- Electroímán
- Fios de ligação
- Fonte de alimentação
- Fontes radioactivas:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{204}\text{Tl}$  e  $^{241}\text{Am}$
- Amperímetro
- Sistema de aquisição (Computador)
- Suportes para o detector e para a fonte radioactiva

## Procedimento experimental

- Estabeleça correctamente as ligações entre a fonte de alimentação, o amperímetro e o electroímán, de acordo com a figura 1.
- Ligue o sistema de aquisição.
- Coloque uma fonte radioactiva de  $^{137}\text{Cs}$  num suporte de forma a que as radiações atravessem o campo magnético.
- Coloque o detector GM diametralmente oposto ( $0^\circ$ ) à fonte radioactiva.
- Comece por fazer uma aquisição durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (por exemplo, 2 minutos) sem aplicar a corrente ao electroímán.
- Ligue o electroímán e aplique uma intensidade de corrente de 0,5 A (dependente do electroímán). Proceda à aquisição com o contador GM durante o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$  anteriormente escolhido.
- Aumente a intensidade de corrente em passos de 0,5 A (dependente do electroímán) até atingir o valor máximo suportado pelas bobinas do electroímán. Em cada passo faça uma aquisição durante o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ .  
**Atenção: não ultrapasse o valor máximo suportado pelas bobinas do electroímán.**
- Faça variar a posição do detector, por exemplo,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  e repita o procedimento anterior.
- Repita todo o procedimento para outras fontes radioactivas, tais como:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{204}\text{Tl}$  e  $^{241}\text{Am}$ .
- Registe os dados experimentais nas tabelas 1 e 2.



- Faça a aquisição do fundo durante o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ , sem qualquer fonte radioactiva nas suas imediações.

### Registo dos resultados

**Tabela 1**

Intensidade de corrente (A)	<sup>137</sup> Cs			<sup>90</sup> Sr		
	Contagens 0°	Contagens 45°	Contagens 90°	Contagens 0°	Contagens 45°	Contagens 90°

**Tabela 2**

Intensidade de corrente (A)	<sup>204</sup> Tl			<sup>241</sup> Am		
	Contagens 0°	Contagens 45°	Contagens 90°	Contagens 0°	Contagens 45°	Contagens 90°

**Fundo** = \_\_\_\_\_ contagens por minuto

### **Tratamento dos dados**

- Comece por subtrair o fundo a cada contagem.
- Faça os gráficos do valor médio do número de contagens em função da intensidade de corrente no electroímã com o fundo subtraído, para cada fonte e para os vários ângulos entre a fonte e o detector. Utilize a folha de cálculo.

### **Questões propostas:**

1. Quais as radiações que sofrem deflexão?
2. Qual a radiação que não é deflectida no campo magnético?
3. Qual a radiação que sofre maior desvio (para um mesmo ângulo)? Qual é a explicação para tal facto?
4. Explique por que motivo a radiação com carga sofre deflexão ao passar por um campo magnético.
5. Que tipo de radiação tem (apresenta) cada uma das fontes que estudou?
6. Algumas das fontes usadas tem (possui) mais do que um tipo de radiação?
7. Tire conclusões.

## Protocolo 2 -Estudo da taxa de contagens com a distância

### Objectivos

- Verificar experimentalmente a relação inversa entre a taxa de contagens e o quadrado da distância da fonte radioactiva ao detector Geiger- Müller.
- Sensibilizar os alunos para a protecção contra as radiações ionizantes.

### Fundamentação teórica

Uma propriedade comum a todas as fontes que emitem radiação isotropicamente, é a de que a intensidade medida por um detector colocado a uma distância  $d$  varia com o inverso do quadrado dessa distância.

O número de contagens é proporcional ao inverso da distância de acordo com a *Lei do Inverso do Quadrado da Distância*:

$$n^{\circ} \text{ contagens} \propto \frac{1}{d^2}$$

A protecção contra as radiações, usando-se a distância como factor de redução da exposição é o meio mais prático, com baixo custo e mais rápido numa situação normal ou de emergência.

Por exemplo, a intensidade de radiação emitida por uma fonte de raios X ou gama diminui à medida que nos afastamos da mesma e, conseqüentemente, a exposição radiológica e a dose de radiação diminui na mesma proporção, de acordo com a *Lei do Inverso do Quadrado da Distância*.

Nesta experiência mede-se a taxa de contagem referente a uma fonte radioactiva colocada a diferentes distâncias de um detector Geiger-Müller.

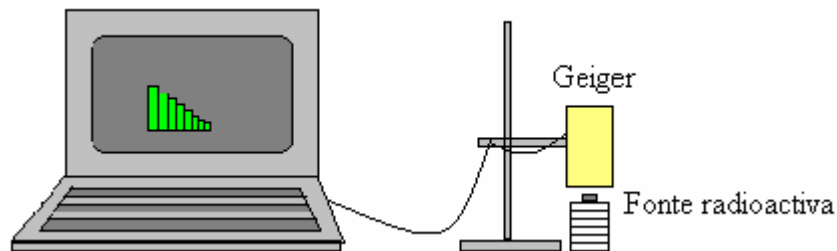
### Material e equipamento:

- Detector Geiger-Müller (GM)
- Fonte radioactiva ( $^{60}\text{Co}$ )
- Régua
- Sistema de aquisição automático (Computador)
- Suporte para o detector
- Suporte com diferentes posições para a fonte radioactiva

## Procedimento experimental

- Ligue o sistema de aquisição automático (figura 1).
- Faça a aquisição durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (por exemplo, 5 minutos) sem fonte. Registe o número de contagens do fundo.
- Comece por colocar a fonte radioactiva de  $^{60}\text{Co}$  à maior distância,  $d$ , possível do detector GM. Meça essa distância e registe-a na tabela 1.
- Inicie o sistema de aquisição durante o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ .
- Faça aquisições durante o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$  colocando a fonte em posições sucessivamente mais próximas do detector. Meça as respectivas posições da fonte e registe-as na tabela 1.

**Nota: Proceda de maneira a manter as condições experimentais.**



**Figura 1: Sistema de aquisição automático.**

## Registo dos resultados

**Tabela 1**

Distância (cm)	Contagens

Fundo = \_\_\_\_\_ contagens por minuto

### Tratamento dos dados

- Subtraia o fundo a cada contagem.
- Faça um gráfico do número de contagens em função da distância, com o fundo subtraído. Utilize a folha de cálculo.
- Faça um gráfico do número de contagens em função do inverso da distância, com o fundo subtraído,  $x = f\left(\frac{1}{d^2}\right)$ . Utilize a folha de cálculo.

### Questões

- Que conclusões pode tirar a partir da análise dos gráficos?
- Verifica-se a *Lei do Inverso do Quadrado da Distância*?

## Protocolo 3 - Estudo da atenuação da radiação gama na matéria

### Objectivos:

- Estudar a relação entre o aumento da espessura de folhas de alumínio e de chumbo e a atenuação da radiação gama.
- Concluir sobre o material que melhor nos protege contra as radiações.

### Fundamentação teórica

Quando um feixe monocromático incide num meio material, o seu número decresce exponencialmente com a espessura da matéria atravessada.

A relação entre a intensidade inicial de um feixe de fotões  $I_0$  que atravessa um meio material e a intensidade  $I$  após ter atravessado uma espessura  $x$  é dada por:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

em que  $\mu$  é o coeficiente de atenuação total.

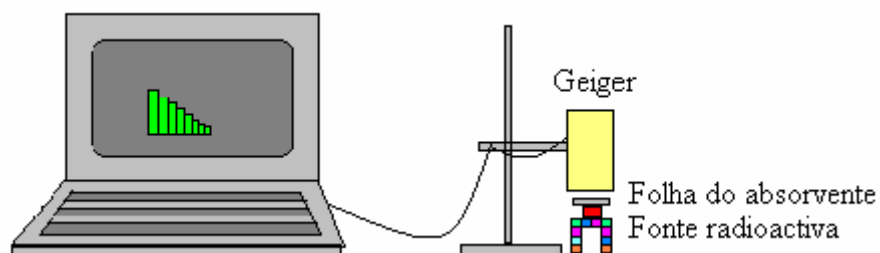
### Material e equipamento

- Detector Geiger-Müller (GM)
- Folhas de dois tipos de absorventes de diferentes espessuras
- Fonte radioactiva ( $^{137}\text{Cs}$  ou  $^{60}\text{Co}$ )
- Sistema de aquisição automático (Computador)
- Suporte para o detector
- Suporte para a fonte

### Procedimento experimental

- Ligue o sistema de aquisição automático (figura 1).
- Escolha dois conjuntos de absorventes de espessuras diferentes (por exemplo, de chumbo, cobre, aço ou alumínio).
- Faça uma primeira aquisição durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (por exemplo, 5 minutos) sem absorvente entre a fonte e o detector.

- Coloque uma folha do absorvente 1 entre a fonte e o detector GM e faça a aquisição durante o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ .
- Utilize folhas do absorvente 1 com espessuras sucessivamente maiores e repita o procedimento anterior.
- Repita os passos anteriores utilizando folhas do absorvente 2.
- Registe os resultados experimentais na tabela 1.



**Figura 1: Sistema de aquisição automático.**

### Registo dos resultados

**Tabela 1**

Absorvente _____		Absorvente _____	
Espessura (cm)	Contagens por minuto	Espessura (cm)	Contagens por minuto

**Fundo = \_\_\_\_\_ contagens por minuto**

### **Tratamento dos dados**

- Subtraia o fundo a cada contagem.
- Faça um gráfico com o número de contagens em função da espessura das folhas de alumínio, com o fundo subtraído. Utilize a folha de cálculo.
- Faça um gráfico com o número de contagens em função da espessura das folhas de chumbo, com o fundo subtraído. Utilize a folha de cálculo.

### **Questões**

1. Que conclui sobre a relação entre as contagens e a espessura das folhas utilizadas dos diferentes absorventes?
2. Qual dos materiais atenua mais a radiação gama?
3. Qual dos materiais nos protege melhor das radiações?



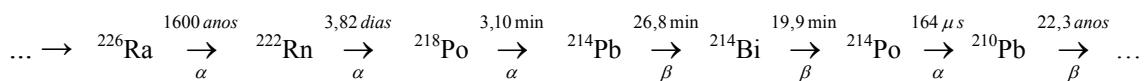
## Protocolo 4 – Amostras de materiais retirados de um gerador de radão

### Objectivos

- Estudar o decaimento dos descendentes do  $^{222}\text{Rn}$ .
- Abordar aspectos relacionados com tempos de meia-vida, decaimento alfa e gama, radiação de fundo.
- Sensibilizar os alunos para a radioactividade natural.

### Fundamentação teórica

O radão é um gás nobre que faz parte das cadeias radioactivas naturais. O  $^{222}\text{Rn}$  é o descendente directo do  $^{226}\text{Ra}$ , da cadeia de decaimento do  $^{238}\text{U}$ . O  $^{222}\text{Rn}$  decai por emissão alfa com uma meia-vida de 3,82 dias. Tal como se pode observar no esquema seguinte os descendentes do  $^{226}\text{Ra}$  têm meias-vidas relativamente curtas tornando possível projectar uma experiência para estudar o decaimento dos descendentes do radão.

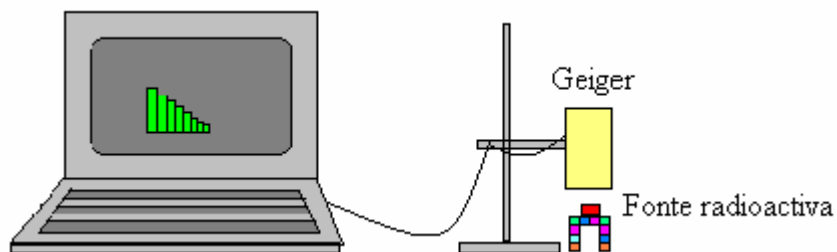


### Material e equipamento

- Carvão activado
- Detector Geiger-Müller (GM)
- Folha de alumínio
- Gerador de radão
- Porta-amostras
- Sistema de aquisição (Computador)
- Suporte para o detector
- Suporte para a amostra

### Procedimento experimental

- Ligue o sistema de aquisição automático (figura 1).
- Faça uma contagem prévia do fundo durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (por exemplo, 5 min) sem fontes radioactivas nas suas proximidades.
- Retire uma folha de alumínio do gerador de radão e coloque-a em frente à janela do contador GM.
- Faça aquisições durante 30 a 60 minutos, em intervalos de 1 minuto. Registe os resultados na tabela 1.
- Retire um porta-amostra com carvão activado do gerador de radão e repita o procedimento anterior para o carvão activado. Registe os resultados na tabela 2.



**Figura 1: Sistema de aquisição automático.**



**Tabela 2 – Carvão activado**

Tempo (min)	Contagens

Tempo (min)	Contagens

Tempo (min)	Contagens

**Fundo = \_\_\_\_\_ contagens por minuto**

**Tratamento dos resultados**

- Agrupe as contagens em intervalos de tempo de 5 minutos.
- Faça os gráficos das contagens em função do tempo, para a folha de alumínio e para o carvão activado. Use uma folha de cálculo.

**Questão**

1. O que pode concluir a partir da análise dos gráficos?

## **Protocolo 5 - Balões radioactivos**

### **Objectivo**

- Verificar a presença de gases radioactivos na atmosfera do interior de um edificio.

### **Fundamentação teórica**

Os balões ao serem friccionados adquirem carga adquirindo a propriedade de captar partículas de pó que estão no ar. Como os descendentes sólidos do radão tendem a ligar-se a poeiras e aerossóis presentes na atmosfera torna-se possível fazer a detecção da radioactividade presente no ar utilizando um detector Geiger-Müller.

### **Material e equipamento**

- Balão de borracha
- Contador Geiger-Müller (GM)
- Pano para friccionar o balão
- Sistema de aquisição (Computador)
- Suporte para o detector
- Suporte para o balão

### **Procedimento experimental**

- Encha um balão de borracha e friccione-o com um pano adequado (tipo pêlo de gato). Coloque o balão pendurado durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (por exemplo, 1 hora) num compartimento de um edificio.
- Ligue o sistema de aquisição automático (figura 1).
- Faça uma contagem prévia do fundo durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (por exemplo, 5 min) sem qualquer fonte radioactiva nas proximidades.
- Esvazie o balão e coloque-o em frente à janela do detector GM. Faça aquisições durante 30 a 60 minutos, em intervalos de tempo de 1 minuto.  
Registe os resultados na tabela 1.

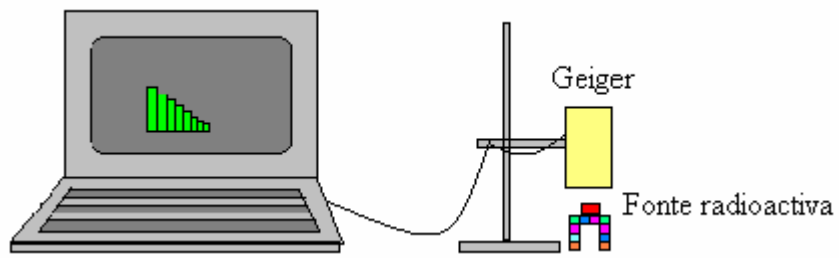


Figura 1 Sistema de aquisição automático.

### Registo dos resultados

Tabela 1

Tempo (min)	Contagens	Tempo (min)	Contagens	Tempo (min)	Contagens

Fundo = \_\_\_\_\_ contagens por minuto

### **Tratamento dos resultados**

- Agrupe as contagens em intervalos de tempo de 5 minutos.
- Faça o gráfico do número de contagens em função do tempo com o fundo subtraído. Utilize uma folha de cálculo.

### **Questão**

1. Que conclusões pode tirar a partir da análise do gráfico.