



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

GESTÃO DE FONTES RADIOATIVAS SELADAS DESCARTADAS

ROBERTO VICENTE

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações.**

**Orientador:
Dr. Gian-Maria A.A. Sordi**

**São Paulo
2002**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

GESTÃO DE FONTES RADIOATIVAS
SELADAS DESCARTADAS

ROBERTO VICENTE



**Tese apresentada como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de Doutor em Ciências
na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações.**

Orientador:
Dr. Gian-Maria A. A. Sordi

São Paulo
2002

À minha mulher e
aos meus filhos

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Gian-Maria A. A. Sordi, pela orientação.

Ao Dr. Goro Hiromoto, pela orientação na fase inicial.

Aos amigos e colegas José Claudio Dellamano e Luis Efrain Torres de Miranda pelas discussões que motivaram e ajudaram a realização deste trabalho.

Aos colegas do IPEN, pela colaboração.

À Rialma, ao Roberto e ao Rafael pelo carinho e apoio.

GESTÃO DE FONTES RADIOATIVAS SELADAS DESCARTADAS

Roberto Vicente

RESUMO

Há no Brasil, atualmente, centenas de milhares de fontes radioativas seladas em uso na indústria, na medicina, na pesquisa científica e em outras aplicações. Uma parcela significativa dessas fontes, ao ser retirada de serviço, é recolhida como rejeito radioativo e armazenada em depósitos intermediários, aguardando a decisão sobre sua deposição final. Falta, porém, nos países em desenvolvimento, uma tecnologia de deposição segura e economicamente viável. A tese defendida neste trabalho é um conceito de repositório de construção simples e barata e que atenda aos requisitos de segurança radiológica estabelecidos pelos organismos internacionais. O conceito desenvolvido é a deposição resgatável das fontes em um repositório profundo, próprio e exclusivo, desenhado segundo o conceito de barreiras múltiplas e construído com tecnologia disponível no país.

MANAGEMENT OF SPENT RADIATION SOURCES

Roberto Vicente

ABSTRACT

The number of sealed radiation sources used in industrial, medical, and research applications in Brazil amounts to hundreds of thousands. Spent or disused sources are being collected and stored as radioactive waste in nuclear research centers, awaiting for a decision on their final disposal. However, a safe and economically feasible disposal technology is unavailable. The aim of this research is to develop the concept of a repository and a treatment process that will allow the final disposal of all the spent sealed sources in a safe, dedicated, and exclusive repository. The concept of the disposal system is a deep borehole in stable geologic media, meeting the radiological performance standards and safety requirements set by international organizations.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Aspectos radio sanitários das fontes seladas	2
1.2 Aspectos da gestão das fontes descartadas como rejeito	3
1.3 Finalidade do presente trabalho	5
1.4 Objetivos do presente trabalho	6
2. DIMENSÃO DO PROBLEMA	8
2.1 Descrição das fontes seladas	8
2.2 Inventário das fontes seladas no Brasil	9
2.3 Tendências do mercado	13
3. DESTINAÇÃO DAS FONTES RETIRADAS DE SERVIÇO	16
3.1 Alternativas de reemprego	16
3.1.1 Retorno para o fornecedor	16
3.1.2 Redução, reutilização e reciclagem	17
3.2 Alternativas de deposição como rejeito radioativo	18
3.2.1 Práticas correntes	19
3.2.2 Repositórios candidatos	20
3.3 Avaliação das alternativas correntes	25
4. CLASSIFICAÇÃO DO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE FONTES	28
4.1 Introdução ao desenvolvimento dos critérios de seleção	32
4.2 Contexto de avaliação	33
4.3 Descrição do sistema de deposição superficial	37
4.4 Desenvolvimento e justificação dos cenários	38
4.5 Formulação e implementação dos modelos	40
4.6 Execução dos cálculos e resultados	43
4.7 Derivação dos critérios quantitativos de seleção	50
5. PROPOSTA DE GESTÃO DAS FONTES SELADAS NO BRASIL	59
5.1 Repositório exclusivo para as fontes seladas	59
5.2 Embalagem de deposição	65
5.3 Processo de tratamento das fontes	66
5.4 Instalações de superfície	68

6.	ANÁLISE E DISCUSSÃO	71
6.1	Estratégia de gestão das fontes seladas	71
6.2	Análise comparativa com o similar	73
6.3	Aspectos técnicos, econômicos e de segurança radiológica	75
6.3.1	Análise técnica e econômica	75
6.3.1.1	Capacidade para atender à demanda	76
6.3.1.2	Disponibilidade de tecnologia	77
6.3.1.3	Custo de implantação e operação	77
6.3.2	Viabilidade no aspecto de segurança radiológica	81
7.	CONCLUSÕES	95
8.	SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS	97
	APÊNDICE	100
	ANEXO	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1 – Radionuclídeos, geometrias, dimensões e materiais de construção de algumas fontes radioativas seladas do inventário brasileiro	10
Tabela 2.2 – Resumo do inventário de fontes seladas no Brasil	12
Tabela 2.3 – Aplicações correntes das fontes seladas e tendências do mercado mundial	14
Tabela 4.1 – Correspondência entre probabilidade de ocorrência de exposições potenciais e doses máximas admissíveis	36
Tabela 4.2 – Atividade máxima das fontes que podem ser depositadas em um repositório de superfície, pelo Cenário 1	51
Tabela 4.3 – Atividade máxima das fontes que podem ser depositadas em um repositório de superfície, pelo Cenário 2	52
Tabela 4.4 – Atividade máxima das fontes que podem ser depositadas em um repositório de superfície, pelo Cenário 3	53
Tabela 4.5 – Atividade máxima das fontes que podem ser depositadas em um repositório de superfície, pelo Cenário 4	54
Tabela 4.6 – Fontes seladas do inventário brasileiro que devem ser depositadas em um repositório profundo, de acordo com o cenário 1	55
Tabela 4.7 – Fontes seladas do inventário brasileiro que devem ser depositadas em um repositório profundo, de acordo com o cenário 2	56
Tabela 4.8 – Fontes seladas do inventário brasileiro que devem ser depositadas em um repositório profundo, de acordo com o cenário 3	57
Tabela 4.9 – Fontes seladas do inventário brasileiro que devem ser depositadas em um repositório profundo, de acordo com o cenário 4	58
Tabela A.1 – Meia-vida dos radionuclídeos contidos nas fontes do inventário brasileiro	101
Tabela A.2 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{60}Co	102
Tabela A.3 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{85}Kr	103
Tabela A.4 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{90}Sr	104
Tabela A.5 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{137}Cs	105
Tabela A.6 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{226}Ra	106
Tabela A.7 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{241}Am	107
Tabela A.8 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de $^{241}\text{Am-Be}$	108
Tabela A.9 – Fontes típicas incluídas no inventário de outras fontes com meia-vida superior a 87 anos	109
Tabela A.10 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes com meia-vida inferior a 18 anos – grupo 1	110
Tabela A.11 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes com meia-vida inferior a 18 anos – grupo 2	111
Tabela A.12 – Resumo do inventário de fontes seladas no Brasil	112

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 – Atividades do inventário de fontes seladas no Brasil	11
Figura 3.1 – Instalações típicas para deposição de fontes que estão sendo utilizadas em alguns países	19
Figura 3.2 – Fontes seladas descartadas em armazenamento temporário no IPEN	20
Figura 3.3 – Modelo de repositório de superfície com barreiras artificiais para rejeitos de atividade baixa e média, baseado no repositório espanhol de El Cabril	22
Figura 3.4 – Desenho esquemático do repositório de Yucca Mountain, nos EUA, destinados aos rejeitos do final do ciclo, que poderá receber as fontes seladas descartadas americanas	23
Figura 3.5 – Conceito dos repositórios sul-africanos de Vaalputs e Pelindaba, para deposição de fontes seladas	24
Figura 3.6 – Projeto do repositório sul-africano para fontes seladas. Detalhes do método de deposição	25
Figura 3.7 – Diagrama lógico da sequência de escolhas para a destinação das fontes seladas	27
Figura 4.1 – Dose potencial por exposição durante 1 hora, a 1 metro das fontes, após 100 anos de decaimento	44
Figura 4.2 – Dose potencial por exposição durante 1 hora, a 1 metro das fontes, após 200 anos de decaimento	44
Figura 4.3 – Dose potencial por exposição durante 1 hora, a 1 metro das fontes, após 300 anos de decaimento	45
Figura 4.4 – Dose potencial por exposição durante 8 horas, a 5 centímetros das fontes, após 100 anos de decaimento	45
Figura 4.5 – Dose potencial por exposição durante 8 horas, a 5 centímetros das fontes, após 200 anos de decaimento	46
Figura 4.6 – Dose potencial por exposição durante 8 horas, a 5 centímetros das fontes, após 300 anos de decaimento	46
Figura 4.7 – Dose potencial da ingestão da atividade presente nas fontes após 100 anos de decaimento	47
Figura 4.8 – Dose potencial da ingestão da atividade presente nas fontes após 200 anos de decaimento	47
Figura 4.9 – Dose potencial da ingestão da atividade presente nas fontes após 300 anos de decaimento	48
Figura 4.10 – Dose potencial da inalação da atividade presente nas fontes após 100 anos de decaimento	48
Figura 4.11 – Dose potencial da inalação da atividade presente nas fontes após 200 anos de decaimento	49

Figura 4.12 – Dose potencial da inalação da atividade presente nas fontes após 300 anos de decaimento	49
Figura 5.1 – Conceito do repositório profundo, exclusivo para as fontes seladas ..	60
Figura 5.2 – Diagrama ilustrativo do repositório	61
Figura 5.3 – Vista em corte do poço e do revestimento	63
Figura 5.4 – Diagrama ilustrativo do método de cimentação do poço	64
Figura 5.5 – Detalhe do método de deposição das fontes no repositório	64
Figura 5.6 – Detalhes da embalagem para deposição das fontes	66
Figura 5.7 – Processo de tratamento das fontes seladas descartadas como rejeito .	67
Figura 5.8 – Croqui do arranjo geral das instalações de superfície	69
Figura A.1 – Inventário de fontes de ^{60}Co	102
Figura A.2 – Inventário de fontes de ^{85}Kr	103
Figura A.3 – Inventário de fontes de ^{90}Sr	104
Figura A.4 – Inventário de fontes de ^{137}Cs	105
Figura A.5 – Inventário de fontes de ^{226}Ra	106
Figura A.6 – Inventário de fontes de ^{241}Am	107
Figura A.7 – Inventário de fontes de $^{241}\text{Am-Be}$	108
Figura A.8 – Inventário de outras fontes, com meia vida superior a 87 anos	109
Figura A.9 – Inventário de outras fontes, com meia-vida inferior a 18 anos – grupo 1..	110
Figura A.10 – Inventário de outras fontes, com meia-vida inferior a 18 anos – grupo 2..	111
Figura A.11 – Atividade presente do inventário das fontes seladas no Brasil	112
Figura A.12 – Inventário das fontes seladas, após decaimento de 100 anos	113
Figura A.13 – Inventário das fontes seladas, após decaimento de 200 anos	113
Figura A.14 – Inventário das fontes seladas, após decaimento de 300 anos	113

1. INTRODUÇÃO

As fontes radioativas seladas são dispositivos de grande valor em diversas aplicações industriais, médicas, de pesquisa e até mesmo em produtos de consumo, e, por isso, a sua utilização continua a crescer em todo o mundo.

Contudo, as fontes seladas típicas são objetos pequenos e reluzentes, facilmente confundidos com peças de maquinaria, que podem representar um grande risco para pessoas desinformadas sobre a natureza e a intensidade do perigo que carregam. Embora sejam raros os acidentes radiológicos que, ao longo das últimas décadas, envolveram fontes seladas, vários deles provocaram prejuízos materiais de grande monta e resultaram em quase duas dezenas de casos fatais entre os indivíduos expostos.

Esses dispositivos têm uma vida útil que varia de poucos anos até algumas dezenas de anos e, em quase todos os casos, ainda têm radioatividade suficiente para causar efeitos nocivos à saúde quando retirados de serviço. Ao serem descartados, tornam-se rejeito radioativo que precisa de gestão especializada.

Nos países em desenvolvimento, sem infra-estrutura adequada de segurança radiológica, não há, ainda, uma destinação definitiva segura para essas fontes, o que tem motivado o Organismo Internacional de Energia Atômica (OIEA) a montar equipes de especialistas com a missão de salvaguardar as fontes já retiradas de serviço em diversos países africanos, asiáticos e latino-americanos. Destaque-se que as missões realizadas nesses últimos têm contado com a ajuda de especialistas do Brasil, (IAEA, 1998a). Contudo, mesmo nos EUA, país líder em tecnologia nuclear, faltava até recentemente, a solução para a deposição¹ definitiva de alguns tipos de fontes seladas, (USDOE, 1995). Na Europa, igualmente, a maioria dos países ainda carece de instalações para deposição e tem, como única opção, o armazenamento temporário das fontes (WELLS et al., 2001)

¹ A palavra deposição é empregada nos regulamentos da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) com a mesma acepção que a palavra disposição tem na literatura técnica, tanto da área nuclear como das demais, ou seja, a colocação ou o depósito de resíduos em locais determinados do ambiente. Enquanto não é unificada a nomenclatura utiliza-se o termo empregado pela CNEN.

Esses dois aspectos das fontes radioativas seladas retiradas de serviço, sua importância radio sanitária, ao lado da falta de uma opção de destino seguro como rejeito radioativo, são o objeto deste estudo.

1.1 – Aspectos radio sanitários das fontes seladas

As fontes radioativas seladas estão envolvidas em grande parte dos acidentes radiológicos ocorridos nas últimas décadas. O acidente de Goiânia (IAEA, 1988) é o mais conhecido, pois teve grande repercussão nos meios de comunicação, mas dezenas de outros têm ocorrido, com impactos variados no meio ambiente e na saúde das pessoas afetadas.

Estimativas sobre a frequência de extravio intencional ou acidental de fontes seladas variam entre diferentes metodologias de levantamento de dados. Entre 1960 e 1991 (IAEA, 1991), o OIEA contabilizou mais de 100 acidentes com irradiação significativa de indivíduos do público, os quais resultaram na morte de 19 pessoas. BELLIAN e JOHNSTON (1995) relatam entre 1983 e 1993, 299 ocorrências envolvendo fontes seladas que foram encontradas em sucata metálica destinada aos fornos de fundição. LUBENAU e YUSKO (1995) informam que, nesse mesmo período, ocorreram 35 casos de contaminação de sucata que foram detectados somente depois da fundição ou da fabricação e distribuição do produto contaminado e que cerca de 300 outros acidentes foram evitados pela detecção das fontes antes que a sucata fosse carregada nos fornos. As estimativas de KELLY (1997) são de que cerca de 200 fontes e aparelhos contendo fontes radioativas são perdidos, roubados ou abandonados nos EUA, a cada ano, tornando-se potencialmente perigosos para irradiar indivíduos do público. Há um relatório na Internet, atualizado diariamente, que informa as ocorrências que envolvem fontes seladas nos EUA (USNRC, 1999; USNRC, 2002). Na República da Geórgia, ex União Soviética, cerca de 300 fontes extraviadas foram encontradas na última década, algumas delas, após terem irradiado gravemente pessoas do público, motivando a formação de grupos internacionais de especialistas para auxiliar na busca e recuperação de outras que possam ainda estar perdidas (IAEA, 2002).

Além da exposição de pessoas, os prejuízos materiais causados pelos acidentes com fontes seladas são, frequentemente, muito elevados. Em 14 acidentes ocorridos entre 1983 e 1993, relatados por BELLIAN (1993), em que fontes seladas foram fundidas

acidentalmente junto com sucata metálica, os custos de descontaminação das fundições variaram entre US\$ 50 mil e US\$ 2 milhões, sem contar a perda de materiais e equipamentos, a parada na produção industrial e a deposição dos rejeitos radioativos gerados durante a intervenção nos acidentes.

Em vários desses acidentes, o extravio das fontes ocorreu depois das fontes terem sido retiradas de serviço e até mesmo depois de terem sido recolhidas e armazenadas como rejeito radioativo (KIVISÄKK, 1995).

1.2 – Aspectos da gestão das fontes descartadas como rejeito

A deposição dos rejeitos radioativos tem sido um foco de atenção da sociedade, tanto nos países com programas nucleares avançados como naqueles que somente utilizam materiais radioativos na indústria, na medicina e em outras aplicações tecnológicas.

Parte da preocupação vem da percepção do risco que os rejeitos representam, e outra parte decorre do reconhecimento de que uma fração desses rejeitos contém radionuclídeos com meia-vida que ultrapassa, em muito, o espaço de tempo de uma geração e pode continuar apresentando riscos radiológicos significativos em um futuro distante.

Algumas questões levantadas frequentemente sobre a gestão dos rejeitos radioativos enfatizam estes pontos: O grau de segurança alcançado na gestão dos rejeitos radioativos é suficientemente seguro? Estamos fazendo o necessário para proteger adequadamente as gerações futuras e preservar o ambiente? Estamos fazendo o necessário para não deixar encargos indevidos às gerações futuras?

Para responder afirmativamente a essas perguntas não bastam as considerações de natureza técnica e econômica, necessárias para demonstrar a viabilidade das alternativas de deposição final dos rejeitos. Princípios éticos estão envolvidos e precisam ser considerados adequadamente para construir um corpo consistente de fundamentos que viabilize a tecnologia nuclear e contribua também para que o público reconheça-a como alternativa viável.

Essa base ética necessária à gestão dos rejeitos radioativos está expressa em diversos documentos que traduzem os acordos e as convenções internacionais estabelecidos com o objetivo de alcançar e manter padrões elevados de segurança para a saúde humana e para o meio ambiente.

Dois desses documentos são especialmente relevantes para a gestão das fontes seladas retiradas de serviço e descartadas como rejeito radioativo. O primeiro é o livro da Série de Segurança do OIEA, “Princípios de Gestão dos Rejeitos Radioativos” (IAEA, 1995), que expressa seu objetivo como um conjunto de princípios filosóficos que propiciem uma base comum sobre a qual desenvolver padrões internacionais de segurança. Dois desses princípios que precisam ser invocados são: proteger a saúde das gerações futuras adequadamente e não deixar-lhes encargos indevidos.

Outro documento é a “Convenção Conjunta sobre a Segurança da Gestão do Combustível Nuclear Queimado e sobre a Segurança da Gestão dos Rejeitos Radioativos” (IAEA, 1997a), em que os signatários reafirmam a importância da comunidade internacional para assegurar que práticas saudáveis sejam planejadas e implementadas. Em um dos artigos, recomenda-se que os signatários da Convenção permitam, sob o amparo de suas leis nacionais, o retorno das fontes seladas postas fora de uso, nos países em desenvolvimento, para os fabricantes nos países desenvolvidos. Como meio de implementar essa disposição, tem sido incentivado o aluguel, em lugar da venda, dos equipamentos que empregam fontes seladas, de modo que, depois de utilizadas, as fontes voltem para os países capacitados a gerenciá-las com segurança.

As fontes descartadas formam uma classe de rejeitos que, apesar de ser ubíqua no mundo todo, tem sido, até certo ponto, negligenciada no âmbito da gestão dos rejeitos radioativos. Enquanto, há décadas, estão sendo experimentadas e desenvolvidas as tecnologias para a deposição dos rejeitos produzidos na operação do ciclo do combustível nuclear, as fontes seladas começaram a ser objeto de preocupação há menos de uma década somente.

Por isso, a deposição das fontes está parcialmente indefinida até em alguns países desenvolvidos no setor nuclear e na gestão dos rejeitos radioativos. O plano estratégico de gestão dos rejeitos radioativos dos EUA de 1990, por exemplo, propunha a deposição das

fontes junto com elementos combustíveis queimados e outros rejeitos de atividade alta, para remediar a falta de alternativas específicas (EG&G, 1990). Até onde se pode depreender da literatura consultada, é o que vigora até o momento.

No início da década passada, o OIEA, reconhecendo a dimensão do problema das fontes seladas postas fora de uso, iniciou um programa para dar assistência aos países em desenvolvimento em seus esforços para evitar as situações que poderiam resultar em acidentes radiológicos (PETTERSSON, 1992).

O OIEA propôs que as fontes fossem guardadas por algumas décadas em armazéns centralizados nos países de origem e, depois, transferidas para os países desenvolvidos e depositadas nos repositórios para rejeitos radioativos de atividade alta, quando estes estiverem operacionais (IAEA, 1991).

Mesmo considerando que repositórios profundos estejam disponíveis num horizonte de poucas décadas nos países desenvolvidos, não se pode deixar de notar que existe grande oposição pública a eles. A partir disso, é fácil prever que a transferência dos rejeitos radioativos de vários países, para deposição nesses repositórios, enfrentará dificuldades talvez intransponíveis. A síndrome de “NIMBY” (abreviação da expressão inglesa “*not in my backyard*” – não no meu quintal), que torna a transferência de rejeitos, de uma unidade geográfica para outra, dentro de um mesmo país, um problema intratável, certamente será mais acentuada em relação à importação de rejeitos radioativos de outros países.

Portanto, para salvaguardar as futuras gerações e para que os encargos relativos à manutenção de sua segurança não lhes sejam deixados de herança, a deposição segura imediata das fontes descartadas como rejeito radioativo nos próprios países usuários das fontes é uma alternativa que precisa ser buscada.

1.3 – Finalidade do presente trabalho

Propor um novo processo de gestão dos rejeitos radioativos constituído por fontes seladas descartadas que inclua a deposição final imediata em um repositório próprio e exclusivo no Brasil.

1.4 – Objetivos do presente trabalho

Para alcançar a finalidade proposta no item 1.3, deve-se obter êxito numa quantidade apreciável de objetivos, que estão enumerados a seguir, e que serão desenvolvidos nos vários capítulos do presente trabalho.

1. Estabelecer critérios para incluir diferentes tipos de fontes radioativas no inventário de fontes seladas do país.
2. Avaliar e analisar o conjunto de fontes existentes no país que obedecem aos critérios do objetivo 1.
3. Avaliar a taxa de reposição das fontes para estimar a extensão que o problema assumirá no futuro próximo.
4. Estudar as alternativas de destinação das fontes retiradas de serviço.
5. Estudar alternativas de deposição dos rejeitos radioativos e avaliar a viabilidade dessas alternativas para a deposição das fontes seladas.
6. Desenvolver critérios de seleção para definir quais fontes podem ser depositadas em repositórios de superfície e quais fontes necessitam de repositórios profundos para sua deposição segura. Esse desenvolvimento é original.
7. Formular cenários e implementar modelos matemáticos para o cálculo das doses resultantes da exposição acidental de indivíduos, após cessado o período de controle institucional em repositórios de superfície e utilizá-los no desenvolvimento dos critérios de seleção do objetivo 6. Na sua base conceitual, essa parte do trabalho é original.
8. Realizar os cálculos de atividade que forneçam os limiares de exclusão das fontes nos repositórios superficiais.
9. Descrever um conceito de repositório profundo, dedicado e exclusivo para as fontes seladas. Parte do conceito de repositório desenvolvido neste trabalho é original.
10. Descrever o processo de tratamento das fontes seladas, antes de sua deposição.
11. Descrever a embalagem de deposição das fontes. Original na sua concepção.
12. Descrever sucintamente as instalações de superfície, necessárias para execução de um programa de gestão das fontes seladas, que inclua a deposição em um repositório como o descrito neste trabalho.

13. Avaliar a eficácia da deposição das fontes seladas em um repositório próprio e exclusivo, em comparação com a alternativa de gestão das fontes juntamente com outros rejeitos radioativos.
14. Efetuar uma análise comparativa do conceito de repositório apresentado neste trabalho com um conceito similar. Original.
15. Avaliar a viabilidade do repositório sugerido, do ponto de vista técnico, econômico e de desempenho de segurança radiológica. Original.

2. DIMENSÃO DO PROBLEMA

O inventário de fontes seladas do país é determinante para a escolha do processo de gestão e da tecnologia de deposição desse rejeito radioativo. É a dimensão desse inventário que define a escala do empreendimento. Além disso, é importante estimar a extensão que o problema assumirá no futuro, ou seja, é necessário avaliar se a taxa de reposição das fontes tenderá a manter-se nos valores atuais, tenderá a desaparecer, pela concorrência de outras tecnologias, ou a crescer, aumentando a demanda pelo serviço de tratamento desse rejeito.

Avaliar o número de fontes seladas existentes atualmente no Brasil é o objetivo deste capítulo. Antes, porém, é necessário descrevê-las e estabelecer os critérios para inclusão de diferentes tipos de fontes radioativas no rol das fontes seladas objeto do presente estudo.

2.1 – Descrição das fontes seladas

As várias definições oficiais de fonte radioativa selada são conflitantes. O OIEA, o Instituto Nacional Americano de Padronização, o Departamento de Energia e a Comissão Reguladora Nuclear dos EUA são órgãos que definem fontes seladas de formas diversas. A proposta de definição das fontes seladas feita por LEE e SHINGLETON, (1996), com a intenção de excluir ambigüidades, não coincide também com as definições mencionadas anteriormente. A Comissão Nacional de Energia Nuclear do Brasil (CNEN), em seus regulamentos, utiliza os termos “fonte selada” e “fonte não selada” para classificar instalações radiativas sujeitas a licenciamento, sem porém, definir o que sejam uma e outra (CNEN, 1984). De forma genérica, fonte radioativa selada é o material radioativo encapsulado ou aderido fortemente em material não radioativo, capaz de prevenir a perda ou dispersão do material radioativo sob as condições mais graves que possam ocorrer em situação normal de uso. Outros materiais radioativos são considerados fontes não seladas.

A fabricação das fontes é padronizada (ISO, 1980; ISO, 1992; ISO, 1994; NBS, 1978), mas há grande variedade nas dimensões, na geometria de construção, nos materiais de encapsulamento e nos radionuclídeos utilizados. Tipicamente, uma fonte selada é um

recipiente metálico, com dimensões de poucos centímetros, lacrado por uma tampa soldada, que encerra a substância radioativa. Na tabela 2.1, são apresentados alguns exemplos de fontes seladas do inventário brasileiro. Os modelos apresentados são exemplos de configurações típicas, desenhados com base no catálogo de um fabricante (AMERSHAM, 1996).

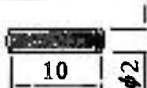
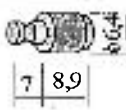
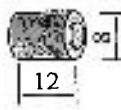
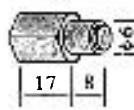
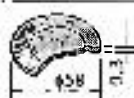
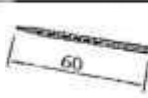
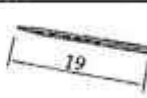
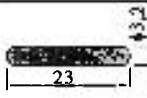
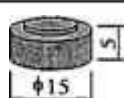
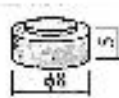
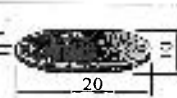
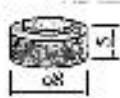
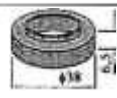
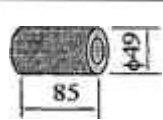
2.2 – Inventário das fontes seladas no Brasil

Dimensionar com exatidão o inventário de fontes de um país é tarefa difícil e árdua, por razões que vão da própria natureza dinâmica do inventário até o desconhecimento oficial sobre a existência e a movimentação de fontes antigas, sem os registros de controle utilizados atualmente. Para exemplificar este último problema, basta mencionar que todas as agulhas, tubos e placas de ^{226}Ra utilizadas em radioterapia foram postos em serviço e utilizados por décadas, antes que os sistemas de controle administrativo dos órgãos reguladores fossem criados.

Por outro lado, como nem todas as fontes assemelham-se à descrição apresentada na tabela 2.1, é necessário esclarecer quais critérios de inclusão foram adotados neste estudo. É necessário destacar também que inventariar as fontes do Brasil foi um trabalho de garimpo de informações nas extensas listas que compõem os bancos de dados mencionados a seguir. Foram selecionados:

- as fontes radioativas, identificadas como fontes seladas pela CNEN, em seu registro de usuários de substâncias radioativas no Brasil (CNEN, 1998);
- os rejeitos radioativos, catalogados como fontes seladas nos registros do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) (NR, 2000);
- as fontes de Amerício-241, retiradas dos pára-raios radioativos e dos detetores de fumaça, recolhidos como rejeito radioativo (MIRANDA e VICENTE, 1999);
- as fontes que contêm trítio incorporado em dispositivos elétricos e que são recolhidos como rejeito radioativo ao IPEN; e, por fim,
- as fontes identificadas como fontes seladas existentes no Brasil, no documento publicado pelo OIEA na Internet “Perfis da Gestão dos Rejeitos Radioativos” (IAEA, 2000).

Tabela 2.1 – Radionuclídeos, geometrias, dimensões e materiais de construção de algumas fontes radioativas seladas do inventário brasileiro (dimensões em mm).

^{90}Sr					
	Estrôncio incorporado em esfera de vidro, em cápsula de aço inox.	Sal de estrôncio incorporado em grão cerâmico, dentro de cápsula dupla de aço inoxidável.	Composto de Sr incorporado em folha de prata laminada.		
^{137}Cs					
	Grão cerâmico de cézio, encerrado em cápsula dupla de aço inoxidável soldado.				Grão de sal prensado, em cápsula dupla, aço inox.
^{226}Ra					
	Descrição não disponível.	Sal de rádio encerrado em agulha oca ou tubo de liga platina-irídio.			Descrição não disponível.
^{241}Am					
	Amerício em esmalte cerâmico, em cápsula de aço inoxidável.	Briquete de AmO_2 sobre lâmina metálica, coberto com liga Au-Pd.	Amerício em grão cerâmico ou incorporado em esmalte cerâmico, selado em cápsula cilíndrica ou anular de aço inoxidável.		
$^{241}\text{Am-Be}$					
	Mistura compactada de óxido de amerício e berílio metálico, encerrada em cápsula dupla, cilíndrica ou anular soldada de aço inoxidável.				

Obs.: A descrição de parte das fontes é baseada no catálogo de um fabricante. (AMERSHAM, 1996)

A atividade estimada das fontes existentes no Brasil está apresentada na figura 2.1, discriminando-se a atividade total, a atividade média do inventário e a atividade da fonte mais freqüente de cada radionuclídeo no inventário, denominada de atividade modal. Na tabela 2.2 estão apresentadas as estimativas da quantidade de fontes, da atividade total e do volume que ocupam. Nos valores apresentados estão incluídas tanto as fontes já recolhidas como rejeito radioativo como aquelas que ainda estão em uso. Os resultados estão afetados por incertezas que são decorrentes das diferentes datas de atualização dos bancos de dados, de alguns registros ambíguos ou incompletos, da falta de registro de algumas fontes e de duplicidade de registros que não foram detectados durante a compilação das informações. Certamente, a maior incerteza está associada às fontes de ^{60}Co presentes em irradiadores de

grande porte. Ante a falta de informações mais completas sobre o inventário das fontes desse tipo de aplicação, optou-se por registrar os valores disponíveis e por deixar para futuros trabalhos a investigação sobre um número mais próximo do verdadeiro. Essa decisão baseou-se no fato de que as fontes de ^{60}Co afetarão pouco as conclusões do presente trabalho, em decorrência da sua meia-vida ser mais curta que a maioria das outras fontes relevantes.

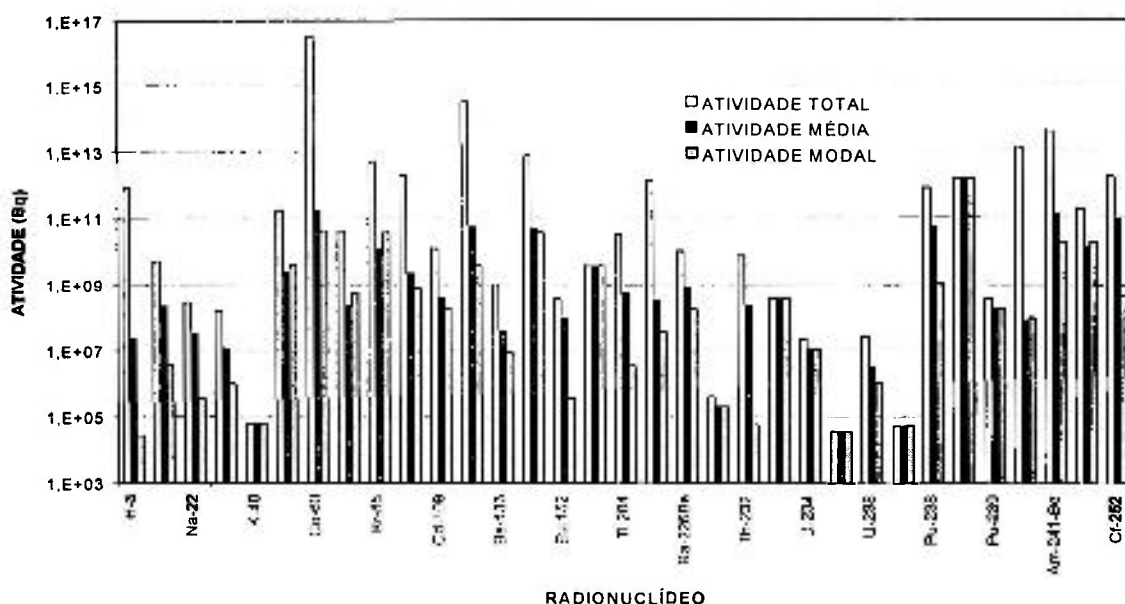


Figura 2.1 – Atividades do inventário de fontes seladas no Brasil. A atividade total é a soma das atividades individuais das fontes de cada radionuclídeo; a atividade média é a atividade total de cada grupo, dividida pelo número de fontes do grupo; a atividade modal é a atividade da fonte que aparece com maior frequência no inventário.

O volume ocupado pelas fontes de cada radionuclídeo, na tabela 2.2, destina-se a fornecer uma estimativa da necessidade de recipientes, espaço de armazenamento e espaço útil no repositório onde serão depositadas. O volume indicado para cada grupo foi calculado com base na descrição típica das fontes, suas dimensões e na composição do inventário brasileiro, em termos de atividade. O volume aparente, que é definido como a capacidade mínima do recipiente que pode acomodar as fontes, dispostas de forma aleatória, foi calculado multiplicando-se o volume geométrico de cada fonte apresentada na tabela 2.1 pelo fator “2,2”. O valor adotado para este fator baseia-se na experiência empírica da engenharia (MIRANDA, 2000). Uma descrição detalhada do inventário de cada grupo de fontes, incluindo a meia-vida dos radionuclídeos, está apresentada no Apêndice.

Tabela 2.2 – Resumo do inventário de fontes seladas no Brasil.

GRUPO DE FONTES (¹)	NÚMERO DE FONTES (²)	ATIVIDADE TOTAL (Bq)	VOLUME APARENTE (dm ³) (³)
⁶⁰ Co	202.306	3,34 x 10 ¹⁶	60
⁸⁵ Kr	440	4,93 x 10 ¹²	42
⁹⁰ Sr	846	1,82 x 10 ¹²	4,0
¹³⁷ Cs	6.153	3,27 x 10 ¹⁴	13
²²⁶ Ra	4.095	1,29 x 10 ¹²	0,92
²⁴¹ Am	172.636	1,35 x 10 ¹³	130
²⁴¹ Am-Be	319	4,16 x 10 ¹³	35
³ H, ²² Na, ⁵⁵ Fe, ¹⁰⁹ Cd, ¹³³ Ba	35520	1,03 x 10 ¹²	7,5
¹⁴⁷ Pm, ¹⁵² Eu, ²⁰⁴ Tl, ²²⁸ Th, ²⁴⁴ Cm, ²⁵² Cf	241	9,24 x 10 ¹²	3,0
¹⁴ C, ³⁶ Cl, ⁴⁰ K, ⁶³ Ni, ¹⁵¹ Sm, ²²⁶ Ra-Be, ²³² Th, ²³³ U, ²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁸ U, ²³⁷ Np, ²³⁸ Pu, ²³⁸ Pu-Be, ²³⁹ Pu	311	2,91 x 10 ¹²	3,5
TOTAIS	422.867	3,38 x 10 ¹⁶	299

(¹) As fontes que aparecem agrupadas são em número reduzido no inventário e têm períodos de semidesintegração semelhantes.

(²) Estão incluídas 200.000 varetas de ⁶⁰Co de um irradiador de grande porte, as fontes de 78.000 pára-raios com ²⁴¹Am e 35.000 centelhadores contendo trítio.

(³) Volume aparente é o volume do menor recipiente que tem capacidade para acomodar as fontes, dispostas de forma aleatória, no seu interior.

2.3 – Tendências do mercado

Os usos correntes das fontes seladas incluem aplicações na indústria, na medicina, na pesquisa científica e tecnológica e em outros campos. Algumas aplicações estão em franca expansão, enquanto o mercado de outras está estável ou retraindo-se em consequência da substituição por outras tecnologias.

Em termos mundiais, a tendência na utilização de fontes seladas na indústria tem uma componente geográfica importante. O exemplo mais relevante de crescimento é a China, que experimenta expansão rápida do uso de fontes, enquanto na Europa várias aplicações estão sendo substituídas por métodos não nucleares.

Na América Latina, há três grupos de países, no que se refere ao seu *status* na utilização dos sistemas de controle nucleônico na indústria (IAEA, 1998c):

- países como Argentina, Brasil, Chile e México, que exploram satisfatoriamente essas tecnologias há muitos anos;
- países como Colômbia, Cuba, Equador, Peru, Uruguai e Venezuela, que somente agora estão alcançando bom desenvolvimento nesse campo; e
- países como Bolívia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Nicarágua, Panamá e Paraguai, que começaram a fazer uso delas recentemente.

O Brasil experimenta uma estagnação do mercado de produção e instalação de equipamentos nucleônicos na indústria, resultado da recessão econômica e da competição de técnicas não nucleares, aliadas à aversão pública à radiação, regras inadequadas de segurança radiológica, processo demorado de licenciamento e falta de orientação clara sobre o processo de licenciamento (CASTAGNET, 1998). Não obstante, no Brasil se utilizam fontes em um amplo leque de aplicações e há um grande parque instalado.

No tabela 2.3 são apresentadas as aplicações correntes das fontes seladas e as avaliações sobre as tendências gerais de expansão ou retração do mercado.

Tabela 2.3 – Aplicações correntes das fontes seladas e tendências do mercado mundial (*).

Aplicação	Radionuclídeo / Uso	Tendência do mercado mundial
Medicina		
Tomografia por emissão de pósitrons (PET) e cintilografia	^{137}Cs , ^{133}Ba . Fontes de calibração.	200 e 17.000 câmaras instaladas, com crescimento de 15% e 5% ao ano, respectivamente.
Densitometria óssea	^{57}Co , ^{153}Gd e ^{241}Am como fontes de referência. ^{125}I , ^{153}Gd , ^{141}Am como fontes de radiação.	500 unidades instaladas. Em declínio, sendo substituída por Raios-X.
Braquiterapia	^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{192}Ir , ^{198}Au . Fontes de radiação.	100.000 unidades em uso. Em crescimento.
Teleterapia	^{60}Co , ^{137}Cs . Fontes de radiação.	2.600 unidades instaladas (1988). Informações contraditórias sobre crescimento.
Irradiação de sangue	^{60}Co , ^{137}Cs . Fontes de radiação	70 novas unidades por ano.
Indústria		
Transdutores para controle de processo (balança nuclear, medidores de espessura, densidade, nível, vazão etc.)	^{55}Fe , ^{60}Co , ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{147}Pm , ^{204}Tl , ^{241}Am , $^{241}\text{Am-Be}$. Fontes de radiação.	500.000 unidades instaladas. Mercado estável em algumas aplicações e em declínio em outras.
Instrumentos analíticos “on line” (umidade, teor de cinzas, teor de enxofre, analisador de elementos)	$^{241}\text{Am-Be}$, ^{254}Cf . Fontes de radiação.	Mercado estável.
Instrumentos analíticos portáteis (cromatografia gasosa, fluorescência de R-X, perfilagem de poços de petróleo.)	^{14}C , ^{55}Fe , ^{63}Ni , ^{137}Cs , ^{147}Pm , ^{238}Pu , ^{241}Am , $^{241}\text{Am-Be}$, ^{254}Cf . Fontes de radiação.	Mercado estável.
Equipamentos de segurança (detecção de drogas e explosivos em aeroportos).	^{252}Cf . Fonte de radiação	Mercado em expansão.

(continua)

Tabela 2.3 – Aplicações correntes das fontes seladas e tendências do mercado mundial (*).
(continuação)

Esterilização de materiais cirúrgicos e produtos médicos.	^{60}Co . Fonte de radiação.	Mercado em expansão.
Conservação de alimentos.	^{60}Co . Fonte de radiação.	Mercado em grande expansão.
Pesquisa		
Pesquisas agropecuárias, aeroespaciais, físicas, biomédicas, biotecnológicas etc.	^{14}C , ^{55}Fe , ^{63}Ni , ^{137}Cs , ^{147}Pm , ^{241}Am , $^{241}\text{Am-Be}$, ^{254}Cf . Fontes de radiação e calibração	Estável

(*) Informações adaptadas de IAEA (1991), TOMINAGA (1998), IAEA (1998c) e NEA (1998).

Observa-se na terceira coluna da tabela 2.3 que, das 12 aplicações arroladas, seis estão em expansão, quatro estão com mercado estável e somente duas apresentam tendência a desaparecer, de acordo com as indicações das fontes bibliográficas citadas. Portanto, como regra geral para o mercado mundial, pode-se esperar crescimento no emprego de fontes seladas.

No Brasil, considerando-se que grande parte dos equipamentos com fontes seladas origina-se de países líderes nessas tecnologias, é razoável supor que o mercado acompanhe as tendências mundiais.

Portanto, como conclusão deste capítulo, pode-se afirmar que os três primeiros objetivos do presente trabalho foram alcançados e, em consequência, três pontos podem ser destacados:

- existem cerca de 400.000 fontes seladas no Brasil, perfazendo uma atividade total de $3,38 \times 10^{16}$ Bq, aproximadamente, que deverão ser gerenciadas como rejeito radioativo;
- haverá demanda pelo serviço de gestão desse tipo de rejeito, por várias décadas, à medida que essas fontes forem sendo postas fora de serviço;
- a taxa atual de reposição das fontes descartadas como rejeito tende a aumentar, pois pode-se concluir, com razoável convicção, que a maioria das aplicações correntes tende a manter-se competitiva, num mercado em expansão.

3. DESTINAÇÃO DAS FONTES RETIRADAS DE SERVIÇO

Fazer a deposição imediata das fontes seladas postas fora de uso é uma contribuição para elevar a segurança da gestão desse tipo de rejeito radioativo. Contudo, na formulação de um programa de gestão das fontes para o país, devem ser contempladas todas as alternativas disponíveis ou potenciais, considerando-se parâmetros como recursos financeiros, segurança radiológica e outros. Entre essas alternativas, há a possibilidade de tratar as fontes descartadas não como rejeito, mas como bens comerciáveis.

O OIEA considera três possibilidades para a gestão do problema das fontes seladas nos países em desenvolvimento (IAEA, 1990): o retorno das fontes para os fornecedores, a sua reutilização no próprio país e, em último caso, o armazenamento, como rejeito radioativo, em depósitos supervisionados. Nestas alternativas há o pressuposto de que o país em desenvolvimento não disponha de um repositório para rejeitos radioativos.

No presente estudo, aborda-se as recomendações do OIEA e as alternativas de deposição já praticadas ou sendo projetadas em outros países.

3.1 – Alternativas de reemprego

3.1.1 – Retorno para o fornecedor

O OIEA recomenda a prática de incluir, nos contratos de fornecimento, uma cláusula de retorno para o fornecedor, ao fim do período de uso, ou o aluguel da fonte em lugar da venda, como meio de evitar ou minimizar a ocorrência de incidentes com fontes seladas nos países sem estrutura adequada para tratar rejeitos radioativos. Essa providência é destinada, principalmente, às fontes intensas, utilizadas em radioterapia, em perfilagem de poços de petróleo e em instrumentos de processos industriais. Contudo, no Brasil, como em outros países, apenas uma pequena parte dos contratos de fornecimento está sob o alcance dessa prática, que é recente e não é aplicada a todas as fontes.

3.1.2 – Redução, reutilização e reciclagem

Os termos “Reduzir, Reaproveitar, Reciclar” relacionam-se com a gestão de resíduos em geral e originam-se da prática de extrair algumas substâncias ou materiais dos resíduos, resultando em ganho econômico duplo: o aproveitamento de valores presentes nos resíduos e a diminuição da quantidade dos resíduos a serem depositados no ambiente.

Reduzir os rejeitos radioativos, aplicado à gestão das fontes seladas, corresponderia a empregar tecnologias não nucleares em substituição ao uso das fontes ou modificar as tecnologias para reduzir a atividade empregada ou para utilizar fontes com meia vida mais curta. Reutilizar os rejeitos corresponderia a reaproveitar as fontes retiradas de serviço em outra aplicação. Reciclar os rejeitos corresponderia a reprocessar o material das fontes para fabricar novas fontes.

Embora certos tipos de fontes possam ser reutilizadas ou reciclados, essas alternativas são normalmente excluídas quando se trata de rejeitos radioativos. Isso se deve ao fato de que a própria definição de rejeitos radioativos já exclui esta possibilidade: “rejeito radioativo é um material que será, ou foi, descartado e para o qual não está previsto qualquer uso” (CNEN, 1985; ICRP, 1998). Dessa forma, na gestão das fontes seladas, a alternativa dos três R’s compete com a alternativa de gestão como rejeito radioativo.

A reutilização e o reaproveitamento das fontes dentro do próprio país podem ser implementadas pela transferência de propriedade da fonte para um novo usuário. Além de eventuais vantagens econômicas, essas práticas podem representar uma solução para a falta de opções de destinação segura para as fontes descartadas como rejeito. A dificuldade para aplicação dessa solução, nos países em desenvolvimento, é a falta de instalações adequadas para fazer a transferência para a nova aplicação. Há ainda dois fatores que inibem a reutilização das fontes por outros usuários (FISHER, 1992): a garantia de integridade do encapsulamento das fontes no momento da transferência de propriedade, principalmente daquelas que foram utilizadas em condições ambientais adversas, e a falta de padronização das fontes e das blindagens, cujas geometrias e dimensões variam entre diferentes aplicações e entre diferentes fabricantes.

Quanto à reciclagem, em alguns países, se propõem programas que visam minimizar o problema da deposição (DINEHART et al., 1997). Por exemplo, o programa de reprocessamento das fontes de $^{241}\text{Am-Be}$ e de $^{238}\text{Pu-Be}$, utilizadas em perfilagem de poços de petróleo, proposto nos EUA (LAAO, 1995), deverá gerar até 2010, 1 kg de plutônio e 3 kg de amerício e reduzir os volumes de rejeito primário de fatores 8000 e 700, respectivamente.

Contudo, a reciclagem tem viabilidade em poucos casos. A razão é, em parte, o custo das instalações para processar as fontes e, em parte, os preços de mercado dos radioisótopos. Um exemplo que ilustra esse fato, é a iniciativa no IPEN de reaproveitamento do ^{241}Am contido nos pára-raios radioativos, que estão sendo substituídos e recolhidos como rejeito radioativo. É necessário processar entre 2.000 e 12.000 pára-raios para obter 1 grama de ^{241}Am , dependendo do número de fontes em cada dispositivo. Uma avaliação preliminar de custo indicou um investimento em instalações da ordem de US\$ 150 mil (AQUINO, 2000), sem incluir os custos operacionais e do tratamento dos rejeitos secundários. Em contrapartida, dióxido de amerício pode ser adquirido no mercado ao preço de US\$ 750 por grama (LANL, 2001; ORNL, 1998).

Portanto, o reemprego das fontes ou do radioisótopo é aplicável somente em casos especiais. Além disso, os três R's não excluem a necessidade de um repositório; apenas diminuem o inventário total de fontes e retardam o seu descarte definitivo. Como a meia-vida de grande parte das fontes é muito superior ao período de uso conceitual, todas acabarão por ingressar nos sistemas de gestão de rejeitos radioativos, mesmo que tenham sido reutilizadas ou recicladas.

3.2 – Alternativas de deposição como rejeito radioativo

A última etapa da gestão das fontes seladas é a deposição definitiva em um repositório. Como essa deposição é um destino inescapável e como deixá-las em depósitos temporários, indefinidamente, é legar o problema para as gerações futuras, é necessário encontrar meios de viabilizar a deposição segura agora. Na busca da solução definitiva, é preciso analisar as várias tecnologias de deposição dos rejeitos radioativos em uso ou sendo projetadas.

3.2.1 – Práticas correntes

Nos países onde existem repositórios de superfície em operação comercial, para os rejeitos de atividade baixa e média, uma parte das fontes é aceita para deposição – veja-se KERR (1997), e MORALES e GRÁVALOS (1993) – e outra é recusada porque excede os limites de concentração e de atividade estabelecidos nos critérios de aceitação nesses repositórios. Nos EUA, as fontes recusadas estão sendo armazenadas à espera de outra solução (INEL, 1994), o mesmo acontecendo em outros países.

Em cerca de duas dezenas de países sem repositórios comerciais, mas que já praticam alguma espécie de deposição, as fontes seladas são colocadas em cubículos ou cilindros de concreto, com poucos metros de profundidade. Nesses repositórios, concreto é despejado junto com as fontes, de modo a resultar em um monólito no qual as fontes vão sendo incorporadas (IAEA, 2000). Na figura 3.1 são apresentados três exemplos desse tipo de repositório, instalados na Federação Russa, África do Sul e Argentina, pela ordem de apresentação. Essas instalações localizam-se, usualmente, em institutos de pesquisa nuclear. É uma prática considerada aceitável para uma parcela do inventário, mas, de acordo com o OIEA (IAEA, 1991), muitos desses repositórios foram construídos e estão sendo operados sem os requisitos modernos de segurança.

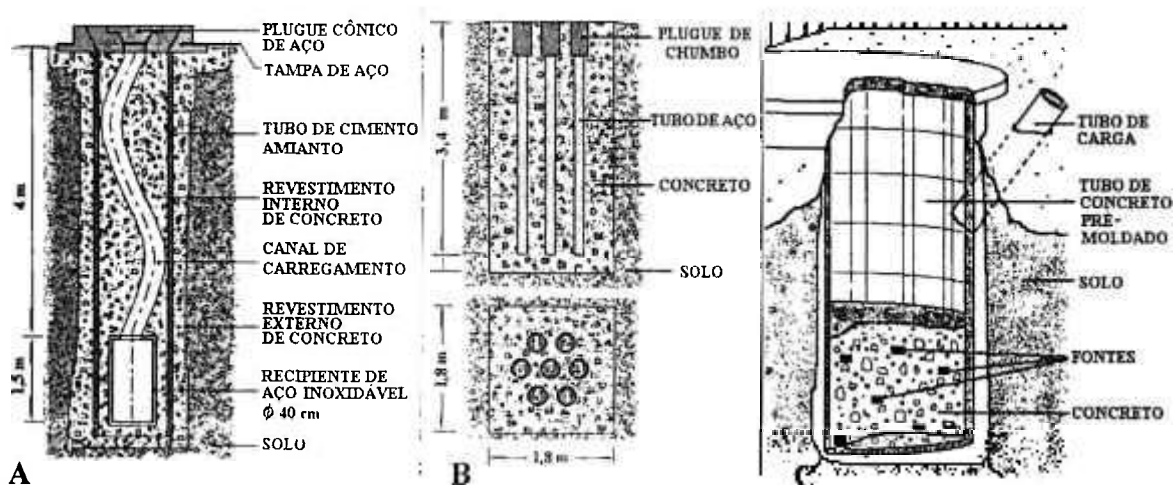


Figura 3.1 – Instalações típicas para deposição de fontes que foram ou estão sendo utilizadas em alguns países: A – Federação Russa; B – África do Sul; C – Argentina. Desenhos A e B adaptados de KOZAK et al., (1999).

Na maioria dos países em desenvolvimento, as fontes estão sendo armazenadas em cofres, casamatas e tambores blindados (IAEA, 1996; IAEA, 1998a), à espera de uma

solução definitiva. No Brasil, as fontes descartadas estão sendo recolhidas em depósitos supervisionados nos institutos da CNEN, como havia recomendado ao Governo do Brasil a Missão do Programa Consultivo de Gestão dos Rejeitos Radioativos (WAMAP) de 1988 do OIEA (GUETAT et al., 1988)

Na figura 3.2, está apresentado um retrato de algumas fontes seladas em suas blindagens originais, armazenadas no IPEN.

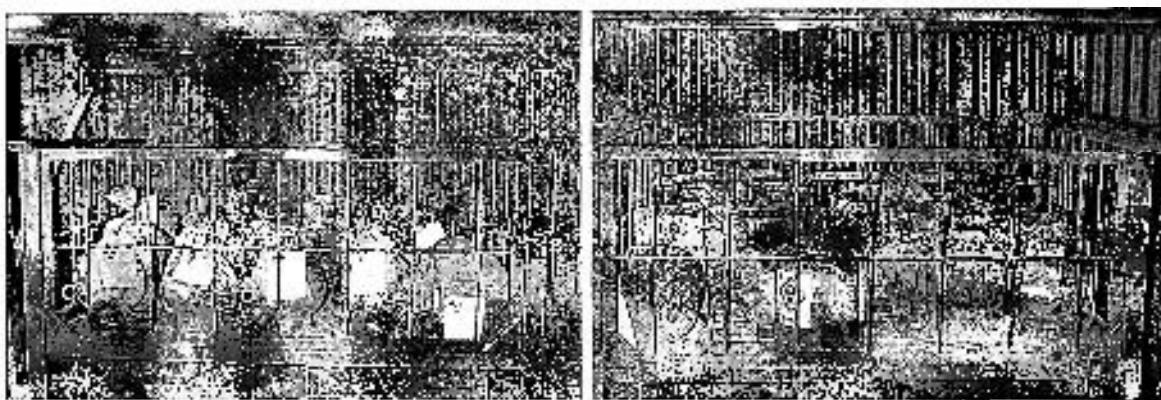


Figura 3.2 – Fontes seladas descartadas em armazenamento temporário no IPEN.

3.2.2 – Repositórios candidatos

Diversos tipos de repositório para rejeitos radioativos podem, em princípio, receber fontes seladas descartadas, e uma análise dessas alternativas é necessária para auxiliar a tomada de decisão quando for definida uma política geral para a gestão desse rejeito.

Sob o aspecto de local de deposição, e pelo critério adotado nos EUA (USDOE, 1998), as tecnologias de deposição podem ser classificadas como: deposição na superfície, deposição em profundidades intermediárias e deposição em meios geológicos profundos. A deposição na superfície é a colocação dos rejeitos nos 30 metros superiores da superfície da Terra; deposição em profundidades intermediárias é a colocação dos rejeitos em até cerca de 100 metros de profundidade (ALLRED, 1994); e deposição em meios geológicos profundos é a colocação dos rejeitos em regiões situadas a centenas de metros abaixo da superfície.

O OIEA classifica os repositórios em instalações próximas à superfície e instalações subterrâneas (IAEA, 1992), mas não indica o critério de classificação em termos de profundidade. As instalações correspondentes são chamadas repositórios de superfície e repositórios profundos.

Sob o aspecto de grau de isolamento das instalações, os repositórios podem ser classificados em função das barreiras artificiais instaladas entre os rejeitos depositados e o meio natural ao redor do repositório. Em um extremo da classificação, estão os repositórios sem qualquer barreira adicional, nos quais os rejeitos são depositados in natura, em contato direto com o meio geológico ao seu redor. No extremo oposto, estão os repositórios constituídos de recintos de concreto, onde os rejeitos são depositados dentro de recipientes robustos, depois de terem sido convertidos em blocos sólidos monolíticos de materiais duráveis e resistentes.

Sob o aspecto da forma da instalação, os repositórios sem barreiras adicionais são simples trincheiras, poços ou cavernas naturais, nos quais os rejeitos são depositados e depois cobertos com materiais naturais como solo, argila, pedregulhos ou combinações desses materiais. Os repositórios com barreiras adicionais podem ser cubículos, silos, túneis, galerias ou combinações dessas formas, nos quais os rejeitos são depositados e depois encerrados com coberturas múltiplas de materiais naturais e artificiais.

Os repositórios sem barreiras adicionais foram utilizados em muitos países nas primeiras décadas da era nuclear, para a deposição dos rejeitos de atividade baixa e média, que correspondem, aproximadamente, às categorias SBN, SMN e S(alfa)BN da classificação dos regulamentos da CNEN (CNEN, 1985), às categorias IV e V da classificação recomendada pelo OIEA (IAEA 1992), ou às classes A, B e C da classificação norte-americana (USNRC, 1992). No Anexo estão apresentados excertos das três classificações citadas.

Atualmente, as licenças de construção e operação exigem barreiras adicionais contra a dispersão de radionuclídeos no ambiente, e, por isso, as formas usuais de repositório em operação são os cubículos de concreto na superfície, dos quais há cerca de duas dezenas em operação no mundo. Na figura 3.3, apresenta-se um exemplo de

repositório moderno para a deposição de rejeitos de atividade baixa e média institucionais e do ciclo do combustível, baseado no repositório espanhol de El Cabril.

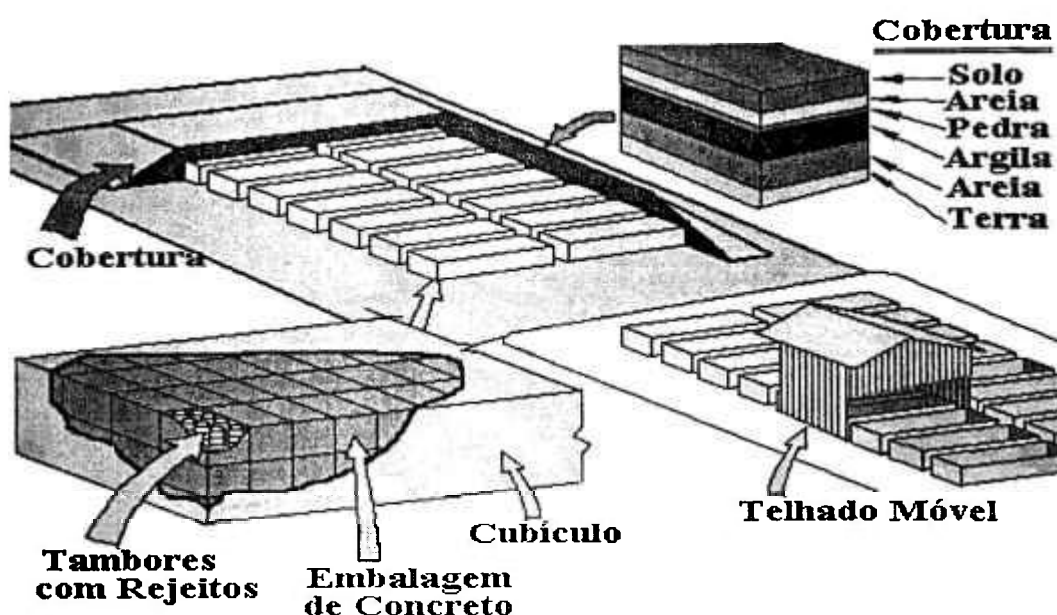


Figura 3.3 – Modelo de repositório de superfície com barreiras artificiais para rejeitos de atividade baixa e média, baseado no repositório espanhol de El Cabril.

Em profundidades intermediárias, alguns países, principalmente na Europa, estão aproveitando minas abandonadas (HOLUB, 1993; NEIS, 1993) ou estão construindo repositórios na forma de silos, galerias e túneis subterrâneos (SJÖBLOM, 2000).

Os repositórios profundos, escavados especialmente para a deposição dos rejeitos de atividade alta e dos elementos combustíveis queimados, estão em desenvolvimento em poucos países com programas nucleares avançados. São túneis e galerias escavados em meios geológicos selecionados em profundidades de várias centenas de metros. Essa destinação é considerada, atualmente, a estratégia mais favorável para alcançar o grau necessário de isolamento entre os rejeitos de atividade alta e a biosfera (NEA, 1996). Na figura 3.4, está apresentado um desenho esquemático do repositório de Yucca Mountain, Nevada, EUA, destinado aos rejeitos de atividade alta do programa comercial americano e que está sendo cogitado para receber as fontes seladas descartadas naquele país.

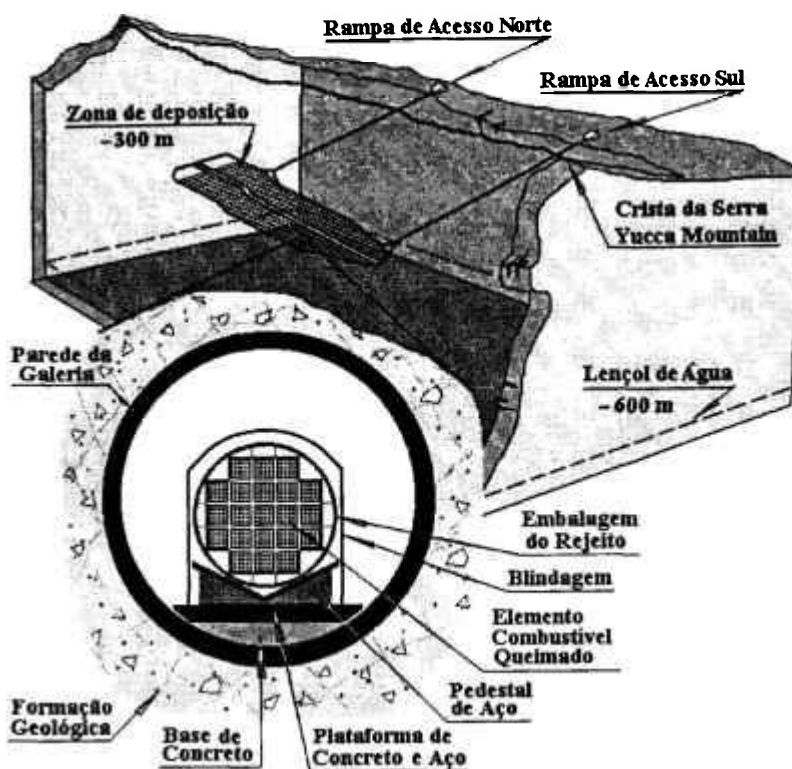


Figura 3.4 – Desenho esquemático do repositório de Yucca Mountain, nos EUA, destinados aos rejeitos do final do ciclo, que poderá receber as fontes seladas descartadas americanas.

Por fim, há o tipo de instalação para deposição de rejeitos chamado poço tubular. Esse é o nome dos poços usualmente destinados à extração de minerais como água, petróleo e gás ou à obtenção de amostras do subsolo.

Poços tubulares têm sido usados há décadas para a deposição de rejeitos líquidos industriais, como as salmouras dos poços de petróleo (STRUXNESS et al. 1960) ou resíduos municipais (GARCÍA-BENGOCHÉA, 1983). A deposição é feita em formações geológicas porosas ou fraturadas, por meio da injeção do resíduo líquido, sob pressão. Esse tipo de deposição final chegou a ser cogitada para rejeitos radioativos, aproveitando-se a experiência da indústria do petróleo, nos primeiros anos da indústria nuclear civil nos EUA (HESS, 1957).

Os poços tubulares profundos estão sendo cogitados também para a deposição de rejeitos radioativos sólidos de alta atividade (FEUSER et al., 1996), em particular, do

plutônio gerado nos programas de redução de armas nucleares (HALSEY, 1995; HEIKEN et al., 1996). Recentemente, foi proposto o uso de um poço tubular para a deposição das fontes seladas em países africanos (BLERK et al., 1999). Nas figuras 3.5 e 3.6 estão apresentados desenhos esquemáticos daquele conceito de repositório.

O repositório sul-africano constitui-se de um poço tubular, perfurado até 100 metros de profundidade, revestido com tubo de PVC de 165 mm de diâmetro e fechado no fundo com concreto. As fontes são encapsuladas em pasta de cimento, dentro de recipientes de aço, os quais são depositados em intervalos regulares dentro do poço, e o espaço restante é preenchido com concreto. Argila é introduzida no espaço anular entre o tubo de PVC e o meio ao redor e, supõe-se, será progressivamente saturada com água, a menos que o sítio fique seco indefinidamente.

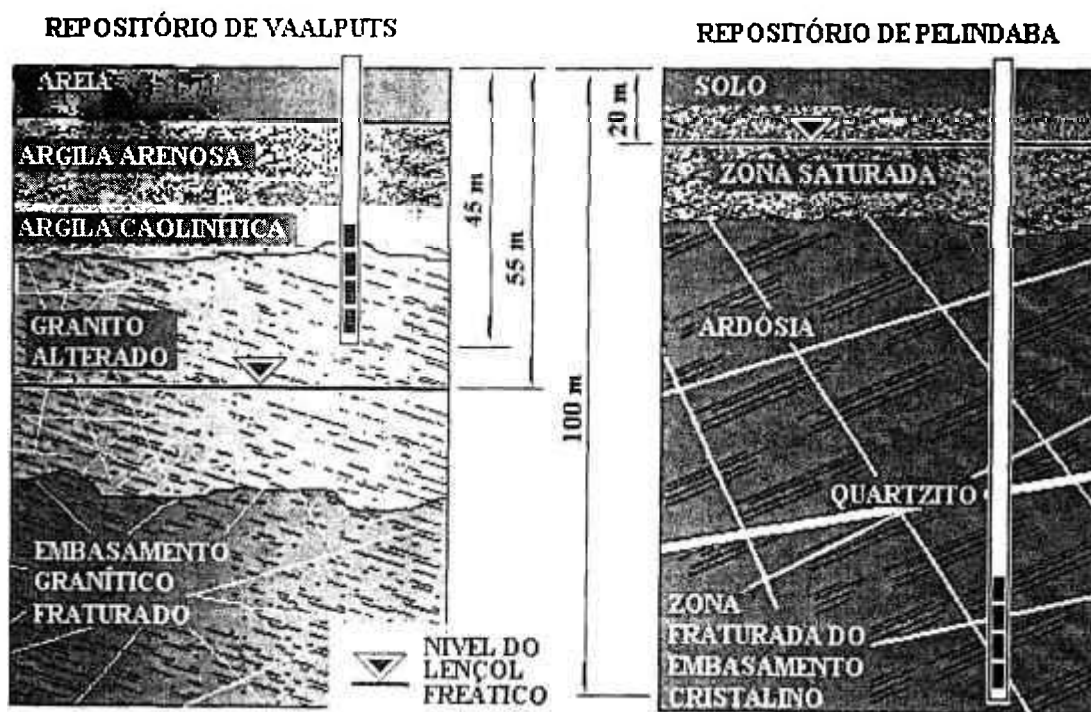


Figura 3.5 – Conceito dos repositórios sul-africanos de Vaalputs e Pelindaba, para deposição de fontes seladas. Detalhes do meio geológico e da profundidade de deposição. Ver figura 3.6 para detalhes do método de deposição. Adaptado de BLERK et al. (1999).

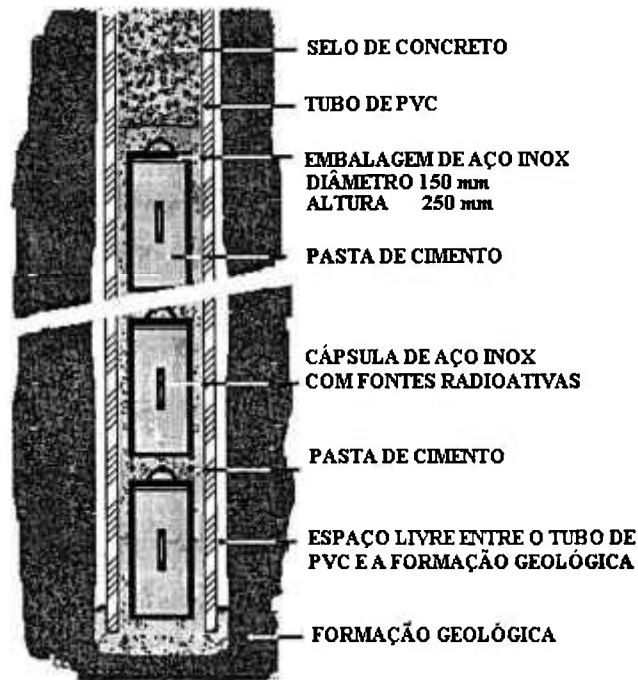


Figura 3.6 – Projeto do repositório sul-africano para fontes seladas. Detalhes do método de deposição. Adaptado de BLERK et al. (1999).

3.3 – Avaliação das alternativas correntes

As alternativas de destinação para as fontes seladas retiradas de serviço são:

- reemprego das fontes, discutido na seção 3.1; ou
- gestão como rejeito radioativo, discutida na seção 3.2.

A primeira tem aplicação limitada a alguns poucos tipos de fontes e, no caso da reciclagem, a alguns países com infra-estrutura para reprocessar as substâncias radioativas das fontes. Além disso, essa alternativa não representa uma solução definitiva para a destinação da maioria das fontes retiradas de serviço, porque a meia-vida é superior ao tempo concebível de utilização, de forma que, no final, as fontes terminarão ingressando no sistema de tratamento de rejeitos radioativos.

A segunda alternativa é inescapável para a maioria das fontes. As opções, dentro dela, são:

- depositar as fontes nos repositórios comerciais de superfície em operação, opção que alcança somente uma parte das fontes;
- construir um repositório do tipo túnel, galeria ou silo em profundidades intermediárias, o que pode ser inalcançável, do ponto de vista econômico, para os países em desenvolvimento;
- construir um repositório do tipo poço tubular, de acordo com o modelo da África do Sul, opção que pode ser inadequada para um inventário do tamanho do brasileiro;
- manter as fontes em depósitos temporários até que estejam disponíveis repositórios profundos e depois transferir as fontes para os países em que estejam funcionando esses repositórios, o que pode levar até algumas décadas para ocorrer.

Para a gestão das fontes seladas no Brasil, há duas alternativas: construir um repositório exclusivo para todas as fontes ou construir um repositório destinado somente às fontes que não puderem ser depositadas num repositório de superfície, sendo que a fração do inventário que poderia beneficiar-se dessa alternativa precisa ser determinada.

A figura 3.7 é um diagrama lógico que resume a sequência de escolhas para a destinação das fontes discutidas até aqui.

Como a intenção implícita neste trabalho é colaborar com as autoridades para decidir o curso a seguir na definição de uma estratégia de gestão do problema, estudou-se um método para determinar qual a fração do número total de fontes que estaria impedida, por razões de segurança radiológica, de ser depositada num repositório de superfície e desenvolveu-se um conceito de repositório que atende aos requisitos de segurança radiológica e que tem capacidade para receber todo o inventário de fontes seladas do país. Com isso, contribui-se para que a CNEN possa continuar a cumprir sua missão constitucional de receber os rejeitos radioativos do país, ao mesmo tempo que evita-se que seus institutos de pesquisa transformem-se em depósitos por tempo prolongado.

Portanto, pelo que foi exposto neste capítulo, pode-se dizer que foram alcançados os objetivos números quatro e cinco do presente trabalho, quais sejam, estudar as alternativas de destinação das fontes retiradas de serviço e estudar alternativas de deposição dos rejeitos radioativos e avaliar a viabilidade dessas alternativas para a deposição das fontes seladas.

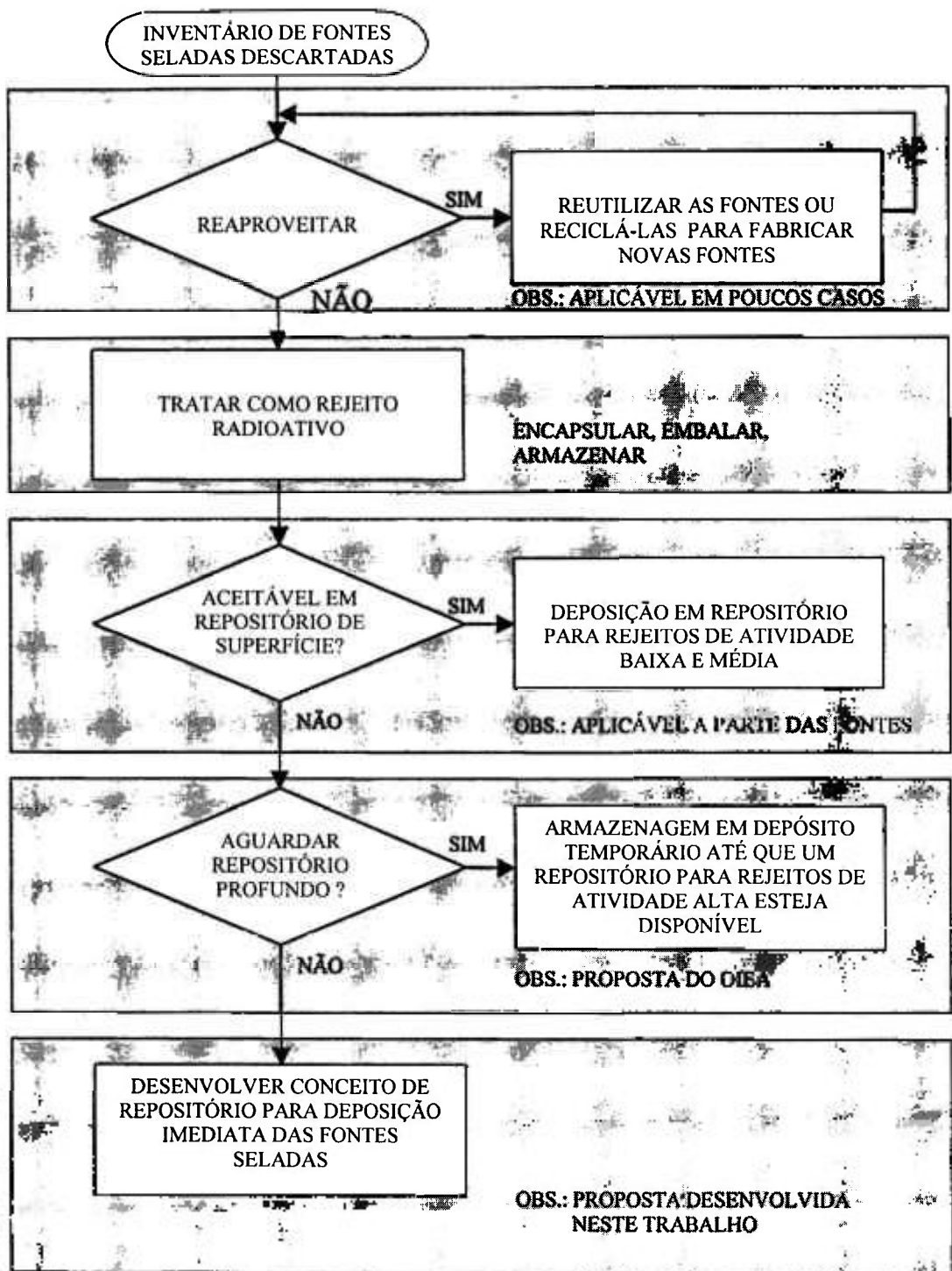


Figura 3.7 – Diagrama lógico da sequência de escolhas para a destinação das fontes seladas.

4. CLASSIFICAÇÃO DO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE FONTES

A decisão sobre quais fontes podem ser depositadas em repositórios de superfície é tomada com base nos critérios de aceitação dos rejeitos nesses repositórios. Esses critérios são derivados basicamente de considerações sobre as possíveis consequências radiológicas, a longo prazo, dos rejeitos depositados (IAEA, 1999a), além de refletir a preocupação com a proteção dos trabalhadores e indivíduos do público durante a operação da instalação de deposição.

Os critérios de aceitação podem ser entendidos como guias para os requisitos de desempenho radiológico de um sistema de deposição. Alguns dos critérios de aceitação estão relacionados com a embalagem, o material de imobilização e a estrutura do repositório. Outros estão relacionados com o rejeito radioativo propriamente dito e são importantes para a segurança radiológica a longo prazo, particularmente após cessado o controle institucional no repositório.

No presente trabalho, utiliza-se o conceito de critério de aceitação com o objetivo básico de determinar qual a combinação de atividade e meia-vida que recomenda a deposição em um repositório profundo e qual é aceitável para deposição na superfície. A resposta é simples para os dois grupos de fontes nos extremos do espectro:

- o grupo que pode ser depositado com segurança na superfície é o que contém radionuclídeos de meia-vida inferior a alguns anos, com qualquer atividade, e também as fontes de quaisquer radionuclídeos desde que com atividade abaixo de um valor da ordem de 10^4 Bq;
- o grupo que contém radionuclídeos com meia-vida superior a várias dezenas de anos e atividade maior que 10^9 Bq deve ser depositado em repositórios profundos.

Ainda que a resposta seja simples para esses exemplos, falta uma demonstração formal de que isso seja válido. Essa demonstração, se é aplicada a todo o espectro de fontes, permite também resolver a região de penumbra na qual não se tem, a priori, uma idéia do enquadramento em um ou outro grupo. Essa demonstração formal é a aplicação de

critérios de seleção ao inventário de fontes, o que resulta em dois conjuntos de fontes seladas: as que podem ser depositadas no repositório de superfície e as que não podem.

O regulamento da CNEN, contendo os critérios de aceitação para os rejeitos radioativos destinados a um repositório de superfície no Brasil, seria o instrumento natural para a seleção dos dois grupos de fontes. Esse regulamento, porém, ainda está em desenvolvimento, estando disponíveis apenas projetos de norma em estágio preliminar de desenvolvimento (CNEN, 1997).

A política de gestão dos rejeitos ainda está indefinida, não sendo possível saber qual será a duração do período de controle institucional do repositório prevista no país. Quando a autoridade reguladora houver estabelecido os critérios de aceitação para o futuro repositório de superfície, ou mesmo quando a autoridade houver implantado a metodologia em que estejam definidos os cenários, os modelos e os valores de entrada, a definição dos dois grupos de fontes seladas poderá ser feita oficialmente. Os critérios desenvolvidos neste trabalho são uma contribuição a essa tarefa.

Em princípio, há duas maneiras de estimar o inventário de fontes que são candidatos à deposição em um repositório profundo, enquanto ainda não tiverem sido estabelecidos os critérios de aceitação para um repositório de superfície no país:

- utilizar critérios de seleção derivados dos critérios de aceitação nos repositórios de superfície em operação em várias partes do mundo;
- estabelecer um método de cálculo para derivar uma proposta de critérios de seleção.

Em vários países, existem repositórios que recebem rejeitos radioativos há décadas, mas as informações disponíveis nem sempre são claras sobre a questão das fontes seladas. Contudo, pode-se inferir algumas informações a partir dos dados levantados, e mencionar alguns exemplos pode ser esclarecedor sobre a situação das fontes seladas quanto à deposição em repositórios de superfície.

Exemplos de critérios de aceitação de fontes em repositórios são apresentados a seguir. Estes exemplos evidenciam extremos de rigidez e tolerância para com a deposição das fontes.

NAKASHIMA e HARA (1993) mencionam que o repositório de Rokkasho, no Japão, aceita somente embalagens contendo rejeitos homogêneos, o que exclui as fontes seladas.

No repositório espanhol de El Cabril, as fontes seladas encapsuladas são aceitas sob certas condições (MORALES e GRÁVALOS, 1993): atividade de emissores alfa inferior a $3,7 \times 10^3$ Bq/g; atividade de ^{60}Co , ^{90}Sr e ^{137}Cs limitadas a $3,7 \times 10^5$ Bq/g, para cada um dos três radioisótopos. O cálculo de concentração pode levar em conta o peso da embalagem e da matriz de imobilização, mas não pode incluir o peso de blindagens. Dessa forma, a atividade máxima por embalagem, de fontes emissoras de radiação alfa, é de 1,5 GBq aproximadamente, e a atividade máxima por embalagem de fontes, de cada um dos três radioisótopos limitantes mencionados, é 150 GBq aproximadamente. Há ainda um limite para a atividade total desses radioisótopos e dos emissores alfa no repositório (RUIZ e ALONSO, 1993), estabelecendo mais uma restrição para a deposição das fontes seladas. O limite é 27 TBq para emissores alfa, 2000 TBq para ^{90}Sr e 3700 TBq para ^{137}Cs .

Por fim, pode-se dizer, no extremo oposto da escala, estão os critérios de aceitação dos repositórios tchecos. Neles, os critérios de aceitação de fontes seladas (HOLUB, 1993) são distintos para radionuclídeos naturais e artificiais, sem limite de atividade. Os naturais, como ^{226}Ra e ^{210}Po , são depositados no repositório de Bratrství Jáchymov, e os artificiais, sejam ^{60}Co e ^{137}Cs ou ^{238}Pu e ^{241}Am , para citar exemplos extremos de meia-vida e radiotoxicidade, são encaminhados para o repositório de Richard Litomerice. Fontes com atividade total na casa dos Exabecquerel já foram depositadas nesses repositórios.

Cada um desses exemplos reflete as necessidades e disponibilidades de cada país e permite concluir que não há modelos prontos para serem adaptados ao inventário do Brasil, havendo a necessidade de estabelecer um conjunto de critérios de seleção que permita classificar o inventário do país quanto ao seu destino.

Um dos critérios de aceitação em repositórios é a atividade total do rejeito e sua concentração. Essas duas características estão ligadas estreitamente com o risco radiológico associado com o rejeito para a avaliação de segurança em cenários de dispersão dos radionuclídeos no meio ambiente e de intrusão, após cessado o controle institucional, como será visto mais adiante. Controle institucional é o controle ativo de acesso ao local do repositório e é especialmente importante no caso de fontes seladas, pois como já se mencionou, as fontes seladas são os objetos com maior potencial de exposição acidental de indivíduos do público.

Para os rejeitos radioativos em geral, a irradiação de indivíduos pode resultar da dispersão dos radionuclídeos no meio ambiente ou pode ocorrer em consequência da intrusão dos indivíduos no sítio de deposição.

A dispersão dos radionuclídeos no ambiente é o resultado da ação de fenômenos naturais que rompem as barreiras naturais e artificiais do repositório ou permitem que os radionuclídeos atravessem estas barreiras e alcancem a biosfera. A intrusão é descrita como ações humanas que levam à exposição dos indivíduos à radiação emitida pelos rejeitos no próprio local do repositório, ou à exumação dos rejeitos ou parte deles.

Para os rejeitos radioativos em geral, o impacto radiológico resultante da dispersão dos radionuclídeos no meio ambiente é controlado pela robustez da instalação e pelas características do local. Já na intrusão, as barreiras artificiais influem menos, e as consequências radiológicas são menos dependentes da robustez da instalação.

Para as fontes seladas, a dispersão dos radionuclídeos na biosfera tem pouca importância para derivar critérios de aceitação, por causa da robustez do encapsulamento. A migração dos radionuclídeos para fora do repositório é controlada predominantemente pelas características do encapsulamento da fonte, e como esse encapsulamento é, via de regra, de alta resistência à corrosão, age como uma contenção muito eficaz contra a dispersão dos radionuclídeos, tornando as características das barreiras artificiais menos importantes.

Para a intrusão no repositório, ao contrário, o encapsulamento das fontes tem um efeito adverso sobre possíveis impactos radiológicos por causa da atividade elevada,

concentrada em um volume que pode ser considerado quase puntiforme. Em decorrência disso, os critérios de aceitação para as fontes devem ser estabelecidos prioritariamente em função de cenários de intrusão e suas consequências radiológicas.

4.1 – Introdução ao desenvolvimento dos critérios de seleção

O desenvolvimento dos critérios de seleção das fontes seladas apresentado aqui é uma ferramenta que permite, no contexto deste trabalho, identificar o conjunto de fontes candidatas a um repositório profundo e o conjunto de fontes que podem ser depositadas em um repositório de superfície. O método consiste em modelar a intrusão em um repositório de superfície e verificar quais fontes superam valores previamente estabelecidos de dose de radiação. Essas fontes são as candidatas ao repositório profundo. O desenvolvimento dessa ferramenta é o que se descreve a seguir.

A possibilidade de intrusão após o fim do período de controle institucional deve ser abordada nas avaliações de desempenho do repositório e é objeto de modelagem, pela aplicação de técnicas de quantificação das frequências ou probabilidades de ocorrência de ações humanas que levem à exposição e dos impactos dessas ocorrências, ou seja, da intensidade das consequências. A combinação de frequência com intensidade de impacto é a estimativa do risco radiológico do repositório.

Segundo CLEGG et al. (1997), o modelo computacional de intrusão envolve três componentes: a) estimativa das frequências das ações humanas que levam à exposição de indivíduos ao rejeito radioativo; b) estimativa do impacto radiológico de tais ações; c) combinação da frequência e do impacto, considerando-se o inventário de radionuclídeos no repositório em função do tempo.

Para o repositório de Drigg na Inglaterra, a metodologia de avaliação de segurança utilizada foi baseada em procedimentos formais de julgamento por especialistas, para definir o conjunto de parâmetros para o modelo, relacionados com as características futuras potenciais de uso do local do repositório e com as ações humanas que levariam à intrusão (CLEGG et al., 1997). A metodologia que foi utilizada para o repositório de Drigg contempla três fases: a) definir os fenômenos e fatores a serem considerados no processo

de avaliação, ou seja, “conceitualizar os eventos”; b) selecionar as ferramentas matemáticas e de computação para representar esses fenômenos, os fatores e suas interações, ou seja, “representar os eventos”; e, c) selecionar os valores dos dados de entrada nos modelos, suas variações e distribuições, ou seja, “especificar os dados de entrada”.

Essa metodologia serviu de modelo para o desenvolvimento deste trabalho.

O estabelecimento dos critérios foi realizado utilizando-se também a metodologia que o OIEA está empregando no projeto: “Quantitative Acceptance Criteria for Near Surface Disposal of Radioactive Waste”, descrito no relatório IAEA (1999a). Essa metodologia é basicamente uma avaliação de segurança do repositório. Os componentes básicos da abordagem utilizada pela OIEA para a avaliação de segurança são: especificação do contexto da avaliação; descrição do sistema de deposição; desenvolvimento e justificação de cenários; formulação e implementação dos modelos; execução dos cálculos; e derivação dos critérios quantitativos de seleção.

A seguir, cada um desses componentes é apresentado e discutido.

4.2 – Contexto de avaliação

A especificação do contexto de avaliação envolve os seguintes aspectos: propósito da análise; critérios de proteção radiológica; grandeza-alvo do cálculo; descrição do rejeito; escala de tempo da avaliação.

a) **Propósito da análise:** O propósito é identificar fontes ou conjuntos de fontes seladas que seriam excluídas de um repositório de superfície, por razões de natureza radiológica, de modo a definir o inventário básico de fontes candidatas à deposição em um repositório profundo para as fontes seladas.

b) **Critérios de proteção radiológica:** Os seguintes critérios foram adotados para este estudo:

- Limite de dose de 1 mGy na superfície do corpo, para exposição direta de indivíduos do público às fontes seladas depositadas no repositório, consideradas individualmente ou em conjunto, de acordo com recomendação da ICRP (1998);
- Limite de dose efetiva comprometida de 0,3 mSv, por ingestão ou inalação, de acordo com recomendação da ICRP (1998);

Ainda que fosse mais apropriado expressar os critérios de proteção radiológica em termos dos limites de risco (ICRP, 1993), de forma a considerar adequadamente as probabilidades de ocorrência de efeitos radiológicos relevantes, dados os objetivos da análise e a diretriz de uma análise simplificada, optou-se pelas grandezas indicadas.

Como será discutido mais adiante, a simplificação da análise resultou em pseudocenários, em que não são descritos de forma completa as situações e os eventos que levam à exposição, a árvore de eventos, mas tão-somente alguns eventos iniciadores e finais. Em outras palavras, independentemente das probabilidades de ocorrência de uma certa seqüência ocorrer, as conseqüências serão as descritas. O presente estudo limita-se a isso.

Normalmente, para as seqüências de eventos consideradas prováveis de ocorrer na fase posterior ao controle institucional no repositório, a dose em membros do público não deve exceder uma fração do limite de dose de 1 mSv.ano^{-1} (ICRP, 1998). A fração apropriada de dose, chamada de dose restringida, é determinada pelo órgão regulador do país, mas é fixada, tipicamente, entre 0,1 e 0,3 do limite. A CIPR recomenda o valor 0,3 (ICRP, 1998).

Isso significa que esses critérios são mais restritivos do que os limites de risco permitiriam. A seguir mostra-se o que se acaba de asseverar.

Na Publicação nº 64 da CIPR (ICRP, 1993), foram estabelecidos limites de risco em função das doses potenciais que poderiam ocorrer e das probabilidades anuais de ocorrência da exposição. Foi estabelecido que o risco às exposições acidentais não deveriam ser superiores aos riscos apresentados pelos limites anuais para situações normais

de trabalho. Para efeito de clareza, define-se como exposição e limite reais aqueles valores recebidos em situação normal de trabalho e exposição e limite potenciais aqueles que seriam recebidos se a situação potencial se tornasse real.

Pela Publicação nº 64 (ICRP, 1993), a probabilidade de ocorrência de situações potenciais pode variar no intervalo desde uma fração de 10^{-6} ano^{-1} até 1 ano^{-1} , sendo este último valor o que corresponde à exposição real. De qualquer maneira, probabilidades de exposição potenciais maiores ou iguais a 10^{-2} ano^{-1} são consideradas, por definição, exposições reais. Portanto, a probabilidade de ocorrência de uma situação de exposição potencial deve ser inferior a 10^{-2} ano^{-1} . As exposições com probabilidade maior são consideradas, conservadoramente, exposições reais.

Tendo em vista que abaixo de duas vezes o limite anual de dose para o trabalhador (por exemplo, 0,1 Sv para o corpo inteiro) a relação “dose x probabilidade de efeito” é assumida como sendo linear, para as doses potenciais atribui-se ao indivíduo uma dose anual que é o produto da probabilidade anual de ocorrência da exposição potencial pela dose esperada no evento.

No intervalo entre duas vezes e 10 vezes o limite anual, supõe-se que a relação “dose x probabilidade de efeito biológico” seja quadrática, e, portanto, a probabilidade de ocorrência dever ser mais restringida. A partir de 10 vezes o limite anual e até cerca de 3 Gy, supõe-se a ocorrência de efeitos determinísticos, com restrição ainda maior nas probabilidades admissíveis. Por fim, acima de 3 Gy, admite-se o limiar para a ocorrência de morte e, então, restringe-se a probabilidade de ocorrência do evento a menos de 10^{-6} ano^{-1} .

Na tabela 4.1 estão indicados os valores de limite de dose que poderiam ser adotados como critério de proteção radiológica, utilizando-se as probabilidades de ocorrência dos eventos que foram modelados. A tabela foi montada a partir dos resultados de SORDI (2000), e verifica-se que, para qualquer seqüência de eventos e qualquer probabilidade de ocorrência, os valores adotados neste trabalho são mais restritivos do que os limites de exposição potencial apresentados nela. É uma posição conservadora que deverá ser avaliada pela autoridade competente, no estabelecimento de uma programa de gestão das fontes seladas no país. Além disso, a partir das premissas já expostas, a

determinação das probabilidades de ocorrência dos cenários de exposição potencial foi deixada para futuros trabalhos, assim como a utilização desses valores na otimização da gestão das fontes seladas.

Tabela 4.1 – Correspondência entre probabilidade de ocorrência de exposições potenciais e doses máximas admissíveis.

Probabilidade de risco (ano ⁻¹)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²
Dose máxima admissível durante a ocorrência do evento (mSv)	40	12	4	2,1	2

c) **Grandezas-alvo do cálculo** (“calculational end points”): Os valores-alvo do cálculo são as atividades das fontes de cada radionuclídeo excluído do repositório de superfície.

As atividades das fontes de cada radionuclídeo que cumprem com os critérios de exclusão são os valores-alvo do cálculo. Isso decorre de que existe um valor de atividade suficientemente pequeno para que a fonte seja aceita em um repositório de superfície, qualquer que seja o radionuclídeo. Contudo, do ponto de vista operacional de gestão das fontes seladas, a autoridade pode preferir que todas as fontes de um determinado radionuclídeo tenham o mesmo destino ou que sejam separados grupos de fontes, de um mesmo radionuclídeo, para deposição em diferentes sistemas.

Destaca-se, novamente, que a concentração de atividade, que geralmente é uma grandeza importante na aplicação de critérios de aceitação, não se aplica a esses rejeitos por causa da geometria bem definida e puntiforme das fontes e da resistência de seu encapsulamento. Isso ocorre, ainda que se possa calcular uma “concentração” de atividade, dividindo-se a atividade das fontes contidas em um tambor pela massa do tambor, independentemente de quão pouco homogênea seja a distribuição das fontes no mesmo (ver descrição dos rejeitos, a seguir).

d) **Descrição dos rejeitos**: Os rejeitos radioativos considerados neste estudo são constituídos por tambores metálicos de 200 litros, contendo as fontes seladas, imersas em concreto ou argamassa de cimento, ainda dentro de suas blindagens, ou removidas delas.

Os radionuclídeos e as atividades das fontes, individualmente ou em grupo, estão indicados nas tabelas e figuras da seção 2.2 – Inventário de fontes seladas no Brasil e, de forma completa, no Apêndice. Os radionuclídeos incluídos na análise são todos aqueles constantes do inventário das fontes registradas no país, que ainda estejam em uso ou que já tenham sido descartadas.

e) **Escala de tempo**: Na análise realizada neste trabalho, considerou-se que os eventos que levam à exposição ocorrem, deterministicamente, logo após cessado o controle institucional, o qual se estende por um período entre 100 e 300 anos.

A extensão do período de controle institucional é típica daquelas que vêm sendo adotadas em estudos internacionais (ROMETSCH, 1993; IAEA, 1999a). A hipótese de que o evento ocorra logo após cessado o controle institucional é restritiva, pois, nesse momento, as atividades das fontes envolvidas e os seus efeitos radiológicos são máximos.

4.3 – Descrição do sistema de deposição superficial

A descrição do sistema de deposição envolve três componentes: a instalação de deposição, a geosfera e a biosfera no entorno do repositório. Os dois últimos componentes são importantes quando fenômenos naturais que afetam a contenção dos radionuclídeos promovem sua dispersão nos compartimentos da geosfera e da biosfera.

Na avaliação realizada neste trabalho, como será detalhado mais adiante, a exposição dos indivíduos ocorre por intrusão na instalação, e as situações que envolvem exposição não são afetadas pelas características do terreno, dos corpos de água e das populações de espécies vegetais e animais do local ou região.

Por isso, o sistema de deposição pode ser caracterizado somente pela descrição da instalação, a qual é definida como um cubículo de concreto, situado a poucos metros da superfície do terreno, com tambores contendo os rejeitos imobilizados em matriz de cimento.

4.4 – Desenvolvimento e justificação dos cenários

Neste estudo, o cenário de exposição às fontes radioativas está construído sobre a hipótese de intrusão humana na instalação, sem que seja percebido o perigo presente na estrutura invadida.

A seqüência inicial de eventos que leva à exposição é a seguinte:

- execução de extensos trabalhos de terraplenagem para construção de estrada, ferrovia ou outra obra pública ou privada;
- destruição de parte ou de todo o cubículo onde estão depositados os rejeitos;
- danificação de embalagens;

A partir daí, a seqüência de eventos que leva à exposição por irradiação externa é:

Cenários 1 e 2

- extração de uma ou mais fontes;
- manipulação e porte da fonte por indivíduos.

Uma seqüência de eventos que leva à exposição por ingestão é a seguinte:

Cenário 3

- danificação de uma ou mais fontes;
- contaminação de água potável ou alimentos;
- ingestão do material radioativo por um ou mais indivíduos.

Uma seqüência de eventos que leva à exposição por inalação é a seguinte:

Cenário 4

- danificação de uma ou mais fontes;
- dispersão do material radioativo na forma de poeira;
- inalação do material radioativo por um ou mais indivíduos.

Ainda que não seja objeto deste estudo avaliar as probabilidades dos eventos iniciadores e das seqüências de eventos dos exemplos anteriores, o que será deixado para futuros trabalhos, cabe discorrer sobre a justificação dos cenários propostos em termos da possibilidade de ocorrência desses eventos e de sua relevância em termos radiológicos.

A exclusão de fenômenos naturais que dispersam os radionuclídeos na biosfera deve-se ao fato de que as fontes típicas são encapsuladas com materiais resistentes mecânica e quimicamente, de modo que o tempo necessário para que o isolamento dos materiais radioativos se rompa pode ser considerado longo, quando comparado com a meia-vida dos radionuclídeos. Por isso, os cenários de dispersão por força dos elementos da natureza foram descartados e mantidos somente os de intrusão.

Os cenários de intrusão considerados estão a favor da segurança no que se refere à dose potencial resultante das exposições, mas as seqüências de eventos propostas são consistentes com inúmeros acidentes reais envolvendo fontes seladas que foram encontradas no chão após desprenderem-se de seus recipientes durante o uso. Refletem também episódios de extração das fontes de dentro da blindagem após furto do equipamento, seguidos de manipulação, transporte nos bolsos da roupa, armazenamento dentro de casa, abertura e dispersão do conteúdo radioativo, ingestão junto com alimentos etc.

Por fim, é razoável considerar-se que a probabilidade de intrusão no repositório aumentará com o passar do tempo, se for assumido que a ocupação humana na Terra prosseguirá no mesmo padrão que tem sido observado até o presente. Não obstante, considera-se que o momento da intrusão dá-se em seguida ao fim do controle institucional.

Ainda que sejam pouco prováveis tais cenários, o excesso de rigor é contrabalançado pela hipótese de duração do controle institucional, que pode ser

considerada otimista para o valor 300 anos, em comparação com o valor 100 anos, dentro da faixa de tempo postulada.

4.5 – Formulação e implementação dos modelos

A representação matemática dos modelos de cálculo, no caso do presente estudo, é bastante simples, em decorrência das simplificações nos cenários de exposição.

O cálculo da dose absorvida em consequência da exposição externa às fontes é feito a partir dos coeficientes de exposição externa de cada radionuclídeo e da atividade da fonte e para pares de valores de distância do indivíduo até fonte e de tempo de contato. O resultado é comparado com o limite de dose e com o valor de dose restringida.

Foram consideradas duas situações:

- cenário 1: exposição a uma fonte, a uma distância de 1 metro, por 1 hora, simulando a situação em que um indivíduo está trabalhando inadvertidamente no local do repositório, quando as embalagens já tenham sido danificadas.
- cenário 2: exposição a uma fonte, a uma distância de 5 cm, por 8 horas, simulando a situação em um indivíduo encontra uma fonte que tenha sido retirada da embalagem e guarda-a consigo.

Em ambos casos, os cálculos são realizados para duas fontes: uma que contém a atividade média do inventário de fontes, e outra que contém a atividade modal, a atividade que aparece com mais frequência no inventário. As atividades são aquelas esperadas após o decaimento de 100, 200 ou 300 anos, de acordo com as hipóteses sobre o controle institucional já mencionadas.

A expressão matemática utilizada para esse cálculo está representada a seguir:

$$D_i^{\text{ext}}(t) = \frac{A_i}{N_i} e^{-\lambda_i \times t} \times \frac{\Gamma_i \times T}{d^2} \quad \text{ou} \quad D_i^{\text{ext}}(t) = \hat{A}_i \times e^{-\lambda_i \times t} \times \frac{\Gamma_i \times T}{d^2} \quad \text{Equação 1}$$

onde:

$D_i^{ext}(t)$ é a dose absorvida por exposição à radiação externa, de uma fonte com a atividade média ou modal do inventários de fontes do radionuclídeo i ;

A_i é a atividade total do inventário de fontes seladas do radionuclídeo i ;

N_i é o número de fontes do inventário do radionuclídeo i ;

$\hat{A}_i$ é a atividade modal do inventário de fontes seladas do radionuclídeo i ;

λ_i é a constante de decaimento do radionuclídeo i ;

t é a data em que ocorre a intrusão no repositório, fixada em 100, 200 ou 300 anos, a partir do presente;

Γ_i é a taxa de dose, para radiação externa, do radionuclídeo i ;

T é o tempo de exposição; e

d é a distância entre o indivíduo exposto e a fonte.

Os valores da taxa de dose (Γ_i), em $Sv.m^2/h.Bq$, foram obtidos nos registros de fontes seladas e dispositivos com fontes seladas na Comissão Reguladora Nuclear dos EUA¹ (USNRC, 2001a).

Os cálculos da dose potencial por ingestão (cenário 3) e por inalação (cenário 4) são feitos a partir das atividades de cada radionuclídeo contido nas fontes e dos fatores dosimétricos de cada radionuclídeo, por ingestão e por inalação, para um grupo de indivíduos do público de faixa etária pertinente publicados pelo OIEA (IAEA, 1997b). Foram utilizados os fatores dosimétricos para indivíduos do público com idade entre 2 e 7 anos, o que pode ser justificado pela história de acidentes envolvendo fontes seladas em que crianças ingeriram o material radioativo da fonte. O resultado do cálculo da dose potencial efetiva é comparado com o valor de dose restringida, adotado como critério de proteção radiológica.

As mesmas considerações sobre a atividade individual das fontes utilizadas na simulação de exposição externa valem também neste caso. As expressões matemáticas

¹ Atualmente, é possível acesso irrestrito somente a um resumo dos registros das fontes e dos dispositivos com fontes na referência citada. O acesso aos registros completos está limitado ao pessoal autorizado e requer senha de acesso. Contudo, cópias impressas, dos registros que foram utilizados como fonte de informação, são mantidas no Departamento de Rejeitos Radioativos.

utilizadas para calcular as doses potenciais por ingestão e inalação estão representadas nas equações a seguir:

$$D_i^{ing}(t) = \frac{A_i}{N_i} e^{-\lambda_i \times t} \times F_i^{ing} \quad \text{ou} \quad D_i^{ing}(t) = \hat{A} \times e^{-\lambda_i \times t} \times F_i^{ing} \quad \text{equação 2}$$

$$D_i^{inh}(t) = \frac{A_i}{N_i} e^{-\lambda_i \times t} \times F_i^{inh} \quad \text{ou} \quad D_i^{inh}(t) = \hat{A} \times e^{-\lambda_i \times t} \times F_i^{inh} \quad \text{equação 3}$$

onde

D_i^{ing} e D_i^{inh} são as doses potenciais por ingestão e inalação do radionuclídeo i;

F_i^{ing} e F_i^{inh} são os fatores dosimétricos para ingestão e inalação, respectivamente, para o radionuclídeo i;

Os fatores dosimétricos utilizados resultam em valores da dose comprometida efetiva potencialmente recebida pelo indivíduo exposto.

O adjetivo “potencial” afixado à dose representa também o fato de que as doses calculadas representam o valor que resultaria da ingestão ou inalação de toda a atividade presente em uma fonte, cenário pouco provável sob quaisquer circunstâncias. Como está fora do escopo deste trabalho avaliar impactos radiológicos de instalações ou de tecnologias ou de programas de deposição final de rejeitos, optou-se por essa simplificação. Caso contrário, as frações da atividade da fonte que podem ser ingeridas ou inaladas devem ser objeto de consideração pormenorizada na elaboração dos cenários. Este assunto poderá também ser objeto de futuro trabalho nessa área.

A simplicidade do modelo permitiu a utilização de uma planilha eletrônica para a realização dos cálculos. A apresentação dos resultados pôde ser feita em forma de tabelas e gráficos em que estão indicadas as doses decorrentes da exposição às fontes nos cenários descritos.

As fontes que cumprem com o critério de exclusão no repositório de superfície são aquelas que resultam em doses superiores aos limites estabelecidos nos critérios radiológicos descritos anteriormente.

4.6 – Execução dos cálculos e resultados

O inventário de fontes, que foi determinado de acordo com a metodologia descrita no Apêndice, foi submetido às equações 1, 2 e 3 do modelo, e os valores resultantes são mostrados nas figuras 4.1 a 4.12.

O resultado é o inventário das fontes que são candidatas à deposição final num repositório profundo para fontes seladas. Esse resultado é includente, ou seja, delimita a área do espectro das fontes que, de acordo com os critérios propostos, devem ser depositadas no repositório proposto, mas não exclui as outras fontes, as quais também podem ter o mesmo destino sem afetar o desempenho radiológico do sistema de deposição. Por razões econômicas, operacionais ou até mesmo políticas, todas as fontes seladas podem ser depositadas no repositório profundo ou, por iguais razões, somente aquelas que estão excluídas de um repositório de superfície.

Nas figuras 4.1 a 4.3, estão apresentados os gráficos que indicam as doses potenciais resultantes da exposição externa às fontes, de acordo com o cenário 1, após decaimento de 100, 200 e 300 anos, respectivamente. Nas figuras 4.4 a 4.6, estão apresentados os gráficos que indicam as doses potenciais resultantes da exposição externa às fontes, de acordo com o cenário 2, para os mesmos tempos de decaimento. Para cada radionuclídeo dois valores são apresentados: a atividade da fonte mais abundante no inventário, chamada de atividade modal, e a atividade de uma fonte hipotética que apresenta a atividade média do inventário. Nas figuras 4.7 a 4.12, estão apresentados os gráficos que indicam as doses potenciais por ingestão (cenário 3) e inalação (cenário 4) da atividade presente nas fontes.

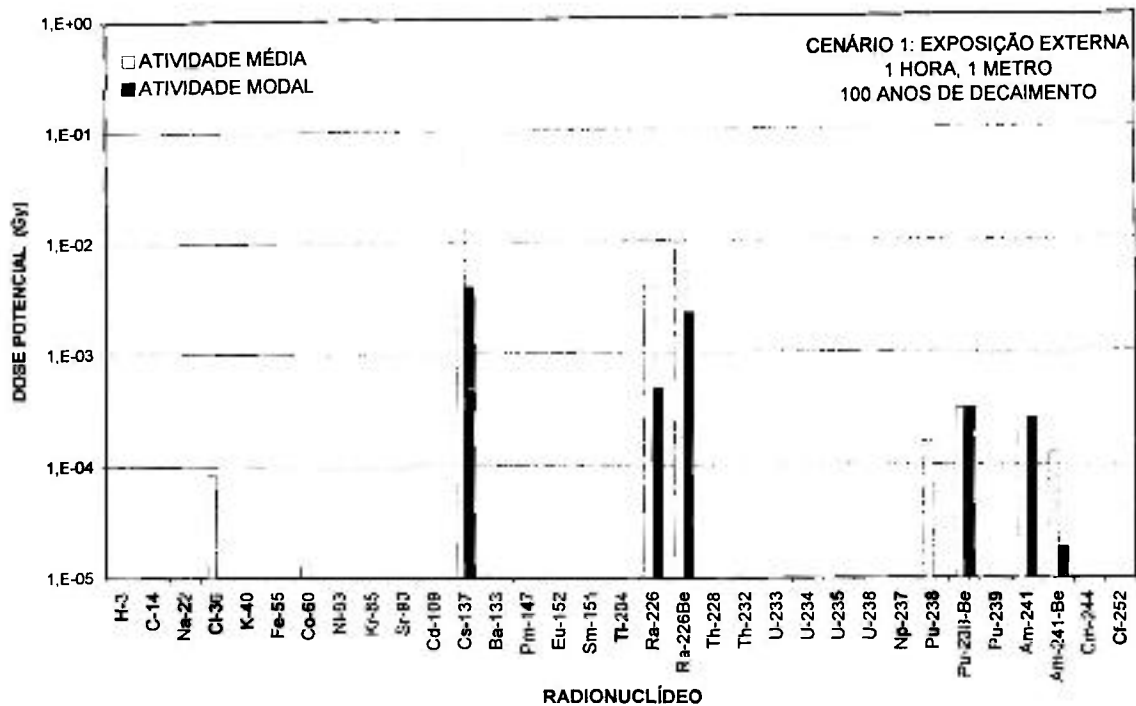


Figura 4.1 – Dose potencial por exposição durante 1 hora, a 1 metro das fontes, após 100 anos de decaimento.

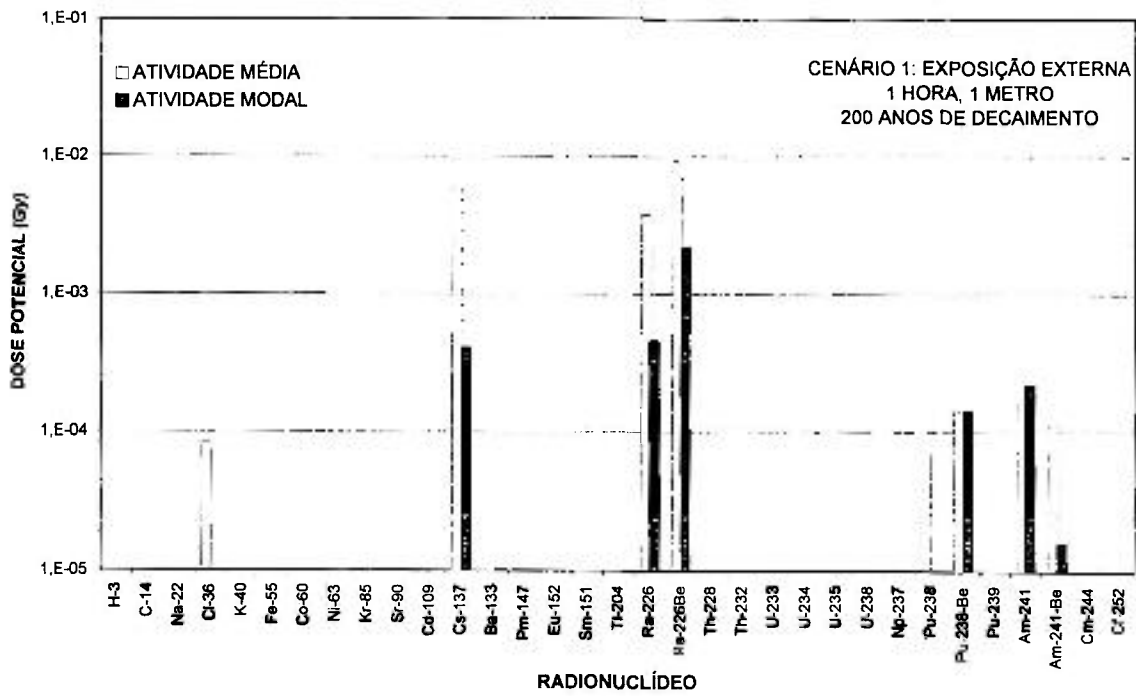


Figura 4.2 – Dose potencial por exposição durante 1 hora, a 1 metro das fontes, após 200 anos de decaimento.

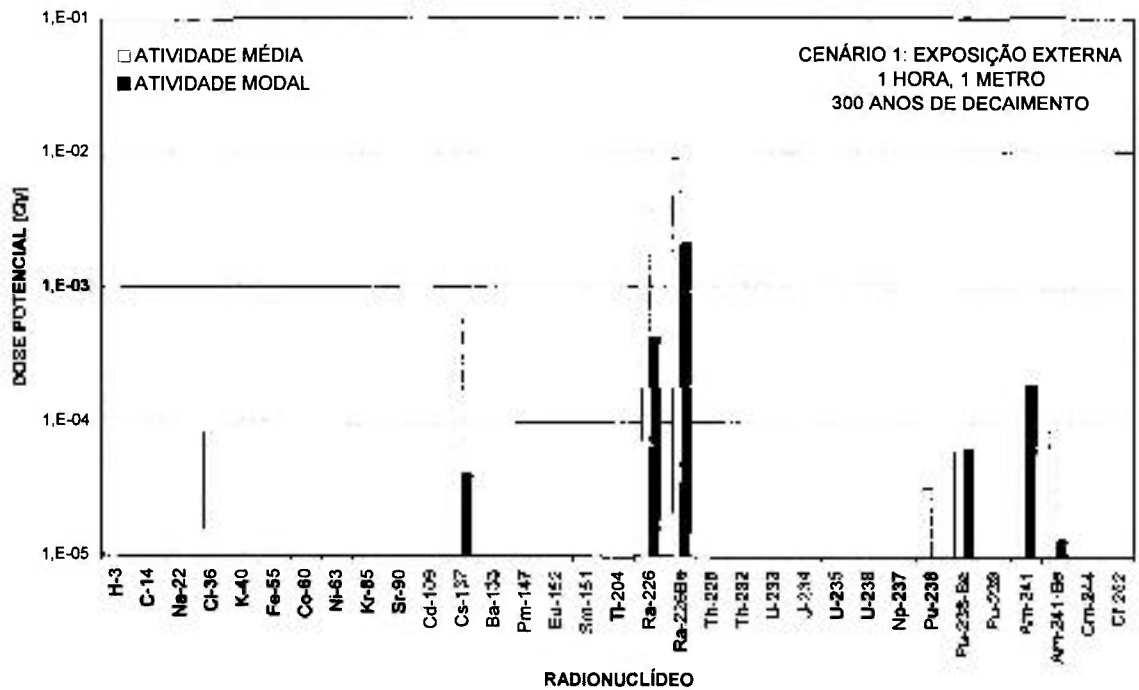


Figura 4.3 – Dose potencial por exposição durante 1 hora, a 1 metro das fontes, após 300 anos de decaimento.

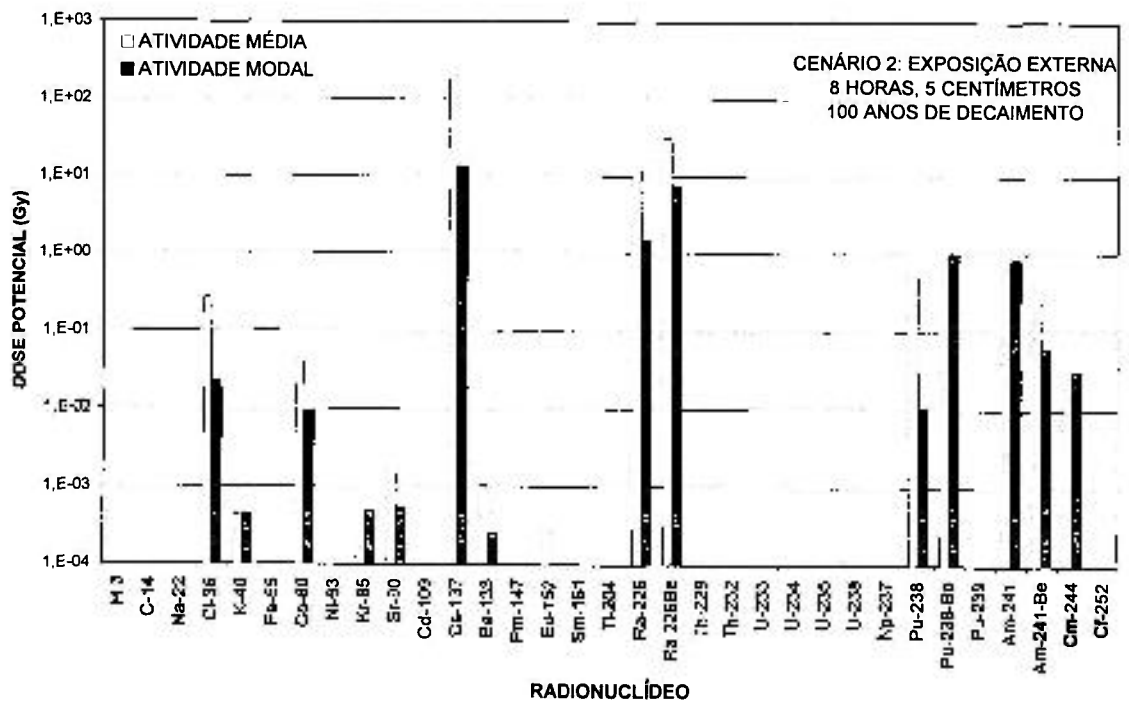


Figura 4.4 – Dose potencial por exposição durante 8 horas, a 5 centímetros das fontes, após 100 anos de decaimento.

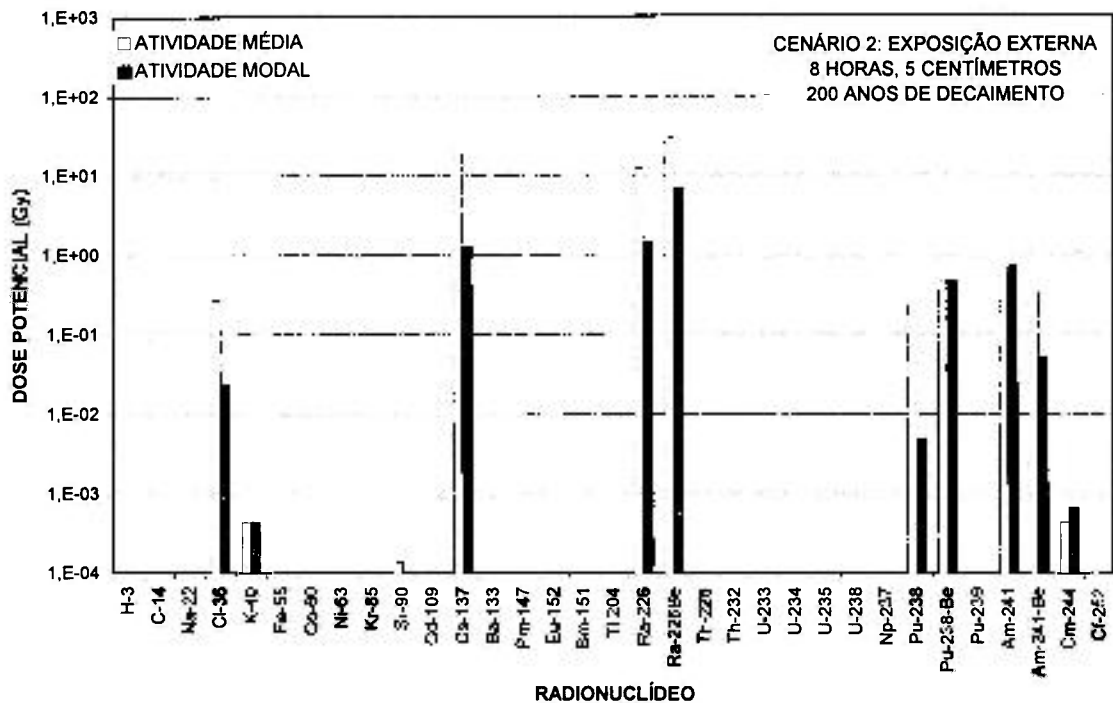


Figura 4.5 – Dose potencial por exposição durante 8 horas, a 5 centímetros das fontes, após 200 anos de decaimento.

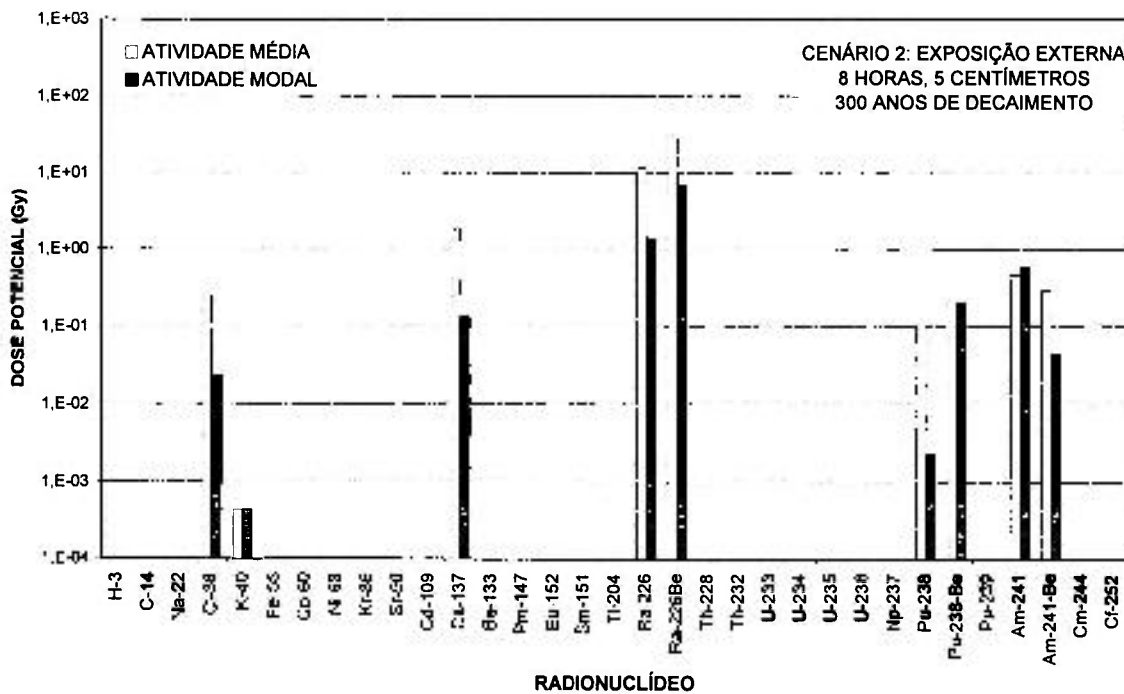


Figura 4.6 – Dose potencial por exposição durante 8 horas, a 5 centímetros das fontes, após 300 anos de decaimento.

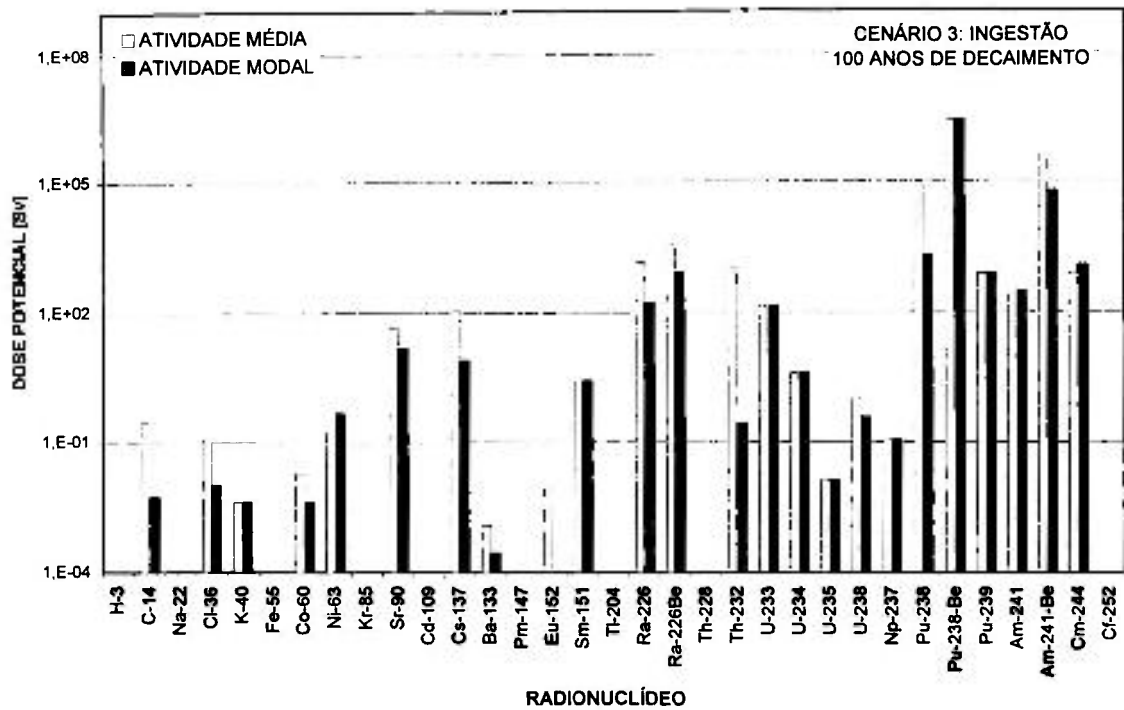


Figura 4.7 – Dose potencial da ingestão da atividade presente nas fontes após 100 anos de decaimento.

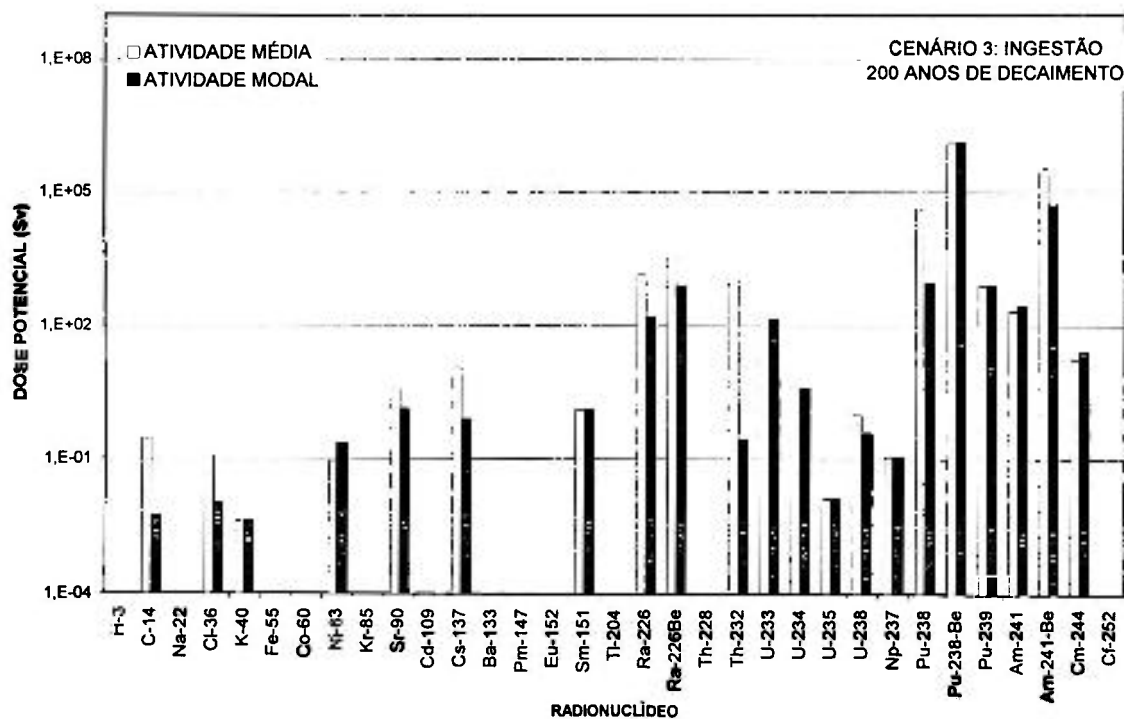


Figura 4.8 – Dose potencial da ingestão da atividade presente nas fontes após 200 anos de decaimento.

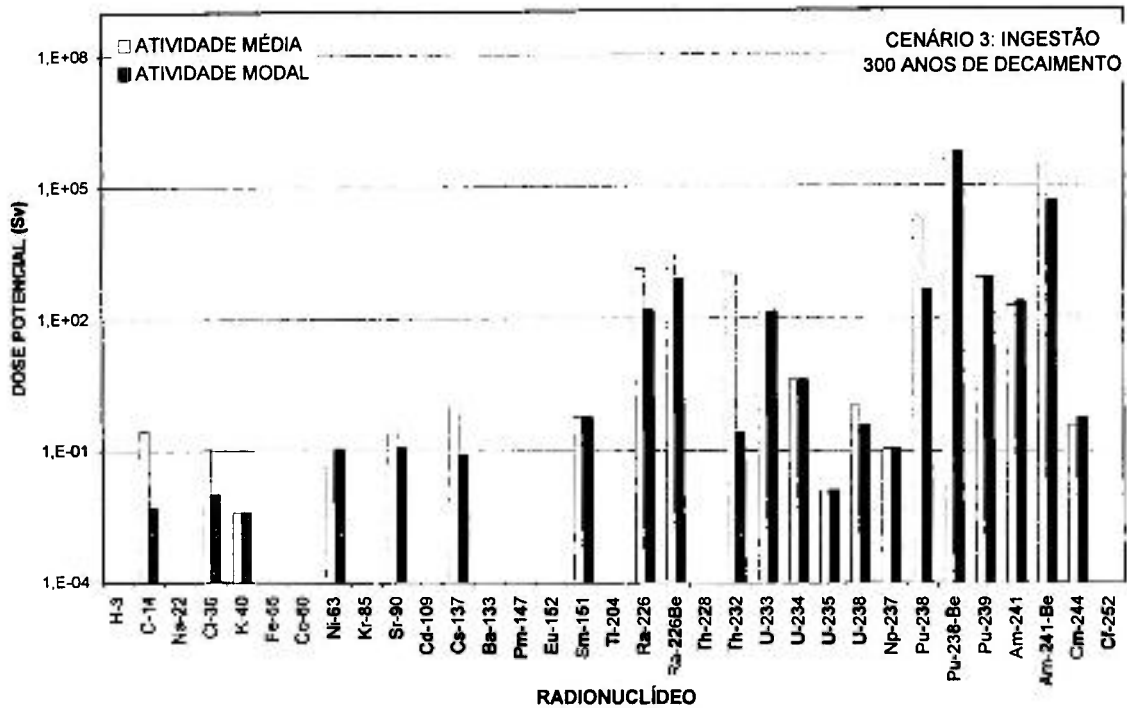


Figura 4.9 – Dose potencial da ingestão da atividade presente nas fontes após 300 anos de decaimento.

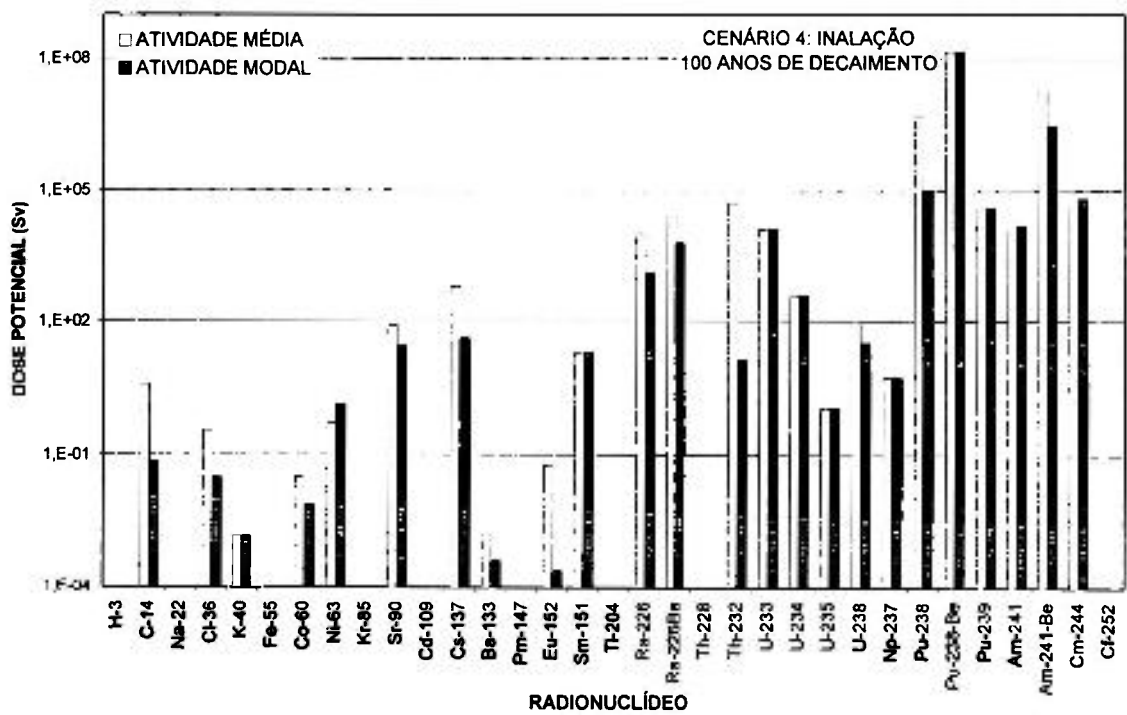


Figura 4.10 – Dose potencial da inalação da atividade presente nas fontes após 100 anos de decaimento.

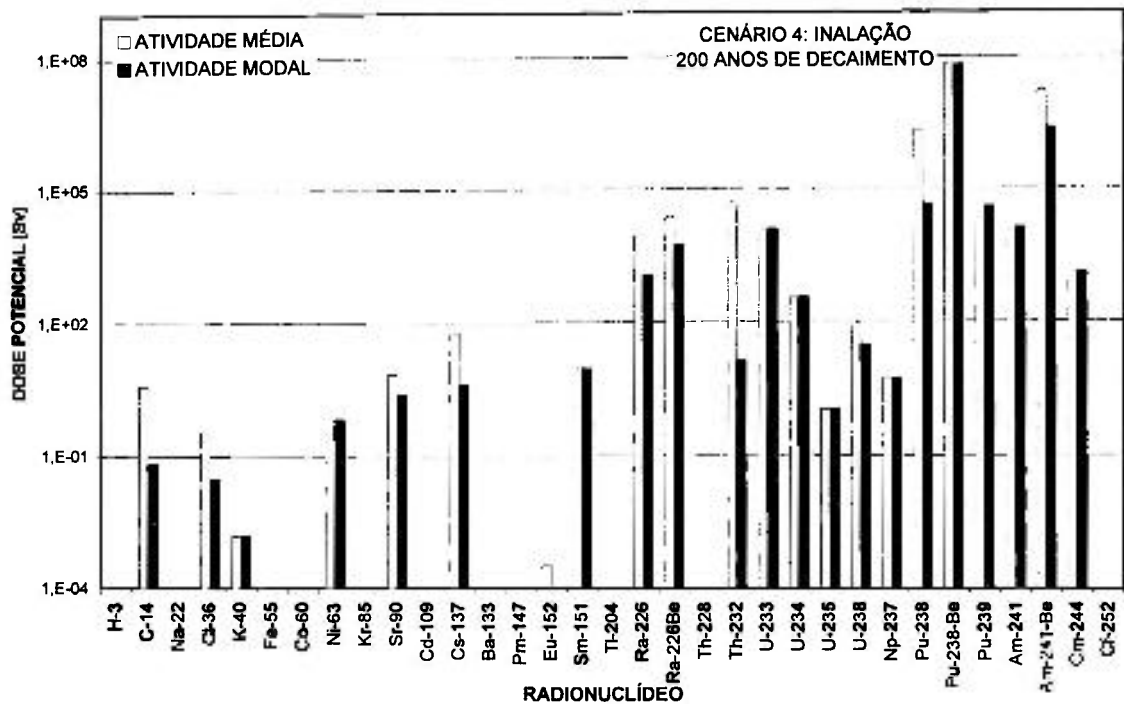


Figura 4.11 – Dose potencial da inalação da atividade presente nas fontes após 200 anos de decaimento.

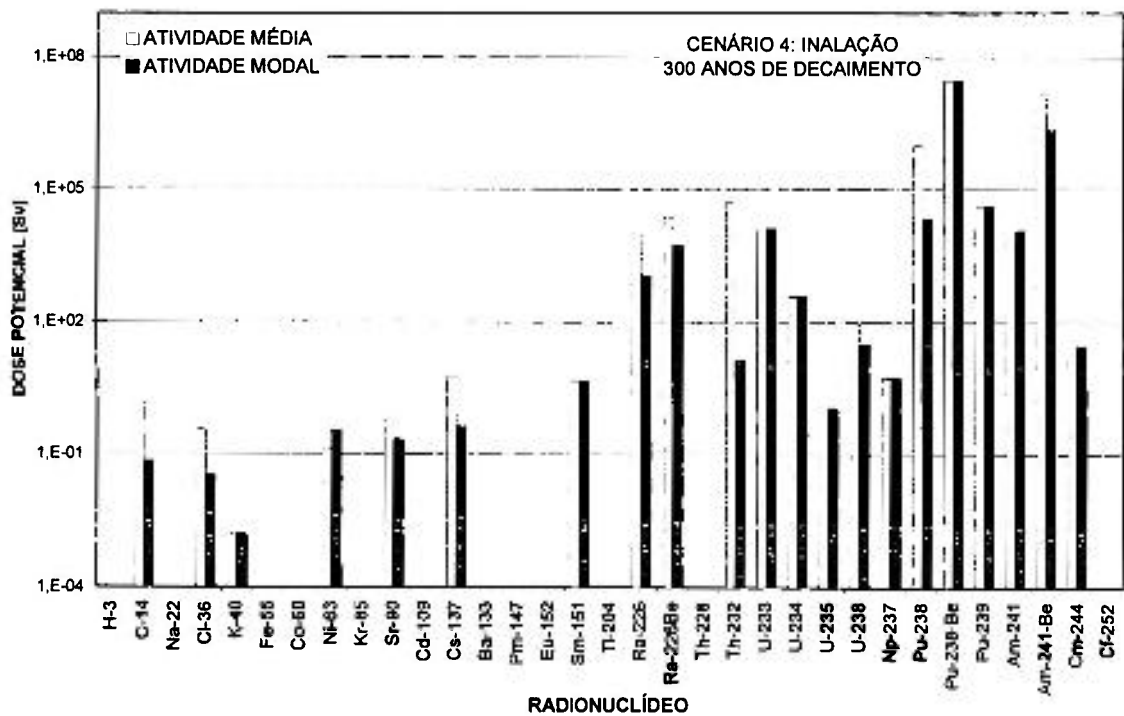


Figura 4.12 – Dose potencial da inalação da atividade presente nas fontes após 300 anos de decaimento.

4.7 – Derivação dos critérios quantitativos de seleção

A partir dos resultados da seção anterior, pôde-se determinar a atividade máxima de cada radionuclídeo que cumpre com os critérios de aceitação em um repositório de superfície, em cada cenário proposto, e selecionar as fontes candidatas ao repositório profundo. Os valores-limites de atividade das fontes que podem ser depositadas em um repositório de superfície estão indicados nas tabelas 4.2 a 4.5. Nos casos em que a atividade-limite de um radionuclídeo é inferior à atividade da fonte menos intensa do inventário desse radionuclídeo, o valor foi omitido das tabelas. Isso significa que nenhuma das fontes pode ser depositada em um repositório de superfície.

Por fim, apresenta-se nas tabelas 4.6 a 4.9, o número de fontes que deve ser depositado em um repositório profundo, a fração que este número representa do número total de fontes, as atividades e as correspondentes frações das atividades totais, e os volumes aparentes e as correspondentes frações do volume aparente total de fontes do inventário brasileiro em cada um dos cenários propostos. Os valores omitidos nas tabelas correspondem às atividades limiares que são superiores às atividades das fontes mais intensas existentes no inventário. Nestes casos, todas as fontes daquele radionuclídeo podem ser depositadas em um repositório de superfície, de acordo com o cenário proposto e o tempo de decaimento indicado. O radionuclídeo foi omitido na tabela nos cenários em que a atividade limiar é superior à atividade da fonte mais intensa, em todos os tempos de decaimento.

Observa-se, nas linhas correspondentes aos totais naquelas tabelas, que a atividade e o volume aparente ocupado pelas fontes distribui-se de modo não uniforme no inventário. Assim, para um cenário e tempo de decaimento, a fração do número de fontes que deve ser depositada no repositório profundo difere significativamente da fração correspondente da atividade total, e ambas diferem da fração do volume aparente que essas fontes ocupam no repositório. Esses resultados podem servir para as autoridades do país decidirem sobre a estratégia mais adequada de gestão, considerando os aspectos técnicos, econômicos e políticos pertinentes.

Os modelos, os cálculos e os resultados apresentados neste capítulo indicam que os objetivos números seis, sete e oito do presente trabalho foram alcançados.

Tabela 4.2 – Atividade máxima das fontes que podem ser depositadas em um repositório de superfície, pelo Cenário 1 ⁽¹⁾

	ATIVIDADE LIMITE (Bq)		
	100 anos de decaimento	200 anos de decaimento	300 anos de decaimento
³ H	$1,3 \times 10^{11}$	$1,3 \times 10^{11}$	$1,3 \times 10^{11}$
¹⁴ C	$2,2 \times 10^9$	$2,2 \times 10^9$	$2,2 \times 10^9$
²² Na	$2,8 \times 10^8$	$2,8 \times 10^8$	$2,8 \times 10^8$
³⁶ Cl	$7,4 \times 10^7$	$7,4 \times 10^7$	$7,4 \times 10^7$
⁴⁰ K	$6,3 \times 10^4$	$6,3 \times 10^4$	$6,3 \times 10^4$
⁵⁵ Fe	$2,6 \times 10^{10}$	$2,6 \times 10^{10}$	$2,6 \times 10^{10}$
⁶⁰ Co	$1,1 \times 10^{13}$	$4,1 \times 10^{14}$	$4,1 \times 10^{14}$
⁶³ Ni	$1,9 \times 10^9$	$1,9 \times 10^9$	$1,9 \times 10^9$
⁸⁵ Kr	$2,1 \times 10^{11}$	$2,1 \times 10^{11}$	$2,1 \times 10^{11}$
⁹⁰ Sr	$7,4 \times 10^{11}$	$7,4 \times 10^{11}$	$7,4 \times 10^{11}$
¹⁰⁹ Cd	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$
¹³⁷ Cs	$8,9 \times 10^8$	$8,7 \times 10^9$	$8,9 \times 10^{10}$
¹³³ Ba	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$
¹⁴⁷ Pm	$2,8 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{12}$
¹⁵² Eu	$3,9 \times 10^8$	$3,9 \times 10^8$	$3,9 \times 10^8$
¹⁵¹ Sm	$3,7 \times 10^9$	$3,7 \times 10^9$	$3,7 \times 10^9$
²⁰⁴ Tl	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$
²²⁶ Ra	$7,9 \times 10^7$	$8,2 \times 10^7$	$8,7 \times 10^7$
²²⁶ RaBe	$1,1 \times 10^8$	$1,1 \times 10^8$	$1,1 \times 10^8$
²²⁸ Th	$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$
²³² Th	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$
²³³ U	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$
²³⁴ U	$2,2 \times 10^7$	$2,2 \times 10^7$	$2,2 \times 10^7$
²³⁵ U	$3,7 \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$
²³⁸ U	$1,5 \times 10^7$	$1,5 \times 10^7$	$1,5 \times 10^7$
²³⁷ Np	$5,6 \times 10^4$	$5,6 \times 10^4$	$5,6 \times 10^4$
²³⁸ Pu	$2,7 \times 10^{11}$	$4,5 \times 10^{11}$	$4,5 \times 10^{11}$
²³⁸ PuBe	$1,6 \times 10^{12}$	$1,6 \times 10^{12}$	$1,6 \times 10^{12}$
²³⁹ Pu	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$
²⁴¹ Am	$5,2 \times 10^8$	— ⁽²⁾	—
²⁴¹ AmBe	$7,4 \times 10^{11}$	$7,4 \times 10^{11}$	$7,4 \times 10^{11}$
²⁴⁴ Cm	$3,7 \times 10^{10}$	$3,7 \times 10^{10}$	$3,7 \times 10^{10}$
²⁵² Cf	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$

⁽¹⁾ Cenário 1 – exposição por 1 hora, a 1 metro de distância da fonte.

⁽²⁾ Os valores omitidos correspondem a atividades inferiores à da fonte menos intensa do inventário.

Tabela 4.3 – Atividade máxima das fontes que podem ser depositadas em um repositório de superfície, pelo Cenário 2 ⁽¹⁾

	ATIVIDADE LIMITE (Bq)		
	100 anos de decaimento	200 anos de decaimento	300 anos de decaimento
³ H	$1,3 \times 10^{11}$	$1,3 \times 10^{11}$	$1,3 \times 10^{11}$
¹⁴ C	$2,2 \times 10^9$	$2,2 \times 10^9$	$2,2 \times 10^9$
²² Na	$2,8 \times 10^8$	$2,8 \times 10^8$	$2,8 \times 10^8$
³⁶ Cl	-(2)	-	-
⁴⁰ K	$6,3 \times 10^4$	$6,3 \times 10^4$	$6,3 \times 10^4$
⁵⁵ Fe	$2,6 \times 10^{10}$	$2,6 \times 10^{10}$	$2,6 \times 10^{10}$
⁶⁰ Co	$3,9 \times 10^9$	$4,1 \times 10^{14}$	$4,1 \times 10^{14}$
⁶³ Ni	$1,9 \times 10^9$	$1,9 \times 10^9$	$1,9 \times 10^9$
⁸⁵ Kr	$4,6 \times 10^8$	$2,1 \times 10^{11}$	$2,1 \times 10^{11}$
⁹⁰ Sr	$1,2 \times 10^9$	$1,2 \times 10^{10}$	$7,2 \times 10^{10}$
¹⁰⁹ Cd	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$
¹³⁷ Cs	$2,7 \times 10^5$	$1,6 \times 10^6$	$2,6 \times 10^7$
¹³³ Ba	$2,8 \times 10^7$	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$
¹⁴⁷ Pm	$2,8 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{12}$
¹⁵² Eu	$3,8 \times 10^5$	$3,9 \times 10^8$	$3,9 \times 10^8$
¹⁵¹ Sm	$3,7 \times 10^9$	$3,7 \times 10^9$	$3,7 \times 10^9$
²⁰⁴ Tl	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$
²²⁶ Ra	$7,4 \times 10^3$	$7,4 \times 10^3$	$7,4 \times 10^3$
²²⁶ RaBe	-	-	-
²²⁸ Th	$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$
²³² Th	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$
²³³ U	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$
²³⁴ U	$2,2 \times 10^7$	$2,2 \times 10^7$	$2,2 \times 10^7$
²³⁵ U	$3,7 \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$
²³⁸ U	$1,5 \times 10^7$	$1,5 \times 10^7$	$1,5 \times 10^7$
²³⁷ Np	$5,6 \times 10^4$	$5,6 \times 10^4$	$5,6 \times 10^4$
²³⁸ Pu	-	-	-
²³⁸ PuBe	-	-	-
²³⁹ Pu	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$
²⁴¹ Am	$4,4 \times 10^4$	$4,4 \times 10^4$	$4,4 \times 10^4$
²⁴¹ AmBe	$1,1 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$
²⁴⁴ Cm	-	$1,9 \times 10^{10}$	$3,7 \times 10^{10}$
²⁵² Cf	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$

⁽¹⁾ Cenário 2 – exposição por 8 horas, a 0,05 metros de distância da fonte.

⁽²⁾ Os valores omitidos correspondem a atividades inferiores à da fonte menos intensa do inventário.

Tabela 4.4 – Atividade máxima das fontes que podem ser depositadas em um repositório de superfície, pelo Cenário 3 ⁽¹⁾

	ATIVIDADE LIMITE (Bq)		
	100 anos de decaimento	200 anos de decaimento	300 anos de decaimento
³ H	$1,9 \times 10^8$	$1,3 \times 10^{11}$	$1,3 \times 10^{11}$
¹⁴ C	-	-	-
²² Na	$2,8 \times 10^8$	$2,8 \times 10^8$	$2,8 \times 10^8$
³⁶ Cl	-	-	-
⁴⁰ K	-	-	-
⁵⁵ Fe	$2,6 \times 10^{10}$	$2,6 \times 10^{10}$	$2,6 \times 10^{10}$
⁶⁰ Co	$2,5 \times 10^9$	$4,1 \times 10^{14}$	$4,1 \times 10^{14}$
⁶³ Ni	$3,7 \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$
⁸⁵ Kr	$2,1 \times 10^{11}$	$2,1 \times 10^{11}$	$2,1 \times 10^{11}$
⁹⁰ Sr	$9,3 \times 10^3$	$1,5 \times 10^5$	$1,9 \times 10^6$
¹⁰⁹ Cd	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$
¹³⁷ Cs	$1,3 \times 10^5$	$1,1 \times 10^6$	$1,3 \times 10^7$
¹³³ Ba	$9,8 \times 10^6$	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$
¹⁴⁷ Pm	$2,8 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{12}$
¹⁵² Eu	$3,8 \times 10^5$	$3,9 \times 10^8$	$3,9 \times 10^8$
¹⁵¹ Sm	-	-	-
²⁰⁴ Tl	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$
²²⁶ Ra	-	-	-
²²⁶ RaBe	-	-	-
²²⁸ Th	$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$
²³² Th	-	-	-
²³³ U	-	-	-
²³⁴ U	-	-	-
²³⁵ U	-	-	-
²³⁸ U	-	-	-
²³⁷ Np	-	-	-
²³⁸ Pu	-	-	-
²³⁸ PuBe	-	-	-
²³⁹ Pu	-	-	-
²⁴¹ Am	-	-	-
²⁴¹ AmBe	-	-	-
²⁴⁴ Cm	-	-	-
²⁵² Cf	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$

⁽¹⁾ Cenário 3 – ingestão da substância radioativa contida na fonte.

⁽²⁾ Os valores omitidos correspondem a atividades inferiores à da fonte menos intensa do inventário.

Tabela 4.5 – Atividade máxima das fontes que podem ser depositadas em um repositório de superfície, pelo Cenário 4 ⁽¹⁾

	ATIVIDADE LIMITE (Bq)		
	100 anos de decaimento	200 anos de decaimento	300 anos de decaimento
³ H	$3,7 \times 10^7$	$9,3 \times 10^9$	$1,3 \times 10^{11}$
¹⁴ C	-	-	-
²² Na	$2,8 \times 10^8$	$2,8 \times 10^8$	$2,8 \times 10^8$
³⁶ Cl	-	-	-
⁴⁰ K	-	-	-
⁵⁵ Fe	$2,6 \times 10^{10}$	$2,6 \times 10^{10}$	$2,6 \times 10^{10}$
⁶⁰ Co	$1,5 \times 10^9$	$4,1 \times 10^{14}$	$4,1 \times 10^{14}$
⁶³ Ni	$3,7 \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$
⁸⁵ Kr	$2,1 \times 10^{11}$	$2,1 \times 10^{11}$	$2,1 \times 10^{11}$
⁹⁰ Sr	-	$7,4 \times 10^4$	$9,3 \times 10^5$
¹⁰⁹ Cd	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$
¹³⁷ Cs	$2,7 \times 10^4$	$2,6 \times 10^5$	$1,6 \times 10^6$
¹³³ Ba	$7,4 \times 10^5$	$3,7 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$
¹⁴⁷ Pm	$2,8 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{12}$
¹⁵² Eu	$3,8 \times 10^5$	$3,8 \times 10^5$	$3,9 \times 10^8$
¹⁵¹ Sm	-	-	-
²⁰⁴ Tl	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$	$7,4 \times 10^9$
²²⁶ Ra	-	-	-
²²⁶ RaBe	-	-	-
²²⁸ Th	$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$
²³² Th	-	-	-
²³³ U	-	-	-
²³⁴ U	-	-	-
²³⁵ U	-	-	-
²³⁸ U	-	-	-
²³⁷ Np	-	-	-
²³⁸ Pu	-	-	-
²³⁸ PuBe	-	-	-
²³⁹ Pu	-	-	-
²⁴¹ Am	-	-	-
²⁴¹ AmBe	-	-	-
²⁴⁴ Cm	-	-	-
²⁵² Cf	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$

⁽¹⁾ Cenário 4 – inalação da substância radioativa contida na fonte.

⁽²⁾ Os valores omitidos correspondem a atividades inferiores à da fonte menos intensa do inventário.

Tabela 4.6 – Fontes seladas do inventário brasileiro que devem ser depositadas em um repositório profundo, de acordo com o cenário 1.

	100 ANOS DE DECAIMENTO					200 ANOS DE DECAIMENTO					300 ANOS DE DECAIMENTO				
	atividade límiar (Bq)	atividade total (Bq)	%	número total	volume (dm ³)	atividade límiar (Bq)	atividade total (Bq)	%	número total	volume (dm ³)	atividade límiar (Bq)	atividade total (Bq)	%	número total	volume (dm ³)
⁶⁰ Co	1,5x10 ¹³	2,4x10 ¹⁶	71	248	0,33	— ⁽¹⁾	0	0	0	0	—	0	0	0	0
¹³⁷ Cs	9,3x10 ⁸	3,3x10 ¹⁴	100	3281	9,8	9,3x10 ⁹	3,2x10 ¹⁴	97	890	2,6	1,1x10 ¹¹	3,0x10 ¹⁴	91	156	0,82
²²⁶ Ra	7,9x10 ⁷	1,2x10 ¹²	95	2487	0,47	8,2x10 ⁷	1,2x10 ¹²	94	2379	0,17	8,7x10 ⁷	1,2x10 ¹²	94	2370	0,17
²²⁶ RaBe	1,1x10 ⁸	9,9x10 ⁹	100	12	0,33	1,1x10 ⁸	9,9x10 ⁹	100	12	0,33	1,1x10 ⁸	9,9x10 ⁹	100	12	0,33
²³⁸ Pu	4,5x10 ¹¹	4,5x10 ¹¹	55	1	0,016	—	0	0	0	0	—	0	0	0	0
²⁴¹ Am	5,2x10 ⁸	5,6x10 ¹²	41	687	4,3	5,2x10 ⁸	5,6x10 ¹²	41	687	4,3	9,3x10 ⁸	5,6x10 ¹²	41	686	4,3
Totais		2,43x10 ¹⁶	72	6716	15		3,27x10 ¹⁴	1	3968	7,4		3,07x10 ¹⁴	1	3224	5,6

⁽¹⁾ Os valores omitidos correspondem a atividades superiores às atividades das fontes mais intensas existentes no inventário de cada radionuclídeo.

Tabela 4.7 – Fontes seladas do inventário brasileiro que devem ser depositadas em um repositório profundo, de acordo com o cenário 2.

100 ANOS DE DECAIMENTO					200 ANOS DE DECAIMENTO					300 ANOS DE DECAIMENTO				
	atividade limiar (Bq)	atividade total (Bq)	número total	volume % (dm ³)	atividade limiar (Bq)	atividade total (Bq)	número total	volume % (dm ³)	atividade limiar (Bq)	atividade total (Bq)	número total	volume % (dm ³)	número total	volume % (dm ³)
³⁶ Cl	9,1x10 ⁴	1,5x10 ⁸	13	100	9,1x10 ⁴	1,5x10 ⁸	13	100	9,1x10 ⁴	1,5x10 ⁸	13	100	13	100
⁶⁰ Co	4,1x10 ⁹	3,3x10 ¹⁶	201495	100	— ⁽¹⁾	0	0	0	—	0	0	0	0	0
⁸⁵ Kr	6,2x10 ⁸	4,9x10 ¹²	373	85	—	0	0	0	—	0	0	0	0	0
⁹⁰ Sr	1,5x10 ⁹	1,6x10 ¹²	195	23	1,7x10 ¹⁰	1,1x10 ¹²	16	2	7,4x10 ¹¹	7,4x10 ¹¹	1	≅ 0	1	≅ 0
¹³⁷ Cs	3,0x10 ⁵	3,3x10 ¹⁴	6054	98	3,1x10 ⁶	3,3x10 ¹⁴	5849	95	3,4x10 ⁷	3,3x10 ¹⁴	5708	93	5708	93
¹³³ Ba	2,0x10 ⁸	8,8x10 ⁸	3	11	—	0	0	0	—	0	0	0	0	0
¹⁵² Eu	3,9x10 ⁸	3,9x10 ⁸	1	25	—	0	0	0	—	0	0	0	0	0
²²⁶ Ra	3,3x10 ⁴	1,3x10 ¹²	4094	100	3,3x10 ⁴	1,3x10 ¹²	4094	100	3,3x10 ⁴	1,3x10 ¹²	4094	100	4094	100
²²⁶ RaBe	3,3x10 ⁷	1,0x10 ¹⁰	13	100	3,3x10 ⁷	1,0x10 ¹⁰	13	100	3,3x10 ⁷	1,0x10 ¹⁰	13	100	13	100
²³⁸ Pu	1,1x10 ⁹	8,2x10 ¹¹	16	100	1,1x10 ⁹	8,2x10 ¹¹	16	100	1,1x10 ⁹	8,2x10 ¹¹	16	100	16	100
²³⁸ PuBe	1,6x10 ¹²	1,6x10 ¹²	1	100	1,6x10 ¹²	1,6x10 ¹²	1	100	1,6x10 ¹²	1,6x10 ¹²	1	100	1	100
²⁴¹ Am	3,3x10 ⁵	1,4x10 ¹³	99652	57	3,3x10 ⁵	1,4x10 ¹³	99652	57	3,3x10 ⁵	1,4x10 ¹³	99652	57	99652	57
²⁴¹ AmBe	3,7x10 ⁸	4,1x10 ¹³	312	98	6,8x10 ⁸	4,1x10 ¹³	309	97	6,8x10 ⁸	4,1x10 ¹³	309	97	309	97
²⁴⁴ Cm	1,1x10 ⁹	2,0x10 ¹¹	16	100	3,7x10 ¹⁰	3,7x10 ¹⁰	1	6	—	0	0	0	0	0
Totais		3,34x10 ¹⁶	312238	74		3,90x10 ¹⁴	109964	26		3,89x10 ¹⁴	109807	26	109807	60

(1) Os valores omitidos correspondem a atividades superiores às atividades das fontes mais intensas existentes no inventário de cada radionuclídeo.

Tabela 4.8 – Fontes seladas do inventário brasileiro que devem ser depositadas em um repositório profundo, de acordo com o cenário 3.

	100 ANOS DE DECAIMENTO					200 ANOS DE DECAIMENTO					300 ANOS DE DECAIMENTO				
	atividade limiar (Bq)	atividade total (Bq)	%	número total	volume (dm ³)	atividade limiar (Bq)	atividade total (Bq)	%	número total	volume (dm ³)	atividade limiar (Bq)	atividade total (Bq)	%	número total	volume (dm ³)
³ H	1,9x10 ⁹	8,4x10 ¹¹	100	43	0,007	≅ 0	— ⁽¹⁾	0	0	0	—	0	0	0	0
¹⁴ C	1,9x10 ⁶	4,9x10 ⁹	100	24	0,66	24	1,9x10 ⁶	4,9x10 ⁹	100	24	0,66	1,9x10 ⁶	4,9x10 ⁹	100	24
³⁶ Cl	9,1x10 ⁴	1,5x10 ⁸	100	13	0,36	100	9,1x10 ⁴	1,5x10 ⁸	100	13	0,36	9,1x10 ⁴	1,5x10 ⁸	100	13
⁴⁰ K	6,3x10 ⁴	6,3x10 ⁴	100	1	0,03	1	6,3x10 ⁴	6,3x10 ⁴	100	1	0,03	6,3x10 ⁴	6,3x10 ⁴	100	1
⁶⁰ Co	2,8x10 ⁹	3,3x10 ¹⁶	100	201587	58,7	98	—	0	0	0	0	—	0	0	0
⁶³ Ni	7,4x10 ⁶	4,2x10 ¹⁰	100	90	0,003	50	7,4x10 ⁶	4,2x10 ¹⁰	100	90	0,003	7,4x10 ⁶	4,2x10 ¹⁰	100	90
⁹⁰ Sr	1,9x10 ⁴	1,8x10 ¹²	100	845	4,0	100	1,9x10 ⁴	1,8x10 ¹²	100	838	99	4,0	2,2x10 ⁶	1,8x10 ¹²	100
¹³⁷ Cs	1,6x10 ⁵	3,3x10 ¹⁴	100	6110	99	13	1,5x10 ⁶	3,3x10 ¹⁴	100	5925	96	13	1,6x10 ⁷	3,3x10 ¹⁴	100
¹³³ Ba	9,9x10 ⁶	9,2x10 ⁸	88	6	22	0,003	—	0	0	0	0	—	0	0	0
¹⁵² Eu	3,9x10 ⁸	3,9x10 ⁸	100	1	25	0,11	—	0	0	0	0	—	0	0	0
¹⁵¹ Sm	3,7x10 ⁹	3,7x10 ⁹	100	1	0,03	1	3,7x10 ⁹	3,7x10 ⁹	100	1	0,03	3,7x10 ⁹	3,7x10 ⁹	100	1
²²⁶ Ra	7,4x10 ³	1,3x10 ¹²	100	4095	0,92	100	7,4x10 ³	1,3x10 ¹²	100	4095	100	0,92	7,4x10 ³	1,3x10 ¹²	100
²²⁶ RaBe	3,7x10 ⁷	1,0x10 ¹⁰	100	13	0,36	100	3,7x10 ⁷	1,0x10 ¹⁰	100	13	0,36	3,7x10 ⁷	1,0x10 ¹⁰	100	13
²³² Th	6,3x10 ³	7,4x10 ⁹	100	34	0,93	33	6,3x10 ³	7,4x10 ⁹	100	34	0,93	6,3x10 ³	7,4x10 ⁹	100	34
²³³ U	3,7x10 ⁸	3,7x10 ⁸	100	1	0,03	1	3,7x10 ⁸	3,7x10 ⁸	100	1	0,03	3,7x10 ⁸	3,7x10 ⁸	100	1
²³⁴ U	1,5x10 ⁵	2,2x10 ⁷	100	2	0,06	2	1,5x10 ⁵	2,2x10 ⁷	100	2	0,06	1,5x10 ⁵	2,2x10 ⁷	100	2
²³⁵ U	3,7x10 ⁴	3,7x10 ⁴	100	1	0,03	1	3,7x10 ⁴	3,7x10 ⁴	100	1	0,03	3,7x10 ⁴	3,7x10 ⁴	100	1
²³⁸ U	8,5x10 ³	2,9x10 ⁷	100	9	0,25	9	8,5x10 ³	2,9x10 ⁷	100	9	0,25	8,5x10 ³	2,9x10 ⁷	100	9
²³⁷ Np	5,6x10 ⁴	5,6x10 ⁴	100	1	0,03	1	5,6x10 ⁴	5,6x10 ⁴	100	1	0,03	5,6x10 ⁴	5,6x10 ⁴	100	1
²³⁸ Pu	1,9x10 ⁹	8,2x10 ¹¹	100	16	0,26	100	1,9x10 ⁹	8,2x10 ¹¹	100	16	0,26	1,9x10 ⁹	8,2x10 ¹¹	100	16
²³⁸ PuBe	1,6x10 ¹²	1,6x10 ¹²	100	1	0,35	100	1,6x10 ¹²	1,6x10 ¹²	100	1	0,35	1,6x10 ¹²	1,6x10 ¹²	100	1
²³⁹ Pu	5,6x10 ⁶	3,8x10 ⁸	100	2	0,03	1	5,6x10 ⁶	3,8x10 ⁸	100	2	0,03	5,6x10 ⁶	3,8x10 ⁸	100	2
²⁴¹ Am	3,7x10 ²	1,4x10 ¹³	100	172636	100	130	3,7x10 ²	1,4x10 ¹³	100	172636	100	130	3,7x10 ²	1,4x10 ¹³	100
²⁴¹ AmBe	3,7x10 ⁵	4,1x10 ¹³	100	319	100	35	3,7x10 ⁵	4,1x10 ¹³	100	319	100	35	3,7x10 ⁵	4,1x10 ¹³	100
²⁴⁴ Cm	1,1x10 ⁹	2,0x10 ¹¹	100	16	0,081	100	1,1x10 ⁹	2,0x10 ¹¹	100	16	0,081	1,1x10 ⁹	2,0x10 ¹¹	100	16
Totais		3,31x10 ¹⁶	98	385867	91	245		6,08x10 ¹³	≅ 0	184038	44	186		6,08x10 ¹³	≅ 0

⁽¹⁾ Os valores omitidos correspondem a atividades superiores às atividades das fontes mais intensas existentes no inventário de cada radionuclídeo.

Tabela 4.9 – Fontes seladas do inventário brasileiro que devem ser depositadas em um repositório profundo, de acordo com o cenário 4.

	100 ANOS DE DECAIMENTO				200 ANOS DE DECAIMENTO				300 ANOS DE DECAIMENTO											
	atividade limiar (Bq)	atividade total (Bq)	%	número total	volume (dm ³)	%	atividade limiar (Bq)	atividade total (Bq)	%	número total	volume (dm ³)	%	atividade limiar (Bq)	atividade total (Bq)	%	número total	volume (dm ³)			
³ H	1,9x10 ⁸	8,4x10 ¹¹	100	49	0,007	≅0	3,7x10 ¹⁰	7,1x10 ¹¹	84	9	0,001	≅0	— ⁽¹⁾	0	0	0	0			
¹⁴ C	1,9x10 ⁶	4,9x10 ⁹	100	24	0,66	24	1,9x10 ⁶	4,9x10 ⁹	100	24	0,66	24	1,9x10 ⁶	4,9x10 ⁹	100	24	0,66			
³⁶ Cl	9,1x10 ⁴	1,5x10 ⁸	100	13	0,36	100	9,1x10 ⁴	1,5x10 ⁸	100	13	0,36	100	9,1x10 ⁴	1,5x10 ⁸	100	13	0,36			
⁴⁰ K	6,3x10 ⁴	6,3x10 ⁴	100	1	0,03	1	6,3x10 ⁴	6,3x10 ⁴	100	1	0,03	1	6,3x10 ⁴	6,3x10 ⁴	100	1	0,03			
⁶⁰ Co	1,6x10 ⁹	3,3x10 ¹⁶	100	201604	58,7	98	—	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0			
⁶³ Ni	7,4x10 ⁶	4,2x10 ¹⁰	100	90	0,03	1	7,4x10 ⁶	4,2x10 ¹⁰	100	90	0,03	1	7,4x10 ⁶	4,2x10 ¹⁰	100	90	0,03			
⁹⁰ Sr	9,3x10 ³	1,8x10 ¹²	100	846	4,0	100	1,5x10 ⁵	1,8x10 ¹²	100	840	4,0	100	1,9x10 ⁶	1,8x10 ¹²	100	829	4,0			
¹³⁷ Cs	3,0x10 ⁴	3,3x10 ¹⁴	100	6137	13	100	2,7x10 ⁵	3,3x10 ¹⁴	100	6078	13	100	3,1x10 ⁶	3,3x10 ¹⁴	100	5849	13			
¹³³ Ba	9,2x10 ⁶	1,0x10 ⁹	100	19	0,01	70	—	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0			
¹⁵² Eu	3,9x10 ⁸	3,9x10 ⁸	100	1	25	0,11	25	3,9x10 ⁸	3,9x10 ⁸	1	25	0	—	0	0	0	0			
¹⁵¹ Sm	3,7x10 ⁹	3,7x10 ⁹	100	1	0,03	1	3,7x10 ⁹	3,7x10 ⁹	100	1	0,03	1	3,7x10 ⁹	3,7x10 ⁹	100	1	0,03			
²²⁶ Ra	7,4x10 ³	1,3x10 ¹²	100	4095	0,92	100	7,4x10 ³	1,3x10 ¹²	100	4095	0,92	100	7,4x10 ³	1,3x10 ¹²	100	4095	0,92			
²²⁶ RaBe	1,1x10 ⁷	1,0x10 ¹⁰	100	13	0,36	100	1,1x10 ⁷	1,0x10 ¹⁰	100	13	0,36	100	1,1x10 ⁷	1,0x10 ¹⁰	100	13	0,36			
²³² Th	6,3x10 ³	7,4x10 ⁹	100	34	0,93	33	6,3x10 ³	7,4x10 ⁹	100	34	0,93	33	6,3x10 ³	7,4x10 ⁹	100	34	0,93			
²³³ U	3,7x10 ⁸	3,7x10 ⁸	100	1	0,03	1	3,7x10 ⁸	3,7x10 ⁸	100	1	0,03	1	3,7x10 ⁸	3,7x10 ⁸	100	1	0,03			
²³⁴ U	1,5x10 ⁵	2,2x10 ⁷	100	2	0,06	2	1,5x10 ⁵	2,2x10 ⁷	100	2	0,06	2	1,5x10 ⁵	2,2x10 ⁷	100	2	0,06			
²³⁵ U	3,7x10 ⁴	3,7x10 ⁴	100	1	0,03	1	3,7x10 ⁴	3,7x10 ⁴	100	1	0,03	1	3,7x10 ⁴	3,7x10 ⁴	100	1	0,03			
²³⁸ U	8,5x10 ³	2,9x10 ⁷	100	9	0,25	9	8,5x10 ³	2,9x10 ⁷	100	9	0,25	9	8,5x10 ³	2,9x10 ⁷	100	9	0,25			
²³⁷ Np	5,6x10 ⁴	5,6x10 ⁴	100	1	0,03	1	5,6x10 ⁴	5,6x10 ⁴	100	1	0,03	1	5,6x10 ⁴	5,6x10 ⁴	100	1	0,03			
²³⁸ Pu	1,9x10 ⁹	8,2x10 ¹¹	100	16	0,26	100	1,9x10 ⁹	8,2x10 ¹¹	100	16	0,26	100	1,9x10 ⁹	8,2x10 ¹¹	100	16	0,26			
²³⁸ PuBe	1,6x10 ¹²	1,6x10 ¹²	100	1	0,35	100	1,6x10 ¹²	1,6x10 ¹²	100	1	0,35	100	1,6x10 ¹²	1,6x10 ¹²	100	1	0,35			
²³⁹ Pu	5,6x10 ⁶	3,8x10 ⁸	100	2	0,03	1	5,6x10 ⁶	3,8x10 ⁸	100	2	0,03	1	5,6x10 ⁶	3,8x10 ⁸	100	2	0,03			
²⁴¹ Am	3,7x10 ²	1,4x10 ¹³	100	172636	130	100	3,7x10 ²	1,4x10 ¹³	100	172636	130	100	3,7x10 ²	1,4x10 ¹³	100	172636	130			
²⁴¹ AmBe	3,7x10 ⁵	4,1x10 ¹³	100	319	35	100	3,7x10 ⁵	4,1x10 ¹³	100	319	35	100	3,7x10 ⁵	4,1x10 ¹³	100	319	35			
²⁴⁴ Cm	1,1x10 ⁹	2,0x10 ¹¹	100	16	0,081	100	1,1x10 ⁹	2,0x10 ¹¹	100	16	0,081	100	1,1x10 ⁹	2,0x10 ¹¹	100	16	0,081			
Totais		3,3x10 ¹⁶	98	385931	245	82		5,9x10 ¹³	≅0	184203	44	186	62		6,1x10 ¹³	≅0	183953	44	186	62

⁽¹⁾ Os valores omitidos correspondem a atividades superiores às atividades das fontes mais intensas existentes no inventário de cada radionuclídeo.

5. PROPOSTA DE GESTÃO DAS FONTES SELADAS NO BRASIL

As fontes radioativas seladas descartadas têm sido tratadas juntamente com outros rejeitos radioativos institucionais. No Brasil, o recolhimento desses rejeitos tem sido feito em institutos de pesquisa nuclear, e sua gestão inclui o tratamento e o armazenamento temporário visando o futuro transporte para um repositório nacional. Como ficou demonstrado no capítulo anterior, a magnitude do inventário de fontes seladas, que são impróprias para deposição em um repositório de superfície, indica a necessidade de se desenvolver um novo conceito de repositório que possa atender à demanda de tratamento desse tipo de rejeito.

É contribuição deste trabalho o desenvolvimento de um conceito de repositório, localizado em meio geológico profundo, próprio e exclusivo para acomodar todo o inventário de fontes seladas do país. Os materiais empregados e a forma como os rejeitos serão imobilizados e depositados são também características desta proposta que conferem originalidade ao trabalho.

Um sistema para a gestão das fontes constitui-se de diversos componentes, entre os quais: um repositório; um processo de tratamento físico do rejeito; instalações de superfície para armazenamento temporário e tratamento do rejeito; meios de transporte das fontes ao local do repositório; embalagens para deposição final; um sistema de controle radiológico e de segurança industrial; meios administrativos e legais para operação das instalações. Como a finalidade deste trabalho, porém, é desenvolver o conceito de repositório, descreve-se somente alguns desses componentes e deixa-se, para futuros trabalhos, a descrição completa do sistema. A seguir estão descritos o repositório, a embalagem, o processo de tratamento e as instalações de superfície, que são os componentes principais para caracterizar o conceito proposto.

5.1 – Repositório exclusivo para as fontes seladas

O principal argumento para defender a idéia de um repositório dedicado e exclusivo decorre das propriedades únicas das fontes seladas: alta atividade concentrada em um

volume reduzido. Isso faz com que seja possível depositar as fontes em grandes profundidades sem que sejam necessários investimentos inalcançáveis para países em desenvolvimento.

O delineamento do repositório está apresentado na figura 5.1. Esse repositório é constituído de um poço revestido com uma camisa de aço e cimentado no espaço anular entre o tubo de revestimento e a formação geológica. As tecnologias de perfuração, revestimento e cimentação do poço são disponíveis comercialmente e a execução do projeto é feita de acordo com as normas e padrões utilizados em empreendimentos de exploração de recursos hídricos.

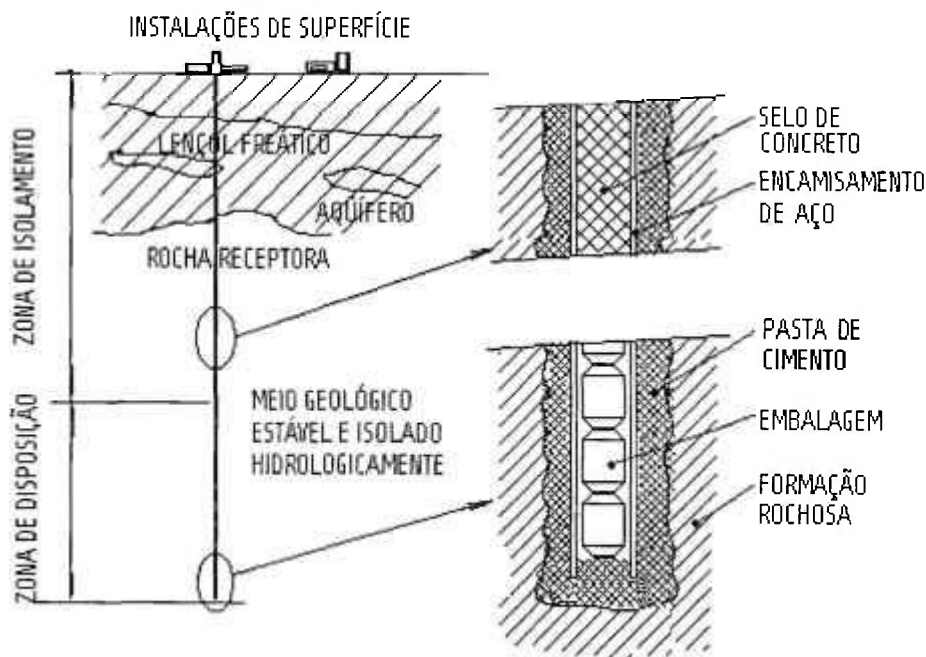


Figura 5.1 – Conceito do repositório profundo, exclusivo para as fontes seladas.

O conceito desenvolvido não é específico para um local determinado, e o perfil geológico do local é somente ilustrativo. Na figura 5.2 está esquematizado um perfil geológico genérico de um possível local de deposição.

A profundidade do poço foi estabelecida localizando-se a parte útil do repositório, para a colocação do rejeito, no embasamento cristalino, abaixo da zona fraturada e alterada, que neste exemplo está além dos 200 metros de profundidade, num batólito de granito.

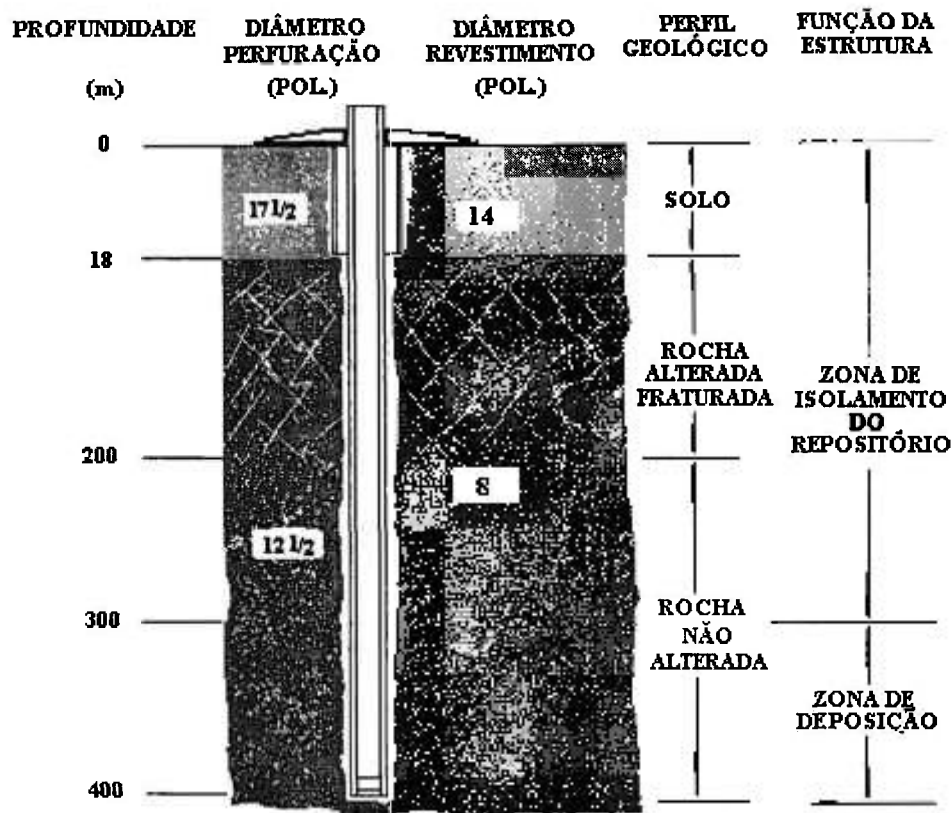


Figura 5.2 – Diagrama ilustrativo do repositório. (Observação: Desenho fora de escala.)

A zona de deposição tem 100 metros de altura, a partir do fundo, e é suficiente para a deposição do inventário atual de fontes do país. Acima da zona de deposição está a zona de isolamento do repositório, constituído de uma parte localizada ainda no batólito granítico, com 100 metros de altura, e outra zona que vai até a superfície, com camadas estratigráficas variadas.

Considera-se que, até a profundidade de 18 metros, o poço atravessa um depósito sedimentar recente e, daí até 200 metros de profundidade, atravessa a fase de transição para o embasamento cristalino. O propósito é conferir ao repositório um isolamento da área acessível à água subterrânea igual à dimensão da zona de deposição, admitindo-se que as condições sejam desfavoráveis sob o aspecto de custo, uma vez que a maior profundidade aumenta o preço de execução de uma obra dessa natureza.

Os estudos de localização do sítio e de otimização do repositório poderão alterar essas dimensões, mas o exemplo proposto é representativo de um possível repositório real.

O diâmetro da perfuração foi definido a partir do diâmetro interno da camisa de aço de revestimento do poço, a qual deve acomodar, com as folgas necessárias, as embalagens contendo as fontes. A partir desse parâmetro e da experiência das empresas especializadas nesse tipo de obra foram definidos os diâmetros de perfuração que estão indicados na figura 5.2.

A parte do poço que atravessa a camada superior do solo é primeiramente perfurada com diâmetro bem maior, e o furo é encamisado com tubo de aço de 14 polegadas e cimentado de modo a consolidar o poço e evitar desbarrancamento. A partir daí, a perfuração é feita de modo a permitir a introdução da camisa de aço e o revestimento com pasta de cimento.

As tecnologias de perfuração recomendadas pela empresa CPA, convidada pelo autor a orçar a obra (CPA, 1999), são o método rotativo com diâmetro de 17½ polegadas até 18 metros, com circulação direta de lama de bentonita, e a rotopercussão com diâmetro de 8 polegadas, seguida de alargamento para 12½ polegadas, também por rotopercussão com circulação direta de água e ar, até 400 metros de profundidade.

A camisa de aço é um tubo liso, sem costura, de aço carbono, ASTM-A-106, Sch. 40, com diâmetro de 8 polegadas. As dimensões desse tubo são 219,08 mm de diâmetro externo e parede de 8,18 mm, com diâmetro interno aproximado de 200 mm. A união entre os segmentos de tubo é feita por meio de rosca “flush joint”, sem ressalto internos ou externos, em conformidade com a norma da Associação Americana de Obras Hidráulicas (CPA, 1999). As alternativas ao aço ASTM-A-106, como aço inoxidável ou polímeros como polietileno e cloreto de polivinila, foram descartados em razão do preço elevado ou da pequena resistência à radiólise e porque a atmosfera no interior do poço pode ser facilmente condicionada de modo a minimizar a possibilidade de corrosão do tubo durante a operação da instalação.

Na figura 5.3 está apresentada uma vista em corte do poço concluído, de forma a evidenciar as diversas estruturas que envolvem o volume útil onde serão depositadas as embalagens com as fontes.

A cimentação do espaço anular entre a camisa de aço do poço e o meio geológico circundante é feita com pasta de cimento, por meio de sapata flutuante (figura 5.4). A cimentação do poço tem como objetivo isolar as diversas zonas estratigráficas atravessadas pelo furo, impedindo o livre caminho vertical de fluidos entre estas zonas. Serve, também, para proteger a camisa de aço contra a corrosão e funciona como barreira adicional à intrusão de água e à migração dos radionuclídeos, presentes no repositório, para o meio circundante. A cimentação do poço é realizada após concluída a perfuração. O cimento é considerado um material durável, tanto assim que é recomendado como material de imobilização de rejeitos radioativos. Contudo, a pasta de cimento utilizada na cimentação dos poços contém aditivos químicos que podem alterar as características do produto final quanto à sua resistência aos agentes agressivos do ambiente durante períodos prolongados de tempo. Esta é uma questão que será deixada para aprofundamento em futuros trabalhos.

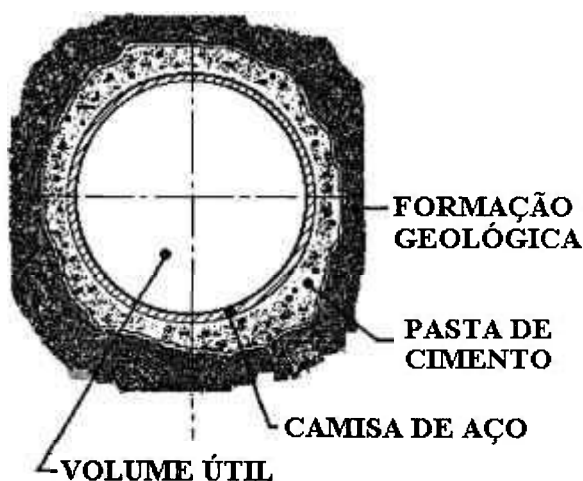


Figura 5.3 – Vista em corte do poço e do revestimento.

O tubo de encamisamento é introduzido até o fundo, e pasta de cimento é bombeada pelo tubo, deslocando a lama usada na perfuração, até preencher todo o espaço anular entre o tubo e a formação geológica (NELSON, 1990). Sapatas flutuantes são utilizadas como plugues para isolar a pasta de cimento dos fluidos de perfuração e de bombeamento da pasta. Após concluída a cimentação, o fluido de bombeamento é removido do poço.

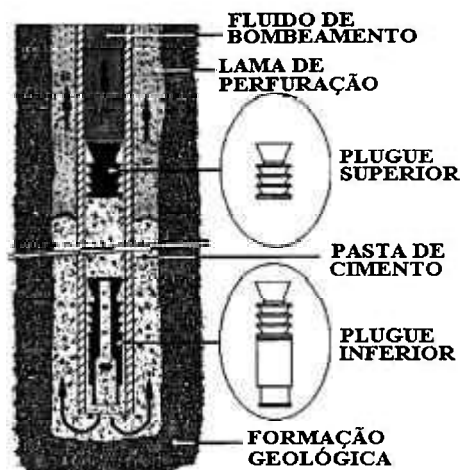


Figura 5.4 – Diagrama ilustrativo do método de cimentação do poço.

A estrutura do repositório, após concluída a cimentação do poço, está esquematizada na figura 5.5. As embalagens contendo as fontes podem ser depositadas no fundo do repositório por meio de uma ferramenta suspensa por cabos de aço, desde a superfície. Após esgotada a capacidade de armazenamento do repositório, concreto ou pasta de cimento são bombeados para o espaço acima das embalagens até a superfície, pelo mesmo processo já descrito, criando-se uma barreira à intrusão humana e ao escape dos materiais radioativos.

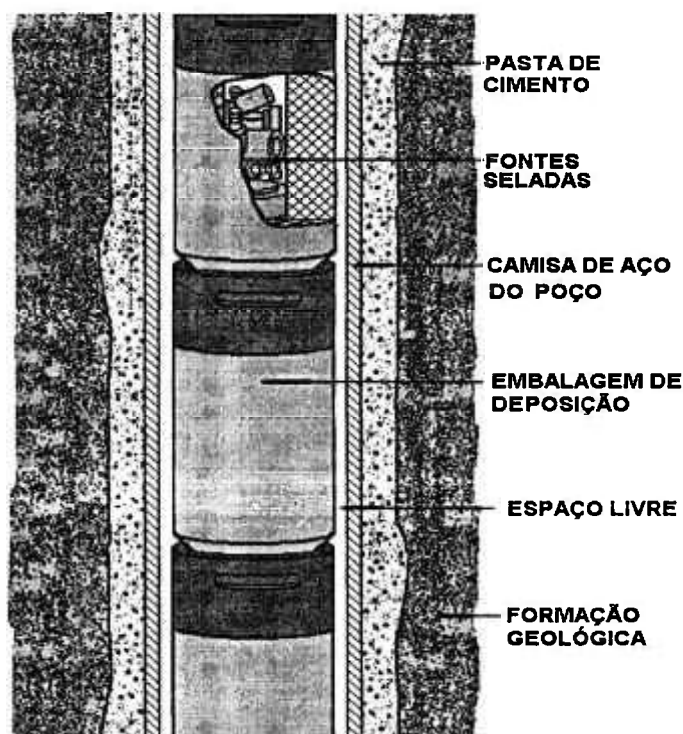


Figura 5.5 – Detalhe do método de deposição das fontes no repositório.

Este conceito de repositório permite o resgate das fontes, após terem sido depositadas, em qualquer tempo antes do fechamento definitivo da instalação. Ainda que as definições correntes de deposição final incluam explicitamente a idéia de não haver a intenção de remover o rejeito do repositório, foi explorada a alternativa de deixar meios para realizar a exumação das fontes antes do fechamento definitivo do repositório.

O desenho da embalagem de deposição permite o levantamento da embalagem, de volta para a superfície, com a mesma ferramenta utilizada para a colocação no fundo do poço. Além disso, nenhum material de imobilização é utilizado no interior da camisa do poço ou da embalagem. Uma vez que tenha sido decidido o fechamento definitivo do repositório, o selo de concreto ou pasta de cimento, será acrescentado desde o topo da última embalagem depositada, até a superfície do repositório, criando-se uma barreira contra a penetração tanto de fluidos da superfície como de indivíduos que, intencional ou inadvertidamente pretendam atingir a zona onde estão depositados os rejeitos.

A definição da política de gestão dos rejeitos no país deverá decidir se a deposição resgatável dos rejeitos favorece a aceitação pública de um repositório ou, se ao contrário, este ou outros fatores apontam para uma estratégia de deposição sem os meios de exumação das fontes.

5.2 – Embalagem de deposição

A proposta de embalagem para deposição está detalhada na figura 5.6. O desenho da embalagem permite acondicionar todas as fontes do inventário no repositório. Cerca de 300 embalagens, como a apresentada, são suficientes para acondicionamento de todo o inventário de fontes existente atualmente no Brasil.

De acordo com a figura 5.6, o volume útil de cada embalagem é $1,57 \text{ dm}^3$, mas adotou-se um fator de segurança de 1,5 para o preenchimento de cada uma, de modo que o volume ocupado com as fontes é 1 dm^3 , aproximadamente. No capítulo 4, estimou-se o volume total das fontes em 299 dm^3 , e, portanto, calcula-se em 300 embalagens o número necessário para acomodar o inventário brasileiro.

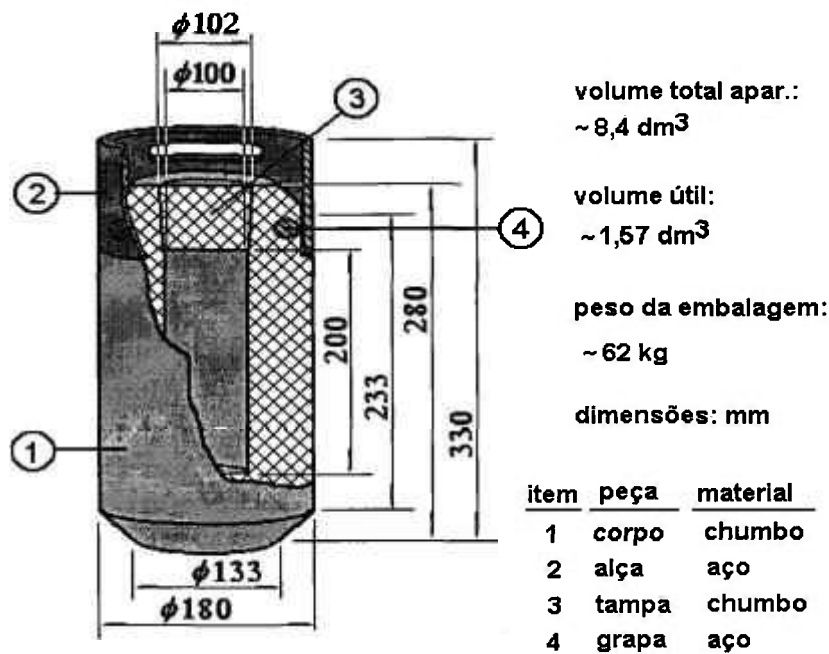


Figura 5.6 – Detalhes da embalagem para deposição das fontes.

A escolha do chumbo como material de construção foi baseada nas características de resistência à corrosão, custo e simplicidade de fabricação. Ele é freqüentemente o material com melhor desempenho como material de blindagem, considerando-se o preço e a facilidade de moldagem e usinagem das peças. Além disso, o chumbo tem excelente resistência à corrosão, tanto em uso industrial como exposto à intempérie e ao contato prolongado com o solo e com materiais de construção. Testes indicam perda de peso variando entre 0,3 µg/cm² e 0,14 mg/cm² após mais de uma década de exposição a meios agressivos no solo (LYMAN, 1961) e perdas de espessura variando entre 0,1 e 2 µm/ano na intempérie, 2 e 15 µm/ano exposto a águas naturais e entre 0,25 e 7 µm/ano exposto a diferentes solos (BOYER e GALL, 1985). Dividindo-se a espessura de chumbo da embalagem, 40 mm, pelo valor médio de taxa de corrosão, dentre os mencionados há pouco, chega-se a 5.700 anos. Mesmo considerando que esse cálculo não leve em conta os mecanismos de corrosão, o resultado indica a sobrevivência da embalagem por milhares de anos, sob as condições concebíveis que possam ocorrer no repositório.

5.3 – Processo de tratamento das fontes

O processo de acondicionamento das fontes está apresentado na figura 5.7. Nesse processo, as fontes seladas provenientes dos usuários são recebidas numa unidade central

de tratamento e armazenadas temporariamente para formação de bateladas. O tratamento consiste da remoção da blindagem original de transporte em uma cela blindada dotada de telemanipuladores e da colocação de uma batelada de fontes no recipiente de deposição final. A última etapa é a colocação das fontes no repositório, o descarte da sucata metálica remanescente para reciclagem e o tratamento dos rejeitos secundários produzidos no processo.



(*) Vazão ainda não determinada.

Figura 5.7 – Processo de tratamento das fontes seladas descartadas como rejeito.

Os fluxos e as vazões indicadas na figura são estimativas feitas a partir da experiência de gestão de rejeitos no IPEN, supondo-se um ritmo de descarte de fontes por parte dos usuários igual ao que foi praticado na década de 90. Os valores apresentados podem diferir dos valores que venham a ser efetivamente praticados porque a planta de tratamento tem flexibilidade para trabalhar em ritmo superior ou inferior ao indicado aqui. No caso do fluxo de rejeitos secundários, os dados são insuficientes para prever uma vazão anual de referência, e, por isso, a estimativa desse valor foi deixada para futuros trabalhos.

As duas linhas de entrada correspondem ao ingresso das fontes seladas provenientes dos usuários (linha 1) e das fontes provenientes do tratamento de pára-raios radioativos e detetores de fumaça (linha 2). As fontes recebidas são examinadas com relação à sua documentação, às suas características físicas e radiológicas e, por fim, são identificadas para ingresso na instalação.

A linha 3 corresponde à colocação das fontes no depósito temporário, representando o fluxo de entrada de fontes no depósito, com controle de localização, como número do palete, número da prateleira etc.

A linha 4 corresponde à colocação de um grupo de fontes dentro da cela blindada para a operação de remoção da blindagem original, quando for o caso, e para o acondicionamento das fontes na blindagem de deposição. O tamanho da batelada e a definição das fontes que integram o grupo serão definidos em função da taxa de exposição nos operadores da cela blindada e durante o transporte até o repositório. Deverão ser levadas em conta também as características das fontes, pois é recomendável que cada embalagem contenha fontes com valores de meia-vida próximos.

A linha 5 corresponde ao descarte das blindagens e embalagens originais, após verificação para garantir que não contenham mais fontes radioativas e após controle de contaminação.

A linha 6 corresponde ao transporte das fontes nas embalagens de deposição desde o local da cela blindada até o poço de deposição.

Por fim, a linha 7 corresponde à remoção dos rejeitos radioativos secundários gerados na operação da cela blindada, tais como objetos contaminados, material de limpeza e outros materiais gerados durante o trabalho de embalagem das fontes, que precisam ser descartados.

5.4 – Instalações de superfície

As instalações de superfície, necessárias para realizar a deposição das fontes seladas de acordo com o processo proposto, são compostas de uma planta de tratamento das fontes, de um armazém temporário, oficinas, escritórios e demais edifícios de pessoal de operação, proteção radiológica, administração e segurança física e de uma torre de guincho para movimento das fontes para dentro do repositório. A figura 5.8 é uma representação esquemática das instalações de superfície de um possível sistema de disposição.

O armazém temporário é uma edificação para acomodar as fontes seladas que chegam para disposição final. Contém, basicamente, estantes porta-paletes, equipamentos para movimento de carga e equipamentos de controle radiológico de exposição à radiação. As fontes são estocadas para formar bateladas que serão acondicionadas na mesma embalagem de disposição segundo critérios de meia-vida, tipo de fonte ou outro critério que permita uma gestão racional do volume útil do repositório e considere também questões de blindagem e eventual resgate futuro das fontes para fora do repositório.

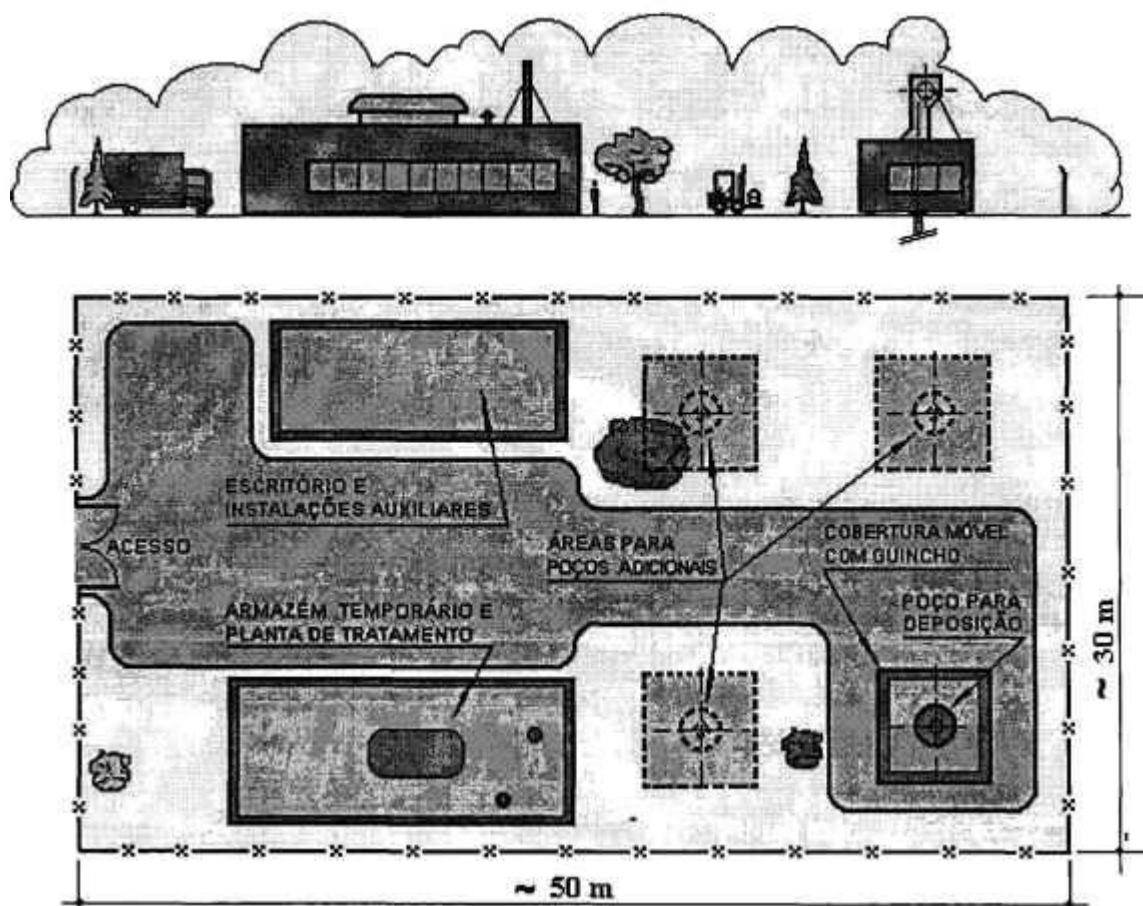


Figura 5.8 - Croqui do arranjo geral das instalações de superfície.

A planta de tratamento é uma edificação para acomodar a cela blindada na qual as fontes são removidas de suas blindagens originais e acondicionadas na embalagem de disposição final. Nessa cela poderão ser realizadas também operações necessárias para acomodar fontes especiais no espaço útil das embalagens, como corte, dobra ou outra operação, nos casos em que as dimensões e a geometria das fontes estiverem fora dos padrões adotados.

A torre de guincho é instalada em um edifício móvel para cobertura do poço, que acomoda o equipamento necessário para descer as embalagens de disposição até o fundo do repositório. Pode ser construído de forma a poder ser deslocado para novas posições, no caso de que poços adicionais sejam construídos, dentro do programa de gestão das fontes no país.

Os edifícios auxiliares destinam-se a acomodar o pessoal de operação, de segurança e administrativo, assim como outras tarefas auxiliares à operação da instalação.

O número, a disposição dos edifícios e as suas dimensões são apenas ilustrativos, porque está fora do escopo deste trabalho discutir detalhes desses aspectos do sistema de deposição. Será deixado para futuros trabalhos detalhar essa parte do sistema de deposição.

Como conclusão deste capítulo, pode-se afirmar que foram alcançados os objetivos de números 9, 10, 11 e 12 do presente trabalho, que eram descrever um conceito de repositório, um processo de tratamento, uma embalagem de deposição e instalações de superfície que permitissem fazer a gestão das fontes seladas descartadas como rejeito radioativo, como foi proposto na seção 1.4 do primeiro capítulo.

inaceitável em um repositório de superfície, determinou que todas as fontes fossem armazenadas de forma resgatável até que estivessem estabelecidos os critérios de aceitação no futuro repositório nacional. Conseqüentemente, as fontes passaram a ser armazenadas nas blindagens originais, à espera de um plano final de gestão.

Ainda que a falta de alternativas de deposição afete somente uma parcela das fontes seladas, duas características peculiares favorecem a opção por uma gestão de todo o inventário, de forma independente dos outros rejeitos: o volume reduzido e a concentração elevada de atividade.

As fontes seladas inventariadas neste trabalho apresentam um volume aparente estimado em 300 dm^3 , aproximadamente. Esse volume é uma fração insignificante do volume dos outros rejeitos institucionais produzidos no país. Contudo, a sua atividade total excede ao limite de atividade de um repositório de superfície típico. A título de exemplo, compare-se a atividade total do inventário brasileiro de fontes, que está estimada em $3,38 \times 10^{16} \text{ Bq}$, com o limite de atividade total no repositório espanhol de El Cabril, que é $2,8 \times 10^{16} \text{ Bq}$ (RUIZ e ALONSO, 1993). A atividade das fontes emissoras de partículas alfa do inventário brasileiro, $6,04 \times 10^{13} \text{ Bq}$, também excede o limite de atividade total dos emissores alfa no repositório espanhol, que é de $2,7 \times 10^{13} \text{ Bq}$.

A parcela das fontes que está impedida de deposição num repositório de superfície teria destinação indefinida até o momento. De acordo com o OIEA, um destino possível poderia ser os repositórios profundos dos países desenvolvidos, destinados aos rejeitos do fim do ciclo do combustível nuclear, quando estiverem operacionais.

Há dois pontos a questionar nessa estratégia. Em primeiro lugar, os prazos para que esses repositórios estejam operacionais são incertos. Estima-se atualmente que começarão a aceitar rejeitos para deposição dentro de algumas décadas. Esse período de armazenamento longo provocará o acúmulo de fontes armazenadas, com crescente risco de acidentes, principalmente nos países em desenvolvimento. Em segundo lugar, não há garantias de que seja viável transferir esses rejeitos àqueles países, por causa da forte oposição pública aos repositórios e, mais ainda, aos rejeitos “importados”. São episódios cada vez mais freqüentes em todo o mundo a organização popular para impedir o transporte transfronteiriço de rejeitos radioativos.

Em vista desses fatos, a definição de um destino imediato para todas as fontes seladas tem o mérito de proporcionar garantia de segurança, a longo prazo, para a gestão das fontes. Sendo esse destino a própria região geográfica que originou esses rejeitos, essa definição tem o mérito de evitar um curso de ação controverso e com incerteza de sucesso.

Um repositório dedicado às fontes seladas que seja viável economicamente para os países em desenvolvimento é uma alternativa de resposta aos problemas apontados.

6.2 – Análise comparativa com o similar

Uma proposta de repositório, similar à apresentada no presente trabalho, apareceu na literatura recentemente (BLERK et al., 1999) e está descrita na seção 3.2.2 do capítulo 3. Aquele conceito é, em resumo, um poço tubular com até 100 metros de profundidade, perfurado em rochas permeáveis, revestido com tubo de PVC e preenchido com argila no espaço anular entre o tubo e o meio. As fontes são imersas em pasta de cimento dentro de recipientes de aço, os quais são colocados dentro do tubo de PVC, em intervalos regulares, e o espaço restante é preenchido com concreto. O conceito defendido nesta tese já estava delineado e detalhado quando aquele trabalho se tornou público. É um exemplo de convergência simultânea para conceitos semelhantes. Contudo, vários aspectos são diferentes entre o similar mencionado e o conceito apresentado neste trabalho.

Dentre as diferenças, destacam-se os cinco pontos que são discutidos a seguir:

- meio geológico;
- profundidade (acessibilidade à intrusão);
- materiais de construção;
- processo de deposição do rejeito;
- reversibilidade da deposição.

Inicia-se esta análise destacando-se que a preocupação motivadora na elaboração de um conceito de repositório é isolar as fontes da biosfera, por tempo suficiente, para que o decaimento torne-as inócuas. A idéia de colocá-las em um meio geológico profundo e impermeável à água, como num batólito granítico, reflete essa preocupação. Uma parte

significativa das fontes, e em particular aquelas com maior risco radiológico a longo prazo, por exemplo Rádio-226, Amerício-241 e Amerício-241-Berílio, terão decaído para valores inócuos somente após vários milênios. O repositório deve ficar, portanto, isolado da biosfera por um período equivalente.

Quando se avalia a questão da intrusão humana no repositório, a profundidade da zona de deposição das fontes tem, também, importância significativa. Ainda que a escolha do local seja feita considerando-se a ausência de minerais de interesse econômico, as chances de intrusão inadvertida ou intencional, pelas populações futuras, devem ser minimizadas. Nesse sentido, a colocação dos rejeitos a algumas centenas de metros de profundidade diminui a probabilidade de encontro fortuito entre as fontes e pessoas no futuro, por exemplo, os trabalhadores em obras de estradas, túneis, edificações, ou outras obras civis capazes de remodelar o relevo do terreno. É também um desincentivo à escavação arqueológica, pelo custo elevado e dificuldade de penetração em uma rocha sã de granito, sem uma recompensa visível para justificá-la.

O ponto seguinte de comparação está relacionado com o material de revestimento do poço. A escolha de um revestimento de aço proporciona maior estabilidade da estrutura em comparação com os polímeros orgânicos, que se degradam e perdem as suas propriedades estruturais por ataque químico, por radiólise, por aumento da temperatura ou pela ação bacteriana. A sequência de materiais empregados no conceito de barreiras múltiplas do repositório proposto também aumenta o grau de isolamento dos rejeitos, em comparação com o similar. A primeira barreira é o revestimento com pasta de cimento, entre a camisa de aço e a formação geológica hospedeira. Essa tecnologia é empregada no revestimento de poços de petróleo e é efetiva sob as altas pressões e temperaturas encontradas nos poços profundos de prospecção e extração. A segunda barreira é a camisa de aço. A terceira barreira é a embalagem de chumbo, um material de grande inércia química e de grande durabilidade. A taxa de corrosão do chumbo, observada em diversos meios agressivos naturais, permite estimar a durabilidade das embalagens em vários milhares de anos.

O penúltimo ponto a ser analisado está relacionado com o processo de imobilização das fontes nas embalagens de deposição. No conceito desenvolvido neste trabalho, levou-se em consideração os aspectos operacionais de tratamento das fontes. A remoção das

fontes de suas blindagens originais requer operação em cela blindada com telemanipulação. Evitou-se, por isso, o emprego do cimento como matriz de imobilização das fontes. A operação de cimentação dificulta a manutenção de ambiente limpo dentro das celas quentes. Pela tecnologia desenvolvida neste trabalho, a colocação das fontes nas embalagens de deposição é feita imediatamente após a remoção da blindagem original e a selagem da embalagem de deposição dispensa o uso de equipamento de solda, outro grande inconveniente do processo similar.

O último aspecto de destaque está relacionado com a questão do resgate dos rejeitos depositados, a qualquer tempo antes do fechamento definitivo do repositório. As fontes são depositadas, dentro de suas blindagens, no fundo do repositório, por meio de uma ferramenta suspensa por cabos desde a superfície. O içamento das embalagens pode ser feito com a mesma ferramenta, antes do fechamento definitivo do repositório. Ainda que a idéia de deposição final esteja associada com a intenção de não remover os rejeitos, o conceito de armazenamento resgatável, “retrievable storage”, para indicar o termo em inglês utilizado internacionalmente, pode ser utilizado para alcançar o endosso político à deposição. Órgãos licenciadores e o público em geral sentem-se mais confortáveis se o processo é reversível. Ainda que tecnicamente seja plenamente defensável que será desnecessário resgatar as fontes de dentro do repositório, essa característica do conceito pode ser favorável para viabilizar o empreendimento.

6.3 – Aspectos técnicos, econômicos e de segurança radiológica

A viabilidade da implantação de um repositório para as fontes seladas depende de fatores como tipo e custo da tecnologia empregada e do desempenho do repositório em relação à sua segurança radiológica. Estes dois aspectos, tecnologia e desempenho radiológico, são abordados a seguir.

6.3.1 – Análise técnica e econômica

A viabilidade técnica e econômica do repositório é discutida em relação aos seguintes aspectos:

- capacidade para atender à demanda atual;
- disponibilidade de tecnologia para sua construção;
- custo de implantação e operação.

6.3.1.1 – Capacidade para atender à demanda

Entende-se como capacidade para atender à demanda a capacidade de acomodar todo o inventário de fontes seladas existentes no país, incluindo-se aquelas que já foram descartadas como rejeito radioativo e aquelas que ainda estão em uso.

Para dimensionar essa demanda, foram inventariadas todas as fontes potencialmente classificáveis como fontes seladas e foram utilizadas as informações mais completas disponíveis. Os resultados estão apresentados no capítulo 3. Deve-se considerar, porém, que há incertezas quanto ao número exato de fontes existentes no momento, tanto por incompleteza dos bancos de dados como também pela própria natureza dinâmica do inventário. Essas incertezas, ainda que não tenham sido estimadas, são suficientemente pequenas para limitar qualquer impacto negativo sobre a capacidade do repositório em atender à demanda. O conceito proposto admite, também, que margens de segurança nas dimensões da instalação acomodem variações no inventário, sem inviabilizar o método de deposição.

Outro ponto a considerar sobre a capacidade do repositório é que a maioria das fontes inventariadas está em uso atualmente, e o prazo para descarte de cada uma delas é muito variável e depende da vida útil e data de fabricação, além de outros fatores. Esse prazo pode estender-se por até algumas décadas. Nesse ínterim, novas fontes serão incorporadas ao inventário de fontes do país e, eventualmente, descartadas antes daquelas. Considerando-se este fato, a capacidade nominal do repositório foi baseada no inventário atual. Se a previsão feita no capítulo 2, de o crescimento do uso de fontes seladas concretizar-se, a instalação com a capacidade projetada neste trabalho será insuficiente para acomodar todos os rejeitos que serão gerado durante a vigência dessa tecnologia. Não obstante, o conceito modular de repositório proposto permitirá acomodar o crescimento futuro da demanda, expandindo a capacidade de armazenamento com a construção de novos poços, como está indicado na figura 5.8. É preciso destacar que o conceito de

repositório proposto tem essa vantagem em comparação com outras tecnologias de deposição.

Por fim, é preciso discutir os resultados obtidos no capítulo 4, onde foi desenvolvido um método para selecionar as fontes que poderiam ser encaminhadas aos repositórios de superfície, com tecnologia já conhecida, e aquelas para as quais é recomendável a deposição em repositórios profundos. Pelos resultados apresentados nas tabelas 4.6 a 4.9, pode-se observar que, para vários dos cenários postulados no processo de seleção das fontes, e relativamente à atividade, ao número de fontes e ao volume que ocupam, as frações são pequenas e, em alguns casos, essencialmente nulas. Estes resultados poderiam indicar que o repositório proposto é irrelevante frente ao problema de gestão dos rejeitos radioativos em geral. Cabe, para esclarecer este ponto, destacar que há uma particularidade no inventário brasileiro de fontes seladas, que afeta significativamente os resultados: a presença de 200.000 fontes de ^{60}Co de um irradiador de grande porte, cuja atividade soma mais de 98 % do total, 48 % no número de fontes e 20 % do volume do inventário. Como a meia-vida desse radionuclídeo é pequena se comparada aos tempos previstos de decaimento no repositório, particularmente nos cenários com 200 e 300 anos de decaimento, sua eliminação por decaimento resulta em frações próximas de zero para a atividade, e em frações pequenas para o número de fontes e para o volume dos radionuclídeos restantes, frente ao total.

A partir dessas observações, conclui-se que o repositório proposto tem capacidade para receber todo o inventário de fontes seladas com folga suficiente para acomodar eventuais variações nas quantidades determinadas neste trabalho.

6.3.1.2 – Disponibilidade de tecnologia

Com relação à viabilidade técnica para realização de um empreendimento dessa natureza, o critério para análise foi a disponibilidade, no país, de tecnologia comprovada. Para verificar esse ponto, dentre as dezenas de empresas existentes no país no ramo de perfuração de poços, que foram arroladas pelo Instituto de Pesquisa Tecnológicas de São Paulo (IGOMASA, 1999), três empresas foram convidadas a enviar propostas técnicas de orçamento. Foi solicitado às empresas que especificassem os métodos de construção, as

normas utilizadas, os materiais empregados, os prazos e os custos, com base na especificação de um poço com as características descritas no capítulo 4. Uma das empresas forneceu uma proposta completa de execução da obra, com prazos de execução, custos e demais condições de contrato (CPA, 1999). As outras duas afirmaram ter capacidade para executar a obra, mas não se interessaram por apresentar uma proposta naquele momento.

Como resultados dessa investigação, pôde-se concluir que a construção de uma instalação como a descrita é obra comum no país, com tecnologia comprovada e utilizada rotineiramente na exploração de recursos hídricos, minerais e em obras civis.

6.3.1.3 – Custo de implantação e operação

Em relação ao custo de colocação dos rejeitos no repositório, a viabilidade econômica do sistema proposto pode ser enfocada sob três aspectos: em primeiro lugar, o volume total de recursos que deverão ser mobilizados para implantação e operação dessa instalação, em toda sua vida útil; o segundo aspecto é a comparação desse investimento com aquele necessário para solucionar o problema de destinação das fontes por outros meios; o terceiro é o custo do descarte de cada fonte no sistema de deposição proposto, em comparação com os custos normais do emprego das fontes em suas aplicações usuais. Está fora do escopo deste trabalho fazer essas avaliações em detalhe, e, por isso, foram feitas apenas estimativas da ordem de grandeza dos valores, para poder, nessa etapa, ter um indício de viabilidade. O estudo econômico detalhado será deixado para futuros trabalhos.

a) Volume de investimentos: O montante dos recursos financeiros que deverão ser alocados para construir e operar a instalação proposta dependerá de muitos fatores, cuja avaliação está fora do escopo de trabalho nesta fase do estudo. Os custos do terreno, das vias de acesso, das instalações de superfície e, principalmente, da escolha do local e do licenciamento da instalação, que podem ser compartilhados com a implantação de um repositório de superfície, influem significativamente no volume dos investimentos.

Apenas dois itens de custo foram estimados neste estudo: o de perfuração e acabamento do poço e o de construção das instalações de superfície.

Adotou-se como estimativa do custo de perfuração e acabamento do poço o orçamento apresentado pela empresa consultada, afetado de um fator de segurança de 1,5. De acordo com a proposta da empresa (CPA, 1999), a perfuração e o acabamento de um poço com até 400 metros de profundidade, num local com o perfil litológico apresentado na figura 5.2, tem preço equivalente a US\$ 100.000, resultando numa estimativa de US\$ 150.000 para esse item de custo.

Em comparação, a estimativa feita por BLERK et al. (1999) para os poços de até 100 metros de profundidade, perfurados em argila e ardósia, revestidos com tubos de PVC, sem revestimento de cimento, em alguns países africanos, é de até US\$ 8.000. Essa estimativa foi feita, considerando-se diversas alternativas de tecnologia de perfuração e a disponibilidade dessas tecnologias nos países estudados. Considerando-se as diferenças de conceito, aceita-se a magnitude da estimativa feita acima como um valor de referência para o custo de perfuração e acabamento do poço.

Com relação às instalações de superfície, os investimentos necessários para sua construção foram estimados com base em informações da literatura, e adotou-se, como valor de referência, US\$ 150.000, para essa parte do empreendimento. Para sustentar esse valor, pode-se tomar o exemplo de FEIZOLLAHI e SHROPSHIRE (1992), que estimaram em US\$ 160.000, aproximadamente, o custo das instalações auxiliares para um repositório de pequenas dimensões, nos EUA. Outro exemplo é o de KOZAK et al. (1999), que estimaram em US\$ 150.000 o custo de uma instalação móvel para acondicionamento de fontes em países africanos, incluindo blindagens, telemanipuladores, embalagens e dispositivos de manuseio das fontes. Por fim, como último exemplo, veja-se o caso de uma cela blindada para remoção das fontes de suas blindagens originais, que está sendo projetada no IPEN e que tem seu custo estimado em US\$ 100.000, incluindo-se a blindagem, pinças e rótulas, visores de vidro plumbífero e demais equipamentos (ENDO, 2001).

b) Custo de outras alternativas: A estimativa para o custo das instalações de superfície e perfuração e acabamento do poço de deposição resulta em US\$ 300.000. Esse valor deve ser comparado com as informações da literatura sobre os investimentos necessários para a construção de repositórios de superfície para rejeitos radioativos institucionais, os quais se

situam na faixa de US\$ 6 milhões (DAMES e MOORE, 1993) a US\$ 160 milhões (FEIZOLLAHI e SHROPSHIRE, 1992).

c) Custo unitário de deposição: Com respeito ao custo de colocação de uma fonte no repositório proposto, os critérios de cálculo devem levar em conta a meia-vida dos radionuclídeos e o volume das fontes, além de outros fatores, mas, para estimar a ordem de grandeza daquele valor, dividiu-se o custo de construção do repositório e das instalações de superfície pelo número de fontes a serem depositadas nele, usando-se a atividade da fonte como fator de ponderação. O custo de construção estimado é US\$ 300.000, e a atividade total é $3,38 \times 10^{16}$ Becquerel. O custo de deposição de uma fonte de ^{137}Cs com 0,05 TBq, a atividade média do inventário brasileiro de fontes de ^{137}Cs , é, portanto, de US\$ 0,44. O mesmo cálculo para uma fonte de 0,13 TBq de $^{241}\text{Am-Be}$ resulta em US\$ 1,15. Esses valores devem ser entendidos como uma fração do custo total, tendo-se em vista que o custo total da construção, operação e fechamento de um repositório inclui muitos outros itens, além daqueles considerados nesta avaliação.

Os valores cobrados pelos repositórios comerciais para a deposição de fontes seladas não foram encontrados na literatura. Contudo, para estabelecer uma comparação, os preços para rejeitos radioativos em geral foram utilizados como valor de referência. O custo de deposição de rejeitos em repositórios comerciais nos EUA, obtido a partir de informações adaptadas de FEIZOLLAHI e SHROPSHIRE (1992), era estimado em US\$ 10.700 por m^3 . Em outra referência (NUTRINO, 2001), a deposição de tambores de 200 litros contendo rejeitos radioativos gerados em laboratórios universitários estava orçada em cerca de US\$ 1.700 por tambor, no repositório de Barnwell, Carolina do Sul, EUA. Os dois valores são consistentes. Para adaptar esses valores para as fontes seladas, utilizou-se como critério a atividade-limite para embalagem tipo A2, dos regulamentos de transporte. O limite de atividade de ^{137}Cs por embalagem é 0,5 TBq, e o limite de atividade de ^{241}Am é 0,0002 TBq. Como as atividades médias do inventário são 0,04 TBq e 0,00008 TBq, respectivamente, pode-se estimar um custo médio de deposição de US\$ 136 por fonte de ^{137}Cs e US\$ 680 por fonte de ^{241}Am do inventário brasileiro, nos repositórios comerciais americanos.

Por fim, os custos de deposição podem ser comparados com o custo de utilização dessas fontes, como meio de avaliar se o descarte como rejeito poderia inviabilizar ou

desincentivar a sua utilização nas aplicações tecnológicas atuais. Os preços correntes, em setembro de 2001, de fontes seladas de ^{137}Cs , ^{241}Am e ^{241}Am -Berílio são US\$ 3.925, US\$ 4.955 e US\$ 6.500, respectivamente (ACTIVA, 2001). Esses números servem para indicar que o custo de deposição é uma fração pequena do custo total do ciclo de vida de uma fonte selada.

6.3.2 – Viabilidade no aspecto de segurança radiológica

A análise dos aspectos de segurança radiológica do repositório proposto empreendida neste trabalho é uma comparação das características da proposta com os padrões de qualidade aceitos internacionalmente. Esse critério de análise permite avaliar a proposta, ao mesmo tempo que dispensa um estudo de impacto radiológico por meio de modelagem e uso de códigos computacionais, que está fora do escopo do presente trabalho e poderá ser deixado para futuros trabalhos.

A acolhida de uma nova concepção de repositório deve estar baseada em uma garantia razoável de que a instalação cumprirá com os requisitos de segurança. Esses requisitos formam um conjunto de características contra o qual a proposta é comparada e julgada.

A experiência internacional consolidada em documentos da CIPR e nos livros da “Série de Segurança” do OIEA, que especificam e detalham componentes dos sistemas de deposição e estabelecem suas características desejáveis e seus desempenhos mínimos aceitáveis, serve de padrão de qualidade para a avaliação do conceito de repositório.

Os seguintes documentos foram utilizados na análise:

- Recomendações de proteção radiológica aplicadas à deposição de rejeitos radioativos sólidos de meia-vida longa (ICRP, 2000);
- Avaliação de segurança para a disposição de rejeitos radioativos em repositórios de superfície (IAEA, 1999b);

- Requisitos para a deposição de rejeitos radioativos próximo à superfície (IAEA, 1999c);
- Requisitos de segurança para a deposição de rejeitos próximo à superfície (IAEA, 1998b);
- Guia de segurança para a localização de repositórios profundos (IAEA, 1994a)
- Princípios de segurança e critérios técnicos para a deposição subterrânea de rejeitos radioativos de atividade alta (IAEA, 1989);
- Livro guia para a deposição de rejeitos radioativos sólidos de atividade baixa e intermediária em cavidades rochosas (IAEA, 1983a);
- Conceitos e exemplos de análises de segurança para repositórios em formações geológicas continentais (IAEA, 1983c)
- Critérios para a deposição subterrânea de rejeitos radioativos sólidos (IAEA, 1983b);
- Guia básico para a deposição subterrânea de rejeitos radioativos (IAEA, 1981);

As características do repositório proposto foram comparadas com cada um dos critérios, requisitos, recomendações e restrições dos documentos citados, cada um deles aplicáveis aos seguintes aspectos, discutidos em seguida:

- A) Conceito do sistema de deposição
- B) Características do meio geológico
- C) Características do repositório
- D) Características dos rejeitos
- E) Outros requisitos gerais

A) Conceito do sistema de deposição

A-1) A avaliação do desempenho de um sistema de deposição deve ter uma abordagem sistêmica, em que a segurança esteja baseada no conceito de barreiras múltiplas e seja alcançada pelo conjunto de componentes do repositório.

Este critério foi incorporado no conceito de repositório proposto, em que o isolamento dos rejeitos é alcançado pela combinação de profundidade, meio geológico, materiais de construção e múltiplas barreiras entre os rejeitos e o meio ambiente.

A-2) O conceito do repositório deve ser tal que eventuais falhas na estrutura não impliquem em uma rota preferencial de migração dos radionuclídeos.

A simplicidade estrutural e a existência de barreiras múltiplas conferem robustez ao conceito e fazem com que a integridade do isolamento possa ser esperada a longo prazo, mesmo que ocorram falhas em uma das estruturas.

A-3) O conceito do repositório deve ser tal que os rejeitos sejam mantidos isolados por um tempo de decaimento suficiente, considerando-se as características dos rejeitos depositados.

Considerando-se que é impossível manter os rejeitos em isolamento completo indefinidamente, é necessário um isolamento inicial até que a atividade tenha decaído para valores inócuos. Pela experiência internacional no desenvolvimento de repositórios para os rejeitos de alta atividade, um período de isolamento de alguns milhares de anos é perfeitamente aceitável e alcançável em meios geológicos profundos e é suficiente, no caso dos rejeitos depositados no repositório proposto, para decair até valores da mesma ordem de grandeza da radioatividade natural ao redor do repositório. A demonstração desse fato foi deixada para futuros trabalhos.

A-4) A profundidade do repositório deve ser suficiente para que os rejeitos não venham a ser expostos enquanto a atividade ainda representar perigo.

Enquanto, no item anterior, a preocupação era com a migração dos radionuclídeos no ambiente, neste item a preocupação é com a exposição do rejeito na superfície, por fenômenos naturais ou induzidos pelo homem, que removam a camada superior de isolamento ou tragam o repositório para a superfície. A profundidade de deposição, aliada às características do meio geológico, minimiza a possibilidade desse tipo de ocorrência durante o tempo necessário para o decaimento das fontes, ainda que seja possível que ocorra essa exposição em eras geológicas futuras.

- A-5) *O conceito do repositório deve ser tal que seja possível fazer a deposição, mantendo-se as doses recebidas pelos trabalhadores e pelos indivíduos do público, durante as operações normais de deposição, abaixo dos limites apropriados e mantendo-se as conseqüências de eventuais acidentes em valores aceitáveis.***

O modo como se prevê a colocação dos rejeitos no repositório é compatível com as operações realizadas rotineiramente na produção, transporte e utilização das fontes seladas nas aplicações tecnológicas usuais. A parte do processo que consiste em transportar as fontes para a cela blindada de tratamento, em remover as fontes das blindagens originais e em colocá-las em embalagens destinadas à deposição, já é realizada rotineiramente dentro dos padrões de radioproteção vigentes. Como essas são as etapas que apresentam o maior potencial para irradiar os trabalhadores ou os indivíduos do público, em operação normal e em situações acidentais, conclui-se que o conceito de repositório atende a esse requisito.

- A-6) *A localização, projeto, construção e operação do repositório devem ser otimizados para garantir que os efeitos adversos no meio ambiente e nos recursos naturais sejam mantidos tão pequenos quanto seja racionalmente exeqüível, agora e no futuro. Os efeitos adversos que devem ser considerados incluem também os efeitos sobre a disponibilidade e conservação de recursos naturais, liberação de poluentes não radioativos no ambiente, degradação ambiental decorrente da escavação do repositório e de outras operações industriais relacionadas com o sistema de deposição, efeitos adversos sobre plantas e animais, degradação da qualidade de fontes de água potável e outros.***

Sob todos esses aspectos, o conceito de repositório desenvolvido neste trabalho tem desempenho melhor que outros sistemas em decorrência das pequenas dimensões, uso reduzido de materiais, volume insignificante de material escavado e uma perturbação quase puntiforme no ambiente. Não obstante, a otimização da proteção radiológica, tanto no desenvolvimento do conceito como na operação da instalação, deve ser realizada, sendo esse um tema para futuros trabalhos.

- A-7) *O conceito deve ser tal que as alterações indesejáveis, provocadas pela construção do repositório no meio geológico e principalmente nas suas características hidrológicas, não diminuam a capacidade do meio geológico de funcionar como barreira à migração das substâncias radioativas depositadas.***

O repositório do tipo poço tubular é o que apresenta a menor perturbação no meio geológico, alterando-o somente nos limites do próprio poço. A extensão lateral do repositório é desprezível, e a cimentação do poço, em toda sua profundidade, impede o transporte de fluidos entre as diferentes camadas estratigráficas atravessadas pela estrutura, e não provoca alteração no fluxo normal das águas subterrâneas. O método proposto de perfuração do poço não induz o aparecimento de fraturas de extensão significativa.

A-8) *O conceito do repositório deve favorecer a segurança durante a fase operacional, de fechamento e de selagem final.*

O que se pode argumentar é que o transporte dos rejeitos desde a superfície até o ponto de deposição é feito de forma autoblindada, da mesma forma que, durante a selagem para fechamento definitivo do repositório, é razoável supor que não haverá exposição laboral ou do público acima do aceitável.

A-9) *Flexibilidade para atender à elasticidade da demanda.*

A capacidade nominal do sistema de deposição proposto neste trabalho foi calculada para acomodar todas as fontes existentes no país atualmente. Em consequência do caráter dinâmico do inventário de fontes e por causa das variações decorrentes das políticas de gestão dos rejeitos radioativos que venham a ser adotadas no país, a demanda real poderá ser maior ou menor do que aquela utilizada como base de cálculo. Em qualquer dos dois casos, o sistema proposto tem flexibilidade para acomodar essas variações. Poços adicionais poderão ser perfurados nas adjacências do primeiro, à medida que forem necessários, para atender ao crescimento da demanda, ou o poço em operação poderá ser utilizado abaixo da capacidade máxima, em caso de redução da demanda prevista, sem prejudicar o desempenho do sistema.

A-10) *Reversibilidade.*

O sistema de deposição proposto permite que, a qualquer tempo durante a operação da instalação, as fontes sejam resgatadas e trazidas à superfície, com os recursos já disponíveis na planta. Isso permite que futuros desenvolvimentos possam ser incorporados ao plano de gestão das fontes, atendendo a mudanças na política geral de gestão dos rejeitos radioativos no país. Por outro lado, a exumação das fontes requer informações e competências que estão disponíveis geralmente somente aos

operadores, de forma que o sistema é razoavelmente seguro contra ações mal-intencionadas.

A-11) *Impacto sobre o uso da terra.*

O conceito de repositório proposto é, dentre os sistemas existentes atualmente, o que apresenta o menor impacto sobre o uso e ocupação da terra, tendo-se em vista que as necessidades de terreno são menores que em outros tipos de repositório.

B) Características do meio geológico

B-1) *O tipo de meio geológico deve ser escolhido considerando-se as propriedades da rocha quanto à susceptibilidade à deformação, resistência à ruptura, permeabilidade, solubilidade, susceptibilidade à degradação pela ação dos rejeitos ou das barreiras artificiais interpostas, estabilidade física e química, homogeneidade e valor econômico.*

As rochas cristalinas são consideradas, em geral, meios adequados, e o granito é o meio preferido em diversos países para a deposição dos rejeitos do final do ciclo do combustível. O granito apresenta baixa permeabilidade, exceto em zonas fraturadas, e contém pouca ou nenhuma água circulante. Além disso, tem grande estabilidade física e química, ocorrendo em formações maciças, homogêneas e duráveis, que possuem pouco ou nenhum valor econômico.

B-2) *O meio geológico deve ter espessura e extensão suficientes para prover uma zona de proteção ao redor do repositório e, principalmente, para separação e distanciamento das transições entre as diferentes camadas e falhas ao redor do meio selecionado.*

A escolha de um batólito de granito assegura características favoráveis sob esse aspecto. Um batólito é definido como um grande corpo de rocha plutônica, contínuo na profundidade, portanto sem descontinuidades no seu embasamento, e com extensão lateral da ordem de 100 km².

- B-3) *O meio geológico deve ter estabilidade pelo tempo necessário ao isolamento dos rejeitos, devendo estar localizado em áreas de pequena atividade tectônica e sísmica, longe de falhas ativas.***

Esses critérios estão relacionados mais com o local escolhido do que propriamente com o meio; o tipo de meio escolhido, porém, favorece a seleção do local para a construção do repositório.

- B-4) *O repositório deve ser afastado de depósitos minerais que possam ser de interesse para futuras explorações. A observância desse critério é importante tanto para não privar as futuras gerações do acesso às fontes de matéria-prima, como para que a exploração de recursos minerais no futuro não interfira no meio ao redor do repositório, reduzindo sua capacidade para isolar os rejeitos.***

A escolha de um batólito de granito, a centenas de metros de profundidade, cumpre com esse requisito. Ainda que o granito possa ter algum valor econômico, a existência de fontes mais acessíveis torna o local do repositório não atrativo à mineração.

- B-5) *O repositório deve ser localizado em um ambiente hidrogeológico em que seja mínimo o fluxo de água.***

O conceito de repositório apresentado prevê a deposição em uma rocha sã, portanto com baixa permeabilidade e com fluxo de água somente nas camadas estratigráficas superiores, afastadas da zona de deposição.

- B-6) *As características físico-químicas e geoquímicas do ambiente geológico devem tender a limitar o transporte de radionuclídeos.***

O granito tem propriedades de adsorção variável, com coeficientes elevados para tecnécio, európio, neptúnio e amerício e moderados para estrôncio e cério, havendo indícios da ocorrência de sorção irreversível (SKAGIUS, 1992). É, portanto, adequado sob esse aspecto, para a deposição de rejeitos radioativos.

- B-7) *O meio geológico escolhido deve estar em local estável geomorfologicamente, sem condições climáticas extremas e não sujeito a processos que possam afetar a superfície do terreno do repositório.***

O meio geológico escolhido é bastante comum e permite ampla escolha de locais favoráveis, do ponto de vista das características do ambiente na superfície.

C) Características do repositório

C-1) O desenho do repositório deve incluir barreiras artificiais à migração dos radionuclídeos.

A proposta cumpre com esse requisito, tendo sido interpostas três barreiras artificiais entre as fontes seladas e o meio ao redor do repositório: a embalagem de deposição, a camisa de aço do poço e o revestimento do poço com pasta de cimento, todas elas com características favoráveis para impedir o transporte dos radionuclídeos para fora do repositório.

C-2) Devem ser escolhidos materiais de construção do repositório que minimizem efeitos de reações químicas com o meio geológico.

Os materiais escolhidos para encamisamento e revestimento do poço são o resultado de longa experiência em projetos de engenharia na exploração de recursos hídricos e de petróleo e gás. São, por isso, compatíveis com meios geológicos variados apresentando desempenho excelente, mesmo sob condições ambientais mais desfavoráveis do que aquelas que prevalecerão no local do repositório. O material de embalagem apresenta grande resistência à corrosão, encontrando-se na literatura relatos de achados arqueológicos de peças de chumbo da Antigüidade greco-romana em excelente estado de conservação. Os resultados de ensaios sob condições ambientais variadas, relatados na literatura, mostram também que as embalagens têm expectativa de vida de vários milênios no repositório.

C-3) A construção do repositório deve obedecer a códigos e normas de engenharia.

O método de construção, os materiais empregados e os equipamentos utilizados na operação do sistema de deposição são comuns a empreendimentos convencionais e já estão padronizados em normas e códigos industriais.

C-4) Deve ser dada atenção ao impacto ambiental do material retirado da escavação, durante a construção do repositório.

O repositório proposto tem um desempenho ótimo nesse quesito, tendo em vista que o volume escavado para a execução do poço é da ordem de 32 m³ de solo e rocha, o que resulta num impacto ambiental mínimo, quando comparado com os milhares de metros cúbicos de material de escavação retirados das galerias e túneis nos outros tipos de repositório em construção. Há também o fato de que, exceto por poços exploratórios de caracterização do local, não há cavidades que precisem ser preenchidas durante a construção do repositório.

C-5) O repositório e os sistemas de manuseio e armazenamento devem ser desenhados de forma que os materiais físséis fiquem sempre em configurações subcríticas.

Esse requisito é importante para a deposição de rejeitos do final do ciclo, como os elementos combustíveis queimados, ou o plutônio dos programas de redução de armas. As fontes de ²³⁵U ou ²³⁹Pu presentes no inventário de fontes somam uma fração de um grama e não representam risco sob esse ponto de vista, ainda que seja elevado o inventário de fontes de nêutrons presentes no inventário. Ainda assim, a forma tubular do repositório, com diâmetro útil de 20 cm, favorece a segurança nesse aspecto.

C-6) O repositório deve ser desenhado de forma a permitir o monitoramento sistemático do escape de materiais radioativos durante a fase operacional e pós-operacional.

A forma do repositório pode dificultar a inspeção para detecção de vazamentos, seja pela profundidade e pequeno diâmetro do poço, seja pelo empilhamento das embalagens. Ainda que sejam improváveis e difíceis de conceber, ao longo de muitos anos de operação, eventos ou condições não previstos, que degradem a contenção das fontes, podem ocasionar o escape de radionuclídeos para fora das embalagens ou para fora do repositório. A análise desse aspecto da deposição das fontes deve ser objeto de futuros trabalhos.

C-7) O repositório deve ser construído com materiais termicamente estáveis e resistentes à degradação radiolítica para suportar as condições reinantes no local e evitar alterações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas que poderiam afetar a capacidade de restringir a liberação dos radionuclídeos.

Os materiais metálicos e o cimento apresentam capacidade para suportar cargas térmicas e de radiação muito superiores àquelas esperadas no repositório. O concreto

é empregado como material estrutural em reatores nucleares, suportando doses de radiação muitas ordens de grandeza superiores àquelas a que estará sujeito durante toda a vida útil do sistema de deposição.

C-8) *O repositório deve ser construído de forma a impedir a inundação da área de deposição.*

Dois caminhos podem ser concebidos para a penetração de água no repositório. Um deles é a inundação a partir da superfície, o outro é a penetração de água subterrânea de camadas atravessadas pelo poço. O primeiro caso é evitado pela escolha do local do repositório em área não sujeita a inundações e também, conforme a proposta deste trabalho, pelo abrigo da abertura do poço contra a intempérie e pelo desenho da boca do poço, de forma a evitar que, mesmo pequenas quantidades de água, sejam derramadas no seu interior. O segundo caso é evitado pelo uso da camisa de aço e da cimentação do poço e pela escolha de um batólito granítico, que é normalmente isento de água, como meio geológico para a deposição.

C-9) *No preenchimento de cavidades no repositório, os materiais empregados devem ser escolhidos de forma a aumentar o isolamento dos rejeitos e evitar efeitos adversos no meio geológico.*

A única cavidade a ser preenchida é o espaço anular entre a camisa de aço e a formação geológica, durante a construção, e o interior da camisa de aço, ao final da vida útil do repositório, em toda a extensão acima da zona de deposição. No primeiro, o preenchimento é feito com pasta de cimento e no segundo com concreto; ambos proporcionam ligação forte com a camisa de aço e com a rocha da formação geológica, conforme atestam a experiência da indústria petrolífera e a engenharia hidráulica. O tubo de aço, cimentado externamente e concretado internamente, forma uma tampa de difícil penetração.

D) Características dos rejeitos

Sob este título estão contemplados os requisitos para os rejeitos propriamente ditos e para as embalagens, formando o que se convencionou chamar de embalado.

D-1) *Os rejeitos devem ser sólidos ou estar fixados em uma matriz sólida, com propriedades químicas que garantam sua integridade pelo tempo necessário de isolamento.*

A relação de propriedades físicas e químicas desejáveis é extensa. Entre elas estão:

a) *estabilidade estrutural – a embalagem deve manter a forma e as dimensões sob as condições normais de emprego:*

As embalagens de chumbo são robustas e desenhadas para suportar as condições do repositório.

b) *durabilidade química – a embalagem deve ser fabricada com substâncias que não se degradem naturalmente:*

O material de fabricação das embalagens é uma liga de chumbo e antimônio que não se decompõe naturalmente.

c) *resistência à corrosão – a embalagem deve ser fabricada com materiais resistentes ao ataque químico sob as condições prevalentes no repositório:*

O chumbo é um dos metais com maior inércia química e resistência à corrosão.

d) *estabilidade térmica – a embalagem deve manter a forma e as dimensões sob as condições de temperatura existentes no repositório:*

O ponto de fusão da liga chumbo-antimônio, normalmente utilizada na fabricação de blindagens de chumbo, é de 380, resistindo, portanto, às condições ambientais do repositório.

e) *estabilidade radiolítica – a embalagem deve manter a sua estrutura mecânica, forma e dimensões após acumular a dose de radiação prevista durante toda a vida da instalação e não gerar gases de radiólise:*

Os metais são resistentes à radiação e não geram produtos gasosos.

f) *incombustibilidade – a embalagem deve ser construída de material incombustível:*

O chumbo é incombustível e é um metal não pirofórico.

g) resistência à degradação microbiana – o material da embalagem não deve ser susceptível à degradação por bactérias, fungos ou outros organismos:

O chumbo não é meio propício à proliferação de microorganismos.

h) ausência de líquidos livres – o rejeito deve ser sólidos ou solidificado:

Tanto as fontes como a embalagem não contêm líquidos livres.

i) agentes complexantes ou quelantes – o rejeito e a embalagem devem ser isentos deste tipo de material:

As fontes e a embalagem cumprem com esse requisito.

j) explosividade ausente – o rejeito e a embalagem devem estar livres de materiais explosivos:

As fontes seladas e a embalagem não contêm materiais explosivos.

k) corrosividade ausente – a embalagem deve ser construída com materiais não corrosivos:

A embalagem cumpre com esse requisito.

l) toxicidade ausente – a embalagem deve ser construída com materiais não tóxicos:

O chumbo é um metal de toxicidade moderada.

D-2) A embalagem deve suportar as condições normais de manuseio, transporte e deposição sem deteriorar-se e deve suportar as condições de acidente máximo previsto nessas operações.

De acordo com o conceito de gestão das fontes seladas proposto neste trabalho, as fontes seladas são colocadas na embalagem de deposição no próprio local do repositório, o que exclui o seu transporte pela via pública. Caso outros esquemas de gestão venham a ser utilizados, a embalagem de deposição deverá ser colocada em uma embalagem de transporte, tendo em vista que não foi desenhada para cumprir com todos os requisitos dos regulamentos pertinentes, não por causa da falta de robustez, mas por causa de limites na taxa de dose na superfície da embalagem, ausência de dispositivos de fixação no veículo etc. Com relação ao manuseio e à deposição, a robustez do desenho das embalagens garante a integridade sob

condições normais de operação. Por fim, sob condições de acidente em que o cenário mais grave é a queda da embalagem dentro do poço, é preciso ainda estabelecer a velocidade final e a energia do impacto, considerando-se o freio aerodinâmico proporcionado pelo efeito “êmbolo” da embalagem deslocando-se no poço com um espaço anular de pequena área para o fluxo de ar no sentido oposto, para estabelecer o desempenho da embalagem. Essa é uma área de estudo para futuros trabalhos.

D-3) *A embalagem deve ser feita de material de pouco valor.*

Materiais valiosos podem ser utilizados na embalagem dos rejeitos quando o ganho de desempenho compensa seu custo, mas podem ser um incentivo à mineração do repositório por populações futuras desavisadas da periculosidade dos rejeitos depositados. O chumbo das embalagens é o único material com potencial para atrair a busca por matéria-prima. Contudo, as embalagens de chumbo são de pouco valor, e a pequena quantidade presente não compensará o custo de exumação na profundidade em que estarão.

D-4) *O conteúdo de substâncias radioativas e a composição dos rejeitos devem ser conhecidos com exatidão suficiente para assegurar que os limites autorizados sejam cumpridos.*

Esse critério aplica-se ao controle administrativo na operação do repositório. Pode-se argumentar, porém, que o controle do inventário nesse tipo de repositório apresenta poucas dificuldades de ser realizado, pela natureza do rejeito. Uma grande parte das fontes seladas tem registro detalhado sobre radionuclídeo, atividade e data de inventário, e, para a parte que carece destas informações, medidas relativamente simples e de pequeno custo permitem obtê-las com exatidão e precisão suficientes.

E) Outros requisitos gerais

Além dos critérios, requisitos, recomendações e restrições contidos nos documentos citados e já discutidos, estão indicadas, a seguir, algumas qualidades desejáveis em um sistema de deposição para as fontes, junto com a avaliação do conceito proposto neste trabalho:

E-1) *A construção, a operação e o fechamento do repositório devem ser realizados sob um programa de garantia da qualidade.*

A construção e a operação do repositório proposto e o processo de gestão das fontes seladas são facilmente enquadráveis nas diretrizes de um programa de garantia da qualidade, no sentido de atendimento aos requisitos das normas ambientais, cumprimento dos regulamentos da CNEN e respeito à legislação pertinente.

E-2) *A construção, a operação e o fechamento do repositório devem ser realizados com segurança.*

A simplicidade das operações e das tecnologias necessárias para a deposição dos rejeitos é um fator favorável à manutenção da segurança. O atendimento às normas é simples porque os riscos industriais convencionais são de pequena magnitude: não há utilização de materiais combustíveis, explosivos, corrosivos, tóxicos ou patogênicos; não há movimentação de cargas pesadas; os equipamentos trabalham com baixa tensão; as operações são realizadas em temperatura ambiente; o contingente humano necessário à operação é reduzido a poucos indivíduos.

E-3) *A deposição dos rejeitos deve ser feita sob controle.*

O cumprimento das normas ambientais exige o registro rastreável de todas as informações pertinentes da operação da instalação. O controle administrativo da deposição das fontes no repositório proposto é realizável com poucos recursos em virtude da simplicidade do processo e do número reduzido de equipamentos de processo e de instrumentos de controle necessários à operação.

Para concluir, destaca-se que, com as avaliações apresentadas neste capítulo, os objetivos de números 13, 14 e 15, arrolados na seção 1.4 do primeiro capítulo, foram alcançados.

7. CONCLUSÕES

As fontes seladas representam um risco radiológico significativo, não só nos países em desenvolvimento, onde há poucos recursos materiais e capacidade técnica para lidar com rejeitos radioativos, como nos países desenvolvidos onde há um inventário de centenas de milhares de fontes de difícil controle. O número de fontes seladas que são extraviadas e que tornam-se potencialmente perigosas para irradiar pessoas e causar prejuízos materiais em instalações, é da ordem de dezenas por ano e tende a aumentar se não forem encontradas soluções para sua destinação definitiva.

A gestão dos rejeitos radioativos, constituídos pelas fontes seladas descartadas ao fim do seu período de uso, está indefinida na maioria dos países. Por falta de uma solução definitiva, as fontes estão sendo armazenadas temporariamente em cofres ou cubículos semi-enterrados em salas de institutos de pesquisa nuclear, hospitais ou universidades ao redor do mundo. Em um grupo de duas dezenas de países, as fontes estão sendo depositadas definitivamente em repositórios de superfície, construídos no terreno de institutos de pesquisa e constituídos de poços rasos revestidos de concreto. Esta prática é remanescente do período inicial da tecnologia nuclear, quando os modernos requisitos de segurança radiológica estavam ainda sendo concebidos.

No Brasil, o inventário de fontes seladas existente, por sua magnitude, requer que se estudem imediatamente, alternativas de gestão e que essas alternativas sejam viabilizadas a curto prazo, para atender à demanda das fontes já recolhidas como rejeito e que estão armazenadas nos institutos de pesquisa da CNEN.

Pela metodologia desenvolvida neste trabalho, demonstra-se que é imprópria, para uma parcela significativa das fontes existentes, a deposição em repositório de superfície que são destinados aos rejeitos de atividade baixa e média gerados no ciclo do combustível e nas aplicações dos radioisótopos.

A deposição das fontes, separadamente de outros rejeitos radioativos, é uma estratégia que deve ser adotada, aproveitando o volume reduzido, com alta concentração de atividade, das fontes seladas. Um repositório profundo, próprio e exclusivo, que foi desenvolvido e está apresentado neste trabalho, é o meio para implantar esta estratégia.

As tecnologias necessárias para a construção do repositório profundo, estão disponíveis comercialmente e os investimentos requeridos são da mesma ordem, porém inferiores, aos necessários para a construção de armazéns intermediários para as fontes.

A comparação das características do sistema de deposição proposto com os requisitos e recomendações da experiência internacional consolidada em documentos da CIPR e nos livros da “Série de Segurança” do OIEA, que especificam e detalham componentes dos sistemas de deposição e estabelecem suas características desejáveis e seus desempenhos mínimos aceitáveis, mostra que o conceito de repositório desenvolvido neste trabalho atende às expectativas de um sistema seguro para a deposição imediata das fontes radioativas seladas retiradas de serviço.

Finalizando, pode-se dizer que os objetivos do presente trabalho foram plenamente desenvolvidos e alcançados, corroborando de maneira significativa e segura a finalidade proposta, conforme destacou-se ao fim de cada capítulo.

8. SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Como pôde-se constatar do presente trabalho, a proposição não está completa, mas é tão somente a viga mestra que dá sustento ao conceito de repositório profundo, próprio e exclusivo para a deposição de fontes radioativas seladas retiradas de serviço. No próprio texto informou-se de possíveis trabalhos que deverão ser empreendidos para completar o que já foi realizado.

A seguir enumera-se estes trabalhos:

1. Desenvolver uma metodologia e implantá-la para avaliar o número e a taxa de reposição das fontes seladas de cada tipo existente no Brasil com exatidão maior que a alcançada no presente trabalho.
2. Desenvolver uma metodologia para estimar as probabilidades de ocorrência dos eventos iniciadores e das seqüências de eventos que levam à exposição acidental às fontes seladas depositadas em repositórios de superfície, bem como avaliar as doses que seriam recebidas nessas seqüências.
3. Aprimorar a metodologia de seleção das fontes seladas excluídas dos repositórios de superfície pela inclusão das probabilidades de ocorrência de eventos que caracterizam os cenários modelados.
4. Modelar os cenários de acidente envolvendo as fontes seladas depositadas nos repositórios de superfície levando em conta frações mais realistas da atividade de cada fonte que pode estar envolvida nos episódios de ingestão e/ou inalação.
5. Estudar a resistência a longo prazo da pasta de cimento com aditivos utilizada na cimentação do poço de deposição.
6. Estudar as características e detalhar o conjunto de instalações de superfície necessários para a operação de um programa de deposição das fontes seladas em um repositório profundo.

7. Estudar as características e detalhar o sistema de transporte necessário para a operação de um programa de deposição das fontes seladas em um repositório profundo.
8. Estudar as características e detalhar o sistema de controle radiológico e de segurança industrial necessários para a operação de um programa de deposição das fontes seladas em um repositório profundo.
9. Estudar as características e detalhar o conjunto de requisitos administrativos e a base legal necessários para implantar e operar um programa de deposição das fontes seladas em um repositório profundo.
10. Investigar com maior detalhe o processo de tratamento das fontes para avaliar os fluxos de rejeitos secundários que podem ser produzidos na execução do processo.
11. Realizar estudos mais detalhados e realistas dos aspectos econômicos de um programa de deposição das fontes seladas em um repositório profundo.
12. Avaliar a segurança radiológica do sistema de deposição por meio de modelagem e uso de códigos computacionais visando estimar o impacto radiológico potencial do sistema a longo prazo.
13. Desenvolver uma metodologia para apresentação dos aspectos radiológicos envolvidos com a deposição das fontes em um repositório profundo ao público leigo, utilizando como argumento a comparação entre a atividade depositada e a atividade natural ao redor do repositório.
14. Otimizar o sistema de deposição, à luz do princípio ALARA¹ de otimização da proteção radiológica.
15. Desenvolver um sistema de monitoramento da integridade das embalagens e do vazamento de substâncias radioativas para controle durante o período de operação do repositório profundo.

16. Avaliar as possíveis condições acidentais e suas conseqüências durante a operação de colocação das fontes no repositório.

17. Estudar os possíveis sítios para localização do repositório profundo.

18. Investigar os custos e os riscos associados com a utilização das fontes seladas, para subsidiar estudos de “ciclo de vida”, de modo prover informações necessárias à definição de políticas públicas relacionadas com as aplicações da tecnologia nuclear.

¹ *As Low As Reasonably Achievable*, traduzido para o Português como: tão baixo quanto seja racionalmente exeqüível.

Apêndice

INVENTÁRIO DE FONTES SELADAS DO BRASIL

A contabilização das fontes seladas existentes no Brasil é uma tarefa de garimpo dos dados constantes em diversas fontes de informação, tendo em vista que nenhuma delas cataloga todas as fontes existentes.

As definições de fonte selada variam um pouco de um para outro organismo de padronização e certas fontes são de difícil enquadramento nestas definições. Por essa razão, foi preciso realizar esta contabilização. Para tanto, definiu-se alguns critérios de inclusão de fontes no inventário e pesquisou-se os bancos de dados em busca dos registros pertinentes. Os critérios de seleção e os bancos de dados pesquisados estão indicados a seguir.

Foram selecionadas:

- as fontes radioativas identificadas como fontes seladas pela CNEN no banco de dados SINRAD, que contém o registro de usuários de substâncias radioativas no Brasil (CNEN, 1998);
- os rejeitos radioativos catalogados como fontes seladas nos registros do Departamento de Rejeitos Radioativos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (NR, 2000);
- as fontes de Amerício-241 retiradas dos pára-raios radioativos e dos detetores de fumaça, recolhidos como rejeito radioativo (MIRANDA e VICENTE, 1999);
- as fontes que contêm trítio incorporado em dispositivos elétricos, e que são recolhidos como rejeito radioativo ao IPEN;
- as fontes identificadas na publicação do OIEA “Perfis da Gestão dos Rejeitos Radioativos” como fontes seladas existentes no Brasil (IAEA, 2000).

A meia-vida dos radionuclídeos, o número e a atividade das fontes existentes no Brasil estão apresentados nas figuras e tabelas a seguir e incluem tanto as fontes já recolhidas como rejeito radioativo como aquelas que ainda estão em uso. Os resultados estão afetados de incertezas decorrentes das diferentes datas de atualização dos bancos de

dados, de alguns registros ambíguos ou incompletos, da falta de registro de algumas fontes e da duplicidade de registros que não foram detectados durante a compilação das informações.

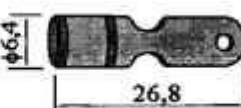
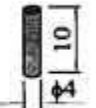
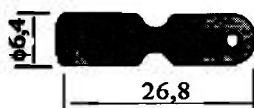
As tabelas contêm uma estimativa do volume ocupado pelas fontes de cada radionuclídeo, para se avaliar a necessidade de recipientes, espaço de armazenamento e espaço útil no repositório onde serão depositadas. O volume indicado para cada grupo foi calculado com base na descrição típica das fontes, nas suas dimensões e na composição do inventário brasileiro em termos de atividade. O volume aparente, que é definido como a capacidade mínima do recipiente que pode acomodar as fontes, dispostas de forma aleatória, foi calculado multiplicando o volume geométrico de cada fonte apresentada nas tabelas pelo fator 2,2.

A descrição apresentada para cada fonte ou grupo de fontes é típica de modelos existentes no mercado e foi obtida do catálogo de um fabricante ou sugerida com base na experiência de recolhimento de fontes como rejeito no IPEN.

Tabela A.1 – Meia-vida dos radionuclídeos contidos nas fontes do inventário brasileiro.

Radionuclídeo	Meia-Vida (anos)	Radionuclídeo	Meia-Vida (anos)
H	$1,2 \times 10^1$	²² Ra	$1,6 \times 10^3$
¹ C	$5,7 \times 10^3$	²² Ra-Be	$1,6 \times 10^3$
² Na	$2,6 \times 10^0$	²² Th	$1,9 \times 10^0$
³ Cl	$3,0 \times 10^5$	²³ Th	$1,4 \times 10^{10}$
⁴ K	$1,3 \times 10^9$	²³ U	$1,6 \times 10^5$
⁵ Fe	$2,7 \times 10^0$	²³ U	$2,4 \times 10^5$
⁶ Co	$5,3 \times 10^0$	²³ U	$7,0 \times 10^8$
⁶ Ni	$1,0 \times 10^2$	²³ U	$4,5 \times 10^9$
⁸ Kr	$1,1 \times 10^1$	²³ Np	$2,1 \times 10^6$
⁹ Sr	$2,9 \times 10^1$	²³ Pu	$8,8 \times 10^1$
¹⁰ Cd	$1,2 \times 10^0$	²³ Pu-Be	$8,8 \times 10^1$
¹³ Cs	$3,0 \times 10^1$	²³ Pu	$2,4 \times 10^4$
¹³ Ba	$1,1 \times 10^1$	²⁴ Am	$4,3 \times 10^2$
¹⁴ Pm	$2,6 \times 10^0$	²⁴ Am-Be	$4,3 \times 10^2$
¹⁵ Eu	$1,3 \times 10^1$	²⁴ Cm	$1,8 \times 10^1$
¹⁵ Sm	$9,3 \times 10^1$	²⁵ Cf	$2,6 \times 10^0$
²⁰ Tl	$3,8 \times 10^0$		

Tabela A.2 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{60}Co ⁽¹⁾.

^{60}Co							
Descrição	Cilindro metálico de cobalto, encerrado em cápsula soldada de aço inoxidável.						
volume médio (cm ³)	0,15	0,61	0,61	0,13	0,61	0,61	0,61
nº fontes	412	323	380	2 x 10 ⁵	236	391	456
volume total (dm ³) ⁽²⁾	0,062	0,20	0,23	26	0,21	0,238	0,278
volume total aparente (dm ³) ⁽²⁾	0,14	0,43	0,51	57	0,46	0,52	0,61
volume total = 27 dm ³ ⁽²⁾							
volume total aparente = 60 dm ³ ⁽²⁾							

⁽¹⁾ As colunas correspondem às classes de fontes indicadas na figura A.1.

⁽²⁾ Diferenças entre os valores apresentados e os resultados dos cálculos se devem a erros de arredondamento.

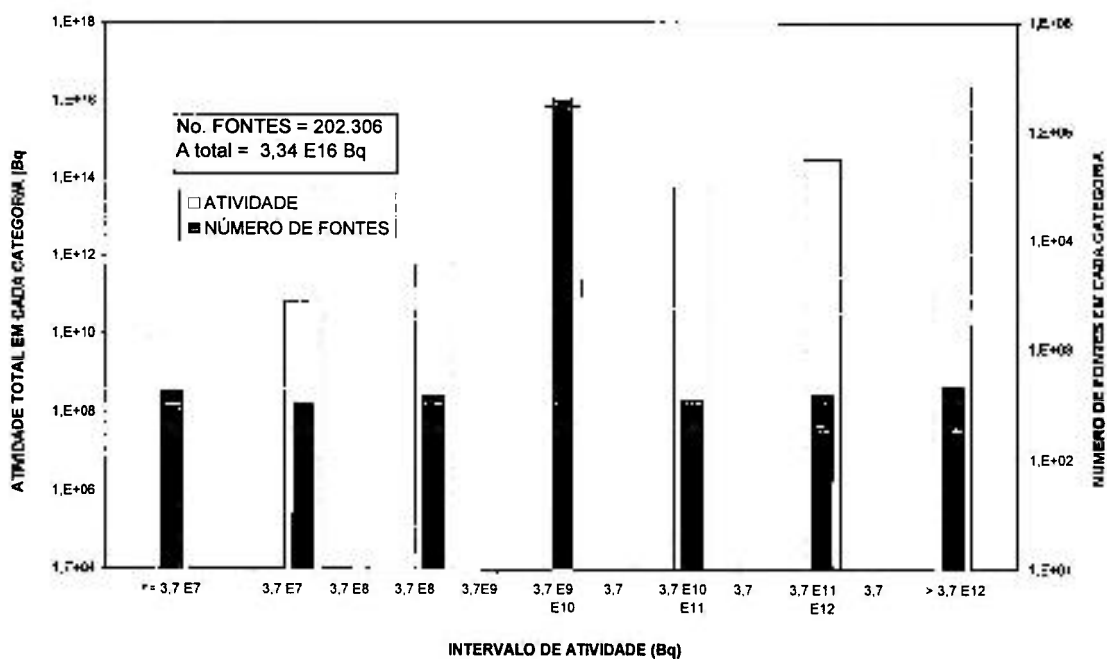
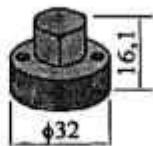
Figura A.1 – Inventário de fontes de ^{60}Co .

Tabela A.3 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{85}Kr ⁽¹⁾.

^{85}Kr				
Descrição	Gás de criptônio selado hermeticamente em cápsula de aço inoxidável soldada.			
volume médio (cm ³)	4,8	49	49	136
n ^o fontes	66	154	211	9
volume total (dm ³) (2)	0,32	7,5	10	1,2
volume total aparente (dm ³) (2)	0,70	17	23	2,7
volume total = 19 dm ³ (2)				
volume total aparente = 42 dm ³ (2)				

⁽¹⁾ As colunas correspondem às classes de fontes indicadas na figura A.2.

⁽²⁾ Diferenças entre os valores apresentados e os resultados dos cálculos se devem a erros de arredondamento.

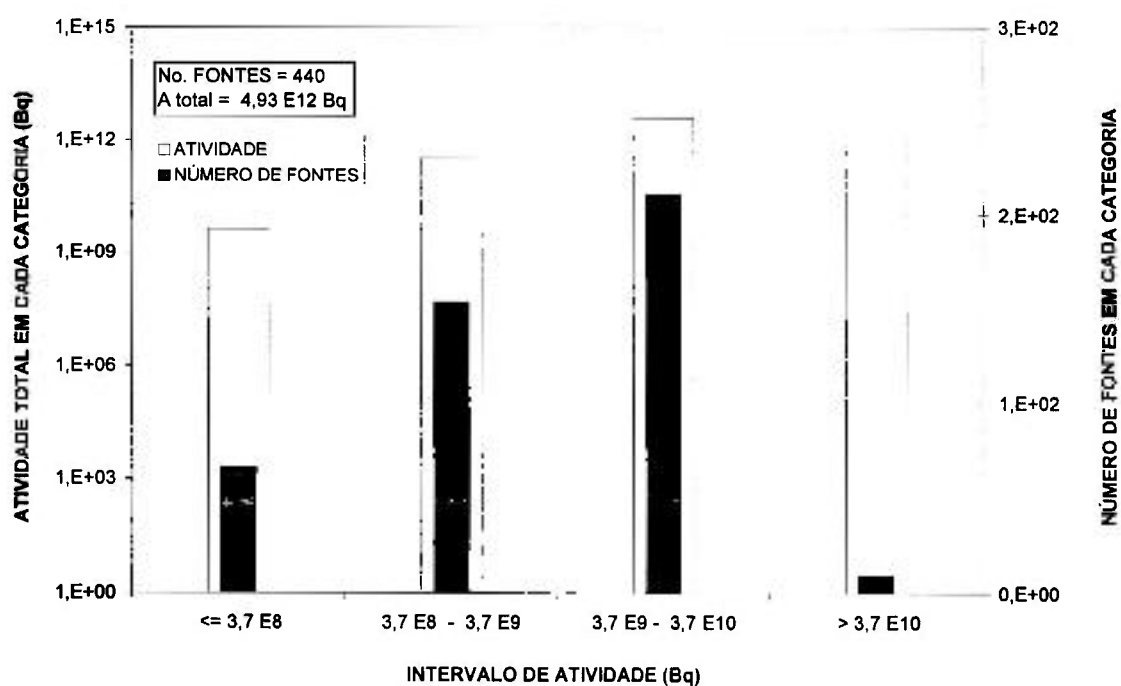
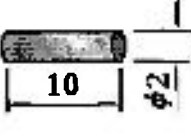
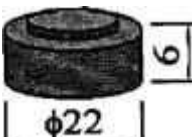
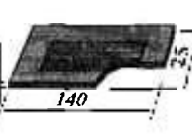
Figura A.2 – Inventário de fontes de ^{85}Kr .

Tabela A.4 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{90}Sr ⁽¹⁾.

^{90}Sr				
Descrição	Estrôncio incorporado em bolinha de vidro, selada em cápsula de aço inoxidável soldada.	Composto de estrôncio incorporado em lâmina de prata, selada em cápsula de aço inoxidável.	Composto de estrôncio incorporado em grão cerâmico. Cápsula dupla de aço inox.	Composto de estrôncio incorporado em uma folha de prata laminada.
volume médio (cm ³)	0,31	2,8	2,2	3,4
n ^o fontes	141	274	403	28
volume total (dm ³) ⁽²⁾	0,044	0,78	0,89	0,095
volume total aparente (dm ³) ⁽²⁾	0,097	1,7	2,0	0,21
volume total = 1,8 dm ³ ⁽²⁾				
volume total aparente = 4,0 dm ³ ⁽²⁾				

⁽¹⁾ As colunas correspondem às classes de fontes indicadas na figura A.3.

⁽²⁾ Diferenças entre os valores apresentados e os resultados dos cálculos se devem a erros de arredondamento.

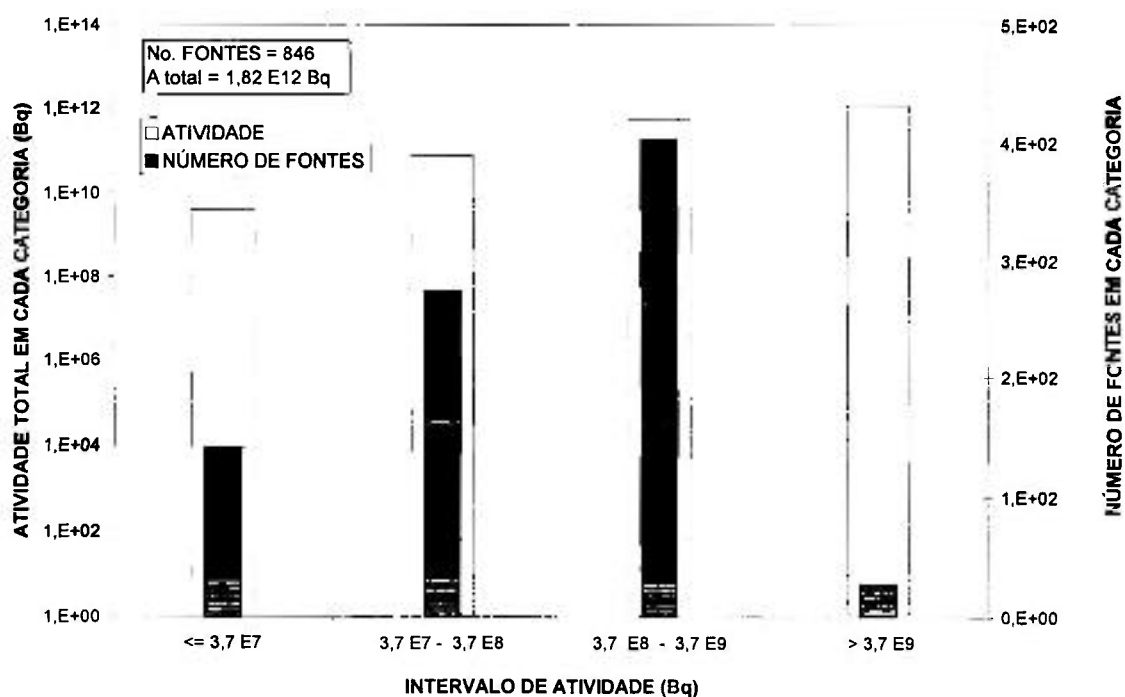
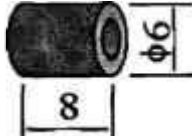
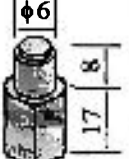
Figura A.3 – Inventário de fontes de ^{90}Sr .

Tabela A.5 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{137}Cs ⁽¹⁾.

^{137}Cs						
Descrição	Grão cerâmico de cézio, encerrado em cápsula dupla de aço inoxidável soldado.					Grão de sal prensado em capsula dupla de aço inox.
volume médio (cm ³)	0,23	0,23	0,42	0,60	2,1	2,4
nº fontes	313	256	1176	2833	1253	322
volume total (dm ³) ⁽²⁾	0,071	0,058	0,50	1,7	2,6	0,77
volume total aparente (dm ³) ⁽²⁾	0,16	0,13	1,1	3,8	5,8	1,7
volume total = 5,7 dm ³ ⁽²⁾						
volume total aparente = 13 dm ³ ⁽²⁾						

⁽¹⁾ As colunas correspondem às classes de fontes indicadas na figura A.4.

⁽²⁾ Diferenças entre os valores apresentados e os resultados dos cálculos se devem a erros de arredondamento.

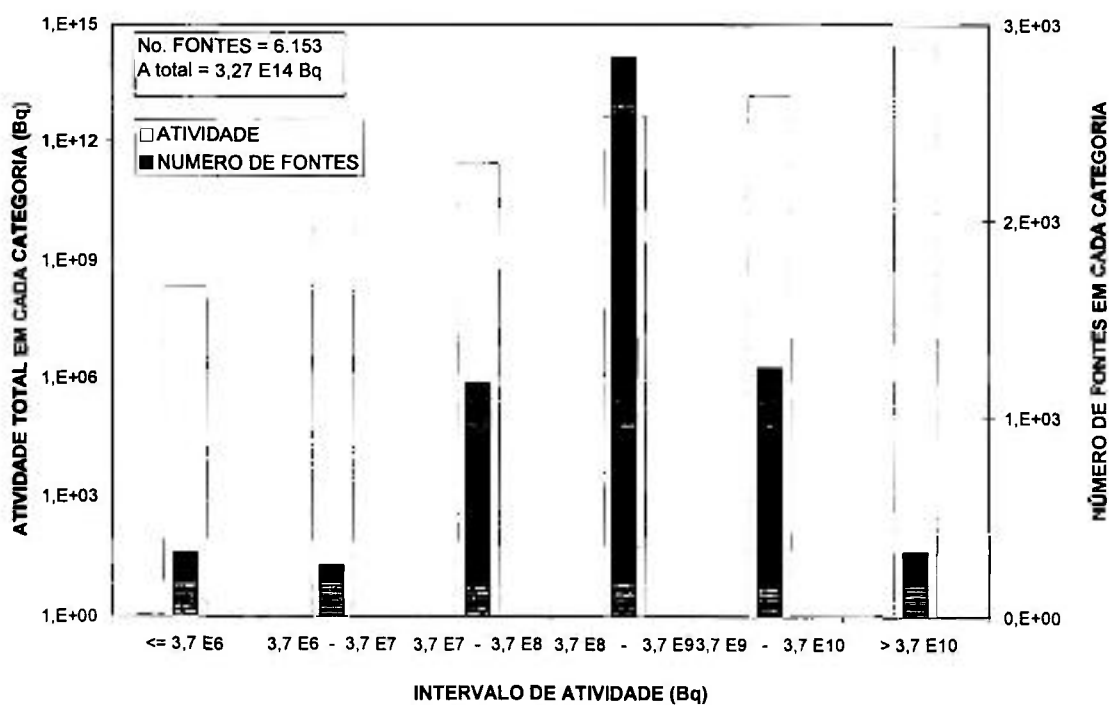
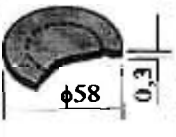
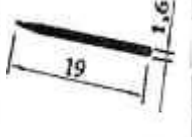
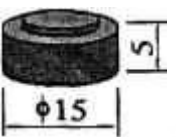
Figura A.4 – Inventário de fontes de ^{137}Cs .

Tabela A.6 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{226}Ra ⁽¹⁾.

^{226}Ra					
Descrição	Descrição não disponível	Sal de rádio encerrado em agulha oca ou tubo de liga platina-irídio.			Descrição não disponível
volume médio (cm ³)	0,79	0,12	0,038	0,18	0,88
n ^o fontes	81	1034	2654	222	104
volume total (dm ³) ⁽²⁾	0,064	0,12	0,10	0,040	0,092
volume total aparente (dm ³) ⁽²⁾	0,14	0,26	0,22	0,088	0,20
volume total = 0,42 dm ³ ⁽²⁾					
volume total aparente = 0,92 dm ³ ⁽²⁾					

⁽¹⁾ As colunas correspondem às classes de fontes indicadas na figura A.5.

⁽²⁾ Diferenças entre os valores apresentados e os resultados dos cálculos se devem a erros de arredondamento.

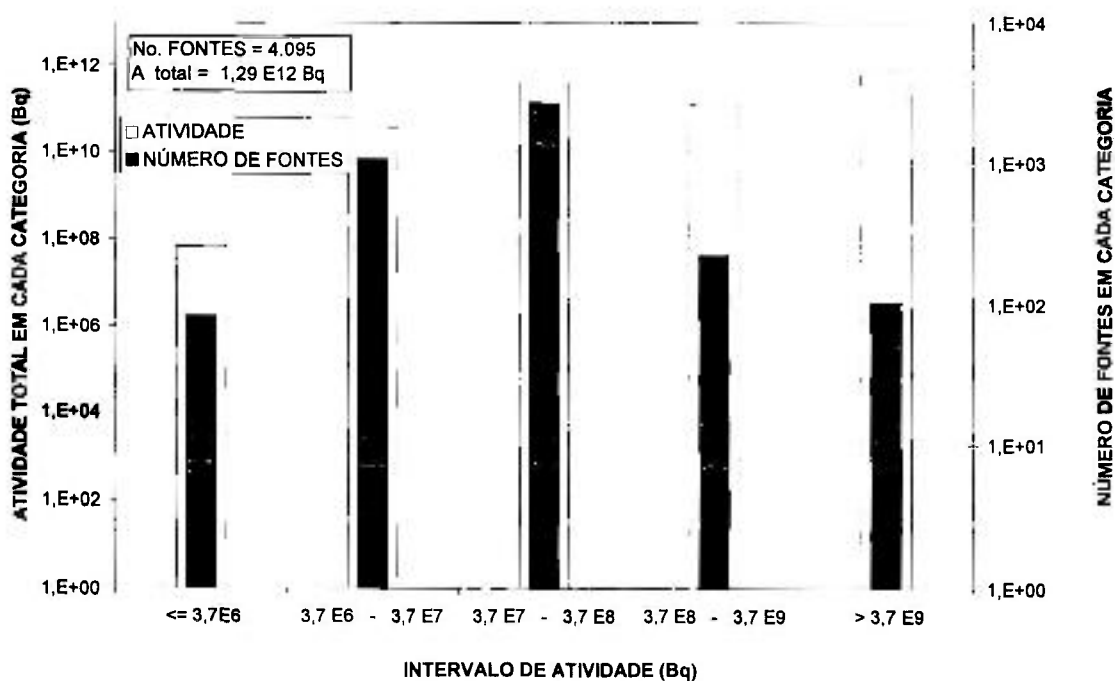
Figura A.5 – Inventário de fontes de ^{226}Ra .

Tabela A.7 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de ^{241}Am ⁽¹⁾.

^{241}Am							
Descrição	Briquete de AmO_2 sobre lâmina metálica, coberto com liga Au-Pd.	Americio em grão cerâmico ou incorporado em esmalte cerâmico, selado em cápsulas cilíndricas de aço inoxidável.	Briquete de AmO_2 sobre lâmina metálica, coberto com liga Au-Pd.	Americio em grão cerâmico ou incorporado em esmalte cerâmico, selado em cápsulas cilíndricas ou anulares de aço inoxidável.			
volume médio (cm^3)	0,005	0,14 ⁽²⁾	0,14 ⁽²⁾	0,72 ⁽³⁾	2,6 ⁽⁴⁾	2,8 ⁽⁵⁾	7,4
nº fontes	85.986	603	6.912	78.446	499	174	16
volume total (dm^3) ⁽⁵⁾	0,43	0,085	0,97	56	1,3	0,49	0,12
volume total aparente (dm^3) ⁽⁵⁾	0,95	0,19	2,1	123	2,9	1,1	0,26
volume total = 59 dm^3 ⁽⁵⁾							
volume total aparente = 130 dm^3 ⁽⁵⁾							

⁽¹⁾ As colunas correspondem às classes de fontes indicadas na figura A.6.

⁽²⁾ Inventário constituído por 50% de cada modelo de fonte.

⁽³⁾ Inventário constituído por 60% do primeiro modelo e 40% do segundo modelo de fonte.

⁽⁴⁾ Inventário constituído pela média dos três primeiros modelos de fonte.

⁽⁵⁾ Inventário constituído pela média dos três últimos modelos de fonte.

Diferenças entre os valores apresentados e os resultados dos cálculos se devem a erros de arredondamento.

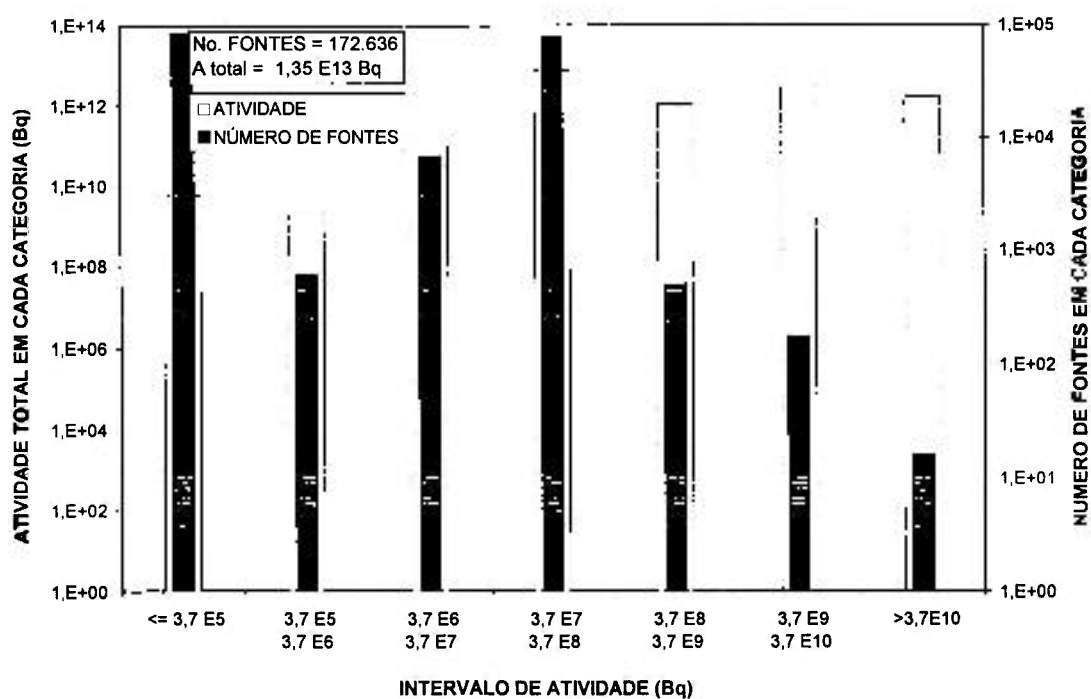
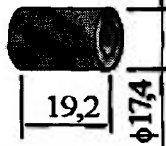
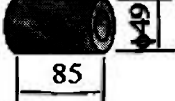
Figura A.6 - Inventário de fontes de ^{241}Am .

Tabela A.8 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes de $^{241}\text{Am-Be}$ ⁽¹⁾.

²⁴¹ Am-Be				
Descrição	Mistura compactada de óxido de amerício com berílio metálico encerrado em cápsula dupla, cilíndrica ou anular soldada de aço inoxidável.			
volume médio (cm ³)	4,6	4,6	17	160
n ^o fontes	10	91	137	81
volume total (dm ³) ⁽²⁾	0,046	0,42	2,3	13
volume total aparente (dm ³) ⁽²⁾	0,10	0,92	5,0	28
volume total = 16 dm ³ ⁽²⁾				
volume total aparente = 35 dm ³ ⁽²⁾				

⁽¹⁾ As colunas correspondem às classes de fontes indicadas na figura A.7.

⁽²⁾ Diferenças entre os valores apresentados e os resultados dos cálculos se devem a erros de arredondamento.

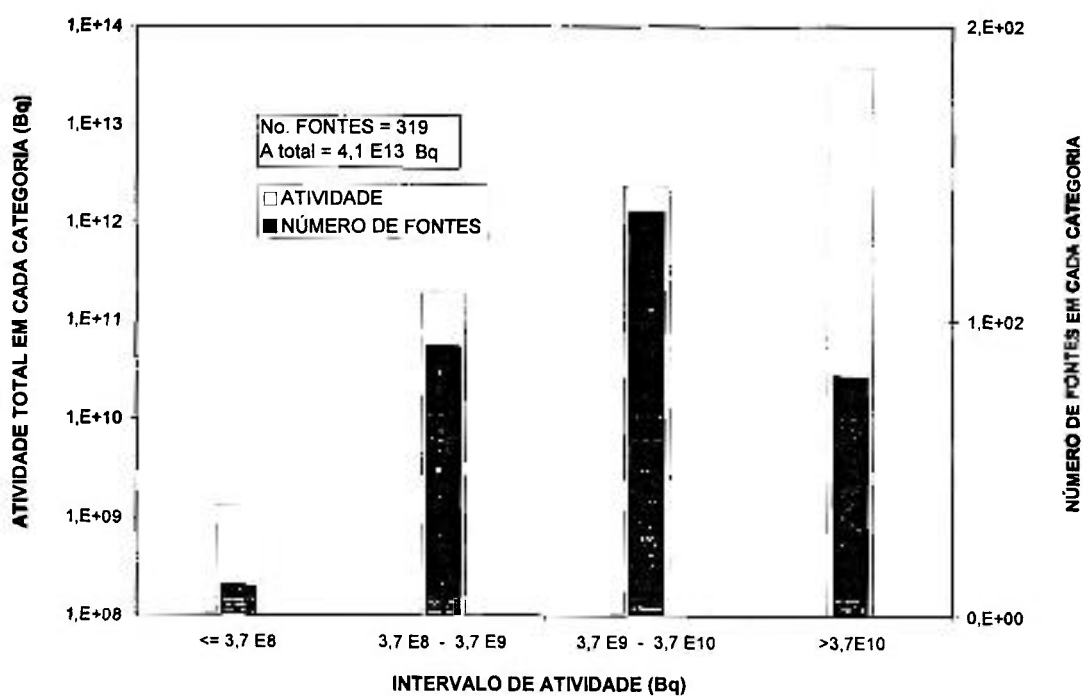
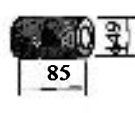
Figura A.7 – Inventário de fontes de $^{241}\text{Am-Be}$.

Tabela A.9 – Fontes típicas incluídas no inventário de outras fontes com meia-vida superior a 87 anos.

	^{63}Ni	^{238}Pu	$^{238}\text{Pu-Be}$	(1)
				
Descrição	Níquel metálico eletrodepositado sobre lâmina de liga de níquel	Pu incorporado em esmalte cerâmico sobre suporte de aço-W Cápsula de aço ou monel e berílio.	Mistura compactada de PuO_2 e berílio metálico, dentro de cápsula dupla de aço inoxidável.	Descrição detalhada não disponível. (2)
volume médio (cm^3)	0,015	7,4	160	13,
nº fontes	192	16	1	102
volume total (dm^3) ⁽³⁾	0,0029	0,12	0,16	1,3
volume total aparente (dm^3) ⁽³⁾	0,0063	0,26	0,35	2,8
volume total = $1,6 \text{ dm}^3$ ⁽³⁾				
volume total aparente = $3,5 \text{ dm}^3$ ⁽³⁾				

(1) ^{14}C , ^{36}Cl , ^{40}K , ^{151}Sm , $^{226}\text{Ra-Be}$, ^{232}Th , ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu

(2) Formas químicas e estruturas variadas. Considera-se que o encapsulamento seja de aço, mas a geometria e as dimensões das fontes podem diferir significativamente do exemplo apresentado.

(3) Diferenças entre os valores apresentados e os resultados dos cálculos se devem a erros de arredondamento.

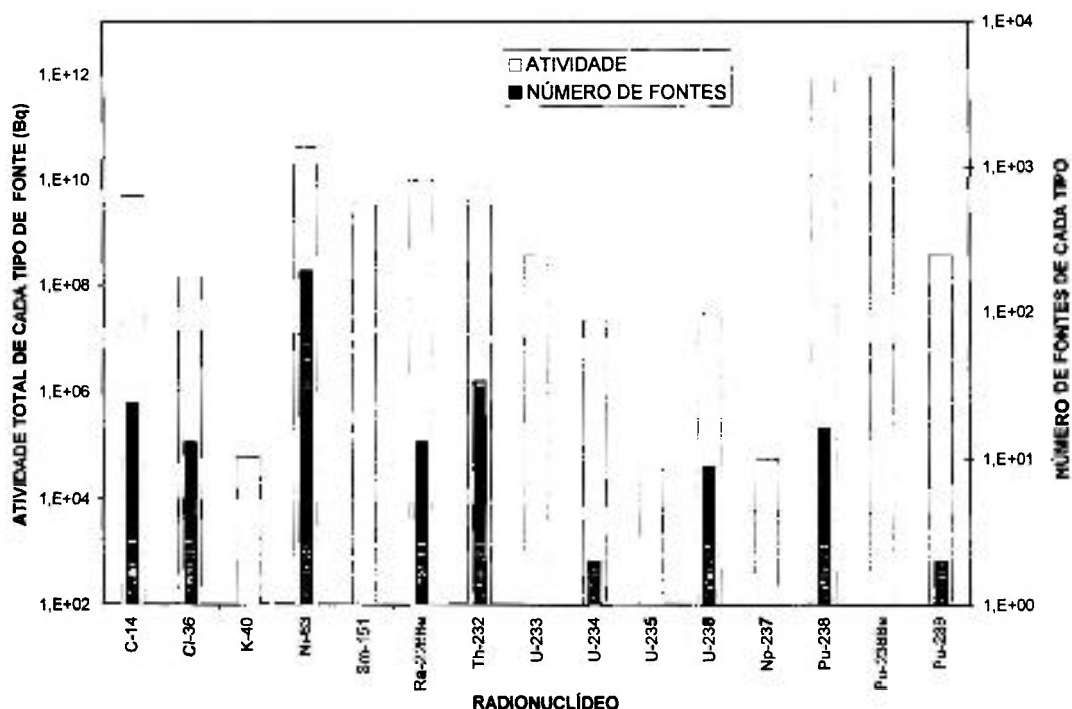


Figura A.8 – Inventário de outras fontes, com meia vida superior a 87 anos.

Tabela A.10 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes com meia-vida inferior a 18 anos – grupo 1.

	³ H	²² Na	⁵⁵ Fe	¹⁰⁹ Cd	¹³³ Ba
					
Descrição	Tritio absorvido em lâmina de titânio, sobre folha de aço inoxidável ou cobre.	Sal de sódio depositado em disco de platina, sobre suporte de titânio.	Ferro eletro-depositado sobre disco de cobre. Cápsula de monel/ berílio.	Cádmio eletro-depositado sobre disco de Ag. Cápsula de monel e berílio.	Grão cerâmico contendo bário, selado em cápsula soldada de aço inox.
volume médio (cm ³)	0,075	1,1	7,4	7,4	0,23
nº fontes	35.380	9	74	30	27
volume total (dm ³) ⁽¹⁾	2,6	0,0095	0,55	0,22	0,0062
volume total aparente (dm ³) ⁽¹⁾	5,8	0,022	1,2	0,49	0,014
volume total = 3,4 dm ³ ⁽¹⁾					
volume total aparente = 7,5 dm ³ ⁽¹⁾					

⁽¹⁾ Diferenças entre os valores apresentados e os resultados dos cálculos se devem a erros de arredondamento.

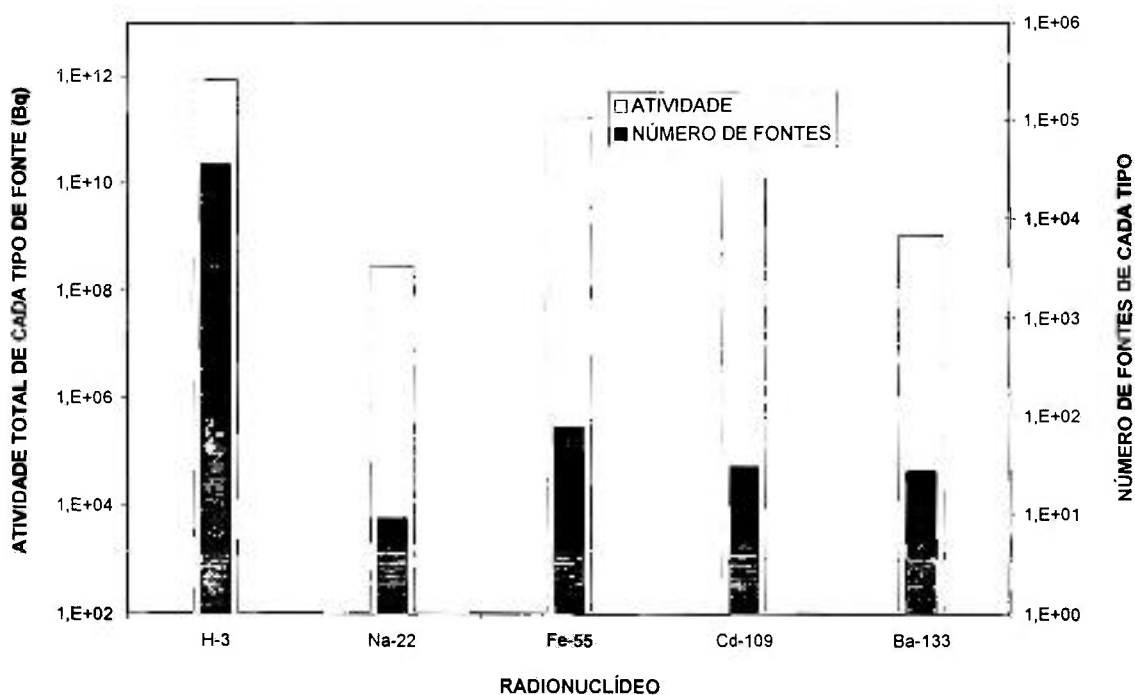
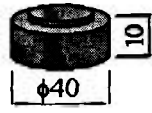


Figura A.9 – Inventário de outras fontes, com meia-vida inferior a 18 anos – grupo 1.

Tabela A.11 – Fontes típicas incluídas no inventário de fontes com meia-vida inferior a 18 anos – grupo 2.

	^{147}Pm 	^{204}Tl 	^{244}Cm 	^{252}Cf 	$^{152}\text{Eu}, ^{228}\text{Th}$ 
Descrição	Promécio em esmalte, sobre suporte de latão. Cápsula de aço inox e titânio.	Cromato de tálio incorporado em uma lâmina de prata.	Cúrio em esmalte cerâmico sobre suporte de aço e tungstênio. Cápsula de monel e berílio.	Grão de óxido de califórnio ou liga de Cf-Pt. Cápsula de aço inoxidável ou liga de zircônio.	Descrição detalhada não disponível. ⁽¹⁾
volume médio (cm^3)	8,2	0,79	2,3	1,2	12,6
nº fontes	143	58	16	18	6
volume total (dm^3) ⁽²⁾	1,2	0,046	0,036	0,022	0,076
volume total aparente (dm^3) ⁽²⁾	2,6	0,100	0,081	0,048	0,17
volume total $\approx 1,4 \text{ dm}^3$ ⁽²⁾					
volume total aparente $\approx 3,0 \text{ dm}^3$ ⁽²⁾					

⁽¹⁾ Formas químicas e estruturas variadas. Considera-se que o encapsulamento seja de aço, mas a geometria e as dimensões das fontes podem diferir significativamente do exemplo apresentado.

⁽²⁾ Diferenças entre os valores apresentados e os resultados dos cálculos se devem a erros de arredondamento.

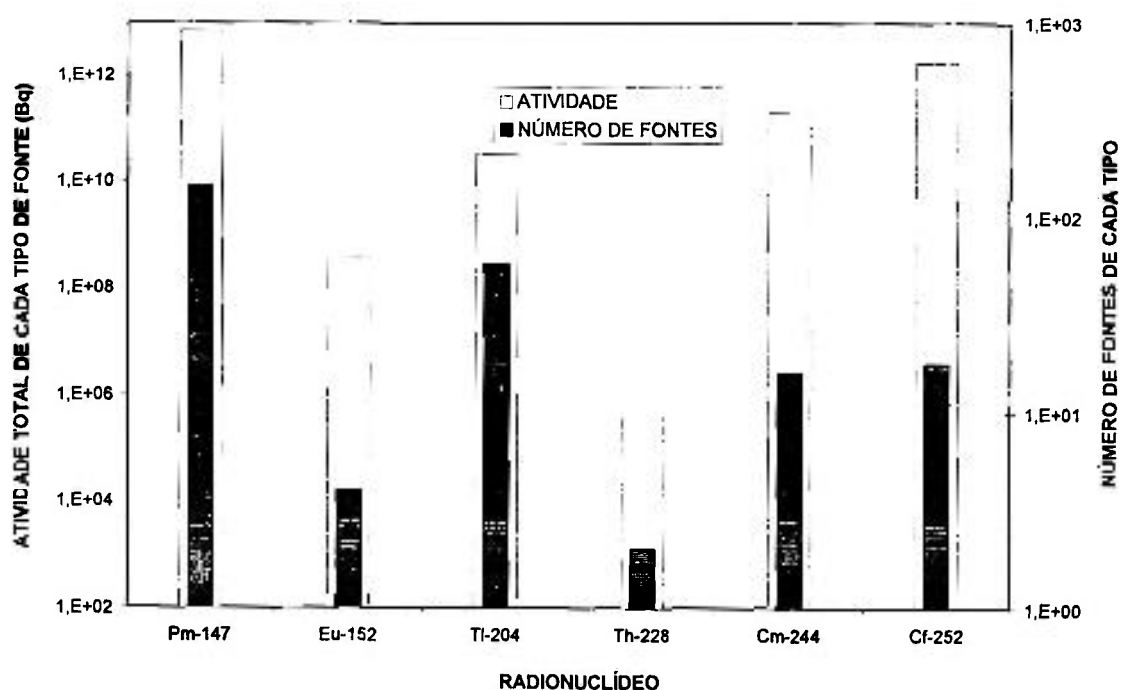


Figura A.10 – Inventário de outras fontes, com meia-vida inferior a 18 anos – grupo 2.

Tabela A.12 – Resumo do inventário de fontes seladas no Brasil.

GRUPO DE FONTES	No. DE FONTES	VOLUME (dm ³)	VOLUME APARENTE (dm ³)
⁶⁰ Co	202.306	27	60
⁸⁵ Kr	440	19	42
⁹⁰ Sr	846	1,8	4,0
¹³⁷ Cs	6.153	5,7	13
²²⁶ Ra	4.095	0,42	0,92
²⁴¹ Am	172.636	59	130
²⁴¹ Am-Be	319	16	35
³ H, ²² Na, ⁵⁵ Fe, ¹⁰⁹ Cd, ¹³³ Ba	35.520	3,4	7,5
¹⁴⁷ Pm, ¹⁵² Eu, ²⁰⁴ Tl, ²²⁸ Th, ²⁴⁴ Cm, ²⁵² Cf	241	1,4	3,0
¹⁴ C, ³⁶ Cl, ⁴⁰ K, ⁶³ Ni, ¹⁵¹ Sm, ²²⁶ Ra-Be, ²³² Th, ²³³ U, ²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁸ U, ²³⁷ Np, ²³⁸ Pu, ²³⁸ Pu-Be, ²³⁹ Pu	311	1,6	3,5
TOTAIS	422.867	135	299

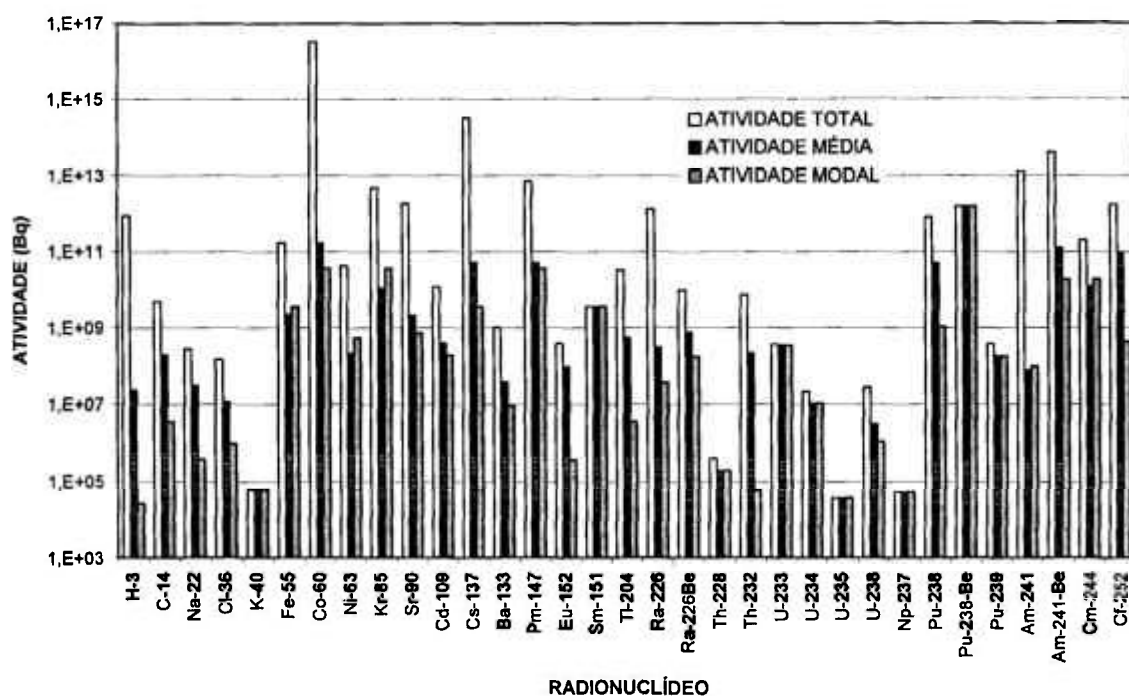


Figura A.11 – Atividade presente do inventário das fontes seladas no Brasil.

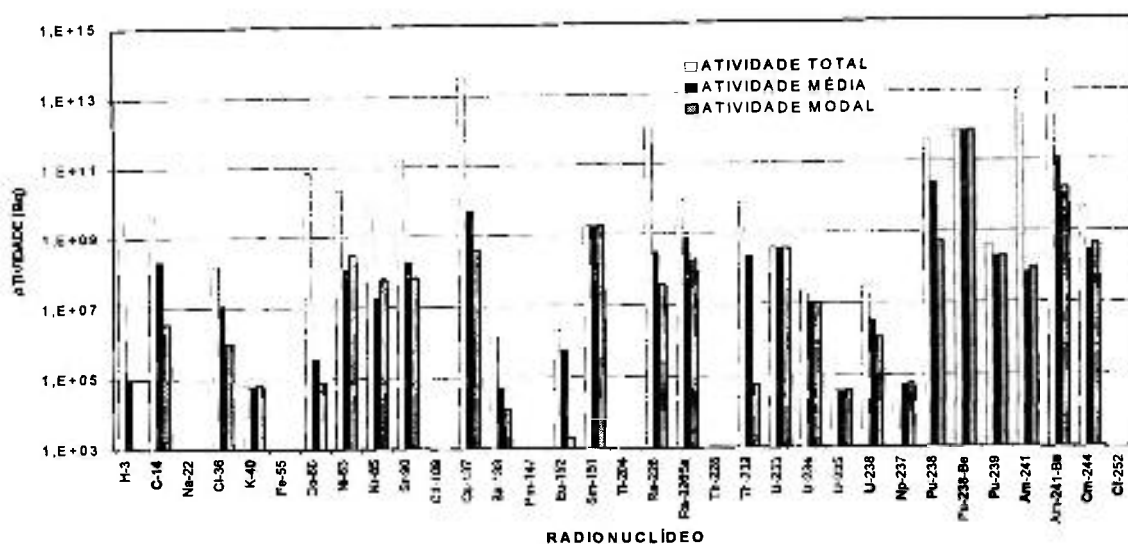


Figura A.12 – Inventário das fontes seladas, após decaimento de 100 anos.

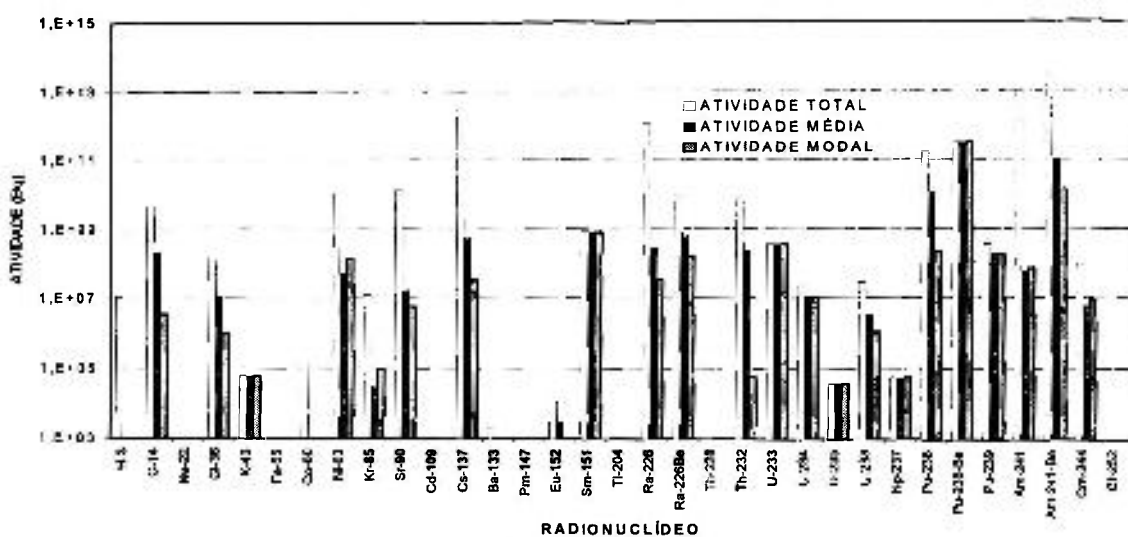


Figura A.13 – Inventário das fontes seladas, após decaimento de 200 anos.

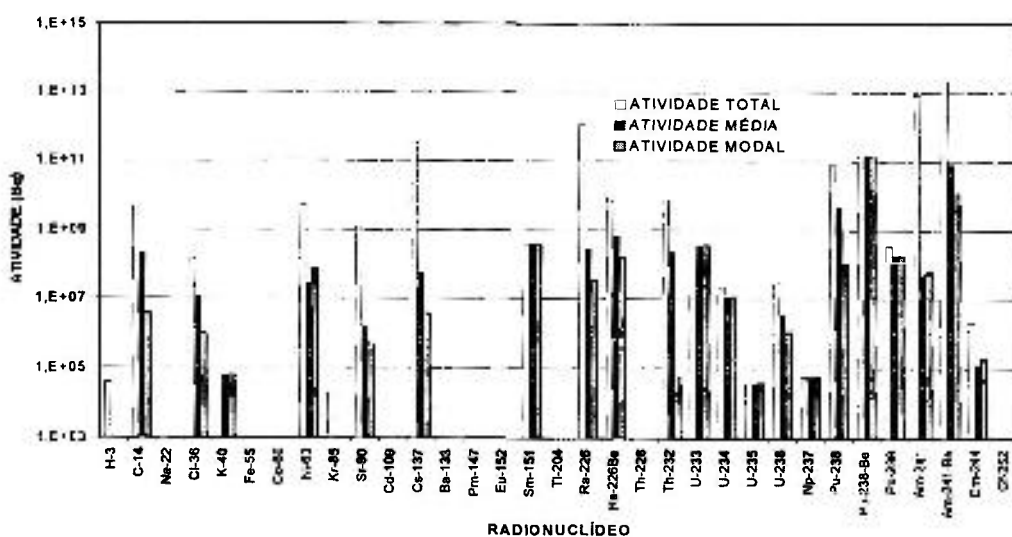


Figura A.14 – Inventário das fontes seladas, após decaimento de 300 anos.

ANEXO

CLASSIFICAÇÃO DOS REJEITOS RADIOATIVOS

1. Classificação dos rejeitos de acordo com o regulamento da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN-NE-6.05 – Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas (CNEN, 1985)

“4. CLASSIFICAÇÃO DOS REJEITOS

Os rejeitos são classificados em categorias segundo o estado físico, natureza da radiação, concentração e taxa de exposição, conforme especificado em 4.1 e 4.2.

4.1 REJEITOS COM EMISSORES BETA/GAMA

4.1.2 Rejeitos sólidos

Os rejeitos sólidos contendo emissores beta e/ou gama, e nos quais os eventuais emissores alfa tenham concentração total inferior a $3,7 \times 10^8 \text{ Bq/m}^3$ (10^{-2} Ci/m^3), são classificados nas seguintes categorias, de acordo com a taxa de exposição na superfície do rejeito (Tabela 2).

TABELA 2
CLASSIFICAÇÃO DE REJEITOS SÓLIDOS

CATEGORIA	TAXA DE EXPOSIÇÃO (X) NA SUPERFÍCIE	
	$\mu\text{C/kg.h}$	R/h
Baixo Nível de Radiação (SBN)	$X \leq 50$	$X \leq 0,2$
Médio Nível de Radiação (SMN)	$50 < X \leq 500$	$0,2 < X \leq 2$
Alto Nível de Radiação (SAN)	$X > 500$	$X > 2$

4.2 REJEITOS COM EMISSORES ALFA

4.2.2 Rejeitos sólidos

Os rejeitos sólidos contendo emissores alfa, em concentrações superiores a $3,7 \times 10^8 \text{ Bq/m}^3$ (10^{-2} Ci/m^3) são classificados nas seguintes categorias, de acordo com os níveis de concentração (Tabela 5).

TABELA 5
CLASSIFICAÇÃO DE REJEITOS SÓLIDOS COM EMISSORES ALFA

CATEGORIA	CONCENTRAÇÃO (c)	
	(Bq/m^3)	(Ci/m^3)
Baixo Nível de Radiação ($S\alpha\text{BN}$)	$3,7 \times 10^8 < c \leq 3,7 \times 10^{11}$	$10^{-2} < c \leq 10$
Médio Nível de Radiação ($S\alpha\text{MN}$)	$3,7 \times 10^{11} < c \leq 3,7 \times 10^{13}$	$10 < c \leq 10^3$
Alto Nível de Radiação ($S\alpha\text{AN}$)	$c > 3,7 \times 10^{13}$	$c > 10^3$

2. Classificação dos rejeitos de acordo com a recomendação do Organismo Internacional de Energia Atômica – Safety Series No. 111-G-1.1. (IAEA, 1994b)

“ Rejeito isento (Exempt Waste [EW])

Rejeitos isentos contêm uma quantidade tão pequena de materiais radioativos que podem ser considerados como “não radioativos” e podem ser excluídos do controle regulador nuclear. Em outras palavras: embora sejam radioativos do ponto de vista físico, estes rejeitos podem ser descartados utilizando as técnicas e sistemas convencionais, sem se considerar suas propriedades radioativas.

...

Rejeito de atividade baixa e média (Low and Intermediate Level Waste [LILW])

Os rejeitos de atividade baixa e média devem ser subdivididos em rejeitos de meia-vida curta e meia-vida longa.

Rejeitos de meia-vida curta (Short Lived Waste [LILW-SL])

Rejeitos de meia-vida curta de atividade baixa ou intermediária contêm concentrações baixas de radionuclídeos de meia-vida longa. Os métodos de deposição podem variar desde o descarte em simples aterros até a colocação em repositórios profundos, a centenas de metros da superfície.

b) Rejeitos de meia-vida longa (Long Lived Waste [LILW-LL])

Rejeitos de meia vida longa de atividade baixa ou intermediária contêm radionuclídeos de meia-vida longa em quantidades que requerem um grau elevado de isolamento da biosfera, tipicamente, pela deposição em um repositório a centenas de metros da superfície.

A prática corrente é classificar nesta categoria os rejeitos que contenham mais que 400 a 4000 Bq/m³ de emissores alfa de meia-vida longa, dependendo do país.

Rejeitos de atividade alta. (High Level Waste [HLW])

Rejeitos de atividade alta contêm concentrações elevadas de radionuclídeos de meia-vida curta e de meia-vida longa e geram quantidades significativas de calor por decaimento radioativo durante vários séculos. Concentrações de atividade típicas estão na faixa de 5×10^4 a 5×10^5 TBq/m³. O método de deposição é a colocação em repositórios profundos a centenas de metros da superfície.”

3. Classificação dos rejeitos de acordo com a Comissão Reguladora Nuclear dos EUA (USNRC, 2001b)

“CLASSIFICAÇÃO DOS REJEITOS DE ATIVIDADE BAIXA

A classificação dos rejeitos de atividade baixa é feita em função da concentração de certos radionuclídeos, de acordo com a tabela abaixo:

	Critério 1 ⁽¹⁾	Critério 2
Classe A	$c \leq 0,1 \times C1$	$c \leq C2$
Classe B	$c \leq C1$	$C2 < c \leq C3$
Classe C	$0,1 \times C1 < c \leq C1$	$C3 < c \leq C4$
GTCC LLW ⁽²⁾	$c > C1$	$c > C4$

⁽¹⁾ Os rejeitos devem satisfazer aos dois critérios simultaneamente.

⁽²⁾ Sigla de: *Greater-than-class C low-level waste*

onde C1, C2, C3 e C4 são definidos de acordo com a tabela abaixo:

CONCENTRAÇÕES LIMITE				
	C1 (Ci/m ³)	C2 (Ci/m ³)	C3 (Ci/m ³)	C4 (Ci/m ³)
¹⁴ C	8	—	—	—
¹⁴ C em metal ativado	80	—	—	—
⁵⁹ Ni	220	—	—	—
⁹⁴ Nb	0,2	—	—	—
⁹⁹ Tc	3	—	—	—
¹²⁹ I	0,08	—	—	—
RN α com $T_{1/2} > 5$ anos	100 (nCi/g)	—	—	—
²⁴¹ Pu	500 (nCi/g)	—	—	—
²⁴² Cm	20.000 (nCi/g)	—	—	—
RN $\alpha\beta\gamma$ $T_{1/2} > 5$ anos	—	700	—	—
³ H	—	40	—	—
⁶⁰ Co	—	700	—	—
⁶³ Ni	—	3,5	70	70
⁶³ Ni	—	35	700	7000
⁹⁰ Sr	—	0,04	150	7000
¹³⁷ Cs	—	1	44	4600

Obs.: Os rejeitos das classes A, B e C são aceitos para deposição em repositórios de superfície.”

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (ACTIVA, 2001) ACTIVA PRODUTOS CIENTÍFICOS E SERVIÇOS. **Cotação de preços para fontes seladas de fabricação da AEA Technology** São Paulo, Setembro de 2001, Arquivo IPEN/NR.
- (ALLRED, 1994) ALLRED, W. E. **Potential co-disposal of greater-than-class C low-level waste with Department of Energy special case waste.** Idaho Falls: Idaho National Engineering Laboratory, 1994. (DOE/LLW-213).
- (AMERSHAM, 1996) AMERSHAM INTERNATIONAL PLC. **Industrial gauging and analytical instrumentation sources** Buckinghamshire, UK, 1996.
- (AQUINO, 2000) AQUINO, A. **Comunicação pessoal** São Paulo, Junho, 2000.
- (BELLIAN e JOHNSTON, 1995) BELLIAN, J.C.; JOHNSTON, J.G. Developing methods for detecting radioactive scrap. *In*: ASSOCIATION OF IRON AND STEEL ENGINEERS ANNUAL CONVENTION, 25-28 Sept. 1995, Pittsburgh. **Proceedings ...** [S.l.]: Iron & Steel Engineers, 1995 (CONF-9509197).
- (BELLIAN, 1993) BELLIAN, J.G. **Radioactive material in scrap metal - its frequency, consequences, and detection** Solon, Ohio: Harshaw/Bicron, 1993.
- (BLERK et al., 1999) BLERK, J.J. VAN; VIVIER, J.J.P.; PIROW, P.; ANDREOLI, M.A.G. HEARD, R.G. **The borehole disposal concept for spent sources** Pretoria: Atomic Energy Corporation, 1999 (GEA-1353).
- (BOYER e GALL, 1985) BOYER, H.E.; GALL, T.L. **Metals Handbook - desk edition** Metals Park,: American Society for Metals, 1985.
- (CASTAGNET, 1998) CASTAGNET, A.C. Current status of nucleonic gauge applications in Brazil and the need for the technology ... *In*: MEETING ON EMERGING NEW APPLICATIONS OF NCS IN INDUSTRY, 5-8 Sept.1998, Vienna. **Report of the Advisory Group Meeting on Emerging New Applications of NCS in Industry.** Vienna: International Atomic Energy Agency, 1998.
- (CLEGG et al., 1997) CLEGG, R.; PINER, A.; SMITH, A.; QUARTERMAINE, J.; THORNE, M.C. Considerations of post-closure controls for a near surface low level waste disposal site *In*: SYMPOSIUM ON EXPERIENCE IN PLANNING AND OPERATION OF LOW LEVEL WASTE DISPOSAL FACILITIES, June 17-21, 1996, Vienna. **Proceedings ...** Vienna: International Atomic Energy Agency, 1997. p. 505-521.
- (CNEN, 1984) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de instalações radiativas** 1984 . (Norma experimental CNEN-NE-6.02).
- (CNEN, 1985) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas** 1985. (Norma Experimental CNEN-NE-6.05).
- (CNEN, 1997) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Norma CNEN-NE-6.09 – Critérios de aceitação de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação.** Rio de Janeiro, SENOR/CNEN, 1997 . (Ofício/Circular 01/97NE609).

- (CNEN, 1998) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - SUPERINTENDÊNCIA DE LICENCIAMENTO E CONTROLE. **Sinr_rds.dbf. Registro de instalações radiativas Banco de dados em disquete de 3 1/2 pol.** Rio de Janeiro: CNEN, 1998.
- (CPA, 1999) CENTRAL PERFURADORA ARARAQUARENSE. **Proposta técnica para perfuração de poço para disposição final de fontes radioativas.** Araraquara: CPA, 1999.
- (DAMES AND MOORE, 1993) DAMES AND MOORE. **Economics of a small-volume low-level radioactive waste disposal facility** Idaho Falls: EG&G Idaho, 1993 (DOE/LLW-170).
- (DINEHART et al., 1997) DINEHART, S.M.; HATLER, V.A.; GRAY, D.W.; GUILLEN, A.D.; BROWN JR., C. JONES, S.W.; GRIGSBY, C.O.; LEONARD, L.E.; CAMPBELL, R.A. **Radioactive source recovery program. Responses to neutron source emergencies.** Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1997 (LA-UR-97-1105).
- (EG&G, 1990) EG&G IDAHO. **Managing greater-than-class C low-level radioactive waste: a strategic plan.** Idaho Falls: EG&G Idaho., 1990 (DOE/LLW-79T).
- (ENDO, 2001) ENDO, L.S. **Comunicação pessoal.** São Paulo, 2001.
- (FEIZOLLAHI e SHROPSHIRE, 1992) FEIZOLLAHI, F.; SHROPSHIRE, D. **Waste management facilities cost information report.** Idaho Falls: EG&G Idaho, 1992 (EGG-WTD-10443).
- (FEUSER et al., 1996) FEUSER, W.; BARNERT, E.; BIJGEN, H.; WETZLER, H. Investigations concerning the mechanical load on waste packages in vertical repository boreholes. **Nuclear Engineering Design**, v. 162, p. 325-328, 1996.
- (FISHER, 1992) FISHER, D. **Potencial greater-than-class C low-level waste sealed radiation source recycle initiatives.** Idaho Falls: EG&G Idaho, 1992 (DOE/LLW-145).
- (GARCIA-BENGOCHEA, 1983) GARCIA-BENGOCHEA, J.I. Protecting water supply aquifers in areas using deep-well wastewater disposal. **Journal AWWA**, p. 288-291, June 1983.
- (GUETAT et al., 1988) GUETAT, P.; WHITEHEAD, W.; THOMAS, K.T. **Interoffice Memorandum - Report of the Waste Management Advisory Programme Mission to Brazil, 7 - 11 March, 1988.** Vienna: International Atomic Energy Agency, 1988.
- (HALSEY, 1995) HALSEY, W.G. Repository and deep borehole disposition of plutonium *In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN NUCLEAR SOCIETY*, June 25-29, 1995, Philadelphia, PA. **Transactions of the American Nuclear Society**, v. 72. [S.l.]: ANS, 1995. p. 66. (UCRL-JC-123436)
- (HEIKEN, 1996) HEIKEN, G.; WOLDEGABRIL, G.; MORLEY, R.; PLANNERER, H. **Deep borehole disposition of surplus fissile materials - the site selection process.** Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1996 (LA-UR-96-870).
- (HESS, 1957) HESS, H.H. The disposal of radioactive waste on land - Report of the Committee on Waste Disposal **National Academy of Science - National Research Council**, Washington, n. Pub. 519, 1957.

- (HOLUB, 1993) HOLUB, J. The institutional waste management in Czech Republic *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR WASTE MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL REMEDIATION*, Sept. 5-11, 1993, Praga. **Proceedings**. New York: American Society of Mechanical Engineers. Vol. 3, 1993. p. 337-341.
- (IAEA, 1981) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Underground disposal of radioactive wastes - basic guidance** Vienna: IAEA, 1981. (Safety Series No. 54.)
- (IAEA, 1983a) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (a). **Disposal of low- and intermediate-level solid radioactive wastes in rock cavities - a guide book**. Vienna: IAEA, 1983. (Safety Series No. 59.)
- (IAEA, 1983b) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (b). **Criteria for underground disposal of solid radioactive wastes**. Vienna: IAEA, 1983. (Safety Series No. 60.)
- (IAEA, 1983c) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (c). **Concepts and examples of safety analyses for radioactive waste repositories in continental geological formations** Vienna: IAEA, 1983. (Safety Series No. 58.)
- (IAEA, 1988) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The radiological accident in Goiania**. IAEA, Vienna, 1988.
- (IAEA, 1989) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Safety principles and technical criteria for the underground disposal of high level radioactive waste**. Vienna: IAEA, 1989. ((Safety Series No. 99.)
- (IAEA, 1990) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Handling, conditioning, and disposal of spent sealed sources** Vienna: IAEA, 1990 . (IAEA-TECDOC-548.)
- (IAEA, 1991) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Nature and magnitude of the problem of spent radiation sources** Vienna: IAEA, 1991 . (IAEA-TECDOC-620.)
- (IAEA, 1992) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Review of available options for low level radioactive waste disposal**. Vienna: IAEA, 1992 . (IAEA-TECDOC-661.)
- (IAEA, 1994a) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (a). **Siting of geological disposal facilities**. Vienna: IAEA, 1994. (Safety Series No. 111-G-4.1.)
- (IAEA, 1994b) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (b). **Classification of radioactive waste**. Vienna: IAEA, 1994. (Safety Series No. 111-G-1.1.)
- (IAEA, 1995) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The principles of radioactive waste management**. Vienna: IAEA, 1995. (Safety Series No. 111-F.)
- (IAEA, 1996) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Conditioning and interim storage of spent radium sources** Vienna: IAEA, 1996. (IAEA-TECDOC-886.)
- (IAEA, 1997a) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (a). **Joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management** Vienna: IAEA, 1997. (INFCIRC/546.)

- (IAEA, 1997b) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (b). **International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources.** Vienna: IAEA, 1997. (Safety Series No. 115.)
- (IAEA, 1998a) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (a). **Safe storage of radiation sources.** Disponível em: <<http://www.iaea.org/worldatom/updates/radsources.html>> Acesso em: Oct. 16, 1998.
- (IAEA, 1998b) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (b). **Near surface disposal of radioactive waste. Draft safety requirements.** Vienna: IAEA, 1998. (NS 153.)
- (IAEA, 1998c) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (c). Advisory group meeting on emerging new applications of nucleonic control systems in industry. May 5-8, 1998, Vienna. **Report of the Advisory Group Meeting on** Vienna: IAEA, 1998.
- (IAEA, 1999a) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (a). **Derivation of quantitative acceptance criteria for disposal of radioactive waste to near surface facilities: development and implementation of an approach.** Vienna: IAEA, 1999. (Draft Safety Report.)
- (IAEA, 1999b) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (b). **Safety assessment for near surface disposal of radioactive waste - safety guide.** Vienna: IAEA, 1999. (Safety Series No. NS-G-1.1.)
- (IAEA, 1999c) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (c). **Near surface disposal of radioactive waste - requirements.** Vienna: IAEA, 1999. (Safety Series No. WS-R-1.)
- (IAEA, 2000) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radioactive waste management profiles - a compilation of data from the waste management database. No. 3.** Disponível em: <<http://www-newmdb.iaea.org/>> Acesso em: May 3, 2000.
- (IAEA, 2002) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. IAEA Daily Press Review nº 17, February 01, 2002. IAEA. Vienna, 2002. Disponível em: <http://www.iaea.org/worldatom/Press/P_release/> Acesso em: 08 de fevereiro de 2002.
- (ICRP, 1993) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Protection from potential exposure: a conceptual framework.** Oxford: Pergamon, 1993. (ICRP Publication 64)
- (ICRP, 1998) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste.** Oxford: Pergamon, 1998. (ICRP Publication 77.)
- (ICRP, 2000) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste** Oxford: Elsevier, 2000. (ICRP Publication No. 81.) v. .
- (INEL, 1994) IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY. **Greater-than-class C low-level radioactive waste characterization - estimated volumes, radionuclide activities, and other characteristics** Idaho Falls: INEL, 1994. 722 p. (DOE/LLW-114-Rev. 1).

- (IGOMASA, 1999) IGOMASA, W.S. **Comunicação pessoal**. São Paulo, 1999.
- (ISO, 1980) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Sealed radioactive source - classification** : Geneva, Switzerland, 1980 (ISO 2919).
- (ISO, 1992) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Radiation protection - sealed radioactive sources - leakage test methods** : Geneva, Switzerland, 1992 (ISO 9978).
- (ISO, 1994) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Sealed radioactive sources - general**. Geneva, 1994 (ISO 1677).
- (KELLY, 1997) KELLY, N.E. Federal foot-dragging on radioactive scrap. **Newsteel**, [S.l.], Dec. 1997. <http://www.newsteel.com/features/ArchivedArticles.asp>. Acesso em: Oct. 23, 2001.
- (KERR, 1997) KERR, T.A. **A comparison on cross-reference of commercial low-level radioactive waste acceptance criteria** [S.l.]: United States Department of Energy, 1997 (DOE/LLW-239).
- (KIVISÄKK, 1995) KIVISÄKK, E. Radioactive source adrift. SSI helps Estonian authorities. **SSI News**, v. 1, n. 3, p. 1-3, 1995.
- (KOZAK et al., 1999) KOZAK, M.W.; STENHOUSE, J.H.; BLERK, J.J. VAN; HEARD, R.G. **Borehole disposal of spent sources. Volume II. Initial safety assessment and evaluation of the disposal concept** Pretoria: Atomic Energy Corporation, 1999 (GEA-1353).
- (LAAO, 1995) LOS ALAMOS AREA OFFICE. **Environmental assessment - radioactive source recovery program**. Washington: United States Department of Energy, 1995 (DOE-EA-1059).
- (LANL, 2001) LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY. **Order form for isotopes**. Disponível em: <<http://www.lanl.gov/worldview/>> Acesso em: 23 Out. 2001.
- (LEE e SHINGLETON, 1996) LEE, D.W.; SHINGLETON, K.L. **Radioactive sealed source reasonable accountability, exemption, and licencing activity thresholds - a technical basis**. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1996 (LA-UR--96-2132).
- (LUBENAU e YUSKO, 1995) LUBENAU, J.O.; YUSKO, J.G. Radioactive materials in recycled metals. **Health Physics**, v. 68, n. 4, p. 440-451, 1995
- (LYMAN, 1961) LYMAN, T. **Metals handbook**. 8th ed. Metals Park: American Society for Metals, 1961. v. 1.
- (MIRANDA e VICENTE, 1999) MIRANDA, L.E.T.; VICENTE, R. **Processos para a gestão dos pára-raios radioativos no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1999.
- (MIRANDA, 2000) MIRANDA, L.E.T. **Comunicação pessoal**. São Paulo, 2000.
- (MORALES e GRÁVALOS, 1993) MORALES, A.; GRÁVALOS, J.M. Acceptance criteria for waste packages at El Cabril Repository Waste Quality Verification Laboratory. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR WASTE MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL REMEDIATION, Sept. 5-11, 1993, Praga. **Proceedings. Vol. 3**. New York: American Society Mechanical Engineers., 1993. p. 841-847.

- (NAKASHIMA e HARA, 1993) NAKASHIMA, T.; HARA, M. Low level radioactive waste package inspection for shipping and disposal *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR WASTE MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL REMEDIATION*, Sept. 5-11, 1993, Praga. **Proceedings. Vol. 3.** New York: American Society of Mechanical Engineers, 1993. p. 73-78.
- (NBS, 1978) NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. **Sealed radioactive sources - classification** : Washington, 1978 (ANSI N542-1977).
- (NEA, 1996) NUCLEAR ENERGY AGENCY. **The environmental and ethical basis of geological disposal of long-lived radioactive wastes - a collective opinion of the radioactive waste management committee.** Paris: NEA, 1996.
- (NEA, 1998) NUCLEAR ENERGY AGENCY. **Beneficial uses and production of isotopes.** Paris: NEA, 1998.
- (NEIS, 1993) NEIS, A. Public and political issues in radioactive waste management in the Federal Republic of Germany. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR WASTE MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL REMEDIATION*, Sept. 5-11, 1993, Praga. **Proceedings, Vol.2.** New York: American Society of Mechanical Engineers, 1993. p. 745-752.
- (NELSON, 1990) NELSON, E.B. **Well cementing.** Amsterdam: Elsevier, 1990.
- (NR, 2000) DEPARTAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS. **Rejeitos radioativos depositados no IPEN-CNEN/SP.** NR - IPEN, 2000. Arquivo em disquete de 3,5 pol.. Planilha Excel.
- (NUTRINO, 2001) NORTHWESTERN UNIVERSITY. **Radioactive waste disposal costs skyrocket.** Nutrino 3. Disponível em: <<http://www.nwu.edu/research-safety/rad/nutrino/nutrino3.htm>> Acesso em: Oct. 18, 2001.
- (ORNL, 1998) OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. **Isotopes price list.** Disponível em: <http://www.ornl.gov/isotopes/p_r_list.htm> Acesso em: Sept. 29, 1998.
- (PETTERSSON, 1992) PETTERSSON, B.G. Improving the management of spent radiation sources. **IAEA Bulletin**, Vienna, v. 34, n. 3, p. 19-23, 1992
- (ROMETSCH, 1993) ROMETSCH, R. Human intrusion and safeguarding of repositories. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SAFE MANAGEMENT AND DISPOSAL OF NUCLEAR WASTE*, Jun. 13-18, 1993, Avignon. **Proceedings, Vol. 1.** Paris: Société Française d'Energie Nucleaire, 1993. p.399-407.
- (RUIZ e ALONSO, 1993) RUIZ, M.C.; ALONSO, J.A. Safety aspects related to the operation of the Cabril L/LLW disposal facility. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR WASTE MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL REMEDIATION*, Sept. 5-11, 1993, Praga. **Proceedings, Vol. 3.** New York: American Society of Mechanical Engineers, 1993. p. 559-564.
- (SJÖBLOM, 2000) SJÖBLOM, K-L. **Nuclear waste disposal in Finland: special emphasis to low and intermediate waste disposal.** Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority, 2000.

- (SKAGIUS, 1992) SKAGIUS, K. **The international intraval project. Phase 1 case 2. Radionuclide migration in single natural fractures in granite.** Paris: Nuclear Energy Agency, 1992 (INIS-XN-417).
- (SORDI, 2000) SORDI, G.M.A.A. Equations proposal to determine risk limits for workers and for public individuals. *In: 10TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION ON HARMONIZATION OF RADIATION, HUMAN LIFE, AND THE ECOSYSTEM, May 14–19, 2000, Hiroshima, Japan. Proceedings.* Tokyo. Japan Health Physics Society, 2000. (CD-ROM WINDOWS 95/98)
- (STRUXNESS et al., 1959) STRUXNESS, E.G.; COWSER, K.E.; DE LAGUNA, W.; JACOBS, D.G.; MORTON, R.J.; TAMURA, T. Waste disposal research and development in the United States of America. *In: SCIENTIFIC CONFERENCE ON DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTES, Nov. 16-21, 1959, Mônaco. Proceedings..* Vienna: International Atomic Energy Agency, 1960. p. 481-498.
- (TOMINAGA, 1998) TOMINAGA, H. The progress an trends in the nucleonic gauge technology. *In: ADVISORY GROUP MEETING ON EMERGING NEW APPLICATIONS OF NCS IN INDUSTRY, May 5-8, 1998., Vienna. Report of the Advisory Group Meeting.* Vienna: International Atomic Energy Agency, 1998.
- (USDOE, 1995) UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Strategy for managment and disposal of Greater-than-class C Low Level Radioactive Waste – Notice of Inquiry.** Carson City: State of Nevada Nuclear Waste Project Office. 1995. Disponível em: <http://www.state.nv.us/nuc_waste/gtcc/gtccnotic.htm> Acesso em: Nov. 11, 2001.
- (USDOE, 1998) UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Radioactive waste management: definitions. Orders. DOE 5820.2A..** Washington: Department of Energy, 1998.
- (USNRC, 1992) UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Licensing requirements for land disposal of low-level radioactive waste : Code of Federal Regulations.** Office of the Federal Register. 1992 (10CFR61).
- (USNRC, 1999) UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **USNRC Operations Center - Daily Events Report - 97 May, 23.** Disponível em: <<http://www.nrc.gov/NRR/DAILY/dr.htm>> Acesso em: Oct. 20, 1999.
- (USNRC, 2001a) UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Registry of radioactive sealed sources and devices. Safety evaluation of sealed source.** Disponível em: <<http://searchpdf.adobe.com/proxies/0/65/87/6.html>> Acesso em: Nov. 16, 2001.
- (USNRC, 2001b) UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Code of Federal Regulations, Title 10, Part 61, Section 55.** US Government Printing Office. Disponível em: <<http://www.nrc.gov/NRR/DAILY/dr.htm>> Acesso em: Nov. 11, 2001.
- (USNRC, 2002) UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **USNRC Office of Public Affairs – Press Release - February 01, 2002.** Disponível em: <<http://www.nrc.gov>> Acesso em: Fev. 08, 2002.

(WELLS et al., 2001) WELLS, D. A.; ANGUS, M. J.; CECILLE, L. Management and disposal of disused sealed radioactive sources in Europe. In: **International Conference on Managment of Radioactive Waste from Non-Power Applications – Sharing Experience. St. Paul’s Bay (Malta), 5 – 9 Nov. 2001. Book of extended synopses.** INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 2001. p. 98-99. Resumo no INIS Database: <http://inisdb.iaea.org/inis/>.