

Marco Gilles Rodrigues Costa

Estudo do Desmantelamento de uma Instalação com Valências de Imagiologia Molecular e Produção de Radioisótopos

Dissertação de Mestrado na área científica de Engenharia Biomédica, perfil Imagem e Radiação, orientada pelo Professor Doutor Nuno Ferreira e pelo Professor Doutor Francisco Alves e apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Setembro 2012



Estudo do Desmantelamento de uma Instalação com Valências de Imagiologia Molecular e Produção de Radioisótopos



Departamento de Física
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

Marco Gilles Rodrigues Costa

Tese orientada por:

Prof. Dr. Nuno Ferreira

Tese Supervisionada por:

Prof. Dr. Francisco Alves

Coimbra, Setembro 2012

© Esta cópia da tese é fornecida na condição de que quem a consulta reconhece que os direitos de autor são pertença do autor da tese e que nenhuma citação ou informação obtida a partir dela pode ser publicada sem a referência apropriada.

© This copy of the thesis has been supplied on condition that anyone who consults it is understood to recognize that its copyright rests with its author and that no quotation from the thesis and no information derived from it may be published without proper acknowledgement.

“There are no insurmountable technical problems to decommissioning at any stage, but considerations with respect to policy, planning, timing, costs, waste disposal, safety criteria and regulatory aspects need further development”

(IAEA)

Aos meus ...

Agradecimentos

Chega ao fim uma etapa e como resultado surge este trabalho, fruto do trabalho árduo de um ano de finalista. Sem o apoio de algumas pessoas, a concretização de este trabalho não seria possível. Por isso, queria agradecer todas aquelas pessoas que me ajudaram durante este, não só profissionalmente, mas também moralmente, pois sem uma mente sã não conseguiria alcançar este objectivo.

Quero dirigir especialmente os meus agradecimentos, em primeiro lugar, aos meus pais, pois sem ajuda monetária e afectiva não poderia alcançar e terminar os meus estudos. Se hoje posso chegar a ser mestre em Engenharia Biomédica, levar comigo esta bagagem de conhecimentos para o futuro, a eles o devo. Também gostaria de agradecer o apoio do meu irmão Rui e da Florence, que me aconselharam e deram força para acreditar de que era capaz. Ao meu avô, que já partiu, também fica um agradecimento pelo apoio que ele me proporcionou.

Um agradecimento e um grande abraço vão para os meus amigos, pela distração que me proporcionaram, por me desviarem às vezes, mas também pela força e apoio que me deram.

Por último, gostaria de agradecer aos meus orientadores, pela confiança que depositaram em mim, pela autonomia que me proporcionaram. Ao professor Francisco agradeço pelo apoio, pelas informações, pelas questões científicas e sobretudo pela disponibilidade

Sumário

A fase final na vida de uma instalação nuclear é o seu desmantelamento. O desmantelamento é um processo complexo que envolve diversas tarefas como a caracterização radiológica; a descontaminação das instalações e dos equipamentos, a gestão de resíduos e a demolição dos edifícios e estruturas ou então a reutilização das mesmas. Um planeamento e a gestão cautelosa do desmantelamento segue um conjunto de legislação aplicável que tem em conta a saúde e a segurança dos trabalhadores expostos e do público em geral e a protecção do ambiente.

Desde os meados dos anos 1980, muitas experiências foram partilhadas sobre actividades de desmantelamento. Com o desenvolvimento de algumas nações, como os EUA, a França, o Japão, o Reino Unido, etc., a experiência permitiu a publicação de documentos, em particular pela IAEA, sobre diversos assuntos, como aspectos técnicos, estratégias, segurança nuclear, aspectos legais e gestão de resíduos.

Portugal tem pouca legislação publicada sobre desmantelamento, provavelmente devido à pouca experiência no domínio nuclear. O ICNAS é um instituto, onde se aplicam as ciências nucleares, e não possui um plano de desmantelamento, importante para a sua actividade legal e sua segurança.

Abstract

The final phase in nuclear facilities life is the decommissioning. It is a complex process involving several operations: radiological characterization; decontamination; dismantling of plant, equipment and facilities; waste management and handling other materials; and demolition of buildings and structures or reuse them. Careful planning and management of decommissioning follow wide regulatory aspects that take into account the importance of operating staff and general public health and safety and the protection of environment.

Since the mid of 1980s, much has been learned in decommissioning activities. With a growing experience of some countries such as USA, France, UK, Japan, etc, numerous guidance documents have been published, particularly by the IAEA in many subjects including technologies, strategy, safety, regulations and waste management.

Portugal has weak regulations on decommissioning, probably due to a poor nuclear experience. ICNAS is a nuclear facility without a decommissioning plan, important to its legal and safe activities.

Índice

Agradecimentos	v
Sumário	vii
Abstract	ix
Índice	xi
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xvii
Índice de abreviaturas e siglas	xix
Capítulo I - Introdução	1
I.1. Contextualização	1
I.2. Objectivo	4
I.3. Motivação	4
I.4. Estrutura	5
Capítulo II – Desmantelamento de uma instalação nuclear	7
II.1. Nota introdutória	7
II.2. Tipo de Instalação	9
2.1. Piso 1 – Administração e direcção	9
2.2. Piso 0 – Medicina Nuclear	9
2.3. Piso -1 – Medicina Nuclear – PET/CT	10
2.4. Piso -2 – Unidade de Produção	11
2.5. Outros	11
II.3. Estratégia de Desmantelamento para o ICNAS	12
3.1. Estratégia de não acção	14
3.2. Estratégia para instalações individuais	14
3.2.1. Estratégia para instalações que usam pequenas fontes radioactivas portáteis ou móveis	15
3.2.2. Estratégia para aceleradores de partículas	16
3.2.3. Estratégia para instalações de investigação, <i>hot cells</i> , laboratórios de radioquímica e instalações médicas (MN)	16

II.4. Aspectos Regulamentares	18
4.1. Em Portugal.....	20
4.1.1. Entidades Competentes.....	20
4.1.2. No domínio da protecção sanitária e segurança dos trabalhadores e público em geral.....	21
4.1.3. Em caso de emergência radiológica	23
4.1.4. No domínio da higiene e segurança nos locais de trabalho e organização das actividades de segurança, higiene e saúde no trabalho.....	23
4.1.5. Práticas Seguras de gestão de resíduos	24
4.1.6. No domínio da protecção do Ambiente	25
4.2. Na União Europeia.....	25
4.3. Recomendações da IAEA.....	26
II.5. Planeamento e Gestão	27
II.6. Aspectos Técnicos.....	29
6.1. A radioactividade e as instalações	29
6.2. O que produz o ciclotrão?.....	30
6.2.1. Fórmula de Bethe, secção eficaz e estimativa dos neutrões produzidos	31
6.2.2. Composição das Paredes do bunker e interacção dos neutrões com a matéria.....	33
6.2.3. Núcleos possivelmente produzidos.....	36
6.3. Historial das fontes seladas	39
6.4. Outros equipamentos.....	42
6.4.1. Módulos de produção de radiofármacos.....	42
6.4.2. Tomógrafos de PET e Câmaras gama	43
6.4.3. Ciclotrão.....	43
II.7. Segurança durante o Desmantelamento	44
II.8. Gestão de Resíduos.....	46
8.1. Gestão de fontes seladas radioactivas.....	51
8.2. Gestão de resíduos radioactivos sólidos	54
8.3. Gestão de resíduos radioactivos líquidos.....	55
8.4. Transporte de resíduos radioactivos	55
8.5. Resíduos no ICNAS	57
II.9. Custos	61
II.10. Garantia de Qualidade.....	64
Conclusão/Discussão	65

Trabalho Futuro	67
Anexo A	69
Anexo B	74
Anexo C	77
Anexo D	78
Anexo D.1.....	79
Anexo D.2.....	81
Anexo D.3.....	85
Anexo D.4.....	89
Anexo E	90
Anexo F	98
Referência Bibliográfica	101

Índice de Figuras

Figura 1 – Exemplos de propaganda publicitária nas décadas de 1920 até 1960 para produtos contendo materiais radioactivos.....	2
Figura 2 - Representação do tipo de interacção dos neutrões em função da sua energia....	35
Figura 3 - Árvore de decisão para a gestão de resíduos: separação, classificação e eliminação (adaptada).....	49
Figura 4 - Opções para fontes seladas radioactivas fora de uso.....	52
Figura 5 - Planta do ICNAS: Piso 1.....	69
Figura 6 - Planta do ICNAS: Piso 0.....	70
Figura 7 - Planta do ICNAS: Piso -1	71
Figura 8 - Planta do ICNAS: Piso -2	72
Figura 9 - Planta do ICNAS: Piso -3	73
Figura 10 – Variação da Actividade das fontes seladas que o ICNAS possui, em μCi	92
Figura 11 - Fonte de ^{22}Na $T_{1/2}=2,6$ anos Lote: 1251-94-3	93
Figura 12 - de ^{22}Na $T_{1/2}=2,6$ anos Lote: 1321-83-49 Thru54.....	93
Figura 13 - Fonte de ^{22}Na $T_{1/2}=2,6$ anos Lote: 05091H7.....	94
Figura 14 - Fonte de ^{22}Na $T_{1/2}=2,6$ anos Lote: 1289-85	94
Figura 15 - Fonte de ^{68}Ge $T_{1/2}=270,8$ dias Lote: 12896.....	95
Figura 16 - Fonte de ^{68}Ge $T_{1/2}=270,8$ dias Lote: 1267-62	95
Figura 17 - Fonte de ^{137}Cs $T_{1/2}=30$ anos Lote: CDRB2719 S/O 119209 pz 768.....	96
Figura 18 - Fonte de ^{137}Cs $T_{1/2}=30$ anos Lote: 422-95	96
Figura 19 - Fonte de ^{152}Eu $T_{1/2}=13,54$ anos Lote: 424-29	97

Índice de Tabelas

Tabela 1. - Radionuclídeos usados no ICNAS e respectivos exames para que são usados.....	10
Tabela 2 - Características dos feixes obtidos no ICNAS	30
Tabela 3 - Alvos usados no ciclotrão do ICNAS	30
Tabela 4 - Densidade dos átomos de cada elemento em betão "normal".	33
Tabela 5 - Energias dos diferentes tipos de neutrão.....	35
Tabela 6 - Núcleos radioactivos que possam surgir nas paredes do bunker. *	37
Tabela 7 - Limites de dose para os trabalhadores expostos e membros do público.....	45
Tabela 8 - Critérios típicos dos resíduos	47
Tabela 9 – Triagem de resíduos perigosos, com origem no ICNAS.....	58
Tabela 10 - Câmaras gama que o ICNAS possui.	74
Tabela 11 - Composição do Havar®	77
Tabela 12 - Propriedades físicas do Havar®	77
Tabela 13 - Lista das fontes seladas que o ICNAS possui. Lista afixada na parede antes de aceder à sala quente do piso -2.	91

Índice de abreviaturas e siglas

ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
CE	<u>C</u> omissão <u>E</u> uropeia
CEE	<u>C</u> omunidade <u>E</u> conómica <u>E</u> uropeia
EURATOM (CEEA)	<u>C</u> omunidade E uropeia da <u>E</u> nergia A tómica
DL	<u>D</u> ecreto- <u>L</u> ei
FMUC	<u>F</u> aculdade de <u>M</u> edicina da <u>U</u> niversidade de <u>C</u> oimbra
¹⁸ F _{FDG}	2- ^[18F] fluoro-2- <u>d</u> esoxi-D-glicose
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
ICNAS	Instituto de <u>C</u> iências <u>N</u> ucleares <u>A</u> plicadas à <u>S</u> aúde
ITN/IST	Instituto <u>T</u> écnico <u>N</u> uclear / <u>I</u> nstituto <u>S</u> uperior <u>T</u> écnico
MN	<u>M</u> edicina <u>N</u> uclear
NRC	<u>N</u> uclear <u>R</u> egulatory <u>C</u> ommission
OCDE	<u>O</u> rganização para a <u>C</u> ooperação e <u>D</u> esenvolvimento <u>E</u> conómicos
PET/CT	<i>Positron Emission Tomography / Computerized Tomography</i>
PIB	<u>P</u> roduto <u>I</u> nterno <u>B</u> ruto
T _{1/2}	Período de semi-desintegração
TPE	<u>T</u> rabalhadores <u>P</u> rofissionalmente <u>E</u> xpostos
UE	<u>U</u> nião <u>E</u> uropeia

Capítulo I

INTRODUÇÃO

I.1. Contextualização

Há mais de um século que a radioactividade foi observada acidentalmente pela primeira vez por Henri Becquerel (1896), enquanto este estudava propriedades de fluorescência de sais de urânio. Inicialmente baptizada de “Hiperfosforescência”, Marie Curie renomeou este fenómeno de “radioactividade” no desenvolvimento da sua tese de doutoramento, sobre as propriedades ionizantes da radiação. Desde então, muito se tem estudado sobre este fenómeno, o que permitiu diferenciar tipos de radiação, quantificá-la e estabelecer limites e riscos no seu manuseamento.

O facto de haver um intervalo de tempo, relativamente alargado, entre a descoberta da radioactividade e o conhecimento dos perigos que acarreta, levou ao aparecimento de uma série de produtos que incluíam substâncias radioactivas, como mostra a Figura 1. Desde da década de 1920 até à década de 1960, os consumidores adquiriam estes produtos, pois acreditavam nos seus benefícios, não sabendo dos perigos que eles traziam à saúde pública. Além destes produtos, desde a década de 1940, vários protótipos de reactores nucleares foram desenhados e postos em funcionamento; e rapidamente o número de reactores aumentou pelo mundo, resultado do desenvolvimento da indústria nuclear [IAEA06].



Figura 1 – Exemplos de propaganda publicitária nas décadas de 1920 até 1960 para produtos contendo materiais radioativos.

Os avanços científicos na física das radiações e na física biológica, até ao fim da segunda metade do século XX, permitiram esclarecer a interação da radiação com a matéria, em particular os tecidos vivos. Assim, começou-se a utilizar este fenómeno, de modo controlado, nos meios de diagnóstico médico e terapêutica, e em muitas outras áreas, como a datação com carbono 14, nos detectores de incêndios, ou até mesmo na esterilização. Deste modo, surgiu a necessidade de se implementarem medidas de radioproteção, meios de sensibilização e todo um conjunto de legislação nacional e internacional, à medida que eram conhecidos os efeitos nocivos das radiações. O primeiro grande passo na uniformização e preocupação nesta área foi o Tratado de Roma. Este tratado foi assinado em 1957 e inclui o Tratado que institui a CEE e o Tratado que institui a EURATOM (ou CEEA). Além das proporções políticas e económicas que representa, o Tratado de Roma revela a importância e a necessidade de se criarem condições para o desenvolvimento da indústria nuclear, assim como a utilização pacífica da energia nuclear. Além disso, o Tratado EURATOM prevê uma cooperação internacional na investigação da energia atómica. Posterior a este tratado, mas ainda no mesmo ano, enquanto a Europa se unificava, era estabelecida a Agência Internacional da Energia Atómica (IAEA). A IAEA é um organismo que não legisla, constitui sim um meio internacional para incentivar o desenvolvimento e o uso pacífico da energia nuclear, fornecendo salvaguardas contra o seu mau uso. Além disso, este órgão promove a segurança nuclear, padrões de segurança e sua implementação; demonstrando já a necessidade de proteger as populações contra as radiações ionizantes.

A partir da década de 1970, o Conselho Europeu, o mais alto órgão que governa a CEEA, tendo conhecimento dos riscos que a radioactividade trazia à população, apenas emitia documentos para a sensibilização dos Estados-membros em implementar medidas de protecção contra as radiações. O Conselho também emitia resoluções ou convenções em matéria de gestão de resíduos e sobre outros assuntos radiológicos. A primeira acção direccionada para a protecção das populações surge em 1989 com a Directiva 89/618/EURATOM. Com este documento o Conselho obriga os Estados-Membros a informar as populações sobre as medidas de protecção sanitárias aplicáveis e que comportamento adoptar em caso de emergência radiológica. Outra medida importante na radioprotecção surge em 1996. Com a Directiva 96/29/EURATOM, o Conselho da União Europeia fixa as normas base de segurança, relativamente à protecção sanitária da população e dos trabalhadores contra os riscos resultantes da radiação ionizante. Desde da publicação desta directiva, outras foram publicadas mais recentemente, no que diz respeito à protecção, fiscalização e controlo de fontes seladas e outros materiais radioactivos (resíduos e combustível irradiado). [JOCE89, JOCE96]

Estas medidas foram tomadas, como já foi referido, à medida que se evoluía neste domínio da Ciência. Além disso, muitas medidas surgiram quando se evidenciaram os riscos da exposição dos trabalhadores à radiação, mas também do público em caso de acidentes nucleares. Na década de 1970 surgiu um problema que permitiu identificar alguns riscos radiológicos e alertar para a necessidade de legislar nesse domínio. Esse problema tem que ver com o envelhecimento progressivo e a obsolescência técnica e económica dos reactores nucleares construídos nos anos 1940. Assim, identificava-se pela primeira vez (1975) o desafio de desmantelamento de instalações nucleares. Muitos dos reactores situavam-se em países/instituições que, embora familiarizados com o seu funcionamento e gestão, não tinham sistemas de controlo e tecnologia suficiente para planear e implementar projectos de desmantelamento. Passados estes anos, muito se tem trabalhado e progredido nesse sentido. Hoje, o desmantelamento é geralmente considerado uma indústria desenvolvida. Contudo, esta indústria deve manter continuamente uma postura activa com os requisitos regulamentares ambientais e de segurança, com o progresso técnico e com as mudanças políticas nacionais e internacionais. Para tal, os relatórios da IAEA contribuem para a sensibilização e difusão do conhecimento técnico e experiência já desenvolvidos, principalmente para os países que estejam a iniciar o primeiro plano de desmantelamento. Deste modo, a IAEA ajuda e

aconselha no desenvolvimento de planos de desmantelamento, mas também na construção de instalações nucleares de diversas valências, e também no desenvolvimento pacífico e sustentável de programas nucleares. [IAEA06]

I.2. Objectivo

Conforme o título da presente dissertação, esta tese tem por objectivo desenvolver um estudo de desmantelamento de uma instalação nuclear. Em primeira instância, o estudo será desenvolvido com base e para o ICNAS. Além do ICNAS, o estudo deve ser um exemplo para outras instalações semelhantes e alertar para a necessidade da legislação nacional contemplar programas de desmantelamento. Desta forma, o presente documento poderá ser pioneiro na implementação de medidas neste domínio, regulamentando e aconselhando estratégias, métodos como desenvolver projectos de desmantelamento.

Este estudo de desmantelamento, como é dirigido a uma instalação como a do ICNAS, não será tão extenso como para um reactor nuclear, pois os riscos radiológicos não são tão elevados, dado que as energias atingidas no ICNAS são bastante inferiores. Além disso, um projecto de desmantelamento de um reactor nuclear requer uma equipa de trabalho bastante mais numerosa e mais anos de desenvolvimento.

Além disso, esta dissertação tem por objectivo esclarecer os passos e as exigências de um plano de desmantelamento e esclarecer o que é o desmantelamento nuclear em si.

I.3. Motivação

Em Portugal, o único reactor nuclear existente foi construído em 1961. Exclusivamente para investigação científica, o reactor, situado no Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN) – Sacavém, manteve esse propósito até aos dias de hoje. Mais recentemente, em 2009, entrou em funcionamento o único ciclotrão público do país e está instalado no Instituto de Ciências Nucleares Aplicadas à Saúde (ICNAS), no Pólo das Ciências da Saúde da Universidade de Coimbra. Além destes dois institutos, existem outros centros/entidades que utilizam material radioactivo, ou que produzem radiações. Exemplos disso são os serviços de medicina nuclear (MN), que utilizam radiotraçadores, e centros de radioterapia que possuem aceleradores lineares. Com isto pode considerar-se que Portugal não tem um grande historial em energia nuclear. A legislação existente prova isso mesmo, pois não houve necessidade de desenvolver grandes medidas nesta matéria.

Ainda assim, a primeira medida de radioprotecção em Portugal surgiu em 1963, com a criação da Comissão de Protecção Contra as Radiações Ionizantes, bem antes da adesão ao Tratado de Roma. Contudo, com mais de cinquenta anos de experiência no reactor nuclear, poderia avançar-se para um programa nuclear, na produção de electricidade. Para tal, seriam necessárias alterações na política nacional e deveriam ser criadas condições, implementando mais medidas, pois a legislação que vigora em Portugal é maioritariamente destinada à protecção das pessoas.

I.4. Estrutura

O primeiro capítulo apenas serve para introduzir e contextualizar o assunto contemplado na dissertação. O segundo capítulo é subdividido em várias secções.

- Secção II.1: define-se desmantelamento;
- Secção II.2: descreve-se as instalações do ICNAS
- Secção II.3: descrevem-se estratégias de desmantelamento;
- Secção II.4: referem-se aspectos regulamentares e faz-se o levantamento da legislação aplicável;
- Secção II.5: faz-se referência ao planeamento e gestão do projecto de desmantelamento;
- Secção II.6: descreve aspectos técnicos, tais como produção de neutrões, activação das paredes, mas também a caracterização de fontes seladas e que medidas tomar para o seu desmantelamento e outras medidas sobre descontaminação e desmantelamento de outros dispositivos;
- Secção II.7: faz-se referência às medidas de segurança radiológica que se devem tomar durante o desmantelamento;
- Secção II.8: descreve a gestão dos resíduos produzidos no ICNAS e sobre os resíduos resultantes do desmantelamento;
- Secção II.9: faz referência aos custos que o desmantelamento envolve, e os pontos necessários para se fazer uma estimativa de custos;
- Secção II.10: refere-se à garantia de qualidade do plano de desmantelamento;

Por último vem a discussão/conclusão e os anexos.

Capítulo II

DESMANTELAMENTO DE UMA INSTALAÇÃO NUCLEAR

II.1. Nota introdutória

Muita literatura existente sobre desmantelamento, principalmente com origem na IAEA, engloba aspectos sobre a gestão, regulamentação e técnica para instalações de grandes dimensões, tais como: centrais nucleares, centros de processamento de material radioactivo e reactores de investigação. Contudo, existem instalações de menores dimensões com licença para usar material radioactivo, em áreas como a medicina, indústria e investigação. Essas instalações, tais como laboratórios de radiofarmácia, hospitais, universidades, sendo de menores dimensões e menos complexas, apresentam riscos radiológicos menores durante o seu desmantelamento. Muitas delas têm funcionários que não estão formados ou familiarizados com o desmantelamento, gestão de resíduos e aspectos associados à segurança neste tipo de instalações em fim da vida operacional. Além disso, em instalações em que se recorre muito pouco a materiais radioactivos, mesmo que os requisitos de segurança sejam cumpridos, a atenção, preocupação ou responsabilidade pode não ir muito além disso. Assim, os requisitos mínimos para o desmantelamento podem ser ignorados, ou até mesmo desconhecidos, o

que se traduz em atrasos evitáveis, riscos e falhas na segurança. Apesar das estratégias e requisitos de desmantelamento de pequenas instalações sejam menos dispendiosos, relativamente às instalações de maiores dimensões, muitos princípios aplicam-se a ambos os casos. [IAEA03]

O desmantelamento representa a fase final da vida de uma instalação nuclear e envolve um conjunto complexo de operações. Segundo a IAEA, é o conjunto de medidas administrativas e técnicas que são tomadas para retirar uma instalação do controlo legislativo. De entre as actividades necessárias para o desmantelamento, pode destacar-se a caracterização radiológica da instalação, a descontaminação, a retirada de equipamentos, a gestão e manuseamento de resíduos radioactivos e outros materiais, e a demolição dos edifícios e estruturas ou reutilização das instalações. O planeamento cuidadoso de um desmantelamento segue um conjunto alargado de normas e legislação. Estes aspectos regulamentares têm em conta a segurança dos trabalhadores e a protecção a longo prazo do público em geral e do ambiente. Um processo de desmantelamento pode enfrentar muitos desafios em termos de segurança. Antes que se inicie um programa de desmantelamento, esses desafios devem ser antecipados, avaliados e solucionados convenientemente. [IAEA04]

Para se desenvolver um plano de desmantelamento, deve redigir-se um documento que descreva as instalações e as decisões tomadas para o efeito. O documento deve contemplar vários aspectos, que, regra geral, seguem os tópicos seguintes:

- Tipo de instalação nuclear e sua descrição;
- A estratégia de desmantelamento escolhida para essa instalação nuclear;
- Aspectos regulamentares, i.e., toda a legislação nacional aplicável e no caso de haver falhas, que legislação internacional consultar;
- Planeamento e Gestão;
- Aspectos técnicos;
- Segurança durante o desmantelamento;
- Gestão de combustíveis irradiados (não aplicável no caso do ICNAS);
- Gestão de resíduos;
- Custos;
- Garantia de qualidade.

II.2. Tipo de Instalação

Dos quatro tipos de instalações de pequenas dimensões que a IAEA considera, o ICNAS contempla três. No ICNAS podemos então encontrar instalações médicas de diagnóstico – a MN; laboratórios de radiofarmácia/investigação e por último a unidade de produção – o ciclotrão. Estas três partes são os pontos de acção fundamentais e sobre estes recai a atenção do plano de desmantelamento.

O ICNAS, segundo a Deliberação (extracto) n.º 3063/2009, publicada no Diário da República, 2ª série – N.º 217 – dia 9 de Novembro de 2009, é uma unidade orgânica de investigação da Universidade de Coimbra, com carácter multidisciplinar, nos termos dos artigos 16º e 18º dos Estatutos da Universidade. O ICNAS tem sede em edifício próprio no pólo das ciências da saúde da Universidade de Coimbra e desenvolve actividades de investigação, produção e utilização de radionuclidos e/ou radiofármacos e presta serviços de saúde na área da MN.

A seguir são descritas as instalações do ICNAS por piso.

2.1. Piso 1 – Administração e direcção

Este piso é dedicado à administração e direcção. Além disso, neste piso existem diversos gabinetes de trabalho, individuais e duplos; outras salas dedicadas à investigação científica; uma sala de reuniões e ainda uma biblioteca. A Figura 5, no Anexo A, ilustra a planta deste piso, onde não há actividade.

2.2. Piso 0 – Medicina Nuclear

O piso 0 do ICNAS é dedicado à prestação de serviços de diagnóstico em MN convencional. O serviço de MN está organizado em quatro áreas principais:

- Áreas restritas de recepção, armazenagem e manuseamento de material radioactivo;
- Áreas de administração de radiofármacos,
- Salas de espera para os doentes injectados,
- Salas de aquisição de imagem, em número de quatro,

No serviço de MN é produzida a maior quantidade e variedade de resíduos radioactivos. No entanto, a maioria dos radionuclidos utilizados em MN têm um período de semi-desintegração curto, pelo que decaem rapidamente para níveis aceitáveis. Na MN realizam-se diversos exames de diagnóstico, recorrendo aos radionuclidos listados na Tabela 1. A mesma tabela descreve os exames efectuados na MN do ICNAS, recorrendo a esses radionuclidos.

Tabela 1. - Radionuclidos usados no ICNAS e respectivos exames para que são usados

Radionuclido	$T_{1/2}$ (*)	Exames efectuados (**)
^{99m}Tc	6,01h (^{99}Tc)	O ^{99m}Tc é praticamente usado em todas as cintigrafias efectuadas na MN do ICNAS
^{123}I	13,22h (^{123}Te)	Tomografia cerebral com ^{123}I -Ioflupano (6mCi) Cintigrafia com ^{123}I -MIBG (5/10mCi)
^{201}Tl	3,04d (^{201}Hg)	Cintigrafia miocárdica, uma vez por semana (3mCi)
^{67}Ga	3,26d (^{67}Zn)	Cintigrafia com gálio (3/6mCi)

h = horas | d = dias

* Entre parêntese está o núcleo filho

** Actividade administrada aos doentes

A Figura 6, no Anexo A, representa a planta do Piso 0, onde as salas marcadas com os números 3, 4, 6 e 7 são as salas onde estão as câmaras gama. Estas e outras salas são enumeradas no mesmo anexo. No serviço de MN do piso 0 também se encontra uma fonte de raio X, usado em densitometria. A descrição destes dispositivos de diagnóstico encontra-se no Anexo B.

2.3. Piso -1 – Medicina Nuclear-PET/CT

Este piso é dedicado à realização de exames de diagnóstico, utilizando ^{18}F e ^{11}C produzidos no nível inferior – piso -2. As salas assinaladas na Figura 7 com os números 5 e 7, são salas onde se encontram os tomógrafos para realização de PET/CT. A zona assinalada com o número 2, na mesma figura, situa-se exactamente por cima dos laboratórios de radiofarmácia do piso -2. Assim, esta sala possui um elevador dedicado ao

transporte de radiofármacos, prontos a injectar nos doentes, a partir do piso inferior, onde são sintetizados e fraccionados. Neste piso encontra-se uma fonte selada armazenada para calibração dos tomógrafos. Esta fonte encontra-se aqui para evitar o seu transporte desde o piso inferior, onde se encontram as restantes, de modo a evitar riscos de derrame e exposição.

2.4. Piso -2 – Unidade de Produção

Este piso é dedicado à produção de radionuclidos e radiofármacos. Neste piso encontra-se o ciclotrão, dentro de um *bunker* de betão, cujas paredes têm dois metros de espessura. O ciclotrão permite acelerar protões ou deuterões, formando feixes destas partículas, de modo obter vários radionuclidos, dependendo do alvo irradiado com os feixes. A planta deste piso está representada na Figura 8 do Anexo A, o número 1 indica o *bunker* onde está o ciclotrão.

Além do ciclotrão, neste piso também podem encontrar-se dois laboratórios de radiofarmácia. Um é dedicado à produção de ^{18}F FDG, recorrendo a um módulo *Synthera*® da IBA, está indicado com o número 11 na Figura 8 do Anexo A. Neste laboratório também está uma célula blindada onde se encontra um sistema automático para diluição, calibração e fraccionamento automático de doses. No outro laboratório, indicado com o número 14, sintetizam-se outros radiofármacos e é dedicado à investigação.

2.5. Outros

Outras instalações situadas no ICNAS, mas independentes desta instituição, pertencem à extinta ANIF (Associação Nacional de Imagiologia Funcional). A ressonância magnética usada na obtenção de imagens funcionais encontra-se na sala indicada com o número 15, na Figura 8 do Anexo A. O acesso a estas instalações é exterior ao ICNAS.

Por enquanto apenas existem as instalações acima referidas. No entanto, o ICNAS tem por objectivo instalar meios de investigação em animais (ratos e ratinhos), sem data ou projecto definido.

Mais detalhes sobre os dispositivos existentes nas instalações do ICNAS encontram-se no Anexo B.

II.3. Estratégia de Desmantelamento para o ICNAS

A IAEA recomenda que todas as instalações nucleares redundantes ou obsoletas sejam desmanteladas de forma eficiente e segura. Uma abordagem sistemática para o desenvolvimento de estratégias de desmantelamento é importante, de forma a criar-se uma cultura de segurança e protecção radiológica das populações. Para tal, bem antes do encerramento de instalações nucleares, deve investir-se em planeamento, de forma a reduzir custos e prazos de um programa de desmantelamento. Idealmente, planos preliminares de desmantelamento devem ser desenvolvidos durante a fase de concepção das instalações nucleares. Inicialmente não eram exigidos, mas actualmente, os planos preliminares começam a ser um requisito regulamentar amplamente aceite. Além disso, estes devem ser revistos e desenvolvidos durante a vida útil das instalações e finalizados antes do encerramento final, de modo a reflectir o estado das mesmas.

Um plano de desmantelamento poderá identificar onde poderão existir dificuldades, por uma eventual falta de recursos. Essas deficiências podem ser resolvidas de forma prática, se o plano de desmantelamento for desenvolvido atempadamente. Com recursos limitados, a identificação dos pontos que consomem mais meios financeiros é essencial, de modo a tentar reduzi-los. Por outro lado, os recursos existentes podem ser utilizados de forma a gerar mais recursos ainda.

As opções estratégicas de desmantelamento relacionam-se com o momento em que se inicia o processo e com as medidas técnicas escolhidas. Quanto ao momento em que se inicia, o desmantelamento pode ser imediato, diferido ou então existe a opção de confinamento seguro das instalações. Quanto às medidas tomadas, a opção estratégica de desmantelamento prende-se com o tipo de acção:

- Estratégia de não acção;
- Estratégias para instalações individuais:
 - Estratégia para instalações que usam pequenas fontes radioactivas portáteis ou móveis;
 - Estratégia para aceleradores de partículas;
 - Estratégia para instalações de investigação, *hot cells*, laboratórios de radioquímica e instalações médicas (MN). [IAEA03,IAEA08]

Como pode constatar-se, uma estratégia de desmantelamento adapta-se consoante a instalação a que se destina. Dado que não existe uma legislação específica, a estratégia vai depender da abordagem feita pelos responsáveis e das políticas assumidas a nível nacional. Em cada caso, deve reflectir-se sobre o plano de desmantelamento, apelando ao bom senso, tendo em conta a legislação existente sobre radioprotecção e outros aspectos radiológicos.

Mesmo que uma estratégia varie de uma instalação nuclear para outra, a IAEA considera que os pontos seguintes são transversais a todas as estratégias:

- Nomear ou identificar uma pessoa responsável;
- Comunicar com as autoridades reguladoras;
- Estabelecer prazos, planos e objectivos;
- Recolher dados radiológicos das instalações a serem desmanteladas;
- Identificar as alternativas para o desmantelamento;
- Identificar as alternativas para a gestão de resíduos;
- Estabelecer recursos humanos e financeiros necessários;
- Agrupar os registos e arquivos. [IAEA03]

Um dos principais objectivos do desmantelamento é a redução dos efeitos nocivos da radiação no público em geral e nos trabalhadores para níveis aceitáveis. Daí ser fundamental a elaboração de uma estratégia apropriada para alcançar esse objectivo. Deste modo, são tomadas medidas para reduzir os riscos radiológicos, com base em pré-planeamento e avaliações para garantir a segurança durante o desmantelamento.

O tempo necessário para finalizar um processo de desmantelamento vai depender do tipo de instalação, do inventário dos materiais radioactivos, do período de semi-desintegração dos radionuclidos, da estratégia de desmantelamento escolhida e das técnicas utilizadas. O desmantelamento pode ser concluído em poucos dias, se apenas for necessária a remoção do material radioactivo (p.e. fontes seladas), seguida de estudos radiológicos. Posteriormente, se for necessário, deve efectuar-se uma descontaminação e deve solicitar-se a remoção da instalação do controlo regulamentar. Em casos como pequenos reactores ou laboratórios de investigação, poderiam ser exigidas operações de descontaminação por mais algumas semanas ou mesmo meses. [IAEA03]

Para pequenas instalações como as do ICNAS, o desmantelamento imediato é geralmente a melhor estratégia, uma vez que o inventário radiológico é fraco, i.e., a

quantidade de resíduos radioactivos não é muito significativa. Além disso, uma acção rápida faz melhor uso do pessoal chave, familiarizado com as instalações. No entanto, o *bunker* onde se situa o ciclotrão causa alguma relutância quanto ao desmantelamento imediato. Dado que a activação das paredes é um facto a considerar, a conjunção de um desmantelamento imediato com um diferido será uma melhor opção para o ICNAS.

Além das estratégias indicadas, existem outras, mas estas têm mais interesse para instalações como as do ICNAS. Como se pode constatar, as linhas do desmantelamento dividem-se em dois grandes conjuntos: agir ou não agir. A questão da não acção, apesar de não ser desejável, deve ser considerada, como é descrito mais à frente. Por outro lado, a estratégia para instalações individuais subdivide-se em várias opções, dependendo das características da instalação nuclear. Apesar de existirem mais, as três opções listadas prendem-se com as valências do ICNAS. Daí poder prever que uma estratégia de desmantelamento não é única, mas sim constituída por várias estratégias, cada uma específica para cada parte das instalações.

3.1. Estratégia de não acção

Este tipo de estratégia tem sido, infelizmente, uma medida tomada, com alguma frequência, em pequenas instalações nucleares. Mesmo que o encerramento destas instituições seja por curtos períodos de não utilização ou manutenção, podem nunca mais reabrir devido a razões comerciais, obsolescência técnica ou outras. Estas medidas de não acção são muitas vezes tomadas devido a uma percepção trivial dos riscos associados ao encerramento. Assim, os riscos podem ser negligenciados, pondo em perigo a população. Por outro lado, a não acção é possivelmente a única alternativa, dada a falta de meios financeiros podendo levar ao abandono das instalações. [IAEA03]

Apesar de não ser uma opção desejável, a não acção pode ser a única alternativa. Para evitar essa situação, as instituições, como o ICNAS, devem desenvolver a sua actividade de modo a garantir meios financeiros para um possível desmantelamento.

3.2. Estratégia para instalações individuais

A escolha de uma estratégia para pequenas instalações como as do ICNAS é geralmente mais simples que para instalações com reactores nucleares ou com ciclos de

combustível. Como já foi referido anteriormente, as instalações nucleares podem ser classificadas como instalações com pequenas fontes seladas móveis ou portáteis; instalações com aceleradores de partículas; ou ainda instalações dedicadas à investigação, com *hot cells*, laboratórios de radiofarmácia e instalações médicas, entre outras.

3.2.1. Estratégia para instalações que usam pequenas fontes radioactivas portáteis ou móveis

Instalações deste género usam fontes radioactivas seladas para fins médicos, industriais ou de investigação. Dada a variedade, o tamanho reduzido e aparência benigna, essas fontes devem ser inventariadas para reduzir riscos. O inventário total dessas fontes é o problema maior, pois muitas vezes é impossível quantificar convenientemente fontes mais antigas.

Quando as fontes radioactivas não são mais usadas com o seu propósito inicial, existem várias opções para lhes dar um destino dentro de estreitos parâmetros de segurança radiológica. A estratégia preferível para fontes seladas usadas é a devolução ao fabricante; o que por vezes não é possível por razões várias. Portanto, uma estratégia prévia adequada é o armazenamento temporário em local apropriado. Esse local pode ser organizado e especializado no tratamento e manipulação de fontes usadas e gerido por uma empresa nacional. Por outro lado, as fontes podem ser armazenadas na instituição onde são usadas. De uma ou de outra forma, o operador deve ter em conta a protecção exigida e o controlo de qualquer vazamento ou emissão, especialmente no caso de haver uma grande acumulação de fontes. Daí a importância de um registo rigoroso e actualizado das fontes seladas, que possa ser posteriormente usado no processo de desmantelamento. [IAEA03]

Ainda assim, as fontes podem ser recolhidas como resíduos radioactivos. Para que tal aconteça, devem ser tidas em conta várias medidas de segurança, e uma questão fundamental é se a actividade actual da fonte se encontra acima ou abaixo do limite máximo de isenção, pois este parâmetro determina se uma determinada fonte se encontra ainda debaixo de controlo regulamentar, e em que circunstâncias.

3.2.2. Estratégia para aceleradores de partículas

Os aceleradores de partículas, como o ciclotrão do ICNAS, são geralmente colocados em estruturas de betão (*bunkers*), com paredes bastantes espessas, de modo a servir de blindagem, para a segurança dos trabalhadores e público em geral. A activação destas construções com neutrões, a partir do espaço que encerram, é a fonte da maior quantidade de resíduos de baixa actividade. No entanto, mesmo sendo baixa, a actividade presente nas paredes pode estar bem acima do permitido por lei para a remoção do controlo regulamentar; e o decaimento necessário para valores abaixo dos limites pode estender-se por várias décadas.

No caso de haver recursos suficientes (financeiros e pessoal treinado) e de haver uma via de eliminação de resíduos bem definida, o desmantelamento pode avançar prontamente. Em casos excepcionais, o desmantelamento diferido é mais viável, dependendo da aprovação das autoridades e do público. Além disso, devem ser considerados os custos dos encargos com a vigilância radiológica, que um desmantelamento diferido acarreta. [IAEA03]

Ainda assim, uma opção também viável é a substituição do ciclotrão. No fim de vida do ciclotrão (30/40 anos), as instalações ainda podem estar operacionais e rentáveis, pelo que a destruição completa do edifício pode não ser justificada. Deste modo, apenas seria necessário substituir o ciclotrão por outro mais actual. Para efectuar uma acção destas, o ICNAS possui um alçapão por onde foi introduzido o ciclotrão inicial e por um onde se pode efectuar a troca. Uma substituição geraria uma quantidade significativamente menor de resíduos. Apenas seria necessário destruir a porta que dá acesso à sala onde se encontra o ciclotrão e uma pequena parte da parede do *bunker*, junto à porta, já preparada para o caso de ter de ser destruída, sem por em risco o resto da estrutura em betão.

3.2.3. Estratégia para instalações de investigação, *hot cells*, laboratórios de radioquímica e instalações médicas (MN)

Os riscos associados a estas zonas das instalações prendem-se sobretudo com as contaminações com material radioactivo, que pode estar sob diversas formas químicas, o que influencia a sua solubilidade e a capacidade de transformarem em gases. Outros materiais radioactivos podem apresentar riscos bacterianos e infecciosos. Assim, a forma

como se apresentam os materiais radioactivos causa o maior problema. A activação das paredes, contentores ou outros dispositivos é um problema menor. [IAEA03]

Por estas razões, é recomendável um desmantelamento imediato para instalações deste género. Nos EUA, por exemplo, a NRC determinou um prazo máximo de dois anos para se iniciar o desmantelamento de uma instalação, depois de esta encerrar portas. De facto, um desmantelamento imediato de instalações de MN e laboratórios de radiofarmácia, como as do ICNAS, é preferível. Como já foi referido, um desmantelamento imediato tem o proveito de ter pessoas familiarizadas com as instalações, e neste caso particular, reduz os riscos associados a substâncias químicas ou com alguma contaminação bacteriana, que possa trazer infecções e outros riscos biológicos.

Uma razão que se possa considerar para estipular um prazo de espera para se iniciar o desmantelamento é o decaimento de materiais radioactivos. A falta de um esquema definido para eliminação de resíduos não é, nem deve ser, uma razão para um diferimento no desmantelamento. [IAEA03]

Assim conclui-se que o melhor é um desmantelamento imediato de instalações médicas e que se deve armazenar os resíduos em local apropriado, até se definir um plano de eliminação de resíduos, na falta deste.

II.4. Aspectos Regulamentares

A posse, o manuseamento e o uso de materiais radioactivos são controlados por uma autoridade competente, que emite uma licença ou autorização similar para tal e que garante um controlo regulamentar. Além disso, a autoridade deve manter um registo das fontes radioactivas. O controlo regulamentar adequado também se aplica a actividades como o desmantelamento e gestão de resíduos. Desta forma, poderão ser feitas disposições técnicas e financeiras adequadas. A licença ou documento de registo que permite a posse de material radioactivo identifica o detentor da mesma, ou aquele que possui e usa o material.

Na planificação de um desmantelamento, identificar toda a regulamentação, normas e leis que são aplicáveis é essencial. Como um plano de desmantelamento é elaborado a partir do início do funcionamento das instalações, essa documentação deve ser mantida actualizada. Assim, uma actualização regular da legislação evita atrasos na hora de se iniciar o processo de desmantelamento.

A legislação para um processo de desmantelamento inclui:

- A saúde e segurança dos trabalhadores e do público em geral;
- Práticas seguras de gestão de resíduos radioactivos;
- Critérios para supressão de controlos sobre os materiais resultantes do desmantelamento ou autorização para a sua reutilização;
- A supressão do controlo regulamentar ou a autorização para reutilização do local ou da instalação, é exigida;
- Higiene industrial;
- Protecção do ambiente.

Um plano de desmantelamento pode variar em detalhe e complexidade. No entanto, não importa o quanto uma instalação possa parecer pequena ou trivial, o plano deve contemplar todas as actividades propostas num único documento. Esse documento deve ser bem redigido e não ambíguo, de forma a informar todos os interessados e permitir a aprovação do órgão regulador. Além disso, o documento deve propor uma resolução para todas as questões de segurança e riscos radiológicos, antes de se iniciar o desmantelamento. Portanto, o documento deve mostrar que o desmantelamento pode ser concluído em segurança. [IAEA03]

Durante o programa de desmantelamento, os órgãos reguladores podem fazer auditorias, para assegurar o cumprimento da legislação nacional existente.

Regra geral, a legislação em cada país é constituída por legislação primária (as Leis) e legislação secundária (os regulamentos), cujas disposições são juridicamente vinculativas. A esta legislação, geralmente, acrescentam-se orientações e códigos de práticas. Ao Estado compete determinar a melhor forma de combinar toda a legislação, de modo a providenciar o melhor quadro regulamentar. Além disso, ainda existem documentos publicados por organismos internacionais, como a IAEA ou a Comissão Internacional para a Protecção Radiológica (ICRP). [IAEA03]

Interessa agora saber a forma como os textos, nacionais e internacionais, se tornam juridicamente vinculativos numa dada nação. Em Portugal, os instrumentos, ou fontes que ditam regras de Direito são a seguir hierarquizadas:

- a) A Constituição da República e as Leis Constitucionais;
- b) As normas e os princípios de Direito internacional geral ou comum e as Convenções Internacionais;
- c) As leis e os decretos-lei;
- d) Os decretos legislativos regionais;
- e) Os actos dotados de força equivalente à das leis;
- f) Os Regulamentos

Tendo em conta esta hierarquia, é importante saber como são adoptadas no território nacional as medidas contidas nos instrumentos supranacionais. Em Portugal, as regras de Direito só entram em vigor depois de publicadas no jornal oficial (Diário da República). [RJE12a]

Importante também é perceber como é que o Direito Comunitário se aplica em Portugal. Com o Tratado de Amesterdão (1999), a UE pode adoptar regras em termos de direito civil e comercial, que se traduzem por directivas, regulamentos e decisões, e há ainda as recomendações (*guidelines*). Estes textos também servem como fontes de Direito nos Estados-Membros.

Os regulamentos são aplicados directamente e da mesma forma em cada Estado-Membro. Além disso, os cidadãos podem invocá-los directamente perante um tribunal, que os deve aplicar. Por outro lado, as Directivas definem um conjunto de objectivos que os

Estados-membros devem atingir; estas devem ser transpostas para o Direito nacional de cada Estado-Membro, dentro de um determinado prazo. Contudo, aos Estados-Membros, é-lhes dada uma certa liberdade na forma como fazê-lo e devem verificar se a transposição é ou não inconstitucional. Assim, as Leis nacionais devem ser redigidas de acordo com a Constituição portuguesa e com os princípios das directivas. [RJE12b, CE12]

Com estes aspectos judiciais, é possível agora recolher a legislação aplicável no processo de desmantelamento. Apesar de ainda não haver legislação direccionada para o desmantelamento, alguns Estados-Membros já exigem que instalações nucleares adoptem medidas para o plano de desmantelamento, ainda na fase de projecção da própria instalação. Além disso, esses Estados requerem que o plano seja desenvolvido durante a fase de vida útil das instalações.

Além disso, as instalações nucleares têm planos de emergência e têm conhecimento técnico suficiente para poder intervir em caso de algum incidente. Deste modo, já existe algum conhecimento e prática que pode ser aplicado no desmantelamento.

4.1. Em Portugal

Em Portugal, a legislação na área nuclear não é muito extensa. Um problema que existe a nível nacional é alguma redundância nos textos. Além da redundância, falta legislar em alguns domínios, o que por vezes pode limitar a acção de empreendedores, ou por outro lado pode levar a alguns excessos. Outro problema que surge é o não cumprimento de prazos na transposição de Directivas Europeias.

4.1.1. Entidades Competentes

- IST/ITN
- Autoridades Regionais de Saúde
- Direcção Geral de Saúde
- Comissão Reguladora para a Segurança das Instalações Nucleares
- Autoridade para as Condições de Trabalho
- Centro Nacional de Protecção contra Riscos Profissionais
- Instituto do Ambiente

4.1.2. No domínio da protecção sanitária e segurança dos trabalhadores e público em geral

- Decreto-Lei n.º 348/89 de 12 de Outubro: Estabelece normas e directivas de protecção contra radiações ionizantes. Derrogado pelo Decreto-Lei n.º 180/2002 de 8 de Agosto e Decreto-Lei n.º 165/2002 de 17 de Julho.
 - Os Artigos 15º, 24º e 35º do Decreto-lei 180/2002 têm particular interesse no desmantelamento. Os artigos 15º e 24º referem-se à conservação dos registos fundamentais para o desmantelamento, tais como inventários de dispositivos médicos e de radiodiagnóstico, bem como relatórios de estudos radiológicos, registos de fontes e resíduos radioactivos, contratos assinados com outras entidades e os resultados de monitorização das doses a que os trabalhadores estão sujeitos.
 - O Artigo 35º do Decreto-Lei n.º 180/2002 é talvez o primeiro passo para a regulamentação de processos de desmantelamento. De acordo com este artigo, quando se pretender encerrar uma instalação nuclear, o titular da licença deverá fazer um pedido à DGS, acompanhado do inventário dos equipamentos e fontes radioactivas, se as houver, e o destino previsto para os mesmos. Além disso, o pedido enviado à DGS deve fazer-se acompanhar por um plano de descontaminação, no caso de existir contaminação radioactiva na instalação. A responsabilidade do titular só se extingue quando forem removidos todos os materiais e equipamentos das instalações e estas forem descontaminadas, se for necessário.
- Decreto Regulamentar n.º 9/90 de 19 de Abril: Estabelece princípios e normas de segurança destinados à protecção sanitária da população e dos trabalhadores contra os perigos resultantes das radiações ionizantes. Também estipula medidas de protecção contra as radiações das pessoas submetidas a exames e tratamentos médicos. Alterado pelo Decreto Regulamentar n.º 3/92 de 6 de Março, e derrogado pelos Decretos-Lei n.ºs 180/2002 de 8 de Agosto, 165/2002 de 17 de Julho e 140/2005 de 17 de Agosto.
- Decreto-Lei n.º 29/97 de 29 de Julho: Estabelece o regime de protecção dos trabalhadores externos em zonas controladas.

- Decreto-Lei n.º 165/2002 de 17 de Julho: Estabelece princípios gerais de protecção e as competências e atribuições dos organismos e serviços intervenientes na área da protecção contra radiações ionizantes. Fixa também normas base de segurança relativas à protecção sanitária da população e trabalhadores. A este Decreto-lei é aditado o artigo 11º-A, pelo Decreto-Lei n.º 215/2008 de 10 de Novembro.
- Circular Normativa n.º 05/DSA de 4 de Abril de 2003: Controlo das doses individuais de radiação dos trabalhadores expostos.
- Circular Normativa n.º 06/DSA de 6 de Abril de 2003: Protecção operacional dos trabalhadores expostos.
- Decreto-Lei n.º 140/2005 de 17 de Agosto: Estabelece os valores de dispensa de declaração do exercício de práticas que impliquem risco resultante das radiações ionizantes, transpondo as correspondentes disposições da Directiva n.º 96/29/EURATOM, do Conselho, de 13 de Maio.
- Decreto-Lei n.º 38/2007 de 19 de Fevereiro: Estabelece regras de prevenção da exposição dos trabalhadores e do público a radiações ionizantes resultantes de um controlo inadequado das fontes radioactivas seladas. O Decreto-Lei também se aplica à protecção das pessoas e do ambiente contra os riscos associados à perda de controlo, extravio, acidente ou eliminação resultante de um inadequado controlo regulamentar destas fontes radioactivas.
- Decreto-Lei n.º 222/2008 de 17 de Novembro: Estabelece normas de segurança e aplica-se à exposição dos membros do público às radiações ionizantes de origem artificial, bem como aos trabalhadores e aprendizes expostos no âmbito profissional, sendo estabelecido um conjunto de critérios específicos de protecção dos mesmos.
- Decreto-Lei n.º 227/2008 de 25 de Novembro: Vem colmatar lacunas relativamente a profissionais qualificados em protecção radiológica, bem como completar a transposição para o Direito Nacional nesta matéria, tendo em conta as disposições da Directiva 96/29/EURATOM.

4.1.3. Em caso de emergência radiológica

Apesar do processo de desmantelamento se desenvolver nas melhores condições de segurança, os casos de emergência radiológica também devem ser considerados.

- Decreto-Lei n.º 36/95 de 14 de Fevereiro: Transpõe para o Direito nacional a directiva n.º 89/618/EURATOM, relativa à informação da população sobre medidas de protecção sanitárias aplicáveis em caso de emergência radiológica.
- Decreto-Lei n.º 174/2002 de 25 de Julho: Estabelece princípios de intervenção em caso de emergência radiológica ou de exposição prolongada na sequência de uma emergência radiológica.
- Resolução da Assembleia da República n.º 72/2003 de 3 de Julho: Convenção sobre assistência em caso de acidente nuclear ou emergência radiológica.

4.1.4. No domínio da higiene e segurança nos locais de trabalho e organização das actividades de segurança, higiene e saúde no trabalho

- Decreto-Lei n.º 243/86 de 20 de Agosto: Regulamento geral de higiene e segurança no trabalho nos estabelecimentos comerciais, de escritório e serviços.
- Portaria 987/93 de 6 de Outubro: Aprovação das prescrições mínimas de segurança e de saúde nos locais de trabalho.
- Decreto-Lei n.º 348/93 de 1 de Outubro: Estabelece as prescrições mínimas de segurança e de saúde dos trabalhadores na utilização de equipamentos de protecção individual.
- Capítulo IV da Lei n.º 99/2003 de 27 de Agosto: Obriga as entidades empregadoras a organizar as actividades de segurança, higiene e saúde no trabalho, as quais constituem um meio de prevenção de riscos profissionais e de promoção e vigilância da saúde dos trabalhadores.
- Capítulo XXII da Lei n.º 35/2004 de 29 de Julho: Estabelece o regime de organização e funcionamento das actividades, higiene e saúde no trabalho.

4.1.5. Práticas Seguras de gestão de resíduos

- Resíduos Radioactivos:
 - Decreto-Lei n.º 138/96 de 14 de Agosto: Estabelece regras a que devem obedecer a transferência resíduos radioactivos entre Portugal e os restantes Estados-membros e para dentro e fora da Comunidade.
 - Decreto-Lei n.º 198/2009 de 26 de Agosto: Estabelece regras de fiscalização e transferência de resíduos radioactivos e combustível nuclear irradiado.
- Resíduos hospitalares:
 - Despacho n.º 242/96 do gabinete da Ministra da Saúde, de 13 de Agosto: Estabelece normas de organização e gestão global de resíduos hospitalares, tendo em conta a protecção dos trabalhadores do sector, a operacionalidade, os preceitos éticos e a preparação de risco pela opinião pública.
 - Portaria n.º 174/97 de 10 de Março: Estabelece as regras de instalação e funcionamento de unidades ou equipamentos de valorização ou eliminação de resíduos perigosos hospitalares, bem como o regime de autorização da realização de operações de gestão de resíduos hospitalares por unidades responsáveis pela exploração das referidas unidades ou equipamentos.
 - Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de Setembro: Aprova o regime geral da gestão de resíduos. Define resíduo hospitalar.
- Resíduos perigosos:
 - Decreto-Lei n.º 310/95 de 20 de Novembro: Reformula o quadro legislativo neste domínio, estabelecendo regras a que fica sujeita a gestão de resíduos, nomeadamente a sua recolha, armazenagem, transporte, tratamento, valorização e eliminação, de forma a não causarem prejuízo para a saúde humana, nem para os componentes ambientais definidos na Lei n.º 11/87, de 7 de Abril, designadamente a água, o ar, o solo, a fauna, a flora, a paisagem e o património natural e construído.

4.1.6. No domínio da protecção do Ambiente

- Decreto-Lei n.º 236/98 de 1 de Agosto: Estabelece normas, critérios e objectivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos.
- Decreto-Lei n.º 138/2005 de 17 de Agosto: Aprova o sistema de monitorização ambiental do grau de radioactividade.
- Decreto-Lei n.º 164/2001 de 23 de Maio: O presente diploma tem por objecto a prevenção de acidentes graves que envolvam substâncias perigosas e a limitação das suas consequências para o homem e para o ambiente.

4.2. Na União Europeia

Como já foi referido, a UE emite directivas, regulamentos, decisões e recomendações. As directivas são obrigatórias e devem ser transpostas para o Direito nacional. As recomendações são indicações dadas aos Estados-Membros para implementarem as directivas (não são obrigatórias). Os regulamentos são obrigatórios e são aplicados imediatamente, sem adaptação à Legislação nacional

Como também já foi referido, em Portugal existe alguma morosidade na transposição de directivas, em particular directivas EURATOM, não havendo, em geral, cumprimento nos prazos. Todas as directivas EURATOM publicadas até dia 1 de Janeiro de 2007 já foram vistas e transpostas para o Direito interno português. As directivas 2009/71/EURATOM de 25 de Junho de 2009 e 2011/70/EURATOM de 19 de Julho de 2011 ainda não.

A directiva 2009/71/EURATOM, cujo prazo de transposição é 22 de Julho de 2011, estabelece um quadro comunitário para a preservação e promoção da segurança nuclear das instalações nucleares e a sua regulação, protegendo trabalhadores e público em geral da exposição às radiações ionizantes.

A directiva 2011/70/EURATOM estabelece um quadro comunitário para gestão responsável e em segurança de combustível irradiado e de resíduos radioactivos, de modo a evitar legar situações indevidas às gerações futuras.

4.3. Recomendações da IAEA

A IAEA, enquanto órgão internacional, não emite legislação, propriamente dita. O seu papel tem que ver com a pacificação da utilização da energia nuclear. Esta agência emite todo tipo de documentos (relatórios e documentos técnicos, normas de segurança, estados de arte, etc.) onde descreve recomendações sobre todos os aspectos que estejam relacionados com actividades que envolvam material radioactivo. Estas recomendações têm a contribuição de muitos intervenientes, e conta sobretudo com a experiência adquirida nos diversos Estados-Membros da agência. Posteriormente, estas recomendações devem ser implementadas nos países que usem material radioactivo.

Posto isto, todos os países, quer membros ou não, devem seguir estas recomendações para a segurança mundial. Assim, além de recomendações, a IAEA está encarregue de verificar se a energia nuclear não está a ser usada para a produção de armamento e que está a ser usada nas melhores condições, para não por em perigo o público. Isto significa que a IAEA tem um papel de policiamento da energia nuclear.

Deste modo, todas informações que são necessárias para o desmantelamento devem ser fornecidas pelas entidades regulamentares, i.e., o governo português e a UE. Aspectos técnicos mais específicos, relacionados com o manuseamento em segurança de material radioactivo e todas as diligências envolvidas, podem e devem ser consultados nos mais diversos documentos então publicados pela IAEA. De facto, existe uma grande quantidade e variedade de assuntos detalhados por estes documentos, pelo que não serão especificados. As grandes linhas de consulta dos documentos terão que ver com os seguintes tópicos: fontes seladas radioactivas; gestão de resíduos radioactivos; tratamento, acondicionamento e transporte de material radioactivo; desmantelamento; aspectos regulamentares (licenciamentos e controlos regulamentares) e estimativa de custos.

II.5. Planeamento e Gestão

Geralmente, o detentor da licença ou a pessoa responsável por uma instalação nuclear nomeia um agente ou um gestor de projectos para desenvolver o plano de desmantelamento. Para instalações de tamanho muito pequeno, o gestor do projecto pode ser o próprio gestor das instalações ou o responsável pela radioprotecção. Dependendo do tamanho e complexidade das instalações, a gestão do projecto de desmantelamento pode tornar-se uma actividade a tempo inteiro. O gestor do projecto fica encarregado de toda planificação, gestão e implementação do desmantelamento. Também deve dar assistência ao detentor da licença nas negociações com os órgãos reguladores, no que diz respeito à segurança radiológica e aspectos regulamentares. No entanto, a responsabilidade dos aspectos legais do desmantelamento em segurança, incluindo a eliminação de resíduos, permanece no detentor da licença. [IAEA03]

No plano de desmantelamento, o gestor deve detalhar todos os passos que devem ser seguidos para concluir o processo de desmantelamento. Para tal, devem ser detalhados os objectivos a serem atingidos e as metodologias para cumpri-los.

Num primeiro passo, o gestor de projecto deve:

- Nomear uma equipa para o desmantelamento e atribuir-lhe tarefas e responsabilidades;
- Criar rotinas de controlo e segurança radiológica, tendo em conta aspectos discutidos nas secções adiante;
- Recolher dados, registos e relatórios e completá-los;
- Identificar potenciais riscos radiológicos;
- Garantir a segurança e protecção radiológica dos trabalhadores e público em geral;
- Implementar sistema de garantia de qualidade;
- Obter aprovação do orçamento para o projecto, tendo em conta estimativa de custos;
- Adquirir equipamentos necessários, como material de radioprotecção, contentores para eliminação de resíduos, entre outros;
- Contratar entidades competentes para a descontaminação, remoção de resíduos e demolição;
- etc.

Entre outros aspectos, o gestor agrupa em si todas as variáveis do plano de desmantelamento. Além disso, ele fica responsável pela elaboração do documento com a descrição do processo de desmantelamento, o qual é submetido às autoridades para avaliação e aprovação. Como já foi visto nos aspectos regulamentares, não existe a obrigação de se efectuar um plano de desmantelamento. Apenas existe a necessidade de comunicar às autoridades a intenção de encerrar uma instalação, o qual é autorizado, mediante o cumprimento das normas de protecção radiológica.

O gestor pode e deve rodear-se de pessoas competentes em áreas específicas, como a radioprotecção, a gestão de resíduos, a descontaminação, de modo a ajudá-lo na elaboração do plano de desmantelamento e torná-lo o mais rigoroso possível.

Além do plano de desmantelamento, o gestor deve providenciar formação aos trabalhadores em segurança e protecção radiológica, gestão de resíduos, e ainda formar especialistas para a utilização de algumas ferramentas e equipamentos.

Todavia, actualmente existem empresas em alguns países que se dedicam ao desmantelamento de instalações nucleares ou apenas a partes do processo, como a descontaminação, remoção de resíduos ou demolição. Mesmo que as tarefas de desmantelamento sejam cumpridas por empresas do género, a nomeação de um responsável pela gestão do projecto é inevitável. Aliás, o gestor é o responsável pela contratação destas empresas, cuja contratação deve ser referida no plano de desmantelamento. As actividades levadas a cabo por estas empresas nas instalações devem ser previstas e planeadas pelo gestor, que continua responsável pelo que acontece durante as actividades de desmantelamento, mesmo sendo efectuado por uma empresa particular.

Além destes aspectos, por vezes, antes mesmo do desmantelamento, é vantajoso efectuar-se um estudo piloto, para verificar se vale a pena avançar com a elaboração de um plano de desmantelamento e sua implementação.

II.6. Aspectos Técnicos

As instalações nucleares de pequenas dimensões podem variar na construção e fins para que foram desenhadas. Estas também utilizam um conjunto variado de radionuclídeos, que contribui para a variedade e complexidade das instalações nucleares. Os aspectos técnicos contemplam em si conceitos físicos e a descrição das condições físicas em que se encontram as instalações nucleares. Nesta parte são descritas as diferentes interações dos neutrões, que são o principal problema no ICNAS, a descrição dos resíduos e de que forma devem estar acondicionados materiais radioactivos, para poder optar pelo melhor plano de desmantelamento.

6.1. A radioactividade e as instalações

A forma como a radioactividade foi descoberta já foi descrita na introdução. O que importa saber no âmbito desta dissertação é a forma como ela interage com a matéria. A radioactividade é o resultado da transformação espontânea do núcleo atómico, que tende para um estado de energia mais estável. A probabilidade disso acontecer é uma constante, característica do núcleo considerado. A essa constante chama-se constante de decaimento (λ). Na prática utiliza-se o período de semi-desintegração ($T_{1/2}$), que representa o tempo necessário para que metade de uma amostra radioactiva se desintegre. O período de semi-desintegração, assim como a constante de decaimento, são característicos de uma determinada substância radioactiva e relacionam-se pela expressão:

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

O período de semi-desintegração, ou simplesmente período, é que permite orientar a planificação do desmantelamento. Dada a presença de certos núcleos radioactivos nas instalações, é o período destes que permite decidir qual a melhor altura para agir e de que forma. [Perr60]

Como é a partir do ciclotrão que a radioactividade é produzida no ICNAS, o conhecimento do que é produzido e em que quantidade é essencial para estimar de que forma as paredes do *bunker*, onde se encontra o ciclotrão, estão activadas. Este aspecto é fundamental, pois é esta activação que causa mais problemas face ao desmantelamento. O plano de desmantelamento do ICNAS não deve apenas focar-se na activação das paredes,

pois a radioactividade está presente em outras zonas das instalações. Para ter uma descrição técnica fidedigna do que acontece no ICNAS, é preferível determinar planos diferentes para zonas diferentes, assim têm-se zonas onde há fontes seladas (sala quente), instalações de investigação (laboratórios de radioquímica e *hot cells*), sala de resíduos (onde se armazena e decaem os resíduos radioactivos) e por último zonas mais complexas (ciclotrão e respectivo *bunker*).

6.2. O que produz o ciclotrão?

O ciclotrão que o ICNAS possui tem suporte para oito alvos diferentes, com um sistema capaz de extrair dois feixes simultâneos bastante estáveis. A Tabela 1 mostra as características dos feixes que podem ser produzidos e a Tabela 2 mostra os alvos actualmente montados no ciclotrão.

Tabela 2 - Características dos feixes obtidos no ICNAS [Cun10]

Feixe	Energia (MeV)	Corrente (μA)	Distribuição gaussiana dentro de 10mm	Dispersão
Protões	18	150	80%	3σ
Deuterões	9	40	70%	4σ

Tabela 3 - Alvos usados no ciclotrão do ICNAS [Alv12]

Alvo	Reacção Nuclear
<i>Nirta</i> [®] Fluor ¹	$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$
<i>Nirta</i> [®] Gas ^{11}C Carbon	$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$
<i>Nirta</i> [®] Liquid ^{13}N Ammonia ²	$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$
<i>Nirta</i> [®] Gas ^{15}O Oxygen ³	$^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$

¹Estão montados os alvos de tamanho L e XXL

²Montado, mas utilizado para produzir ^{18}F

³Montado mas não utilizado

Além destes aspectos, deve ter-se em conta os materiais que compõem o ciclotrão e os alvos. O conhecimento dos materiais que o feixe de protões deve atravessar, até atingir os alvos propriamente ditos, i.e., o material irradiado para produzir os radionuclidos pretendidos, é fundamental. Os protões, antes de atingirem ^{18}O ou ^{14}N , atravessam uma

folha de 50 μm de Havar[®] (Anexo C) e um fluxo de hélio gasoso, que existe como sistema de arrefecimento. Daí, a energia decresce para 17,5 MeV quando o feixe de protões atinge o alvo. [Cun10]

Outro aspecto a considerar tem que ver com a quantidade de protões que chega ao alvo. Na realidade, a corrente de protões que chega ao alvo não é 150 μA . Esta corrente é a corrente total máxima que é possível extrair do ciclotrão, a partir de um plasma na ordem da centena de miliamperes. Normalmente, os alvos são irradiados com uma corrente de 20 μA ($\approx 1,2483 \times 10^{14}$ protões/s), podendo chegar aos 80 μA nas produções com o alvo XXL e aos 40 μA nos alvos L.

Agora, tendo os feixes caracterizados, interessa saber a forma como a energia do feixe é degradada no alvo e perceber que reacções nucleares podem ser produzidas no ICNAS.

6.2.1. Fórmula de Bethe, secção eficaz e estimativa dos neutrões produzidos

Quando um feixe de partículas carregadas atravessa um determinado meio, com uma velocidade muito superior à dos electrões presentes nesse meio, pode determinar-se a degradação média da energia do feixe. Essa perda de energia reflecte o *poder de paragem* do meio para esse feixe e, para velocidades não relativísticas do feixe, determina-se pela equação (1), também conhecida por “fórmula de Bethe”.

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 q_e^4}{m_e v^2} N Z \ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) \quad (1)$$

O membro do lado esquerdo designa-se *poder linear de paragem* do material e representa a variação da energia de um feixe, quando atravessa um determinado meio, por unidade de comprimento. Assim, de acordo com o sistema internacional, o *poder linear de paragem* vem em Joule por metro. As variáveis do membro do lado direito representam:

- z e v : o número atómico e velocidade das partículas que compõem o feixe;
- Z e N : o número atómico e número de átomos por unidade de volume do meio;
- m_e e q_e : a massa e a carga do electrão;
- I : o valor do potencial de excitação médio de um átomo do meio atravessado, e pode calcular-se usando a expressão semi-empírica, dada pela equação (2).

$$\frac{I}{Z} = 9.1 \left(1 + 1.9Z^{-2/3} \right) \quad (2)$$

O cálculo teórico de I é complexo, assim esta expressão é bastante útil, pois fornece uma boa aproximação. [Alv08]

A degradação da energia do feixe, não se deve apenas a reacções nucleares. A degradação da energia também se deve ao facto de se tratar de partículas carregadas, que ao passarem perto dos núcleos ou dos electrões perdem parte da sua energia. A quantidade de protões que atravessa o alvo por segundo, i.e., a corrente de protões mantém-se aproximadamente constante ao longo do alvo. Posteriormente, o feixe é completamente parado pelo suporte do alvo.

Recorrendo então à “fórmula de Bethe” e tendo em conta as propriedades do alvo de ^{18}O , é possível determinar qual o decréscimo de energia dE dentro de uma pequena distância dx . Deste modo, é possível determinar o intervalo de valores da energia que o feixe adquire ao longo do alvo. A cada decréscimo correspondem um determinado número de reacções, logo à emissão de uma quantidade de neutrões com uma certa energia, que é possível determinar, conhecendo o valor Q da reacção nuclear de interesse [$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$] e o seu valor K_{th} (*threshold*). Essa quantidade de neutrões produzidos e respectivas energias são o ponto-chave para perceber de que forma as paredes do bunker são activadas.

Para determinar o número de neutrões produzidos, é necessário estimar a probabilidade dos protões reagirem com os núcleos de oxigénio. Essa probabilidade é a secção eficaz. Esta grandeza dá-nos a probabilidade de um neutrão, com uma determinada energia, encontrar um determinado núcleo e formar um determinado produto. A secção eficaz é medida em física nuclear pelo barn, pois é mais conveniente e equivale a 10^{-28} m^2 . Ao conjunto de valores da secção eficaz, para uma dada reacção nuclear, em função da energia dos projecteis, chama-se função de excitação para essa mesma reacção. Outros aspectos relacionados com a secção eficaz de neutrões são mais detalhados na secção 6.2.2. [Alv08]

Deste modo, e consultando informações na base de dados ENDF/VI-B, do *National Nuclear Data Centre*, disponível no sítio <http://www.nndc.bnl.gov/>, pode chegar-se ao intervalo de energias dos neutrões produzidos, nos alvos de produção de ^{18}F . Não existe necessidade de estimarmos as partículas alfa produzidas nos alvos de ^{11}C , pois os alvos têm uma espessura suficiente para parar na totalidade estas partículas. Portanto, como

resultado têm-se alvos muito activados, mas facilmente manuseados, contrariamente às paredes do *bunker*.

6.2.2. Composição das Paredes do bunker e interacção dos neutrões com a matéria

O *bunker* das instalações do ICNAS foi concebido para alojar no seu interior o ciclotrão. Com o objectivo de produzir ^{18}F , as paredes do *bunker* foram construídas com betão dito “normal” com dois metros de espessura. Esta espessura prende-se com a necessidade de parar neutrões rápidos, resultantes das reacções nucleares induzidas pelos feixes de protões e garantir que não saiam do espaço que as paredes encerram. Os meios bastante hidrogenados, como o betão, são bons para parar neutrões, dado o tamanho semelhante dos núcleos de hidrogénio com o do neutrão. Por vezes, de modo a tentar reduzir as dimensões das estruturas, ao betão são adicionados elementos que capturam facilmente neutrões, como boro. No entanto, características como estas tornam o betão muito mais dispendioso. Assim, aumentando a espessura das paredes, surte o mesmo efeito e torna a obra menos onerosa.

Diversos estudos já foram efectuados no que diz respeito à activação de blindagens de betão, mas ainda há muito para lá do que já foi feito. Condicionantes como a falta de dados sobre a secção eficaz de algumas reacções nucleares, a variabilidade dos tipos de betão, e o próprio facto das reacções com neutrões serem fenómenos probabilísticos, deixam uma margem onde ainda há muito a estudar.

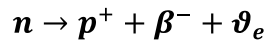
Em primeiro lugar, deve então saber-se o que compõe as paredes do *bunker*. Em vários estudos, e regra geral, há concordância na composição do betão dito “normal”. A Tabela 3 indica os principais elementos presentes no betão “normal”.

Tabela 4 - Densidade dos átomos de cada elemento em betão “normal”. [Udd09]

Elemento	Densidade atómica [n/cm ³ ×10 ²²]	Elemento	Densidade atómica [n/cm ³ ×10 ²²]
H	1,2300	Al	0,1670
O	0,4380	K	0,0441
Na	0,0922	C	0,0110
Ca	0,0332	Fe	0,0332
Si	1,5900		

Agora que se sabe os elementos que compõem as paredes do *bunker*, importa saber a forma como os neutrões vão interagir com esses elementos.

O neutrão é uma partícula subatómica sem carga eléctrica e existe no núcleo de um átomo. O neutrão tem um período de semi-desintegração de 10,183 minutos e desintegra-se emitindo uma partícula β^- e um protão.



O facto de não possuir carga eléctrica deixa prever que o neutrão dificilmente interage com a matéria. Assim, é difícil parar o neutrão, pois este é muito penetrante. No entanto, mesmo sendo muito penetrante, o neutrão pode ter diferentes tipos de interacção. O neutrão pode ser simplesmente dispersado de duas maneiras ou então absorvido pelo núcleo de um átomo. A dispersão pode ser elástica ou inelástica, dependendo da variação da energia da interacção. Se o neutrão é absorvido, o resultado pode ser a emissão de raios gama ou de outras partículas subatómicas ou então pode levar à cisão do núcleo. [DOE93]

Numa dispersão elástica não há transferência de energia para o núcleo, i.e., não é excitado e ocorre com neutrões incidentes com uma energia acima de 1MeV. Na realidade, neste tipo de dispersão elástica, o neutrão não toca no núcleo. O neutrão é repellido e disperso devido às forças nucleares de curto alcance, quando este se aproxima suficientemente do núcleo. Numa dispersão inelástica, o neutrão é absorvido pelo núcleo, formando um núcleo mais pesado. Posteriormente, o núcleo formado emite um neutrão com uma energia cinética inferior à do neutrão incidente. Quando sai, o neutrão deixa o núcleo num estado excitado, que por sua vez volta ao estado fundamental emitindo um ou mais raios gama. [DOE93]

Quando ocorre a absorção do neutrão, o resultado é a emissão de uma partícula carregada ou de um raio gama. Se o núcleo que resulta da interacção for radioactivo, haverá radiação adicional emitida num instante posterior, o que determina a activação das paredes. Reacções como esta ocorrem para vários valores de energia dos neutrões, mas são mais prováveis para valores mais baixos, abaixo de 1MeV. [DOE93]

A Figura 2 e a Tabela 5 consolidam o que já foi dito sobre os neutrões, representando os diferentes tipos de interacção em função da energia.

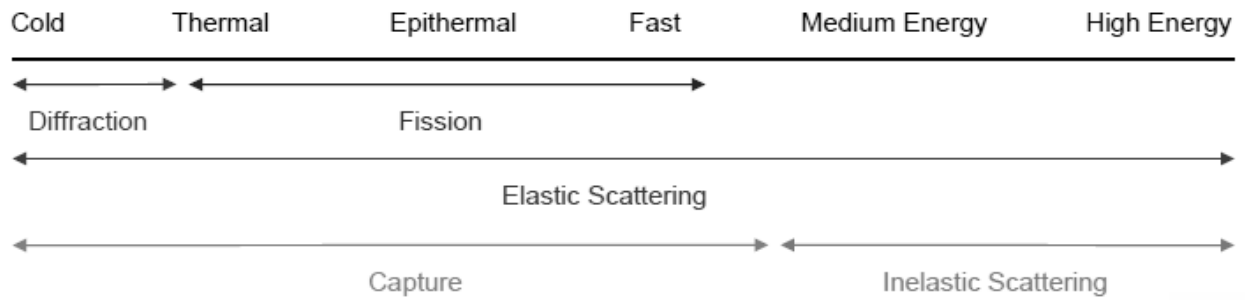


Figura 2 - Representação do tipo de interacção dos neutrões em função da sua energia. [Ham06]

Tabela 5 - Energias dos diferentes tipos de neutrão. [Ham06]

Tipo de neutrão	Energia
<i>Cold</i>	<1meV
<i>Thermal</i>	<0,5eV
<i>Epithermal</i>	0,5eV – 50 keV
<i>Fast</i>	>50keV
<i>Medium Energy</i>	>1MeV
<i>High Energy</i>	>10Mev

A probabilidade de um neutrão interagir com um determinado núcleo é então medida pela secção eficaz, cujo valor depende do núcleo alvo e da energia do neutrão. A probabilidade de uma interacção acontecer em específico é medida pela secção eficaz microscópica (σ). Se o neutrão interagir com um determinado volume de material, a probabilidade de interacção não depende apenas da secção eficaz microscópica de um núcleo, mas também do número de núcleos presentes. Assim, pode definir-se a secção eficaz macroscópica (Σ), que nos dá a probabilidade de uma determinada reacção ocorrer por unidade percorrida por um neutrão. As secções eficazes relacionam-se da seguinte forma:

$$\Sigma = N\sigma \quad (3)$$

onde N representa a densidade atómica e vem em átomos/cm³; Σ vem em cm⁻¹ e σ em cm². [DOE93]

No caso do meio conter mais que um tipo de elemento, a secção eficaz macroscópica define-se da seguinte forma:

$$\Sigma = N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + \dots + N_n\sigma_n \quad (4)$$

onde n identifica o enésimo elemento presente no meio.

Como já referido anteriormente, o neutrão pode interagir por dispersão ou ser absorvido. Assim, a probabilidade do neutrão ser absorvido é a secção eficaz microscópica para a sua absorção (σ_a). O mesmo sucede para a dispersão, tendo assim a secção eficaz para a dispersão do neutrão (σ_s – s do inglês *scattering*). A soma destas duas grandezas é a secção eficaz microscópica total (σ_T). Como também já foi visto, a dispersão pode ser elástica ou inelástica. Assim, a secção eficaz microscópica para a dispersão é igual à soma da secção eficaz para dispersão elástica (σ_{se}), mais a secção eficaz para dispersão inelástica (σ_{si}).

Analisando a função de excitação para cada elemento que compõe as paredes do *bunker*, em função do intervalo de energias dos neutrões produzidos, é notório o facto dos valores da secção eficaz microscópica total serem muito próximos dos valores da secção eficaz microscópica para a dispersão elástica. Daqui pode concluir-se que os neutrões serão maioritariamente dispersos por dispersão elástica dentro do betão até a sua paragem, ou desintegração.

6.2.3. Núcleos possivelmente produzidos

Como já foi referido anteriormente, a falta de dados sobre a secção eficaz das reacções nucleares, limita a previsão da actividade que pode surgir dentro das paredes de betão. O que se tem feito são estudos laboratoriais com feixes de neutrões incidentes sobre amostras de betão, e posterior medição da actividade. Outros fazem simulações computacionais, procurando prever a existência de determinados núcleos. Deste modo, antevê-se a dificuldade de fazerem-se estudos, contemplando todos os núcleos radioactivos possivelmente produzidos.

Com este panorama, são a seguir apresentados, na Tabela 6, todos os núcleos possivelmente produzidos, tendo em conta os seguintes aspectos:

- O intervalo de energias dos neutrões;
- Os valores K_{th} das reacções nucleares;
- Os elementos constituintes das paredes do *bunker* e respectivas proporções.

Tabela 6 - Núcleos radioactivos que possam surgir nas paredes do *bunker*. *

T_{1/2} <1dia	T_{1/2} >1dia	T_{1/2} >>>1dia
	³ H (17,77a)	
	³² P (14,262d)	
⁸ Be, ¹² B, ¹⁶ N, ²⁰ F, ²² Na, ²⁴ Na,	³⁷ Ar (35,04d)	²⁶ Al (7,17×10 ⁵ a)
²³ Ne, ²⁷ Mg, ²⁸ Mg, ²⁸ Al, ²⁹ Al, ³⁰ Al,	³⁹ Ar (367a)	³⁶ Cl (3,01×10 ⁵ a)
³¹ Si, ³⁷ S, ⁴¹ Ar, ³⁸ K, ⁴² K, ⁴³ K, ⁴⁴ K,	⁴⁵ Ca (162,61d)	⁴⁰ K (1,248×10 ⁹ a)
³⁸ Cl, ³⁹ Cl, ⁴⁰ Cl, ⁵⁶ Mn, ⁵⁷ Mn, ⁵² V,	⁴² Ar (32,9a)	⁴¹ Ca (1,02×10 ⁵ a)
⁵³ V, ⁵⁵ Cr, ⁵³ Fe, ⁶¹ Fe, ⁶² Cu, ⁶⁴ Cu,	⁵¹ Cr (27,7025d)	⁵³ Mn (3,74×10 ⁶ a)
⁶⁶ Cu, ⁶¹ Co, ⁶² Co, ⁶³ Co, ⁶⁵ Ni,	⁵² Mn (5,591d)	⁵⁰ V (>2,1×10 ¹⁷ a)
	⁵⁴ Mn (312,12d)	
	⁵⁵ Fe (2,744a)	
	⁶⁰ Co (5,275a)	
	⁶³ Ni (101,2a)	
	⁶⁴ Cu (12,701d)	

* Os valores entre parênteses representam o período de semi-desintegração do respectivo radionuclido.
a = anos | d = dias

Na segunda linha da Tabela 6 também estão indicados radionuclidos que podem surgir da activação do material que compõe o ciclotrão, que é maioritariamente composto por cobre e ferro. No entanto, dada a posição dos alvos relativamente ao ciclotrão e dada a direcção dos projecteis acelerados pelo ciclotrão, os neutrões são projectados para fora deste dispositivo, Assim, a activação do ciclotrão com neutrões é pouco provável. O material que compõe o ciclotrão e os alvos é, sim, muito activado por protões. Essa activação é bastante significativa, tanto que partes dos alvos, quando não mais usados, ficam, por segurança, dentro do *bunker* a decair.

A divisão desta tabela está feita desta forma para se poderem visualizar os radionuclidos que mais causam problemas face ao desmantelamento. Radionuclidos com um período de semi-desintegração com menos de 24 horas não causam problemas ao desmantelamento, pois pode aguardar-se um tempo relativamente curto e aceitável até estes radioisótopos decaírem o suficiente. Os radionuclidos com um período de semi-desintegração muito grande, como acontece na terceira coluna da tabela, não terão uma actividade muito significativa, e abaixo na radioactividade natural. Além disso, o tempo necessário para concluir um processo de desmantelamento bastante inferior. Os

radionuclídeos que têm um período com alguns dias até 100 anos é que causam maior relutância.

Os neutrões interagem maioritariamente com silício e com hidrogénio, por serem os mais abundantes no betão. Com o hidrogénio, os neutrões, como já foi referido, sofrem maioritariamente dispersão, e quando absorvidos, produzem-se deuterões. Quando interagem com o silício, não se produzem radioisótopos com período superior a 24 horas, dada a energia disponível.

O ferro existente nas paredes, para manter a estrutura, apesar de não ser tão abundante, relativamente aos restantes elementos do betão, pode ser bastante activado, surgindo elementos radioactivos como ^{55}Fe e ^{54}Mn , com actividades acima dos limites legais, após alguns anos de produção. Outros elementos podem surgir, como ^{37}Ar , ^{42}Ar , ^{45}Ca e ^{51}Cr , com alguma actividade, mas após uma década, os valores ainda se mantêm bastante abaixo dos limites legais de isenção. Sobre os restantes radionuclídeos, não é possível adiantar muito mais, como já foi referido, dada a falta de alguns dados sobre a secção eficaz de algumas reacções nucleares.

Um estudo divulgado por L.R. Carroll, da *Carrol & Ramsey Associates*, sobre o aparecimento de elementos com período de semi-desintegração longo no betão à volta de um ciclotrão, com características próximas do ciclotrão do ICNAS, sugere o aparecimento de ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{60}Co e ^{134}Cs . Estes radioisótopos surgem a partir de elementos que existem apenas em poucas partes por milhão no betão. O estudo prova a evidência da activação das paredes do *bunker* e demonstra o aumento da actividade destes radioisótopos. Mesmo após 16 anos, a actividade destes elementos mantém-se abaixo de 2Bq/g, sendo o limite de isenção para estes radioisótopos de 10Bq/g [JOCE96].

Com isto vê-se a variabilidade de elementos que podem surgir nas paredes do *bunker*. Também se mostra que são necessários mais estudos laboratoriais e computacionais, focados na previsão da activação do betão.

6.3. Historial das fontes seladas

O perigo que uma fonte selada apresenta depende do isótopo que contém e da sua actividade total; a forma física e química também tem alguma relevância. Quando se põe a questão de remover as fontes do seu local de armazenamento, devem ser consideradas as opções de transporte. Além disso, devem ser consideradas as condições em que os dispositivos estão armazenados, pois podem estar degradados ou não haver um controlo rigoroso sobre eles. Quando o armazenamento perdura por longos períodos de tempo, pode resultar na perda da identificação e registo das fontes. Essa perda de informação retira a possibilidade das fontes voltarem para o fornecedor. Nestas condições, não é recomendado o desmantelamento imediato, e passa a ser necessária uma sala de armazenamento devidamente licenciada, e deve incluir um sistema de ventilação, segurança, inspecção e deve manter-se uma vigilância radiológica. Além disso, os contentores devem ser tidos em conta para um possível esvaziamento da sala de armazenamento. Uma sala deste género não permite que um desmantelamento seja completamente concluído.

No entanto, se todas as fontes estiverem devidamente identificadas e caracterizadas e se estiverem bem acondicionadas, apenas é necessário um manuseamento e transporte em segurança. Se houver suspeita de algum vazamento, devem ser aplicados métodos de desmantelamento mais complexos, que incluem sondagens radiológicas, contentores secundários e técnicas de descontaminação. [IAEA03]

Sejam fontes contendo isótopos de semi-vida curta ou longa, todas devem ser armazenadas temporariamente para decaimento. Dependendo da capacidade de armazenamento das salas de decaimento, poder-se-á manter as fontes temporariamente nas instalações. No caso do ICNAS, as instalações estão devidamente preparadas para o armazenamento de fontes, além de que estão devidamente licenciadas para tal. Assim, as fontes seladas presentes no ICNAS estão, garantidamente, acondicionadas como convém, não havendo risco de contaminações. Além disso, as fontes estão bem caracterizadas *in loco*. Este facto permite uma remoção bastante mais simplificada das fontes

Um problema que surge na questão da gestão interna das fontes seladas prende-se com o sistema de registo. O ICNAS não tem qualquer meio sistematizado para o registo adequado das fontes, apenas têm uma lista afixada à entrada da sala quente (sala indicada

com o número 6, na do Figura 8 Anexo A). Assim, é impreterível uma listagem das fontes existentes e a criação de um meio sistemático de registo. O conhecimento das fontes existentes e a actualização permanente do seu registo são fundamentais para a planificação do desmantelamento. Esta necessidade deve ser satisfeita, pois permite estabelecer medidas de prevenção e segurança para a protecção dos trabalhadores e do público em geral.

Todo a actividade que envolva fontes radioactivas seladas é regulamentada pelo DL 38/2007 de 19 de Fevereiro, que transpõe a Directiva 2003/22/EURATOM, do Conselho, de 22 de Dezembro. Para os registos, declarações anuais e autorizações de actividades com fontes seladas (transporte e manuseamento), devem seguir-se os anexos do DL 38/2007. Além destes decretos, devem ser seguidas algumas recomendações técnicas da IAEA na gestão de fontes seladas.

O registo das fontes por si só não basta. A IAEA recomenda uma caracterização físico-química rigorosa, incluindo também potenciais danos ou contaminações. Essa caracterização deve vir no sistema de registo, pois deve ser facilitado o acesso a essas informações. A ficha normalizada para o registo de fontes seladas, constante no anexo IV do DL 38/2007, já inclui um espaço reservado para essas informações. Assim, não há necessidade de se aceder às salas de armazenamento sempre que se queira saber o estado das fontes. [IAEA01]

Os atributos das fontes que o registo deve conter relacionam-se com certos aspectos a seguir detalhados:

- Propriedades radiológicas
Este atributo compreende o tipo de radiação emitida pelo radionuclido, o período de semi-desintegração, a energia da radiação e a actividade da fonte.
- Propriedades físico-químicas
Este atributo inclui a forma física e química da fonte, se é ou não uma fonte selada, a toxicidade química do material e se a forma do material representa um risco numa situação de exposição.
- Práticas ou condições de uso
Este atributo deve referir se a fonte é usada em instalações fixas ou ambulantes; o tipo de aplicação (industrial, médica, investigação ou militar); a concepção e desenho (acrescido de uma fotografia); o tipo de equipamento; o tamanho da fonte; outros equipamentos como blindagens e factores

operacionais, tais como se a fonte é retirada da blindagem para o seu uso específico. Além disso, deve referir-se se o dispositivo onde está a fonte é fixo ou móvel.

- Fim de vida

Este atributo refere-se às opções disponíveis para o destino final dado às fontes, os custos dessas opções, a traçabilidade das fontes, se é uma fonte em desuso e a probabilidade de se perder o controlo regulamentar. Por outro lado, a fonte pode voltar para o fabricante, dependendo do acordo existente entre este e o utilizador.

- Categoria

Existem três categorias de fontes, de acordo com a IAEA. No ICNAS as fontes são todas da categoria 3 – fontes de baixa actividade usadas para calibrações. As fontes que o ICNAS possui têm geralmente uma actividade abaixo de 1GBq.

No caso particular das fontes seladas, deve considerar-se três tipos de exposição prejudicial que estas podem causar aos trabalhadores, público e ambiente. O risco de exposição também deve constar no registo da fonte.

- Exposição não uniforme externa a uma fonte próxima a um ou mais indivíduos;
- Exposição externa do corpo inteiro a uma fonte não blindada;
- Exposição (interna e externa) após ruptura do invólucro da fonte ou seu contentor. [IAEA01]

Além de todas as informações, é fundamental haver medidas de controlo com uma certa regularidade. Esse controlo deve ser seguido com bastante rigor pelas autoridades regulamentares, no caso de fontes de categoria 1. Como as fontes presentes do ICNAS são de categoria 3, o controlo exige menos esforços por parte das autoridades regulamentares. Nesta categoria, geralmente, a segurança e protecção radiológica são funções asseguradas pelos próprios dispositivos. Todavia, as autoridades devem permanecer atentos quanto às questões do fim de vida das fontes, onde a perda de controlo pode ser um problema. Assim, o relatório anual de práticas previsto no DL 38/2007, tendo em conta os limites estabelecidos pelo DL 140/2005, é suficiente. Além disso, deve manter-se sempre a vigilância e a responsabilidade sobre as fontes.

6.4. Outros equipamentos

6.4.1. Módulos de produção de radiofármacos

Estes equipamentos, presentes em instalações médicas, farmacêuticas, universitárias ou de investigação industrial, compreendem *gloveboxes*, *hot cells* e *hottes*. Nestes dispositivos, a contaminação radioactiva nem sempre é a principal preocupação. A esta, podem somar-se os riscos da possível toxicidade dos reagentes. Num conjunto alargado de contaminantes, as boas práticas e os procedimentos de protecção e manutenção devem ser bem definidos, para evitar situações que possam pôr em perigo os trabalhadores.

De modo geral, para este tipo de equipamento, a IAEA recomenda os seguintes procedimentos para o seu desmantelamento:

- Retirar todas as fontes de radiação que potenciam riscos de exposição, assim como todos os resíduos soltos e, no caso das *hot cells*, dispositivos que possam aí permanecer;
- Executar uma descontaminação preliminar, assim reduzem-se riscos para trabalhadores nas fases de desmantelamento subsequentes;
- Desmantelar as *hot cells* e as *gloveboxes* em câmaras ventiladas ou então em áreas controladas no caso das *hottes*;
- Minimizar a produção de resíduos com uma gestão adequada (reciclagem e/ou reutilização, descontaminações para cumprir os critérios de remoção de resíduos radioactivos).

Para *gloveboxes* de tamanho mais pequeno (i.e., que possam entrar num contentor com aproximadamente 2,5 m³), estas podem ser completamente desconectadas (electricidade, pressão, etc.) e colocadas dentro de um contentor. As *gloveboxes* devem ser seladas e tratadas como resíduos sólidos radioactivos de baixa actividade. Para tamanhos maiores, as *gloveboxes* devem ser descontaminadas e completamente seladas. Todas as canalizações devem ser desconectadas e seladas

As *hottes* e sistemas de ventilação devem ser limpos no sentido descendente, para a remoção de contaminantes. As *hottes* devem ser bloqueadas e devem indicar “fora de serviço”

No ICNAS, os equipamentos deste género são os módulos de produção de radiofármacos no piso -2, já identificados na secção II.2, e a *hotte* da radiofarmácia no piso 0, onde se efectuam as eluições do gerador $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. Existe ainda uma *hotte* na sala onde se efectuam análises clínicas, mas onde não há radioactividade.

Em primeiro lugar, deve ser medido o nível de actividade, de modo a estimar a necessidade de descontaminação. Posteriormente à descontaminação, se necessária, os dispositivos devem ser selados e removidos. No caso dos módulos de produção de radiofármacos do piso -2, estes dispositivos são demasiado grandes para saírem pela porta. Para remover estes dispositivos das instalações, deve ser destruída parte da parede que separa as salas onde encontram do corredor, já preparada para o efeito, como acontece com a parede do *bunker* para o ciclotrão. Claro está que este cenário só se impõe dependendo da estratégia de desmantelamento estipulada.

6.4.2. Tomógrafos de PET e Câmaras gama

Estes dispositivos, depois de avaliada a sua funcionalidade, podem ser reutilizados em outras instalações. Além disso, deve verificar-se se existe alguma contaminação radiológica, de modo a ser descontaminada, que à partida não deve ser necessária. No caso de estes dispositivos serem eliminados como resíduos, deve ter-se em atenção os detectores de radiação e os colimadores, e deve verificar-se também o nível de contaminação e descontaminar se necessário, tendo em conta o limite de actividade aceitável por lei.

6.4.3. Ciclotrão

Para retirar o ciclotrão do *bunker*, para ser substituído, é necessário destruir parte das paredes do *bunker*. A parede a destruir é aquela que é partilhada pelo espaço que encerra o ciclotrão, com a sala de acesso a este dispositivo, indicada com o número 2 na Figura 8. Além disso, à sala de acesso ao ciclotrão, deve ser interdito o acesso pelo interior do ICNAS. Também se deve escavar um buraco a partir do solo ao nível do piso 0, que se situe por cima da sala de acesso ao ciclotrão. Esta zona situa-se abaixo da sala indicada com o número 1 na Figura 6 do Anexo A, que é a sala de recessão de doentes. O ciclotrão é posteriormente embrulhado em plástico e retirado com uma grua.

II.7. Segurança durante o Desmantelamento

Esta secção é dedicada às medidas de segurança que devem ser tomadas durante o processo de desmantelamento. Para tal, devem ser seguidas as recomendações de organismos como a IAEA ou a EURATOM, e ter em atenção a legislação nacional.

Em primeira instância, a principal preocupação, durante todas as fases do desmantelamento, é proteger devidamente os trabalhadores, o público e o meio ambiente dos perigos que possam resultar das actividades de desmantelamento. Assim, deve ser feita uma avaliação minuciosa dos potenciais riscos envolvidos. Muitas vezes, as medidas de radioprotecção para o desmantelamento diferem das medidas tomadas durante a operacionalidade das instalações. [IAEA99]

Os principais factores de protecção e segurança radiológica são a distância, o tempo e as barreiras físicas:

- A dose de radiação decresce com o quadrado da distância entre um indivíduo e uma fonte radioactiva; assim os trabalhadores devem manter uma distância de segurança para poderem exercer as suas funções sem riscos. Além disso, para manter o público em segurança, quando se iniciar o processo de desmantelamento, deve delimitar-se um perímetro de segurança à volta das instalações, o qual seja de acesso restrito. O facto de o ICNAS se situar no Pólo das Ciências da Saúde da Universidade de Coimbra impõe um problema a considerar, dado a circulação de pessoas ser significativa. Além disso, os Hospitais da Universidade de Coimbra também se situam a uma distância não muito grande.
- O tempo de exposição deve ser rigorosamente controlado, de modo a preservar a saúde dos trabalhadores. Além de que devem ser respeitados os limites de dose estabelecidos por lei. De acordo com o disposto no Decreto-Lei 222/2008 de 17 de Novembro, os limites de doses estão transcritos na Tabela 7.
- As barreiras físicas são dispositivos que se interpõem entre os indivíduos e as fontes radioactivas, de modo a atenuar a quantidade de radiação à qual os indivíduos estão expostos. Entre as barreiras físicas podem citar-se as luvas, as máscaras e os fatos destinados a proteger os trabalhadores encarregues de

descontaminar as instalações do ICNAS, quando se iniciar o processo de desmantelamento.

De modo a aumentar a segurança radiológica e a prever os meios necessários para o desmantelamento, em particular a descontaminação, devem ser efectuadas sondagens e elaborados relatórios que dêem conta do nível de contaminação das instalações.

Tabela 7 - Limites de dose para os trabalhadores expostos e membros do público

	Limite de dose efectiva	Limite de dose equivalente
▪ Trabalhadores Expostos	50 mSv/ano (100 mSv em cinco anos consecutivos)	
▪ Cristalino		150 mSv/ano
▪ Pele		500 mSv/cm ² /ano
▪ Extremidades		500 mSv/ano
▪ Membros do Público	1mSv/ano ¹	
▪ Cristalino		15 mSv/ano
▪ Pele		50 mSv/cm ² /ano

¹pode ser excedido, desde que a média ao longo de cinco anos consecutivos não exceda 1 mSv/ano

No que diz respeito ao ciclotrão, a descontaminação também se aplica. Antes se retirar o ciclotrão da sua posição, deve ser efectuada uma descontaminação das paredes no interior do *bunker*. Posteriormente, as paredes devem ser demolidas, tentando não expor o interior do betão, pois é lá que se encontram os isótopos radioactivos de período de semi-desintegração longo. O ideal seria conseguir criar blocos relativamente grandes, para expor o mínimo possível o interior das paredes e não libertar tanta radiação, mas que possam ser transportáveis. A redução de poeiras também é um ponto importante. A quantidade de poeira resultante da demolição dos muros do *bunker* deve ser mínima. As poeiras contêm isótopos radioactivos e são facilmente deslocadas do seu local de origem e difícil de monitorizar, o que pode por em riscos populações mais distantes.

Além disso, deve ter-se em conta o facto de os isótopos radioactivos presentes no betão, estarem principalmente situados no meio da parede, nos primeiros 100cm.

II.8. Gestão de Resíduos

Os principais objectivos da gestão de resíduos são a minimização do volume de resíduos radioactivos produzidos durante as fases de desmantelamento; impedir a mistura de resíduos de diferentes categorias; cumprir com a legislação aplicável no manuseamento, armazenamento e eliminação de resíduos. A gestão de resíduos provenientes de actividades de desmantelamento acarreta alguns riscos, pois estes podem diferir dos resíduos normalmente produzidos nas instalações. Além disso, estes resíduos requerem técnicas de manuseamento, processamento e eliminação diferentes.

Um problema que surge com o desmantelamento é o aparecimento de resíduos secundários devido às actividades de descontaminação. Estas actividades podem levar a uma quantidade de resíduos bastante superior àquela que normalmente é produzida durante a operacionalidade das instalações, dependendo, claro, do tipo de instalação. A definição de um plano adequado de gestão de resíduos é essencial, e sem este não se podem iniciar actividades de desmantelamento. A gestão de resíduos deve seguir a legislação nacional, e na falta desta, deve seguir recomendações internacionais, como as da IAEA. Como se pode constatar, a minimização na produção de resíduos é um ponto fundamental. Essa minimização pode ser conseguida efectuando estudos sobre o historial das actividades das instalações e planeando a gestão de resíduos, antes do início do desmantelamento.

Apesar de a descontaminação produzir resíduos secundários, é um passo incontornável para a segurança e protecção dos trabalhadores e público em geral. Um processo de descontaminação terá em conta aspectos como o radionuclido a eliminar, o destino a dar aos resíduos secundários, o quadro legislativo, a exposição dos trabalhadores e os custos que a descontaminação acarreta. Além disso, é conveniente que, com as técnicas utilizadas na descontaminação, não sejam produzidos resíduos muito diferentes dos habitualmente produzidos nas instalações. Também se deve ter em atenção a relação custo/benefício e o princípio ALARA. [IAEA03]

Em primeiro lugar, para uma boa gestão de resíduos é necessário e prática comum classificar os resíduos radioactivos em diferentes categorias. Esta categorização permite um manuseamento mais eficiente e permite prever que meios serão necessários para o seu empacotamento, eliminação e transporte. Para classificar os resíduos é necessário seleccionar critérios e hierarquizá-los. Assim, uma classificação pode ser mais ou menos

diferencial, dependendo dos critérios seleccionados. Todavia, os critérios não podem ser escolhidos aleatoriamente, devem sim ser escolhidos com base científica e serem facilmente perceptíveis. Além disso, devem ser conhecidas as restrições e limitações dos critérios e o sistema de classificação deve ser de fácil utilização. [IAEA94, IAEA03]

Um sistema de classificação ideal não existe, pois existem muitos factores de que dependem os critérios. Contudo, na generalidade dos casos, um sistema de classificação tem em conta a actividade e a semi-vida dos radionuclidos presentes nos resíduos. Assim, a Tabela 6 exemplifica um sistema de classificação recomendado pela IAEA.

Tabela 8 - Critérios típicos dos resíduos [IAEA03]

Classificação do Resíduo	Característica	Observação
Sem actividade	Actividade inferior aos limites legais permitidos (<0,01mSv para o público)	Sem restrições radiológicas
Actividade baixa ou intermédia	Actividade acima dos limites legais e com uma potência térmica abaixo de 2 kW/m ³	
Semi-vida curta ¹	Limite de 4 kBq/g para emissores α em empacotamentos individuais e de 400 Bq/g em média para outros empacotamentos	Instalações de eliminação próximas da superfície ou formações geológicas profundas
Semi-vida longa	Casos que excedam as restrições para os radionuclidos de semi-vida curta	Formações geológicas profundas
Actividade elevada	Resíduos com potência térmica acima dos 2kW/m ³ e que excedam as restrições para radionuclidos de semi-vida curta	Formações geológicas profundas

¹O ponto que separa semi-vida curta de semi-vida longa não pode ser determinado de forma abrangente, em relação à concentração dos resíduos radioactivos; pois vai depender das opções escolhidas para a gestão de resíduos na hora do desmantelamento e das propriedades individuais dos radionuclidos. Então nesta categoria restringem-se as concentrações para radionuclidos de semi-vida longa. [IAEA94]

Além deste sistema de classificação de resíduos, existem outras vias, tais como:

- As propriedades físicas e/ou químicas (se é um resíduo sólido ou líquido, se é uma solução aquosa ou orgânica);
- As técnicas de tratamento de determinados resíduos (se dois são ou não resíduos compatíveis, se é ou não combustível). [IAEA03]

Capítulo II – Desmantelamento de uma Instalação nuclear

Além da classificação, a quantidade de resíduos produzidos deve ser estimada durante o planeamento do desmantelamento. Depois, os resíduos devem ser categorizados de acordo com o sistema de classificação adoptado, separados assim que são produzidos, no decorrer das actividades de desmantelamento.

De um modo geral, a IAEA considera que a gestão de resíduos passa pelas seguintes etapas:

- Minimização e separação;
- Caracterização e monitorização;
- Tratamento;
- Acondicionamento;
- Transporte e eliminação. [IAEA03]

Estas etapas representam o ciclo dos resíduos. No entanto, nem todas as etapas têm lugar nas instalações onde são gerados os resíduos. A minimização será um objectivo a alcançar e deve ser contemplado no plano de desmantelamento. As outras etapas são a seguir mais detalhadas.

Em Portugal, de acordo com a alínea j) do artigo 14º do decreto-lei n.º 165/2002 de 17 de Julho, o ITN, actualmente ITN/IST, é o organismo competente pela recolha, acondicionamento e armazenamento temporário de resíduos radioactivos sólidos, produzidos pelas instalações nucleares a nível nacional. Assim, quando se iniciarem as actividades de desmantelamento, o ITN/IST deverá recolher os resíduos produzidos, mediante um pedido a ele dirigido. Esse pedido deve ser efectuado através de um formulário disponibilizado pelo ITN/IST, que pode ser consultado no Anexo D.2 da presente dissertação. De forma a reduzir custos de desmantelamento, a instituição deve zelar pela minimização, separação e caracterização dos resíduos radioactivos e seu empacotamento, i.e., a instituição prepara os resíduos de modo a serem imediatamente recolhidos, transportados e armazenados em segurança.

De forma a facilitar a gestão de resíduos, podem ser criadas árvores de decisão, que contemplam os momentos desde a criação até à eliminação de resíduos. A Figura 3 mostra uma árvore de decisão adaptada de recomendações da IAEA. Instituições como as do ICNAS podem recorrer a esta árvore de decisão para a adopção de um sistema de gestão de resíduos.

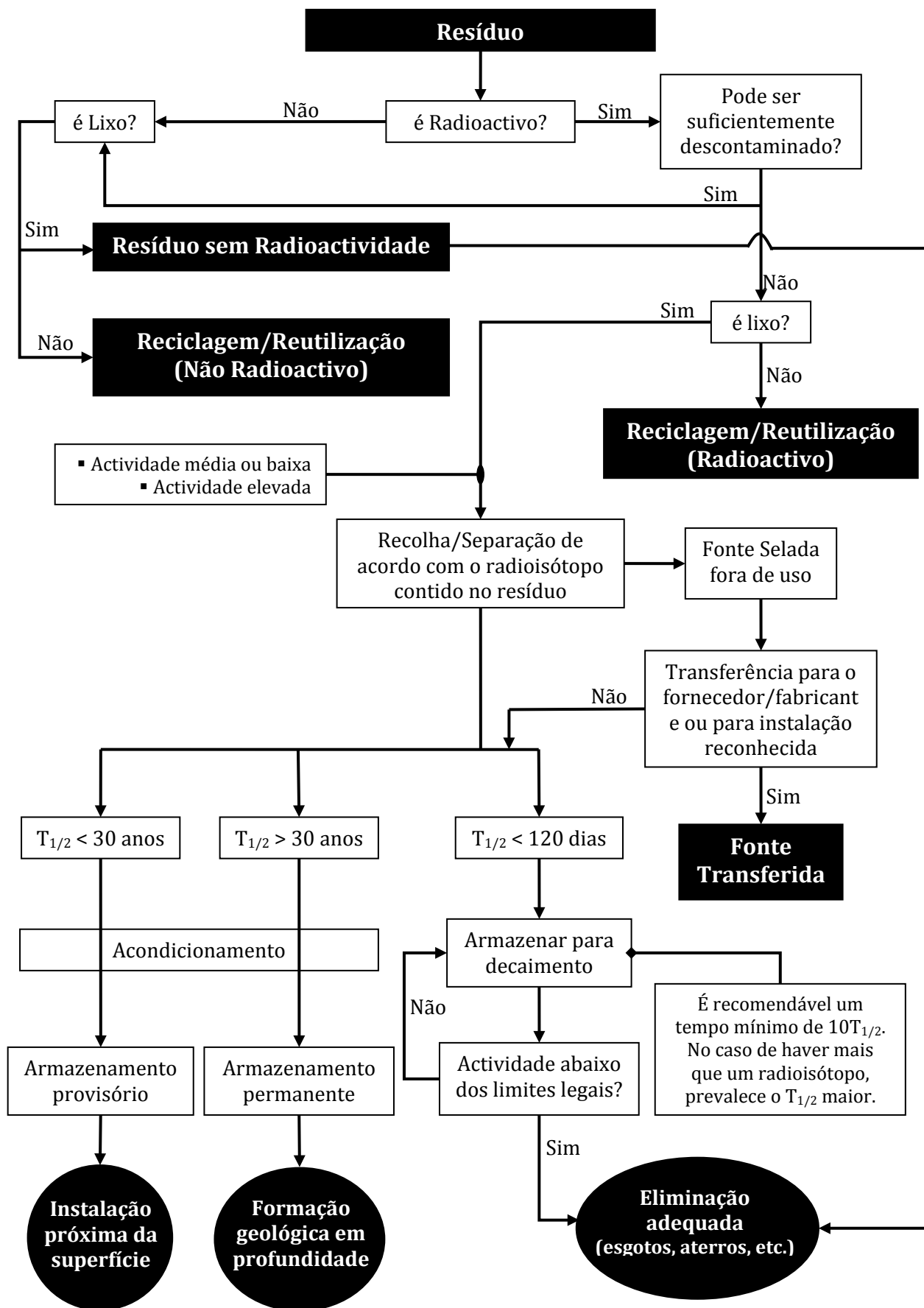


Figura 3 - Árvore de decisão para a gestão de resíduos: separação, classificação e eliminação (adaptada). [IAEA03, IAEA94]

Capítulo II – Desmantelamento de uma Instalação nuclear

Dado um sistema de gestão de resíduos, importa agora detalhar como devem ser geridos diferentes tipos de resíduos. Regra geral, os resíduos devem ser segregados de acordo com a sua natureza. Assim, e de acordo com recomendações internacionais, os resíduos radioactivos devem ser separados em fontes seladas, resíduos sólidos e resíduos líquidos.

Em instalações como as do ICNAS, os potenciais perigos sucedem mais com as propriedades, físicas, biológicas ou químicas, do que com os perigos radiológicos que advêm da presença de certos radionuclidos. Antes de serem detalhados os tipos de resíduos radioactivos que podem ser produzidos, devem ser considerados os resíduos que possam resultar das actividades realizadas em serviços de medicina nuclear, mais precisamente de imagiologia molecular. Assim, os resíduos que podem ocorrer no ICNAS são os seguintes: [IAEA00a]

- Excedentes de soluções preparadas para diagnóstico ou investigação, que contenham radionuclidos;
- Soluções aquosas, contendo quantidades mínimas de radionuclido e actividade baixa, resultantes da lavagem de materiais de laboratório e outros aparelhos;
- Soluções orgânicas, imiscíveis ou não com a água (resíduos de líquido de contagem de cintilação ou resíduos da síntese orgânica);
- Excreções dos doentes (fezes e urina), aos quais foram administrados radionuclidos para diagnóstico;
- Resíduos anatómicos, como partes anatómicas, órgãos, tecidos e fluidos;
- Geradores de radionuclidos fora de uso e soluções radioactivas provenientes dos laboratórios de radiofarmácia;
- Diversos resíduos húmidos, sólidos e semi-sólidos que podem ou não seguir para um aterro ou para combustão (p.e. pensos e fraldas);
- Chapas de cromatografia e outros tipos de colunas, resultantes de diagnóstico médico e investigação;
- Diversos resíduos sólidos e secos, que podem seguir para compactação, combustão ou trituração (luvas e papel) ou não (peças de mobiliário e de equipamentos);
- Diversos resíduos que possam causar ferimentos, tais como agulhas, vidros partidos e frascos de vidro;

- Resíduos provenientes de derramamentos e descontaminações, como tecidos, soluções tampão, etc.
- Filtros usados em *hottes* e armadilhas de carvão;
- Fontes seladas radioactivas fora de uso.

8.1. Gestão de fontes seladas radioactivas

A gestão de fontes fora de uso envolve as autoridades regulamentares, o utilizador/proprietário, e os serviços centralizados de gestão de resíduos (se existirem). No entanto, o proprietário é o principal responsável pela gestão segura de fontes, a menos que essa responsabilidade tenha sido legalmente transferida para outra pessoa/instituição. Além de assegurar a segurança das fontes, o proprietário deve ainda definir um destino para as fontes fora de uso. Caso não seja possível transferir as fontes para outro lugar, o proprietário deve assegurar um local onde seja possível armazená-las. Caso as fontes possam ser transferidas, o proprietário é responsável por preparar as fontes, a fim de serem transportadas em segurança. O proprietário, como já foi indicado nos Aspectos Técnicos, deve ainda estabelecer um registo das fontes para facilitar a identificação, caracterização e armazenamento das mesmas. Por fim, o proprietário deve nomear um coordenador de materiais radioactivos (físico responsável), a quem delega as funções de especialista em radioprotecção e em gestão de resíduos. [IAEA00b]

O coordenador do material radioactivo deve manter o registo das fontes actualizado; aconselhar e orientar as pessoas que manipulam as fontes; verificar que as fontes são mantidas e transportadas em segurança (blindagem, rótulos, integridade do invólucro, etc.); e deve colaborar com as autoridades e com a entidade responsável pela recolha de resíduos radioactivos. Este coordenador deve ainda reportar à gestão interna da instituição/organização qualquer incidente/acidente com fontes seladas no seio das instalações. [IAEA00b]

O primeiro passo para a gestão de fontes seladas radioactivas fora de uso é, de facto, declarar que uma dada fonte está fora de uso. Ao proprietário compete fazer essa declaração e dar início ao desmantelamento da fonte selada. Isto acontece quando uma dada fonte já não tem a mesma utilidade, para que foi concebida, no seio de uma dada instituição. A Figura 4 mostra os passos a seguir para declarar uma fonte fora de uso.

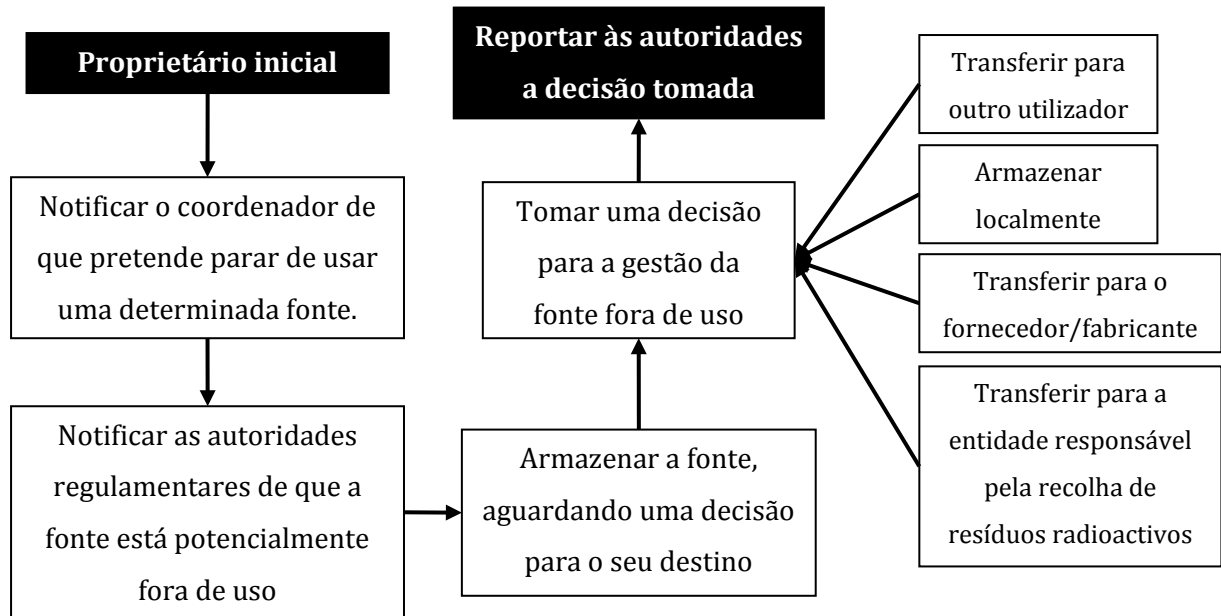


Figura 4 - Opções para fontes seladas radioactivas fora de uso [IAEA00]

Depois de ser tomada uma decisão sobre a gestão de fontes seladas, importa saber que precauções devem ser tomadas localmente, i.e., que precauções devem ser tomadas pelo responsável do material radioactivo das instalações. No caso do ICNAS, as precauções a tomar centram-se no armazenamento local e na transferência segura das fontes.

▪ O armazenamento local

O armazenamento local de fontes, em instalações nucleares, é a divisão onde são colocadas as fontes radioactivas até atingirem uma actividade abaixo dos limites legais, ou então onde aguardam em segurança até serem expedidas para outro local. Para precaver qualquer acidente as fontes devem ser mantidas em contentores de chumbo com tampa; a dose à superfície do contentor deve cumprir com as normas estabelecidas para o local de armazenamento; os contentores devem ser devidamente identificados (com símbolo de radiação ionizante, com a palavra “radioactivo” e com a identificação da fonte); e para emissores beta não devem ser usados contentores de chumbo, de modo a evitar o *bremstrahlung*. [IAEA00b]

▪ Transferência de fontes radioactivas

Qualquer que seja a transferência escolhida para uma fonte selada fora de uso, como indicado na Figura 4, o detentor deve dirigir um requerimento ao ITN/IST, acompanhado de um conjunto de documentos, constituído de uma declaração (conforme o Anexo III do DL n.º 38/2007, constante no Anexo D.4 da presente dissertação), da licença de detenção da fonte, do registo da fonte (ficha normalizada, constante no Anexo IV do DL n.º 38/2007) e do certificado do contentor (sempre que possível). Antes de a transferência ser efectuada, o detentor deve verificar que o destinatário está devidamente licenciado e que tem na sua posse a autorização para o efeito. Se a transferência for efectuada dentro do território nacional, devem ser emitidas novas licenças de detenção e de transporte, caso seja necessário.

No caso de a fonte ser transferida para fora do território nacional, para o fornecedor/fabricante ou para outro utilizador, o destinatário deve preencher um formulário, constante no Anexo D.3 da presente dissertação, de acordo com o Regulamento (EURATOM) n.º 1493/93 do Conselho. O formulário deve ser preenchido pelo destinatário e enviado à autoridade do seu país. Depois de a autoridade autorizar a transferência, o destinatário deve enviar o formulário ao detentor, de forma a poder ser feita a transferência.

No caso de a fonte ser eliminada como um resíduo radioactivo, o detentor deverá fazer um pedido de recolha ao ITN/IST, usando o formulário constante no Anexo D.2 da presente dissertação. Estes casos surgem quando existem fontes órfãs, e ou, situações em que a fonte não pode ser devolvida ao fornecedor/fabricante.

Dentro das fontes seladas, podem ser incluídos os geradores de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. A gestão destes geradores fora de uso também é orientada da mesma forma que a gestão de fontes seladas. Na maioria dos casos, os geradores fora de uso são reencaminhados para o fornecedor/fabricante, onde são desmantelados. Caso não seja possível o retorno à origem, o gerador deve ser recolhido como resíduo radioactivo. [IAEA98]

8.2. Gestão de resíduos radioactivos sólidos

Os resíduos sólidos radioactivos produzidos em instalações como as do ICNAS têm, na maioria dos casos, uma actividade média ou baixa. Os resíduos aqui produzidos são, na sua maior parte, papel, plástico, contentores descartados, ligaduras, etc. Os resíduos sólidos radioactivos, que possam resultar do desmantelamento do ICNAS, surgem como: [IAEA00a, IAEA03]

- Materiais inflamáveis, como vestuário de protecção, componentes de madeira e mobiliário de laboratório;
- Metais activados, como os componentes do ciclotrão, válvulas, tanques de armazenamento, tubagens, cabos eléctricos, instrumentos contaminados e outros materiais estruturais;
- Betão activado ou contaminado proveniente de lajes, pisos, muros de protecção (principalmente do *bunker*) e outras paredes eventualmente contaminadas, assim como outros escombros;
- Materiais leves variados, como isolamentos térmicos;
- Outros resíduos, como blocos de chumbo e outros materiais de blindagem, como vidros, ou resíduos que possam conter berílio, amianto, etc.

Como já foi referido, o ITN/IST é o organismo responsável pela recolha de resíduos radioactivos. De modo a reduzir a quantidade de resíduos, estes podem seguir para a incineração ou serem compactados. A incineração é a maneira mais eficiente de reduzir resíduos inflamáveis, caso existam instalações para o efeito e se a regulamentação permite. No entanto, o desmantelamento de incineradoras usadas para este efeito provoca alguma relutância. A compactação também é um bom método de redução e que se ajusta às necessidades de resíduos sólidos. Outra via de eliminação de resíduos que é usada com alguma frequência é o acondicionamento numa matriz de cimento. [IAEA03]

8.3. Gestão de resíduos radioactivos líquidos

Dentro dos resíduos líquidos, devem ser considerados os seguintes: água contaminada; resíduos provenientes de processamento químico e de soluções de descontaminação; solventes; sangue e outros fluidos orgânicos; resíduos líquidos descartados dos laboratórios de radiofarmácia; pequenas quantidades de óleos contaminados e de líquidos de cintilação. Assim, além dos riscos radiológicos, também devem ser tidos em conta os riscos químicos e toxicidade dos resíduos. Os resíduos líquidos podem e devem ser diferenciados em líquidos aquosos e líquidos orgânicos. [IAEA00a, IAEA03]

Além desta separação, a gestão de resíduos deve considerar outros riscos além dos que advêm da presença de radionuclídeos. A toxicidade de alguns materiais pode tornar-se um problema maior, relativamente aos riscos radiológicos, que podem ser mínimos. Dentro dos materiais que causam maior preocupação, existem os metais alcalinos (sódio e potássio), o chumbo, vários químicos usados nos laboratórios e vários solventes orgânicos como o metanol, e ainda outros elementos, mas que não são constantes nas instalações do ICNAS, como o amianto, o berílio e a grafite.

8.4. Transporte de resíduos radioactivos

A questão do transporte de resíduos, das instalações onde são produzidos para o destino escolhido, deve ser analisada com algum cuidado e sobre a qual devem ser feitas algumas considerações. Apesar de o transporte não ser responsabilidade do ICNAS, a transferência de material radioactivo requer uma autorização prévia para ser efectuada e de um meio de transporte adequado, também devidamente licenciado. Portanto, de certa forma, o ICNAS deve preocupar-se com o transporte deste género de materiais.

De modo a facilitar o transporte de resíduos radioactivos, estes devem ser previamente tratados nas instalações. Antes do transporte de resíduos, alguns requisitos devem ser cumpridos. O transporte de resíduos líquidos deve ser efectuada em contentores apropriados. Os resíduos putrescíveis não acondicionados devem ser

congelados, e devem permanecer até ao fim do transporte. Daqui prevê-se que os resíduos devem ser transportados em veículos com refrigeração, ou equipados com dióxido de carbono sólido (gelo seco). Além disso, o meio de transporte deve ter um plano de emergência e os trabalhadores devem seguir uma formação conveniente, dadas as responsabilidades que estes resíduos acarretam. [IAEA00a]

Por mínima que seja a actividade, a composição química ou em radioisótopos, o volume, o peso, ou por mínimos que sejam os riscos associados aos materiais transportados, devem ser registados o nome do responsável e a data em que foi efectuado o transporte. Assim, constata-se que as precauções, como se tem vindo a ver ao longo da dissertação, não se prendem apenas com aspectos técnicos, mas também com aspectos burocráticos, como registos e autorizações. Esta documentação é necessária, pois a autoridade regulamentar pode a qualquer altura requerer cópias dos documentos das transferências (autorizações de posse, transferência e transporte, registos e certificados de garantia, etc.), ou pode ainda exigir que sejam disponibilizadas pelo remetente e/ou pelo destinatário do material transportado. [IAEA00a]

Outra questão que se coloca é a segurança durante o transporte. Para evitar quaisquer complicações, os resíduos, para serem transportados, devem ser preparados, seguindo um conjunto de regulamentos e orientações. Assim, os resíduos devem ser devidamente empacotados e colocados em contentores. Posteriormente, antes de serem carregados no veículo, os empacotamentos (contentores) devem ser conferidos, de modo a garantir que permanecem intactos e que aguentam as condições de transporte. Se houver qualquer dúvida sobre a integridade do contentor, este deve ser empacotado, de modo a reter seguramente o seu conteúdo. O condutor deve levar consigo um inventário dos contentores que transporta, onde são univocamente identificados. Assim, caso haja algum roubo ou perda, facilmente seria percebido. Todavia, um veículo que transporte material radioactivo é supervisionado de forma apertada, de modo a evitar qualquer adulteração do conteúdo. [IAEA00a]

Para completar a segurança no transporte de material radioactivo, deve agora contemplar-se as propriedades dos contentores e empacotamentos. Como já foi referido anteriormente, existe um conjunto de regulamentos e orientações para preparar os resíduos e ou outros materiais radioactivos, para depois serem transportados. Em termos

práticos, e porque apenas esse aspecto é de interesse para instalações como as do ICNAS, basta saber os tipos de contentores existentes, o que cada um pode conter e qual a actividade permitida por contentor. Todos estes aspectos são constantes do regulamento da IAEA sobre transporte de material radioactivo em segurança (referencia [IAEA00c]), que é referido no DL n.º 38/2007 e deve ser consultado com algum cuidado.

8.5. Resíduos no ICNAS

Os resíduos que o ICNAS produz, como foi referido anteriormente, têm muito pouca actividade. Deste modo, a quase totalidade dos resíduos produzidos são eliminados como não radioactivos. Para serem eliminados como tal, os resíduos são armazenados em primeiro lugar na sala dos resíduos (marcada com o número 5 na planta do piso -2, constante no Anexo A da presente dissertação). Depois de decaírem o suficiente, os resíduos podem ser eliminados como isentos de actividade (*empty*).

Os resíduos equiparados a urbanos e resíduos hospitalares não perigosos (dos grupos I e II, respectivamente, de acordo com o Despacho n.º 242/96 de 13 de Agosto) devem ser acondicionados em saco plástico de cor preta, e são geralmente recolhidos pelos serviços municipalizados comuns. Os resíduos hospitalares perigosos com risco biológico, do grupo III, devem ser acondicionados em saco plástico de cor branca. Os resíduos hospitalares com risco específico, do grupo IV, devem ser acondicionados em saco plástico de cor vermelha. Destes resíduos perigosos, exceptuam-se os objectos cortantes e perfurantes, que devem ser acondicionados em contentores imperfuráveis. Esses contentores são fornecidos pela empresa responsável pela recolha. A Tabela 9 indica alguns aspectos quanto aos resíduos produzidos no ICNAS

Um pequeno apontamento deve ser feito quanto aos geradores de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. Um gerador destes chega todas as semanas às instalações do ICNAS com uma actividade de aproximadamente 1200 mCi. Este gerador é manipulado na *hotte* da sala de radiofarmácia (marcada com o número 15 na planta do piso 0, constante no Anexo A da presente dissertação) durante uma semana. Na semana seguinte, outro gerador substitui o primeiro, mas permanecem os dois na radiofarmácia. Na terceira semana vem um terceiro gerador e o primeiro é transferido para a sala dos resíduos do piso -2, e assim sucessivamente.

Capítulo II – Desmantelamento de uma Instalação nuclear

Depois de o gerador decair cerca de 43 dias, tempo necessário para o gerador de molibdénio estar abaixo do nível de isenção, este é eliminado como resíduo industrial. O contentor de chumbo que trazia o gerador é depois vendido.

Tabela 9 – Triagem de resíduos perigosos, com origem no ICNAS

	Resíduos hospitalares cortantes	Resíduos hospitalares com risco biológico	Resíduos puramente industriais
Quais?	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Seringas ▪ Lâminas ▪ Agulhas ▪ Cateteres e outros materiais invasivos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compressas ▪ Fraldas e resguardos contaminados ou com vestígios de sangue ▪ Material de protecção individual em que haja contacto com material contaminado (luvas, mascaras, aventais, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Químicos e restos de kits resultantes da produção de ^{18}FFDG ▪ Frascos e restos de soluções resultantes da eluição dos geradores de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ ▪ Restos de soluções de outros radiofármacos ▪ Restos do controlo de qualidade e de descontaminações ▪ Geradores $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ depois de decaírem
Empresa que recolhe	Ambimed – Gestão Ambiental Lda.	Ambimed – Gestão Ambiental Lda.	BioVia® - Engenharia e Gestão Ambiental, S.A.
Destino	Incineradora do hospital (HUC)	Incineradora do hospital (HUC)	Incineradora de Souselas

Outro apontamento deve ser feito quanto aos excrementos dos doentes. Em primeiro lugar, os excrementos sólidos (fezes) são separados dos líquidos (urina). Apenas os excrementos líquidos são acumulados nos dois tanques presentes no piso -3 das instalações. Os excrementos sólidos são eliminados para rede pública. Isto sucede, dado que os radiofármacos são maioritariamente eliminados pela urina. O processo de eliminação de radiofármacos pelas fezes, em alguns casos, é muito reduzido, ou mesmo quase nulo. Noutros casos, como o $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Sestamibi, a principal via de eliminação é o sistema hepatobiliar, logo haverá alguma actividade, pouca, nas fezes. No entanto, a produção de fezes é lento, pelo que a sua excreção será feita no domicílio do doente.

Os autoclismos descarregam seis litros de água a cada descarga e os tanques têm uma capacidade de cinco mil litros cada. Assim, um tanque enche em três semanas sensivelmente. Quando um tanque fica cheio, é medida a actividade e se estiver abaixo do

limite de isenção, o conteúdo é eliminado para rede pública. Quando um tanque enche, passa-se para o segundo. O primeiro é esvaziado apenas quando o segundo encher.

Quando se pretender iniciar o processo de desmantelamento, os resíduos que são normalmente produzidos nas instalações podem e devem ser eliminados da forma como o são até ao momento. A opção escolhida para o desmantelamento das instalações é que determina que resíduos deverão ser eliminados. Assim, se for apenas a substituição do ciclotrão, deve continuar-se a rotina da eliminação de resíduos, e focar as atenções para os resíduos produzidos nestas actividades de substituição (metais provenientes do ciclotrão e parte das paredes do *bunker*). A parte a parede destruída representa um volume de entulho entre 12 e 15 m³, o que equivale entre 28,8 e 36 toneladas de betão. Apesar de activo, o betão deverá apresentar uma actividade considerada de nível baixo, geralmente abaixo dos 100Bq/g, e como já foi referido, nem todo betão tem uma igual activação. O material que compõe o ciclotrão deverá também ter uma actividade considerada de nível baixo, geralmente abaixo dos 300 Bq/g. O ciclotrão tem cerca de 25 toneladas de material.

Caso as intenções sejam a utilização das instalações para outros fins ou a remoção completa das instalações, aí sim devem ser removidos, em primeiro lugar, todos os resíduos produzidos, para depois tratar os resíduos que advirão posteriormente. No caso do desmantelamento total, depois de serem retirados todos os resíduos normalmente produzidos, incluindo os tanques onde se armazenam os excrementos, deve efectuar então a sondagem de modo a medir o nível da contaminação. O período que se deve esperar para retirar os resíduos radioactivos será o tempo necessário para que o radionuclido com maior período de semi-desintegração decaia para níveis abaixo do limite de isenção. Para tal não devem ser consideradas as fontes seladas e o betão do *bunker*, apenas os resíduos normalmente produzidos. Assim, o gerador de ^{99m}Tc é que dita o tempo de espera. Os tais 43 dias (aproximadamente 1,5 meses) são um tempo aceitável de espera, entre o fim do funcionamento das instalações e o início do processo de desmantelamento. No entanto, se durante a vida útil das instalações se começar a usar outros geradores na MN com período de semi-desintegração superior, o tempo de espera para se iniciar o desmantelamento deve ser revisto. Por isso, o registo de todas as fontes, geradores, resíduos produzidos e outras substâncias que contenham radioactividade é fundamental para se planear o desmantelamento.

Capítulo II – Desmantelamento de uma Instalação nuclear

Posteriormente, faz então a avaliação do nível de contaminação e, se de facto a contaminação é significativa, deve descontaminar-se as instalações e eliminar convenientemente os resíduos daí resultantes.

Por último, deve demolir-se a instalação por partes. Em primeiro deve demolir-se as partes onde, à partida, não há riscos radiológicos, tentando manter o *bunker* intacto. Como a radioactividade é gerada de dentro para fora do *bunker*, a parte exterior não apresenta grandes riscos radiológicos. No fim é demolido o *bunker*, tentando respeitar ao máximo todos os critérios, até então referidos, sobre segurança e protecção radiológica.

II.9. Custos

Como é possível verificar ao longo da dissertação, por mais simples que seja a instalação nuclear, o processo de desmantelamento envolve sempre uma certa complexidade. Como também é possível verificar, a variabilidade de instalações em tamanho, complexidade e natureza leva, inevitavelmente a processos de desmantelamento diferentes de instalação para instalação. Um processo de desmantelamento acarreta diversos encargos monetários, como também foi referido em algumas partes deste documento. Assim, a elaboração de um orçamento para o processo de desmantelamento varia consoante a instalação a que se destina.

A estimativa de custos é uma parte importante da planificação, que por si só, pode considerar-se uma planificação independente, dadas as variáveis que contempla. Desde material necessário para os resíduos até à mobilização de meios de maior envergadura, também é preciso considerar todas as instituições que estão em rede com a instalação nuclear, o impacto na economia do seu encerramento e também recursos humanos que são dispensados, e os encargos que isso envolve. A estimativa de custos é fundamental para se poder criar meios de financiamento suficientes para o desmantelamento.

Além disso, uma instituição como o ICNAS já representa alguma responsabilidade na sociedade, pelo que o seu encerramento já implica algumas negociações com os órgãos reguladores e depende das políticas nacionais. O encerramento de instalações do género pode representar dois problemas para o estado. Por um lado, com o encerramento, deixam de se produzir radiofármacos, principalmente ^{18}FDG , para diagnóstico e para necessidade da população, aumentando a dependência do estrangeiro, em particular de Espanha. A diminuição da dependência do estrangeiro reduz significativamente os preços dos diagnósticos, logo diminui o valor da participação do estado. Além de que a produção de radiofármacos nacionais contribui para o PIB interno. Por outro lado, a falta de uma estimativa de custos, não permite o financiamento do desmantelamento atempadamente. Assim, sem fundos suficientes para desmantelar as instalações, o desmantelamento pode vir a representar um encargo demasiado importante para a economia nacional. Então, corre-se o risco de um encerramento negligenciado, pondo em risco a população. Com isto, os órgãos supranacionais, como a IAEA e a EURTOM, sempre atentos, vêm responsabilizar o estado, aplicando coimas e obrigando a tomadas de decisão sobre o desmantelamento das instalações, para benefício e segurança da população.

Desta forma, muitos governos insistem em negociar, numa tentativa de arranjar meios financeiros para o desmantelamento, antes mesmo do licenciamento de novas instalações nucleares. Para os ajudar, os órgãos nacionais podem e devem solicitar a ajuda dos órgãos supranacionais, como a IAEA, a CE e a OCDE, para se elaborarem orçamentos para o desmantelamento de determinadas instalações

Uma estimativa de custos pode ser efectuada de três modos diferentes, cada um com um grau de confiança diferentes. Os tipos de estimativas são a seguir apresentados.

- Uma estimativa com um grau de confiança menor, logo com uma variabilidade maior, contempla itens técnicos não detalhados, fazendo aproximações e majorações ou negligenciando factores. Este tipo de estimativa é efectuado principalmente quando ainda não estão definidos os objectivos do plano de desmantelamento.
- Uma estimativa orçamental, com um grau de confiança intermédio, analisa os registos e os detalhes dos equipamentos, os objectivos do projecto estão bem definidos, mas os detalhes técnicos não são desenvolvidos.
- Uma estimativa definitiva, com um grau de confiança elevado, já contém objectivos de desmantelamento bem definidos e tem detalhes do processo de desmantelamento bem desenvolvidos. Além disso, os aspectos técnicos e os passos a seguir estão contemplados e bem detalhados.

O responsável por desenvolver a estimativa deverá julgar os dados que lhe são fornecidos, para estimar os custos da melhor forma, de acordo com esses mesmos dados. No desenvolvimento de meios para financiar o desmantelamento, a pessoa responsável pela estimativa de custos deverá estabelecer margens (ou contingências) de modo a precaver derrapagens orçamentais ou algum imprevisto. [IAEA05]

Dentro de uma estimativa, podem dividir-se os custos por grupos. Esses grupos incluem os Trabalhadores; Equipamentos e Materiais; Serviços; Contingências.

- Trabalhadores

Este grupo relaciona-se com os contratados para o desmantelamento e inclui os salários, férias, seguros de saúde e de vida. Também podem incluir-se os valores relativos ao despedimento dos trabalhadores das instalações antes do encerramento.

- Equipamentos e Materiais

Este grupo diz respeito a todo o equipamento necessário adquirir para o desmantelamento: escavadores, gruas, demolidores, contentores para os resíduos e outros equipamentos para monitorização de doses se necessário; fatos protectores, máscaras, luvas, materiais para descontaminação etc.

- Outras despesas

Este grupo prende-se com custos como taxas, seguros de responsabilidade civil (geralmente adquiridos por instalações do género), consultores (serviços prestados por órgãos que se deslocam às instalações, como o ITN/IST), custos de transferências de resíduos radioactivos e outros resíduos, material de escritório e outros utilitários.

- Contingências

Este grupo relaciona-se com a previsão de imprevistos que acarretam custos. Estas previsões vêm com incertezas e dúvidas que existem no plano de desmantelamento. [IAEA05]

A estimativa de custos é um projecto que deve ser desenvolvido durante ao longo da vida útil das instalações, conjuntamente com o resto do plano de desmantelamento. No entanto, deve ser concluído algum tempo antes do encerramento das instalações. Além disso, mesmo não tendo uma estimativa de custos, uma instituição como o ICNAS deve procurar criar meios para garantir um financiamento para o seu próprio desmantelamento. Com a venda de radiofármacos, é recomendável que parte do valor reverta para algum mecanismo que permita no futuro sustentar o processo de desmantelamento e toda a logística que envolve.

II.10. Garantia de Qualidade

Esta secção surge neste enquadramento para realçar alguns pontos fundamentais dentro da planificação do desmantelamento. Essencialmente, a garantia de qualidade diz respeito ao conjunto de medidas necessárias ao desenvolvimento do desmantelamento em segurança, i.e., quais os procedimentos a seguir para evitar qualquer perda de material, acidentes ou outras situações desagradáveis. Estes procedimentos consistem no registo de todo o material radioactivo possuído e que circula nas instalações; tal como fontes seladas, cujo registo deve ser verificado periodicamente (declaração de posse de fontes deve ser anual e dirigida ao ITN e redigida de acordo com Anexo V do DL n.38/2007).

Para instalações de tamanho reduzido, ou onde não se manipulam quantidades de material com radioactividade significativa, os projectos de desmantelamento não são muito extensos, pelo que não precisam de procedimentos demasiado complexos. Já em instalações onde são manuseados maiores quantidades de material radioactivo, o plano de desmantelamento deve dar ênfase ao processo de documentação e outros procedimentos, que envolvam contacto directo com a radioactividade. [IAEA03]

A garantia de qualidade também engloba a atribuição de responsabilidades e a formação de operadores, tanto os que estão antes, como os que estão depois do início do processo de desmantelamento. Os primeiros operadores são aqueles que estão encarregues, ou em parte, de por em prática o sistema de registo. Os seguintes estarão a por em prática o plano de desmantelamento, com base nos registos efectuados pelos primeiros. Daí, a integridade e a fiabilidade dos registos serem de máxima importância.

Também deve ser referido que além destes aspectos para garantir a qualidade do desmantelamento, é recomendável que sejam prevenidas situações anormais. Esta prevenção permite solucionar qualquer situação que se desvie dos procedimentos inicialmente estabelecidos, ou que possa sair do controlo dos operadores. Além disso, esta prevenção deve conseguir dar resposta, caso não haja recursos suficientes para dar seguimento ao processo de desmantelamento, ou no caso inverso, se os recursos actuais permitem uma maior rapidez do processo e uma redução de custos.

Para ajudar a conceber um plano de desmantelamento e para garantir que todas as etapas são concluídas, no Anexo F está uma *check-list* com os itens que o plano deve seguir.

Conclusão/Discussão

O facto das actividades de planificação, para o desmantelamento de instalações nucleares, ser uma matéria ainda muito verde em Portugal, houve necessidade de consultar-se muita literatura, em primeiro lugar, para se perceber o conceito de desmantelamento. Apesar da experiência partilhada ser uma necessidade em assuntos de desmantelamento nuclear, em Portugal essa prática não existe, daí este projecto ser pioneiro nestas actividades. Dada a variedade de instalações, cada plano de desmantelamento é único. A publicação desses planos é muito útil para se documentarem todas as situações que podem suceder de um desmantelamento e ser mais fácil a outros resolverem problemas já enfrentados.

Além disso, a literatura existente está direccionada principalmente para instalações mais complexas, como reactores nucleares de grandes dimensões. Com este trabalho percebe-se que a dimensão do problema de desmantelamento, para instalações como as do ICNAS, não é tão grande, mas não se deve menosprezar os riscos que existem, que podem ser bastante prejudiciais. Assim, existe todo um esforço para se adaptar recomendações para instalações de grandes dimensões, a instalações de tamanho mais modesto, como as do ICNAS, para evitar o cuidado excessivo, que encarece todo o plano de desmantelamento.

Este documento procura alertar as autoridades deste país, e a população em geral, para a necessidade dos cuidados que se devem ter com a energia nuclear. O desmantelamento, assim como o licenciamento de instalações nucleares, acabam por atingir dimensões políticas e económicas consideráveis, pelo que os chefes de estado devem ter isso em atenção nas suas campanhas e funções, devendo legislar nesse sentido. O facto de manter actualizadas as directivas impostas pela EURATOM, no Direito nacional, também é um ponto essencial para se desenvolver este domínio. As Directivas existem e devem ser aplicadas, de modo a acompanharmos de mais perto o que acontece na Europa e não ficarmos na eterna cauda. Além disso, pode considerar-se que este documento procura iniciar uma cultura de previsão e planificação prévia de acontecimentos, no que diz respeito ao desmantelamento de instalações nucleares.

A presente dissertação permitiu detalhar as partes que um plano de desmantelamento necessita desenvolver, referindo a forma como se pode aplicar ao ICNAS. No entanto, tentou-se ser o mais abrangente possível, de modo a criar um

documento que possa ser consultado por outras entidades portuguesas, que necessitem de um plano de desmantelamento, que actualmente nenhuma possui, e lhes permita saber que direcções tomar para o efeito. Tecnicamente, a descontaminação e o desmantelamento nuclear para pequenas instalações não apresentam grandes problemas. Por vezes, obtêm-se melhores resultados quando o desmantelamento é desenvolvido pelos trabalhadores da própria instituição, familiarizados com a estrutura e com a rotina das instalações. Contudo, não pode deixar de haver formação dos mesmos trabalhadores.

No ICNAS, já existem boas práticas de segurança e protecção radiológica, e existe uma boa orgânica na gestão de resíduos produzidos na rotina do seu funcionamento. O processo de desmantelamento prende-se sobretudo com a descontaminação das instalações e com o seu problema maior – as paredes do *bunker*. Quanto a este ponto, já foi referida a necessidade de se desenvolverem mais estudos quanto à activação. Os isótopos radioactivos que podem surgir, dada a composição do betão, foram identificados. Em alguns casos, de modo a saber-se o nível de actividade do betão, perfuram-se as paredes e mede-se directamente a actividade no interior das mesmas. Claro está que isto sucede numa fase posterior ao encerramento e ao fim das actividades das instalações, caso contrário, poder-se-ia por em causa a blindagem e a segurança dos trabalhadores e público em geral.

Outro aspecto a considerar é o facto de estas instituições de tamanho menor poderem não ter recursos suficientes para concluir o processo de desmantelamento. Daí que as exigências devam ser menores e devem ser apropriadas a instalações de pequeno porte, com menos riscos em termos de segurança nuclear. De facto, a logística envolvida no desmantelamento de instalações como as do ICNAS são razoavelmente menores. Para se precaver de situações menos agradáveis, o ICNAS deve criar mecanismos que lhe permitam gerar meios financeiros para sustentar o desmantelamento, além do seu orçamento habitual.

Por último, pode considerar-se este documento um bom ponto de partida para o desmantelamento do ICNAS. Como foi referido ao longo da dissertação, este documento não é, nem pode ser definitivo e tem que evoluir com a evolução da própria instituição. Para começar, a instituição deve criar um sistema de registo das fontes, recorrendo aos documentos anexados. Também deveria ser mantido actualizado um sistema de registo dos resíduos produzidos e armazenados na sala dos resíduos do piso -2, assim como a sua saída das instalações.

Trabalho Futuro

Para trabalho futuro ficam alguns pontos a realizar. Além dos registos, deve ser nomeado alguém que fique responsável pelo projecto de desmantelamento, aqui iniciado, de modo a assegurar a sua constante actualização.

Em segundo lugar, deve começar a pensar-se num plano de custos mais detalhado, partindo das considerações aqui feitas. Além disso, deve fazer-se um estudo do impacto socioeconómico de um eventual encerramento das instalações do ICNAS. Claro está que este plano também deve evoluir, pois ainda podem ser licenciadas mais instalações deste género em Portugal. Assim, um encerramento amanhã, não tem o mesmo impacto que um encerramento daqui a 20 anos, se existirem mais institutos como o ICNAS. Além disso, deve ter-se em conta a situação económica actual do país, e o que poderá suceder daqui a uns anos.

Por último, reforça-se a necessidade de se desenvolverem estudos, quanto à activação de materiais, nomeadamente betão. Assim, fica aberta a porta para investigações tanto laboratoriais como computacionais e fica um apelo ao governo e às fundações para a necessidade de financiarem estas mesmas investigações. Isto é verdade, dado o aumento comprovado de doenças oncológicas e outras, que necessitam de meios de diagnóstico e terapêutica cada vez mais sofisticados, e consequente criação de unidades clínicas e de diagnóstico que recorrem a substâncias nucleares.

Anexo A

Plantas do ICNAS

Piso 1



Figura 5 - Planta do ICNAS: Piso 1

Piso 0

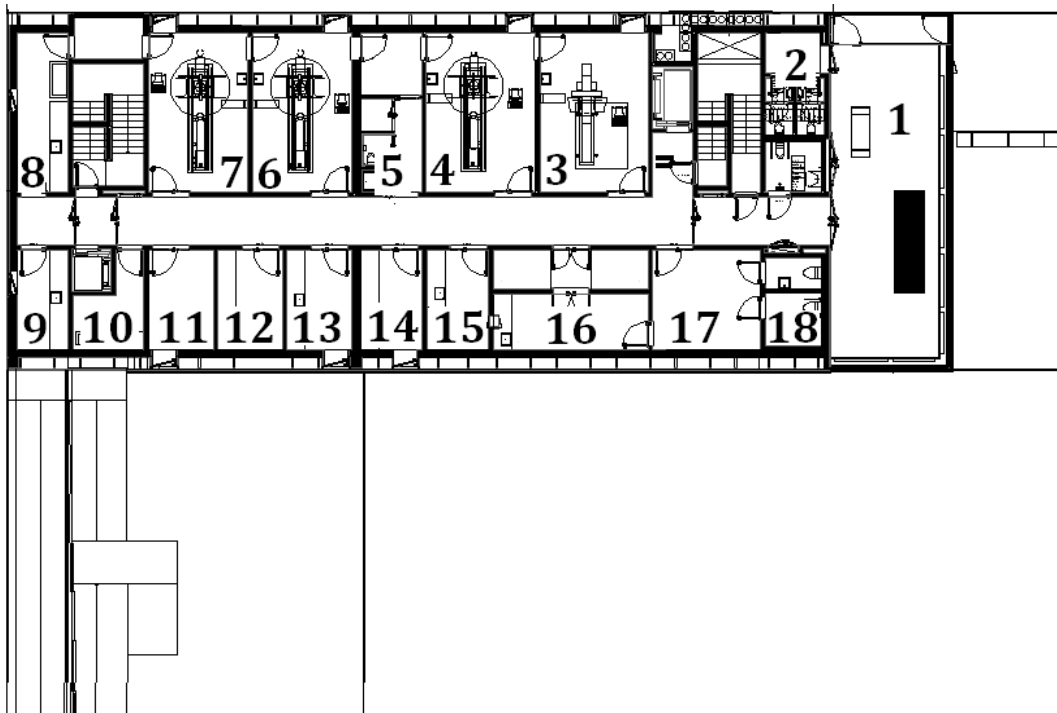


Figura 6 - Planta do ICNAS: Piso 0

1 - Sala de recepção e de espera para acompanhantes e doentes antes da administração de radiofármacos;

2 - Sanitários para acompanhantes e doentes antes da administração de radiofármacos;

3, 4, 6 e 7 - Salas de aquisição de imagens, equipadas com câmaras gama;

5 - Sanitários para TPE e chuveiro de emergência;

8 - Sala de pré-clínica, projectada para investigação em animais;

9 - Sala de apoio;

10 - Laboratório de análises clínicas;

11 - Sala de densitometria;

12 - Sala de provas funcionais;

13 - Sala de processamento de exames;

14 - Gabinete médico;

15 - Laboratório de radiofarmácia;

16 - Sala de injeção de radiofármacos;

17 - Sala de espera para doentes injectados;

18 - Sanitários para doentes com radiofármaco administrado.

Piso -1

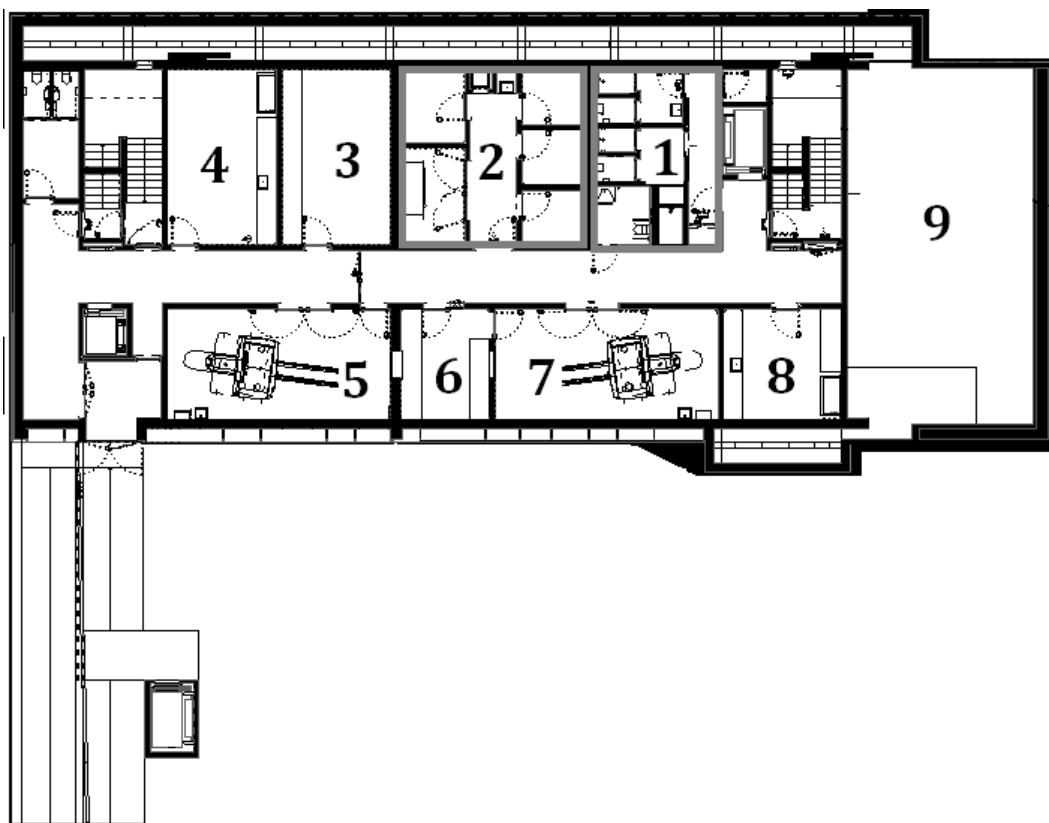


Figura 7 - Planta do ICNAS: Piso -1

1 – Sanitários para TPE e doentes com radiofármaco administrado e chuveiros de emergência;

2 – Sala de injeção de radiofármacos. Nesta sala está o elevador dedicado ao transporte do radiofármaco a partir do laboratório de radiofarmácia que se situa exactamente abaixo desta sala;

3 – Sala de pré-clínica;

4 – Laboratório;

5 – Sala com tomógrafo PET para a mama;

6 – Sala de controlo;

7 – Sala com o tomógrafo PET/CT;

8 – Sala de contagens;

9 – *Corrette* técnica.

Piso -2

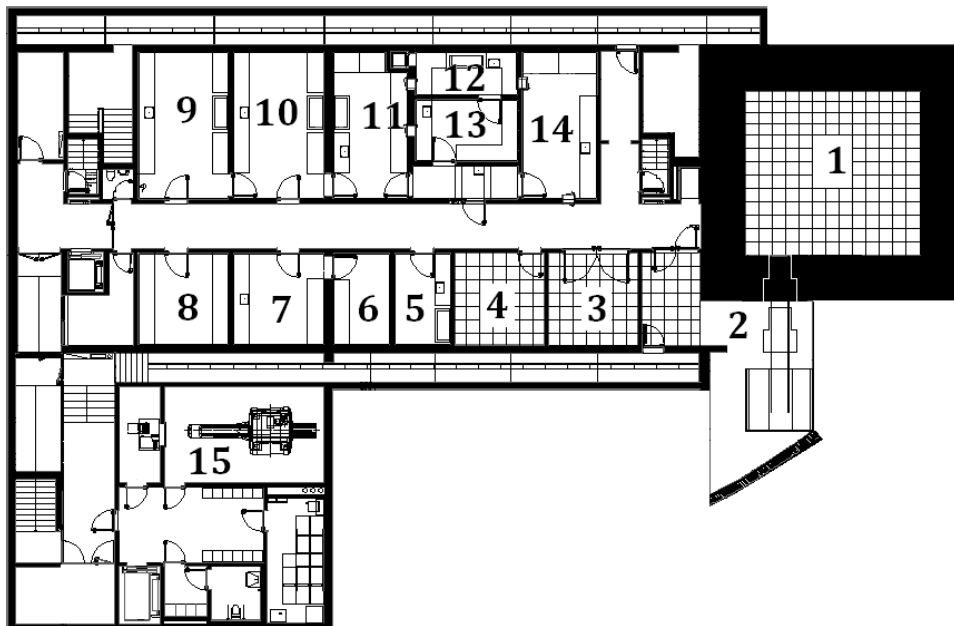
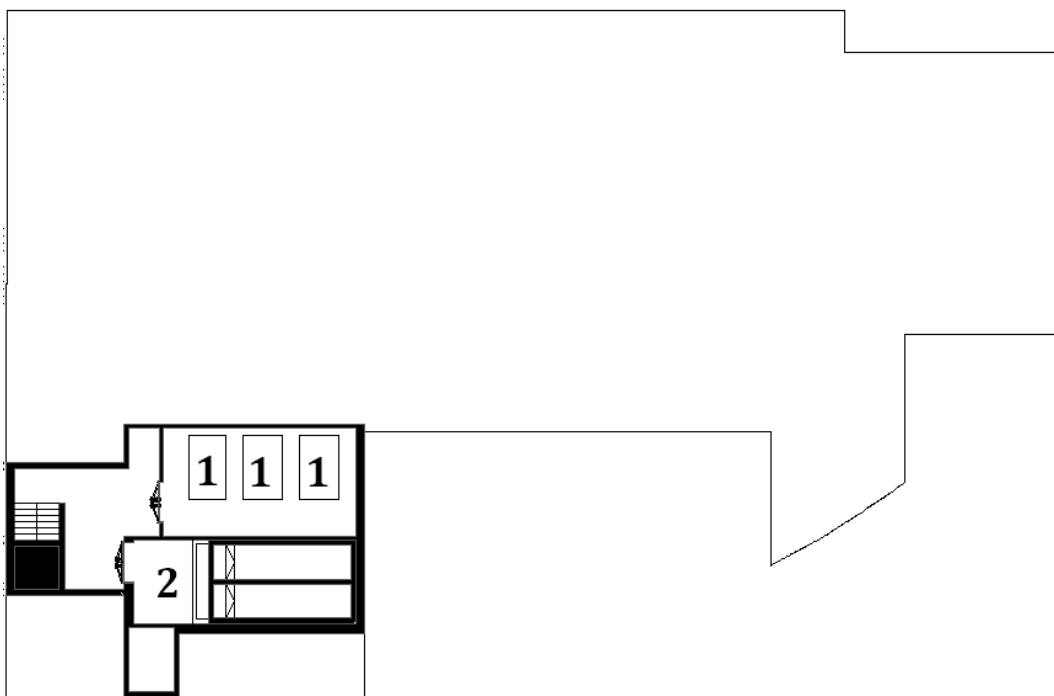


Figura 8 - Planta do ICNAS: Piso -2

- 1 – *Bunker* onde se encontra o ciclotrão;
- 2 – Sala de acesso ao ciclotrão e onde se preparam os alvos;
- 3 – Sala de fontes de alimentação;
- 4 – Sala de controlo do ciclotrão;
- 5 – Sala dos resíduos radioactivos;
- 6 – Sala quente, destinada à recepção, abertura e armazenamento de produtos radioactivos, como as fontes
- 7 – Sala morna;
- 8 – Oficina;
- 9 – Sala de lavagens;
- 10 – Sala de controlo de produtos radioactivos, que são posteriormente transportados para outras instalações;
- 11 – Laboratório de radiofarmácia 1 onde é feita a síntese de ^{18}F FDG e seu fraccionamento em unidoses para uso no próprio edifício.
- 12 e 13 – Sala de calibração de doses e controlo de qualidade dos radiofármacos, que depois seguem por elevador dedicado até ao piso -1.
- 14 – Laboratório de radiofarmácia 2, principalmente dedicado à investigação e está preparado para receber os radionuclidos ^{11}C , ^{13}N e ^{15}O , produzidos no ciclotrão.

Piso -3**Figura 9 - Planta do ICNAS: Piso -3**

1 – Tanques de retenção, onde são recolhidas as urinas dos doentes injectados e onde são recolhidos outros resíduos radioactivos que possam ser eliminados pela rede pública, depois de decaírem o tempo suficiente;

2 – Bomba de incêndio e depósitos de águas de incêndio.

Anexo B

Especificações de dispositivos que podem ser encontrados no ICNAS, por Piso

Piso 1

Neste piso, como é dedicado à investigação computacional, direcção e administração, não se encontram dispositivos complexos como tomógrafos.

Piso 0

As quatro câmaras gama que podem ser encontradas neste piso foram transferidas do Laboratório de MN, antes instalado na FMUC. A Tabela 10 identifica as câmaras gama do ICNAS e suas características, estando indicada a sala, relativamente à Figura 6, onde se encontram.

Tabela 10 - Câmaras gama que o ICNAS possui.

Sala	Modelo	Ano de aquisição	Características
3	STARCAM 3200 XR/T	1996	1 Detector rectangular
4	Millenium VG	2000	2 Detectores rectangulares
6	STARCAM 2000 AC/T	1992	1 Detector circular
7	Maxi Camera 400T	1987	1 Detector circular Colimador <i>pinhole</i>

Neste piso também existe um densitómetro, que foi transferido também do Laboratório de MN da FMUC. Fonte de raios-X, trata-se de um modelo QDR 4500 ELITE, da Hologic, adquirido em 1999.

Piso .-1

Neste piso existe dois tomógrafos PET/CT. O mais utilizado é um modelo GEMINI GXL da Philips®.

Piso -2

Ciclotrão

O ICNAS está equipado com um ciclotrão Cyclone® 18/9 HC da empresa IBA. Este ciclotrão é capaz de acelerar prótons (18MeV) e deutérios (9MeV) e gerar correntes de 150µA e 40µA respectivamente, até formar um plasma. Sobre os alvos, incide uma corrente de prótons de cerca de 20µA. Apesar de acelerar prótons até aos 18MeV, quando o feixe passa pelo material que constitui os alvos até atingir a amostra para a produção de radionuclídeos, a energia do feixe cai para cerca de 17,5MeV. Os materiais que compõem os alvos são os seguintes:

- *Havar*®: permite manter uma pressão baixa no interior no ciclotrão;
- *Hélio gasoso*: funciona como sistema de arrefecimento;
- *Alumínio, titânio ou nióbio*: funciona como suporte das amostras a irradiar e como barreira térmica entre o hélio e as amostras

O ciclotrão tem 8 portas, o que lhe confere a capacidade para suportar 8 alvos.

O sistema de controlo e automação do ciclotrão é um sistema Zephiros® e permite a automatização total do dispositivo.

Laboratório de radiofarmácia 1

Está equipado com duas células blindadas. Uma é dedicada à síntese de ¹⁸FDG, inclui um sistema de síntese compacto Synthera® da IBA. Todas as faces da célula blindada têm uma blindagem efectiva de 75mm de chumbo.

A outra célula blindada, modelo Theodorico/FA, contém um sistema automático para diluição, calibração e fraccionamento de doses, transferidas directamente da célula de sínteses. As faces do equipamento têm uma espessura mínima de 75mm de chumbo, e alguma podem chegar aos 100mm.

Laboratório de radiofarmácia 2

Neste laboratório existe uma célula blindada dupla, modelo MIP2-2, cujo objectivo é investigação. Esta célula possui um painel de isolamento em acrílico com luvas, o que permite a manipulação de objectos dentro da célula. A blindagem efectiva é de 75mm de chumbo em todas as faces.

Anexo C

Havar®

O Havar® foi originalmente desenvolvido pela Hamilton Watch Company nos finais dos anos 1940, como um material inquebrável. De acordo com o folheto do Havar®, este material foi concebido para ser forte, resistente à corrosão e não magnético. [HPM]

A Tabela 11 e a Tabela 12 mostram as propriedades deste material.

Tabela 11 - Composição do Havar® [HPM]

Elemento	Percentagem
Cobalto	42,0%
Crómio	19,5%
Níquel	12,7%
Tungsténio	2,7%
Molibdénio	2,2%
Manganésio	1,6%
Carbono	0,2%
Ferro	19,1%

Tabela 12 - Propriedades físicas do Havar® [HPM]

Propriedade	Valor
Densidade	8,304 g cm ⁻³
Ponto <i>Melting</i>	1480°C
Resistividade eléctrica	92,0 µΩ cm
Coefficiente de expansão térmica (0°C até 50°C)	12,5×10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Condutividade térmica	13,0 W m ⁻¹ K

A folha de Havar® vem da *Goodfellows®*, uma empresa americana líder mundial na especialidade que garante a precisão da espessura da folha, com um erro muito pequeno.

Anexo D

-

DOCUMENTAÇÃO

ANEXO D.1

Ficha normalizada para o registo de fontes seladas (anexo IV do DL n.º 38/2007)

1. Número de identificação da fonte	2. Identificação do detentor autorizado Nome: Morada: País: Fabricante <input type="checkbox"/> Fornecedor <input type="checkbox"/> Utilizador <input type="checkbox"/>	3. Localização da fonte (utilização ou armazenagem) Se não for a mesma que em (2) Nome: Morada: Utilização fixa <input type="checkbox"/> Armazenagem (móvel) <input type="checkbox"/>
4. Registo Data do primeiro registo: Data da transferência do registo para o arquivo histórico:	5. Autorização Número: Data de emissão: Válida até:	6. Controlo operacional da fonte Data: Data: Data:
7. Características da fonte	8. Recepção da fonte	Data: Data:
Radionuclídeo:	Recebida em:	Data:
Actividade na data de fabrico ou da primeira colocação no mercado:	Recebida de:	Data:
Data de fabrico:	Nome:	Data:
Fabricante/fornecedor: (1)	Morada:	Data:
Nome:	País:	Data:
Morada:	Fabricante <input type="checkbox"/> Fornecedor <input type="checkbox"/> Utilizador <input type="checkbox"/>	Data:
País:	9. Transferência da fonte	10. Informações complementares:
Propriedades físico-químicas:	Transferida em:	Perda <input type="checkbox"/> Data da perda:
Tipo de fonte:	Transferida para:	Roubo <input type="checkbox"/> Data do roubo:
Identificação da cápsula:	Nome:	Não <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/>
Classificação ISO:	Morada:	Descoberta: Data:
Classificação ANSI:	País:	Local
Certificado de forma especial:	Fabricante <input type="checkbox"/> Fornecedor <input type="checkbox"/> Utilizador <input type="checkbox"/>	Outras Informações:
	Instalação reconhecida:	

ANEXO D.2

**Formulário para pedido de recolha de resíduos
radioactivos dirigido ao ITN/IST**



PEDIDO DE RECOLHA DE RESÍDUOS RADIOACTIVOS

1. Entidade:.....
2. Instalação:.....
3. Contribuinte n.º:.....
4. Morada:.....
.....
5. Telefone:..... Fax:..... E-mail:.....
6. Pessoa a contactar:.....

Características dos resíduos radioactivos

7. Radionuclido:.....
8. Actividade:.....
9. Tipo de resíduo:.....
10. Tipo de embalagem:.....
11. Massa (kg):.....
12. Volume (m³):.....
- 13.

Estado	Combustível	Comburente	Inflamável	Explosivo	Tóxico	Putrescível
Sólido	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Líquido	não	não	não	não	não	não

(Riscar o que não interessa)

14. Informações adicionais:.....
.....
15. Local e data:.....
16. Assinatura:.....

- | | |
|--------------------|-------------------------------------|
| 17. Veículo:..... | 18. Hora: partida..... chegada..... |
| 19. Trajecto:..... | |

(A preencher pelo transportador)

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 20. Data de recolha:..... | 21. N.º de recolha:..... |
| 22. Débito de dose a 1m:..... | 23. Débito de dose ao contacto:..... |
| 24. Estado geral da embalagem:..... | |
| 25. Observações:..... | |
| 26. Assinatura:..... | |

(A preencher pela UPSR)

ANEXO D.3

**Formulário para transferência de fontes radioactivas
seladas entre Estados-Membros da União Europeia**



Transferência de Fontes Radioactivas Seladas entre Estados-Membros da União Europeia
Shipment of Sealed Sources between the Member States of the European Community
Documento Normalizado a utilizar ao abrigo do Regulamento (Euratom) n.º 1493/93 do Conselho
Standard document to be used pursuant to Council Regulation (EEC) No 1493/93

1. A Presente Declaração diz Respeito a (*this declaration concerns*):

Uma Transferência (o impresso é válido até completa realização da transferência, excepto declaração em contrário no ponto 6 / *this form is valid until the shipment is completed unless otherwise stated in box 6*)
(*one shipment*)

Várias Transferências (o impresso é válido por três anos, excepto declaração em contrário no ponto 6 / *this form is valid for three years unless otherwise stated in box 6*)
(*several shipments*)

Data prevista da transferência (*expected date of shipment*): _____

2. Destino da(s) Fonte(s) (*destination of the source(s)*):

Entidade Autorizada (*name of consignee*): _____
Pessoa a Contactar (*person to contact*): _____
Endereço (*address*): _____
Telefone: _____ Fax: _____ email: _____

3. Detentor da(s) Fonte(s) no País de Expedição (*holder of the source(s) in the forwarding country*):

Nome do Detentor (*name of holder*): _____
Pessoa a Contactar (*person to contact*): _____
Endereço (*address*): _____
Telefone: _____ Fax: _____ email: _____

4. Descrição da(s) Fonte(s) (*description of the source(s) involved in the shipment(s)*):

a) Radionuclídeos /Radionuclides						
b) Actividade máxima por fonte / maximum activity of individual source (Bq)						
c) Número de fontes / number of sources						

d) Breve descrição da máquina/dispositivo/equipamento em que a(s) fonte(s) selada(s) se encontra(m) montada(s) (se aplicável) (*if this (these) sealed source(s) is (are) mounted in (a) machinery/device/equipment, short description of the machinery/device/equipment*):

e) Indicar a norma técnica nacional ou internacional observada pela(s) fonte(s) selada(s) e número do certificado (se os dados estiverem disponíveis e as autoridades competentes o exigirem) (*indicate, if available and requested by the competent authorities: national or international technical standard with which the sealed source(s) complies(y) and certificate number; date of expiry of certification; name of the manufacturer and catalogue reference*):

5. Declaração da Entidade Autorizada ou Responsável (*declaration of the authorized or responsible person*):

- Eu, destinatário, abaixo assinado, declaro que as informações contidas no presente impresso são correctas (*I, the consignee, hereby certify that the information provided in this form is correct*).

- Eu, destinatário, abaixo assinado, declaro que me foi concedida uma licença, autorização ou que estou habilitado a receber a(s) fonte(s) descrita(s) no presente impresso (*I, the consignee, hereby certify that I am licensed, authorized or otherwise permitted to receive the source(s) described in this form*).

Número de licença, autorização ou outra habilitação (se aplicável) e respectiva data de validade: _____
(*licence, authorization or other permission number (if applicable) and validity date thereof*)

- Eu, destinatário, abaixo assinado, declaro preencher todos os requisitos nacionais relevantes, nomeadamente os relacionados com a armazenagem, utilização ou eliminação seguras da(s) fonte(s) descrita(s) no presente impresso (*I, the consignee, hereby certify that I comply with all the relevant national requirements, such as those relating to the safe storage, use or disposal of the source(s) described in this form*).

- Nome (*name*): _____ Assinatura (*signature*): _____ Data (*date*): _____

6. Confirmação da Tomada de Conhecimento desta Declaração pela Autoridade Competente do País do Destinatário:
(*confirmation by the competent authority of the consignee country that it has taken note of this declaration*)

Instituto Tecnológico e Nuclear
Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa
Estrada Nacional 10, Apartado 21, 2686-953, Sacavém, Portugal
Telefone: +351 21 994 6000
Telefax: +351 21 994 1995
Email: dprsn.secretariado@itn.pt

Assinatura e carimbo :
(*signature and stamp*)

A presente declaração é válida até (se aplicável) (*this declaration is valid until (if applicable)*): _____

Notas
O destinatário de fontes seladas deve preencher os pontos 1 a 5 e enviar o impresso à autoridade competente do seu país.
A autoridade competente do Estado-Membro do destinatário deve preencher o ponto 6 e devolver o impresso ao destinatário.
Todas as secções do presente impresso devem ser devidamente preenchidas, assinalando-se as quadriculas adequadas.
O destinatário deve então enviar o impresso ao detentor no país de expedição antes da transferência das fontes seladas.

ANEXO D.4

Termos em que deve ser redigida a declaração para transferência de fontes radioactivas, de acordo com o Anexo III do DL n.º 38/2007

Transferência de fontes radioactivas:

Identificação do detentor:
Denominação Social:
Endereço:
Telefone:
Fax:
Telex:
E-mail:
Número de Identificação de pessoa colectiva:

Localização da fonte:
Radionuclido:
Actividade nominal:
Data a que se refere a actividade:
Fornecedor:
Modelo:
Número de série:
Outras referências:

Identificação do futuro detentor:
Denominação Social:
Endereço:
Telefone:
Fax:
Telex:
E-mail:
Número de Identificação de pessoa colectiva:

Localização:
Estabelecimento:

Endereço:
Telefone:
Fax:
Telex:
E-mail:

Tipo de transporte:
Veículo:
Modelo:
Matrícula:
Responsável pela fonte:

Autorização para a instalação receptora ou meio de transporte:
Data:
Validade:
Condições (*):

Responsável pela utilização:
Nome:
Coordenadas para o contacto:
Endereço:
Telefone:
Fax:
Telex:
E-mail:

(*) Pode juntar cópia da autorização

ANEXO E

Fontes seladas presentes no ICNAS

A Tabela 8 descreve as fontes presentes no ICNAS. Estas fontes estão armazenadas na sala quente do piso -2 (unidade de produção). Por uma questão de segurança das pessoas, existe uma fonte armazenada no piso -1 (PET), para evitar movimentações da fonte e exposições desnecessárias à radiação. A tabela é apresentada na página seguinte. Depois, são apresentadas figuras com a variação da actividade das fontes enumeradas na Tabela 13, de acordo com a relação matemática do decaimento radioactivo:

$$A(t) = A(0)e^{-\lambda t} \quad (5)$$

onde $A(t)$ e $A(0)$ representam a actividade da fonte nos instantes t e 0 ; t representa o tempo e λ representa a constante de decaimento que se calcula dividindo o logaritmo neperiano de 2 pelo período de semi-desintegração ($T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$).

Tabela 13 - Lista das fontes seladas que o ICNAS possui. Lista afixada na parede antes de aceder à sala quente do piso -2.

Qt ¹	Fonte	T _{1/2}	Act ²	Data	Lote	Apresentação	Utilização Prevista	Limite de Isenção (Bq)	Local (piso)
1	²² Na	2,6 a*	100 μCi (3,7MBq)	01 Jan. 2009	1289-6	Fonte cilíndrica dentro de cofre Pb cilíndrico	Calibração do PET/CT	10 ⁶	-1
6	²² Na	2,6 a*	6×10 μCi (6×0,37MBq)	01 Jan. 2009	1321-83 Thru54	Cofre Pb com 6 fontes em forma de pastilha	Calibração do PET/CT	10 ⁶	-1
1	²² Na	2,6 a*	1mCi (37MBq)	18 Mai. 2010	05091H7	Fonte Não-Selada NaCl em água	Investigação	10 ⁶	-2
1	²² Na	2,6 a*	20 μCi (0,74MBq)	01 Ago. 2009	1289-85	Sal evaporado numa matriz de resina coberta com acrílico; Área activa f=35mm (×) l=38,1mm	Calibração do clean PEM	10 ⁶	-2
1	⁶⁸ Ge	270,8 d*	500 μCi (18,5MBq)	01 Mai. 2008	12896	Distribuído numa matriz de resina coberta com alumínio Área reactiva: 16,0cm×18,0cm	Calibração do clean PEM	10 ⁵	-2
1	⁶⁸ Ge	270,8 d*	1mCi (18,5MBq)	01 Mai. 2008	1267-62	⁶⁸ Ge/ ⁶⁸ Ga Distribuído numa matriz de Epoxi Volume activo≈1282mL (1282g)	Calibração do clean PEM	10 ⁵	-2
1	¹³⁷ Cs	30 a*	0,1mCi (3,7MBq)	01 Jan. 2009	CDRB2719 S/O 119209 pz 768	Caixa de madeira selada	Calibração do calibrador de doses	10 ⁴ (+)Equilíbrio com ¹³⁷ Ba	-2
1	¹³⁷ Cs	30 a*	0,5 μCi (18,5kBq)	01 Mai. 1993	422-95	Dentro de um cilindro transparente	Calibração	10 ⁴ (+)Equilíbrio com ¹³⁷ Ba ⁽³⁾	-2
1	¹⁵² Eu	13,54 a*	0,5 μCi (18,5kBq)	15 Abr. 1993	424-29	Dentro de um cilindro transparente	Calibração	10 ⁶	-2

¹Qt=quantidade | ²Actividade da fonte na data indicada | ³T_{1/2}(¹³⁷Ba)=| * Unidade de tempo: a = anos, d = dias

Estimativa da variação da actividade de cada fonte por lote

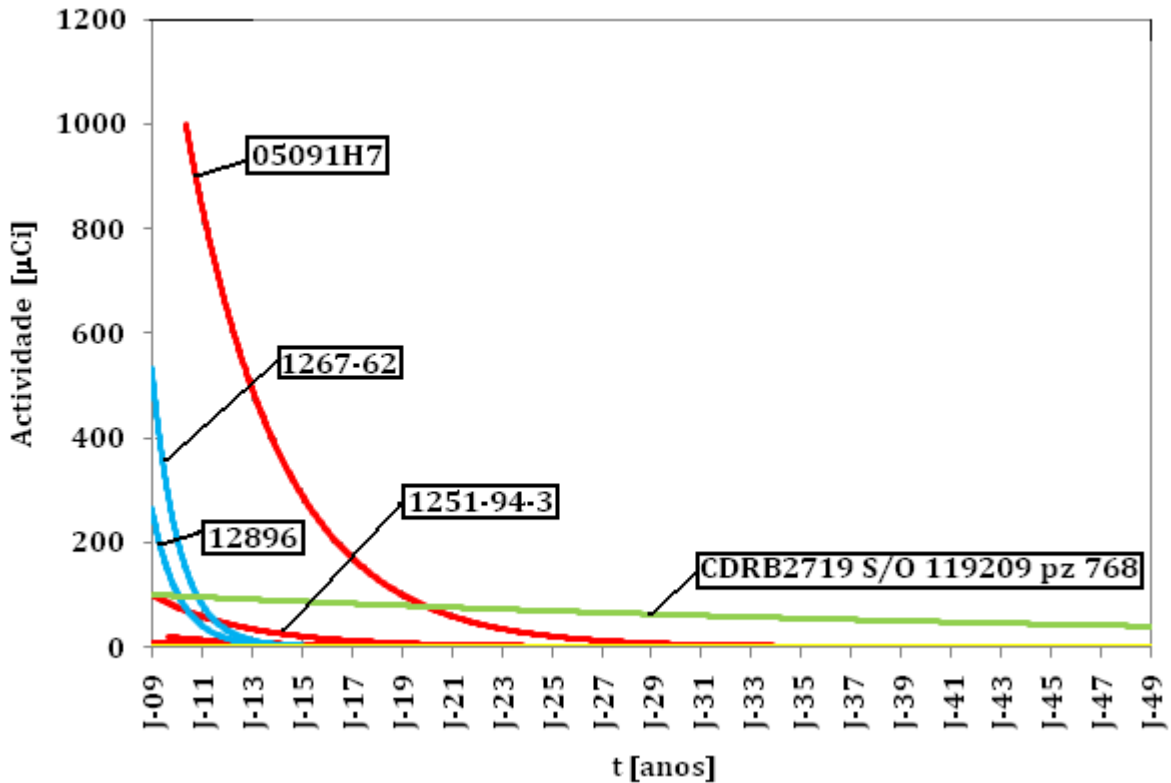
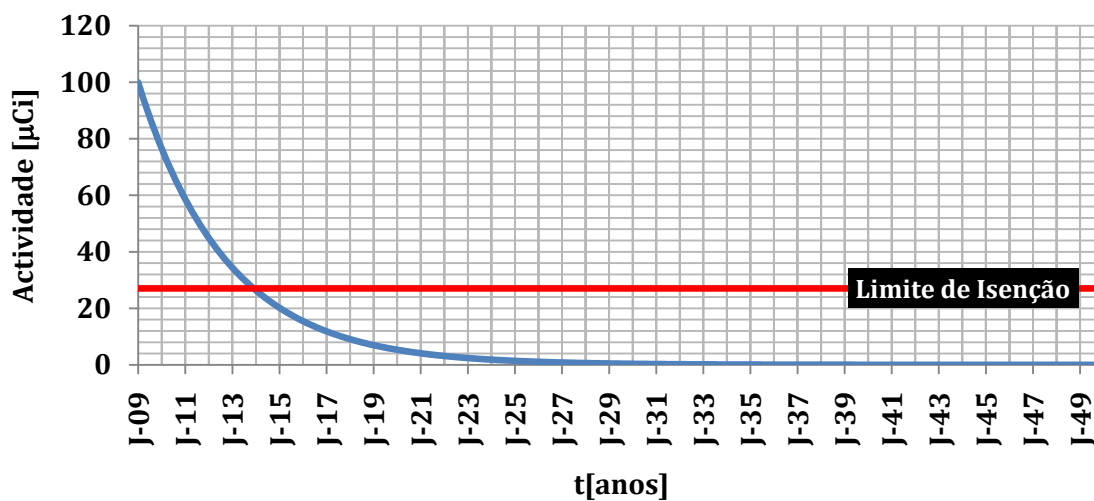
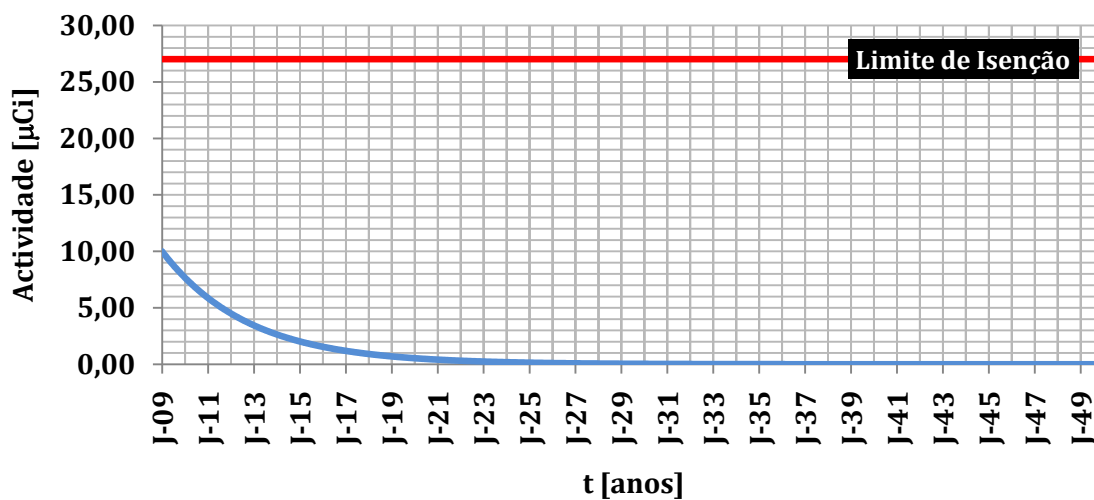


Figura 10 - Variação da Actividade das fontes seladas que o ICNAS possui, em μCi

Como se pode observar na Figura 10, a actividade da maioria das fontes é bastante reduzida, pelo que nas figuras seguintes serão apresentadas as fontes organizadas por lote. Além da curva de actividade, é ilustrado o limite de isenção legal, de acordo com o disposto no DL nº 140/2005. Os valores apresentados no eixo das abcissas, na Figura 10, referem-se ao dia 1 de Janeiro do ano que indica, sendo a origem o ano de 2009. O mesmo sucede com as figuras seguintes.

Fonte de ^{22}Na Figura 11 - Fonte de ^{22}Na | $T_{1/2}=2,6$ anos | Lote: 1251-94-36 x Fonte de ^{22}Na Figura 12 - de ^{22}Na | $T_{1/2}=2,6$ anos | Lote: 1321-83-49 Thru54

Fonte de ^{22}Na

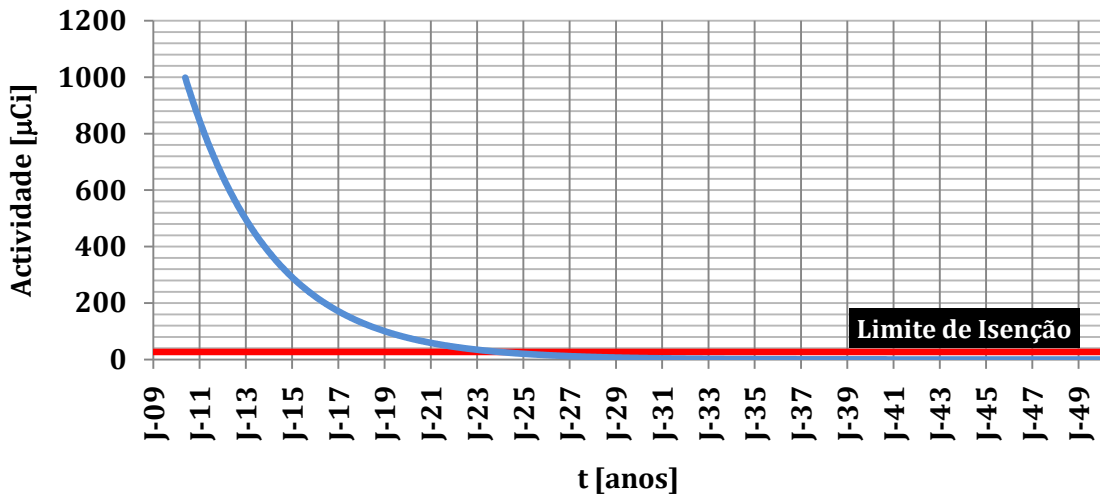


Figura 13 - Fonte de ^{22}Na | $T_{1/2}=2,6$ anos | Lote: 05091H7

Fontes de ^{22}Na

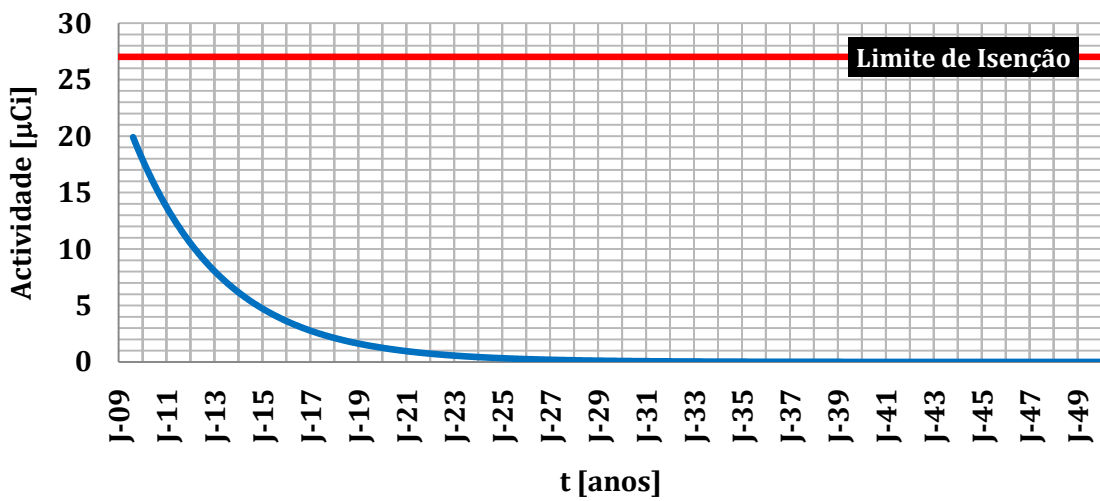
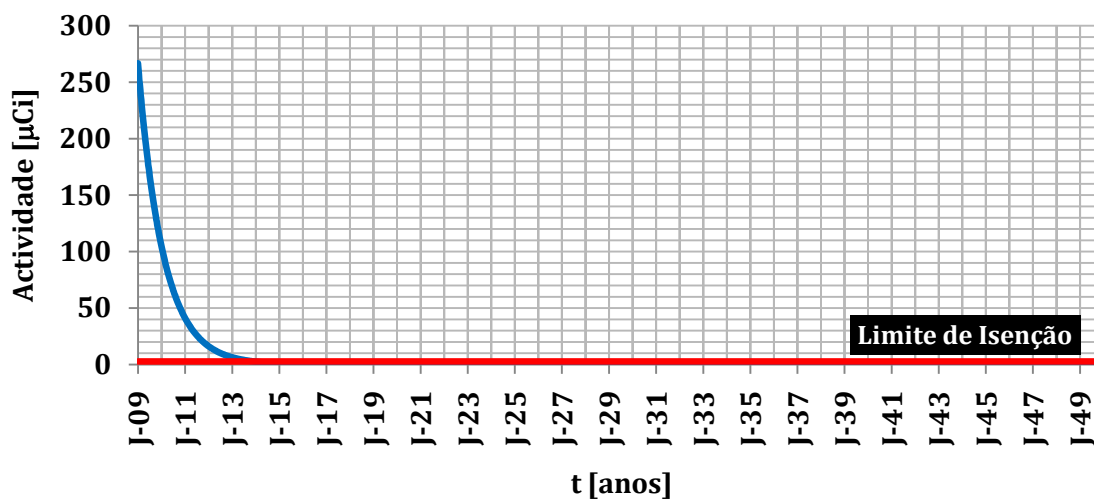
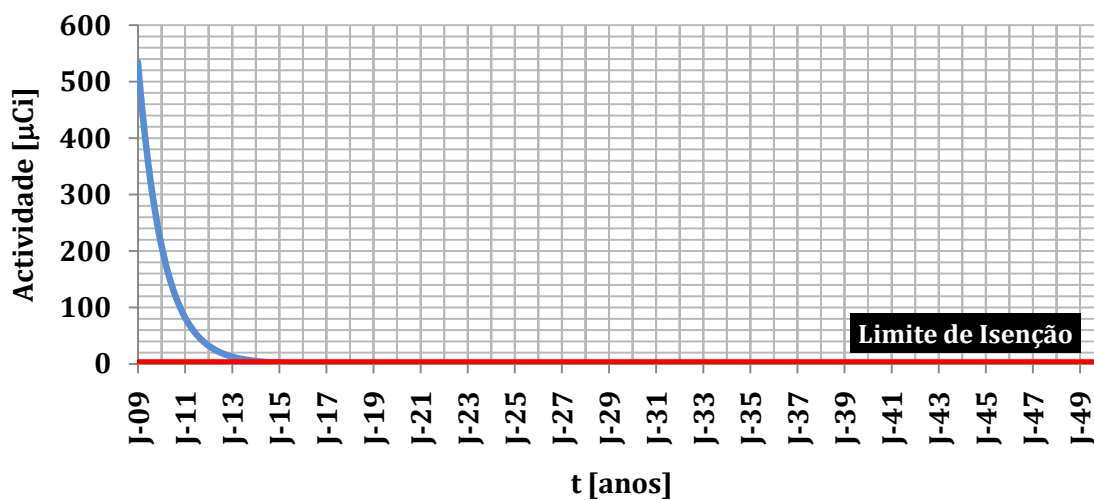


Figura 14 - Fontes de ^{22}Na | $T_{1/2}=2,6$ anos | Lote: 1289-85

Fonte de ^{68}Ge Figura 15 - Fonte de ^{68}Ge | $T_{1/2}=270,8$ dias | Lote: 12896Fonte de ^{68}Ge Figura 16 - Fonte de ^{68}Ge | $T_{1/2}=270,8$ dias | Lote: 1267-62

Fonte de ^{137}Cs

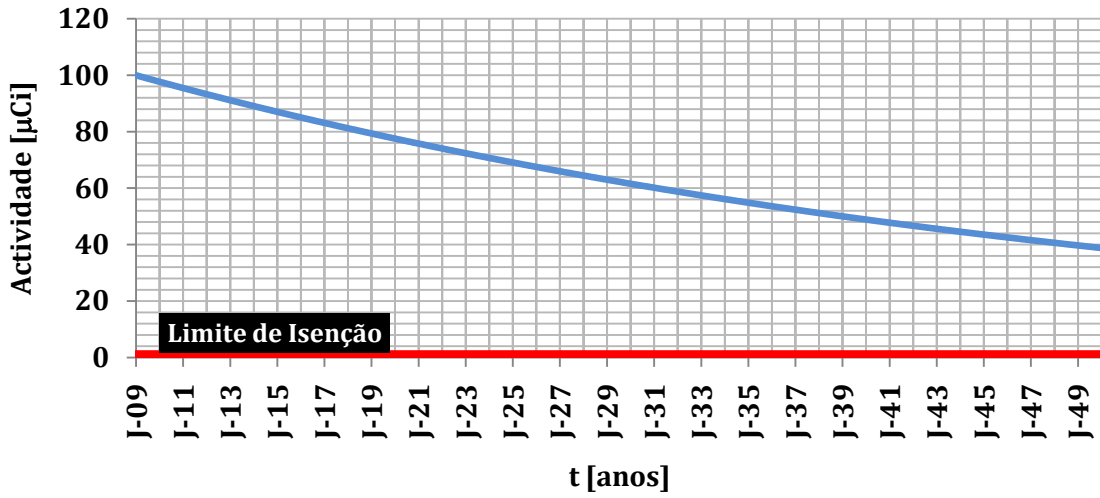


Figura 17 - Fonte de ^{137}Cs | $T_{1/2}=30$ anos | Lote: CDRB2719 S/O 119209 pz 768

Fonte de ^{137}Cs

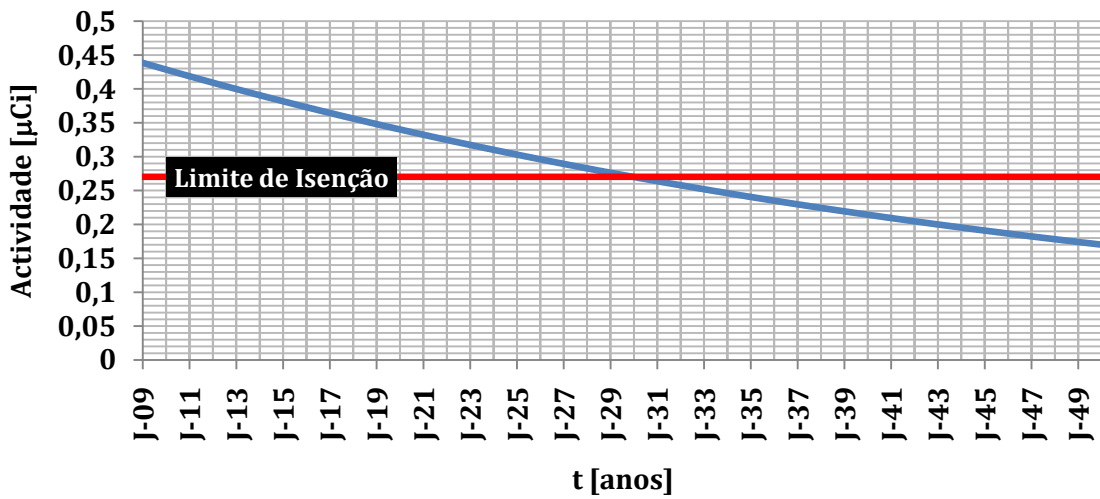


Figura 18 - Fonte de ^{137}Cs | $T_{1/2}=30$ anos | Lote: 422-95

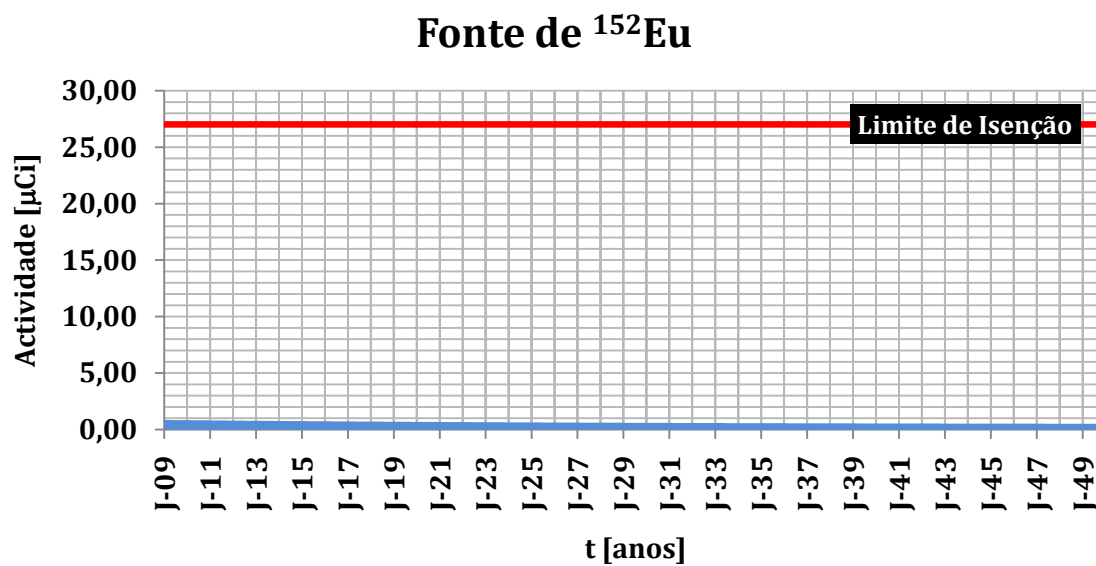


Figura 19 - Fonte de ^{152}Eu | $T_{1/2}=13,54$ anos | Lote: 424-29

Anexo F

Check-list do desmantelamento

A seguir estão os itens mínimos para se desenvolver um projecto de desmantelamento, ou a pelo menos a sua planificação. É fundamental documentar-se todos estes aspectos, para facilitar o acesso ao plano de desmantelamento. Assim, cria-se um dossier onde toda a informação pode ser consultada.

- ✓ Nomear uma equipa de trabalho capaz e responsável pelo sucesso do plano de desmantelamento.
- ✓ Levantamento de toda a legislação aplicável no desmantelamento de instalações nucleares. Também se deve fazer o levantamento das normas internacionais que podem ser aplicáveis, na falta de jurisdição nacional. Desde normas de segurança, limites de dose, procedimentos legais, gestão de resíduos, etc...
- ✓ Manter relações com as autoridades competentes na planificação do desmantelamento e na sua implementação. Manter relações estreitas também com o poder local de modo a avaliar o impacto do encerramento de uma instalação do género: tanto o impacto ambiental, como socioeconómico.
- ✓ Descrição exhaustiva das instalações, incluindo a construção e estruturas, os materiais presentes, os equipamentos e dispositivos electrónicos existentes. Além disso, deve referenciar-se eventuais alterações na construção dos edifícios, e recolher relatórios de actividade – se houve algum acidente nuclear, alguma contaminação, relatórios que verifiquem o cumprimento das normas de segurança, etc. Essencialmente deve assegurar-se que existe conhecimento adequado das instalações e da sua actividade.
- ✓ Fazer uma caracterização física e radiológica da instalações, incluindo um inventário de todo o material radioactivo presente, desde resíduos, fontes radioactivas seladas e dispositivos que produzem radiação e também a possibilidade da activação de alguns materiais, como o betão.
- ✓ Estabelecer objectivos e metas a atingir.
- ✓ Estabelecer limites e critérios de isenção e definir unidades de uso prático.
- ✓ Definir estratégias alternativas e os seus objectivos. Seleccionar uma e justificar porquê (Numa fase inicial, começar pelas alternativas).

- ✓ Identificar riscos radiológicos, químicos e biológicos, e criar sistemas de controlo destes riscos, de modo a monitorizá-los da melhor forma.
- ✓ Seleccionar metodologias e desenvolver procedimentos específicos para cada situação, e definir etapas que devem ser alcançadas.
- ✓ Definir vias de eliminação de resíduos produzidos (tanto radioactivos como não radioactivos), referindo se são necessários tratamentos prévios antes da eliminação.
- ✓ Estimar o trabalho que deve ser feito, incluindo uma estimativa de toda a logística necessária, como o material de radioprotecção, contentores, material de descontaminação, etc.
- ✓ Verificar os recursos que possui a instituição, fazer uma estimativa de custos, e propor meios para garantir o financiamento do projecto.
- ✓ Criar um sistema de garantia de qualidade, de modo a assegurar que o plano de desmantelamento seja bem sucedido.
- ✓ Identificar potenciais problemas que possam surgir e propor uma solução.
- ✓ Assegurar que os registos são feitos, em todos os domínios do desmantelamento, e sejam salvaguardados.
- ✓ Pedir a aprovação dos órgãos reguladores.
- ✓ Arquivar os registos e manter actualizado o plano de desmantelamento. Mesmo depois de se concluir o processo de desmantelamento, a planificação e todos os dados devem ser arquivados, não por uma questão de controlo, mas também para a partilha de experiências.
- ✓ Posteriormente ao desmantelamento, pedir a remoção do controlo regulamentar.

Referências Bibliográficas

- [Alv08] ALVES, Francisco J. C.. O ciclotrão e a produção de radionuclídeos. *In* J.J. Pedroso de Lima. *Física em Medicina Nuclear: Temas e aplicações*, capítulo 2. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1ª Edição, 2008.
- [Alv12] ALVES, Francisco J. C.. Comunicação Privada, 23 de Março 2012.
- [CE12] Comissão Europeia, Aplicação do Direito da União Europeia – Directivas. Disponível na Internet a 1 de Junho de 2012 em: http://ec.europa.eu/eu_law/directives/directives_pt.htm.
- [Cun10] CUNHA, Micaela. *Radiobiology with Proton Cyclotron Beams: A Viability Study*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2010.
- [DOE93] U.S. Department of Energy, “Nuclear Physics and Reactor Theory”, Volume 1 de 2, DOE-HDBK-1019/1-93, DOE, Washington, D.C. (1993)).
- [Ham06] HAMILTON, Dr. David. *Neutron Interactions with Matter*. EU – Joint Research Center, 8th Multi-Media Training Course with Nuclides.net, 14/09/2006.
- [HPM] HPM®: Hamilton Precision Metals. Havar®. Disponível em <http://www.hpmetals.com/pdfs/Havar.pdf>
- [IAEA00a] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Management of radioactive waste from the use of radionuclides in medicine”, IAEA-TECDOC-1183, IAEA, Viena (2000).
- [IAEA00b] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Handling, conditioning and storage of spent sealed radioactive sources”, IAEA-TECDOC-1145, IAEA, Viena (2000).
- [IAEA00c] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Regulations for the safe transport of radioactive material”, Safety Standard Series No TS-R-1, IAEA, Viena (2000).
- [IAEA01] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Categorization of radiation sources”, IAEA-TECDOC-1191, IAEA, Viena (2001).
- [IAEA03] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities”, Technical Report Series No. 414, IAEA, Viena (2003).

Referências Bibliográficas

- [IAEA04] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Planning, Managing and Organizing the Decommissioning of Nuclear Facilities: Lessons Learned”, IAEA-TECDOC-1394, IAEA, Viena (2004).
- [IAEA05] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Financial aspects of decommissioning”, IAEA-TECDOC-1476, IAEA, Viena (2005).
- [IAEA06] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Decommissioning of Research Reactors: Evolution, State of the Art, Open Issues”, Technical Report Series No. 446, IAEA, Viena (2006).
- [IAEA08] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Decommissioning of Research reactors and other Small Facilities by Making Optimal use of Available Resources”, Technical Report Series No. 463, IAEA, Viena (2008).
- [IAEA98] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Management of radioactive waste from ⁹⁹Mo production”, IAEA-TECDOC-1051, IAEA, Viena (1998).
- [IAEA99] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities”, Safety Standard Series No. WS-G 2.2, IAEA, Viena (1999).
- [IAEA94] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Classification of radioactive waste: A safety guide”, Safety Series No. 111-G-1.1, IAEA, Viena (1994).
- [JOCE89] Directiva 89/618/EURATOM do Conselho de 27 de Novembro de 1989, Jornal Oficial das Comunidades Europeias N.º L 351/31 de 7 de Dezembro de 1989.
- [JOCE96] Directiva 96/29/EURATOM do Conselho de 13 de Maio de 1996, Jornal Oficial das Comunidades Europeias N.º L 159/1 de 29 Junho de 1996.
- [Perr60] PERRIN, François *et al.* *Génie Atomique* – Tome Premier. Presses Universitaires de France, 1ª edição, Paris, 1960.
- [RJE12a] Rede Judiciária Europeia em matéria civil e comercial, Ordem Jurídica – Portugal. Disponível na Internet a 31 de Maio de 2012 em: http://ec.europa.eu/civiljustice/legal_order/legal_order_gen_pt.htm.
- [RJE12b] Rede Judiciária Europeia em matéria civil e comercial, Ordem Jurídica – Direito Comunitário. Disponível na Internet a 1 de Junho de 2012 em: http://ec.europa.eu/civiljustice/legal_order/legal_order_ec_pt.htm.