

CARACTERIZAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DEVIDO A OPERAÇÃO DE VÁRIAS INSTALAÇÕES NUCLEARES EM UM MESMO SÍTIO

Elena Albeira Guirado Lucinio e José Messias de Oliveira Neto

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
Av. Lineu Prestes 2.242
05508-900 Butantã, São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

O presente trabalho avalia as conseqüências radiológicas de instalações de um centro nuclear que abriga atividades de enriquecimento isotópico, conversão e reconversão. Para isto é utilizada a metodologia desenvolvida pela Comunidade Européia, que se encontra implementada no código de computador PC-CREAM. A metodologia compreende vários modelos interligados os quais descrevem a transferência de radionuclídeos para o meio ambiente, os caminhos pelos quais as pessoas podem ser expostas à radiação e os danos resultantes à saúde. Os modelos utilizados contemplam a liberação de efluentes para a atmosfera e para meios aquáticos, além de calcularem a dose equivalente em cada órgão irradiado, devido aos radionuclídeos inalados e/ou ingeridos, para estimar os efeitos na saúde em uma população selecionada.

Keywords: environment impact, routine releases, transport modelling, radiological consequences.

I. INTRODUÇÃO

A liberação de materiais radioativos decorrentes de atividades antropogênicas, como a operação de reatores nucleares e de instalações do ciclo do combustível, pode eventualmente, elevar os níveis de radioatividade no meio ambiente, devido às descargas dos efluentes gerados por essas instalações, e expor indivíduos à dose de radiação.

A avaliação das conseqüências radiológicas devido à liberação de material radioativo para o meio ambiente, envolve o cálculo da exposição à radiação por indivíduos do público e grupos populacionais. Para isso, é necessário que se disponha de ferramentas apropriadas para que se possa avaliar possíveis impactos indesejáveis, estabelecer limites de liberação para essas instalações, de modo que a operação conjunta das mesmas seja considerada segura sem causar impactos indevidos.

Para isto, utilizam-se modelos como o código PC-CREAM, que contemplam a liberação de efluentes para a atmosfera e para ambientes aquáticos, além de calcularem a dose equivalente em cada órgão irradiado, devido aos radionuclídeos inalados e/ou ingeridos, para estimar os efeitos na saúde em uma população selecionada.

Esses modelos avaliam a distribuição temporal e espacial da contaminação ambiental por radionuclídeos, o que acoplado com informações sobre distribuição populacional, produção agrícola e hábitos alimentares, permitem avaliar impactos no homem e no meio ambiente.

Este trabalho tem por objetivo estudar as conseqüências radiológicas resultantes da operação normal de um conjunto de instalações do ciclo do combustível (enriquecimento isotópico, conversão e reconversão) localizadas num mesmo sítio.

II. METODOLOGIA

A metodologia utilizada através do código PC-CREAM avalia as doses individual e coletiva, assim como os danos na saúde do homem, resultantes das liberações rotineiras de efluentes radioativos. Como os efluentes são liberados via atmosfera ou meios líquidos, é necessária a utilização de modelos de dispersão atmosférica e aquática [1].

Para modelar os movimentos de atividade (radionuclídeos) no meio ambiente aquático, o PC-CREAM utiliza a análise compartimental. Esta técnica assume uma mistura instantânea e uniforme sendo que a transferência de atividade entre os compartimentos é proporcional ao inventário do doador.

O código possui modelos que descrevem a transferência de atividade para a superfície do solo e sua subseqüente passagem através do meio ambiente terrestre e os caminhos de exposição ao homem. Estes modelos são utilizados para calcular a concentração no ar devido a ressuspensão, a dose externa e a atividade transferida para alimentos selecionados, integradas no tempo. A matriz dos

resultados obtidos, quando combinada com dados das condições meteorológicas do local, dados de distribuição e hábitos da população e dados de produção agrícola, pode ser utilizada para avaliar a exposição individual ou coletiva, via meio ambiente terrestre, resultante da liberação de material radioativo para a atmosfera.

Padrões de Radioproteção e Conceitos Básicos de Dosimetria. As conseqüências são baseadas nos conceitos e nas grandezas dosimétricas definidos pela ICRP 60 [2], aplicando limites de dose equivalente apropriados aos membros individuais do público, ponderados sobre a dose equivalente média recebida por este grupo, que deve ser suficientemente pequeno para que seja homogêneo em relação à idade, dieta e aspectos do comportamento que afetam as doses recebidas. Este grupo homogêneo de indivíduos que estejam potencialmente sujeitos à maior exposição, resultante das fontes de radiação, é chamado de grupo crítico [3].

Os limites de liberação de efluentes para instalações nucleares devem ser definidos com base em limites autorizados, normalmente inferiores aos limites primários de dose equivalente para indivíduos do público, sendo aplicável somente em circunstâncias específicas.

III. PRINCIPAIS CAMINHOS DE EXPOSIÇÃO PARA LIBERAÇÕES GASOSAS E LÍQUIDAS

A maior parte das descargas radioativas ocorre na forma de material dissolvido ou em suspensão nos efluentes líquidos, ou gases e particulados em efluentes gasosos. O material que entra num corpo de água ou corrente de ar é imediatamente sujeito a um processo de turbulência e difusão molecular que causa a sua dispersão.

a) Liberação de efluentes gasosos:

- Inalação de radionuclídeos após sua dispersão na pluma;
- Ingestão de leite, vegetais e carne contaminados pela dispersão e deposição de radionuclídeos na vegetação e sua conseqüente absorção radicular;
- Deposição de radionuclídeos no solo após sua dispersão na pluma;
- Imersão na pluma após os radionuclídeos serem ressuspensos devido à ação do vento.

b) Liberação de efluentes líquidos:

- Imersão em água contaminada pela diluição nos radionuclídeos;
- Ingestão de leite, vegetais e carne através da cadeia alimentar após a deposição de radionuclídeos nas pastagens;
- Ingestão de peixes contaminados pela água;
- Exposição aos sedimentos contaminados presentes nas margens do rio.

IV. AVALIAÇÃO DAS DOSES DE RADIAÇÃO RESULTANTES DA LIBERAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS PARA A ATMOSFERA

A liberação de radionuclídeos para a atmosfera pode levar à exposição do homem à radiação, principalmente devido a duas rotas: a irradiação externa por fótons e elétrons emitidos como resultado de processos de decaimento radioativo e a irradiação interna devido à inalação de radionuclídeos. Os radionuclídeos depositados no solo podem ser inalados pelo homem como resultado de sua ressuspensão, a qual pode ser causada pela ação do vento ou do homem.

Os radionuclídeos presentes na pluma podem ser removidos da mesma por processo de deposição úmida e seca, e de decaimento radioativo. A deposição úmida e seca de radionuclídeos resulta na sua incorporação pelo meio ambiente terrestre, onde podem continuar a expor o homem à radiação.

A deposição de radionuclídeos sobre a vegetação e o solo também pode levar à transferência dos mesmos para diversos gêneros alimentícios, cujo consumo pelo homem resultará em exposição interna.

Dispersão Atmosférica. A dispersão atmosférica é analisada utilizando o modelo de Pluma Gaussiana, que é apropriado para liberações contínuas de longa duração. Para as avaliações de doses individuais e da dispersão a distâncias relativamente curtas, o modelo considera a influência de fatores específicos do sítio, tais como a turbulência causada pelo(s) prédio(s) (efeito de "building wake") e processo de elevação da pluma.

Nos cálculos da dispersão atmosférica são considerados os seguintes fatores: influência da altura da camada de mistura; processos de remoção úmida e seca; decaimento radioativo; rugosidade do solo; elevação da pluma; efeito de "building-wake".

As concentrações de atividade no ar e as taxas de deposição em função da distância são estimadas considerando-se o número de setores de direção do vento (determinado pelo usuário), a freqüência da direção do vento no setor de interesse e as classes de estabilidade atmosférica consideradas.

O modelo da Pluma Gaussiana é definido pelos seguintes parâmetros:

- Para liberação pontual contínua, sob condições de difusão constantes:

$$X(x, y, z) = \frac{\dot{Q}}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] * \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

onde:

X (x,y,z): concentração no ar, no ponto com coordenadas x, y, z (Bq.m⁻³);

Q: Atividade liberada (Bq.s⁻¹);

u: Velocidade média do vento (m.s⁻¹);

σ_y, σ_z : parâmetros de difusão: desvio padrão da distribuição da concentração na direção horizontal e vertical, respectivamente (m);

H: altura efetiva de liberação (m).

- Para concentração ao nível do solo ($z=0$):

$$X(x, y, z) = \frac{\dot{Q}}{2\pi.u.\sigma_y.\sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (2)$$

- Fator de Difusão da Pluma:

$$\frac{X}{\dot{Q}} = 2,032 \sum_{jk} \frac{n_{jk}}{N} \cdot \frac{1}{x.u.k.\sigma_{-j}} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_{-j}^2}\right) \quad (3)$$

onde:

n_{jk} : número de horas em que há ocorrência de ventos, em uma dada direção, com classe de velocidade k, sob condições de classe de estabilidade j;

N : número total de horas de observação e n_{jk}/N é a frequência do vento em uma dada direção.

Exposição Direta Devido à Imersão na Pluma. Na metodologia estudada, a estimativa da exposição externa devido à imersão na pluma radioativa é feita, em geral, em dois estágios: a avaliação da dose absorvida no ar, seguida pela conversão desta para dose equivalente em tecidos apropriados ou para dose equivalente efetiva.

Irradiação Interna Devido à Ingestão de Alimentos Contaminados. Um dos principais caminhos de exposição resultantes da deposição de radionuclídeos no solo é a irradiação interna devido à ingestão de alimentos contaminados.

A transferência de radionuclídeos transportados no meio ambiente terrestre para alimentos é complexa, envolvendo inúmeros processos e sendo muito dependente das características dos radionuclídeos em ambientes específicos.

Devido à complexidade dos processos físicos de transferência de radionuclídeos através das cadeias alimentares terrestres, a modelagem adotada consiste de compartimentos interligados, cada um representando diferentes partes da cadeia alimentar. Também podem ser considerados outros tipos de contaminação do solo, tal como via irrigação.

Os principais processos de transferência de radionuclídeos através das cadeias alimentares para o homem são: a migração de radionuclídeos no solo, a transferência para animais, sendo que a técnica de análise compartimental é adotada para modelar a transferência de atividade por cada sistema.

Os alimentos foram agrupados em categorias como: legumes, grãos, raízes, frutas, carnes, leite e derivados de leite.

Irradiação Externa Devido à Deposição de Radionuclídeos no Solo. Na liberação de radionuclídeos para a atmosfera, um tipo de consequência que pode persistir por vários anos é a irradiação externa de pessoas

devido à deposição de radionuclídeos no solo. Este tipo de exposição depende do espectro de emissão gama e da migração de radionuclídeos no solo e das taxas de decaimento radioativo.

Para descrever a migração de radionuclídeos no solo, o código possui dois modelos, um para solo não perturbado (pastagens) e outro para solos arados ou cultivados. Estes modelos estimam a concentração de atividade em vários níveis de profundidade do solo.

A irradiação externa devido aos radionuclídeos emissores de fótons considera a contaminação do solo até a profundidade de 30 cm, enquanto que para os emissores de elétrons é considerada a deposição sobre a superfície do solo.

V. AVALIAÇÃO DAS DOSES DE RADIAÇÃO RESULTANTES DA LIBERAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS PARA O MEIO AMBIENTE AQUÁTICO

Os efluentes líquidos podem ser liberados em ambientes de água doce, estuários ou ambientes marinhos.

Os radionuclídeos liberados em rios sofrem dispersão devido aos movimentos da água e aos processos de sedimentação.

Para modelar os movimentos de atividade (radionuclídeos) no meio ambiente aquático, o modelo estudado utiliza a análise compartimental. Esta técnica assume uma mistura instantânea e uniforme dentro de cada compartimento, sendo que a transferência de atividade entre os compartimentos é proporcional ao inventário do compartimento fonte (doador).

Todos os modelos de avaliação do impacto radiológico da liberação de radionuclídeos para rios, deve considerar o processo de decaimento radioativo.

Caminhos de Exposição.

Ingestão de Água Potável. A água de um rio, ou de um lençol de água próximo a um rio, pode ser extraída e utilizada, após tratamento, como água potável. A concentração de atividade na água potável normalmente é inferior à concentração na água do rio por um fator que depende dos tipos de métodos de extração e de tratamento. Pode haver ingestão de água contaminada pelos animais de criação, o que leva à acumulação de radionuclídeos na carne e nos derivados do leite.

Ingestão de Peixe. A transferência de atividade para peixes é calculada utilizando um fator de concentração para cada elemento. Este fator relaciona a concentração de atividade na porção comestível do peixe com a concentração na água na qual o peixe é criado.

Exposição Externa aos Sedimentos. Pode ocorrer pela imersão na água do rio (banho ou pesca), ou da permanência na margem do rio (banho de sol) ou em barcos. O tempo gasto pelas pessoas nestas atividades é um dado específico do local.

Irrigação. Podemos considerar que vegetais e pastagens sejam contaminados através da irrigação. As doses resultantes no homem podem ter origem na ingestão de alimentos contaminados, na ressuspensão de radionuclídeos do solo (e conseqüentemente inalação) ou na irradiação externa pelo solo contaminado.

VI. PRINCÍPIOS GERAIS PARA A AVALIAÇÃO DAS DOSES INDIVIDUAIS E COLETIVAS

A limitação de exposições à radiação para a operação de instalações do ciclo do combustível envolve uma combinação de avaliação de exposições individuais e suas contribuições de doses provenientes de outras fontes geralmente estimadas através de cálculos de exposições coletivas.

Para avaliar as doses recebidas pelos indivíduos do público, é necessário que se faça uma análise da forma de exposição desse indivíduo, que pode ser, basicamente, de duas formas:

- **Exposição externa:** por imersão no ar contaminado ou recebimento de radiação direta;
- **Exposição interna:** por ingestão de alimentos contaminados ou por inalação.

A metodologia pode ser utilizada para a estimativa de doses individuais e para populações. Na avaliação das doses coletivas os dados médios relativos aos hábitos da população exposta normalmente são suficientes para que as doses estimadas sejam confiáveis.

VII. DADOS DO LOCAL

Localização. A área selecionada para a avaliação de dose nos indivíduos do público, é uma área de 10 km de raio em torno da região estudada, centrada na torre de aquisição de dados meteorológicos do local [4].

Para o cálculo de doses individuais, são necessárias informações a respeito da localização da população estudada e dos pontos nos quais alimentos consumidos são produzidos. Dados dos hábitos tais como taxas de consumo de alimentos e taxas de ocupação, também são necessários para a estimativa da incorporação de radionuclídeos e da dose externa, respectivamente. Estes pontos são chamados de pontos receptores, que são distâncias definidas a partir de uma das chaminés (pontos de descarga), denominada chaminé de referência. As distâncias utilizadas em metros foram: 700, 1500, 3500, 5000, 10000.

Para fins de estudo, foram consideradas as instalações do ciclo do combustível (enriquecimento isotópico, conversão e reconversão), durante operação normal, com liberações dos efluentes à altura de 20m. Os efluentes liberados por estas instalações contêm apenas compostos de urânio natural e enriquecido.

Para as liberações aquáticas, foi considerado que todos os efluentes líquidos produzidos pelas instalações serão lançados no mesmo ponto do rio.

Considerou-se que este rio estudado, tem vazão constante igual a $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Este valor corresponde à sua vazão mínima [4].

A Tabela 1 lista as quantidades liberadas para a atmosfera, pelas instalações do ciclo do combustível [4].

TABELA 1. Quantidades Liberadas para a Atmosfera (Bq/ano) [4]

Nuclídeo	Atividade Liberada (Bq/ano)
U-234	$9,7 \cdot 10^6$
U-235	$4,3 \cdot 10^5$
U-238	$9,4 \cdot 10^6$

A Tabela 2 lista as quantidades liberadas para o rio, pelas instalações do ciclo do combustível [4].

TABELA 2. Quantidades Liberadas para a Atmosfera (Bq/ano) [4]

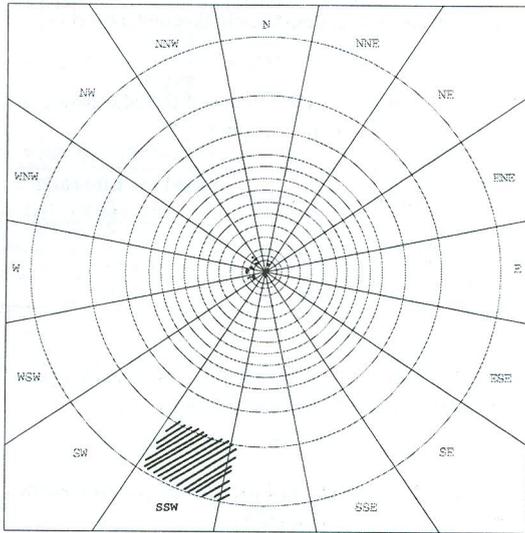
Nuclídeo	Atividade Liberada (Bq/ano)
U-234	$1,4 \cdot 10^7$
U-235	$1,5 \cdot 10^6$
U-238	$1,3 \cdot 10^6$

No modelo, a distribuição demográfica e a produção agrícola ao redor do sítio (área de interesse) é representada na forma de uma grade em coordenadas polares, divididos em 16 setores, cada um com $22,5^\circ$. Esta grade representa as distâncias radiais e os setores com ângulos definidos pelo usuário.

A Figura 1 mostra a grade dividida em 16 setores com ângulos de $22,5^\circ$, os anéis concêntricos representa as distâncias radiais.

Na área hachurada, por exemplo, considerou-se uma população de 770 habitantes. O consumo anual de alimentos nessa área é obtido multiplicando-se os valores da Tabela 3 pela distribuição demográfica nesse setor.

FIGURA 1. Grade com 16 setores com ângulos de 22,5° e os anéis concêntricos representando as distâncias radiais.



O código permite a adoção de até cinco pontos de descarga de efluentes gasosos, localizados no sítio. Cada ponto de descarga corresponderá ao centro de uma grade, sendo que o resultado final leva em conta a soma das doses e/ou concentrações resultantes das liberações de todos os pontos de descarga.

A Tabela 3 lista os alimentos consumidos e as respectivas taxas de ingestão para os indivíduos do sítio estudado [4]/[5].

TABELA 3. Alimentos Consumidos e Taxas de Ingestão (kg/ano) [4]/[5]

Alimento	Taxa de Ingestão (kg/ano)
Carne	71
Leite	120
Derivados de Leite	54
Vegetais	14
Raízes	79
Grãos	74

A taxa de ingestão de água para os indivíduos é de 700 Litros/ano.

Para a avaliação de dose coletiva, assumiu-se que todas as liberações (descargas) são feitas de um único ponto no sítio.

As doses equivalentes efetivas foram calculadas para indivíduos do público adultos residentes na área de interesse, considerando-se uma taxa de ocupação de 100% e tempo de integração de 50 anos.

Consideramos, sem perda da precisão desejada, que a população da região se divide igualmente entre homens e mulheres.

Neste estudo foram calculadas apenas as doses para adultos. Não foram avaliadas crianças com até 1 ano de idade.

Na ausência de informações locais, os parâmetros empregados nos modelos do PC-CREAM foram retirados de [1], [5] e [6].

VIII. CONCLUSÕES

Após diversas análises, constatou-se que o setor com maior dose equivalente efetiva anual é o setor de 203° (SSW), à 700m da Torre de Aquisição dos Dados Meteorológicos (vide Figura 1).

Para este setor a dose equivalente efetiva anual individual, considerando descargas atmosféricas, é de $0,17 \cdot 10^{-4}$ mSv. Este valor é inferior ao limite de dose para o grupo crítico definido pela CNEN [7], que é de 0,3 mSv/ano. A dose coletiva calculada no setor é de $4,9 \cdot 10^{-5}$ homem.Sv.

Com relação aos caminhos de exposição considerados, a inalação de radionuclídeos é o que contribui mais significativamente tanto para a dose total individual quanto coletiva, com cerca de 99%.

Considerando as descargas aquáticas, a dose equivalente efetiva anual individual calculada foi de $8,89 \cdot 10^{-4}$ mSv, valor inferior ao definido pela CNEN [7].

A ingestão de água contaminada é o caminho de exposição mais crítico resultante das liberações líquidas.

REFERÊNCIAS

- [1] MAYALL, A. et alii. "PC-CREAM 97 – Installing and Using the PC System for Assessing the Radiological Impact of Routine Releases – CEC". June, 1997. (EUR 17791 EN)
- [2] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". ICRP 60. November, 1990.
- [3] TODO, A. S., SORDI, G. A. A. "Fundamentos da Tecnologia Nuclear" – Vol. 4 – Proteção Radiológica – Versão 2, 1997.
- [4] FERREIRA, N. L. D., "Doses no Grupo Crítico/CEA Devido à Operação do LEI, da USIDE e do LABMAT, Anais do V Encontro Nacional de Aplicações Nucleares, Rio de Janeiro, 15 a 20 de Outubro de 2000, Rio de Janeiro, 2000.
- [5] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. "Guidelines for Calculating Derived Release Limits for Radioactive Material in Airborne and Liquid Effluents for Normal Operation of Nuclear Facilities". August, 1987. (CAN/CSA-N288.1-M87)
- [6] SIMMONDS, J. R., LAWSON, G. AND MAYALL, A. "Methodology for Assessing the Radiological

Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment – CEC . Luxemburg, 1995. (EUR 15760 EN)

[7] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. “**Diretrizes Básicas de Radioproteção**”. CNEN-NE-3.01. Novembro, 1986.

ABSTRACT

This work deals with the radiological consequences of a site operating fuel enrichment, conversion and reconversion facilities. The consequences are calculated using the methodology recommended by the Commission of the European Communities (CEC), implemented in the PC-CREAM computer code. The methodology encompasses several linked models which describe the transfer of radionuclides to the environment, the pathways on which people may be exposed to radiation, and the radiological consequences. The models include effluent releases to the atmosphere and waterways, calculate the equivalent dose for each irradiated organ and estimate healthy effects in a selected population.