

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
SECRETARIA DA CULTURA, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROTEÇÃO RADIOLÓGICA EM MINAS SUBTERRÂNEAS DE URÂNIO

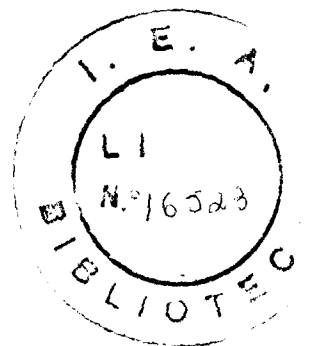
Celia Marina Napolitano

Dissertação apresentada ao Instituto de
Energia Atômica como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
"Mestre - Área Tecnologia Nuclear".

Orientador: Gian-Maria A. A. Sordi

**São Paulo
1978**

À meus pais e irmãos



AGRADECIMENTOS

Ao Doutor Rômulo Ribeiro Pieroni, pela oportunidade.

Ao Doutor Gian-Maria A. A. Sordi pela acolhida dada por ocasião do meu ingresso no Instituto de Energia Atômica, bem como pela orientação, apoio e confiança.

Ao Eng^o Elias Palacios pela sua inestimável dedicação no acompanhamento e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng^o Antonio Carlos Castagnet pelo apoio no desenvolvimento da parte experimental.

Ao pessoal do Centro de Aplicações de Radiosótopos e Radiações na Engenharia e na Indústria e do Centro de Proteção Radiológica e Dosimetria pela colaboração e amizade.

RESUMO

Neste trabalho, fez-se um estudo dos riscos radios sanitários a que estão submetidos os trabalhadores de uma jazida de urânio e dos métodos de controle mais utilizados para a avaliação da dose recebida pelos mesmos.

Para a detecção de radônio, a técnica desenvolvida foi a de câmara de cintilação.

Foram desenvolvidos dois métodos para a extração do radônio de água: por emanação e por difusão.

Foi também estudado um programa de proteção radiológica levando em consideração os princípios básicos estabelecidos pela ICRP. O programa inclui métodos de cálculos para determinar as necessidades de ventilação numa jazida, um estudo de otimização de proteção radiológica segundo uma análise do tipo custo-benefício, um plano de monitoração e um plano de gestão de resíduos radioativos.

ABSTRACT

The radiosanitary hazards that workers of an uranium ore can suffer were studied. The more used control methods for the evaluation of doses received by the workers was studied too.

It was developed a technic using the scintillation chamber method for the detection of radon.

Emanation and diffusion methods were used for extraction of radon from water.

A program of radiological protection based on ICRP recommendation was analised for uranium mines. This program includes: ventilation needs calculation methods, a study of radiological protection optimization based on "cost-benefit" analysis, a monitoring plan and a study about radioactive waste management.

SUMÁRIO

	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA E COMO ALCANÇÁ-LO:.....	4
1.2. CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS DE UMA JAZIDA:.....	6
1.3. RISCOS DO TRABALHADOR DE JAZIDAS DE URÂNIO.....	7
1.3.1. RADIAÇÃO EXTERNA.....	11
1.3.2. CONTAMINAÇÃO INTERNA.....	12
1.4. ENERGIA ALFA POTENCIAL.....	14
1.5. NÍVEIS PERMISSÍVEIS PARA TRABALHADORES.....	16
1.6. OBJETIVO.....	17
2. REVISÃO DE TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE RADÔNIO NO AR E NA ÁGUA.....	18
2.1. TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE Rn NO AR.....	18
2.1.1. CÂMARA DE CINTILAÇÃO.....	18
2.1.2. MÉTODO DOS DOIS FILTROS.....	19
2.1.3. MÉTODO DO CARVÃO ATIVO.....	20
2.1.4. MONITORES CONTÍNUOS.....	21
2.2. TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE Rn NA ÁGUA.....	21
2.2.1. EMANAÇÃO DE Rn DA ÁGUA.....	21
2.2.2. CINTILADOR LÍQUIDO.....	23
3. PARTE EXPERIMENTAL.....	24
3.1. DETECÇÃO DE Rn NO AR.....	24
3.1.1. CÂMARA DE CINTILAÇÃO.....	25
3.1.2. AMOSTRAGEM DE AR.....	26
3.1.3. SISTEMA DE DETECÇÃO E CONTAGEM.....	27

3.1.4.	EFICIÊNCIA RELATIVA DAS CÂMARAS.....	28
3.1.5.	EFICIÊNCIA DO SISTEMA CÂMARA-DETECTOR..	30
3.1.6.	DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE Rn NO AR.....	32
3.2.	DETECÇÃO DE Rn NA ÁGUA.....	32
3.2.1.	MÉTODO DE EMANAÇÃO.....	33
3.2.1.1.	RENDIMENTO DE ARRASTE DO Rn..	33
3.2.1.2.	EFICIÊNCIA DA RETENÇÃO DO Rn PELO CARVÃO ATIVO.....	35
3.2.1.3.	EFICIÊNCIA DO SISTEMA.....	36
3.2.1.4.	DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE Rn EM ÁGUA.....	37
3.2.2.	MÉTODO DE DIFUSÃO GASOSA.....	38
3.2.2.1.	DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE EQUI LÍBRIO.....	39
3.2.2.2.	CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE RA DÔNIO PELO MÉTODO DE DIFUSÃO.	40
3.3.	RESULTADOS.....	42
3.3.1.	RESULTADOS NA DETECÇÃO DE Rn NO AR.....	42
3.3.2.	RESULTADOS NA DETECÇÃO NO RADÔNIO NA ÁGUA PELO MÉTODO DE EMANAÇÃO.....	44
3.3.3.	RESULTADOS NA DETECÇÃO DE RADÔNIO NA Á- GUA PELO MÉTODO DE DIFUSÃO.....	47
4.	PROGRAMA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	49
4.1.	TÉCNICAS DE CONTROLE DE CONCENTRAÇÃO DE Rn NUMA JAZIDA.....	49
4.2.	DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE VENTILAÇÃO.....	50
4.2.1.	CASO DE UM LOCAL DE TRABALHO PRÓXIMO À ENTRADA DE AR ATMOSFÉRICO.....	52
4.2.2.	CASO DE UM LOCAL DE TRABALHO DISTANTE DA ENTRADA DE AR ATMOSFÉRICO.....	53
4.3.	CÁLCULO DE VENTILAÇÃO.....	55
4.3.1.	CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS.....	55
4.3.2.	REGIME DE VAZÕES.....	57
4.3.2.1.	JAZIDA COM SISTEMA DE VENTILA ÇÃO PRINCIPAL.....	59

4.3.2.2.	JAZIDA EM PROJETO.....	59
4.3.3.	MÉTODO DE CÁLCULO.....	59
4.4.	LIMITES DERIVADOS.....	60
4.5.	ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO DE VENTILAÇÃO.....	61
4.5.1.	ANÁLISE DIFERENCIAL DE CUSTO-BENEFÍCIO.	62
4.5.2.	CUSTOS DE VENTILAÇÃO.....	64
4.5.3.	RESULTADOS DA ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO....	84
4.6.	PROGRAMA DE MONITORAÇÃO OPERACIONAL.....	66
4.6.1.	CONCEITOS GERAIS.....	66
4.6.2.	NÍVEIS DE INVESTIGAÇÃO.....	70
4.6.3.	MONITORAÇÃO DA RADIAÇÃO EXTERNA.....	70
4.6.4.	MONITORAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO INTERNA....	71
4.6.5.	CONTROLE DA DOSE RECEBIDA PELO TRABALHA DOR:.....	72
4.7.	PROGRAMA DE GESTÃO DE RESÍDUOS RADIOATIVOS....	73
4.7.1.	PRODUÇÃO.....	73
4.7.1.1.	RESÍDUOS LÍQUIDOS.....	73
4.7.1.2.	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	74
4.7.1.3.	RESÍDUOS GASOSOS.....	74
4.7.2.	TRATAMENTO E ELIMINAÇÃO.....	74
4.7.2.1.	RESÍDUOS LÍQUIDOS.....	74
4.7.2.2.	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	75
4.7.2.3.	RESÍDUOS GASOSOS.....	75
5.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	77
5.1.	DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS DE MONITORAÇÃO.....	77
5.1.1.	DETECÇÃO DE RADÔNIO NO AR.....	77
5.1.2.	DETECÇÃO DE RADÔNIO NA ÁGUA.....	78
5.1.2.1.	MÉTODO DE EMANAÇÃO.....	78
5.1.2.2.	MÉTODO DE DIFUSÃO.....	79
5.2.	PROGRAMA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	79
6.	SUGESTÕES.....	82
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

1. INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVO DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA E COMO ALCANÇÁ-LO

O objetivo básico da proteção radiológica consiste em resguardar o homem dos perigos potenciais da radiação ionizante e ao mesmo tempo tornar possível à raça humana desfrutar de todos os benefícios que se podem originar do uso da energia atômica.

Os indivíduos devem ser resguardados da ocorrência de efeitos biológicos agudos e tardios, enquanto que seus descendentes devem ser protegidos dos efeitos hereditários induzidos pela radiação.

Os efeitos biológicos agudos podem ser evitados, mantendo as doses inferiores a seus valores limiares que a maioria das lesões somáticas apresentam; enquanto que para os efeitos tardios ou hereditários deve-se limitar a níveis considerados aceitáveis a probabilidade destes efeitos. Isto é mais difícil de ser conseguido em virtude do fato de que a doses baixas, a frequência dos efeitos se confundem com aquela provocada por outras causas.

É prática normal da proteção radiológica adotar uma hipótese conservadora em relação aos efeitos biológicos produzidos pela radiação. Esta hipótese consiste em considerar que existe uma relação linear sem limiar, entre a dose e a probabilidade de efeitos tardios, tais como a indução de neoplasias e os efeitos deletérios hereditários. Além disso, os efeitos biológicos são muito bem conhecidos para altas doses e taxas de doses, mas pouco conhecido para as doses e ta-

xas de doses menores, que ocorrem em situações normais. Em vista disso a proteção radiológica supõe que os riscos por unidade de dose sejam equivalentes tanto em baixa quanto em alta dose ou taxa de dose.

Uma consequência implícita desta hipótese é o fato de que nenhuma exposição à radiação possa ser considerada totalmente segura⁽¹⁾.

Os princípios básicos⁽⁴⁵⁾ da proteção radiológica, estabelecidos pelo principal organismo internacional de proteção radiológica (International Commission on Radiological Protection-ICRP) e aceitos pela maioria das nações além da Agência Internacional de Energia Atômica (International Atomic Energy Agency-IAEA), são:

1. As doses recebidas pelos indivíduos (tanto ocupacionalmente expostos como do público) não devem exceder os correspondentes limites de doses recomendados pela ICRP ou no nosso caso a CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear).

2. O detrimento total produzido pelas radiações, numa prática ou operação, deve ser justificável em função do benefício que se obtém de tal prática ou operação.

3. Todas as doses de radiação provocadas por exposições justificadas devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente alcançável, levando em conta considerações sociais e econômicas.

Em relação ao primeiro princípio, os valores dos limites de doses recomendados pela ICRP são tais que resultam num risco pequeno comparado com os da vida diária. Para atingir este princípio, é necessário estabelecer um plano de monitoração para o qual as técnicas devem ser estudadas e desenvolvidas.

Os outros dois princípios devem ser respeitados, pois, qualquer dose de radiação por pequena que seja não pode ser considerada totalmente segura.

Na análise da justificativa, além de considerações sócio-econômicas, são necessárias considerações políticas. Por tal razão, é uma tarefa que compete exclusivamente a Autoridade de cada país, no nosso caso a CNEN.

É fundamental portanto, analisar a aceitabilidade dos riscos aceitos pela sociedade, tanto quanto dos benefícios esperados das operações que produzem a exposição⁽¹⁾.

Esta justificativa é endossada por uma análise do tipo custo-benefício⁽²⁸⁾⁽⁴⁵⁾. Neste caso o detrimento resultante do funcionamento de uma instalação deve ser contrabalanceado pelos benefícios que dela se obtém.

O custo, inclui todos os gastos de capital e de operação, mais os custos diretos e indiretos associados aos efeitos da radiação.

O benefício, inclui todos aqueles que direta ou indiretamente atingem a população.

A equação geral de custo-benefício pode ser expressa por:

$$B = V - P - X - Y \quad (1)$$

onde:

B é o benefício líquido

V é o benefício bruto

P é o custo total da produção, excluindo a proteção radiológica

X é o custo da proteção radiológica

Y é o custo do detrimento causado pela radiação.

A autoridade considerará uma prática justificável, só quando o valor de B for positivo.

A justificativa da exposição não é fácil, em

virtude de que, como em muitas outras atividades, o grupo da população que sofre o detrimento nem sempre é o mesmo que se beneficia, portando esta justificativa não tem sentido a menos que os riscos individuais sejam desprezíveis. O cumprimento dos limites de doses assegura a vigência da condição mencionada e portando, neste caso, uma justificativa baseada na análise custo-benefício pode ser considerada aceitável⁽¹⁾.

Para estabelecer a dose tão baixa quanto razoavelmente alcançável, é necessário recorrer a uma análise diferencial do tipo custo-benefício, tal como é estabelecido pela ICRP⁽²⁸⁾⁽⁴⁵⁾. Esta tarefa se conhece como otimização de proteção radiológica.

Para determinar se uma posterior redução da exposição é razoavelmente alcançável, é necessário considerar a vantagem dessa redução, e também o custo para conseguí-la.

Na equação (1), V e P podem ser considerados constantes para uma determinada instalação.

X e Y são variáveis e podem ser expressos em função da dose coletiva (S) na população, como mostra a figura 1.

Entende-se como dose coletiva a somatória dos produtos da dose média recebida por cada grupo da população pelo número de pessoas do grupo. Sua unidade é o rem-homem ou rad-homem ou, nas novas unidades*, Sv-homem ou Gy-homem.

Na figura 1, o custo do detrimento em função da dose coletiva é representado por uma reta em virtude da linearidade entre a dose recebida e os efeitos biológicos produzidos por ela.

*

1 Sievert (Sv) = 100 rem

1 Gray (Gy) = 100 rad

Vê-se ainda, como é evidente que a medida que aumentamos as inversões financeiras em proteção radiológica (X), diminui a dose recebida pelos indivíduos.

A otimização de Proteção Radiológica consiste em fazer o valor de (X + Y) mínimo para que o benefício líquido seja máximo.

O valor mínimo de (X + Y), será obtido quando

$$\left(\frac{d X}{d S}\right)_{S^*} + \left(\frac{d Y}{d S}\right)_{S^*} = 0$$

Deve-se levar em consideração, de que esta condição tem validade somente quando: 1) as exposições individuais forem inferiores aos limites de doses e 2) o benefício B, for positivo.

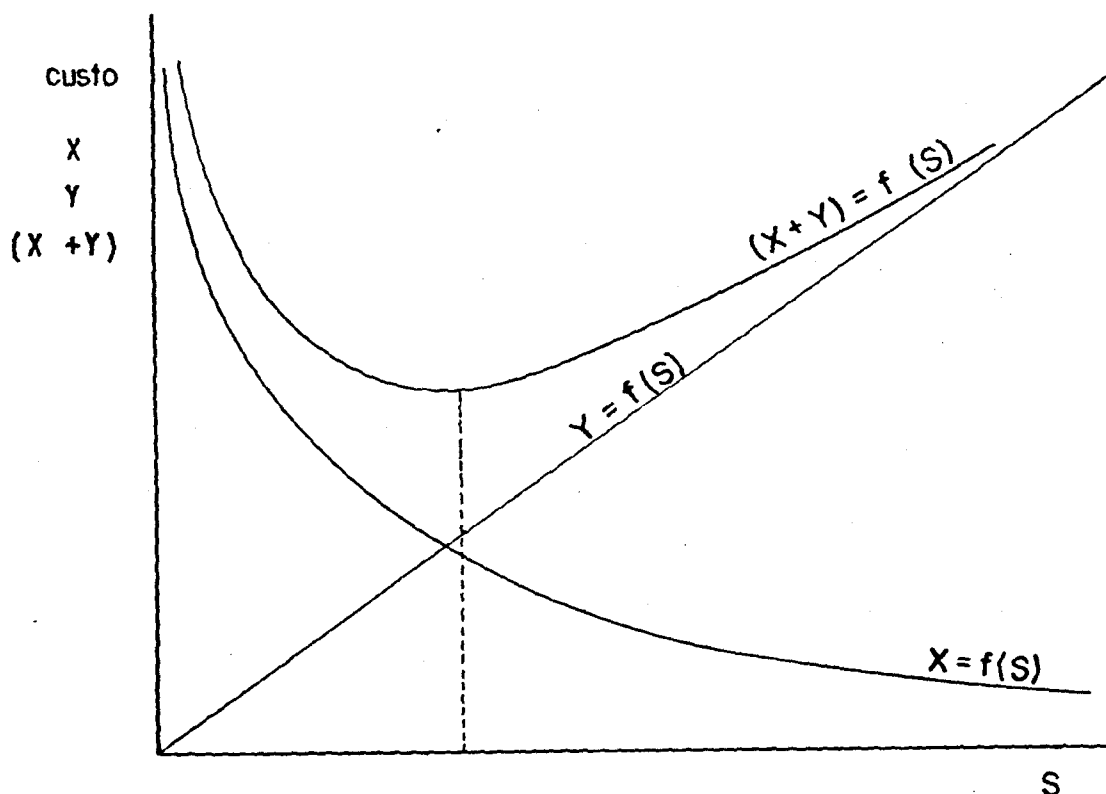


Figura 1 - Dose Coletiva (S) em função do custo.

A ICRP⁽²⁸⁾ fornece os resultados obtidos por diversos autores na avaliação do termo $\frac{dY}{dS}$, resultados estes que variam entre \$10 e \$250 US/rem-homem. A "United State Nuclear Regulatory Commission" fixou o valor de \$1000 US/rem-homem para as análises do tipo custo-benefício em instalações nucleares.

O valor de \$100 US/rem-homem foi sugerido⁽³⁾ como suficientemente representativo para ser usado nos casos onde a Autoridade-Competente do país não estabeleceu nenhum valor.

1.2. CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS DE UMA JAZIDA

Os trabalhadores de uma mina de urânio, encontram-se expostos tanto aos perigos inerentes à exploração mineira, como aos riscos radiossanitários.

Estes riscos são causados pela radiação proveniente dos elementos integrantes das cadeias de decaimento do urânio natural (Figura 2 e 3).

O urânio natural é constituído de 99,27% de ^{238}U , 0,72% de ^{235}U e 0,006% de ^{234}U ; e encontra-se na crosta terrestre como minerais de U^{+4} e U^{+6} . Como U^{+4} encontra-se na forma de óxido simples, óxido múltiplo, silicato, vanadato, fosfato, arseniato, carbonato, sulfato, molibdato e seleniato⁽³⁵⁾.

A exploração do mineral de urânio é feita na maioria dos casos em minas subterrâneas, embora grandes quantidades sejam provenientes de minas a céu aberto.

O radônio, descendente do urânio, e seus produtos filhos de meia vida curta são os elementos que, do ponto de vista radiossanitário, apresentam o maior risco para o trabalhador. É um gás inerte, produzido no interior da rocha,

que por difusão alcança o ar da jazida.

No ar de uma mina de urânio encontram-se quantidades importantes de ^{222}Rn , descendente direto do ^{226}Ra . Também podem aparecer ^{219}Rn e ^{220}Rn da série do actínio e do tório, respectivamente, mas em quantidades negligenciáveis⁽⁴³⁾ (Figura 3 e 4). Em virtude deste fato, chamaremos o ^{222}Rn , simplesmente de radônio (Rn).

A concentração de radônio no interior da jazida depende de vários fatores, sendo de maior relevância a riqueza e composição química e geológica do minério, o gradiente de pressão entre os interstícios da rocha e o ar da galeria, e da renovação do ar da mina.

Os produtos filhos do radônio são partículas sólidas facilmente inaladas e os emissores alfa em particular são os maiores responsáveis pela dose recebida pelos trabalhadores⁽²¹⁾⁽²⁶⁾.

A quantidade de produtos filhos no ar da jazida depende da emanção de radônio e do tempo de permanência do gás na jazida.

O controle da concentração de radônio e filhos no ar da mina é feito mediante um sistema de ventilação, sendo este a principal técnica da proteção radiológica para controlar a dose recebida pelos trabalhadores.

1.3. RISCOS DO TRABALHADOR DE JAZIDAS DE URÂNIO

Como consequência das operações de exploração, aparece no ar de uma jazida uranífera, grandes quantidades de aerossóis possíveis de serem inalados pelo trabalhador. A concentração de partículas no ar varia com o tempo e o local sendo mais significativa nas minas onde são usados explosivos e nos locais mais próximos à explosão⁽¹⁴⁾.

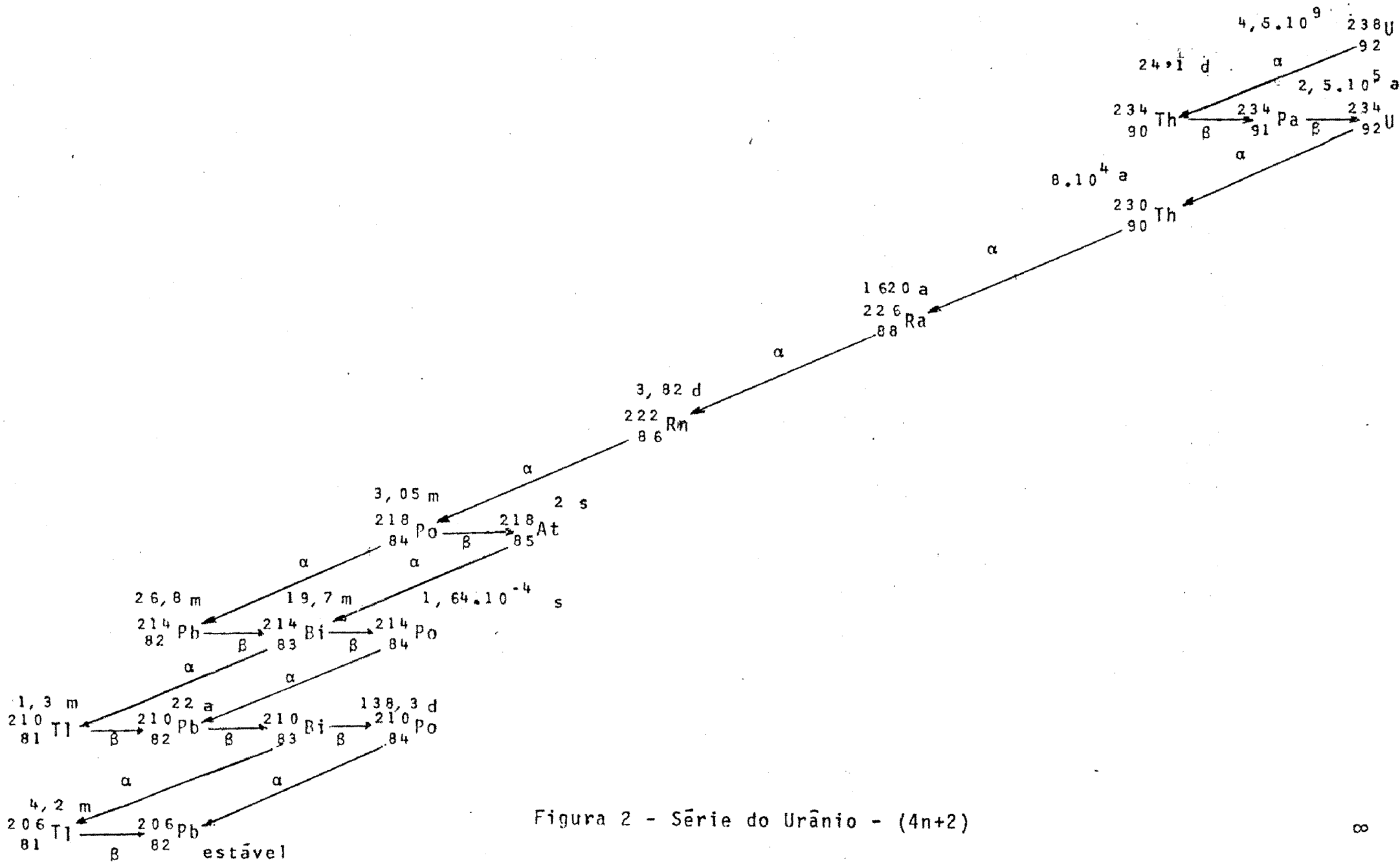


Figura 2 - Série do Urânio - (4n+2)

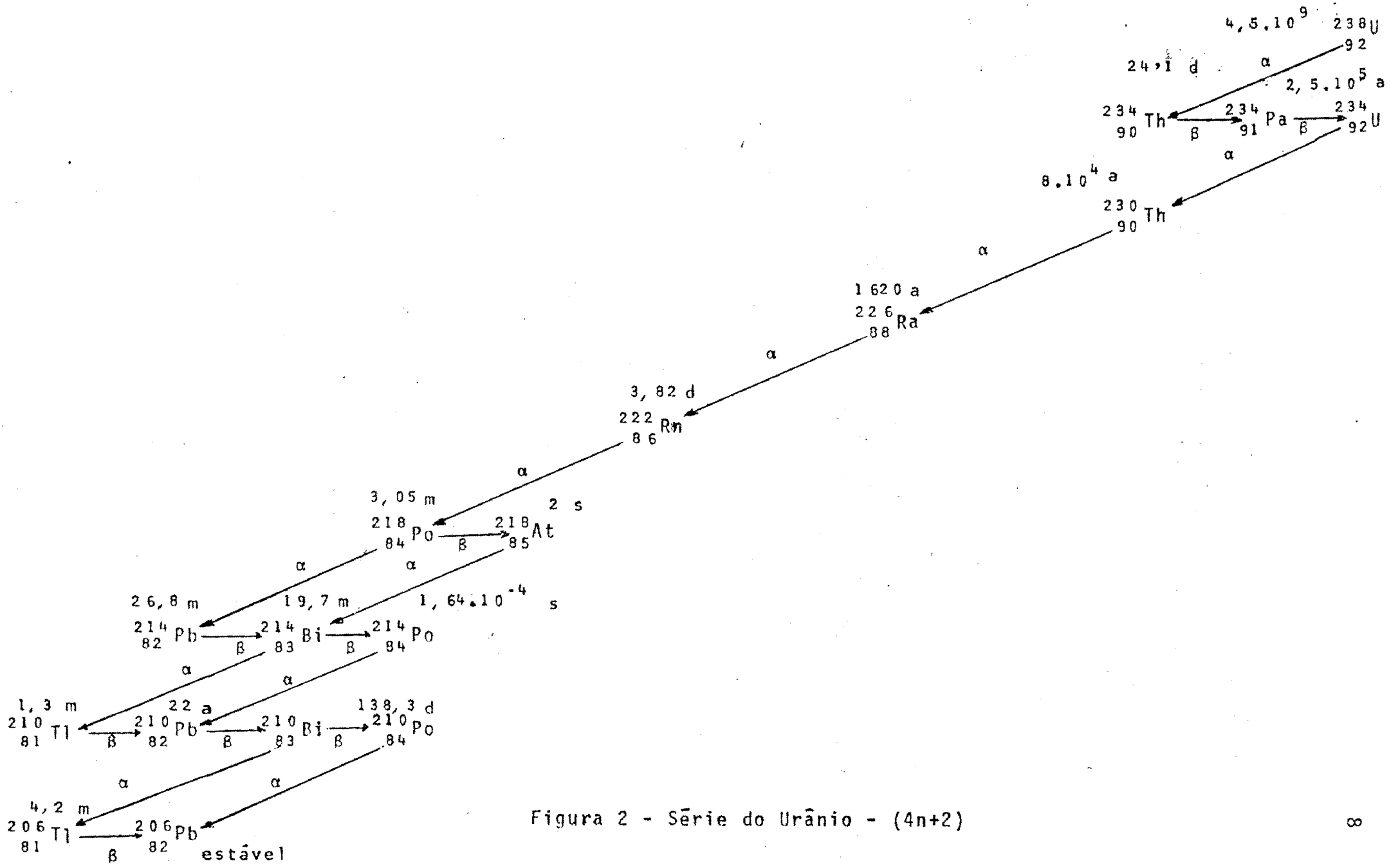


Figura 2 - Série do Urânio - (4n+2)

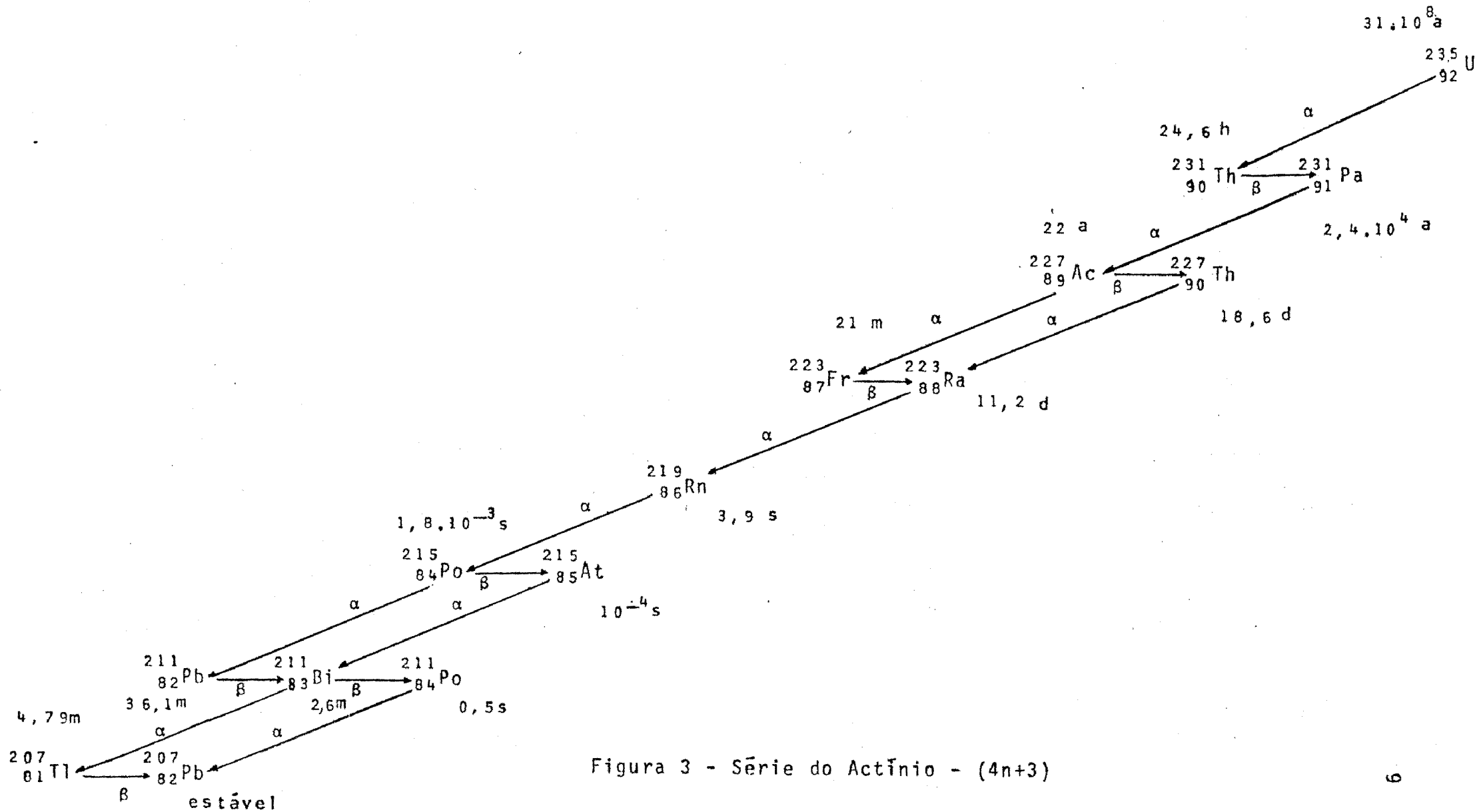


Figura 3 - Série do Actínio - (4n+3)

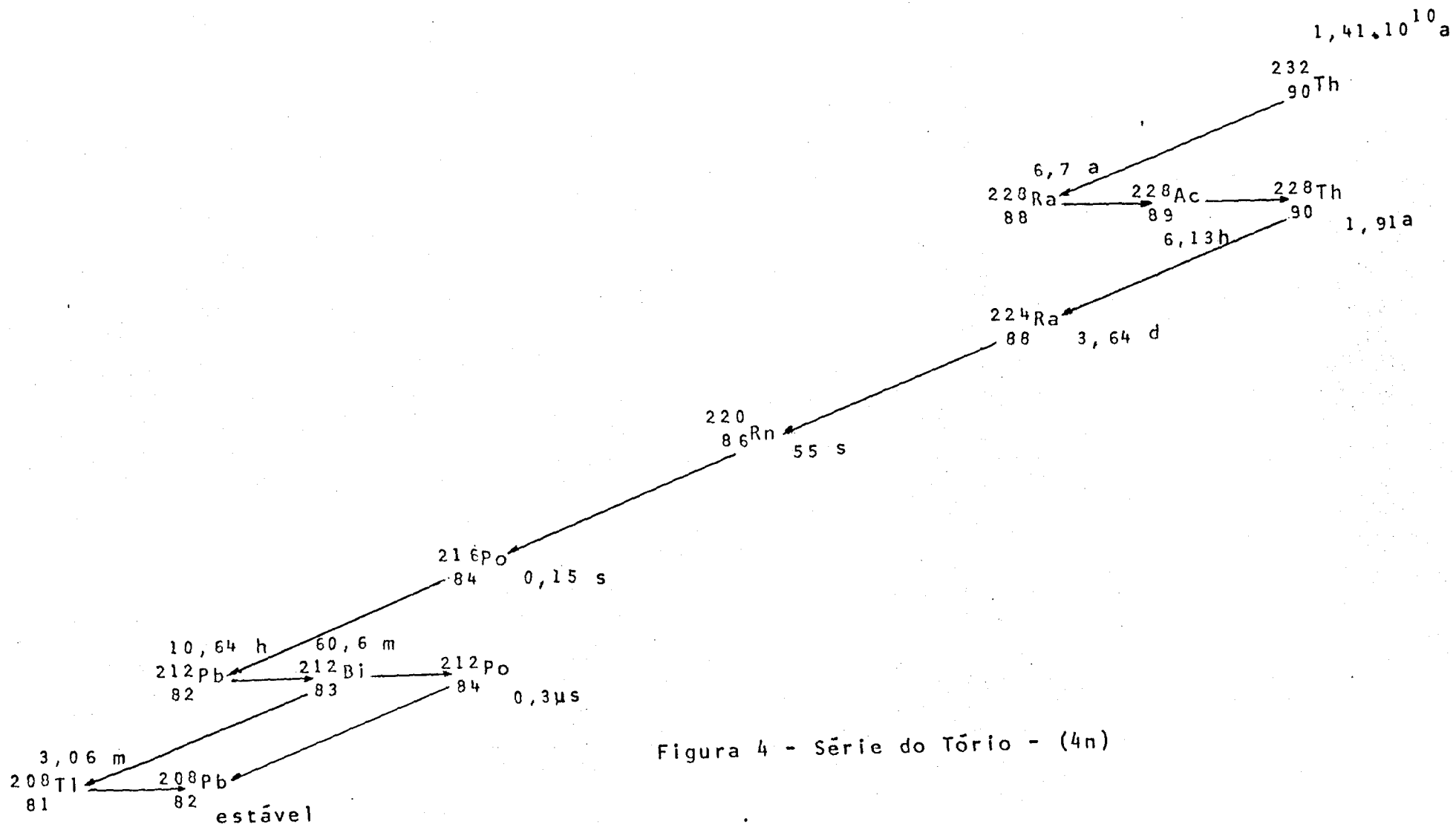


Figura 4 - Série do Tório - (4n)

Estes aerossóis contêm alto teor de sílica e dão origem a uma enfermidade que se conhece como silicose, o que representa o maior risco para qualquer trabalhador mineiro.

Quando se trata de minas de urânio, ao risco antes mencionado deve ser agregado os riscos de origem radiológica. Neste sentido o trabalhador encontra-se exposto a radiação externa e contaminação interna.

Tanto os problemas de silicose como os de origem radiológica, acentuam-se no caso de minas subterrâneas, sendo quase desprezíveis quando se trata de minas a céu aberto.

1.3.1. RADIAÇÃO EXTERNA

O trabalhador está submetido à radiação externa proveniente dos emissores β e γ que se encontram nas paredes e chão da mina.

Os níveis de exposição não superam na maioria dos casos 1 mR/h (minério com teor de U_3O_8 de 0,2%) ; não obstante quando se trata de zonas ricamente mineralizadas (minério com teor de U_3O_8 de 20 a 30%) estes níveis podem alcançar valores significativamente altos, da ordem de 100 mR/h, em pontos muito localizados⁽⁴⁴⁾.

Outra via de radiação externa é provocada pela contaminação da pele e roupa do trabalhador como consequência da lama radioativa, no caso de jazidas submersas em aquíferos, e das partículas de minério em suspensão no ar. Esta forma de contaminação pode traduzir-se em contaminação interna por ingestão quando forem contaminados os alimentos pelas mãos ou por inalação quando ocorrer a ressuspensão dos elementos contaminantes.

A radiação externa não representa um problema

radiológico sério na grande maioria das minas de urânio.

1.3.2. CONTAMINAÇÃO INTERNA

A contaminação interna se origina principalmente pela inalação de Rn e seus filhos de meia vida curta (Figura 6) e também pela inalação de alguns emissores alfa de meia vida longa no ar da jazida: ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra e ^{210}Pb .

O Rn sendo um gás inerte, passa livremente pelos pulmões com um mínimo de incorporação pelo sistema respiratório, o que não ocorre com os seus produtos filhos que são partículas sólidas.

Estas partículas, que são metais pesados, integram-se com as demais partículas do ar atmosférico formando íons ou núcleos de condensação e seguem os respectivos comportamentos.

Os produtos filhos do Rn tem meia vida curta, o que resulta em um aumento rápido da concentração destas partículas no ar da jazida. São de tamanho submicrônico e por tal razão podem alcançar o sistema respiratório.

A maior dose de radiação é recebida pelo sistema respiratório como consequência dos emissores alfa de meia vida curta. A dose causada pela inalação dos filhos de radônio é 20 vezes maior que a produzida pelo Rn por si só nos pulmões⁽²⁷⁾. Essa dose depende da concentração dos produtos filhos no ar inalado, da distribuição do tamanho das partículas onde os produtos filhos são ligados, e também, dos parâmetros fisiológicos do trabalhador.

Os átomos filhos de Rn não combinados aos aerossóis, depositam-se preferencialmente na nasofaringe e traquéia-brônquios (Figura 7), onde se observa a maior incidência de câncer na maioria dos mineiros; enquanto que os liga-

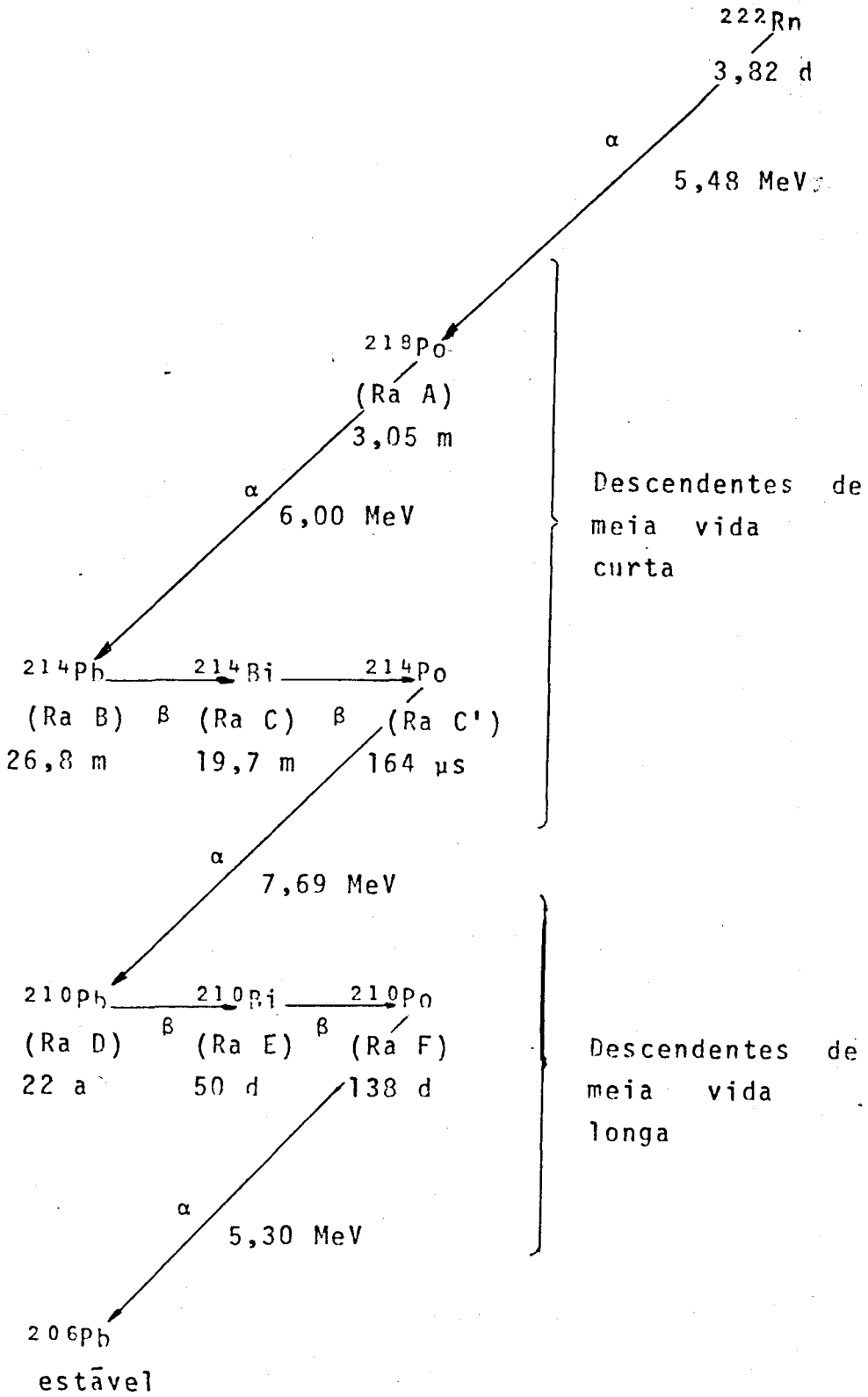


Figura 6 - Esquema de desintegração do ^{222}Rn

dos aos aerossóis, depositam-se nos pulmões, com exceção das partículas maiores que $30\ \mu\text{m}$ que raramente tem acesso ao sistema respiratório^{(26) (27)}.

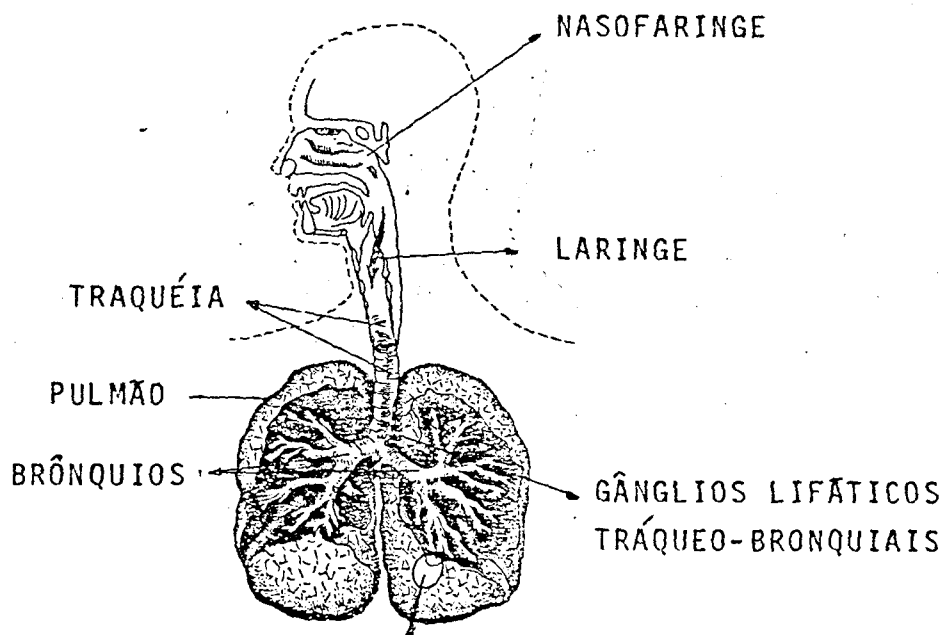


Figura 7 - Diagrama Esquemático do Sistema Respiratório

1.4. ENERGIA ALFA POTENCIAL

O ^{222}Rn entra em equilíbrio radioativo secular com seus filhos de meia vida curta: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po , após 3 horas (Figura 8).

A ventilação natural ou forçada faz com que o tempo de permanência dos átomos de Rn no ar da jazida seja bem menor que o necessário para alcançar o estado de equilíbrio.

Considerando que os filhos de Rn emissores al-

fa, são os principais contribuintes da dose para o trabalhador mineiro e que nunca existe equilíbrio radioativo no ar do interior de uma mina, os limites operacionais têm sido sempre referidos à energia alfa potencial, isto é, a energia total liberada por uma dada mistura de Rn e seus filhos em seu decaimento a ^{210}Pb .

Aos efeitos de poder avaliar a energia alfa potencial do ar inalado pelo trabalhador, foi necessário definir o que se conhece como concentração de radônio equivalente.

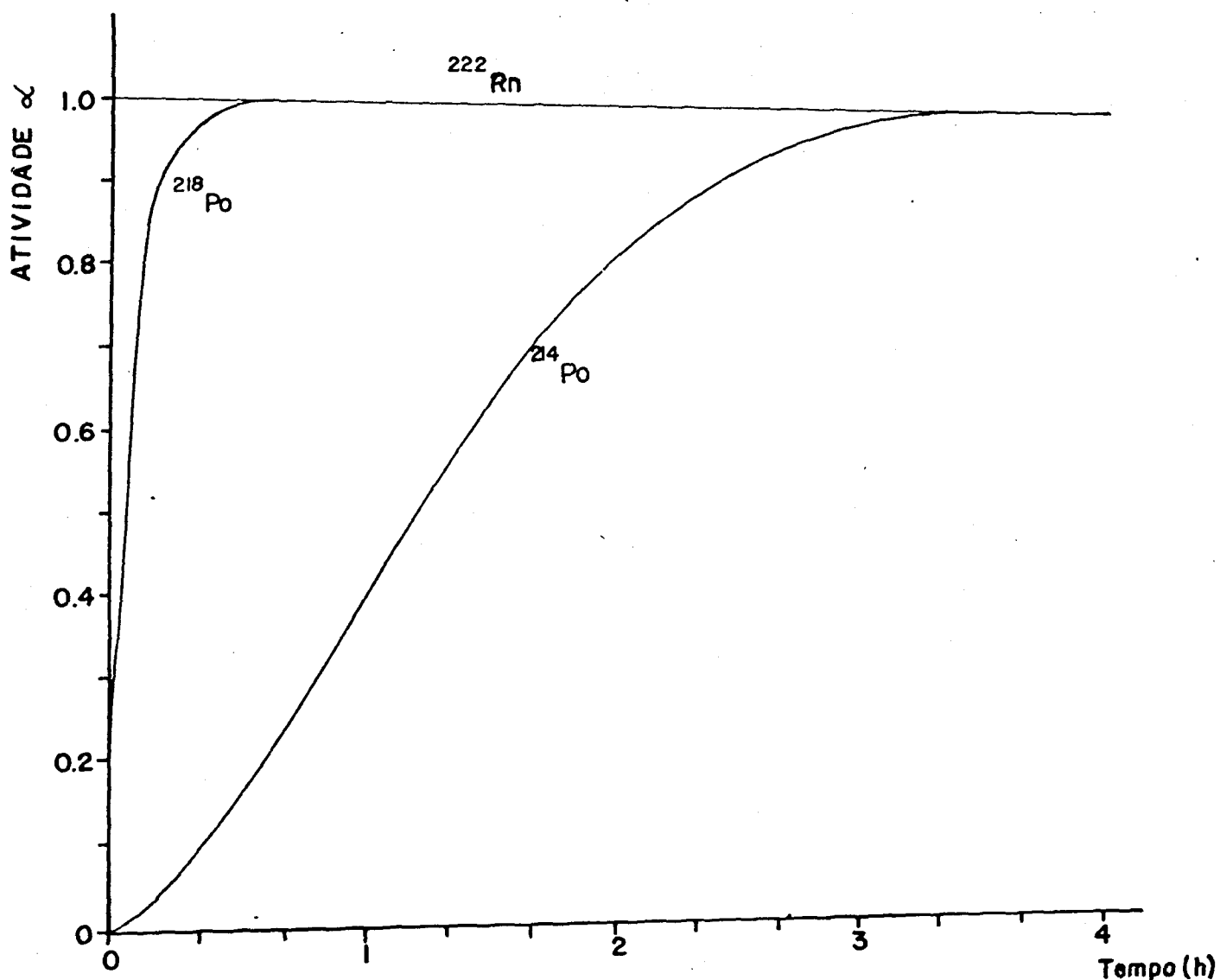


Figura 8- Gráfico de equilíbrio radioativo secular entre Rn e produtos filhos.

Denomina-se concentração de Rn equivalente (C^e), de uma amostra de concentração (C) de radônio, aquela que em equilíbrio com seus filhos, tem mesma energia alfa potencial que a amostra.

A energia alfa potencial de uma amostra de 100 pCi/l de Rn em equilíbrio com seus filhos de meia vida curta é de $1,3 \cdot 10^5$ MeV, o que se definiu como um nível de trabalho (work level - WL) ⁽²⁾⁽¹⁴⁾⁽²⁷⁾⁽⁴⁴⁾.

1.5. NÍVEIS PERMISSÍVEIS PARA TRABALHADORES

Em virtude da incidência de câncer no sistema respiratório em vários grupos de mineiros ⁽²⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁷⁾⁽⁴⁴⁾, expostos a altas concentrações de Rn e seus produtos filhos, a ICRP recomendou, pela primeira vez em 1955, como concentração máxima permissível (CMP) para 2000 h de trabalho por ano (50 semanas de 40 horas cada uma), 300 pCi/l de Rn em equilíbrio com seus filhos de meia vida curta.

Nesta época já se sabia que a dose no pulmão era causada principalmente pelos filhos de ^{222}Rn . A CMP foi avaliada tomando como base o limite de dose para o pulmão de 15 rem/a.

Em 1959, a ICRP reduziu o valor da concentração máxima permissível para 30 pCi/l, considerando que 10% dos átomos de ^{218}Po inalados não estavam ligados às partículas de aerossóis. Isto significa o reconhecimento de que a distribuição de dose no sistema respiratório não era homogênea e a dose máxima alfa causada pelos átomos não ligados de ^{218}Po era dirigida à traqueia-brônquios ⁽²⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾.

Países membros da IAEA e EURATOM, assim como outros países da Europa, América do Sul e África, não obedeceram esta redução, pois o aparecimento de trabalhos experimentais posteriores mostraram que a fração de ^{218}Po não ligada

aos aerossóis é bem menor que 10%⁽²⁾⁽²⁶⁾.

A partir de 1971, a "United States Nuclear Regulatory Commission" fixou como limite operacional para 2000 h/a, 4 WLM (Work Level Month = nível de trabalho mensal) por ano para minas de urânio (1 WL = 12 WLM = 100 pCi/l) ; enquanto que em vários países observava-se uma tendência a limitar este valor em 12 WLM⁽²⁾⁽²⁶⁾.

Em 1976, a ICRP reafirma sua recomendação de limitar a concentração de radônio equivalente em 30 pCi/l⁽⁴⁴⁾.

1.6. OBJETIVO

Em vista dos problemas radiosanitários, em minas de urânio, expostos nos itens anteriores e dos cuidados e medidas corretivas que a proteção radiológica deve tomar (item 1.1.), o objetivo do presente trabalho é desenvolver técnicas de monitoração para o controle radiológico dos trabalhadores de mineração de urânio e estabelecer um programa de Proteção Radiológica que obedeça as recomendações da ICRP.

O programa de Proteção Radiológica implica : 1) num estudo das técnicas de controle da concentração de radônio e filhos nos ambientes de trabalho ; 2) numa orientação para a análise de otimização através de um estudo diferencial do tipo custo-benefício ; 3) num programa de monitoração que assegure que os trabalhadores não superem os limites operacionais resultantes da análise de otimização ; e 4) num plano para a gestão de resíduos radioativos. Em virtude disto nos capítulos seguintes desenvolveremos todos estes itens para alcançar o objetivo proposto.

2. REVISÃO DE TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE RADÔNIO NO AR E NA ÁGUA

Neste capítulo serão descritas sucintamente as principais técnicas de detecção de radônio no ar e na água

2.1. TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE Rn NO AR

2.1.1. CÂMARA DE CINTILAÇÃO

A câmara de cintilação consiste de um frasco de vidro, plástico ou metal de 50 a 200 ml ; revestida internamente com sulfeto de zinco ativado com prata⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾⁽²⁰⁾⁽⁽²⁷⁾⁽³³⁾⁽⁴⁴⁾. Pode ser pintada externamente com tinta branca⁽¹¹⁾ ou prateada⁽¹⁰⁾, mantendo o fundo da câmara transparente, podendo ser o lado oposto semiesférico⁽²⁷⁾⁽³³⁾, cilíndrico⁽¹¹⁾⁽²⁷⁾ ou cone truncado⁽²⁰⁾⁽²⁷⁾.

Lucas⁽³³⁾ desenvolveu uma câmara de cintilação para a detecção de Rn no ar em baixas concentrações. Utilizou um frasco metálico ou pirex de forma cilíndrica, com janela de quartzo, recoberta internamente com uma camada transparente de óxido de estanho, sendo a parte superior semiesférica.

A amostragem é feita estando a câmara previamente em vácuo ou deixando homogeneizar o ar do ambiente com o do interior da câmara; fazendo passar o ar através de um filtro de aerossóis de alta eficiência para evitar assim a contaminação da câmara por emissores alfa de meia vida longa.

Após o equilíbrio do radônio com seus filhos (3 horas), procede-se a contagem num sistema constituído por um detector de cintilação acoplado a um contador. O detector de cintilação é constituído por uma fotomultiplicadora, onde a janela da câmara é colocada em contacto com o tubo fotocátodo; um preamplificador; um discriminador de amplitude de pulso e uma fonte de alta tensão. Neste sistema, o detector de cintilação e a câmara de cintilação apresentam-se dispostos numa câmara completamente escura, para evitar a entrada de luz⁽²⁰⁾.

A concentração de Rn no ar é dada pela seguinte equação:

$$C_{Rn} \text{ (pCi/l)} = \frac{R \cdot e^{\lambda\tau}}{3 \cdot 2,22 \cdot E \cdot V}$$

onde:

R = número de contagem por minuto (cpm)

λ = constante de decaimento do Rn (min^{-1})

τ = tempo entre a coleta e a contagem da amostra (min)

E = eficiência de contagem de câmara de cintilação para Rn em equilíbrio com seus filhos (cpm/dpm)

V = volume da câmara (l)

2,22 = fator de conversão de dpm (número de deintegrações por minuto) em pCi (dpm/pCi)

3 = representa o número de partículas alfa emitidas devido ao decaimento de um átomo de radônio

2.1.2. MÉTODO DOS DOIS FILTROS

Este método consiste em fazer circular um fluxo constante de ar pelo interior de um tubo de metal equipado com filtros de alta eficiência em cada extremidade⁽²⁷⁾⁽⁴⁴⁾⁽⁵⁶⁾. O filtro de entrada remove todas as partículas do ar, incluindo os átomos filhos de Rn, de tal forma que só entre o gás:

ar mais radônio.

Entre os filtros, o ^{222}Rn decai produzindo átomos de ^{218}Po , a maioria dos quais são coletados no filtro terminal, ficando uma fração depositada nas paredes do tubo.

A concentração de radônio é calculada pela atividade alfa dos produtos de decaimento no filtro terminal, levando em consideração as dimensões do tubo, velocidade de fluxo da amostra, intervalos de amostragem e contagem, e a fração de ^{218}Po que alcança o filtro terminal.

A equação que expressa a concentração de Rn é a seguinte:

$$C_{\text{Rn}} (\text{pCi/l}) = \frac{0,45 \cdot X}{E \cdot Z \cdot V \cdot F}$$

onde:

X = número de contagem por minuto no segundo filtro (cpm)

E = eficiência de contagem (cpm/dpm)

Z = fator dado em função dos tempos de amostragem e contagem, ou seja, fator de correção devido ao decaimento radioativo

V = volume do tubo (l)

F = fração dos átomos de ^{218}Po formados no tubo e depositados no filtro terminal

0,45 = fator de conversão de pCi a dpm (pCi/dpm)

A sensibilidade do método depende do tamanho do tubo, velocidade de amostragem e intervalos de amostragem e contagem.

2.1.3. MÉTODO DO CARVÃO ATIVO

Este método consiste em passar o ar através de um tubo com carvão ativo, sendo o Rn adsorvido no carvão⁽⁴⁴⁾. Depois faz-se a contagem num contador gama.

A eficiência de coleta depende da quantidade de carvão, da temperatura e do volume do gás que passa através do sistema coletor.

A eficiência é maior quanto maior a massa de carvão e menor a temperatura do sistema e o volume de ar amostrado.

A coleta se faz mediante uma bomba fazendo passar o ar por uma coluna desidratante e após pelo tubo de carvão.

2.1.4. MONITORES CONTÍNUOS

Neste método o ar é bombeado continuamente através de uma câmara de ionização. Anterior à câmara encontra-se um filtro de alta eficiência de forma tal que não penetre o gás: ar mais radônio.

A concentração de Rn no ar é calculada levando em consideração a eficiência de contagem e o tempo de permanência do gás no interior da câmara⁽¹⁸⁾⁽⁴⁴⁾⁽⁵³⁾.

2.2. TÉCNICA DE DETECÇÃO DE Rn NA ÁGUA

2.2.1. EMANAÇÃO DE Rn DA ÁGUA

O método mais utilizado para detecção de radônio na água consiste na emanação do gás radioativo da solução para posterior transferência a um sistema de contagem.

A emanção é feita pelo borbulhamento na solução radioativa de um gás de arraste. A seguir o fluxo gasoso é purificado eliminando outros gases como dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e vapor de água.

Evans⁽¹³⁾ fez a emanção de Rn por meio do refluxo da solução, separando os vapores condensáveis dos não condensáveis. Os não condensáveis como o Rn, O₂, CO₂ são arrastados por uma corrente de ar, passando por uma microcélula contendo uma substância desidratante (H₂SO₄ concentrado). O gás radioativo é então recolhido numa câmara de ionização, para contagem.

Rieck e Perkins⁽⁴⁷⁾ experimentaram um método de emanção, utilizando como gás de arraste o argônio, mantendo a amostra em refluxo. Utilizaram "ascarite" (NaOH e asbesto) para a remoção do dióxido de carbono; e perclorato de magnésio para a remoção de vapores de água.

Lucas Jr., H.F.⁽³⁴⁾ desenvolveu o processo de emanção de radônio borbulhando gás He através da solução radioativa, passando a mistura gasosa por duas armadilhas mergulhadas numa mistura de gelo seco e acetona para retenção de umidade, e depois, por uma terceira armadilha que contém carvão ativo, onde o Rn fica adsorvido a -80°C. Em seguida, por aquecimento a 350°C, o Rn é liberado do carvão e após, transferido para a câmara de cintilação.

Thomas e Le Clare⁽⁵⁶⁾ usaram ar como gás de arraste, tal que o radônio arrastado é diluído com outra corrente de ar filtrado (sem radônio). A mistura gasosa passa por uma armadilha para remoção de traços de impurezas e depois por uma coluna contendo sílica-gel, sendo coletada num tubo de dois filtros para posterior contagem.

Kobal e Kristan⁽²⁹⁾ fizeram a emanção do gás radônio de amostras de água, com nitrogênio. A remoção do dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio (gases naturalmente dissolvidos na água) e vapor de água foi feita através de ar-

madilhas, contendo respectivamente solução de hidróxido de potássio saturada, solução de nitrato de chumbo a 10% e ácido sulfúrico concentrado. O Rn é então coletado numa coluna de nitrogênio líquido (-196°C) onde é condensado, separando-se do gás carregador. Depois, à temperatura ambiente, o gás radioativo é coletado numa câmara de cintilação em vácuo, para contagem.

Pohl e Pohl-Rulling⁽⁴⁰⁾ utilizaram ar para a emissão do radônio e CaCl₂ como substância desidratante. O gás radioativo foi coletado numa câmara de ionização passando antes por um filtro para a retenção de partículas sólidas e filhos de Rn.

2.2.2. CINTILADOR LÍQUIDO

Outro método que pode ser utilizado para determinar a concentração de radônio em água é por meio de um contador de cintilação líquido. Este processo é possível em virtude de que os gases nobres mais pesados são apreciavelmente solúveis nos hidrocarbonetos aromáticos comumente usados como solventes nos cintiladores líquidos⁽²²⁾⁽⁵²⁾⁽⁵⁴⁾.

Este processo está baseado fundamentalmente no fato de que a energia de decaimento é transformada em fótons luminosos ocasionando um pulso de energia elétrica, que pode ser amplificado e contado mediante um circuito eletrônico.

Este método foi desenvolvido no IEA-CARREI, o que se verificou ser um método rápido e preciso na detecção de radônio em água. A solução cintiladora utilizada foi instalada na proporção de 1:1 entre esta e a amostra de água radioativa; sendo que de acordo com as condições padronizadas e os resultados obtidos, a eficiência de contagem para as partículas alfa no contador de cintilação da LKB-WALLAC 81000 foi de 98%.

3. PARTE EXPERIMENTAL

A primeira parte do objetivo deste trabalho corresponde ao desenvolvimento de técnicas de monitoração, para o controle radiológico dos trabalhadores de mineração de urânio. Neste sentido, foram estudados e analisados os diversos métodos de detecção de Rn, tanto no ar como na água, descritos no capítulo anterior.

Na escolha dos métodos de detecção para serem utilizados no programa de monitoração, levaram-se em consideração as necessidades do ponto de vista de proteção radiológica, que são as de obter dados confiáveis com métodos simples, rápidos e econômicos, compatibilizando estes requisitos com as condições rudes de trabalho numa jazida.

3.1. DETECÇÃO DE Rn NO AR

Dentre os métodos de detecção de Rn no ar descritos no capítulo 2, optou-se pelo método de câmara de cintilação. Este método, além de ser o mais utilizado na monitoração do ar de uma jazida ⁽¹⁰⁾ ⁽¹¹⁾ ⁽¹⁴⁾ ⁽³³⁾ e cumprir com todas as necessidades da proteção radiológica, tem a vantagem de poder ser utilizada a mesma câmara para a determinação da concentração de Rn na água ⁽³⁴⁾.

A detecção de Rn no ar por este método consiste em introduzir a amostra numa câmara de cintilação e uma vez alcançado o equilíbrio radioativo entre o Rn e seus filhos de meia vida curta (3 horas), é contada mediante um sistema de detecção e contagem.

3.1.1. CÂMARA DE CINTILAÇÃO

A câmara de cintilação foi construída utilizando-se um erlenmeyer de 125 ml do tipo comercial, pirex, cuja parede interna foi revestida com uma camada uniforme de sulfeto de zinco ativado com prata, mantendo a parte inferior da câmara, transparente (Figura 7).

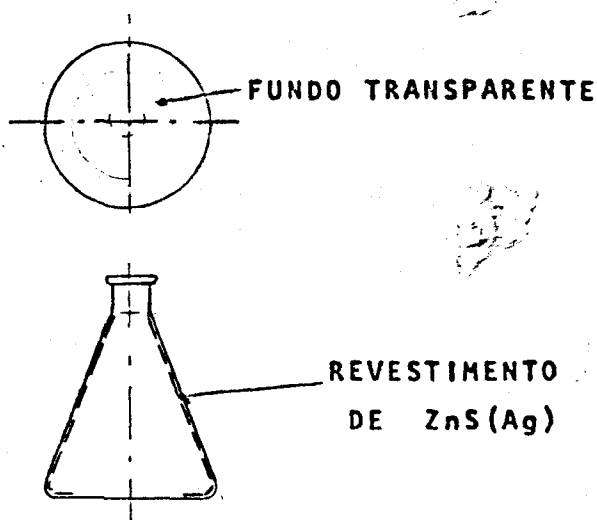


Figura 7 - Câmara de Cintilação

Numa primeira operação, o erlenmeyer foi recoberto interiormente com uma fina camada de graxa de silicone. Para isso, dissolveu-se 250g de graxa de silicone em 1 litro de tetracloreto de carbono, agitando a solução por 3 horas. Uma alíquota desta solução foi introduzida na câmara, molhando toda a superfície interna da mesma. Em seguida, foi colocada invertida para escorrer o excesso e foi mantida nesta posição durante 24 horas para permitir a evaporação de todo o solvente.

A seguir, a parte inferior foi limpada mediante um chumaço de algodão fixado na extremidade de um bastão de vidro.

A segunda operação consistiu em introduzir o

ZnS(Ag) (aproximadamente 10g) e provocar um suave movimento de rotação da câmara até que toda a superfície interna fosse uniformemente recoberta. O excesso da substância cintiladora foi retirado e o fundo da câmara foi limpadado de forma análoga a da operação anterior, mantendo transparente um círculo de 5 cm.

3.1.2. AMOSTRAGEM DE AR

Foram analisadas três formas de amostragem de ar na câmara de cintilação, cujas características são:

3.1.2.1. através de uma bomba portátil de circulação de ar, da Research Appliance Company (RAC) - modelo nº 211004 - série nº 745 , cuja vazão é de 15 l/min. ; acoplada a um filtro de alta eficiência (Figura 8).

A finalidade do filtro é eliminar as partículas contendo emissores alfa de meia vida longa que contaminaria a câmara. A coleta se faz deixando circular ar através da câmara, por um minuto.

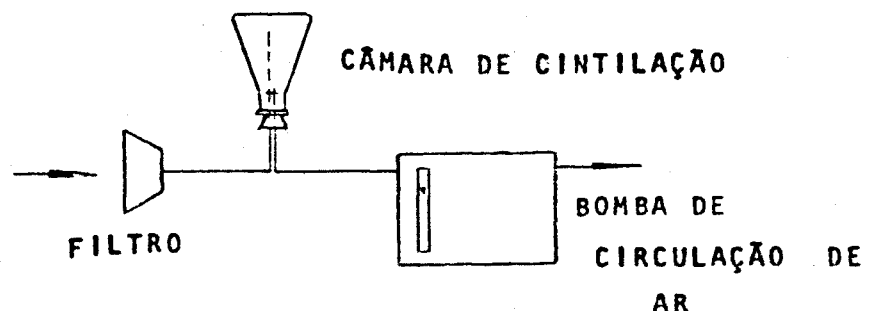


Figura 8 - Sistema para amostragem de ar

3.1.2.2. através de uma câmara previamente em vácuo sendo que, no momento da coleta, introduz-se uma

agulha hipodérmica acoplada a um filtro de características similares às do sistema anterior.

3.1.2.3. diretamente com a câmara aberta, agitando a mesma no local, durante um curto intervalo de tempo (1 min.) para acelerar a entrada de ar na câmara.

3.1.3. SISTEMA DE DETECÇÃO E CONTAGEM

O sistema de detecção e contagem utilizado, é constituído por um detector de cintilação, acoplado a um contador e a um medidor de taxa de contagem, com analisador monocanal do tipo "Ludlum Measurements Inc Model 2200" (Figura 9).

O detector de cintilação é constituído por uma câmara de cintilação (como descrita no ítem 3.1.1.) e tubo fotomultiplicador, sendo que a janela transparente da câmara de cintilação é colocada sobre o tubo fotocatódo. Este conjunto é hermeticamente fechado numa câmara escura.

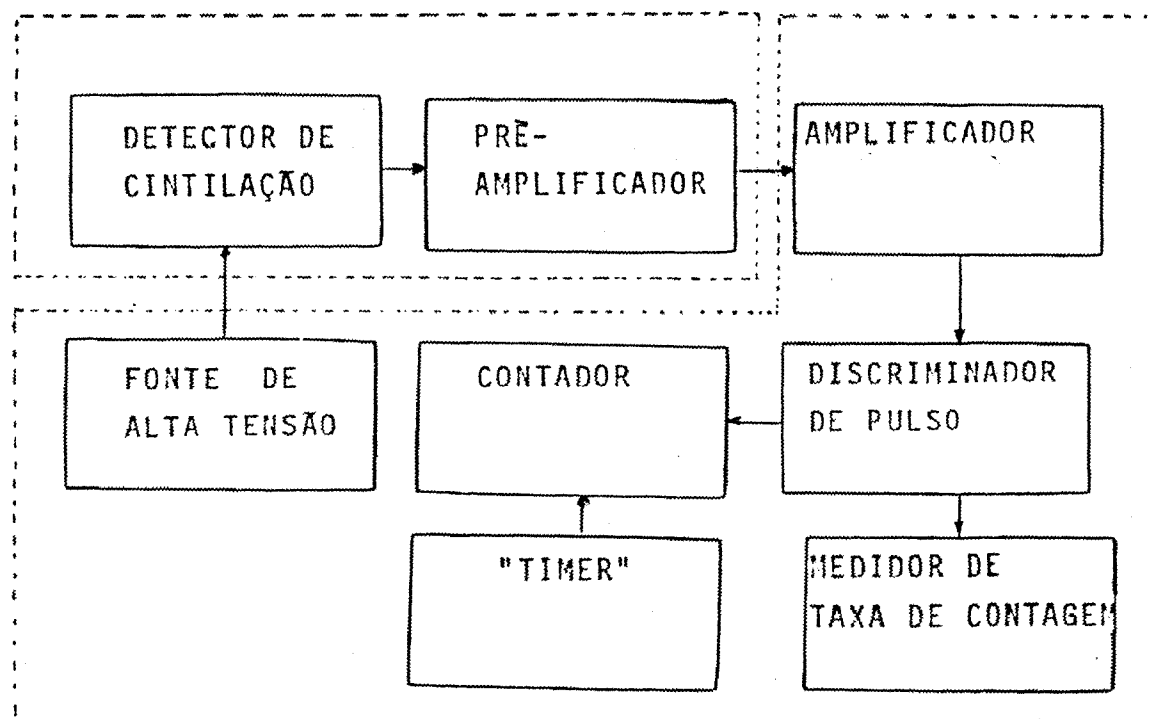


Figura 9 - Sistema de Detecção e Contagem

Neste caso, trabalhou-se com a janela de discriminação de pulso aberta; de forma que todas as partículas alfa existentes na câmara de cintilação foram contadas, independentemente de sua energia.

Tratando-se de radônio em equilíbrio com seus filhos, por cada átomo do gás que desintegra, obtem-se 3 partículas alfa.

3.1.4. EFICIÊNCIA RELATIVA DAS CÂMARAS

Os erlenmeyers utilizados para a construção das câmaras de cintilação são do tipo comercial e portanto, apresentam imperfeições tanto em planitude como em homogeneidade e espessura do fundo.

Aos efeitos de poder comparar as amostras medidas em diferentes câmaras, foi necessário determinar a eficiência relativa das mesmas. Portanto, todas as câmaras foram colocadas em uma atmosfera com radônio, deixando-as 48 horas para homogeneização.

A atmosfera de radônio foi obtida por emanção do gás radioativo de amostras de água subterrânea radioativa (Figura 10). O Rn foi inicialmente coletado numa coluna de carvão ativo.

As câmaras foram dispostas dentro de um dessecador em vácuo.

O radônio foi liberado do carvão ativo, por meio de aquecimento a 350°C durante 20 minutos⁽³⁴⁾. Em seguida, a torneira que liga o dessecador com a coluna de carvão foi aberta e posteriormente a de entrada de ar, até que a pressão do sistema igualou-se com a atmosférica.

O dessecador foi então aberto e todas as câmaras foram fechadas ao mesmo tempo, para posterior contagem.

- T = torneira
 BV = bomba de vácuo
 V = válvula de 3 vias
 1 = cilindro de argônio e válvula reguladora
 2 = frasco borbulhador
 3 = armadilha mergulhada numa mistura de gelo seco e álcool isobutílico
 4 = armadilha contendo sílica-gel
 5 = armadilha contendo carvão ativo
 6 = vacuômetro
 7 = medidor de vazão
 8 = dessecador

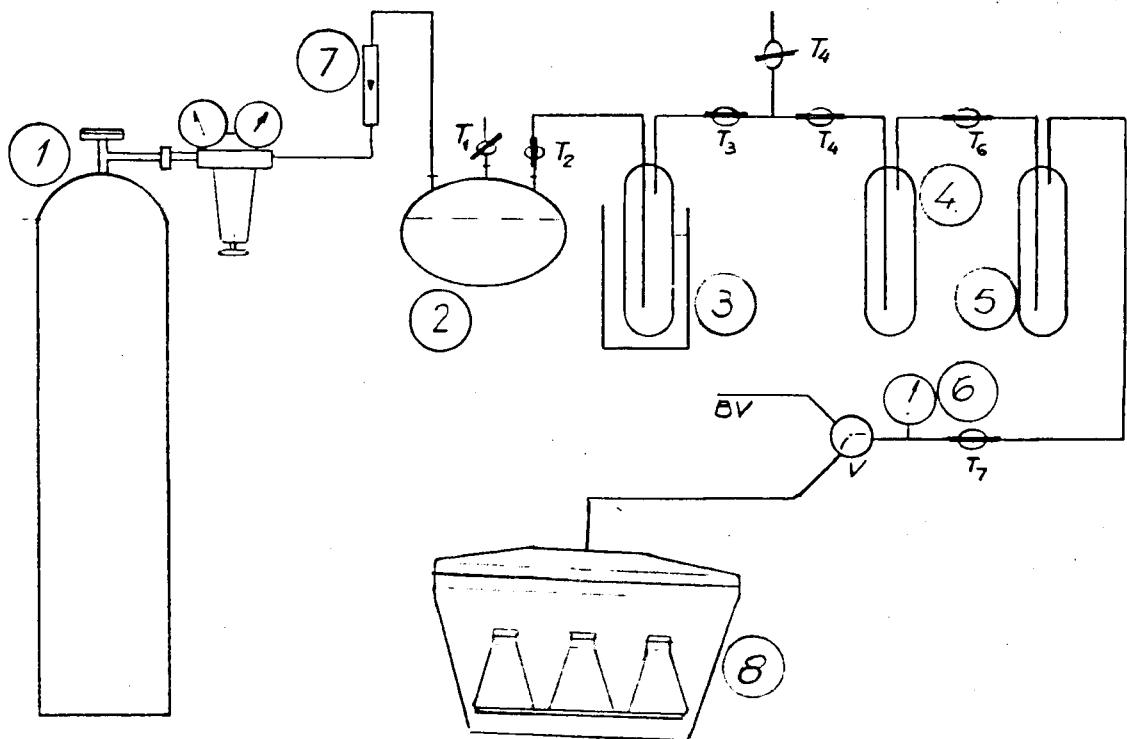


Figura 10 - Sistema para determinar as eficiências relativas das câmaras

A câmara com maior contagem (N_p) foi considerada como padrão, tendo portanto eficiência relativa igual a 1. As eficiências relativas das várias câmaras foram determinadas em relação à câmara padrão, utilizando a seguinte equação:

$$E_{ri} = \frac{N_{ci}}{N_p}$$

onde:

E_{ri} = eficiência relativa da câmara de cintilação i

N_{ci} = número de contagem da câmara de cintilação i (cpm)

N_p = número de contagem da câmara de cintilação padrão (cpm)

3.1.5. EFICIÊNCIA DO SISTEMA CÂMARA-DETECTOR

A eficiência do sistema câmara-detector foi determinada tomando-se um frasco de polietileno contendo 1000 ml de água subterrânea com alto teor de Rn e fechando-o de forma estanque com uma câmara de cintilação (Figura 11).

Previamente foi tirada uma alíquota de 10 ml de água e analisada no "Contador de cintilação líquido - LKB WALLAC 81000", utilizando instagel como solução cintiladora.

O conjunto câmara-amostra foi deixado nesta posição por um tempo de aproximadamente 24 horas.

Em seguida, a câmara foi retirada, fechada e contada no sistema descrito no item 3.1.3.

Simultaneamente à retirada da câmara, tirou-se outra alíquota de 10 ml da amostra para contagem no contador de cintilação líquido.

A eficiência da câmara de cintilação foi calculada pela seguinte expressão:

$$E_f = \frac{(N - BG) \cdot e^{\lambda t} \cdot 0,14}{(A_0 - A \cdot e^{\lambda t_1}) \cdot 3 \cdot E_{ri} \cdot 0,23}$$

onde:

N = número de contagem por minuto, na câmara de cintilação (cpm)

BG = ruído de fundo da câmara (cpm)

A_0 = atividade da água no tempo t_0 (dpm)

A = atividade da água após o tempo t_1 (dpm)

λ = constante de decaimento do radônio (min^{-1})

t = tempo entre o momento de introdução da água no frasco e a contagem da câmara (min)

t_1 = tempo decorrido entre as coletas das alíquotas de água (min)

E_{ri} = eficiência relativa da câmara i

0,23 = volume de ar no sistema (l)

0,14 = volume da câmara (l)

E_f = eficiência do sistema câmara-detector (cpm/dpm)

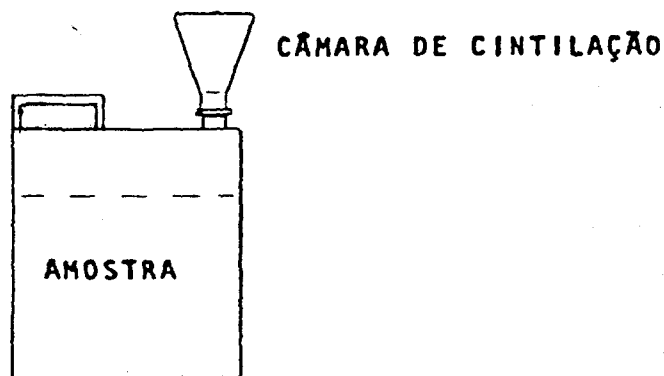


Figura 11 - Conjunto para determinação da eficiência do sistema Câmara-Detector

3.1.6. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE Rn NO AR

Depois da coleta da amostra de ar, pelos métodos descritos anteriormente, a câmara é fechada por 3 horas para que o Rn entre em equilíbrio com seus filhos.

Em seguida procede-se a contagem.

A concentração de Rn é então calculada pela seguinte equação:

$$C_{Rn} \text{ (pCi/l)} = \frac{(N - BG) \cdot e^{\lambda t}}{3 \cdot 2,22 \cdot E_f \cdot E_{r_i} \cdot V}$$

onde:

N = número de contagem por minuto (cpm)

BG = ruído de fundo da câmara (cpm)

λ = constante de decaimento do Rn (min^{-1})

t = tempo entre a coleta da amostra e a contagem (min)

E_{r_i} = eficiência relativa da câmara i

2,22 = fator de conversão de dpm a pCi (dpm/pCi)

V = volume da câmara (l)

E_f = eficiência do sistema câmara-detector (cpm/dpm)

3.2. DETECÇÃO DE Rn NA ÁGUA

O método de cintilação líquido apresenta grandes vantagens por sua simplicidade, rapidez e reprodutibilidade em relação aos métodos de emanação.

Porém, levando em consideração o alto custo de instalação e operação do aparelho, não se justifica sua utilização como única finalidade a monitoração de água numa jazida de urânio, do ponto de vista de proteção radiológica.

O método de emanação, apesar de ser mais demorado e com operações que requerem cuidados minuciosos, exige uma instalação simples e de fácil manutenção.

Foi, portanto, montado um sistema de emanação, adaptando o esquema de Lucas às necessidades de proteção radiológica; foi também desenvolvido um sistema simples para a medida "in situ" de amostras de água pelo princípio de difusão.

3.2.1. MÉTODO DE EMANAÇÃO

O método consistiu em retirar o gás Rn de uma amostra de água, através de arraste por um gás carregador (Figura 12).

O fluxo gasoso atravessa uma primeira armadilha mergulhada numa mistura de gelo seco e álcool isobutílico ($t = -80^{\circ}\text{C}$) na qual condensa a maior parte de umidade contida no gás. Depois o gás torna-se completamente seco ao passar por uma segunda armadilha contendo sílica-gel. Junto com a sílica-gel, foi colocada uma camada de "ascarite" para reter o CO_2 que possa estar dissolvido na água.

Em seguida, o Rn e o gás carregador passou por uma terceira armadilha contendo carvão ativo, à temperatura ambiente (23 a 25°C), onde o gás radioativo ficou adsorvido.

É necessária a eliminação de vapores de água e CO_2 para aumentar a eficiência de retenção do Rn no carvão ativo ⁽³⁴⁾ ⁽³⁷⁾.

Depois, por aquecimento, o Rn foi transferido à câmara de cintilação para posterior contagem.

Aos efeitos de padronizar o método, foi estudada a eficiência de emanação do Rn em função do volume do gás carregador e a eficiência de retenção de Rn no carvão ativo.

3.2.1.1. RENDIMENTO DE ARRASTE DO Rn

- T = torneira
 BV = bomba de vácuo
 V = válvula de 3 vias
 1 = cilindro de argônio e válvula reguladora
 2 = frasco borbulhador
 3 = armadilha mergulhada numa mistura de gelo seco e álcool isobutílico
 4 = armadilha contendo sílica-gel
 5 = armadilha contendo carvão ativo
 6 = vacuômetro
 7 = medidor de vazão
 8 = câmara de cintilação

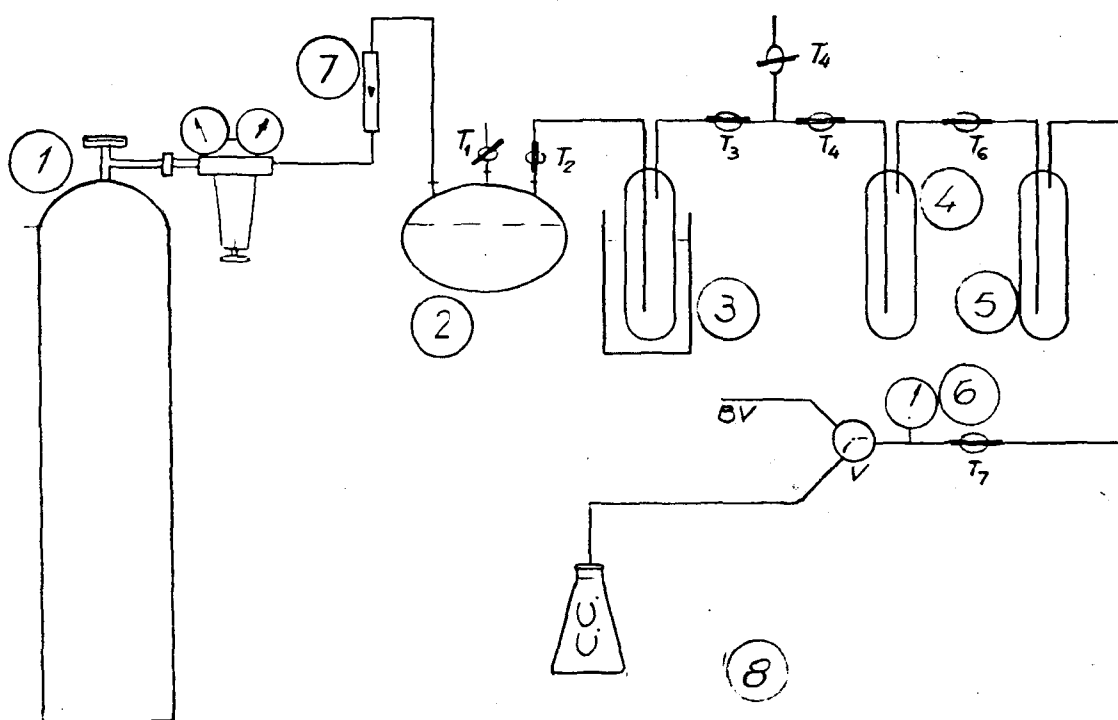


Figura 12 - Sistema de emanção do radônio

O rendimento de arraste foi determinado utilizando como gás carregador ar e argônio.

Foi colocado no frasco borbulhador uma amostra de água de 250 ml e fixado um fluxo de gás de arraste de 1 l/min. Foram coletadas alíquotas em vários intervalos de tempo e estas, medidas num contador de cintilação líquido.

O fluxo de 1 l/min foi estabelecido, visando alcançar a emanação total no menor tempo possível, sem desprendimento de gotículas da superfície da água.

3.2.1.2. EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DO Rn PELO CARVÃO ATIVO

A eficiência do carvão ativo depende do tempo de contato entre gás e carvão, do conteúdo de CO₂ e umidade do gás; e da temperatura.

Foi fixado uma massa de 23g de carvão ativo e estudou-se a retenção de Rn a temperatura ambiente (23 a 25°C). A umidade e dióxido de carbono foram eliminados, como descrito no item 3.2.1.

A determinação da eficiência de retenção do Rn pelo carvão ativo a temperatura ambiente foi feita utilizando o sistema de emanação, como descrito anteriormente, e adicionando ao mesmo outra armadilha de carvão ativo em série contendo a mesma massa que a anterior. Esta segunda armadilha de carvão ativo, foi mergulhada numa mistura de gelo seco e álcool isobutílico ($t = -80^{\circ}\text{C}$), com o que se obtém uma retenção de 99%⁽³⁴⁾.

Após o borbulhamento do gás de arraste (argônio) na solução radioativa, parte do Rn ficou adsorvido na primeira coluna de carvão; enquanto que o restante, na segunda coluna.

Em seguida, através de aquecimento a 350°C por 20 minutos, o gás retido em cada coluna foi liberado, respectivamente, para as câmaras de cintilação e posteriormente contados.

A eficiência de retenção (Ef c.a.) foi calculada pela seguinte equação:

$$\text{Ef c.a.} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \cdot 100\%$$

onde:

N_1 = número de contagem da câmara para a qual foi transferido o Rn retido na primeira coluna de carvão (temperatura ambiente) (cpm)

N_2 = número de contagem da câmara para a qual foi transferido o Rn retido na segunda coluna de carvão (cpm)

3.2.1.3. EFICIÊNCIA DO SISTEMA

A eficiência do sistema de emanção junto com o sistema câmara-detector foi determinada, utilizando uma solução padrão de 80 pCi/l da National Bureau of Standards (NBS) de ^{226}Ra em equilíbrio com ^{222}Rn .

Fez-se a emanção do Rn pelo sistema descrito; o gás radioativo foi coletado numa câmara de cintilação e após 3 horas, quando o Rn entrou em equilíbrio com seus filhos, foi feita a contagem.

A eficiência do sistema é dada pela equação:

$$\text{Ef} = \frac{(N - BG) \cdot e^{\lambda t}}{3 \cdot X \cdot E_{ri} \cdot 0,99^{(n-1)}}$$

onde:

N= numero de contagem da câmara de cintilação (cpm)

BG= ruído de fundo da câmara de cintilação (cpm)

λ = constante de decaimento do Rn (min^{-1})

t= tempo entre o momento da transferência da solução padrão para o sistema de emanação, e a contagem da câmara de cintilação (min)

X= numero de desintegração por minuto, na solução padrão de 80 pCi/l de ^{226}Ra (dpm)

Eri= eficiência relativa da câmara de cintilação i

$0,99^{(n-1)}$ = fator de correção que considera a perda de solução em cada experiência

n= numero de experiência, utilizando a mesma solução padrão

3.2.1.4. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE Rn EM ÁGUA

A concentração de Rn de uma amostra de água foi determinada pela seguinte equação:

$$C_{\text{Rn}} \text{ (pCi/l)} = \frac{(N - BG) \cdot e^{\lambda t} \cdot V^{-1}}{3 \cdot \text{Ef} \cdot \text{Eri} \cdot 2,22}$$

onde;

N= numero de contagem na câmara de cintilação (cpm)

BG= ruído de fundo da câmara de cintilação (cpm)

λ = constante de decaimento do Rn (min^{-1})

t= tempo entre a coleta de amostra e a contagem (min)

E_f = eficiência do sistema de detecção de Rn na água (cpm/dpm)

E_{ri} = eficiência relativa de câmara de cintilação i

V = volume da amostra de água (l)

3.2.2. MÉTODO DE DIFUSÃO GASOSA

Como os demais gases inativos, quando o Rn está em presença de um líquido difunde-se para o interior do mesmo. Reciprocamente, se o Rn está dissolvido num líquido e este entra em contato com outro gás, parte do gás dissolvido se desprende, difundindo-se até a fase gasosa.

A lei de Henry estabelece que, a uma dada temperatura, existe uma relação constante entre as concentrações de equilíbrio no líquido e na fase gasosa. Esta relação constante é chamada de coeficiente de solubilidade (α) e depende da natureza do gás e do líquido.

A figura 13 mostra a variação do coeficiente de solubilidade em função da temperatura, para o gás Rn dissolvido em água⁽⁴²⁾.

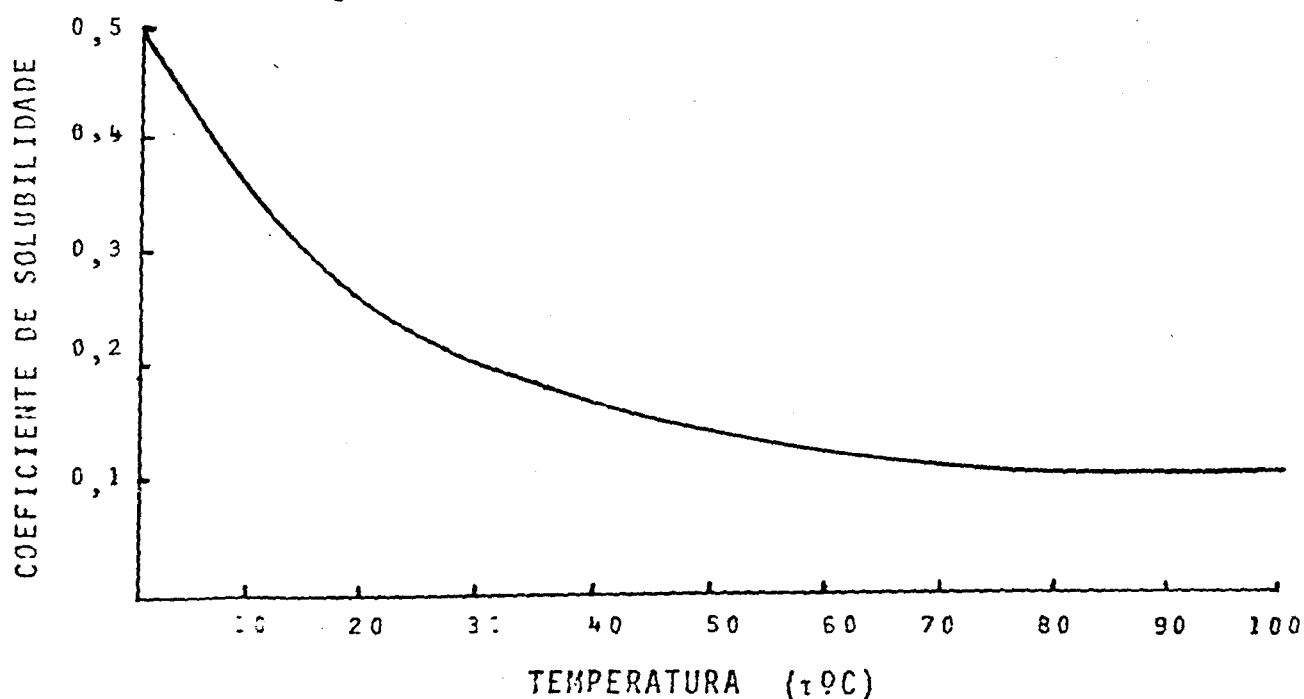


Figura 13 - Gráfico do coeficiente de solubilidade do Rn na água em função da temperatura

Com a finalidade de determinar a concentração de Rn nas águas "in situ" satisfazendo os requisitos de proteção radiológica, isto é, que o método seja simples, reproduzível e econômico, foi idealizado um método de detecção de radônio baseado no princípio de difusão.

Este método consistiu em um recipiente no qual se colocou uma amostra de água, e o mesmo foi fechado de forma estanque mediante uma câmara de cintilação invertida (figura 14).

Aos efeitos de se obter temperatura constante e controlada o conjunto foi introduzido em um banho de água, dentro de uma caixa de isopor.

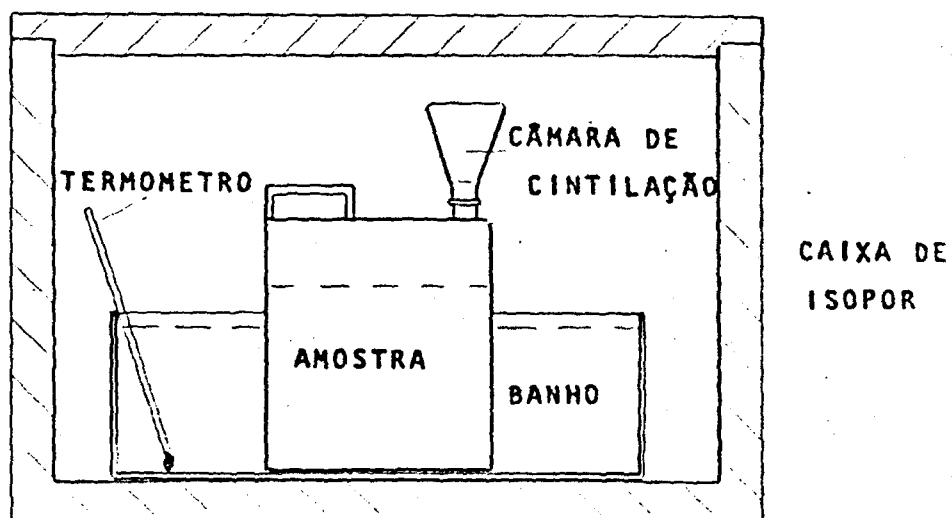


Figura 14 - Sistema para a difusão do Rn

3.2.2.1. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE EQUILÍBRIO

Depois de transcorrido um certo tempo, a concen

tração de radônio no ar do sistema alcança um valor máximo.

O tempo no qual se alcança a concentração máxima foi determinado colocando o sistema detector sobre a câmara de cintilação e o conjunto envolvido numa caixa preta.

Durante as primeiras 3 horas fizeram-se leituras contínuas a cada 10 minutos; e nas próximas horas cada 20 minutos.

3.2.2.2. CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO PELO MÉTODO DE DIFUSÃO

Para determinar a concentração de radônio por este método faz-se a coleta da amostra no recipiente e segue-se o procedimento já descrito no item 3.2.2.

Depois de atingido o equilíbrio entre o Rn dissolvido na água e no ar, a câmara de cintilação é desconectada do sistema, para a contagem.

O coeficiente de solubilidade (α) é definido como a relação entre a concentração de Rn no líquido (C_a) e a concentração de Rn no ar (C_{ar}).

$$\alpha(\tau) = \frac{C_a}{C_{ar}} \quad (1)$$

A atividade total de Rn A, no sistema será:

$$A = C_a \cdot V_a + C_{ar} \cdot V_{ar} \quad (2)$$

onde V_a e V_{ar} são os volumes de água e ar respectivamente.

O valor de C_a pode ser expresso por:

$$C_a = \frac{A}{V_a} \quad (3)$$

Substituindo as equações (1) e (2) na equação (3), temos:

$$Ca = \frac{\alpha(\tau) \cdot Car \cdot Va + Car \cdot Var}{Va}$$

ou:

$$Ca = \frac{Car (\alpha(\tau) \cdot Va + Var)}{Va}$$

A concentração de Rn no ar (Car) é determinada pela seguinte equação:

$$Car \text{ (pCi/l)} = \frac{(N - BG) \cdot e^{\lambda t}}{3 \cdot Ef \cdot Eri \cdot V \cdot 2,22}$$

onde:

N= número de contagem da câmara de cintilação (cpm)

λ = constante de decaimento do Rn (min^{-1})

t= tempo entre a coleta da amostra e a contagem (min)

Ef= eficiência do sistema câmara-detector (cpm/dpm)

V= volume da câmara de cintilação (l)

Eri= eficiência relativa da câmara

Portanto, a equação que exprime a concentração de Rn numa amostra de água em função dos valores obtidos no ar, é a seguinte:

$$Ca = \frac{Car (\alpha(t) \cdot Va + Var)}{Va}$$

3.3. RESULTADOS

3.3.1. RESULTADOS NA DETECÇÃO DE Rn NO AR

Na tabela 1 são apresentados os resultados de ruído de fundo em 12 câmaras de cintilação e suas respectivas eficiências relativas.

Foi determinada a eficiência de contagem do sistema câmara-detector, cujo resultado obtido foi de $23,43\% \pm 3,42$.

Na tabela 2 são dados os resultados de uma monitoração de ar efetuada num local contendo mineral de urânio.

TABELA 1 - RUÍDO DE FUNDO E EFICIÊNCIA RELATIVA DAS RESPECTIVAS CÂMARAS

CÂMARA DE CINTILAÇÃO Nº	RUÍDO DE FUNDO (cpm)	EFICIÊNCIA RELATIVA
0 -	0,60 ± 0,17	0,83 ± 0,13
1	0,40 ± 0,04	0,52 ± 0,09
2	0,70 ± 0,12	0,78 ± 0,13
3	0,60 ± 0,17	0,67 ± 0,11
4	0,84 ± 0,13	0,62 ± 0,10
5	0,55 ± 0,07	0,96 ± 0,15
6	0,55 ± 0,12	0,70 ± 0,11
6'	0,63 ± 0,07	0,69 ± 0,11
7	0,83 ± 0,09	0,70 ± 0,12
8	0,86 ± 0,13	0,68 ± 0,11
9	0,37 ± 0,05	0,90 ± 0,14
10	0,58 ± 0,06	1,0 ± 0,16

TABELA 2 - CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO NA ATMOSFERA DE UM LOCAL CONTENDO MINERAL DE URÂNIO

AMOSTRA DE AR	CONCENTRAÇÃO DE Rn (pCi/l)
A	51,98 ± 6,40
B	46,76 ± 7,13
C	24,40 ± 5,19
D	34,66 ± 6,74

3.3.2. RESULTADOS DA DETECÇÃO DO RADÔNIO NA ÁGUA PELO MÉTODO DE EMANAÇÃO

Na figura 14 apresentam-se os resultados do rendimento de arraste do Rn contido numa amostra de água, pelo borbulhamento de argônio e ar, respectivamente, como gás carregador.

Foi determinada também, a eficiência de retenção de Rn pelo carvão ativo a temperatura ambiente, sendo de $50,16\% \pm 5,01$.

A eficiência do sistema de detecção de radônio pelo método de emanação foi determinada; e o resultado obtido foi de $10,44\% \pm 3,13$.

Na tabela 3, são dadas as concentrações de radônio de águas subterrâneas procedentes de diferentes fontes e mananciais do Estado de São Paulo, determinadas pelo método de emanação. O objetivo destas determinações foi aplicar o método desenvolvido.

Figura 14 - Concentração de ^{222}Rn na amostra de água em função do volume do gás de arraste

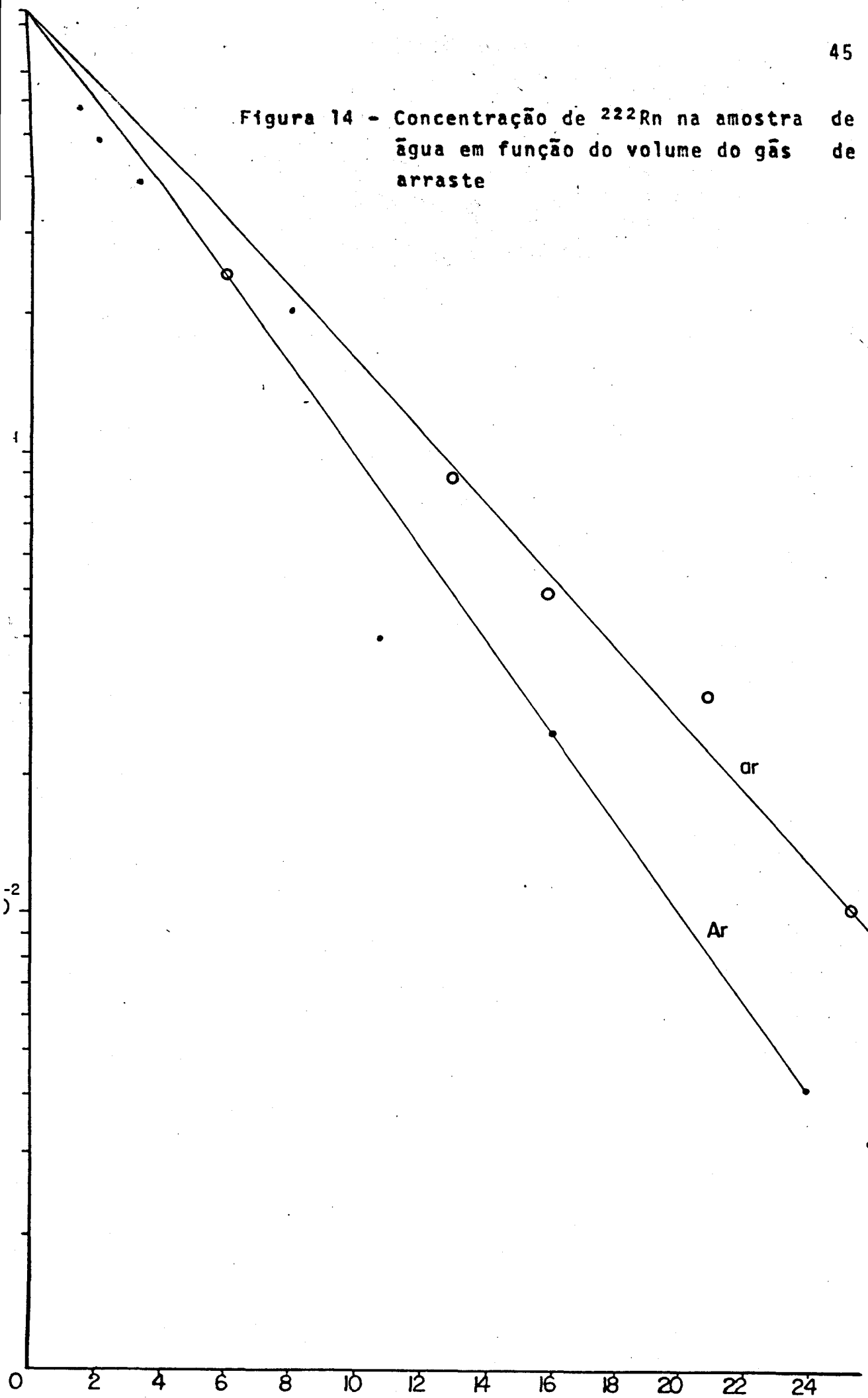


TABELA 3 - CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
DE DIFERENTES FONTES E MANANCIAIS

AMOSTRA DE ÁGUA	CONCENTRAÇÃO DE Rn (pCi/l)
1	2566,01 ± 6,70
2	2959,03 ± 7,06
3	1497,43 ± 2,24
4	11709,56 ± 51,23
5	10762,14 ± 49,07
6	8171,43 ± 15,95
7	11223,65 ± 21,25
8	9629,03 ± 21,69
9	1156,45 ± 3,64

3.3.3. RESULTADOS NA DETECÇÃO DE RADÔNIO NA ÁGUA PELO MÉTODO DE DIFUSÃO

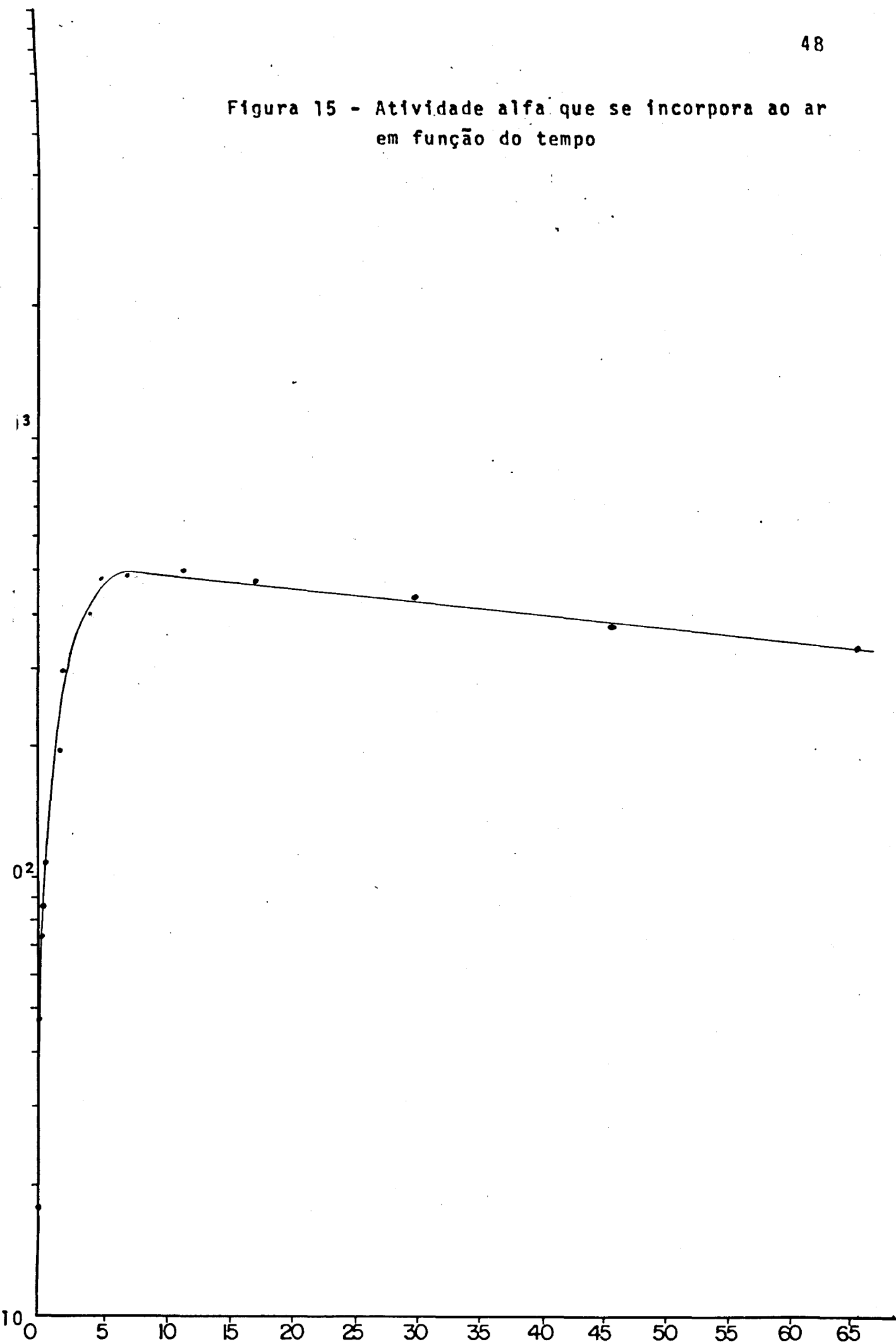
Na figura 15 apresenta-se a curva de crescimento de atividade alfa que se incorpora ao ar em função do tempo.

Na tabela 4, são listados os resultados das concentrações de 5 amostras de água subterrânea, medidas pelo método de difusão.

TABELA 4 - CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO DE AMOSTRAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEAS

AMOSTRA	CONCENTRAÇÃO DE Rn (pCi/l)
A	5993,31 ± 6,86
B	5377,86 ± 7,43
C	3803,45 ± 5,98
D	182,10 ± 6,44
E	569,91 ± 5,28

Figura 15 - Atividade alfa que se incorpora ao ar em função do tempo



4. PROGRAMA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

4.1. TÉCNICAS DE CONTROLE DE CONCENTRAÇÃO DE Rn NUMA JAZIDA

A emissão de radônio no interior de uma jazida é contínua e portanto sua concentração no ar aumenta com o tempo. Como os filhos de ^{222}Rn (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po) têm meia vida muito curta, as concentrações dos respectivos radioelementos aumentam rapidamente.

A ventilação é o método mais eficaz para controlar a concentração de Rn e produtos filhos no ar de uma jazida e conseqüentemente, a dose recebida pelo trabalhador mineiro.

A ventilação, além de propiciar um ambiente conveniente em relação a temperatura, umidade e oxigênio, remove também a poeira e gases tóxicos.

O sistema de ventilação a ser utilizado depende do tipo de mina e dos métodos de exploração aplicados.

A maioria das minas de urânio consistem de um complexo de áreas de trabalho conectadas por túneis e poços que servem como vias de transporte e condutos de ar.

O ar é circulado através da mina por sistemas de ventilação primários e secundários.

O sistema de ventilação primário consiste de ventiladores de alta capacidade, instalados na superfície ou no fundo da jazida, circulando o ar através das vias princi-

pais, tais como, vias de acesso, vias de transporte e locais ativos de trabalho; e depois o ar contaminado é descarregado na superfície, através de uma ou mais vias de retorno.

O sistema de ventilação consiste de pequenos ventiladores auxiliares instalados em zonas cegas, onde a circulação de ar principal não tem acesso.

Estes sistemas secundários são continuamente modificados para manter uma distribuição de ar adequada em todos os locais da jazida.

O projeto de um sistema de ventilação principal em uma jazida de urânio tem por objetivo determinar a vazão de ar necessária para manter a concentração de Rn abaixo dos limites operacionais de trabalho, e encontrar meios para que esta vazão chegue aos diferentes locais da mina.

Outra técnica para proteger os trabalhadores em relação às partículas alfa presentes no ar, é a utilização de respiradores ou máscaras. Esta solução, embora muito eficaz em relação a proteção contra a contaminação interna, é usada só em casos muito especiais, onde não se pode instalar nenhum sistema de ventilação. O peso dos respiradores e a dificuldade de respirar através dos filtros das máscaras, faz com que esta técnica seja impraticável para um trabalho contínuo.

Aos efeitos de reduzir a emissão de radônio, utilizam-se em jazidas modernas, revestimentos a base de emulsão de asfalto com os quais se pintam as paredes dos poços e galerias. Esta técnica é complementar a da ventilação e sua utilização deve-se basear num estudo econômico comparativo entre seu preço e a diminuição das necessidades de ventilação⁽³⁰⁾.

4.2. DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE VENTILAÇÃO

As técnicas de monitoração de radônio no ar ba seiam-se em condições de equilíbrio entre o gás e seus produtos filhos. Porém, do ponto de vista de Proteção Radiológica, e visando calcular a dose recebida pelos trabalhadores, é necessário conhecer a energia alfa potencial do ar inalado. Portanto, é necessário ter uma certa informação do grau de não equilíbrio entre o Rn e seus filhos.

Se se coloca uma amostra de ^{222}Rn puro (sem produtos filhos) dentro de um frasco fechado e analisa-se a evolução da energia alfa potencial da amostra em função do tempo, deduz-se pelas equações de Bateman a seguinte equação ⁽²⁾ :

$$f = 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot t^{0,85} \quad (1)$$

onde :

f = crescimento da energia alfa potencial .
t = tempo de permanência do Rn no frasco
(min.)

No parágrafo 1.4. , definiu-se a "concentração de radônio equivalente" (C') que pode ser então, expressa pela equação:

$$C' = f \cdot C \quad (2)$$

Substituindo a equação (1) em (2), resulta:

$$C' = 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot t^{0,85} \cdot C \quad (3)$$

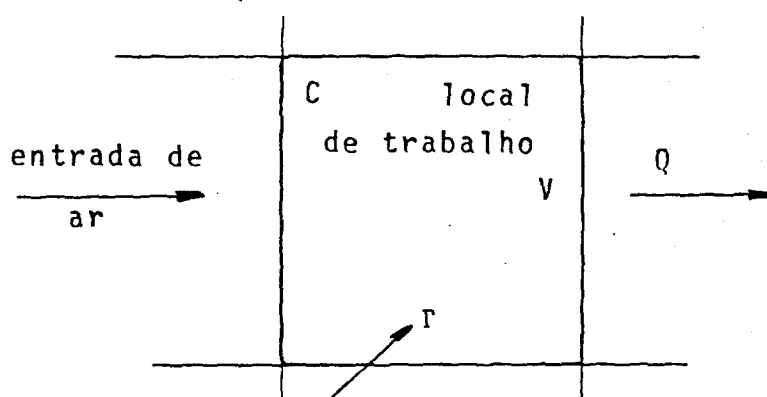
Na prática se apresentam dois casos extremos na determinação da vazão de ventilação:

- a. quando o local de trabalho está próximo à entrada de ar atmosférico
- b. quando o local de trabalho está distante da entrada de ar atmosférico

4.2.1. CASO DE UM LOCAL DE TRABALHO PRÓXIMO À ENTRADA DE AR ATMOSFÉRICO

Quando se trata de uma zona de trabalho suficientemente pequena e próxima à entrada de ar atmosférico, o tempo (t) médio de permanência do radônio, pode ser calculado como:

$$t = \frac{V}{Q} \quad (4)$$



Substituindo a equação (4) em (3), resulta:

$$C' = 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot C \cdot \left(\frac{V}{Q}\right)^{0,85} \quad (5)$$

onde :

C = concentração de Rn (pCi/l)

V = volume do local de trabalho (m^3)

Q = vazão de ventilação ($m^3/min.$)

A concentração de radônio C é dada pela expressão :

$$C = \frac{\Gamma}{Q} \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

onde Γ é o coeficiente de emissão de Rn (pCi /
/min.)

Substituindo a equação (6) em (5), resulta:

$$C' = 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot r \cdot \frac{v^{0,85}}{Q^{1,85}} \quad (7)$$

Considerando-se para esta situação, dois regimes de vazões diferentes (Q_1 e Q) obtém-se a seguinte equação

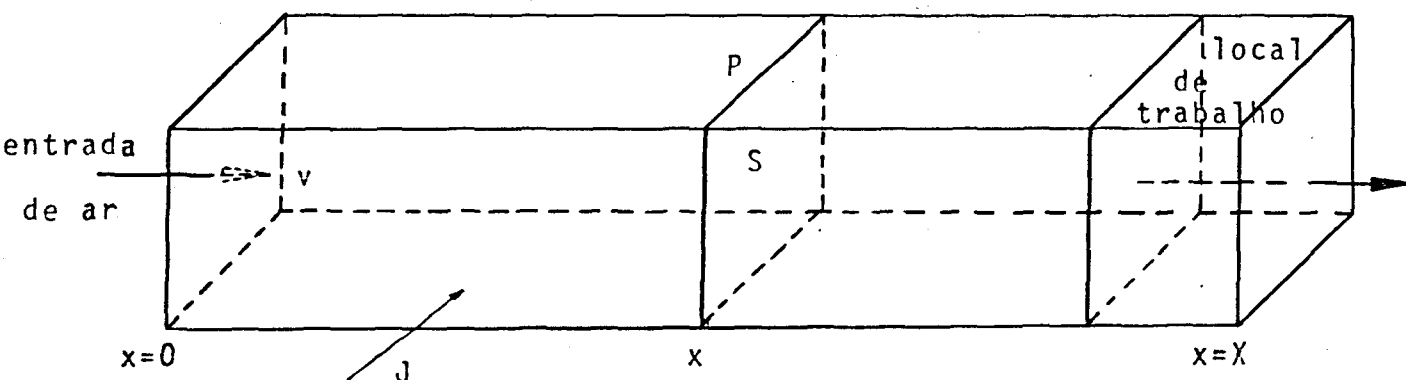
$$\frac{C_1'}{C'} = \left(\frac{Q}{Q_1} \right)^{1,85} \quad (8)$$

ou

$$Q = Q_1 \left(\frac{C_1'}{C'} \right)^{0,54}$$

4.2.2. CASO DE UM LOCAL DE TRABALHO DISTANTE DA ENTRADA DE AR ATMOSFÉRICO

Quando se trata de um local de trabalho distante da entrada de ar atmosférico, é necessário considerar o tempo médio que os átomos de radônio permanecem na jazida desde sua emanção até sua saída do local de trabalho.



O tempo médio de permanência do radônio emanado em x é :

$$t = \frac{X-x}{v}$$

onde :

X = comprimento total da galeria (m)

v = velocidade linear do ar (m/min)

Q = vazão de ventilação (m^3/min)

Neste caso, o crescimento de energia alfa potencial ao longo da galeria é dado pela equação:

$$f = \frac{1,3 \cdot 10^{-2}}{X} \int_0^{X-1} \left(\frac{X-x}{v} \right)^{0,85} \cdot dx \quad (9)$$

Desenvolvendo esta expressão, obtém-se :

$$f = 7 \cdot 10^{-3} \left[\left(\frac{X}{v} \right)^{0,85} - \frac{1}{v^{0,85} \cdot X} \right] \quad (10)$$

A concentração de radônio C , neste caso é dada pela equação :

$$C \text{ (pCi/l)} = \frac{J \cdot P \cdot X}{v \cdot S} \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

onde :

J = coeficiente de emanção de radônio (pCi/
/m².min)

P = perímetro da secção transversal da galeria
(m)

S = secção transversal da galeria (m²)

Substituindo-se as equações (10) e (11) na equação (2), obtém-se a concentração de radônio equivalente:

$$C' = 7.10^{-6} \frac{J.P.X}{V.S} \left[\left(\frac{X}{V} \right)^{0,85} - \frac{1}{X \cdot v^{0,85}} \right] \quad (12)$$

Substituindo v por seu valor, $v = \frac{Q}{S}$, tem-se

$$C' = 7.10^{-6} \cdot J.P.S^{0,85} \cdot \frac{(X^{1,85} - 1)}{Q^{1,85}} \quad (13)$$

Uma vez fixado o limite operativo (C') pela autoridade competente, e conhecida a taxa de emanação de radônio (J) da jazida em estudo, assim como sua secção transversal (S), o perímetro (P) e o comprimento da mesma; pode-se determinar a vazão (Q) da equação (13).

A taxa de emanação de radônio é determinada para cada jazida e depende do gradiente de pressão, do gradiente de concentração, dos parâmetros físicos da rocha e das operações de mineração⁽⁵⁷⁾.

4.3. CÁLCULO DE VENTILAÇÃO

Conhecidas as vazões necessárias em cada área de trabalho, o cálculo de ventilação consiste em encontrar os meios para que os volumes de ar alcancem os diferentes locais da mina. O conjunto de galerias e poços que compõe a jazida formam um circuito análogo a um circuito elétrico, podendo-se aplicar as leis de Kirchoff. Pode-se fazer manualmente ou por computador.

4.3.1. CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS

No cálculo de um sistema de ventilação é necessário conhecer com a maior aproximação, a resistência (R) de cada um dos ramos que integram o circuito.

O método mais preciso para a determinação de R é medir a vazão que circula em cada ramo e a diferença de pressão entre seus extremos (Δp)⁽⁴¹⁾⁽⁴⁶⁾.

$$R = \frac{\Delta p}{Q^2} \quad (\text{regime turbulento})$$

onde:

Δp = diferença de pressão entre os extremos (mm de água)

Q = vazão (m³/seg)

R = resistência (Kilomurgue)

Kilomurgue é a resistência de uma obra mineira que permite passar 1m³/seg com uma depressão de 1mm de água⁽⁴⁷⁾

Em galerias onde a vazão que circula é muito baixa, o fluxo de ar pode ser considerado laminar e, neste caso, o valor de R será⁽⁴¹⁾⁽⁴⁷⁾

$$R = \frac{\Delta p}{Q}$$

Se se trata de um projeto⁽⁴¹⁾⁽⁴⁶⁾, o valor de R pode ser estimado pela fórmula:

$$R = \frac{K \cdot P \cdot L}{1000 \cdot S^3}$$

onde:

R = resistência (Kilomurgue)

P = perímetro da galeria (m)

L = comprimento da galeria (m)

S = secção da galeria (m²)

K = constante de proporcionalidade

O valor de K é aproximadamente igual a:

2,5 - para montagens equipadas

- 2 - para galerias com madeiramento
- 1,3 - para galerias perfiladas
- 1 - para galerias rochosas
- 0,5 - para galerias com argamassa
- 0,3 - para tubulações

4.3.2. REGIME DE VAZÕES

O conjunto de galerias e poços de uma jazida constitui um "circuito de malhas". Desta forma a obra mineira pode ser esquematizada por um conjunto de nós unidos entre si por meio de ramos, dos quais se conhece sua resistência.

Em alguns ramos, será necessário colocar certas resistências (como por exemplo, portas) para limitar o fluxo de ar e cujo valor é necessário determinar.

Por outro lado, nas zonas de trabalho será necessário impor certas vazões calculadas segundo o item 4.2.

Por último, a resolução do circuito consiste em determinar a vazão em cada ramo e a pressão em cada nó.

Dada sua analogia com um circuito elétrico, é possível utilizar as duas equações de Kirchoff⁽⁷⁾⁽⁴¹⁾⁽⁴⁶⁾⁽⁵¹⁾.

Equações dos nós: A somatória de todas as vazões das galerias que convergem a um mesmo nó, é nula.

$$\sum Q = 0$$

Se o circuito está formado por n nós, haverá somente $(n - 1)$ equações independentes.

Equações de malhas: Ao longo de um contorno fechado qualquer, a soma algébrica das perdas de carga entre os extremos de cada um dos ramos é zero.

$$\sum \Delta p = 0$$

De todos os contornos fechados possíveis de se formar em um circuito de malhas, a teoria dos circuitos demonstra que é possível escrever um sistema de m malhas formando uma base e gozando das 2 propriedades seguintes:

- cada ramo do circuito figura pelo menos uma vez no sistema.

- as equações $\sum \Delta p = 0$ que comportam as m malhas, são independentes entre si, e quando a segunda lei de Kirchoff se verifica para essas m malhas, verifica-se para qualquer outro contorno fechado do circuito.

A teoria de circuitos de malhas mostra também que todas as bases de um circuito estão formadas pelo mesmo número m de malhas e este número está ligado pela quantidade n de nós e r de ramos.

$$m = r - n + 1$$

Há uma forma de eleger uma dessas bases: elege-se primeiro um conjunto de r ramos do circuito, chamados "ramos diretrizes", de forma tal que se suprimidas todas elas, todo par de nós continua ligado entre si. Em um circuito existem vários conjuntos de ramos diretrizes. A teoria mostra que existe, para cada um dos ramos diretrizes, uma malha e só uma que passa por esse ramo sem passar por nenhuma das outras. Tem-se também uma base de m malhas as quais contem um só ramo diretriz.

Observe-se que cada ramo do circuito figura pelo menos em uma malha de base.

A terceira lei corresponde a relação que existe em cada ramo entre Q e Δp .

Pode-se escrever 2 equações deste tipo:

$$\Delta p = RQ^2 \quad (\text{regime turbulento})$$

$$\Delta p = RQ \quad (\text{regime laminar})$$

Quando se trata de um ramo motriz (o que comporta um ventilador) e se é suficientemente curto, de tal forma que a perda de carga possa ser desprezada, a relação Δp em função de Q é dada pelas características do ventilador.

4.3.2.1. JAZIDA COM SISTEMA DE VENTILAÇÃO PRINCIPAL

Para uma jazida com sistema de ventilação principal, os problemas que apresentam mais frequentemente são:

a - Conseguir uma distribuição distinta de vazões sem que varie a vazão total. Trata-se neste caso de encontrar as resistências a introduzir no circuito que permitam a nova distribuição.

b - Aumentar a vazão do ar sem variar a potência consumida pelos ventiladores.

c - Encontrar as características do ventilador de maior potência que se deve instalar para aumentar a vazão, sem introduzir sensíveis variações das resistências da jazida.

4.3.2.2. JAZIDA EM PROJETO

Quando se trata de uma jazida em projeto ou sem ventilação principal, o problema se reduz a determinar as vazões necessárias nas frentes de trabalho, estimar as resistências das galerias e encontrar as características do ventilador a instalar.

4.3.3. MÉTODO DE CÁLCULO

Em 1936 Hardy Cross⁽⁵¹⁾ desenvolveu o método de resolução de redes de malhas elétricas complexas por interações sucessivas. Diversos autores⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁵¹⁾ baseando-se neste método estabeleceram técnicas simplificadas para a resolução de sistemas de ventilação em jazidas permitindo sua resolução manualmente com suficiente aproximação. Atualmente estes problemas são resolvidos quase exclusivamente por computadores⁽¹⁴⁾⁽⁴¹⁾.

As resistências de uma jazida em projeto podem ser avaliadas pelas curvas de C. Bertard⁽⁴⁾ em função das dimensões geométricas das aberturas e das rugosidades das superfícies.

Nas referências⁽¹⁴⁾⁽²⁵⁾⁽⁴¹⁾ são apresentados diversos exemplos numéricos de problemas de ventilação de jazidas de acordo com as necessidades numa mina de urânio.

4.4. LIMITES DERIVADOS

Denomina-se limite derivado (LD) a limites deduzidos dos limites de doses estabelecidos pelas normas de proteção radiológica e definidos de maneira tal que, o cumprimento dos LD implica em total certeza dos cumprimentos dos limites de dose.

O limite de dose para qualquer trabalhador na indústria nuclear é de 5 rem/a⁽⁴⁵⁾ e o limite derivado quando a única via de exposição é a contaminação interna proveniente da inalação de radônio e seus produtos filhos, durante 2000 h de trabalho por ano, é 30 pCi/l⁽⁴⁴⁾.

No caso das minas de urânio, como se descreveu no item 1.3., o trabalhador encontra-se exposto a radiação externa e contaminação interna.

O limite de dose, neste caso, será respeitado

se for cumprida a seguinte equação:

$$\frac{E \cdot T}{5 \text{ rem} \cdot \text{a}^{-1}} + \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot N_i}{60000 \frac{\text{pCi/h}}{1}} \leq 1$$

onde:

E = exposição média de radiação gama na jazida
(R/h)

T = tempo que o trabalhador permaneceu no interior da jazida (h/a)

C_i = concentração de radônio equivalente na área de trabalho no dia i (pCi/l)

N_i = número de horas que o trabalhador permaneceu no interior da jazida, no dia i

n = número de dias de trabalho no ano

Conhecendo o valor de E para uma jazida, o limite derivado de concentração, para N horas por dia de trabalho, pode ser calculado como segue:

$$LD(\text{pCi.a/l}) = \left(1 - \frac{E \cdot T}{5 \text{ rem} \cdot \text{a}^{-1}} \right) \cdot \frac{60000 \text{ pCi.h.l}^{-1}}{N \cdot n}$$

4.5. ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO DE VENTILAÇÃO

Como se viu no item 4.2., a energia alfa potencial de uma amostra de radônio puro aumenta proporcionalmente a $t^{0,85}$, onde t é o tempo médio de residência expresso em minutos. Para o caso de uma galeria, levando em consideração que a concentração de radônio aumenta ao longo do túnel, o crescimento de energia alfa potencial resulta proporcional a $t^{1,85}$. Numa mina, o tempo de trânsito depende unicamente da vazão de ventilação Q.

A condição ótima se alcança para um valor de dose equivalente coletiva S, tal que o incremento no custo de

proteção por unidade de dose que se iguala a diminuição do detrimento por unidade de dose.

$$\left(\frac{d X}{d S} \right)_{S^*} = \left(\frac{d Y}{d S} \right)_{S^*} \quad (14)$$

Onde, X é o custo para alcançar um dado nível de proteção, Y é o custo do detrimento envolvido na operação, e S é a dose coletiva proveniente da instalação, durante toda sua vida de operação, ou qualquer parâmetro proporcional a este.

4.5.1. ANÁLISE DIFERENCIAL DE CUSTO-BENEFÍCIO

Para os fins deste estudo pode-se considerar que os custos de proteção radiológica, para uma mina de capacidade de produção estabelecida, variam sô com a concentração de radônio equivalente que se quer manter em seu interior. Como foi dito nos parágrafos anteriores, a ventilação é o principal método para controlar essa concentração. O custo de proteção X será nesse caso proporcional a potência P consumida pelos ventiladores. (Por se tratar de grande massa de ar, os custos dos ventiladores e sua manutenção são considerados desprezíveis frente a energia elétrica consumida).

$$X = f(P) = f(Q \cdot \Delta p) = (Q^3) \quad (15)$$

onde Q é a razão de ventilação e Δp a perda de carga da mina.

O custo de proteção para duas situações diferentes segue a proporção:

$$\frac{X_1}{X} = \left(\frac{Q_1}{Q} \right)^3 \quad (16)$$

Substituindo (8) em (16):

$$X = X_1 \left(\frac{C'_1}{C'} \right)^{1,62} \quad (17)$$

Derivando a equação (17) em relação a C' , resulta:

$$\frac{d X}{d C'} = 1,62 \cdot X_1 \cdot \frac{C_1^{1,62}}{C'^{2,62}}$$

e a situação será ótima quando:

$$1,62 X_1 \cdot \frac{C_1^{1,62}}{C'^{2,62}} = \frac{d Y}{d C} \quad (18)$$

O valor de $\frac{d Y}{d C'}$ deve ser fixado pela autoridade competente do país.

Tomando-se o valor de 100 U\$/rem-homem recomendado para este tipo de estudo⁽³⁾, e um fator dosimétrico de 0,5 rem-homem/pCi.a/l, resulta:

$$\frac{d Y}{d C'} = 50 \text{ U\$/pCi.a/l} \quad (19)$$

Substituindo a equação (19) em (18) resulta o valor de C' procurado:

$$C' (\text{pCi/l}) = \left(3,24 \cdot 10^{-2} \cdot X_1 \cdot C_1^{1,62} \right)^{0,38}$$

onde X_1 é o custo anual de ventilação em U\$, para manter uma concentração de radônio equivalente em ar C_1 pCi/l

O fator dosimétrico foi deduzido considerando 15 rem/a como limite de dose no pulmão e 30 pCi/l como limite derivado de concentração.

4.5.2. CUSTOS DE VENTILAÇÃO

Na tabela 5 apresentam-se os custos de ventilação avaliados em diferentes países, junto com as concentrações de radônio equivalente no ar para as quais eles foram calculados⁽⁵⁷⁾.

Canadá e EUA avaliaram os incrementos dos custos de ventilação para reduzir os valores de C_1 , dados naquela tabela. Nos EUA, resultou um incremento de 1,23 U\$/ton. de minério para atingir 4 WLM, enquanto que no Canadá, o incremento foi de 1,07 U\$/ton., para um nível de 2 WLM⁽¹⁵⁾⁽³⁶⁾⁽³⁸⁾⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁷⁾.

4.5.3. RESULTADOS DA ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO

Na figura 16 (16a e 16b) observam-se os valores de concentração ótima de radônio equivalente C' (pCi/l) em função do produto ($X_1 \cdot C_1^{1,62}$), sendo X_1 os custos de ventilação nos diferentes países para manter uma concentração de radônio equivalente C_1 (pCi/l). No caso a (16a), considerou-se uma jazida hipotética com uma produção de 30000 ton. de minério por ano; e em b (16b), considerou-se uma jazida com uma produção de 300000 ton. de minério por ano. Em ambos os casos, o custo do detrimento foi tomado como 100US/rem-homem.

Trinta mil toneladas de minério por ano corresponde a uma mina de pequena produção como no caso de "Don

TABELA 5 - CUSTO DE VENTILAÇÃO PARA DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO NO AR; AVALIADO EM DIFERENTES PAÍSES

	FRANÇA	EUA	CANADÁ	ARGENTINA
CUSTO DE VENTILAÇÃO US/ton DE MINÉRIO *	0,45 (12 WLM)	0,40-4,00 (12 WLM)	0,52 (12 WLM)	0,20 (36 WLM)
* OS CUSTOS DE VENTILAÇÃO REFEREM-SE AO ANO DE 1972.				

Otto" na Argentina, enquanto que um módulo 10 vezes maior representa as divisões mineiras de "La Cruzille" e "La Vendée" na França.

Na figura 17 (17a e 17b), apresentam-se os valores de concentração ótima de radônio equivalente C' (pCi/l) em função do produto $X_1 \cdot C_1^{1,62}$, para um custo do d etrimento de 1000 U\$/rem-homem.

Na figura 18, mostram-se os valores das concentrações ótimas para uma dada jazida, variando o teor de urânio no minério. O valor do custo de d etrimento considerado foi de 100 U\$/rem-homem.

4.6. PROGRAMA DE MONITORAÇÃO OPERACIONAL

4.6.1. CONCEITOS GERAIS

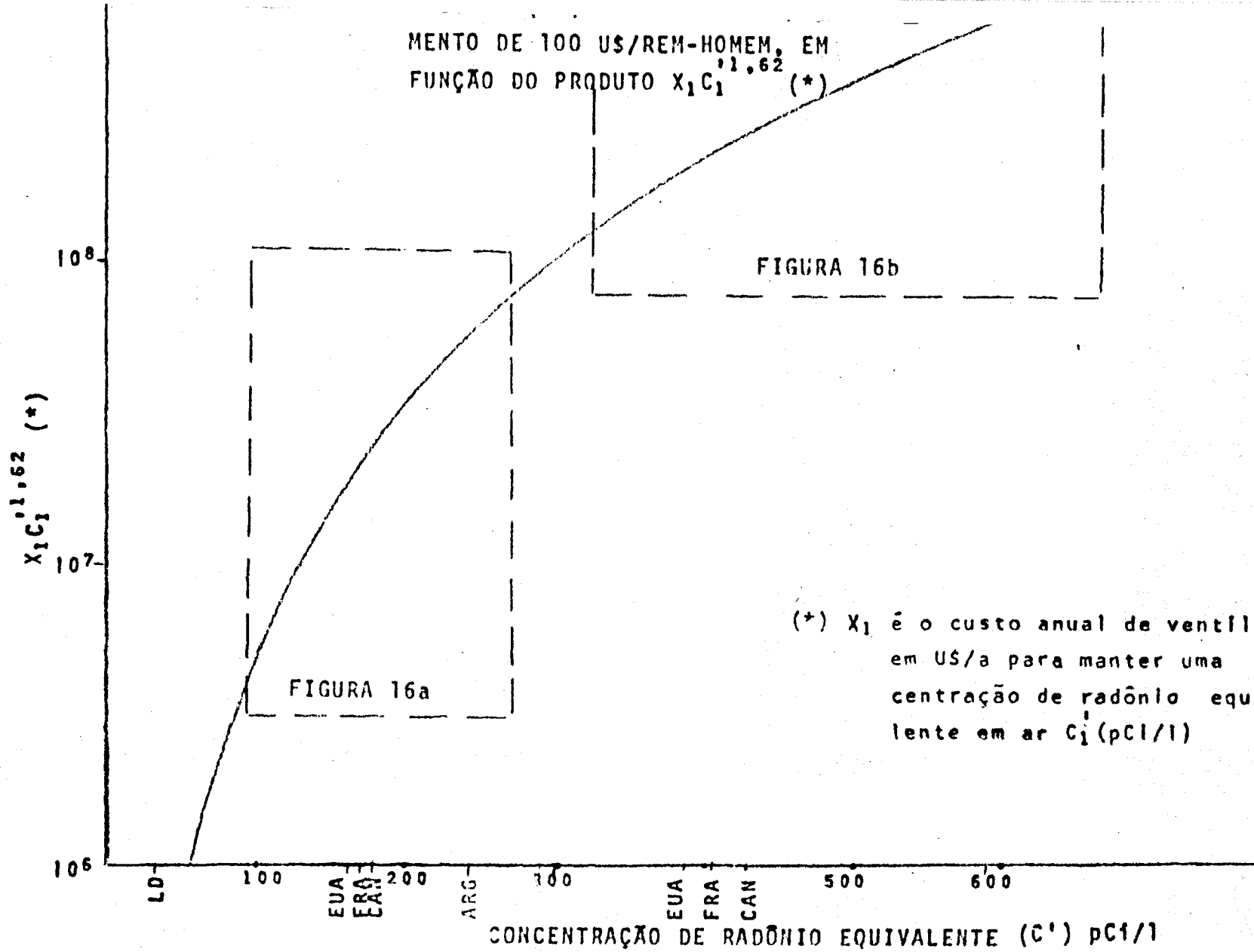
A monitoração é uma técnica utilizada pela proteção radiológica para que os trabalhadores ocupacionalmente expostos não superem os limites de dose e de incorporação estabelecidos pelas normas básicas de Proteção Radiológica, e que as doses recebidas pelos trabalhadores sejam mantidas tão baixas quanto razoavelmente alcançáveis.

Existem diversas técnicas de monitoração, as quais dividem em dois tipos principais: monitoração pessoal e monitoração de área.

Denomina-se monitoração pessoal as medidas dos níveis de exposição e contaminação, efetuadas com detectores levados no corpo do trabalhador; ou com os excretas dos trabalhadores.

A monitoração de área de trabalho, por outro lado, produz informações do meio ambiente onde se desenvolvem as operações dos trabalhadores. O objetivo desta é assegurar

MENTO DE 100 US/REM-HOMEM, EM
FUNÇÃO DO PRODUTO $X_1 C_1^{1.62}$ (*)



(*) X_1 é o custo anual de ventilação em US/a para manter uma concentração de radônio equivalente em ar C_1 (pCi/l)

FIGURA 17 - CONCENTRAÇÃO ÓTIMA DE RADÔNIO EQUIVALENTE (C') PARA UM CUSTO DO DETRIMENTO DE 1000 US/REM-HOMEM, EM FUNÇÃO DO PRODUTO $X_1 C_1^{1,62}$ (*)

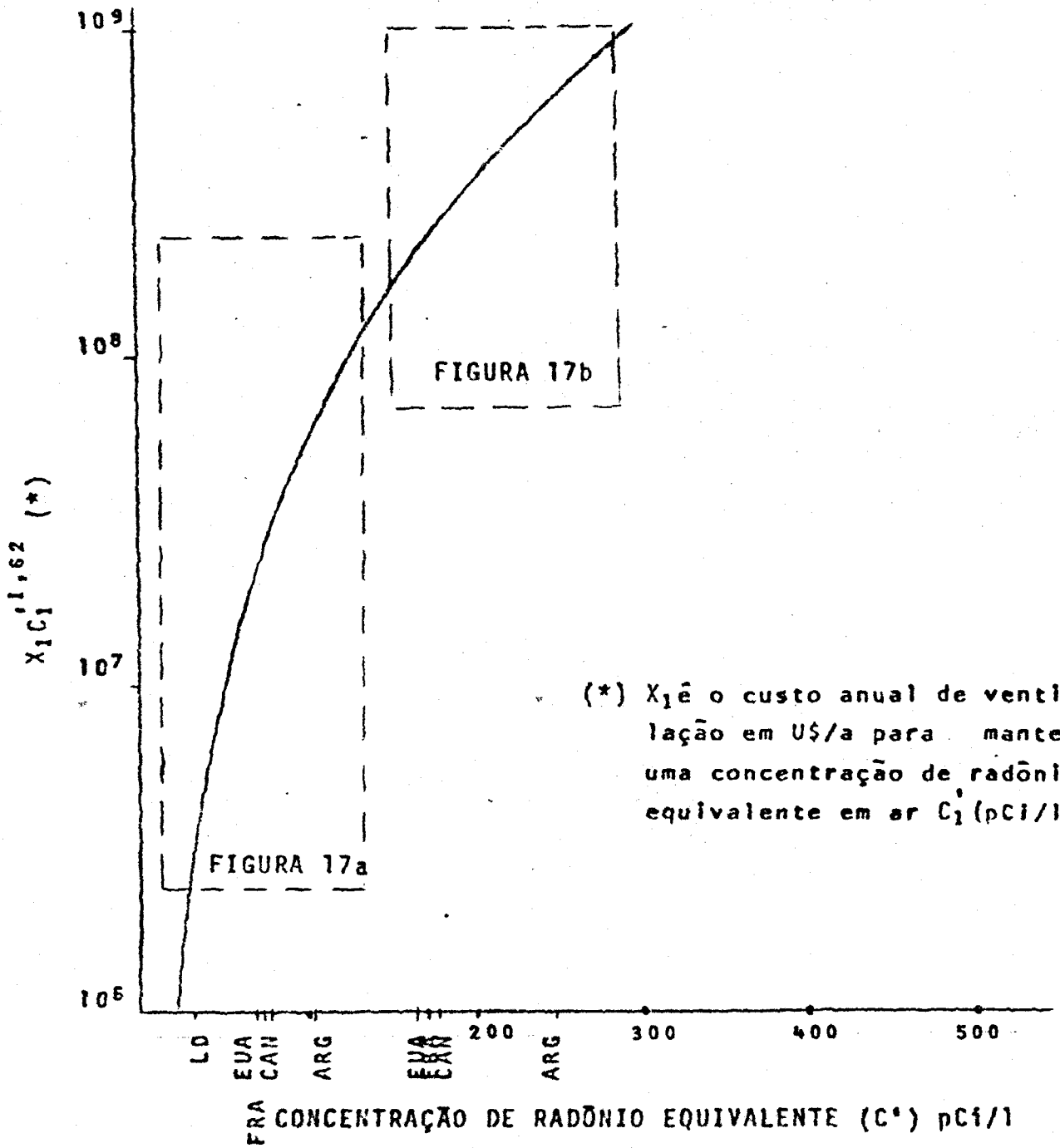
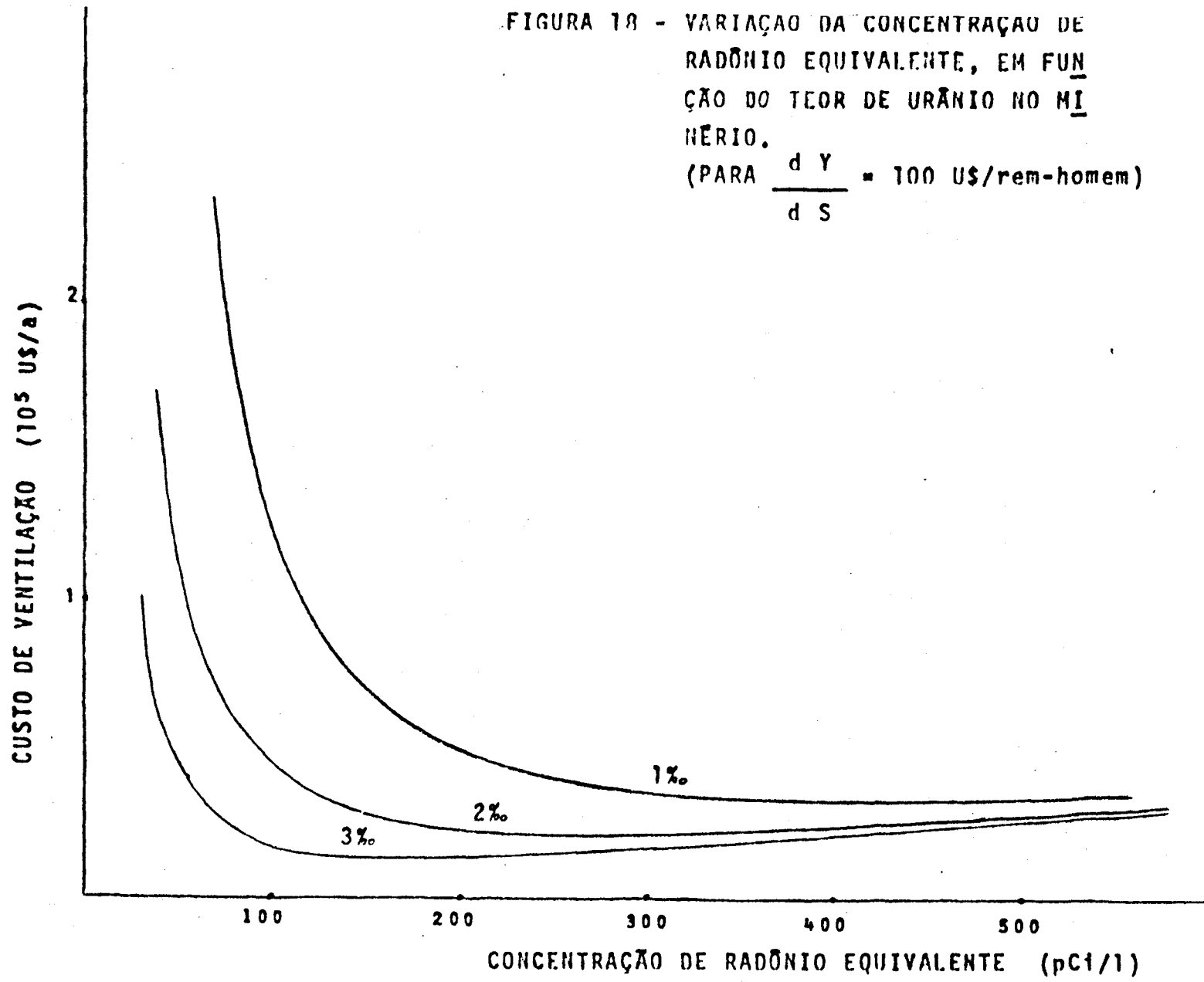


FIGURA 18 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EQUIVALENTE, EM FUNÇÃO DO TEOR DE URÂNIO NO MINÉRIO.

(PARA $\frac{dY}{dS} = 100 \text{ US/rem-homem}$)



que o meio considerado seja adequado para as tarefas rotineiras e indicar qualquer mudança que aconselhe a reavaliação das condições operativas.

Deve-se levar em conta que o conceito de monitoração implica não só na ação de medir, mas também, na interpretação dos resultados obtidos.

4.6.2. - NÍVEIS DE INVESTIGAÇÃO

Denomina-se nível de investigação a um nível de medida suficientemente importante, que justifique as investigações futuras em relação as circunstâncias que se derivam do mesmo ⁽¹⁶⁾.

A definição do nível de investigação é um método adequado para descartar toda a informação inútil que provém da monitoração. Deve-se destacar que em geral, a maioria dos dados obtidos da monitoração confirmam que as condições de trabalho são satisfatórias e portanto, não é necessário qualquer ação ou contramedida. Consequentemente, é prático e conveniente discriminar toda essa informação, conservando só aquela que realmente tem algum interesse.

Esta discriminação é possível comparando os valores monitorados com os níveis de investigação e descartando os menores.

Ao fixar um nível de investigação deve-se assegurar que as doses ou incorporações decorrentes de situações que implicam em níveis que estão abaixo do nível de investigação, estarão também abaixo dos 3/10 dos limites de dose estabelecidos pelas normas de proteção radiológica ^{(16) (45)}.

4.6.3. MONITORAÇÃO DA RADIAÇÃO EXTERNA

A exposição externa a que se encontram submetidos os trabalhadores de uma jazida de urânio é geralmente baixa. Na maioria das minas o grau de minério é da ordem de 1%, e as taxas de exposição gama de alguns décimos de mR/h⁽⁴⁴⁾.

A monitoração individual dos trabalhadores não é necessária, como se mostrou no item anterior, quando as doses anuais não excedem 3/10 do limite de dose.

Quando as taxas de exposição média na mina forem menores que 0,5 mR/h, as inspeções rotineiras de área devem ser realizadas uma ou duas vezes por ano⁽⁴⁴⁾.

Em áreas na jazida cuja exploração é recente, serão necessárias inspeções especiais para verificar se os níveis anteriores não foram modificados significativamente.

Só no caso de minas onde o minério é excepcionalmente rico (superior a 1%), deve-se recorrer a monitoração pessoal, podendo-se utilizar, neste caso, filmes dosimétricos ou dosímetros termoluminescentes⁽⁴⁴⁾.

4.6.4. MONITORAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO INTERNA

Sendo a contaminação interna o maior risco que enfrenta um trabalhador de uma mina de urânio, as técnicas de monitoração devem ser cuidadosamente analisadas.

A monitoração de área é a mais utilizada como técnica rotineira. É necessário fazer um levantamento diário das concentrações de radônio no ar, nas áreas de trabalho e dos trabalhadores envolvidos. Os locais de amostragem devem ser selecionados visando obter dados os mais representativos possíveis das condições reais de trabalho.

A monitoração individual por meio de monitores pessoais requer o uso de equipamentos especiais de amostragem

de ar, o que faz com que esta técnica seja considerada impraticável.

A monitoração por análise de excretas deve ser realizada cada 3 meses em cada trabalhador mineiro, enviando as amostras a um laboratório especializado. O objetivo desta técnica é controlar a contaminação interna decorrente da inalação de aerossóis de urânio.

4.6.5. CONTROLE DA DOSE RECEBIDA PELO TRABALHADOR

O cálculo da dose recebida pelo trabalhador deve ser feito levando em consideração as monitorações rotineiras de ar e os levantamentos radiométricos no interior da jazida. Para isso deve-se identificar diariamente as pessoas que ingressarem na mina e seu tempo de permanência.

O registro de dose deve ser feito mensalmente, observando que nesse prazo não se supera 1/12 do limite anual de dose.

A dose mensal recebida por cada trabalhador deverá ser calculada pela seguinte expressão:

$$D_m = \left[\frac{5 \text{ rem}}{60000 \text{ pCi.h/l}} \cdot \sum_{i=1}^n h_i C'_i \right] + E \cdot \sum_{i=1}^n h_i \leq 0,416 \text{ rem}$$

onde:

- h_i = número de horas de trabalho no dia i (h)
- C'_i = concentração de radônio equivalente na área de trabalho no dia i (pCi/l)
- E = exposição média nas áreas de trabalho (R/h)
- n = número de dias de trabalho no mês n .

Porem pode-se autorizar uma exposição maior

que 0,416 rem/mês em casos especiais, sempre que a situação seja corrigida num prazo curto, e que a dose anual não supere o limite de dose estabelecido pelas normas.

4.7. PROGRAMA DE GESTÃO DE RESÍDUOS RADIOATIVOS

4.7.1. PRODUÇÃO

Como consequência da exploração mineira aparecem resíduos líquidos, sólidos e gasosos contendo radionuclídeos da família do urânio; principalmente o ^{238}U , o ^{230}Th , o ^{226}Ra , o ^{222}Rn e os filhos do radônio de meia vida curta ⁽⁵⁾(⁵⁰)(⁵⁸).

4.7.1.1. RESÍDUOS LÍQUIDOS

Os resíduos líquidos são águas provenientes de drenagens da jazida ou das operações da perfuração e sondagem. O maior volume se origina do bombeamento das águas subterrâneas que inundam as zonas mineralizadas.

A maioria do ^{226}Ra é insolúvel e permanece como resíduo sólido. Uma pequena fração, menor que 1%, pode ser dissolvida. A concentração de rádio nos efluentes de uma mina pode alcançar de 250 a 500 pCi/l ⁽³⁹⁾(⁵⁰).

Até 50% do tório contido no minério pode ser dissolvido em soluções ácidas. Porém, as quantidades encontradas na água drenada de uma mina são, na maioria dos casos, desprezíveis. Outros radionuclídeos como ^{238}U , ^{223}Ra , ^{227}Th , ^{227}Ac , ^{210}Pb , e ^{210}Po podem estar presentes nos efluentes líquidos em quantidades menores.

O ^{226}Ra apresenta-se sempre como o radionuclídeo que do ponto de vista radiossanitário é o mais significativa-

tivo nos resíduos líquidos⁽⁴⁸⁾.

4.7.1.2. RESÍDUOS SÓLIDOS

A principal fonte de produção de resíduos sólidos encontra-se formada por quantidades de minério de baixa concentração de urânio que acompanha a exploração, cuja recuperação não se apresenta rentável.

Mais de 70% da atividade contida no mineral é insolúvel, permanecendo como resíduo sólido⁽⁵⁸⁾ mesmo depois dos processos de recuperação do urânio.

Os sistemas de tratamento de efluentes líquidos fornecem também, resíduos sólidos com concentrações altas de ^{226}Ra , em quantidades menores.

4.7.1.3. RESÍDUOS GASOSOS

O ^{222}Rn é a principal fonte de resíduos gasosos. É emanado de forma contínua para o interior da jazida e por decaimento, aparecem aerossóis radioativos submicrônicos contendo quantidades significativas de ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , e ^{214}Po . As partículas contendo os emissores alfa de meia vida longa como ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , e ^{210}Pb , são formadas como consequência das tarefas de exploração, sendo que em virtude de seus tamanhos relativamente grandes, a maior parte se deposita no interior da jazida.

4.7.2. TRATAMENTO E ELIMINAÇÃO

4.7.2.1. RESÍDUOS LÍQUIDOS

Os efluentes líquidos que aparecem como consequência da exploração de uma mina de urânio devem ser, quando possível, armazenados em pequenas lagoas artificiais provocando a evaporação natural da água. A área de tratamento deve encontrar-se dentro do perímetro destinado à jazida, sem acesso aos membros do público.

Os sedimentos destas lagoas devem ser removidos periodicamente e tratados como resíduos sólidos. A frequência de remoção deve ser governada pelo aumento das taxas de exposição nas proximidades da área de tratamento.

As águas de drenagem podem ser também utilizadas para inundar os níveis inferiores já explorados da jazida, obtendo-se desta forma, uma diminuição na emissão do radônio proveniente dessas áreas, de um fator 25⁽⁵⁸⁾.

4.7.2.2. RESÍDUOS SÓLIDOS

Os resíduos sólidos devem ser utilizados para recheiar as áreas já exploradas da jazida. Desta forma, consegue-se diminuir a emissão de radônio, tanto dos resíduos como das áreas de estocagem.

Nos casos em que esta tarefa for difícil de se conseguir num prazo razoável, e quando não for possível sua disposição em áreas isoladas em relação ao público e trabalhadores, o recobrimento dos resíduos com terra se apresenta como a técnica de tratamento mais adequada. Deve-se levar em consideração que a emissão de Rn diminui de um fator 2 para cada metro de recobrimento⁽⁵⁸⁾.

4.7.2.3. RESÍDUOS GASOSOS

Os gases e aerossóis radioativos produzidos no interior da jazida são diluídos em grandes massas de ar de

ventilação.

As baixas concentrações alcançadas com a diluição e a meia vida curta dos radionuclídeos presentes, não justifica nenhum tratamento adicional para os efluentes gasosos, antes de serem eliminados no ambiente.

As áreas de estocagem do minério explorada são sempre a céu aberto e as concentrações de radônio no ar não atingem níveis altos que possam representar riscos especiais do ponto de vista radiossanitário.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1. DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS DE MONITORAÇÃO

5.1.1. DETECÇÃO DE RADÔNIO NO AR

As câmaras de cintilação desenvolvidas apresentam a grande vantagem de serem construídas com erlenmeyers comerciais, de fácil obtenção no mercado, e ao mesmo tempo apresentarem um baixo ruído de fundo, como mostra a ta be la 1, e com uma eficiência de contagem (23,43%) aceitável para os fins de proteção radiológica. Estas câmaras podem ser comparadas com as câmaras de cintilação Nardeaux, do tipo comercial que, segundo as especificações de catálogo, apresentam uma eficiência de aproximadamente 30%.

Alem disso, a técnica utilizada para a fixação de ZnS(Ag) na parede interna da câmara é simples, permitindo a recuperação do frasco quando o ruído de fundo aumenta significativamente, como consequência da contaminação por partículas de meia vida longa.

Das técnicas de amostragem estudadas, pode-se deduzir que a contaminação das câmaras por partículas de meia vida longa é desprezível quando se utilizam filtros absolutos. Porém a técnica de amostragem por agitação da câmara no local de trabalho é mais simples e rápida. Não foi possível estudar comparativamente estas técnicas por não ter tido acesso a uma jazida em operação, onde se pudesse analisar com mais detalhe a vida útil dos filtros e das câmaras, para

cada caso em particular.

5.1.2. DETECÇÃO DE RADÔNIO NA ÁGUA

5.1.2.1. MÉTODO DE EMANAÇÃO

As experiências de arraste de radônio da água por borbulhamento de um gás mostraram que com 30 l de ar ou 20 l de argônio, alcança-se um rendimento superior a 99%.

Alem disso, observou-se que com a vazão do gás de arraste de 1 l/min, obtém-se o maior diâmetro de bolhas, sem que sejam desprendidas gotículas da superfície da amostra.

O limite de detecção de todo o sistema com 95% de confiança, é de 14,5 pCi/l.

Levando em consideração que as concentrações de radônio em água que são significativas, do ponto de vista radiossanitário são superiores a 1000 pCi/l, conclue-se que o método desenvolvido é aceitável para as necessidades de proteção radiológica.

O sistema permite também determinar a concentração de rádio dos efluentes líquidos a partir da concentração de radônio. Para isso deve-se colocar a amostra no frasco borbulhador, mantendo-o fechado durante 20 dias até atingir o equilíbrio secular entre rádio e radônio.

Como consequência dos resultados obtidos, o método foi padronizado da seguinte maneira:

- volume da amostra de água = 250 ml
- vazão do gás de arraste = 1 l/min
- gás de arraste: argônio ou ar
- tempo de borbulhamento do gás de arraste:

para o argônio = 20 min

para o ar = 30 min

- massa de carvão ativo = 23 g
- temperatura de aquecimento do carvão ativo =
= 350°C
- tempo de aquecimento do carvão ativo = 20min

5.1.2.2. MÉTODO DE DIFUSÃO

Este método permite determinar a concentração de radônio na água, sem necessidade de recorrer a elementos nem sempre fáceis de serem obtidos numa jazida ou nos meios "in situ", como gelo-seco, carvão ativo, etc. Além disso, o limite de detecção é menor que no caso do método de emanção (1,5 pCi/l para 95% de confiança).

O tempo de 5 horas para atingir o equilíbrio entre as concentrações no ar e na água não apresenta dificuldades maiores, se se leva em consideração que em qualquer dos métodos em uso, é necessário esperar 3 horas no mínimo.

5.2. PROGRAMA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Apesar de que, em 1959 a ICRP recomendou como LD para 2000 h de trabalho por ano, 30 pCi/l de radônio em equilíbrio com seus filhos, varios países membros da IAEA e EURATOM mantiveram o limite anterior de 300 pCi/l, marcando uma tendência a reduzi-lo a um terço desse valor. Esta atitude deu lugar a uma série de expectativas que assinalavam um certo exagero na avaliação feita pela ICRP e que o valor de 100 pCi/l seria o correto. Em 1971, os EUA fixou o valor limite para trabalhadores de minas de urânio em 4 WLM/ano (aproximadamente 30 pCi/l), o que parecia impraticável para muitas jazidas existentes. Com a reafirmação em 1976 por parte da

ICRP de sua recomendação anterior, desaparecem aquelas expectativas e surge como medida prioritária para a proteção radiológica das minas de urânio, em diversos países, acondicionar suas instalações seguindo os princípios básicos descritos no item 1.1.

As figuras 16 e 18 mostram as concentrações ótimas de radônio equivalente resultantes de uma análise do tipo custo-benefício como recomenda a ICRP. Observa-se que a concentração ótima cresce com o aumento da capacidade de produção da jazida e diminui com a riqueza do minério.

Tomando os menores custos de ventilação, as concentrações calculadas para minas pequenas encontram-se mais de 5 vezes acima do LD recomendado pela ICRP, e até mais de 10 para jazidas maiores.

Adotando um valor de 1000 U\$/rem-homem, o que parece pouco realista em qualquer parte do mundo ⁽³⁾ ⁽⁸⁾ ⁽¹⁹⁾ ⁽⁴⁹⁾ e até incompatível com uma análise de otimização, os valores de C' mantem-se sensivelmente acima dos 30 pCi/l. (fig. 17)

A premissa de que os indivíduos não devem receber doses anuais superiores aos limites de dose fixados pela ICRP é a condição limite no caso de minas subterrâneas de urânio, como foi demonstrado neste trabalho. O estudo de otimização segundo uma análise custo-benefício leva a valores de concentração de radônio no ar significativamente maiores que o limite de 30 pCi/l, qualquer que seja o custo de ventilação (aqui consideram-se valores de 1972) e qualquer que seja o valor que a autoridade fixe ao detrimento produzido pela radiação, dentro de limites razoáveis.

Em muitas jazidas existentes hoje no mundo, manter uma concentração de radônio no ar abaixo de 30 pCi/l demandará investimentos em proteção radiológica 5 a 20 vezes superiores aos atuais, o que tornará alguma delas antieconômicas. Nestes casos devem considerar-se outras técnicas para diminuir a concentração de radônio no ar, como a impermeabili

zação das áreas de maior emanção ou a ventilação sobrepresão (quando ela se faz a subpressão). O revezamento do pessoal que trabalha no fundo da mina é outra técnica que deve ser levada em conta. A análise de todas estas opções levarão a uma otimização dos custos de proteção da jazida.

O gravame que representa aceitar o valor recomendado pela ICRP pode ser minimizada sensivelmente nas minas novas, sempre que os custos de proteção radiológica sejam analisados nos estudos preoperacionais e levados em consideração para a seleção do método de exploração e o dimensionamento da jazida. Desde este último ponto de vista, deve balancear-se o incremento de custos representados pela construção de galerias de maior diâmetro (d) contra a diminuição da potência de ventilação, que decresce com d^5 . O aumento da seção das passagens de uma mina pode reduzir consideravelmente os custos de ventilação, especialmente quando se movimentam grandes massas de ar.

O LD de 30 pCi/l foi deduzido para um limite de dose no órgão crítico de 15 rem. Porém, de acordo com a publicação nº 26 da ICRP, o conceito de "órgão crítico" foi eliminado e substituído neste caso pela dose equivalente no pulmão que corresponde a 5 rem em todo o corpo. Dessa forma a dose permissível no pulmão eleva-se a 40 rem e então, o LD deveria situar-se em torno de 80 pCi/l. Este valor, se bem que não modificará o que foi dito anteriormente a respeito das análises de otimização na maioria das jazidas, reduzirá de forma considerável os custos de proteção radiológica e do ponto de vista técnico, será muito facilitada a implantação do sistema de ventilação principal.

6. SUGESTÕES

Os métodos de detecção de radônio no ar e as técnicas de monitoração apresentadas neste trabalho, deveriam ser testados numa jazida em operação e os dados obtidos comparados com os resultados do contador de corpo inteiro dos trabalhadores mineiros.

Dever-se-ia também medir o coeficiente de emnação de radônio de uma jazida e estudar seu comportamento quando houver mudanças de alguns parâmetros físicos, tais como: temperatura exterior e interior da mina, gradiente de pressão, etc.

Por último, um programa de computação em linguagem FORTRAN IV, deveria ser elaborado para o cálculo de ventilação em minas de urânio, baseado no programa utilizado pelo C.E.A. (Commissariat à L'Energy Atomique)⁽¹⁴⁾.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BENINSON, D.J. Principios básicos de protección radiológica. Buenos Aires, Comisión Nacional de Energía Atómica, 1974. (Apostila).
2. _____. Radiation protection in uranium mines. [s.n.t.]. (Apostila).
3. _____ et alii. Radiation protection requirements in the limitation of the release of radioactive effluents: Buenos Aires, Comisión Nacional de Energía Atómica, 1977. (Apostila).
4. BERTARD; C. Comment estimer à partir de leurs dimensions géométriques la résistance à l'aérage des ouvrages miniers. [s.L.] Centre d'Etudes et Recherches des Charbonnages de France, mar. 1962. (Publication CERCHAR, 127).
5. BONHOTE; P.A. Environmental problems posed by wastes from the uranium milling industry. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. Uranium ore processing: proceedings of an advisory group meeting held in Washington, D.C., 24-26, November 1975. Vienna, 1976. p.119-25 (Panel proceedings series).
6. CHAINEAUX, L. & BERTARD; C. Résolution à la règle à calcul des problèmes des réseaux d'aérage. [s.n.t.] (Publication CERCHAR, 1259).
7. _____ & SEELEMANN, D. Méthode de mesure et d'étude des réseaux d'aérage dans les travaux du fond. III. Résolu-

- tion des problemes d'aéragé par le calcul. |s.n.t.|. p. 517-31.
8. COHEN, J.J. Plowshare: new challenge for the health physicist. Hlth. Phys., 19(5):633-9, Nov. 1970.
 9. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Rio de Janeiro. Normas básicas de proteção radiológica: Rio de Janeiro, 1963. (Resolução CNEN-6/73).
 10. DAMON, P.E. & HYDE, H.I. Scintillation tube for the measurement of radioactive gases. Rev. Scient. Instrum., 23(12):766, Dec 1952.
 11. DILLA, M.A. Van & TAYSUN, D.H. Scintillation counter for assay of radon gas. Nucleonics, 13(2):68-9, Feb. 1955.
 12. DUNSTER, H.J. & McLEAN, A.S. The use of risk estimates in setting and using basic radiation protection standards. Hlth. Phys., 19(1):121-2, Jul. 1970. (Abstracts of papers presented at the Second Congress of International Radiation Protection Association, Brighton, England, 3-8 May 1970).
 13. EVANS, R.D. Technique for the determination of the radioactive content of liquids. Rev. Scient. Instrum., 4:216-22, Apr. 1933.
 14. FAGNANI, F. et alii. L'optimisation de la radioprotection: approche methodologique dans le cas d'une mine d'uranium française. Fontenay-aux-Roses, France, Centre d'Etudes Nucléaires, 1976. (CEA-R-4787).
 15. FRANÇOIS, Y. et alii. Incidence des normes de radioprotection dans le marché de l'uranium. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. Radon in uranium mining. Vienna, 1975. p.15-36.
 16. GONZALES, A.J. Protección radiologica ocupacional. I. Monitoraje en la proteccion radiologica ocupacional. Bue-

nos Aires, Comision Nacional de Energia Atomica, 1974. (Apostila do curso de funcionamiento y operacion de la Central Nuclear en Atucha). (CNA/14).

17. HAMARD, J. et alii. La concentration maximale admissible du radon 222 dans l'air. Gif-sur-Yvette, CEN Saclay, Sep. 1968. (CEA-R-3583).
18. HARRIS, W.B. et alii. Portable radon detector for continuous air monitoring. Arch. Ind. Health, 16:493-8, Dec. 1957.
19. HEDGRAN, A. & LINDELL, B. PQR-a special way of thinking. Hlth. Phys., 19(1):121, Jul. 1970. (Abstracts os papers presented at the "Seconde Congress of International Radiation Protection Association, Brighton, England, 3-8 May 1970).
20. HIGGINS JR., F.B. et alii. Methods for determining radon-222 and radium-226. J. Am. Wat. Ass., 53:63-74, Jan. 1961.
21. HOLADAY, D.A. et alii. Control of radon and daughters in uranium mines and calculations on biological effects. Am. Ind. Hyg. Assoc. Quart., 17:405-10, 1956.
22. HORROCKS, D.L. & STUDIER, M.H. Determination of radioactive noble gases with a liquid scintillator. Anal. Chem., 36(11):2077-9, Oct. 1964.
23. HUDGENS, J.E. et alii. The determination of radium or radon in gases, liquids, or solids. New Brunswick, N.J., New Brunswick Laboratory, May 10, 1950. (NYO-2010).
24. HURSH, J.B. The radium content of public water supplies. Rochester, N.Y., Rochester University, May 1953. (UR-257).
25. INFLUENCE du mode d'aerage sur le degagement du radon dans une mine d'uranium laboratoire. [s.l.][s.ed.], 1972. (Apostila).

26. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. Inhalation risks from radioactive contaminants. Vienna, 1973. (Technical reports series, 142).
27. _____. Manual on radiological safety in uranium and thorium mines and mills. Vienna, 1976. (Safety series, 43).
28. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Estocolmo. Implications of Commission recommendations that doses be kept as low as readily achievable. Oxford, Pergamon, 1973. (A report by Committee 4 of the International Commission on Radiological Protection). (ICRP-Pub.222).
29. KOBAL, I. & KRISTAN, J. Determination of ^{222}Rn concentration in hot spring waters using a scintillation chamber. Radiochem. Radioanal. Letters, 10(5):291-5, 1972.
30. KOEHMTEDT, P.L. et alii. Use of asphalt emulsion sealants to contain radon and uranium in uranium tailings. [s.l.] [s.ed.], Jul. 1977. (BNWL-2190).
31. LEDERBERG, J. Squaring an infinite circle: radiobiology and the value of life. Bull. Atom. Scient., 27(7):43-5, Sep. 1971.
32. LOVE, S.K. Natural radioactivity of water. Ind. Eng. Chem., 43:1541, 1951.
33. LUCAS, H. F. Improved low-level alpha-scintillation counter for radon. Rev. Scient. Instrum.; 28(9):680-3, Sep. 1957.
34. LUCAS JR, H.F. : fast and accurate survey technique for both radon-222 and radium-226. In: ADAMS, J.A.S., ed. The natural radiation environment. Chicago, Ill., University, 1964. p.315-29.
35. MACIEL, A.C. & CRUZ, P.R. Perfil analítico do urânio. Rio

de Janeiro, Departamento Nacional de Produção Mineral, 1973. (Boletim [do] Departamento Nacional de Produção Mineral, 27).

36. MCGNLEY, F.E. Effects of stricter radiation exposure standards on uranium costs and ore reserves. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Vienna. Radon in uranium mining. Vienna, 1975. p.3-14.
37. MONEY, M. & HEATON, B. The effect of humidity on the detection of radon. Health. Phys., 31(5):456-7. Nov.1976.
38. PALACIOS, E. & MELONE, O. Analisis tecnico economico para la puesta em funcionamiento de un sistema de ventilacion principal en el yacimiento "don Otto" de la Provincia de Salta. Buenos Aires, Comision nacional de Energia Atomica, 1973. (CNEA-RS-49/121).
39. PATENT
ESTADOS UNIDOS. U.S.Patent 3.988,414. Treatment of waste water from uranium ore preparation. KLICKA, V. et alii. Oct. 26, 1976.
40. POHL, E. & POHL-RULING, J. Determination of environmental or occupational ^{222}Rn in air water and ^{226}Ra in water with feasible and rapid methods of sampling and measurement. Health. Phys., 31(4):343-8, Oct. 1976.
41. POLLES, C, Le & DUMAS, M. Calcul des réseaux mailles d'aerage sur ordinateur gamma 10. Bull. Gen. Min., (20), 1968|.
42. PRADO, L:C. do. A radioatividade das fontes hydrominerais. São Paulo, Escola Profissionaes Salesianas, 1938. (Separata dp annuario da Escola Polytechnica para o anno de 1937).
43. RAABE, O.G. & WRENN, M.E. Analysis of the activity of radon daughter samples by weighted least squares. Health. Phys., 17(4):593-605, Oct. 1969.

44. RADIATION protection in uranium and other mines. Annals ICRP, 1(1), 1977. (ICRP publication, 24).
45. RECOMENDATIONS of the International Commission on Radiological Protection. Annals ICRP, 1(3), 1973. (ICRP publication, 26).
46. REUNION d'études [sur] l'aérogène dans les mines d'uranium du C.E.A., des 22 et 23 Février 1967. [s.l.], Commissariat à l'Énergie Atomique, [s.d.].
47. RIECK, H.G. & PERKINS, R.W. Radium determinations in soil vegetation and water by radon counting. Washington, D.C., United States Atomic Energy Commission, 1956. (HW-32210 (Rev.)).
48. RYAN, R.K. & ALFREDSON, P.G. Liquid wastes from mining and milling of uranium ores—a laboratory study of treatment methods. [s.l.] Australian Atomic Energy Commission, 1975. (AAEC/E394).
49. SAGAN, L.A. Human costs of nuclear power. Science, 17(4048):487-93, Aug. 1972.
50. SEARS, M.B. et alii. Radioactive waste treatment costs environmental impact for milling uranium ores. Trans. Amer. Nucl. Soc., 24:94-5, Nov. 1976.
51. SEELEMANN, D. Calculs d'aérage [s.n.t.] [Separata].
52. SELIGER, H.H. Liquid scintillation counting of α -particles and energy resolution of the liquid scintillator for α - and β -particles. Int. J. appl. Radiat. Isotopes, 8 (1):29-34, 1960.
53. SMITH, A.Y. et alii. Radon methods in uranium exploration. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. Exploration for uranium ore deposits. Vienna, 1976. p.185-211.

54. SWARTZ, H.A. Light filter for reduction of background in liquid scintillation counting. Anal. Chem., 36(11): 2080-3, Oct. 1964.
55. TABLE I: costs of radiation control in uranium mines. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. Radon in uranium mining: proceedings of a panel on ... held in Washington, D.C., 4-7 September 1973. Vienna, 1975. p.59.
56. THOMAS, J.W. & LECLARE, P.C. A study of the two-filter method for radon-222. Hlth. Phys., 18(2):113-22, Feb. 1970.
57. THOMPSON, R. Slipping the pill to radon daughters: or how to keep radioactive emanations down while lowering ventilation costs. Can. Min. J., :84-97, Sep. 1974.
58. UNITED NATIONS, New York. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Annex D: Nuclear power production. [s.l.], United Nations, Feb. 1977. (A/AC. 82/R.343).