

**CNEN/SP*****ipen*** Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

ESTIMATIVA DAS DOSES NA POPULAÇÃO CAUSADAS PELA
LIBERAÇÃO DE EFLUENTES GASOSOS POR UMA INSTALAÇÃO
DE PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

Ana Maria Pinho Leite GORDON, Vanusa Maria Feliciano JACOMINO,
Gian-Maria A. A. SORDI

IPEN-PUB--305.

PUBLICAÇÃO IPEN 305

MAIO/1990

SÃO PAULO

**ESTIMATIVA DAS DOSES NA POPULAÇÃO CAUSADAS PELA
LIBERAÇÃO DE EFLUENTES GASOSOS POR UMA INSTALAÇÃO
DE PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS**

Ana Maria Pinho Leite GORDON, Vanusa Maria Feliciano JACOMINO, Gian-Maria A.A. SORDI

DEPARTAMENTO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

**CNEN/SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO – BRASIL**

Série PUBLICAÇÃO IPEN

INIS Categories and Descriptors

C52.20

**DOSE EQUIVALENTS
GASEOUS WASTES
RADIOACTIVE AEROSOLS
RADIOACTIVE EFFLUENTS
POPULATIONS**

IPEN - Doc - 3625

Publicação aprovada pela CNEN em 06/04/90.

Note: A redação, ortografia, conceitos e revisão são de responsabilidade do(s) autor(es).

ESTIMATIVA DAS DOSES NA POPULAÇÃO CAUSADAS PELA LIBERAÇÃO DE EFLUENTES GASOSOS POR UMA INSTALAÇÃO DE PRODUÇÃO DE RA DIOISÓTOPOS.

Ana Maria Pinho Leite GORDON, Vanusa Maria Feliciano JACOMINO, Gian-Maria A.A.SORDI.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR-SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
CAIXA POSTAL 11049-PINHEIROS
05499 - SÃO PAULO - BRASIL

RESUMO

A fim de controlar a descarga de iodo radioativo gaso so para o meio ambiente resultante do funcionamento da Instalação de Produção de Radioisótopos do IPEN-CNEN/SP é feita a monitoração dos efluentes gasosos e aerossóis antes que estes sejam liberados para a atmosfera. No ano de 1988 foi liberada uma atividade total de 65 G Bq de ^{131}I . Com base neste dado e informações sobre a análise do local foi feita a estimativa da dose equivalente efetiva nos indivíduos do público, para condições normais de operação e para o caso de uma liberação não planejada. O cálculo da dose foi feito utilizando-se um modelo de difusão atmosférica para distâncias variando de 500 a 7000m do ponto de liberação e 8 setores diferentes de direção do vento.

O grupo crítico é constituído por aquelas pessoas que vivem a uma distância de 3000m do ponto de liberação no setor de difusão atmosférica noroeste (NW). O valor da dose neste ponto, tanto para condições normais de operação como para uma liberação não planejada, é da ordem de 10^9 vezes menor que o limite de dose anual para indivíduos do público estipulado pelas Normas de Proteção Radiológica. Determinou-se o limite derivado de descarga para iodo e concluiu-se que o IPEN-CNEN/SP pode aumentar a sua produção até um nível que resulte em uma liberação anual de $1,5 \times 10^{12}$ Bq de ^{131}I .

**EVALUATION OF THE POPULATION DOSE DUE TO THE GASEOUS
EMISSION OF A RADIOISOTOPES PRODUCTION UNIT.**

Ana Maria Pinho Leite GORDON, Vanusa Maria Feliciano
JACOMINO, Gian-Maria A.A.SORDI.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR-SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
CAIXA POSTAL 11049 - PINHEIROS
05499 - SÃO PAULO - BRASIL

ABSTRACT

In order to control the emission of gaseous radioactive iodine from the unit responsible for the production of radioisotopes of IPEN-CNEN/SP, a discharge monitoring is carried out.

In 1988 an activity of 65 GBq of I-131 was discharged to the environment. Based upon this value and the site analysis, the effective equivalent dose in the general public was evaluated for normal operation and for an incidental discharge.

The evaluation was carried out by using a diffusion atmospheric model, 500 to 7000 m away from the discharge point and using 8 different wind direction sectors.

The critical group was identified as being the people who lives 3000 m far from the discharge point, in the diffusion sector NW.

The dose evaluated at this point is 10^9 times lower than the annual dose limit for individual of the public, according to Radiological Protection Standards.

The derived limit for discharge of iodine was also evaluated and it was concluded that the IPEN-CNEN/SP can increase their production up to a level which results in an annual discharge of $1,5 \times 10^{12}$ Bq of I-131.

1. INTRODUÇÃO

Durante o funcionamento de uma instalação nuclear existe a possibilidade de liberação de materiais radioativos na forma de efluentes gasosos ou aerossóis. Segundo as normas internacionais vigentes é função da proteção radiológica da Instituição controlar a descarga de material radioativo visando principalmente os seguintes objetivos⁽¹⁰⁾ :

- a) demonstrar que a quantidade de material radioativo liberado está de acordo com os limites autorizados ou com outros limites que porventura possam ser impostos. Atualmente o IPEN-CNEN/SP adota os limites de descarga sugeridos pelas normas específicas da CNEN⁽²⁾.
- b) definir o termo-fonte da Instalação a fim de calcular a dose no indivíduo do público exposto à radiação causada pela liberação destes efluentes, bem como calcular a dose equivalente coletiva na população exposta.
- c) avaliar a necessidade de um cálculo de otimização, ALARA⁽¹¹⁾, para tratamento e descarga de material radioativo.
- d) avaliar a necessidade de um programa de monitoração ambiental.
- e) fornecer os dados que possam avaliar se o tratamento de efluentes, o sistema de controle e a operação da instalação nuclear estão de acordo com o planejado.

- f) detectar rapidamente e identificar a natureza e quantidade de qualquer liberação não planejada para o meio ambiente.
- g) fornecer informações para uma rápida avaliação de um perigo potencial para os indivíduos do público a partir da inalação, ingestão, contaminação de pele e da roupa e exposição externa de material radioativo liberado no meio ambiente.

Em uma instalação nuclear a liberação dos efluentes gasosos e aerossóis na atmosfera é feita através de uma chaminé, após a passagem por um sistema de tratamento (ajuste de pH e filtração) e por um sistema de controle (monitoração de ar). A chaminé irá garantir que na região vizinha à instalação, a concentração máxima do radionuclídeo seja reduzida antes de alcançar o solo em virtude da sua difusão na atmosfera.

Logo que um gás ou aerossol radioativo é liberado na atmosfera, o seu deslocamento e a sua dispersão são regidos pelas suas próprias características físicas e químicas, por aquelas da atmosfera e pela sua velocidade e temperatura de saída, que pode ser diferente ou não daquela do ar ambiente. O efluente na chaminé tem uma velocidade na direção vertical que é alterada na saída, pela velocidade do ar na atmosfera e pela diferença de temperatura. Esses efeitos provocam um deslocamento dos efluentes até uma altura máxima a partir da qual se difunde de acordo com a velocidade da atmosfera. A elevação do efluente é denominada de sobre elevação ΔH a qual irá modificar a altura efetiva de liberação.

O arraste do efluente pelo vento é chamado de transporte. A turbulência da atmosfera irá provocar movimentos em todas as direções sendo este processo denominado de difusão

atmosférica. A combinação do transporte e da difusão atmosférica é denominada de dispersão atmosférica.

Além dos fenômenos mencionados os efluentes são ainda submetidos a :

- a) fenômeno de depósito seco e úmido que conduz a uma diminuição da nuvem radioativa a medida que esta se afasta do ponto de liberação. Este processo por sua vez poderá conduzir a uma contaminação do solo e dos vegetais que se encontram sob a trajetória da nuvem.
- b) migração progressiva no solo dos radionuclídeos depositados.
- c) decaimento radioativo e eventualmente formação e acúmulo de produtos de decaimento também radioativos.
- d) ressuspensão dos radionuclídeos depositados.

Desta maneira é necessário que se conheçam os caminhos percorridos pela nuvem radioativa até chegar ao indivíduo a fim de se avaliar a dose equivalente efetiva recebida pelo grupo crítico (grupo que recebe a maior dose). Para isto são necessárias informações meteorológicas e climáticas para se determinar os efeitos reais sobre o meio ambiente em virtude das descargas radioativas de curta e longa duração. Além do mais o conhecimento das condições meteorológicas reais permitirá aos responsáveis pela instalação adotar medidas mais eficazes no caso de uma liberação não planejada. Também é necessário obter informações sobre as características do terreno em torno das instalações, o estado físico e a composição química do efluente e a altura de liberação, etc..

É importante que se avalie o grau de validade dos parâmetros usados e que se aprecie a limitação resultante do uso destes dados. Para garantir uma segurança adequada são usadas condições mais restritivas que darão um resultado de dose superior à dose real recebida.

O objetivo deste trabalho é avaliar a dose recebida pelos indivíduos do grupo crítico, devidamente identificado, em virtude da liberação de efluentes gasosos gerados por uma instalação de produção de radioisótopos, usando para isto um modelo dosimétrico genérico⁽⁸⁾.

2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

2.1. Produção de Efluentes Radioativos Gasosos e Aerossóis

A instalação de Produção de Radioisótopos do IPEN-CNEN/SP é responsável pela produção de radioisótopos primários para diagnose médica tais como I-131, P-32, Au-198, S-35, Na-24, K-42, Ca-45, Ga-67 etc.. assim como pela produção de geradores de Tc-99. Todos esses radioisótopos são manipulados e produzidos em celas ligadas ao sistema de ventilação e exaustão do prédio, que lança os efluentes para o meio ambiente, após passarem por um sistema de filtração, com uma vazão de aproximadamente $20.000\text{m}^3/\text{h}$ ⁽⁴⁾ através de uma chaminé. Esta possui aproximadamente 22,5m de altura em relação ao nível do terreno onde se encontra a Instalação (altura de 776m em relação ao nível do mar).

2.2. Sistema de Tratamento

Este sistema consiste na exaustão das celas e do ambiente de trabalho e filtração dos gases e aerossóis. As celas estão em depressão com relação ao ambiente de trabalho e este em depressão com relação à atmosfera ambiente.

O ar que penetra no ambiente de trabalho também é filtrado. Desta maneira todo o ar que circula pelas celas e ambiente de trabalho passa por um sistema de filtração e é obrigatoriamente liberado para o meio ambiente via um sistema de exaustão do prédio.

O sistema de ventilação compreende portanto três circuitos independentes; insuflamento de ar para a área de trabalho, exaustão do ambiente da área restrita e exaustão das celas de processamento e distribuição. O circuito de exaustão do ambiente da área restrita tem um conjunto de filtros absolutos para aerossóis a montante dos exaustores. O ar que circula no circuito da exaustão das celas passa por filtros de carvão ativo e filtros absolutos para aerossóis posicionados na saída de cada cela. O ar do circuito de insuflamento passa por filtros metálicos antes de penetrar na área de trabalho.

3. CARACTERÍSTICAS DO LOCAL

Os dados contidos neste item foram extraídos do Relatório de Análise de Local da Unidade Crítica⁽⁵⁾.

3.1. Geografia e Demografia.

3.1.1. Localização.

A Instalação de Produção de Radioisótopos está situada nas dependências do IPEN-CNEN/SP que por sua vez está localizado no "campus" da Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira", bairro do Butantã, cidade de São Paulo, Estado de São Paulo.

O bairro do Butantã situa-se a aproximadamente 8,5 km do centro da cidade, na direção sudoeste possuindo uma área de 58 km². A Cidade Universitária dista cerca de 10,5km do

centro da cidade de São Paulo, e está localizado nas vizinhanças do centro industrial do Jaguaré.

3.1.2. Distribuição Populacional.

A distribuição da população em função da área abrangida pelos setores e círculos concêntricos, com raios de 1 a 7km, centrados - Instalação de Produção de Radioisótopos é mostrada na Tabela 1.

A Universidade de São Paulo compreende aproximadamente 40% da área definida pelo círculo de 2km, possuindo uma população flutuante de 17.000 habitantes, de um total de 46.467.

3.2. Uso do Solo e Água.

3.2.1. Uso do Solo.

A capacidade de uso do solo nas imediações da Instalação de Produção de Radioisótopos, bem como sua ocupação, é estritamente urbana, constituindo basicamente de áreas residenciais, industriais e comerciais.

Deve ser salientado que as áreas destinadas à produção pecuária e hortifrutigranjeira, localizam-se no chamado "cinturão verde" e os centros produtores de leite estão localizados a mais de 60 km do IPEN-CNEN/SP.

3.2.2. Uso da Água.

A principal ocorrência de água superficial próxima do IPEN-CNEN/SP corresponde ao rio Pinheiros que tem o seu escoamento controlado visando o abastecimento dos reservatórios Billings e Rio das Pedras. Esses reservatórios abaste cem grande parte do complexo urbano e industrial da Grande

TABELA 1

**TOTALIZAÇÃO DA POPULAÇÃO EM TORNO DO IPEN POR SETORES
E CÍRCULOS CONCÊNTRICOS**

SETOR	CÍRCULOS CONCÊNTRICOS							TOTAL SETOR
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	
N	1.680	2.690	4.553	4.553	3.072	11.100	23.625	49.171
NNE	1.680	5.218	5.076	5.076	6.930	12.307	9.721	46.161
NE	1.680	5.218	5.456	5.456	19.472	30.584	34.227	101.636
NNE	1.680	5.218	7.581	7.581	27.404	48.892	44.595	147.793
E	1.680	5.218	8.683	8.683	25.547	28.265	41.585	121.983
ESE	1.680	5.218	7.733	7.733	13.914	28.129	46.392	113.314
SE	1.680	5.040	6.797	6.797	11.491	10.783	28.167	73.391
ESE	1.680	5.596	7.786	7.786	10.408	11.004	13.264	60.742
S	1.736	5.870	8.158	8.158	14.326	17.582	18.940	77.915
SSW	1.807	5.870	8.420	8.420	12.262	14.274	17.987	71.274
SW	1.846	5.870	9.750	9.750	5.990	8.664	11.640	56.148
WSW	1.846	5.870	9.750	9.750	4.944	6.576	9.510	52.240
W	1.818	5.870	9.750	9.750	13.900	17.589	20.765	82.200
WNW	1.714	5.870	9.280	9.280	14.332	17.589	20.765	80.847
NW	1.680	3.929	6.537	6.537	14.264	17.589	20.765	73.693
NNW	1.680	3.500	5.814	5.814	9.118	18.259	19.366	65.468
Total Círculos	27.567	92.065	121.124	121.101	207.375	299.186	381.314	1.272.947

São Paulo, estando interligados ao sistema energético de Cubatão.

As águas do rio Pinheiros são anaeróbicas em todo o seu percurso. O rio não possui fauna possível de ser incorporada à dieta da população e suas águas não tem condições de serem utilizadas para o consumo humano ou para a irrigação de vegetais.

3.3. Características Hidrológicas.

As águas do rio Pinheiros dirigem-se por circulação forçada até a represa Billings, através das estações elevatórias de Traição e Pedreira, de 5 e 26 m de recalque, respectivamente.

Após a estação elevatória de Pedreira, as águas do rio Pinheiros entram na represa Billings que possui uma capacidade nominal de 1200 milhões de m^3 e uma área superior a 120 milhões de m^2 . A seguir, as águas passam para o reservatório do rio das Pedras, antes de descer em direção à Serra do Mar para Cubatão, onde se aproveita o potencial hidráulico na Usina Elétrica de Cubatão.

O rio Pinheiros tem uma vazão média de $70 m^3/s$ e o reservatório Billings tem uma vazão de $75 m^3/s$.

3.4. Meteorologia.

3.4.1. Topografia.

A Instalação de Produção de Radioisótopos encontra-se a aproximadamente 776m de altitude, numa encosta da colina onde está assentado o IPEN-CNEN/SP. Esta e outras colinas delineiam o terreno varzeano típico da região, com altitudes máximas que raramente ultrapassam os 800m.

3.4.2. Meteorologia do Local.

Os dados meteorológicos foram avaliados e sumarizados a partir dos dados coletados na Estação Hidrometeorológica da Cidade Universitária pertencente ao DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo), distante cerca de 200 m da Instalação de Produção de Radioisótopos. Estes dados compreendem o período de janeiro de 1974 a dezembro de 1985, para os parâmetros de pressão ao nível da estação, temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento, precipitação, insolação e evaporação.

A Estação Hidrometeorológica do DAEE está localizada distante das áreas altamente urbanizadas, de modo que os dados estão sujeitos a pouca influência tanto da topografia como das edificações. Os dados meteorológicos referentes a este período são mostrados na Tabela 2.

3.4.2.1. Vento.

A distribuição da frequência e velocidade média vento a 10m por setor é apresentada na Tabela 3.

A predominância do vento se dá segundo a direção sudeste (SE) com frequência média de 39,81% e com velocidade média de 3,6m/s, a menor frequência é observada para ventos de sudoeste (SW). A frequência de calmaria fica em torno de 2,0% com velocidades do vento menores que 0,4m/s.

3.4.2.2. Temperatura.

Os valores médios mensais e anuais de temperatura e seus extremos no local são mostrados na Tabela 2.

TABELA 2

DADOS METEOROLÓGICOS

Estação : Cidade Universitária/SP. Lat.23° 34' S

Long.46° 44' W

Altitude: 795 m

Período : 1974 - 1985

ANO	PRESSÃO (mh)	U.R. (Z)	TEMPERATURA (C)					PRECIP. TOTAL (mm)	EVAP. TOTAL (mm)	INSOLAÇÃO TOTAL A REAL (HORAS)	Nº DE DIAS COM PRECIP. (mm)			
			Média	Máxima diária	Média das máximas	Mínima diária	Média das mínimas				P 1	1P 49	49 P 99	P 99
1974	925,2	82	18,6	33,6	24,8	3,2	14,5	1154,8	-	-	-	-	-	-
1975	926,0	82	18,9	33,0	25,0	0,1	14,8	1332,4	851,7	1934,9	-	-	-	-
1976	926,2	82	18,6	32,6	23,9	6,7	14,9	1815,0	-	-	134	128	6	0
1977	926,2	79	20,0	33,5	25,6	5,2	16,0	1245,5	913,3	2125,2	106	104	2	0
1978	926,7	79	18,8	33,9	24,8	2,8	14,7	1573,6	866,2	2294,4	95	89	6	0
1979	926,7	78	18,7	32,0	24,0	0,4	14,9	1313,0	-	-	105	100	1	0
1980	926,7	79	19,4	34,8	25,0	6,2	15,6	1363,4	-	2034,0	111	106	4	0
1981	926,9	80	19,0	33,4	24,7	3,0	15,3	1062,5	934,5	2053,2	101	98	2	0
1982	926,4	81	19,1	32,0	24,4	8,6	15,8	1775,1	-	1791,6	135	125	5	0
1983	925,1	82	19,3	32,6	24,3	6,8	16,1	2177,8	-	1680,3	140	130	5	1
1984	926,1	78	19,9	-	25,6	-	15,6	1040,0	-	-	-	-	-	-
1985	926,2	78	19,4	33,0	25,2	3,4	15,1	1031,6	964,4	-	96	91	1	0
Média no período	926,2	80	19,1	-	24,7	-	15,3	1407,7	-	-	-	-	-	-

TABELA 3
DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA E VELOCIDADE MÉDIA DO
VENTO POR SETOR PARA O PERÍODO DE 1974 a 1983.

ANO	N		NE		E		SE		S		SW		W		NW		Calmo	
	f(Z)	v(m/s)	f(Z)	v(m/s)	f(Z)	v(m/s)	f(Z)	v(m/s)	f(Z)	v(m/s)	f(Z)	v(m/s)	f(Z)	v(m/s)	f(Z)	v(m/s)	f(Z)	v(m/s)
1974	3,2	2,4	6,2	2,0	6,2	2,6	45,4	3,6	8,7	3,6	3,8	2,6	2,1	2,7	23,1	3,4	1,3	0,4
1975	3,9	2,5	3,9	1,7	6,5	2,5	46,9	3,8	10,2	3,5	2,9	2,3	2,2	2,2	21,9	3,3	1,6	0,4
1976	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1977	6,7	2,4	3,3	1,9	6,9	2,8	36,0	3,7	12,9	3,5	1,4	2,2	5,1	2,6	19,9	3,1	5,1	0,4
1978	7,5	2,3	3,9	1,9	10,8	2,7	38,8	3,7	13,8	3,7	1,8	2,3	3,9	2,5	17,3	3,1	2,2	0,4
1979	6,0	2,4	2,9	1,9	8,7	2,7	41,5	3,8	13,6	3,9	1,5	2,2	4,4	2,7	20,3	3,3	1,1	0,4
1980	5,7	2,0	5,3	2,0	13,7	3,0	39,2	3,8	5,1	2,8	1,5	2,2	6,0	2,8	22,6	3,3	1,0	0,4
1981	4,3	1,9	4,1	1,9	12,8	2,9	42,1	3,7	7,5	3,0	1,3	1,9	5,6	2,7	20,6	3,2	1,5	0,4
1982	6,0	1,9	3,3	1,7	11,1	2,6	37,5	3,5	9,9	3,4	1,3	2,0	4,5	2,5	23,3	3,0	3,1	0,4
1983	6,6	2,0	6,1	2,2	15,3	2,6	31,0	3,4	6,0	3,3	1,2	2,0	8,7	3,0	23,8	3,0	1,4	0,4
Média	5,5	2,2	4,3	1,9	10,5	2,7	39,8	3,6	9,7	3,4	1,8	2,2	4,7	2,6	21,4	3,2	2,0	0,4

Os menores valores de temperatura são observados durante os meses de junho, julho e agosto, enquanto que as maiores se verificam durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, sendo que a amplitude entre a estação mais quente e mais fria é cerca de 6°C na temperatura média mensal.

3.4.2.3. Pressão.

Os valores médios anuais da pressão atmosférica são mostrados na Tabela 2.

3.4.2.4. Umidade.

Os valores médios anuais da umidade relativa são mostrados na Tabela 2.

3.4.2.5. Precipitação.

Os valores totais anuais de precipitação são mostrados na Tabela 2.

4. MÉTODO DE CONTROLE E MEDIDA.

A monitoração dos efluentes gasosos é feita de maneira contínua por meio de uma bomba de sucção acoplada a um sistema de medida de fluxo de ar. Todo este sistema é instalado "off-line" no duto da chaminé localizado após o sistema de filtros absolutos e de carvão ativo existentes no sistema de exaustão. Cada componente de interesse, partícula e gases, é coletado por um sistema de filtros posicionado em série após a bomba de sucção. A frequência de amostragem foi escolhida levando-se em conta a meia-vida do radioisótopo de interesse, volume total amostrado e aspectos econômicos.

Após uma semana de amostragem contínua os filtros são recolhidos e enviados ao laboratório de radiometria, onde é realizada a medida da atividade do radioisótopo de interesse por espectrometria gama por meio de um detector semicondutor hiperpuro (HPGe) com eficiência de 15% acoplado a um analisador multicanal calibrado para a energia de 364 keV, correspondente ao pico de emissão gama de 81,2% de intensidade do ^{131}I , por um tempo de 5000s. Para a quantificação da atividade de ^{131}I encontrada nos filtros é feita a correção para a eficiência de detecção nesta energia. Após determinação da atividade total encontrada no filtro o resultado é dividido pelo volume total amostrado e corrigido para o volume total de ar semanal que sai pela chaminé. Além deste controle está prevista a instalação na chaminé de uma sonda detectora de radiação (cintilador de NaI) acoplada a um analisador monocal calibrado de maneira a se fazer a medida seletiva na energia de 364 keV.

5. VIAS CRÍTICAS, GRUPO CRÍTICO E MODELO DOSIMÉTRICO.

5.1. Vias Críticas e Grupo Crítico.

A avaliação do impacto radiológico provocado pela liberação de efluentes gasosos e aerossóis em condição normal ou anormal necessita numa primeira etapa o conhecimento do comportamento da contaminação no meio físico: concentração atmosférica dos principais radionuclídeos, atividade depositada por unidade de superfície no solo e evolução no tempo destes depósitos. A segunda etapa consiste em analisar as vias de transferência e identificar aquelas que são críticas. No caso de liberação de efluentes gasosos é necessário que se analise as seguintes possibilidades de irradiação.

- a) irradiação interna das pessoas em virtude da inalação das partículas radioativas colocadas em suspensão

são a partir dos depósitos e na passagem da nuvem (inalação).

- b) irradiação externa γ em virtude do depósito de radionuclídeos no solo (irradiação do solo).
- c) irradiação externa γ em virtude da imersão na nuvem radioativa
- d) irradiação externa β das pessoas em virtude da imersão na nuvem radioativa
- e) irradiação interna por ingestão após transferência para os alimentos (ingestão).

No caso da liberação de I-131 pela Instalação de Produção de Radioisótopos, as vias críticas a serem consideradas são aquelas que conduzem as irradiações descritas nos itens 5.1.a, 5.1.b, 5.1.c e 5.1.d. A via de irradiação descrita no item 5.1.e não será levada em conta, uma vez que os dados relativos ao uso e ocupação do solo mostram que a área circunvizinha ao IPEN é estritamente urbana não sendo destinada à produção pecuária e hortifrutigranjeira. Desta maneira não se justifica o cálculo de dose em virtude da ingestão de alimentos contaminados.

O grupo crítico será constituído pelos indivíduos que permanecem a uma distância em torno de 3000m da instalação no setor de difusão atmosférica no noroeste (NW), conforme será mostrado no item 6.

5.2. Modelo Dosimétrico e Cálculo da Dose Equivalente Efetiva.

5.2.1. Modelo Dosimétrico para o Cálculo da Dose em Virtude da Inalação de I-131.

Para a determinação da dose equivalente comprometida efetiva no grupo crítico em virtude da inalação utilizou-se um modelo dosimétrico baseado no método do fator de concentração⁽⁸⁾. Neste caso a dose resultante de uma dada liberação para um único radionuclídeo e uma única via de irradiação é dada pela equação geral :

$$H_{E,50} = (A \times B \times D) \times Q \quad (1)$$

sendo,

$H_{E,50}$ = dose equivalente comprometida efetiva no grupo crítico (Sv/ano)

A = fator de difusão no ponto de interesse por unidade de descarga na atmosfera em $s.m^{-3}$ (vide item 5.2.1.1.)

B = taxa de respiração para o homem que é igual $2,32.10^{-4} m^3/s$ ⁽⁷⁾

D = é o fator de conversão da dose por unidade de incorporação, que relaciona a atividade inalada com a dose equivalente comprometida efetiva. Para I-131 este valor é igual a $8,89 \times 10^{-9} Sv/Bq$ ⁽¹²⁾

Q = é o termo-fonte da instalação para efluente gasoso ($6,5 \times 10^{10} Bq/ano$).

5.2.1.1. Determinação do Fator de Difusão e Cálculo da Dose.

Na literatura⁽⁶⁾ foram desenvolvidos numerosos mode

los para a determinação do fator de difusão. Dentre estes destacam-se aqueles baseados em gráficos obtidos a partir de medidas experimentais e que fornecem o fator de difusão em função da distância entre a fonte (ponto de liberação) e o ponto de interesse. Neste trabalho foram utilizados os gráficos que fornecem o fator de difusão em função da distância e da altura efetiva de liberação para diferentes velocidades médias de vento na direção de dispersão.⁽³⁾ Considerou-se os valores dos fatores de difusão (Tabela 4) para diferentes distâncias entre 500 e 7000m e altura efetiva de liberação de aproximadamente 25m, onde a super elevação ΔH foi determinada a partir da equação empírica⁽⁵⁾

$$\Delta H = 1,5 \quad S^{-1/6} \left(\frac{F_m}{V} \right)^{1/3} \quad (2)$$

sendo,

S = parâmetro de estabilidade igual a $1,75 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-2}$ ⁽⁶⁾

V = velocidade aproximada do vento na altura da chaminé ($3,6 \text{ m s}^{-1}$)

e

$$F_m = w_o^2 \left(-\frac{D_i}{2} \right) \quad (3)$$

onde

w_o = velocidade na saída da chaminé (este dado foi medido experimentalmente e é igual a $3,4 \text{ m.s}^{-1}$)

D_i = diâmetro interno da chaminé ($\sim 1,4 \text{ m}$)

A partir da equação 1 calculou-se a dose equivalente comprometida efetiva para inalação para indivíduos do público situados entre 500m e 7000m do ponto de liberação, ponderada para frequência de direção do vento (Tabela 5), sendo que a porcentagem de calmaria foi dividida entre os oito setores. Neste caso a maior dose ocorre nas regiões situa

TABELA 4

FATORES DE DIFUSÃO (X/Q) PARA DIFERENTES DIREÇÕES
DO VENTO E DISTÂNCIAS DO PONTO DE LIBERAÇÃO.

DIREÇÃO	FATORES DE DIFUSÃO (X/Q) DISTÂNCIA (m)							
	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
N	5×10^{-7}	$3,0 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$
NE	5×10^{-7}	$3,0 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$
E	$2,5 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$
SE	$2,5 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$
S	$2,5 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$
SW	$5,0 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$
W	$2,5 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$
NW	$2,5 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$

TABELA 5

DOSE EQUIVALENTE COMPROMETIDA EFETIVA EM VIRTUDE DA
 INALAÇÃO DE ^{131}I PARA DIFERENTES SETORES E DISTÂN-
 CIAS DO PONTO DE LIBERAÇÃO PONDERADA PARA A FRE-
 QUÊNCIA DE DIREÇÃO DOS VENTOS

SETOR DE DI- FUSÃO ATMOS- FÉRICA	DOSE EQUIVALENTE COMPROMETIDA EFETIVA (Sv/ano)							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$3,9 \times 10^{-9}$	$2,3 \times 10^{-8}$	$3,1 \times 10^{-8}$	$3,1 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-8}$
SW	$3,0 \times 10^{-9}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$
W	$3,7 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$3,7 \times 10^{-8}$	$4,3 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-8}$	$3,7 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$	$2,6 \times 10^{-8}$
NW	$1,4 \times 10^{-9}$	$4,0 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$9,6 \times 10^{-8}$
N	$3,4 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-8}$
NE	$1,4 \times 10^{-9}$	$8,2 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$9,0 \times 10^{-9}$	$7,0 \times 10^{-9}$	$5,5 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-9}$
E	$1,7 \times 10^{-10}$	$5,0 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$
SE	$7,4 \times 10^{-10}$	$2,2 \times 10^{-8}$	$7,4 \times 10^{-8}$	$8,7 \times 10^{-8}$	$8,2 \times 10^{-8}$	$7,4 \times 10^{-8}$	$5,8 \times 10^{-8}$	$5,2 \times 10^{-8}$

das em torno de 3000m da Instalação no setor de difusão no roeste (NW) e é da ordem de 10^{-7} Sv/ano. A partir de 3000m a dose para via inalação diminui com a distância em função da maior diluição do efluente.

5.2.2. Modelo Dosimétrico e Cálculo da Dose Externa em Virtude do Depósito de I-131 no Solo (Irradiação do Solo)

A dose equivalente efetiva em virtude da deposição de radionuclídeos no solo, supondo que a atividade depositada dentro do raio de interesse é igual àquela no ponto de referência é dada por ⁽⁸⁾ :

$$H_E = Q (\bar{F}_p + \bar{W}_p) K_b \cdot D \quad (4)$$

onde

H_E = dose equivalente efetiva a 1m de altura em virtude da contaminação do solo pelo radionuclídeo no setor p (Sv)

$\bar{F}_p$ = fator de deposição no setor p (m^{-2})

$\bar{W}_p$ = fator de lavagem no setor p (m^{-2})

D = fator dosimétrico específico que relaciona a atividade depositada por unidade de área do solo com a dose equivalente efetiva. Para o I-131 esse fator é igual a $3,0 \times 10^{-16}$ Sv.Bq⁻¹ por m².s⁻¹ ⁽⁸⁾

K_b = equivale a equação ⁽⁸⁾

$$K_B = \frac{1 - \exp(-\lambda t_{B\phi})}{\lambda} \quad (5)$$

sendo

λ = constante de decaimento do radionuclídeo (s^{-1})

$t_{B\phi}$ = intervalo de tempo no qual o nuclídeo se acumula no solo(s)

O valor de K_p para I-131 é igual a $10^6 \text{seg}^{(8)}$.

O fator de lavagem $\bar{W}_p$ é determinado pela relação⁽⁸⁾

$$\bar{W}_p = \frac{N \cdot C \cdot B_p}{2 \pi x \bar{u}} \quad (6)$$

sendo

N = número de setores da direção do vento que neste trabalho foi considerado igual a 8.

β_p = taxa de precipitação anual total (1407,7mm)

C = constante de lavagem que para o iodo elementar é⁽⁸⁾ $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ (a (mm s)}^{-1})$

x = distância entre o ponto de liberação e o ponto de interesse (m)

$\bar{u}$ = velocidade média do vento no setor p (m/s). O fator de deposição pode ser obtido pela relação⁽⁸⁾.

$$\bar{P}_p = v_g \left(\frac{\bar{X}}{Q} \right)_p \quad (7)$$

sendo

V_g = velocidade de deposição que para o iodo elementar tem o valor $0,04 \text{ m.s}^{-1}$ (8)

$\frac{X}{Q}$ = fator de difusão no setor p

Na Tabela 6 são mostrados os valores calculados para $\bar{F}_p$ e na Tabela 7 os valores calculados para $\bar{W}_p$. Na Tabela 8 encontram-se os resultados da dose equivalente efetiva em virtude da deposição de radionuclídeos no solo ponderada para a frequência média de direção do vento, para os diferentes setores de difusão atmosférica. Pode se observar a partir de 3000m de distância do ponto de emissão, a tendência para a diminuição do valor da dose em virtude da maior diluição do radionuclídeo. Os indivíduos mais expostos por esta via recebem uma dose equivalente efetiva da ordem de 10^{-7} Sv/ano .

5.2.3. Modelo Dosimétrico para o Cálculo da Dose Provocada pela Irradiação Externa γ em Virtude da Imersão na Nuvem Radioativa (Submersão γ)

A dose equivalente efetiva provocada pela irradiação externa gama em virtude da imersão na nuvem radioativa contendo I-131 foi estimada usando-se o modelo da nuvem semi-infinita (8). Este modelo supõe que a nuvem está em equilíbrio radioativo, isto é, a concentração dos radionuclídeos no ar é constante em todo o volume da nuvem. Neste caso, a quantidade de energia absorvida por um dado elemento de volume da nuvem é igual à energia liberada no mesmo elemento. A dose equivalente efetiva será determinada a partir da relação (8)

$$H_E = \left(\frac{X}{Q} \right)_p \cdot D \cdot Q \quad (8)$$

TABELA 6
FATOR DE DEPOSIÇÃO DE ¹³¹I NO SOLO PARA DIFERENTES
SETORES E DISTÂNCIAS DO PONTO DE LIBERAÇÃO

SETOR DE DI- POSIÇÃO ATOMOS- FERICA	FATOR DE DEPOSIÇÃO F_p (M^{-2})							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-8}$
SW	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-8}$
W	$1,0 \times 10^{-9}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-8}$
WN	$1,0 \times 10^{-9}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-8}$
N	$1,0 \times 10^{-9}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-8}$
NE	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-8}$
E	$1,0 \times 10^{-9}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-8}$
SE	$1,0 \times 10^{-9}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-8}$

TABELA 7

FATOR DE LAVAGEM W_p (M^{-2}) PARA DIFERENTES SETORES E
DISTÂNCIAS DO PONTO DE LIBERAÇÃO

SECTOR DE LA FREIO ATRÁS PÚBLICA	FATOR DE LAVAGEM W_p (M^{-2})							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$2,0 \times 10^{-8}$	$9,8 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$
SW	$2,3 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$5,7 \times 10^{-9}$	$3,8 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-9}$	$2,3 \times 10^{-9}$	$1,9 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-9}$
W	$1,6 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-9}$	$4,0 \times 10^{-9}$	$2,7 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$
NW	$1,1 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-9}$	$3,0 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-10}$
N	$1,3 \times 10^{-8}$	$6,3 \times 10^{-9}$	$3,2 \times 10^{-9}$	$2,1 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-9}$	$9,0 \times 10^{-10}$
NE	$2,0 \times 10^{-8}$	$9,8 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$
E	$1,7 \times 10^{-8}$	$8,3 \times 10^{-9}$	$4,1 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-9}$	$2,1 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-9}$
SE	$1,3 \times 10^{-8}$	$6,7 \times 10^{-9}$	$3,4 \times 10^{-9}$	$2,2 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$9,6 \times 10^{-10}$

TABELA 8
DOSE EQUIVALENTE EFETIVA EM VIRTUDE DA IRRADIAÇÃO EXTERNA
DEVIDO À DEPOSIÇÃO DE ^{131}I NO SOLO PARA DIFERENTES SETO-
RES E DISTÂNCIAS DO PONTO DE LIBERAÇÃO

SETOR DE RI- FUSÃO ATÔMICA VERICA	DOSE EQUIVALENTE EFETIVA (Sv/ano)							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$4,5 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$9,2 \times 10^{-8}$	$8,2 \times 10^{-8}$
SW	$3,8 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$9,1 \times 10^{-8}$	$7,3 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-8}$
W	$3,5 \times 10^{-8}$	$8,4 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$
NW	$9,2 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-7}$	$9,6 \times 10^{-7}$	$8,8 \times 10^{-7}$	$7,9 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-7}$	$5,7 \times 10^{-7}$
N	$2,7 \times 10^{-8}$	$7,5 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$
NE	$1,6 \times 10^{-8}$	$5,1 \times 10^{-8}$	$7,4 \times 10^{-8}$	$6,6 \times 10^{-8}$	$5,3 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-8}$	$3,3 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$
E	$1,7 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-8}$	$9,9 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$9,8 \times 10^{-8}$	$7,9 \times 10^{-8}$	$7,1 \times 10^{-8}$
SE	$5,8 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-7}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-7}$	$3,5 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-7}$

sendo

$(\frac{x}{Q})_p$ = fator de difusão para cada setor p em $s.m^{-3}$

Q = termo-fonte da instalação ($6,5.10^{10}$ Bq/ano)

D = fator dosimétrico para imersão na nuvem radioativa por unidade de volume de ar. Para a irradiação externa gama no corpo inteiro e para o I-131 seu valor é de $1,5 \times 10^{-14} Sv.s^{-1}$ por $Bq.m^{-3}$.

Na Tabela 9 são mostrados os resultados obtidos a partir da equação 8 para a dose equivalente efetiva, ponderada para frequência média de direção do vento em virtude da imersão na nuvem radioativa.

Os indivíduos do público mais expostos por esta via permanecem em torno de 3000m no setor de difusão atmosférica noroeste (NW) e recebem uma dose equivalente efetiva da ordem de 10^{-9} Sv/ano.

5.2.4. Dose Equivalente na Pele Provocada Pela Irradiação Beta em Virtude de Imersão na Nuvem Radioativa (submersão β).

Os raios beta têm um pequeno alcance no ar e desta maneira a dose equivalente na pele em virtude da imersão em uma nuvem radioativa é diretamente proporcional à concentração da atividade no ar no ponto de interesse e pode ser obtida por meio da fórmula⁽⁸⁾.

$$H_{\beta p} = \dot{Q} \left(\frac{x}{Q} \right) D_{\beta}$$

TABELA 9
DOSE EQUIVALENTE EFETIVA PROVOCADA PELA IRRADIAÇÃO GAMA
EM VIRTUDE DA IMERSÃO EM UMA NUVEM RADIOATIVA CONTENDO
 ^{131}I PARA DIFERENTES SETORES E DISTÂNCIAS DO PONTO DE
LIBERAÇÃO.

SETOR DE DI FUSÃO ATMOS- FÉRICA	DOSE EQUIVALENTE EFETIVA (Sv/ano)							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$2,8 \times 10^{-11}$	$1,7 \times 10^{-10}$	$2,6 \times 10^{-10}$	$2,3 \times 10^{-10}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-10}$
SW	$2,2 \times 10^{-11}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-10}$	$1,8 \times 10^{-10}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-10}$	$9,1 \times 10^{-11}$	$8,2 \times 10^{-11}$
W	$2,7 \times 10^{-12}$	$8,5 \times 10^{-11}$	$2,7 \times 10^{-10}$	$3,2 \times 10^{-10}$	$3,0 \times 10^{-10}$	$2,6 \times 10^{-10}$	$2,2 \times 10^{-10}$	$1,9 \times 10^{-10}$
NW	$1,0 \times 10^{-11}$	$3,2 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$9,6 \times 10^{-10}$	$8,0 \times 10^{-10}$	$7,2 \times 10^{-10}$
N	$2,5 \times 10^{-12}$	$7,9 \times 10^{-11}$	$2,5 \times 10^{-10}$	$3,0 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-10}$	$2,4 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-10}$	$1,8 \times 10^{-10}$
NE	$1,0 \times 10^{-11}$	$6,2 \times 10^{-11}$	$9,2 \times 10^{-11}$	$8,2 \times 10^{-11}$	$6,8 \times 10^{-11}$	$4,9 \times 10^{-11}$	$4,1 \times 10^{-11}$	$3,7 \times 10^{-11}$
E	$1,2 \times 10^{-12}$	$3,9 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$9,9 \times 10^{-11}$	$8,9 \times 10^{-11}$
SE	$5,4 \times 10^{-12}$	$1,7 \times 10^{-10}$	$5,4 \times 10^{-10}$	$6,5 \times 10^{-10}$	$6,1 \times 10^{-10}$	$5,2 \times 10^{-10}$	$4,3 \times 10^{-10}$	$3,9 \times 10^{-10}$

$H_{\beta P}$ = dose absorvida anual em Sv na pele em virtude da imersão na nuvem radioativa, no setor p.

$\dot{Q}$ = termo-fonte da instalação (Bq/ano)

$\frac{x}{Q}$ = fator de difusão no ponto de interesse ($s.m^{-3}$)

D_{β} = fator dosimétrico para irradiação beta na pele para imersão na nuvem radioativa por unidade de volume de ar.

Para I-131 este valor é igual a $9,2 \times 10^{-15} \frac{Sv.m^3}{Bq.s}^{(8)}$. Na Tabela 10 são mostrados os valores da dose equivalente na pele calculada a uma profundidade de 0,07mm. Estes valores foram ponderados para a frequência média de direção do vento. O grupo crítico para esta via está em torno de 3000m do ponto de liberação e recebe uma dose da ordem de 10^{-10} Sv/ano.

Analisando-se as Tabelas 5, 8, 9 e 10 observa-se que a dose recebida devido à irradiação beta é desprezível, uma vez que esta corresponde a 0,08% da maior dose recebida pelas outras três vias, além do que o limite máximo admissível anual para irradiação de corpo inteiro (1 mSv) é 50 vezes menor do que aquele para irradiação da pele (50 mSv), sendo portanto menor ainda a porcentagem relativa de irradiação beta em relação aos limites anuais máximos admissíveis.

6. DOSE EQUIVALENTE EFETIVA TOTAL.

A dose equivalente efetiva total ponderada para frequência média de direção do vento para diferentes setores foi determinada levando-se em conta a distribuição para a dose de cada uma das quatro vias críticas possíveis. Na Tabela 11 são mostrados os resultados obtidos para diferen

TABELA 10

DOSE EQUIVALENTE NA PELE (PROFUNDIDADE DE 0,07 mm) PROVOCADA
PELA IRRADIAÇÃO BETA EM VIRTUDE DA IMERSÃO EM UMA NUVEM RA-
DIOATIVA CONTENDO ^{131}I PARA DIFERENTES SETORES E DISTÂNCIAS
DO PONTO DE LIBERAÇÃO PONDERADA PARA AS FREQUÊNCIAS DE DIRE-
ÇÃO DOS VENTOS

SECTOR DE DI- FUSÃO ATMOS- FÉRICA	DOSE EQUIVALENTE EFETIVA (Sv/ano)							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$1,7 \times 10^{-11}$	$1,0 \times 10^{-10}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-10}$	$8,6 \times 10^{-11}$	$6,9 \times 10^{-11}$	$6,2 \times 10^{-11}$
SW	$1,4 \times 10^{-11}$	$8,2 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-10}$	$9,0 \times 10^{-11}$	$6,8 \times 10^{-11}$	$5,4 \times 10^{-11}$	$4,9 \times 10^{-11}$
W	$1,6 \times 10^{-12}$	$5,1 \times 10^{-11}$	$1,6 \times 10^{-10}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$1,8 \times 10^{-10}$	$1,6 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-10}$
NW	$6,0 \times 10^{-12}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$6,0 \times 10^{-10}$	$7,2 \times 10^{-10}$	$6,7 \times 10^{-10}$	$6,0 \times 10^{-10}$	$4,8 \times 10^{-10}$	$4,3 \times 10^{-10}$
N	$1,5 \times 10^{-12}$	$4,8 \times 10^{-11}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$1,8 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^{-10}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-10}$
NE	$6,1 \times 10^{-12}$	$3,7 \times 10^{-11}$	$5,5 \times 10^{-11}$	$4,9 \times 10^{-11}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$2,5 \times 10^{-11}$	$2,2 \times 10^{-11}$
E	$1,4 \times 10^{-13}$	$2,4 \times 10^{-11}$	$7,4 \times 10^{-11}$	$8,9 \times 10^{-11}$	$8,3 \times 10^{-11}$	$7,4 \times 10^{-11}$	$5,9 \times 10^{-11}$	$5,3 \times 10^{-11}$
SE	$3,2 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{-10}$	$3,2 \times 10^{-10}$	$3,9 \times 10^{-10}$	$3,6 \times 10^{-10}$	$3,2 \times 10^{-10}$	$2,6 \times 10^{-10}$	$2,3 \times 10^{-10}$

TABELA 11

DOSE EQUIVALENTE EFETIVA TOTAL PONDERADA PARA A FREQUÊNCIA DE
DIREÇÃO DO VENTO NOS DIFERENTES SETORES EM VIRTUDE DA LIBE
RAÇÃO DE ^{131}I NA FORMA GASOSA PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS DO
PONTO DE LIBERAÇÃO

SETOR DE DI- FUSÃO ATMOS- FÉRICA	DOSE EQUIVALENTE EFETIVA TOTAL (Sv/ano)							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$4,9 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$9,6 \times 10^{-8}$
SW	$4,1 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$8,6 \times 10^{-8}$	$7,6 \times 10^{-8}$
W	$3,5 \times 10^{-8}$	$9,5 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$
NW	$9,2 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-7}$	$9,2 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$9,3 \times 10^{-7}$	$7,6 \times 10^{-7}$	$6,7 \times 10^{-7}$
N	$2,7 \times 10^{-8}$	$8,5 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$
NE	$1,7 \times 10^{-8}$	$5,9 \times 10^{-8}$	$8,6 \times 10^{-8}$	$7,6 \times 10^{-8}$	$6,2 \times 10^{-8}$	$4,8 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-8}$
E	$1,7 \times 10^{-8}$	$8,4 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$9,4 \times 10^{-8}$	$8,3 \times 10^{-8}$
SE	$5,8 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-7}$	$6,1 \times 10^{-7}$	$5,6 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-7}$	$4,1 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^{-7}$

tes distâncias do ponto de liberação. O maior valor da dose equivalente efetiva total é de $1,1 \times 10^{-6}$ Sv/ano, no setor de difusão atmosférica (NW), para indivíduos localizados em torno de 3000 m do ponto de liberação. No entanto este grupo receberá um valor 1000 vezes menor do que o limite anual máximo admissível de dose.

7. LIMITE DERIVADO.

Para garantir que os limites de dose nos indivíduos do público não sejam excedidos em virtude da liberação de efluentes radioativos gasosos, calcula-se o limite de descarga de efluentes derivado para a instalação que é definido como : a atividade anual de material radioativo de composição especificada liberada num dado sítio sob influência da Instalação a qual resultará numa dose equivalente efetiva no grupo crítico igual ao limite de dose recomendado pelas Diretrizes Básicas de Radioproteção da CNEN⁽¹⁾, que corresponde neste caso a 1mSv/ano.

Considerando-se que o grupo crítico recebe uma dose equivalente efetiva da ordem de 10^{-6} Sv/ano em virtude da liberação de $6,5 \times 10^{10}$ Bq/ano de I-131, pode-se calcular qual seria a quantidade total que poderia ser liberada a fim de que a dose no grupo crítico não ultrapassasse 1mSv/ano. Esta quantidade é $1,3 \times 10^{13}$ Bq/ano o que equivale a 1000 vezes mais do que é liberado nas condições atuais de trabalho.

8. DOSE EQUIVALENTE EFETIVA TOTAL PARA LIBERAÇÃO NÃO PLANEJADA.

Para determinação da dose equivalente efetiva no caso de uma liberação não planejada partiu-se de uma hipótese absurda em que toda a capacidade de produção da instalação (46,5 G Bq) fosse liberada na forma de efluente gasoso, de uma só vez, para o meio ambiente.

O resultado da dose neste caso para as vias críticas discutidas neste trabalho são mostrados nas Tabelas 12, 13, 14 e 15 respectivamente para inalação, depósito no solo, e irradiação externa de β e γ em virtude da imersão na nuvem. Na Tabela 16 são mostrados os resultados da dose equivalente efetiva total.

Pode-se observar que o grupo de indivíduos que receberia a maior dose no caso de uma liberação não planejada é o mesmo que para situação de operação normal uma vez que nenhuma condição no cálculo foi mudada. No entanto este grupo, dependendo das condições meteorológicas no momento do acidente, poderia ser deslocado para outro setor. Este fato não é importante neste trabalho, uma vez que mesmo no caso desta liberação não planejada superestimada, o grupo crítico não receberia uma dose superior a 1/10 do limite máximo admissível estabelecido pelas normas de proteção radiológica⁽¹⁾.

CONCLUSÃO

O conhecimento dos dados referentes à caracterização da região permitiu identificar as possíveis vias de exposição do homem à radiação em virtude da liberação de iodo gasoso pela Instalação de Produção de Radioisótopos do IPEN-CNEN/SP. As vias consideradas foram :

- a) irradiação externa β e γ em virtude da imersão na nuvem radioativa,
- b) irradiação externa γ em virtude da deposição de ^{131}I no solo e
- c) irradiação interna em virtude da inalação de ^{131}I .

Foi verificado que o grupo crítico é constituído por aquelas pessoas que vivem a uma distância de 3000m da ing

TABELA 12

DOSE EQUIVALENTE COMPROMETIDA EFETIVA EM VIRTUDE DA INALAÇÃO DE ^{131}I NO CASO DE UMA LIBERAÇÃO NÃO PLANEJADA PARA DIFERENTES SETORES E DISTÂNCIAS DO PONTO DE LIBERAÇÃO PONDERADA PARA A FREQUÊNCIA DE DIREÇÃO DOS VENTOS

SETOR DE DIFUSÃO ATMOSFÉRICA	DOSE EQUIVALENTE EFETIVA (Sv/Ano)							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$2,8 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-8}$
SW	$2,2 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$9,0 \times 10^{-9}$	$8,0 \times 10^{-9}$
W	$2,6 \times 10^{-10}$	$8,0 \times 10^{-9}$	$2,6 \times 10^{-8}$	$3,1 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$	$2,6 \times 10^{-8}$	$2,1 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-8}$
NW	$1,0 \times 10^{-9}$	$3,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-8}$
N	$2,4 \times 10^{-10}$	$8,0 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-8}$
NE	$1,0 \times 10^{-9}$	$6,0 \times 10^{-9}$	$9,0 \times 10^{-9}$	$8,0 \times 10^{-9}$	$7,0 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-9}$	$3,9 \times 10^{-9}$	$3,6 \times 10^{-9}$
E	$1,2 \times 10^{-10}$	$3,7 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$9,0 \times 10^{-9}$
SE	$5,0 \times 10^{-10}$	$1,6 \times 10^{-8}$	$5,0 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-8}$	$5,0 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-8}$

TABELA 13

DOSE EQUIVALENTE EFETIVA EM VIRTUDE DA IRRADIAÇÃO EXTERNA PROVOCADA PELA DEPOSIÇÃO DE ^{131}I NO SOLO DEVIDO A UMA LIBERAÇÃO NÃO PLANEJADA EM FUNÇÃO DE DIFERENTES SETORES E DISTÂNCIAS DO PONTO DE LIBERAÇÃO PONDERADA PARA A FREQUÊNCIA DE DIREÇÃO DOS VENTOS

SETOR DE DIREÇÃO DEPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA	DOSE EQUIVALENTE EFETIVA (Sv/Ano)							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-8}$	$5,0 \times 10^{-8}$
SW	$2,8 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$8,5 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-8}$	$5,0 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-8}$
W	$2,6 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$9,5 \times 10^{-8}$
WW	$6,5 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-7}$	$5,3 \times 10^{-7}$	$4,6 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^{-7}$
N	$1,7 \times 10^{-8}$	$5,5 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$9,0 \times 10^{-8}$
NE	$1,2 \times 10^{-8}$	$3,7 \times 10^{-8}$	$5,5 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-8}$
E	$1,3 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$8,5 \times 10^{-8}$	$7,5 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-8}$	$5,5 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-8}$
SE	$5,5 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$3,7 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-7}$

TABELA 14

DOSE EQUIVALENTE EFETIVA PROVOCADA PELA IRRADIAÇÃO GAMA EM VIRTUDE DA IMERSÃO EM UMA NUVEM RADIOATIVA CONTENDO ^{131}I NO CASO DE UMA LIBERAÇÃO NÃO PLANEJADA PARA DIFERENTES SETORES E DISTÂNCIAS DO PONTO DE LIBERAÇÃO PONDERADA PARA A FREQUÊNCIA DE DIREÇÃO DOS VENTOS

SETOR DE DIFUSÃO ATMOSFÉRICA	DOSE EQUIVALENTE EFETIVA (Sv/ano)							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$2,1 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^{-10}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-10}$	$8,0 \times 10^{-11}$	$7,0 \times 10^{-11}$
SW	$1,6 \times 10^{-11}$	$9,5 \times 10^{-11}$	$1,5 \times 10^{-11}$	$1,3 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-10}$	$8,0 \times 10^{-11}$	$6,5 \times 10^{-11}$	$5,5 \times 10^{-11}$
W	$1,9 \times 10^{-12}$	$6,0 \times 10^{-11}$	$1,9 \times 10^{-11}$	$2,3 \times 10^{-10}$	$2,2 \times 10^{-10}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$1,4 \times 10^{-10}$
NW	$7,0 \times 10^{-12}$	$2,2 \times 10^{-10}$	$7,0 \times 10^{-10}$	$8,5 \times 10^{-10}$	$8,0 \times 10^{-10}$	$7,0 \times 10^{-10}$	$5,5 \times 10^{-10}$	$5,0 \times 10^{-10}$
N	$6,5 \times 10^{-13}$	$2,0 \times 10^{-11}$	$6,5 \times 10^{-11}$	$7,5 \times 10^{-11}$	$7,0 \times 10^{-11}$	$1,8 \times 10^{-10}$	$5,0 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-10}$
NE	$7,5 \times 10^{-12}$	$4,3 \times 10^{-11}$	$6,5 \times 10^{-11}$	$6,0 \times 10^{-11}$	$4,8 \times 10^{-11}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$2,9 \times 10^{-11}$	$2,6 \times 10^{-11}$
E	$8,5 \times 10^{-13}$	$2,7 \times 10^{-11}$	$8,5 \times 10^{-11}$	$1,1 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-10}$	$8,5 \times 10^{-11}$	$7,0 \times 10^{-11}$	$6,0 \times 10^{-11}$
SE	$3,8 \times 10^{-12}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$3,8 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-10}$	$4,4 \times 10^{-10}$	$3,8 \times 10^{-10}$	$3,1 \times 10^{-10}$	$2,7 \times 10^{-10}$

TABELA 15

DOSE EQUIVALENTE NA PELE (PROFUNDIDADE DE 0,07 mm) PROVOCADA PELA IRRADIAÇÃO BETA EM VIRTUDE DA IMERSÃO EM UMA NUVEM RADIOATIVA CONTENDO ^{131}I NO CASO DE UMA LIBERAÇÃO NÃO PLANEJADA PARA DIFERENTES SETORES E DISTÂNCIAS DO PONTO DE LIBERAÇÃO PONDERADA PARA A FREQUÊNCIA DE DIREÇÃO DOS VENTOS.

SETOR DE DIFUSÃO ATMOSFÉRICA	DOSE EQUIVALENTE (Sv/ano)							
	500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
S	$2,2 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-10}$	$7,5 \times 10^{-10}$
SW	$2,2 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-10}$	$7,5 \times 10^{-10}$
W	$1,1 \times 10^{-11}$	$3,4 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-10}$	$7,5 \times 10^{-10}$
NW	$1,1 \times 10^{-11}$	$3,4 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-10}$	$7,5 \times 10^{-10}$
N	$1,1 \times 10^{-11}$	$3,4 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-10}$	$7,5 \times 10^{-10}$
NE	$2,2 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-10}$	$7,5 \times 10^{-10}$
E	$1,1 \times 10^{-11}$	$3,4 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-10}$	$7,5 \times 10^{-10}$
SE	$1,1 \times 10^{-11}$	$3,4 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-10}$	$7,5 \times 10^{-10}$

TABELA 16

DOSE EQUIVALENTE EFETIVA TOTAL PARA LIBERAÇÃO NÃO PLANEJADA DE ^{131}I PARA DIFERENTES SETORES E DISTÂNCIAS DO PONTO DE LIBERAÇÃO PONDERADA PARA A FREQUÊNCIA DE DIREÇÃO DOS VENTOS.

SETOR	FREQUÊNCIA DA DIREÇÃO DOS VENTOS (%)	DOSE EQUIVALENTE EFETIVA TOTAL (Sv/ano)							
		500 m	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m	6000 m	7000 m
N	5,75	$3,5 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$9,0 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-8}$
NE	4,55	$3,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$7,5 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-8}$	$4,9 \times 10^{-8}$
E	10,75	$2,6 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$
SE	40,05	$6,5 \times 10^{-8}$	$2,6 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$	$6,5 \times 10^{-7}$	$5,5 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-7}$
S	9,95	$1,7 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$
SW	2,05	$1,3 \times 10^{-8}$	$4,3 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-8}$	$5,5 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$
W	4,95	$1,3 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$9,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$9,0 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-8}$	$5,5 \times 10^{-8}$
NW	21,65	$5,5 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$3,7 \times 10^{-7}$	$4,4 \times 10^{-7}$	$3,9 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^{-7}$	$2,9 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-7}$

talação no setor de difusão atmosférica noroeste (NW).

O resultado obtido no cálculo da dose equivalente efetiva para os indivíduos mais expostos é da ordem de 10^{-6} Sv/ano, tanto para condições normais de operação como para o caso de uma liberação não planejada. Este valor é da ordem de 10^9 vezes menor que o limite de dose anual, para indivíduos do público (1mSv/ano) estipulado pelas Normas de Proteção Radiológica. Foi verificado que 85,7% da dose é devido à irradiação externa por deposição no solo e 14,3% devido à irradiação interna por inalação, sendo a contribuição das demais vias desprezível.

Os resultados encontrados demonstram que as condições de operação da instalação de produção de radioisótopos do IPEN-CNEN/SP, o tratamento e o sistema de controle de efluentes estão sendo feitos de forma a garantir que os indivíduos do público não recebam uma dose acima dos limites estabelecidos pelas Normas de Proteção Radiológica.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório de Radiometria da Divisão de Monitoração Ambiental do IPEN-CNEN/SP pelas medidas realizadas na pessoa de M.Sc. Luzia Venturini e o técnico Marcelo Bessa Nisti, assim como o técnico Marcelo Francis Maduar pela ajuda na elaboração do termo-fonte.

Nossos agradecimentos são estendidos aos colegas supervisores de proteção radiológica Enocles Mello de Oliveira e Eduardo Yoshio Toyoda pela colaboração para a implantação rotineira da monitoração de efluentes gasosos e aerossóis na Instalação de Produção de Radioisótopos, assim como pelos dados fornecidos quanto à operação desta mesma instalação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Diretrizes básicas de radioproteção. Rio de Janeiro, 1988. (CNEN-NE-3.01-88).
- (2) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Gerência de rejeitos radioativos em instalações radioativas. Rio de Janeiro, 1985. (CNEN-NE-6.05).
- (3) DOURY, A.; GERARO, R.; PICOL, M., Abagues d'evaluation des transferts atmospheriques d'effluents gazeux. France, Commissariat a L'Energie Atomique, 1980. (Rapport DSN-84).
- (4) GONÇALVES, O.D. Comunicação pessoal.
- (5) INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Unidade crítica: IPEN/MB-01. Relatório final de análise de segurança. São Paulo, s.d. (Documento Interno).
- (6) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Atmospheric dispersion in nuclear power plant siting. Vienna, 1982. (IAEA-SS-50-SG-S3).
- (7) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Basic safety standards for radiation protection. Vienna, 1982. (IAEA-SS-9).
- (8) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases. Vienna, 1982. (IAEA-SS-57).

- (9) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION.
Implications of Commission recommendations that
doses be kept as low as readily achievable.
Oxford, Pergamon, 1973. (ICRP-22).
- (10) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Monitoring of
airborne and liquid radioactive releases from
nuclear facilities to the environmental. Vienna,
1978. (IAEA-SS-46).
- (11) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION.
Recommendation of the International Commission on
Radiological Protection. Oxford, Pergamon, 1977.
(ICRP-26).
- (12) TILL, J.E & MEYER, H.E. Radiological assessment :
a text book on environmental dose analysis.
Washington, D.C., Nuclear Regulatory Commission,
1983.