

IPEN/GRR-REL-06/16

CATEGORIA DISTRIB:

**Cálculo do risco radiológico de fontes seladas em  
desuso em função do tempo**

**Júlio de Oliveira Júnior**

**Roberto Vicente**

Setembro/2016

Gerência de Rejeitos Radioativos  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear  
São Paulo

**GRR – Gerência de  
Rejeitos Radioativos**





IPEN/GRR-REL-06/16

CATEGORIA DISTRIB:

**Cálculo do risco radiológico de fontes seladas em  
desuso em função do tempo**

**RELATÓRIO TÉCNICO DE  
INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

**Júlio de Oliveira Júnior**

**Orientador: Roberto Vicente**

Setembro/2016

Gerência de Rejeitos Radioativos  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear  
São Paulo

**GRR – Gerência de  
Rejeitos Radioativos**



Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN  
Presidente: Renato Machado Costa

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Ipen-Cnen/SP  
Superintendente: José Carlos Bressiani

Gerência de Rejeitos Radioativos - GRR  
Gerente: Júlio Takehiro Marumo

A Gerência de Rejeitos Radioativos é o departamento do Ipen-Cnen/SP que tem como Missão promover a gestão segura dos rejeitos radioativos gerados no Brasil, dentro dos princípios éticos de proteção ao homem e ao meio ambiente. O objetivo da gestão dos rejeitos radioativos é assegurar um nível adequado de proteção à população e às gerações futuras e a preservação do meio ambiente, protegendo, além do Homem, as outras espécies e os recursos naturais.

A GRR presta serviços de gestão de rejeitos aos usuários de materiais radioativos das áreas industrial, médica e outras. Desenvolve atividades de pesquisa e desenvolvimento conduzidas no sentido de se aprimorar os métodos, as técnicas e as estratégias de gestão para reduzir os custos e melhorar a segurança no tratamento dos rejeitos. As atividades de P&D estão voltadas para as áreas de caracterização, tratamento e deposição final. Além disso, a GRR participa das atividades de ensino, formação e treinamento nas diversas áreas de aplicação da tecnologia nuclear.

O presente relatório técnico foi preparado para divulgar, da forma mais ampla possível, as informações contidas nos resultados das atividades de pesquisa e desenvolvimento da GRR, para a administração do Estado, para a comunidade acadêmica, e para o público em geral.

Comentários e sugestões sobre este ou outros relatórios da GRR são bem vindos e devem ser dirigidos a

GRR – Ipen-Cnen/SP  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária  
CEP 05508-000 – São Paulo, SP  
Fone: 11 3133-9745  
Junho/2016

Página do Ipen-Cnen/SP na Internet: <http://www.ipen.br>

Página da CNEN na Internet: <http://www.cnen.gov.br>

Sugestão de referência deste relatório:

Oliveira, Júlio Jr. Cálculo do risco radiológico de fontes seladas em desuso em função do tempo. Ipen-Cnen/SP, São Paulo, Setembro de 2016. (IPEN/GRR-REL-06/16)

Palavras-chave: disused sealed radioactive source, radioactive waste, radiological risk, decay chain

NOTA: Nem o Ipen-Cnen/SP nem a GRR dão garantias, expressas ou implícitas, da exatidão, completeza ou utilidade de quaisquer informações, produtos ou processos descritos neste relatório, ou de que seu uso não infrinja direitos privados. A referência neste relatório de qualquer produto comercial, processo ou serviço pelo nome comercial, marca ou fabricante não constitui nem implica necessariamente a recomendação ou favorecimento pelo GRR ou pelo Ipen-Cnen/SP.

As conclusões e pontos de vista apresentados neste relatório são do autor.

Para cópias deste documento, contatar:

Biblioteca Terezine Arantes Ferraz  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária  
CEP 05508-000 – São Paulo, SP  
Fone: 11 3133-9094  
[bibl@ipen.br](mailto:bibl@ipen.br)

Para contatos sobre o conteúdo:

Roberto Vicente  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária  
CEP 05508-000 – São Paulo, SP  
Fone: 11 3133-9758  
[rvicente@ipen.br](mailto:rvicente@ipen.br)

## **Resumo**

O objetivo do presente trabalho é calcular o risco radiológico de fontes radioativas seladas em desuso (FRSD) de Califórnio-252 e Cúrio-244 com base na atividade de suas cadeias de decaimento e projetar o risco radiológico que oferecerão no futuro comparado com o risco atual. As equações de Bateman foram usadas para determinar as atividades e os cenários de exposição externa à fonte puntiforme, e inalação e ingestão do material das fontes, em situações de intrusão em um repositório, foram usados para cálculo do risco relativo ao risco atual. O risco para essas fontes é até cem mil vezes menor que o atual em um prazo de 100 anos e, em geral, é pior nos cenários de exposição por inalação. Os dados podem ser usados para melhorar a gestão dos rejeitos estudados e ajudar a definir o tipo adequado de deposição para as FRSD.

## **Abstract**

The purpose of this paper is to calculate the radiological risk of disused sealed radioactive sources (DSRS) of Californium-252 and Curium-244 based on the activities of the decay chain, and foresee the radiological risk they will present in the future as compared to the present risk. The Bateman equations were used to determine the future values of the activities and scenarios of exposure to point sources, inhalation and ingestion of the source materials, under intrusion situations, were used to calculate the future relative radiological risk. In less than one hundred years, the risk will be one hundred thousand times lower than today, and exposure by inhalation is generally the worst case. The results can be used to improve the waste management of these sealed sources and help to decide the best solution for their disposal.



## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Decaimento Radioativo e Radiação .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 Tipos de Decaimento Radioativo .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3 Gestão de Rejeitos Radioativos .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Problema Estudado.....</b>	<b>12</b>
<b>1.5 Risco Radiológico de uma FRSD .....</b>	<b>13</b>
<b>1.6 Tipos de Exposição.....</b>	<b>13</b>
<b>1.7 Cadeias de Decaimento .....</b>	<b>14</b>
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Materiais e Métodos .....</b>	<b>15</b>
<b>4. Resultados e Discussão .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1 Tabelas .....</b>	<b>16</b>
<b>4.2 Gráficos .....</b>	<b>31</b>
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>35</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>36</b>



## 1. Introdução

### 1.1 Decaimento Radioativo e Radiação

O processo de decaimento radioativo é o fenômeno responsável pela emissão radioativa de um radioisótopo. Existem vários tipos diferentes de processos de emissão, e em todos eles a radioatividade do isótopo decresce.

É considerada radiação ionizante qualquer partícula ou radiação eletromagnética que, ao interagir com a matéria, arranca elétrons fortemente ligados dos átomos ou moléculas produzindo íons. Valores mínimos típicos para considerar uma radiação como ionizante costumam ficar entre 10 e 30 eV.

À medida que um isótopo radioativo decai ele pode transformar-se em outros isótopos, radioativos ou não. Um isótopo sempre decairá para outro de número de massa menor ou igual ao anterior.

Quando um radioisótopo decai para outro isótopo radioativo, o processo continua, dando origem a outros isótopos e assim sucessivamente até chegar a um elemento estável. Essas famílias de isótopos são conhecidas como cadeias de decaimento.

Uma cadeia de decaimento é sempre composta por isótopos-pai e isótopos-filhos. Os isótopos-pais dão origem aos isótopos-filhos; esses por sua vez, podem dar origem a novos isótopos, e nesse caso serão tanto isótopos-pai de outras cadeias como isótopos-filhos dentro da cadeia inicial.

O último isótopo de uma cadeia de decaimento será sempre um isótopo estável, ou seja, não radioativo, e, portanto, não será capaz de gerar novos isótopos-filhos. Em alguns casos, podem ser necessários trilhões de anos para um radioisótopo decair para um isótopo estável.

Chama-se 'atividade' a grandeza definida como o número de transformações de isótopo-pai para isótopo-filho, por unidade de tempo, que uma amostra do material radioativo apresenta. Em outras palavras, o número de átomos que decaem por segundo é chamado atividade e sua unidade no Sistema Internacional de Medidas é o becquerel, abreviado (Bq).

Entende-se como meia-vida o tempo necessário para que a atividade de um dado material radioativo caia pela metade, como resultado de um processo de decaimento radioativo.

## 1.2 Tipos de Decaimento Radioativo

Os decaimentos radioativos são acompanhados da emissão de radiações. Cada tipo de emissão possui alcance, intensidade, frequência, penetração e risco biológico distintos.

É possível prever o próximo isótopo de uma cadeia de decaimento a partir do tipo de decaimento radioativo apresentado por um material.

As fontes estudadas neste trabalho apresentaram apenas três tipos de decaimento radioativo: decaimento alfa, decaimento beta menos e fissão espontânea. Além desses tipos de decaimento ainda existem os decaimentos por captura eletrônica, transição isomérica, conversão interna, decaimento beta mais e emissão de cluster. Detalhou-se apenas os tipos de decaimento que foram usados durante a pesquisa.

- **Transição Isomérica e Emissão Gama:** Não é um tipo primário de decaimento radioativo, mas costuma acontecer em conjunto com a radiação alfa e beta. A radiação gama emitida durante esses processos é altamente penetrante e possui longo alcance, necessitando materiais densos e espessos para a blindagem. É muito perigosa, oferecendo sério risco mesmo quando não há contato físico direto com o radioisótopo.
- **Decaimento Alfa:** Emite partículas carregadas de núcleos de Hélio. Como é uma partícula pesada, possui curto alcance e pouca penetração, podendo ser detido por uma folha de papel. Porém, as partículas carregadas são bastante perigosas e podem causar sérias consequências quando entram em contato direto com a pele. Costuma ser mais perigoso quando ingerido ou inalado. É uma emissão frequente em núcleos pesados.
- **Decaimento Beta menos ( $\beta^-$ ):** Ocorre quando um núcleo tem excesso de nêutrons. Emite um par anti-neutrino e elétron e, muitas vezes também, raios gama. Partículas beta podem dar origem a raios-X de freiamento que são altamente penetrantes e também surgem de decaimentos por captura eletrônica.

- **Decaimento por Fissão Espontânea:** É um dos tipos mais raros de decaimento, sendo poucos os radioisótopos que decaem apenas por esse processo. Ocorre quando um núcleo fissiona, gerando fragmentos de núcleos mais leves e emite nêutrons durante o processo. Os núcleos emitidos possuem alcance ainda menor que o das partículas alfa, mas também possuem seu próprio tipo de decaimento radioativo que pode oferecer riscos adicionais. Os nêutrons gerados possuem longo alcance, e precisam de blindagens diferentes das blindagens tradicionais para serem detidos.

Alguns radioisótopos apresentam mais de um tipo de decaimento radioativo simultaneamente, decaindo para mais de um tipo de isótopo-filho. É possível estimar a porcentagem de cada tipo de isótopo-filho que será gerado através da porcentagem do tipo de emissão do isótopo-pai. Se o isótopo-pai apresentar 95% de emissão alfa, e 5% de emissão  $\beta^-$ , 95% serão gerados pelo decaimento alfa e 5% pelo  $\beta^-$ .

Diferente dos outros tipos de decaimento radioativo, o decaimento por fissão espontânea não decai para um único tipo de isótopo, mas sim para uma grande quantidade de radioisótopos que obedecem a uma distribuição probabilística. Essa cadeia de decaimento é muito complexa e exige modelagens matemáticas trabalhosas para ser calculada com precisão satisfatória.

Como os poucos radioisótopos estudados neste trabalho que decaem por fissão espontânea apresentam porcentagens muito baixas deste tipo de decaimento e sua modelagem é demasiadamente complicada, eles foram omitidos e serão alvo de trabalhos futuros apenas para melhorar a exatidão das taxas de risco e complementar o entendimento do processo de fissão espontânea.

Este trabalho baseou-se na tabela de radioisótopos alemã KarlsruheNuklidkarte [1] para calcular e descrever os decaimentos radioativos. Extraíram-se também da mesma tabela as meias-vidas usadas como base para os cálculos.

### 1.3 Gestão de Rejeitos Radioativos

Quando uma fonte radioativa deixa de ter aplicações práticas ela passa a ser tratada como rejeito radioativo. Os rejeitos são enviados a um depósito inicial onde são selados por blindagens, visando diminuir o risco radiológico dos radioisótopos presentes.

Cabe à Gestão de Rejeitos recolher, selar, classificar, estudar, armazenar e decidir o tipo de depósito adequado para um rejeito radioativo. Apenas com o conhecimento aprofundado do decaimento radioativo e dos riscos oferecidos por um rejeito é possível tomar decisões importantes e garantir a segurança da sociedade e do meio ambiente sem deixar o encargo para as futuras gerações.

Um depósito intermediário é usado para classificar, selar e armazenar rejeitos radioativos até decidir o destino final da fonte selada. Quando as fontes apresentam risco alto e meia-vida longa, devem ser encaminhadas para depósitos definitivos, também conhecidos como repositórios ou destinos finais, que precisam ser preparados para comportar os rejeitos por centenas e até milhares de anos em segurança.

Nos depósitos iniciais e intermediários as fontes com meia-vida curta podem, também, ficar guardadas longe do contato humano, enquanto a radioatividade diminui com o passar dos anos até atingir o limite de dispensa, quando o rejeito radioativo pode voltar a ser tratado como rejeito comum.

Os depósitos intermediários são construídos acima do solo e possuem segurança média, sendo feitos para armazenar rejeitos que precisam de pouco tempo para poder retornar à classificação de rejeito comum ou apenas como caminho intermediário entre os rejeitos mais perigosos e o destino final.

Repositórios, por sua vez, costumam ser construídos no subsolo, recebendo o nome de repositórios geológicos, quando a profundidade é de centenas de metros ou mais. Esse tipo de repositório é muito mais caro e muito mais difícil de construir, mas oferece os benefícios de uma segurança muito superior, sendo adequado para armazenar os rejeitos de alto risco, os quais dificilmente voltarão a ser tratados como rejeito comum nos próximos milhares de anos.

No Brasil, até o presente momento, não existem repositórios, e os rejeitos de alta periculosidade são armazenados junto a rejeitos menos perigosos em depósitos intermediários.

#### **1.4 Problema Estudado**

Armazenar rejeitos radioativos adequadamente em depósitos é um dos grandes desafios enfrentados pela gestão de rejeitos. Para estimar um índice de risco realista para uma fonte radioativa selada em desuso (FRSD) é necessário saber como ocorre o decaimento do radioisótopo que ela contém. Conhecer o risco que uma FRSD representa ao longo do tempo é imprescindível para se determinar a segurança que um depósito fornecerá no futuro.

É conhecido o fato de que elementos diferentes frequentemente apresentam níveis de toxicidade distintos que independem de sua atividade e de suas meias vidas. Portanto, se esses fatos forem ignorados na hora de armazenar os rejeitos radioativos, as estimativas de risco radiológico podem tornar-se imprecisas, prejudicando a gestão desses materiais.

Neste trabalho analisou-se as cadeias de decaimento de dois tipos de FRSD armazenados no Ipen, uma de Califórnio-252 e outra de Cúrio-244. Estima-se que as fontes estudadas tenham sido geradas no início da década de 1970, e, portanto, a data referencial adotada para realizar os cálculos de decaimento foi 1º de Janeiro de 1970. Essa estimativa foi feita com base nos dados sobre a produção e comercialização do califórnio [2]; e também baseados na época de aquisição das fontes pelo Ipen.

Mediu-se as atividades destas FRSD anteriormente, em um trabalho realizado no Ipen em dezembro de 2015. Com esses dados foi possível estimar a atividade correspondente em 1º de Janeiro de 1970. Essa é uma abordagem bem conservadora, levando em conta que se houver erro na estimativa da data de origem da fonte pura ela estará sendo superestimada, e assim, na pior das hipóteses, a atividade real dos elementos estará, também, superestimada.

## 1.5 Risco Radiológico de uma FRSD

O risco radiológico de uma FRSD é calculado com base no fator de dose dos radioisótopos e no tipo de exposição sofrida por um indivíduo caso entre em contato com o rejeito. O risco radiológico que as fontes seladas representavam em 1º de Janeiro de 1970 é considerado o risco inicial, e todos os cálculos foram feitos de modo a comparar esse risco inicial com o risco oferecido no futuro.

Dessa forma, o risco inicial representado pelas FRSD em Janeiro de 1970 é equivalente a 1, e o risco relativo oferecido pelos isótopos-filhos formados durante o processo de decaimento será sempre uma fração do risco inicial.

Este risco calculado é válido apenas caso exista um cenário de intrusão. Ou seja, apenas se algum indivíduo entrar em contato com a FRSD no futuro. As fontes não oferecem risco imediato se estiverem armazenadas de forma adequada.

## 1.6 Tipos de Exposição

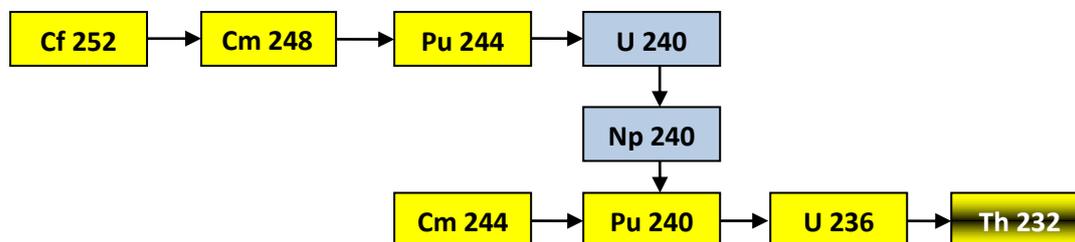
As exposições radiológicas foram divididas em 3 categorias diferentes:

- **Exposição à Fonte puntiforme:** Caso o indivíduo entre em contato com a fonte ou for exposto externamente à radiação oriunda da FRSD;
- **Ingestão:** Caso o indivíduo ingira o material da fonte, após ela ter sido degradada por quaisquer processos físicos e químicos e o material tenha contaminado o ambiente;
- **Inalação:** Caso o indivíduo inale o material da fonte em seu estado gasoso ou como aerossol, após a degradação descrita no item anterior.

Esses casos foram escolhidos por serem os mais documentados em incidentes de exposição, pois são os mais prováveis de ocorrer. Um cenário de exposição que precisa ser considerado é a exposição externa ao material das fontes espalhado no ambiente, mas esse ficará para futuros trabalhos.

## 1.7 Cadeias de Decaimento

A figura 1 apresenta as cadeias de decaimento dos radioisótopos estudados:



**Figura 1: Cadeia de Decaimento do  $^{252}\text{Cf}$  e do  $^{244}\text{Cm}$ , indicando o tipo de decaimento: amarelo para emissão alfa e azul para beta menos.**

Olhando a Figura 1 pode-se notar que a cadeia de decaimento do  $^{244}\text{Cm}$  é muito similar à do  $^{252}\text{Cf}$ , pois o  $^{244}\text{Cm}$  decai para  $^{240}\text{Pu}$ , a partir do qual toda a cadeia é exatamente igual à do  $^{252}\text{Cf}$ .

As cores dos isótopos apresentados na tabela representam seu respectivo tipo de decaimento radioativo, sendo o amarelo para emissões alfa, o azul para emissões  $\beta^-$  e o preto para isótopos estáveis. Quando um dos isótopos apresenta duas cores diferentes, significa que ele atende às duas categorias.

O Tório-232, embora seja radioativo, tem meia-vida de 14 bilhões de anos e é muito maior que a de todos seus isótopos-filhos, sendo, portanto considerado estável para os propósitos de classificação, e por isso, aparece como amarelo e preto. Contudo, nas próximas dezenas de bilhões de anos ele continuará seu decaimento até tornar-se Chumbo-208, que é estável.

Como essa escala de tempo é grande demais para os padrões humanos, é possível considerar o  $^{232}\text{Th}$  como o último elemento da cadeia de decaimento do  $^{244}\text{Cm}$ . Além disso, para os propósitos deste trabalho, estudou-se apenas as fontes radioativas que ainda apresentavam atividade acima do limite de dispensa (abaixo de  $10^{-5}$  Becquerel). Até o  $^{232}\text{Th}$  decair para Rádio-228 sua atividade será desprezível comparada ao limite de dispensa, que determina quando um rejeito radioativo pode ser tratado como rejeito comum.

Na cadeia de decaimento do  $^{252}\text{Cf}$  o elemento final foi o Neptúncio-240, pois a atividade da fonte será tão baixa até chegar nele que já estará muito próxima do limite de dispensa, tornando desnecessários todos os resultados que podem ser obtidos com o cálculo do seu decaimento.

## 2. Objetivos

Objetivou-se estimar o decaimento das fontes radioativas por meios teóricos e determinar um índice de risco relativo para as FRSD no futuro. Levou-se em conta também os isótopos-filhos formados pelo decaimento radioativo e seus respectivos níveis de toxicidade, de modo a ilustrar a importância de saber não somente o risco de um radioisótopo, mas também de conhecer sua cadeia de decaimento para prevenir uma má gestão dos rejeitos.

## 3. Materiais e Métodos

Obeve-se as atividades iniciais de cada fonte por meio dos registros originais das fontes. Usando uma abordagem mais conservadora, no caso do  $^{244}\text{Cm}$ , estimou-se que a atividade inicial das fontes era igual à do radioisótopo em Janeiro de 1970, data estimada para a fabricação das fontes. Os cálculos de decaimento das fontes foram feitos por meio do uso da equação de Bateman:

$$A_n(t) = \sum_{i=1}^n \left[ A_i(0) \times \left( \prod_{j=1}^{n-1} \lambda_j \right) \times \left( \sum_{j=1}^n \left( \frac{e^{-\lambda_j t}}{\prod_{p=i, p \neq j}^n (\lambda_p - \lambda_j)} \right) \right) \right] \quad (1)$$

em que  $A_n(t)$  é a atividade em função do tempo do radioisótopo  $n$  da cadeia de decaimento, medido em Becquerel (Bq);  $t$  é o tempo, medido em anos;  $\lambda_p$  é a constante de decaimento do isótopo-filho  $p$  e  $\lambda_j$  é a constante de decaimento do isótopo-pai  $j$ , ambos medidos em unidade de inverso do tempo.

A fórmula para obter o risco radiológico relativo ao longo do tempo é uma simples comparação, dada pelo produto de sua atividade pelo seu coeficiente de dose dividido pelo produto da atividade presente pelo coeficiente de dose do primeiro radioisótopo da cadeia de decaimento:

$$R(t) = \frac{A_i F_i}{A_0 F_0} \quad (2)$$

Na qual  $R(t)$  é o risco radiológico relativo em função do tempo,  $A_i$  é a atividade do radioisótopo  $i$ ,  $A_0$  é a atividade inicial do radioisótopo na data de referência, medidas em Bq;  $F_i$  é o fator de dose do radioisótopo  $i$  para o tipo de exposição considerada e  $F_0$  é o fator de dose do primeiro isótopo da cadeia de decaimento, medidos em sievert por becquerel.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1 Tabelas

Os resultados obtidos foram dispostos em planilhas do Excel, e podem ser conferidos a seguir, nas tabelas 1 a 10. Tomou-se os valores para a taxa de dose em caso de exposição à fonte puntiforme como aqueles publicados pela ORAU [3]. Para as taxas de dose de inalação e ingestão tomou-se os dados do ICRP [4].

**Tabela 1 – Decaimento Radioativo do <sup>252</sup>Cf**

	<b>Cf-252</b>	<b>Cm-248</b>	<b>Pu-244</b>	<b>U-240</b>	<b>Np-240</b>	<b>Total</b>
<b>T1/2 (anos)</b>	<b>2,645</b>	<b>3,48E+05</b>	<b>7,99E+07</b>	<b>1,61E-03</b>	<b>1,18E-04</b>	<b>8,03E+07</b>
<b>Lambda</b>	<b>2,62E-01</b>	<b>1,99E-06</b>	<b>8,67E-09</b>	<b>4,31E+02</b>	<b>5,89E+03</b>	
<b>Tempo (anos)</b>	<b>Atividade (Bq)</b>					
0,0E+00	1,14E+12	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,14E+12
1,0E-06	1,14E+12	2,13E+00	4,67E-12	4,67E-12	4,67E-12	1,14E+12
5,0E-01	9,66E+11	9,98E+05	2,40E-03	2,40E-03	2,40E-03	9,66E+11
1,0E+00	8,47E+11	1,87E+06	9,21E-03	9,21E-03	9,21E-03	8,47E+11
2,0E+00	6,52E+11	3,31E+06	3,39E-02	3,39E-02	3,39E-02	6,52E+11
4,0E+00	3,86E+11	5,28E+06	1,16E-01	1,16E-01	1,16E-01	3,86E+11
8,0E+00	1,35E+11	7,13E+06	3,56E-01	3,56E-01	3,56E-01	1,35E+11
1,6E+01	1,66E+10	8,00E+06	9,37E-01	9,37E-01	9,37E-01	1,66E+10
3,2E+01	2,51E+08	8,12E+06	2,16E+00	2,16E+00	2,16E+00	2,59E+08
4,8E+01	3,79E+06	8,13E+06	3,38E+00	3,38E+00	3,38E+00	1,19E+07
6,4E+01	5,73E+04	8,13E+06	4,61E+00	4,61E+00	4,61E+00	8,18E+06
1,3E+02	2,98E-03	8,12E+06	9,50E+00	9,50E+00	9,50E+00	8,12E+06
2,6E+02	8,06E-18	8,12E+06	1,93E+01	1,93E+01	1,93E+01	8,12E+06
5,1E+02	5,90E-47	8,12E+06	3,89E+01	3,89E+01	3,89E+01	8,12E+06
1,0E+03	3,16E-105	8,11E+06	7,80E+01	7,80E+01	7,80E+01	8,11E+06
2,0E+03	9,06E-222	8,09E+06	1,56E+02	1,56E+02	1,56E+02	8,09E+06
4,1E+03	0,00E+00	8,06E+06	3,12E+02	3,12E+02	3,12E+02	8,06E+06
8,2E+03	0,00E+00	7,99E+06	6,21E+02	6,21E+02	6,21E+02	7,99E+06
1,6E+04	0,00E+00	7,86E+06	1,23E+03	1,23E+03	1,23E+03	7,86E+06
3,3E+04	0,00E+00	7,60E+06	2,42E+03	2,42E+03	2,42E+03	7,60E+06
6,6E+04	0,00E+00	7,11E+06	4,69E+03	4,69E+03	4,69E+03	7,11E+06
1,3E+05	0,00E+00	6,22E+06	8,80E+03	8,80E+03	8,80E+03	6,23E+06
2,6E+05	0,00E+00	4,76E+06	1,55E+04	1,55E+04	1,55E+04	4,78E+06
5,2E+05	0,00E+00	2,79E+06	2,46E+04	2,46E+04	2,46E+04	2,82E+06
1,0E+06	0,00E+00	9,58E+05	3,29E+04	3,29E+04	3,29E+04	9,91E+05
2,1E+06	0,00E+00	1,13E+05	3,65E+04	3,65E+04	3,65E+04	1,49E+05
4,2E+06	0,00E+00	1,57E+03	3,63E+04	3,63E+04	3,63E+04	3,79E+04
6,3E+06	0,00E+00	2,19E+01	3,57E+04	3,57E+04	3,57E+04	3,57E+04
8,4E+06	0,00E+00	3,04E-01	3,51E+04	3,51E+04	3,51E+04	3,51E+04
1,7E+07	0,00E+00	1,14E-08	3,26E+04	3,26E+04	3,26E+04	3,26E+04
3,4E+07	0,00E+00	1,59E-23	2,82E+04	2,82E+04	2,82E+04	2,82E+04
6,7E+07	0,00E+00	3,11E-53	2,11E+04	2,11E+04	2,11E+04	2,11E+04
1,3E+08	0,00E+00	1,19E-112	1,18E+04	1,18E+04	1,18E+04	1,18E+04
2,7E+08	0,00E+00	1,75E-231	3,68E+03	3,68E+03	3,68E+03	3,68E+03
5,4E+08	0,00E+00	0,00E+00	3,60E+02	3,60E+02	3,60E+02	3,60E+02
1,1E+09	0,00E+00	0,00E+00	3,44E+00	3,44E+00	3,44E+00	3,44E+00
2,1E+09	0,00E+00	0,00E+00	3,14E-04	3,14E-04	3,14E-04	3,14E-04

Como as meias vidas do Urânio-240 e do  $^{240}\text{Np}$  são extremamente curtas em comparação ao Plutônio-244 suas atividades foram aproximadas como sendo equivalentes ao próprio. Também por este motivo, os valores de suas atividades não foram incluídos na soma da atividade total dos elementos.

A Tabela 1 encerra a cadeia de decaimento no  $^{240}\text{Np}$  devido à baixa atividade que as fontes apresentarão até chegarem no próximo isótopo da cadeia, o  $^{240}\text{Pu}$ . De fato, os isótopos-filhos de  $^{240}\text{Pu}$  não chegariam a apresentar atividade acima do limite de dispensa.

Cerca de 3% do decaimento do  $^{252}\text{Cf}$  acontece por fissão espontânea, que é desconsiderada para os propósitos deste trabalho. Sendo assim, sua atividade foi multiplicada por 0.97, para isolar apenas as emissões alfa do decaimento.

O Cúrio-248 também decai por fissão espontânea, sendo que cerca de 8% de seu decaimento é decorrente deste processo. Sua atividade foi multiplicada por 0.92, com o intuito de corrigir esse fator e isolar apenas o decaimento alfa ocorrido durante o processo.

Outros elementos da cadeia também apresentam decaimento por fissão espontânea, porém com uma taxa muito inferior a 1%. Esses valores foram desprezados, pois são pouco significativos na atividade e risco totais.

No entanto, trabalhos futuros poderão estimar seus valores precisos de modo a permitir uma correção nos valores obtidos atualmente e facilitar futuros cálculos para os radioisótopos  $^{252}\text{Cf}$  e  $^{248}\text{Cm}$ .

Extraíram-se todas as estimativas para as porcentagens de átomos de um radioisótopo que decaem por fissão espontânea dos dados do ICRP [5].

**Tabela 2 - Índice de Toxicidade da Cadeia de Decaimento do <sup>252</sup>Cf e fator de dose para exposição externa.**

		Inalação (Sv.Bq <sup>-1</sup> )						Ingestão (Sv.Bq <sup>-1</sup> )						ExpFtPunt (Sv.Bq <sup>-1</sup> )	
		< 1 ano	1 ano	5 anos	10 anos	15 anos	Adulto	< 1 ano	1 ano	5 anos	10 anos	15 anos	Adulto		
<b>Cf-252</b>	<b>F (D)</b>	-	-	-	-	-	-								3,1E-13
	<b>M (W)</b>	5,0E-04	8,7E-05	5,6E-05	3,2E-05	2,2E-05	2,0E-05	2,0E-06	5,1E-07	3,2E-07	1,9E-07	1,0E-07	9,0E-08	2,2E-12	
	<b>S (Y)</b>	-	-	-	-	-	-								1,1E-10
<b>Cm-248</b>	<b>F (D)</b>	5,0E-04	6,5E-04	4,5E-04	3,7E-04	3,4E-04	3,6E-04								2,9E-13
	<b>M (W)</b>	5,0E-04	2,4E-04	1,8E-04	1,4E-04	1,4E-04	1,5E-04	1,4E-05	1,4E-06	1,0E-06	8,4E-07	7,7E-07	7,7E-07	2,1E-12	
	<b>S (Y)</b>	5,0E-04	1,2E-04	8,2E-05	5,6E-05	5,0E-05	4,8E-05								1,1E-10
<b>Pu-244</b>	<b>F (D)</b>	5,0E-04	1,9E-04	1,4E-04	1,2E-04	1,1E-04	1,1E-04								3,5E-13
	<b>M (W)</b>	5,0E-04	7,2E-05	5,6E-05	4,5E-05	4,4E-05	4,7E-05	5,0E-06	4,1E-07	3,2E-07	2,6E-07	2,3E-07	2,4E-07	2,5E-12	
	<b>S (Y)</b>	1,0E-05	3,5E-05	2,4E-05	1,7E-05	1,5E-05	1,5E-05								1,3E-10
<b>U-240</b>	<b>F (D)</b>	2,0E-02	1,6E-09	7,1E-10	4,5E-10	2,3E-10	2,0E-10								1,8E-12
	<b>M (W)</b>	2,0E-02	3,1E-09	1,7E-09	1,1E-09	6,5E-10	5,3E-10	2,0E-02	8,1E-09	4,1E-09	2,4E-09	1,4E-09	1,1E-09	1,3E-11	
	<b>S (Y)</b>	2,0E-03	3,3E-09	1,6E-09	1,1E-09	7,0E-10	5,8E-10								6,7E-10
<b>Np- 240</b>	<b>F (D)</b>	5,0E-04	2,6E-10	1,2E-10	7,7E-11	4,7E-11	4,0E-11								9,2E-12
	<b>M (W)</b>	5,0E-04	4,4E-10	2,2E-10	1,4E-10	1,0E-10	8,5E-11	5,0E-04	5,1E-10	2,6E-10	1,6E-10	1,0E-10	8,2E-11	6,4E-11	
	<b>S (Y)</b>	5,0E-04	4,6E-10	2,3E+10	1,5E-10	1,1E-10	9,0E-11								3,4E-09

Conhecendo o nível de radiotocidade de cada isótopo e sua respectiva atividade, foi possível construir uma tabela que mede o risco relativo dos elementos no futuro, onde o valor máximo é 1, que corresponde ao risco atual. Este valor tende a diminuir para cada fonte, pois sua atividade sempre decrescerá ao longo do tempo, e, portanto, o risco será menor. Contudo, é preciso notar que alguns elementos são mais radiotóxicos que outros, mesmo quando a atividade é menor.

Essa medida de risco leva em conta que houve de fato um contato com a fonte. Sendo assim, elas são consideradas o pior cenário possível, ignorando o fato de que caso os rejeitos estejam armazenados em um repositório eles talvez jamais entrem em contato com algum indivíduo.

Os valores escolhidos de fator de dose para os cálculos de risco foram sempre os maiores para cada isótopo, tipicamente a exposição de um bebê de menos de um ano de idade, sendo esta a abordagem mais conservadora possível para o risco, independente da probabilidade estatística real do cenário realmente acontecer.

**Tabela 3 – Risco por Exposição Externa à Fonte Puntiforme de <sup>252</sup>Cf**

Risco Radiológico Relativo						
Tempo (anos)	Cf-252	Cm-248	Pu-244	U-240	Np-240	Total
0,0E+00	1,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,0E+00
1,0E-06	1,0E+00	1,7E-12	9,0E-24	4,7E-23	2,4E-22	1,0E+00
5,0E-01	8,8E-01	8,0E-07	2,3E-15	1,2E-14	6,0E-14	8,8E-01
1,0E+00	7,7E-01	1,5E-06	8,9E-15	4,7E-14	2,3E-13	7,7E-01
2,0E+00	5,9E-01	2,7E-06	3,3E-14	1,7E-13	8,5E-13	5,9E-01
4,0E+00	3,5E-01	4,3E-06	1,1E-13	5,9E-13	2,9E-12	3,5E-01
8,0E+00	1,2E-01	5,7E-06	3,4E-13	1,8E-12	9,0E-12	1,2E-01
1,6E+01	1,5E-02	6,5E-06	9,0E-13	4,7E-12	2,4E-11	1,5E-02
3,2E+01	2,3E-04	6,6E-06	2,1E-12	1,1E-11	5,4E-11	2,3E-04
4,8E+01	3,4E-06	6,6E-06	3,3E-12	1,7E-11	8,5E-11	1,0E-05
6,4E+01	5,2E-08	6,6E-06	4,4E-12	2,3E-11	1,2E-10	6,6E-06
1,3E+02	2,7E-15	6,6E-06	9,1E-12	4,8E-11	2,4E-10	6,6E-06
2,6E+02	7,3E-30	6,6E-06	1,9E-11	9,8E-11	4,9E-10	6,6E-06
5,1E+02	5,4E-59	6,5E-06	3,7E-11	2,0E-10	9,8E-10	6,5E-06
1,0E+03	2,9E-117	6,5E-06	7,5E-11	3,9E-10	2,0E-09	6,5E-06
2,0E+03	8,2E-234	6,5E-06	1,5E-10	7,9E-10	3,9E-09	6,5E-06
4,1E+03	0,0E+00	6,5E-06	3,0E-10	1,6E-09	7,9E-09	6,5E-06
8,2E+03	0,0E+00	6,4E-06	6,0E-10	3,1E-09	1,6E-08	6,5E-06
1,6E+04	0,0E+00	6,3E-06	1,2E-09	6,2E-09	3,1E-08	6,4E-06
3,3E+04	0,0E+00	6,1E-06	2,3E-09	1,2E-08	6,1E-08	6,2E-06
6,6E+04	0,0E+00	5,8E-06	4,5E-09	2,4E-08	1,2E-07	5,9E-06
1,3E+05	0,0E+00	5,0E-06	8,5E-09	4,5E-08	2,2E-07	5,3E-06
2,6E+05	0,0E+00	3,9E-06	1,5E-08	7,9E-08	3,9E-07	4,4E-06
5,2E+05	0,0E+00	2,3E-06	2,4E-08	1,3E-07	6,3E-07	3,1E-06
1,0E+06	0,0E+00	8,1E-07	3,2E-08	1,7E-07	8,4E-07	1,9E-06
2,1E+06	0,0E+00	1,0E-07	3,6E-08	1,9E-07	9,4E-07	1,3E-06
4,2E+06	0,0E+00	1,5E-09	3,6E-08	1,9E-07	9,4E-07	1,2E-06
6,3E+06	0,0E+00	2,3E-11	3,5E-08	1,8E-07	9,2E-07	1,1E-06
8,4E+06	0,0E+00	3,6E-13	3,4E-08	1,8E-07	9,0E-07	1,1E-06
1,7E+07	0,0E+00	2,0E-20	3,2E-08	1,7E-07	8,4E-07	1,0E-06
3,4E+07	0,0E+00	5,9E-35	2,8E-08	1,5E-07	7,3E-07	9,0E-07
6,7E+07	0,0E+00	5,3E-64	2,1E-08	1,1E-07	5,4E-07	6,7E-07
1,3E+08	0,0E+00	4,3E-122	1,2E-08	6,1E-08	3,0E-07	3,8E-07
2,7E+08	0,0E+00	2,9E-238	3,6E-09	1,9E-08	9,5E-08	1,2E-07
5,4E+08	0,0E+00	0,0E+00	3,5E-10	1,9E-09	9,2E-09	1,1E-08
1,1E+09	0,0E+00	0,0E+00	3,4E-12	1,8E-11	8,8E-11	1,1E-10

**Tabela 4 – Risco por Inalação de <sup>252</sup>Cf**

Tempo (anos)	Risco Radiológico Relativo					
	Cf-252	Cm-248	Pu-244	U-240	Np-240	Total
0,0E+00	1,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,0E+00
1,0E-06	1,0E+00	2,4E-12	8,0E-24	3,2E-22	6,4E-24	1,0E+00
5,0E-01	8,8E-01	1,1E-06	2,1E-15	8,3E-14	1,7E-15	8,8E-01
1,0E+00	7,7E-01	2,1E-06	7,9E-15	3,2E-13	6,3E-15	7,7E-01
2,0E+00	5,9E-01	3,7E-06	2,9E-14	1,2E-12	2,3E-14	5,9E-01
4,0E+00	3,5E-01	5,9E-06	1,0E-13	4,0E-12	8,0E-14	3,5E-01
8,0E+00	1,2E-01	8,0E-06	3,1E-13	1,2E-11	2,5E-13	1,2E-01
1,6E+01	1,5E-02	9,0E-06	8,1E-13	3,2E-11	6,5E-13	1,5E-02
3,2E+01	2,3E-04	9,1E-06	1,9E-12	7,4E-11	1,5E-12	2,4E-04
4,8E+01	3,4E-06	9,1E-06	2,9E-12	1,2E-10	2,3E-12	1,3E-05
5,6E+01	5,2E-08	9,1E-06	4,0E-12	1,6E-10	3,2E-12	9,1E-06
6,4E+01	2,7E-15	9,1E-06	8,2E-12	3,3E-10	6,6E-12	9,1E-06
1,3E+02	7,3E-30	9,1E-06	1,7E-11	6,7E-10	1,3E-11	9,1E-06
2,6E+02	5,4E-59	9,1E-06	3,3E-11	1,3E-09	2,7E-11	9,1E-06
5,1E+02	2,9E-117	9,1E-06	6,7E-11	2,7E-09	5,4E-11	9,1E-06
1,0E+03	8,2E-234	9,1E-06	1,3E-10	5,4E-09	1,1E-10	9,1E-06
2,0E+03	0,0E+00	9,0E-06	2,7E-10	1,1E-08	2,1E-10	9,0E-06
4,1E+03	0,0E+00	8,9E-06	5,4E-10	2,1E-08	4,3E-10	9,0E-06
8,2E+03	0,0E+00	8,8E-06	1,1E-09	4,3E-08	8,5E-10	8,8E-06
1,6E+04	0,0E+00	8,5E-06	2,1E-09	8,4E-08	1,7E-09	8,6E-06
3,3E+04	0,0E+00	8,0E-06	4,0E-09	1,6E-07	3,2E-09	8,2E-06
6,6E+04	0,0E+00	7,0E-06	7,6E-09	3,0E-07	6,1E-09	7,3E-06
1,3E+05	0,0E+00	5,4E-06	1,3E-08	5,4E-07	1,1E-08	6,0E-06
2,6E+05	0,0E+00	3,2E-06	2,1E-08	8,6E-07	1,7E-08	4,1E-06
5,2E+05	0,0E+00	1,1E-06	2,9E-08	1,2E-06	2,3E-08	2,3E-06
1,0E+06	0,0E+00	1,4E-07	3,2E-08	1,3E-06	2,6E-08	1,5E-06
2,1E+06	0,0E+00	2,1E-09	3,2E-08	1,3E-06	2,6E-08	1,3E-06
4,2E+06	0,0E+00	3,3E-11	3,1E-08	1,3E-06	2,5E-08	1,3E-06
6,3E+06	0,0E+00	5,0E-13	3,1E-08	1,2E-06	2,5E-08	1,3E-06
8,4E+06	0,0E+00	2,7E-20	2,9E-08	1,1E-06	2,3E-08	1,2E-06
1,7E+07	0,0E+00	8,2E-35	2,5E-08	9,9E-07	2,0E-08	1,0E-06
3,4E+07	0,0E+00	7,4E-64	1,9E-08	7,4E-07	1,5E-08	7,8E-07
6,7E+07	0,0E+00	6,0E-122	1,0E-08	4,2E-07	8,3E-09	4,3E-07
1,3E+08	0,0E+00	4,0E-238	3,2E-09	1,3E-07	2,6E-09	1,4E-07
2,7E+08	0,0E+00	0,0E+00	3,2E-10	1,3E-08	2,5E-10	1,3E-08
5,4E+08	0,0E+00	0,0E+00	3,0E-12	1,2E-10	2,4E-12	1,3E-10
1,1E+09	0,0E+00	0,0E+00	2,7E-16	1,1E-14	2,2E-16	1,1E-14

Na Tabela 4, a atividade do  $^{240}\text{Np}$  foi multiplicada por 0.8 pois seu valor era equivalente ao do  $^{244}\text{Pu}$ . Dessa forma é possível visualizar no Gráfico 3 a linha de sua taxa de risco relativo.

Tabela 5 - Risco por Ingestão de <sup>252</sup>Cf

Risco Radiológico Relativo						
Tempo (anos)	Cf-252	Cm-248	Pu-244	U-240	Np-240	Total
0,0E+00	1,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,0E+00
1,0E-06	1,0E+00	5,7E-12	8,0E-24	1,0E-25	6,5E-27	1,0E+00
5,0E-01	8,8E-01	2,7E-06	2,1E-15	2,7E-17	1,7E-18	8,8E-01
1,0E+00	7,7E-01	5,0E-06	7,9E-15	1,0E-16	6,4E-18	7,7E-01
2,0E+00	5,9E-01	8,9E-06	2,9E-14	3,7E-16	2,4E-17	5,9E-01
4,0E+00	3,5E-01	1,4E-05	1,0E-13	1,3E-15	8,2E-17	3,5E-01
8,0E+00	1,2E-01	1,9E-05	3,1E-13	3,9E-15	2,5E-16	1,2E-01
1,6E+01	1,5E-02	2,2E-05	8,1E-13	1,0E-14	6,6E-16	1,5E-02
3,2E+01	2,3E-04	2,2E-05	1,9E-12	2,4E-14	1,5E-15	2,5E-04
4,8E+01	3,4E-06	2,2E-05	2,9E-12	3,7E-14	2,4E-15	2,5E-05
6,4E+01	5,2E-08	2,2E-05	4,0E-12	5,1E-14	3,2E-15	2,2E-05
1,3E+02	2,7E-15	2,2E-05	8,2E-12	1,0E-13	6,7E-15	2,2E-05
2,6E+02	7,3E-30	2,2E-05	1,7E-11	2,1E-13	1,4E-14	2,2E-05
5,1E+02	5,4E-59	2,2E-05	3,3E-11	4,3E-13	2,7E-14	2,2E-05
1,0E+03	2,9E-117	2,2E-05	6,7E-11	8,6E-13	5,5E-14	2,2E-05
2,0E+03	8,2E-234	2,2E-05	1,3E-10	1,7E-12	1,1E-13	2,2E-05
4,1E+03	0,0E+00	2,2E-05	2,7E-10	3,4E-12	2,2E-13	2,2E-05
8,2E+03	0,0E+00	2,2E-05	5,4E-10	6,9E-12	4,4E-13	2,2E-05
1,6E+04	0,0E+00	2,1E-05	1,1E-09	1,4E-11	8,6E-13	2,1E-05
3,3E+04	0,0E+00	2,0E-05	2,1E-09	2,7E-11	1,7E-12	2,0E-05
6,6E+04	0,0E+00	1,9E-05	4,0E-09	5,2E-11	3,3E-12	1,9E-05
1,3E+05	0,0E+00	1,7E-05	7,6E-09	9,7E-11	6,2E-12	1,7E-05
2,6E+05	0,0E+00	1,3E-05	1,3E-08	1,7E-10	1,1E-11	1,3E-05
5,2E+05	0,0E+00	7,7E-06	2,1E-08	2,7E-10	1,7E-11	7,7E-06
1,0E+06	0,0E+00	2,7E-06	2,9E-08	3,7E-10	2,3E-11	2,7E-06
2,1E+06	0,0E+00	3,3E-07	3,2E-08	4,1E-10	2,6E-11	3,7E-07
4,2E+06	0,0E+00	5,1E-09	3,2E-08	4,1E-10	2,6E-11	3,8E-08
6,3E+06	0,0E+00	7,8E-11	3,1E-08	4,0E-10	2,6E-11	3,2E-08
8,4E+06	0,0E+00	1,2E-12	3,1E-08	4,0E-10	2,5E-11	3,1E-08
1,7E+07	0,0E+00	6,6E-20	2,9E-08	3,7E-10	2,3E-11	2,9E-08
3,4E+07	0,0E+00	2,0E-34	2,5E-08	3,2E-10	2,0E-11	2,5E-08
6,7E+07	0,0E+00	1,8E-63	1,9E-08	2,4E-10	1,5E-11	1,9E-08
1,3E+08	0,0E+00	1,4E-121	1,0E-08	1,3E-10	8,4E-12	1,1E-08
2,7E+08	0,0E+00	9,6E-238	3,2E-09	4,2E-11	2,6E-12	3,3E-09
5,4E+08	0,0E+00	0,0E+00	3,2E-10	4,1E-12	2,6E-13	3,2E-10
1,1E+09	0,0E+00	0,0E+00	3,0E-12	3,9E-14	2,4E-15	3,1E-12

**Tabela 6 - Decaimento Radioativo do <sup>244</sup>Cm**

	Cm-244	Pu-240	U-236	Th-232	Total
<b>T1/2 (anos)</b>	<b>18,088</b>	<b>6,56E+03</b>	<b>2,34E+07</b>	<b>1,41E+10</b>	<b>1,41E+10</b>
<b>Lambda</b>	<b>3,83E-02</b>	<b>1,06E-04</b>	<b>2,96E-08</b>	<b>4,93E-11</b>	
<b>Tempo (anos)</b>	<b>Atividade (Bq)</b>				
0,0E+00	4,1E+10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,101E+10
1,0E-06	4,1E+10	4,33E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,10E+10
5,0E-01	4,0E+10	2,15E+06	1,59E-02	1,30E-13	4,02E+10
1,0E+00	3,9E+10	4,25E+06	6,33E-02	1,04E-12	3,95E+10
2,0E+00	3,8E+10	8,34E+06	2,50E-01	8,28E-12	3,80E+10
4,0E+00	3,5E+10	1,61E+07	9,76E-01	6,50E-11	3,52E+10
8,0E+00	3,0E+10	2,98E+07	3,72E+00	5,01E-10	3,02E+10
1,6E+01	2,2E+10	5,18E+07	1,35E+01	3,73E-09	2,23E+10
3,2E+01	1,2E+10	7,97E+07	4,54E+01	2,61E-08	1,21E+10
6,4E+01	3,5E+09	1,03E+08	1,34E+02	1,65E-07	3,64E+09
1,3E+02	3,0E+08	1,11E+08	3,40E+02	9,10E-07	4,16E+08
0,0E+00	2,6E+07	1,11E+08	5,51E+02	2,32E-06	1,37E+08
2,6E+02	2,3E+06	1,10E+08	7,61E+02	4,39E-06	1,13E+08
0,0E+00	1,7E+04	1,09E+08	1,18E+03	1,05E-05	1,09E+08
5,1E+02	1,3E+02	1,07E+08	1,59E+03	1,92E-05	1,07E+08
1,0E+03	3,8E-07	1,02E+08	3,17E+03	7,95E-05	1,02E+08
2,0E+03	3,6E-24	9,14E+07	6,10E+03	3,15E-04	9,14E+07
4,1E+03	3,1E-58	7,36E+07	1,11E+04	1,19E-03	7,36E+07
8,2E+03	2,3E-126	4,77E+07	1,83E+04	4,22E-03	4,78E+07
1,6E+04	1,3E-262	2,01E+07	2,61E+04	1,34E-02	2,01E+07
3,3E+04	0,0E+00	3,56E+06	3,07E+04	3,69E-02	3,59E+06
6,6E+04	0,0E+00	1,12E+05	3,16E+04	8,77E-02	1,44E+05
0,0E+00	0,0E+00	3,51E+03	3,16E+04	1,39E-01	3,52E+04
1,3E+05	0,0E+00	1,10E+02	3,16E+04	1,90E-01	3,17E+04
0,0E+00	0,0E+00	1,09E-01	3,15E+04	2,92E-01	3,16E+04
2,6E+05	0,0E+00	1,07E-04	3,15E+04	3,94E-01	3,15E+04
5,2E+05	0,0E+00	1,02E-16	3,12E+04	8,00E-01	3,12E+04
7,9E+05	0,0E+00	9,61E-29	3,10E+04	1,20E+00	3,10E+04
1,0E+06	0,0E+00	9,10E-41	3,08E+04	1,60E+00	3,08E+04
2,1E+06	0,0E+00	7,30E-89	2,98E+04	3,17E+00	2,98E+04
4,2E+06	0,0E+00	4,69E-185	2,80E+04	6,16E+00	2,80E+04
8,4E+06	0,0E+00	0,00E+00	2,48E+04	1,16E+01	2,48E+04
1,7E+07	0,0E+00	0,00E+00	1,93E+04	2,07E+01	1,93E+04
3,4E+07	0,0E+00	0,00E+00	1,17E+04	3,32E+01	1,18E+04
6,7E+07	0,0E+00	0,00E+00	4,35E+03	4,55E+01	4,39E+03
0,0E+00	0,0E+00	0,00E+00	1,61E+03	5,00E+01	1,66E+03
1,3E+08	0,0E+00	0,00E+00	5,95E+02	5,16E+01	6,47E+02
0,0E+00	0,0E+00	0,00E+00	8,16E+01	5,23E+01	1,34E+02
2,7E+08	0,0E+00	0,00E+00	1,12E+01	5,22E+01	6,34E+01
5,4E+08	0,0E+00	0,00E+00	3,93E-03	5,15E+01	5,15E+01
1,1E+09	0,0E+00	0,00E+00	4,88E-10	5,02E+01	5,02E+01
2,1E+09	0,0E+00	0,00E+00	7,50E-24	4,76E+01	4,76E+01
4,3E+09	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-51	4,28E+01	4,28E+01
8,6E+09	0,0E+00	0,00E+00	9,91E-107	3,46E+01	3,46E+01
1,7E+10	0,0E+00	0,00E+00	3,09E-217	2,27E+01	2,27E+01
3,4E+10	0,0E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,72E+00	9,72E+00
6,9E+10	0,0E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,78E+00	1,78E+00
1,4E+11	0,0E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,01E-02	6,01E-02
2,7E+11	0,0E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,83E-05	6,83E-05

Devido a um problema na Equação de Bateman que faz com que os computadores calculem errado a taxa de decaimento quando  $\lambda_p \approx \lambda_i$ , explicado no trabalho de Harr [6], o valor da atividade da primeira linha não-nula de  $^{232}\text{Th}$  precisou ser multiplicado por (-1) para corresponder ao valor nominal correto.

Esse é um dos critérios que se usou para escolher qual seria o último radioisótopo estudado na cadeia de decaimento de cada FRSD. À medida que a atividade fica muito baixa, e a quantidade de isótopos-filhos gerados fica muito alta, a equação de Bateman torna-se progressivamente menos precisa.

As atividades do  $^{240}\text{Np}$  e do  $^{232}\text{Th}$  são pequenas demais para suas posições em suas respectivas cadeias de decaimento para justificar que os cálculos continuem.

**Tabela 7 - Taxa de Risco da Família de Decaimento do <sup>244</sup>Cm e fator de dose para exposição externa.**

		Inalação (Sv.Bq <sup>-1</sup> )						Ingestão (Sv.Bq <sup>-1</sup> )						ExpFtPunt (Sv.Bq <sup>-1</sup> )	
		< 1 ano	1 ano	5 anos	10 anos	15 anos	Adulto	< 1 ano	1 ano	5 anos	10 anos	15 anos	Adulto		
<b>Cm-244</b>	<b>F (D)</b>	5,0E-04	1,3E-04	8,3E-05	6,1E-05	5,3E-05	5,7E-05								4,2E-13
	<b>M (W)</b>	5,0E-04	5,7E-05	3,7E-05	2,7E-05	2,6E-05	2,7E-05	2,9E-06	2,9E-07	1,9E-07	1,4E-07	1,2E-07	1,2E-07	2,9E-12	
	<b>S (Y)</b>	5,0E-04	3,8E-05	2,5E-05	1,7E-05	1,5E-05	1,3E-05							1,5E-10	
<b>Pu-240</b>	<b>F (D)</b>	5,0E-04	2,0E-04	1,5E-04	1,2E-04	1,1E-04	1,2E-04							4,9E-13	
	<b>M (W)</b>	5,0E-04	7,7E-05	6,0E-05	4,8E-05	4,7E-05	5,0E-05	5,2E-06	4,2E-07	3,3E-07	2,7E-07	2,4E-07	2,5E-07	3,4E-12	
	<b>S (Y)</b>	5,0E-05	3,9E-05	2,7E-05	1,9E-05	1,7E-05	1,6E-05							1,8E-10	
<b>U-236</b>	<b>F (D)</b>	2,0E-02	1,3E-06	8,5E-07	7,5E-07	7,8E-07	5,3E-07							4,8E-13	
	<b>M (W)</b>	2,0E-02	1,0E-05	6,5E-06	4,5E-06	3,9E-06	3,2E-06	1,5E-07	1,3E-07	8,4E-08	7,0E-08	7,0E-08	4,7E-08	3,3E-12	
	<b>S (Y)</b>	2,0E-03	2,7E-05	1,8E-05	1,1E-05	9,5E-06	8,7E-06							1,7E-10	
<b>Th-232</b>	<b>F (D)</b>	5,0E-04	2,2E-04	1,6E-04	1,3E-04	1,2E-04	1,1E-04							4,4E-13	
	<b>M (W)</b>	5,0E-04	8,1E-05	6,3E-05	5,0E-05	4,7E-05	4,5E-05	1,6E-06	4,5E-07	3,5E-07	2,9E-07	2,5E-07	2,3E-07	3,1E-12	
	<b>S (Y)</b>	5,0E-04	5,0E-05	3,7E-05	2,6E-05	2,5E-05	2,5E-05							1,6E-10	

**Tabela 8 - Risco por Exposição à Fonte Puntiforme de <sup>244</sup>Cm**

Tempo (anos)	Risco Radiológico Relativo				
	Cm-244	Pu-240	U-236	Th-232	Total
0,0E+00	1,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,0E+00
1,0E-06	1,0E+00	1,2E-10	0,0E+00	3,2E-25	1,0E+00
5,0E-01	9,8E-01	6,1E-05	4,4E-13	3,0E-24	9,8E-01
1,0E+00	9,6E-01	1,2E-04	1,8E-12	2,7E-23	9,6E-01
2,0E+00	9,3E-01	2,4E-04	7,0E-12	2,1E-22	9,3E-01
4,0E+00	8,6E-01	4,6E-04	2,7E-11	1,7E-21	8,6E-01
8,0E+00	7,4E-01	8,5E-04	1,0E-10	1,3E-20	7,4E-01
1,6E+01	5,4E-01	1,5E-03	3,8E-10	9,7E-20	5,4E-01
3,2E+01	2,9E-01	2,3E-03	1,3E-09	6,8E-19	3,0E-01
6,4E+01	8,6E-02	2,9E-03	3,7E-09	4,3E-18	8,9E-02
1,3E+02	7,4E-03	3,2E-03	9,5E-09	2,4E-17	1,1E-02
0,0E+00	6,4E-04	3,2E-03	1,5E-08	6,0E-17	3,8E-03
2,6E+02	5,5E-05	3,1E-03	2,1E-08	1,1E-16	3,2E-03
0,0E+00	4,1E-07	3,1E-03	3,3E-08	2,7E-16	3,1E-03
5,1E+02	3,0E-09	3,1E-03	4,4E-08	5,0E-16	3,1E-03
1,0E+03	9,1E-18	2,9E-03	8,9E-08	2,1E-15	2,9E-03
2,0E+03	8,2E-35	2,6E-03	1,7E-07	8,2E-15	2,6E-03
4,1E+03	6,8E-69	2,1E-03	3,1E-07	3,1E-14	2,1E-03
8,2E+03	4,6E-137	1,4E-03	5,1E-07	1,1E-13	1,4E-03
1,6E+04	2,1E-273	5,7E-04	7,3E-07	3,5E-13	5,7E-04
3,3E+04	0,0E+00	1,0E-04	8,6E-07	9,5E-13	1,0E-04
6,6E+04	0,0E+00	3,2E-06	8,8E-07	2,3E-12	4,1E-06
0,0E+00	0,0E+00	9,9E-08	8,8E-07	3,6E-12	9,8E-07
1,3E+05	0,0E+00	3,1E-09	8,8E-07	4,9E-12	8,8E-07
0,0E+00	0,0E+00	3,1E-12	8,8E-07	7,6E-12	8,8E-07
2,6E+05	0,0E+00	3,0E-15	8,8E-07	1,0E-11	8,8E-07
5,2E+05	0,0E+00	2,8E-27	8,7E-07	2,1E-11	8,7E-07
7,9E+05	0,0E+00	2,6E-39	8,6E-07	3,1E-11	8,6E-07
1,0E+06	0,0E+00	2,4E-51	8,6E-07	4,1E-11	8,6E-07
2,1E+06	0,0E+00	1,8E-99	8,3E-07	8,2E-11	8,3E-07
4,2E+06	0,0E+00	1,1E-195	7,8E-07	1,6E-10	7,8E-07
8,4E+06	0,0E+00	0,0E+00	6,9E-07	3,0E-10	6,9E-07
1,7E+07	0,0E+00	0,0E+00	5,4E-07	5,3E-10	5,4E-07
3,4E+07	0,0E+00	0,0E+00	3,3E-07	8,6E-10	3,3E-07
6,7E+07	0,0E+00	0,0E+00	1,2E-07	1,2E-09	1,2E-07
0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	4,5E-08	1,3E-09	4,6E-08
1,3E+08	0,0E+00	0,0E+00	1,7E-08	1,3E-09	1,8E-08
0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,3E-09	1,4E-09	3,6E-09
2,7E+08	0,0E+00	0,0E+00	3,1E-10	1,4E-09	1,7E-09
5,4E+08	0,0E+00	0,0E+00	1,1E-13	1,3E-09	1,3E-09
1,1E+09	0,0E+00	0,0E+00	1,4E-20	1,3E-09	1,3E-09
2,1E+09	0,0E+00	0,0E+00	2,1E-34	1,2E-09	1,2E-09
4,3E+09	0,0E+00	0,0E+00	4,9E-62	1,1E-09	1,1E-09
8,6E+09	0,0E+00	0,0E+00	2,8E-117	9,0E-10	9,0E-10
1,7E+10	0,0E+00	0,0E+00	8,6E-228	5,9E-10	5,9E-10
3,4E+10	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,5E-10	2,5E-10
6,9E+10	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	4,6E-11	4,6E-11

**Tabela 9 - Risco por Inalação de <sup>244</sup>Cm**

Tempo (anos)	Risco Radiológico Relativo				
	Cm-244	Pu-240	U-236	Th-232	Total
0,0E+00	1,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,0E+00
1,0E-06	1,0E+00	1,1E-10	0,0E+00	3,0E-25	1,0E+00
5,0E-01	9,8E-01	5,2E-05	1,6E-11	2,9E-24	9,8E-01
1,0E+00	9,6E-01	1,0E-04	6,2E-11	2,5E-23	9,6E-01
2,0E+00	9,3E-01	2,0E-04	2,4E-10	2,0E-22	9,3E-01
4,0E+00	8,6E-01	3,9E-04	9,5E-10	1,6E-21	8,6E-01
8,0E+00	7,4E-01	7,3E-04	3,6E-09	1,2E-20	7,4E-01
1,6E+01	5,4E-01	1,3E-03	1,3E-08	9,1E-20	5,4E-01
3,2E+01	2,9E-01	1,9E-03	4,4E-08	6,4E-19	3,0E-01
6,4E+01	8,6E-02	2,5E-03	1,3E-07	4,0E-18	8,9E-02
1,3E+02	7,4E-03	2,7E-03	3,3E-07	2,2E-17	1,0E-02
0,0E+00	6,4E-04	2,7E-03	5,4E-07	5,6E-17	3,3E-03
2,6E+02	5,5E-05	2,7E-03	7,4E-07	1,1E-16	2,7E-03
0,0E+00	4,1E-07	2,7E-03	1,1E-06	2,6E-16	2,7E-03
5,1E+02	3,0E-09	2,6E-03	1,5E-06	4,7E-16	2,6E-03
1,0E+03	9,1E-18	2,5E-03	3,1E-06	1,9E-15	2,5E-03
2,0E+03	8,2E-35	2,2E-03	5,9E-06	7,7E-15	2,2E-03
4,1E+03	6,8E-69	1,8E-03	1,1E-05	2,9E-14	1,8E-03
8,2E+03	4,6E-137	1,2E-03	1,8E-05	1,0E-13	1,2E-03
1,6E+04	2,1E-273	4,9E-04	2,5E-05	3,3E-13	5,2E-04
3,3E+04	0,0E+00	8,7E-05	3,0E-05	9,0E-13	1,2E-04
6,6E+04	0,0E+00	2,7E-06	3,1E-05	2,1E-12	3,4E-05
0,0E+00	0,0E+00	8,5E-08	3,1E-05	3,4E-12	3,1E-05
1,3E+05	0,0E+00	2,7E-09	3,1E-05	4,6E-12	3,1E-05
0,0E+00	0,0E+00	2,6E-12	3,1E-05	7,1E-12	3,1E-05
2,6E+05	0,0E+00	2,6E-15	3,1E-05	9,6E-12	3,1E-05
5,2E+05	0,0E+00	2,4E-27	3,0E-05	1,9E-11	3,0E-05
7,9E+05	0,0E+00	2,2E-39	3,0E-05	2,9E-11	3,0E-05
1,0E+06	0,0E+00	2,1E-51	3,0E-05	3,9E-11	3,0E-05
2,1E+06	0,0E+00	1,6E-99	2,9E-05	7,7E-11	2,9E-05
4,2E+06	0,0E+00	9,1E-196	2,7E-05	1,5E-10	2,7E-05
8,4E+06	0,0E+00	0,0E+00	2,4E-05	2,8E-10	2,4E-05
1,7E+07	0,0E+00	0,0E+00	1,9E-05	5,0E-10	1,9E-05
3,4E+07	0,0E+00	0,0E+00	1,1E-05	8,1E-10	1,1E-05
6,7E+07	0,0E+00	0,0E+00	4,2E-06	1,1E-09	4,2E-06
0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,6E-06	1,2E-09	1,6E-06
1,3E+08	0,0E+00	0,0E+00	5,8E-07	1,3E-09	5,8E-07
0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	8,0E-08	1,3E-09	8,1E-08
2,7E+08	0,0E+00	0,0E+00	1,1E-08	1,3E-09	1,2E-08
4,0E+08	0,0E+00	0,0E+00	3,8E-12	1,3E-09	1,3E-09
5,4E+08	0,0E+00	0,0E+00	4,8E-19	1,2E-09	1,2E-09
1,1E+09	0,0E+00	0,0E+00	7,3E-33	1,2E-09	1,2E-09
2,1E+09	0,0E+00	0,0E+00	1,7E-60	1,0E-09	1,0E-09
4,3E+09	0,0E+00	0,0E+00	9,7E-116	8,4E-10	8,4E-10
8,6E+09	0,0E+00	0,0E+00	3,0E-226	5,5E-10	5,5E-10
1,7E+10	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,4E-10	2,4E-10
3,4E+10	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	4,3E-11	4,3E-11
6,9E+10	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,5E-12	1,5E-12

**Tabela 10 - Risco por Ingestão de <sup>244</sup>Cm**

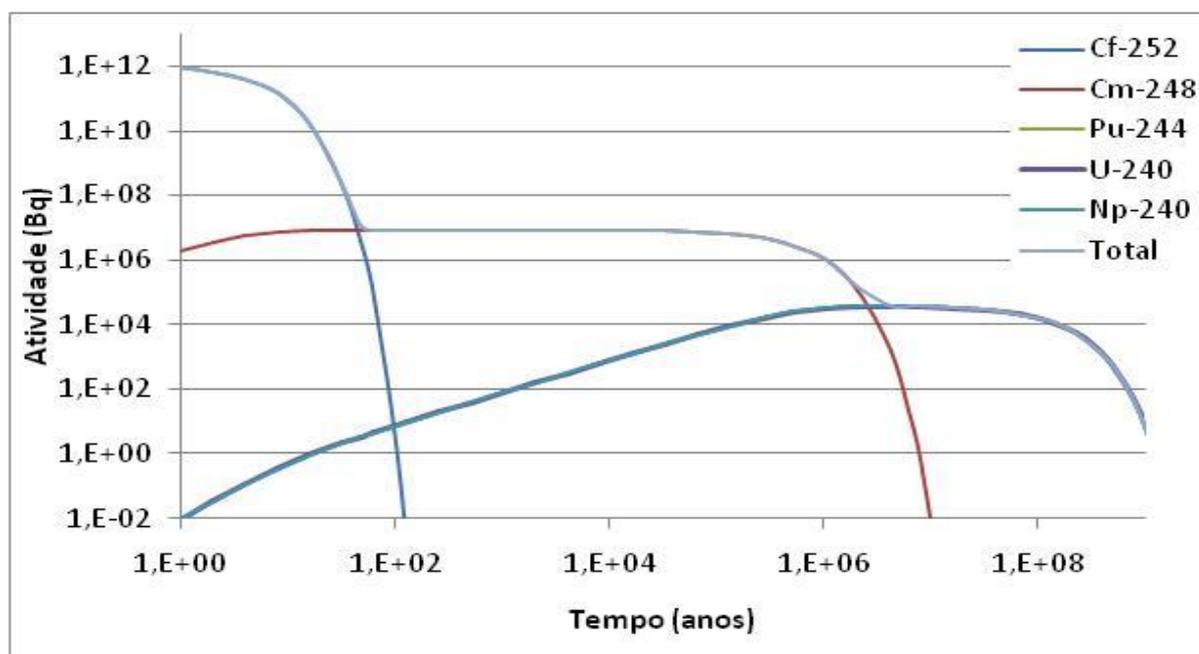
Risco Radiológico Relativo					
Tempo (anos)	Cm-244	Pu-240	U-236	Th-232	Total
0,0E+00	1,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,0E+00
1,0E-06	1,0E+00	1,9E-10	0,0E+00	1,7E-25	1,0E+00
5,0E-01	9,8E-01	9,4E-05	2,0E-14	1,6E-24	9,8E-01
1,0E+00	9,6E-01	1,9E-04	8,0E-14	1,4E-23	9,6E-01
2,0E+00	9,3E-01	3,6E-04	3,2E-13	1,1E-22	9,3E-01
4,0E+00	8,6E-01	7,0E-04	1,2E-12	8,7E-22	8,6E-01
8,0E+00	7,4E-01	1,3E-03	4,7E-12	6,7E-21	7,4E-01
1,6E+01	5,4E-01	2,3E-03	1,7E-11	5,0E-20	5,4E-01
3,2E+01	2,9E-01	3,5E-03	5,7E-11	3,5E-19	3,0E-01
6,4E+01	8,6E-02	4,5E-03	1,7E-10	2,2E-18	9,1E-02
1,3E+02	7,4E-03	4,9E-03	4,3E-10	1,2E-17	1,2E-02
0,0E+00	6,4E-04	4,9E-03	6,9E-10	3,1E-17	5,5E-03
2,6E+02	5,5E-05	4,8E-03	9,6E-10	5,9E-17	4,9E-03
0,0E+00	4,1E-07	4,8E-03	1,5E-09	1,4E-16	4,8E-03
5,1E+02	3,0E-09	4,7E-03	2,0E-09	2,6E-16	4,7E-03
1,0E+03	9,1E-18	4,4E-03	4,0E-09	1,1E-15	4,4E-03
2,0E+03	8,2E-35	4,0E-03	7,7E-09	4,2E-15	4,0E-03
4,1E+03	6,8E-69	3,2E-03	1,4E-08	1,6E-14	3,2E-03
8,2E+03	4,6E-137	2,1E-03	2,3E-08	5,7E-14	2,1E-03
1,6E+04	2,1E-273	8,8E-04	3,3E-08	1,8E-13	8,8E-04
3,3E+04	0,0E+00	1,6E-04	3,9E-08	5,0E-13	1,6E-04
6,6E+04	0,0E+00	4,9E-06	4,0E-08	1,2E-12	4,9E-06
0,0E+00	0,0E+00	1,5E-07	4,0E-08	1,9E-12	1,9E-07
1,3E+05	0,0E+00	4,8E-09	4,0E-08	2,6E-12	4,5E-08
0,0E+00	0,0E+00	4,7E-12	4,0E-08	3,9E-12	4,0E-08
2,6E+05	0,0E+00	4,6E-15	4,0E-08	5,3E-12	4,0E-08
5,2E+05	0,0E+00	4,3E-27	3,9E-08	1,1E-11	3,9E-08
7,9E+05	0,0E+00	4,0E-39	3,9E-08	1,6E-11	3,9E-08
1,0E+06	0,0E+00	3,8E-51	3,9E-08	2,2E-11	3,9E-08
2,1E+06	0,0E+00	2,8E-99	3,8E-08	4,3E-11	3,8E-08
4,2E+06	0,0E+00	1,6E-195	3,5E-08	8,3E-11	3,5E-08
8,4E+06	0,0E+00	0,0E+00	3,1E-08	1,6E-10	3,1E-08
1,7E+07	0,0E+00	0,0E+00	2,4E-08	2,8E-10	2,5E-08
3,4E+07	0,0E+00	0,0E+00	1,5E-08	4,5E-10	1,5E-08
6,7E+07	0,0E+00	0,0E+00	5,5E-09	6,1E-10	6,1E-09
0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,0E-09	6,7E-10	2,7E-09
1,3E+08	0,0E+00	0,0E+00	7,5E-10	6,9E-10	1,4E-09
0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,0E-10	7,0E-10	8,1E-10
2,7E+08	0,0E+00	0,0E+00	1,4E-11	7,0E-10	7,2E-10
5,4E+08	0,0E+00	0,0E+00	5,0E-15	6,9E-10	6,9E-10
1,1E+09	0,0E+00	0,0E+00	6,1E-22	6,7E-10	6,7E-10
2,1E+09	0,0E+00	0,0E+00	9,5E-36	6,4E-10	6,4E-10
4,3E+09	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-63	5,8E-10	5,8E-10
8,6E+09	0,0E+00	0,0E+00	1,2E-118	4,7E-10	4,7E-10
1,7E+10	0,0E+00	0,0E+00	3,9E-229	3,0E-10	3,0E-10
3,4E+10	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,3E-10	1,3E-10
6,9E+10	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,4E-11	2,4E-11

Infelizmente não foi possível obter dados a respeito da exposição à superfície contaminada para qualquer um dos radioisótopos das famílias de decaimento. A literatura disponível referente a essa forma de exposição apresenta dados demasiadamente discrepantes e, portanto, foram excluídos.

Como não houve uma forma de obter dados confiáveis, esse tipo de cenário foi completamente omitido dos resultados.

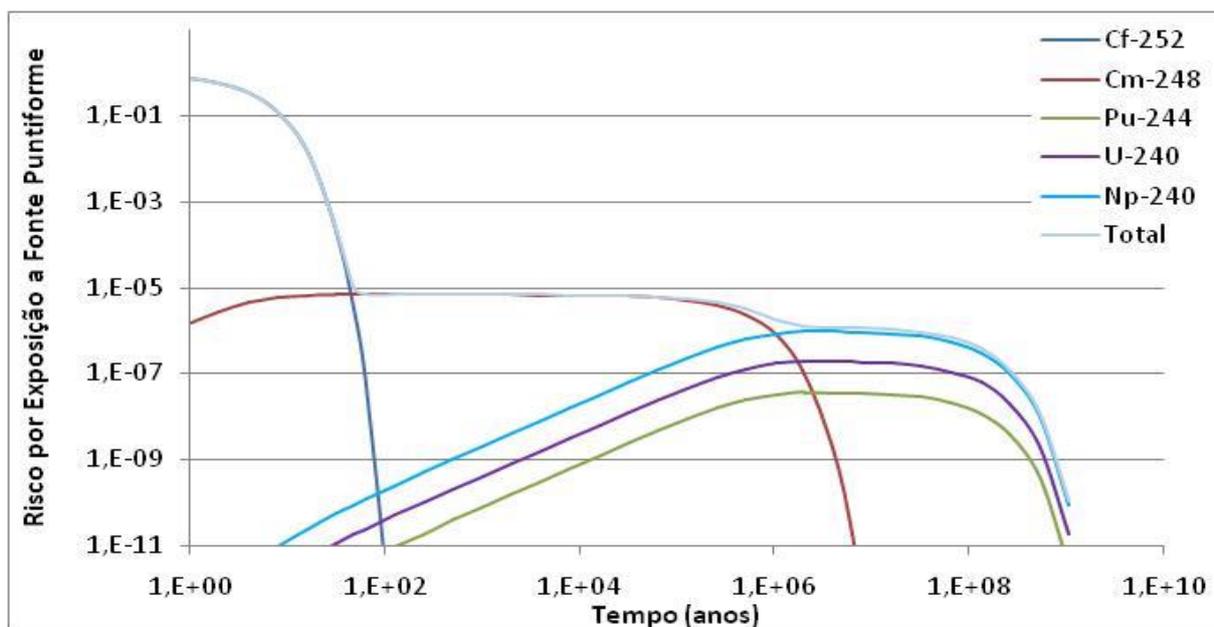
## 4.2 Gráficos

Os dados das tabelas 1 a 10 foram utilizados para esboçar os gráficos 1 a 8 de forma a tornar os resultados mais visuais. Todos os gráficos apresentados estão em escala logarítmica.



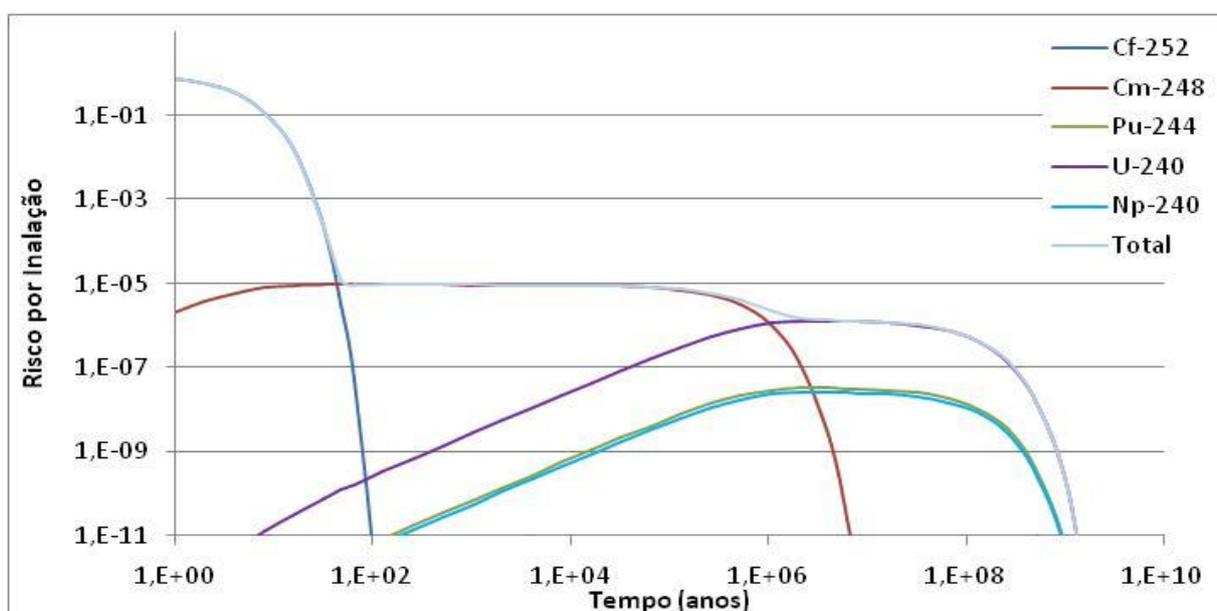
**Gráfico 1: Decaimento Radioativo da Cadeia do  $^{252}\text{Cf}$ , baseado na Tabela 1**

As linhas do  $^{240}\text{U}$  e do  $^{240}\text{Np}$  não são visíveis neste gráfico porque suas meias vidas são tão curtas que estão sobrepostas na linha do  $^{244}\text{Pu}$ , ocupando assim o mesmo espaço dessa linha. Para os propósitos de medição de radioatividade, pode-se aproximar que a atividade dos três isótopos é igual.



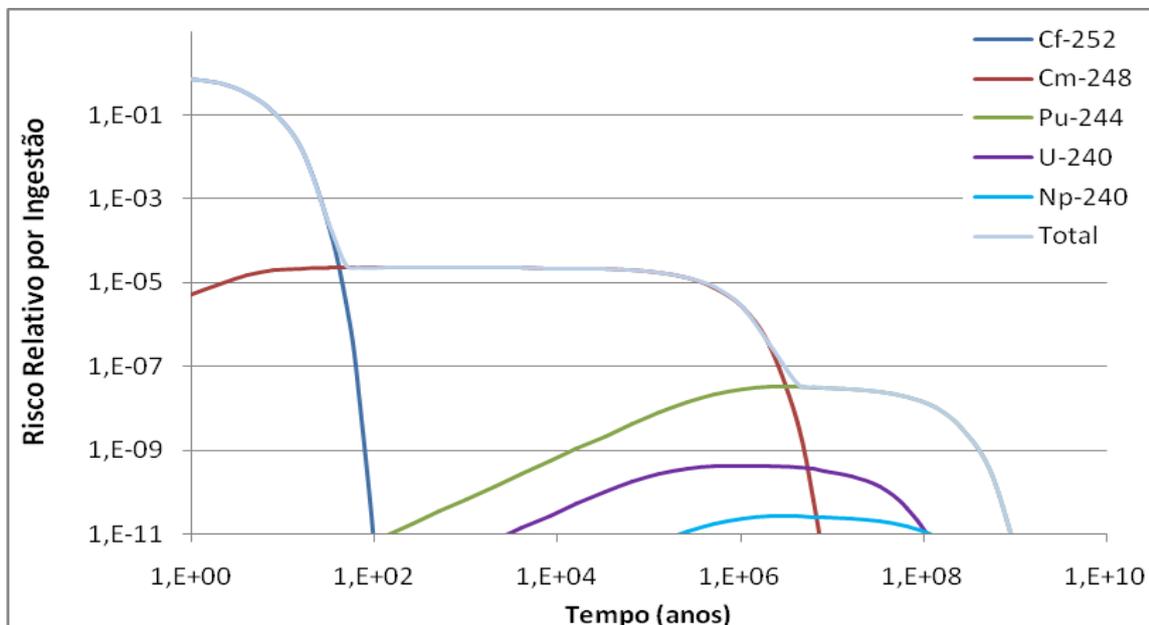
**Gráfico 2 – Taxa de Risco para Exposição à Fonte Puntiforme de  $^{252}\text{Cf}$ , baseado na Tabela 3**

No Gráfico 2 é possível notar que embora o  $^{240}\text{Np}$  esteja abaixo do  $^{244}\text{Pu}$  na cadeia de decaimento, ele decai por emissão  $\beta^-$ , apresentando maior dose para casos de exposição à fonte puntiforme. Isso ocorre porque durante um decaimento  $\beta^-$  existe uma grande possibilidade de o radioisótopo emitir energia sobressalente na forma de raios X, que são mais perigosos na situação de exposição externa à fonte puntiforme.

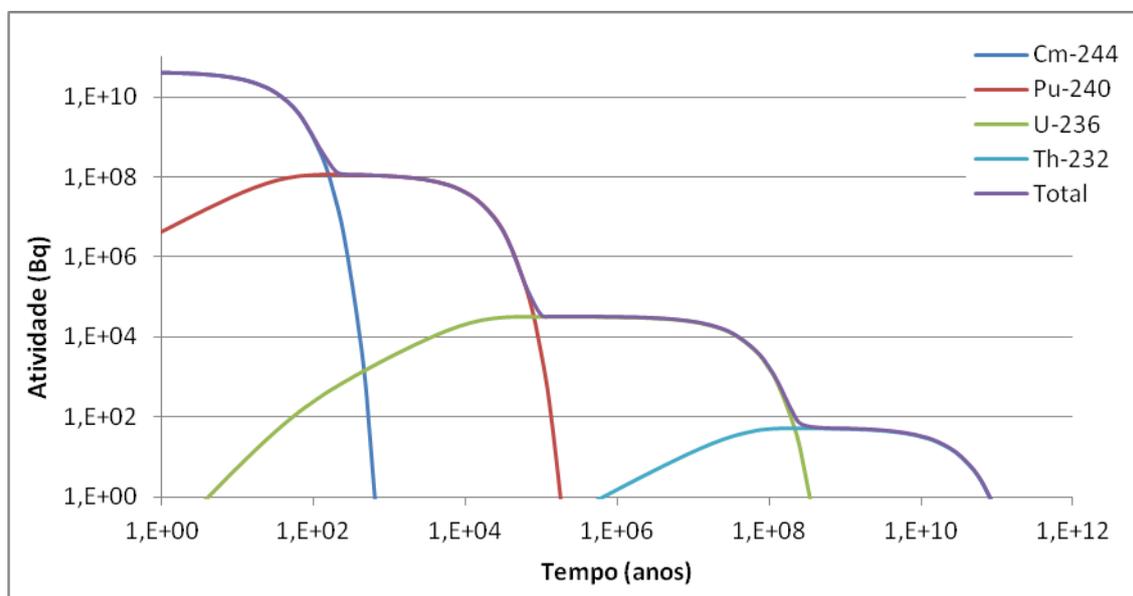


**Gráfico 3 – Taxa de Risco para Inalação de  $^{252}\text{Cf}$ , baseado na Tabela 4**

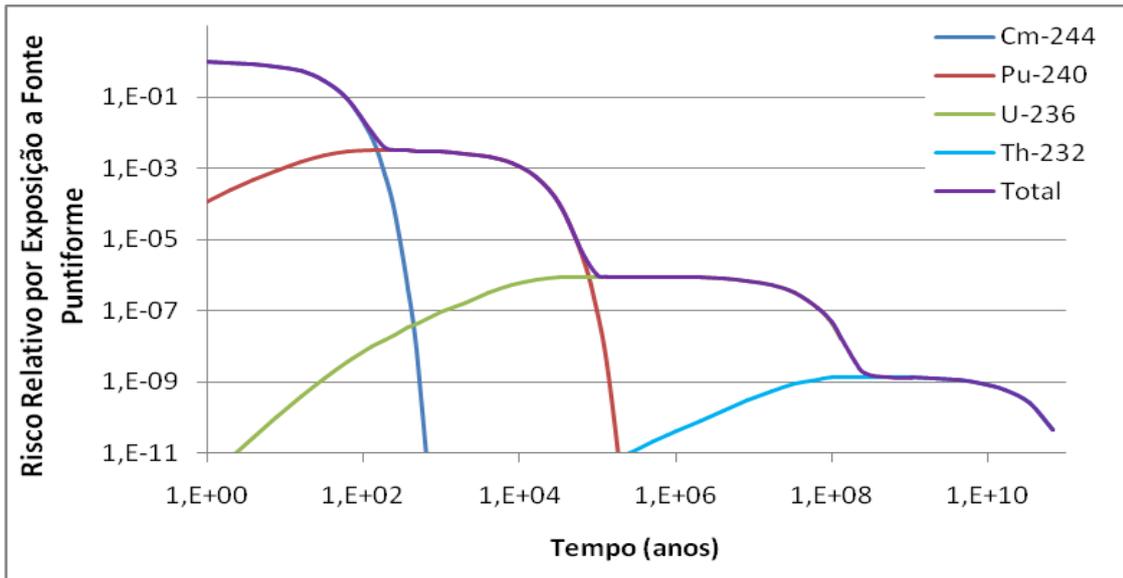
Assim como na Tabela 4, a atividade do  $^{240}\text{Np}$  foi multiplicada por 0.8 apenas para separar a linha de seu risco relativo da linha de risco do  $^{244}\text{Pu}$ . Essas alterações tem como único propósito melhorar a visualização; de fato, o risco relativo de ambos é quase idêntico.



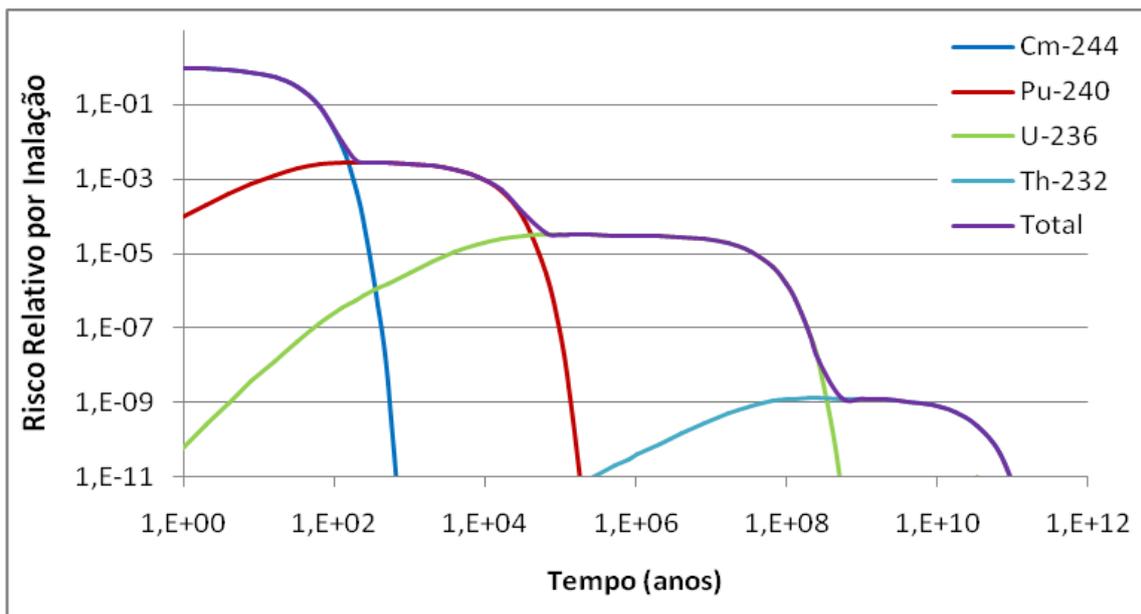
**Gráfico 4 – Taxa de Risco para Ingestão de  $^{252}\text{Cf}$ , baseado na Tabela 5**



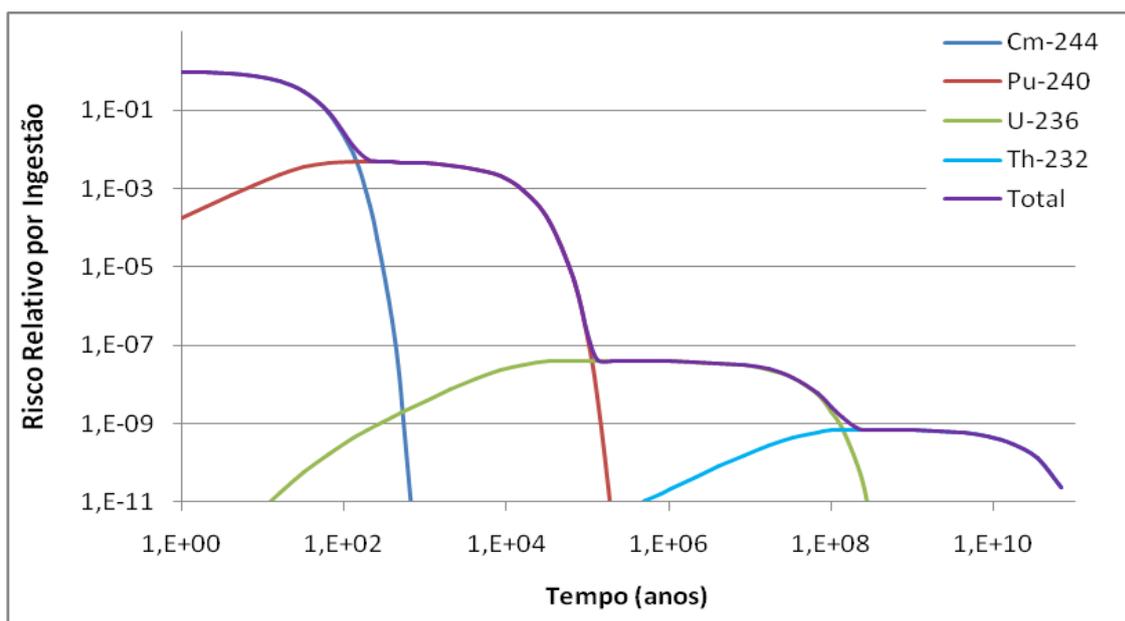
**Gráfico 5 – Decaimento da Família do  $^{244}\text{Cm}$ , baseado na Tabela 6**



**Gráfico 6 – Taxa de Risco por Exposição Externa à Fonte Puntiforme de  $^{244}\text{Cm}$ , baseado na Tabela 8**



**Gráfico 7 – Taxa de Risco por Inalação do  $^{244}\text{Cm}$ , baseado na Tabela 9**



**Gráfico 8 – Taxa de Risco por Ingestão de  $^{244}\text{Cm}$ , baseado na Tabela 10**

## 5. Conclusões

Calculou-se os valores da atividade para as FRSD no futuro e a partir disso determinou-se o risco relativo para cada um dos isótopos de suas famílias de decaimento. De posse dos resultados pode-se notar que mesmo para elementos pesados como o  $^{252}\text{Cf}$ , o risco torna-se até cem mil vezes menor que o atual em um prazo de apenas 100 anos.

Com o armazenamento correto em um depósito seguro, os radioisótopos ficarão cada vez menos perigosos e com o tempo deixarão de ser um risco para as formas de vida e a natureza. O conhecimento dos isótopos-filhos gerados no processo e do risco oferecido pelas FRSD em vários cenários diferentes permite aos gestores a correta classificação dos rejeitos e garante que eles serão armazenados no tipo de depósito correto.

No caso destas FRSD em particular é conveniente notar que devem ser separadas de fontes muito mais perigosas que precisam ser guardadas em repositórios, que custam muito mais que os depósitos temporários.

## Referências Bibliográficas

- [1] J. Magill, G. Pfennig, J. Galy. KarlsruherNuklidkarte, 7<sup>th</sup>Edição 2006;
- [2] R.C MARTIN, J.B KNAUER, P.A BALO. Production, distribution and applications of californium-252 neutron sources. Applied Radiation and Isotopes, Volume 53, Edições 4–5, 15 Novembro de 2000, Páginas 785–792.
- [3] Extraído de:<http://www.orau.org/documents/ivhp/health-physics/ornl-rsic-45.pdf> (Acessado em Maio de 2016)
- [4] Extraído de: [http://www.icrp.org/docs/P%20119%20JAICRP%2041\(s\)%20Compendium%20of%20Dose%20Coefficients%20based%20on%20ICRP%20Publication%2060.pdf](http://www.icrp.org/docs/P%20119%20JAICRP%2041(s)%20Compendium%20of%20Dose%20Coefficients%20based%20on%20ICRP%20Publication%2060.pdf) (Acessado em Maio de 2016)
- [5] Extraído de: Annals of the ICRP – Radionuclide Transformations – Energy and Intensity of Emissions, Volumes 11 – 13. Pergamon Press, Oxford – New York – Frankfurt, 1983.
- [6] LOGAN J. HARR, Captain, USAF. Precise calculation of complex radioactive decay chains. Tese de Mestrado do Air Force Institute of Technology publicada em 2007. Disponível em: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a469273.pdf>