

# METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM MONITOR DE GASES NOBRES

Marcos R. de Carvalho e Adalberto J. Soares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)  
Caixa Postal: 11049, 05422-970, São Paulo, SP, Brasil  
e-mail: carvalho@net.ipen.br  
e-mail: ajsoares@net.ipen.br

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para determinar a eficiência de um monitor de gases nobres. Os valores de eficiência, determinados teoricamente, foram comparados com dados experimentais, utilizando-se fontes pontuais emissoras de partículas  $\beta$ , com energias da ordem de grandeza das partículas emitidas pelo  $^{133}\text{Xe}$ , principal gás nobre presente em situações de acidente em instalações nucleares.

## INTRODUÇÃO

Em instalações nucleares, a monitoração de gases nobres, cuja principal característica é o fato de serem inertes, não sendo retidos com eficiência por filtros, é uma necessidade regulamentada pelos órgãos de licenciamento em situações de acidentes, principalmente no caso do  $^{133}\text{Xe}$ .

Uma das formas de medir a concentração destes gases é por intermédio da contabilização de sua concentração em um volume constante, utilizando-se detectores para radiação  $\beta$ .

A concentração ( $C$ ) de uma fonte radioativa gasosa emissora de partículas  $\beta$ , dispersa em um volume ( $V$ ), medida a partir das contagens obtidas com um detector, pode ser expressa por:

$$C = \frac{\text{Cont}_{total}}{\eta \cdot V} \quad (1)$$

onde:

- $\text{Cont}_{total}$  = Taxa de contagem total (fonte - BG); e
- $\eta$  = Eficiência do sistema de medida.

Da equação (1), conhecendo-se a taxa de contagem, para obter a concentração torna-se necessário determinar a eficiência ( $\eta$ ) do sistema.

Neste trabalho a eficiência foi determinada a partir de um cálculo teórico, e confirmada através de dados obtidos em uma bancada experimental, utilizando-se fontes pontuais emissoras de partículas  $\beta$  [1].

Na bancada experimental foram escolhidas fontes pontuais de  $^{45}\text{Ca}$  e  $^{204}\text{Tl}$ , por emitirem partículas  $\beta$  com energias semelhantes as partículas emitidas pela fonte de  $^{133}\text{Xe}$ .

## EFICIÊNCIA CALCULADA

Dado um detector cilíndrico, com espessura bem menor que o raio, e um recipiente cilíndrico preenchido por uma fonte gasosa emissora de partículas  $\beta$ , sendo o detector adaptado na direção axial em uma das extremidades do recipiente, para obtermos a eficiência do sistema assumimos que:

1. A concentração do gás é considerada constante sobre todo o volume de medida;
2. As emissões de partículas  $\beta$  são isotrópicas; e
3. O espalhamento de partículas  $\beta$  nas paredes do volume é desprezado.

Tais considerações não fogem muito a realidade do caso experimental, se considerarmos que as dimensões do volume de amostragem são relativamente pequenas.

A partir destas condições a eficiência do sistema fonte-detector se resume à apenas três fatores:

- fator geométrico ( $G$ );
- fator de auto-absorção ( $f_a$ ); e
- eficiência intrínseca do detector ( $\epsilon$ ).

Desta forma, matematicamente, a eficiência ( $\eta$ ) pode ser expressa pela seguinte relação:

$$\eta = G \cdot f_a \cdot \epsilon \quad (2)$$

**Fator Geométrico.** Considerando que o fator geométrico estabelece a fração de partículas emitidas pela fonte na direção do detector, assumindo uma fonte volumétrica cilíndrica, com raio L e altura H, e um detector de raio R, conforme ilustrado na figura 1, temos que o fator geométrico será dado por:

$$G = \frac{1}{4\pi H L^2} \int_0^H \int_0^{2\pi} \int_0^L \frac{h r}{(r^2 + l^2 + r^2 - 2rl \cos(\psi - \varphi))^{\frac{3}{2}}} dh dl d\varphi d\psi \quad (3)$$

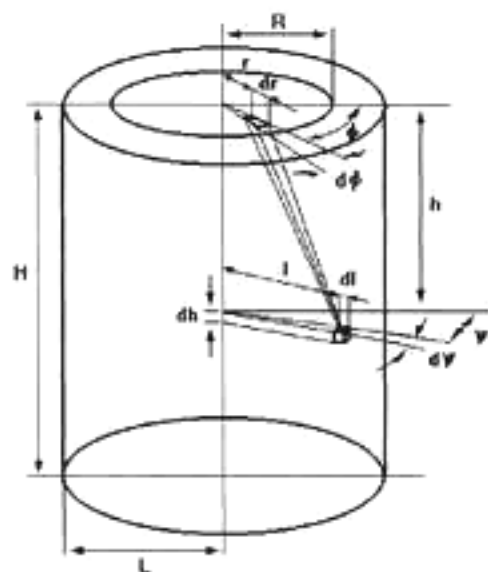


Figura 1. Arranjo geométrico e parâmetros usados no cálculo do ângulo sólido fonte-detector

A equação (3) foi integrada analiticamente em H e L, gerando seis integrais triplas, que foram calculadas numericamente, utilizando-se o Método de Romberg [2].

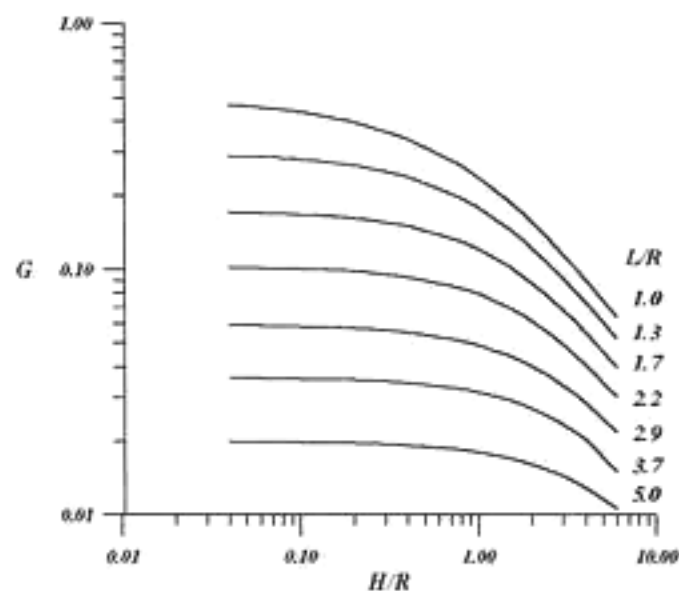


Figura 2. Fator geométrico calculado

Os resultados são mostrados na figura 2, onde no eixo das abscissas temos a profundidade da fonte volumétrica

(H), normalizada pelo raio do detector (R), e no eixo das ordenadas os fatores geométricos (G), sendo que cada curva foi obtida a partir do raio da fonte (L), normalizado também pelo raio do detector.

**Fator de Auto-absorção.** O fator de auto-absorção é definido como a fração de partículas que, tendo sido emitidas na direção do detector, atingem o mesmo, já que tendo a fonte gasosa dimensões razoáveis, apesar de constituir um meio de baixa densidade (densidade do ar), existe uma parcela de partículas β que deixam a fonte e não atingem o detector, sendo "absorvidas" em seu interior. Portanto, assumindo uma fonte uniformemente distribuída com emissão de partículas perpendiculares à superfície do detector, o fator de auto-absorção pode ser expresso por [3]:

$$f_a = \frac{1}{\mu h \rho} (1 - e^{-\mu h \rho}) \quad (4)$$

onde:

- $\mu$  é o coeficiente de atenuação de massa da fonte;
- $\rho$  é a densidade da fonte; e
- $h$  é a profundidade da fonte volumétrica.

Os coeficientes de atenuação foram calculados a partir da relação empírica da equação (5) [3].

$$\mu = 17 \cdot E_{\max}^{-1,14} \quad (5)$$

onde  $E_{\max}$  é a energia máxima da partícula β expressa em MeV.

Na figura 3 são mostrados os fatores de auto-absorção para diversas fontes emissoras de partículas β em volume de amostragem com diversas profundidades. Os resultados foram obtidos considerando as fontes gasosas com densidade semelhante à do ar ( $\rho_{\text{ar}} = 1,293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ).

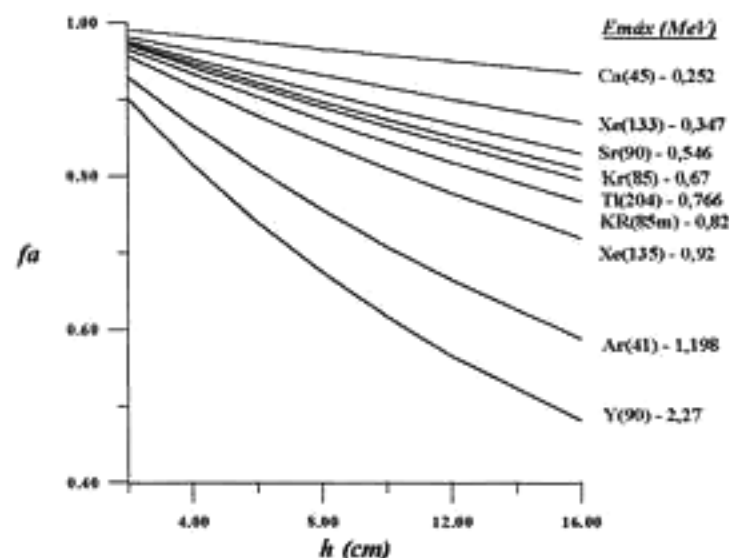


Figura 3. Fator de auto-absorção para fontes uniformemente distribuídas em um volume de ar

**Eficiência Intrínseca do Detector.** Nem todas as partículas incidentes no detector interagem com ele, e mesmo aquelas que interagem nem sempre perdem nele toda a sua energia cinética. Ocorre que, se uma partícula interage no detector, ela somente será registrada, se a altura do pulso, gerado por ela, for maior que o nível do discriminador, ajustado para filtrar o ruído eletrônico do sistema de medida.

Para corrigir esta perda, torna-se necessário determinar a eficiência intrínseca do detector ( $\epsilon$ ). Como a eficiência intrínseca de um detector, está intimamente ligada à fonte de radiação e ao arranjo eletrônico utilizado em um experimento, neste trabalho ela foi determinada experimentalmente, utilizando-se fontes pontuais emissores de partículas  $\beta$ , com energias da mesma ordem de grandeza das partículas emitidas pelo  $^{133}\text{Xe}$ . O detector utilizado no arranjo experimental foi um cintilador plástico cilíndrico, de 45 x 3 mm (diâmetro e espessura).

Como a eficiência de um detector não é uniforme em toda a sua extensão, ela foi determinada posicionando-se a fonte pontual em 5 pontos diferentes, localizados num plano paralelo ao detector e distante 1 cm do mesmo.

Na figura 4 são apresentados mais detalhes do posicionamento da fonte pontual.

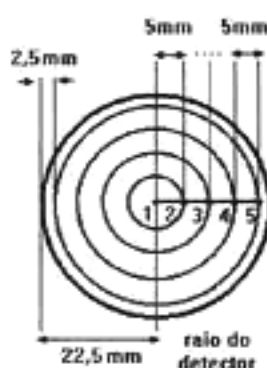


Figura 4. Posicionamento da fonte pontual.

Considerando a simetria radial de um disco, as medidas foram efetuadas aleatoriamente nas circunferências estabelecidas pela distância da fonte pontual ao centro do plano circular. Isto foi realizado com o objetivo de distribuir uniformemente as medidas de eficiência por toda a extensão do detector.

A partir das contagens obtidas, determinou-se a eficiência intrínseca do detector, para cada ponto, a partir da seguinte expressão [4]:

$$\epsilon_p = \frac{\text{cont}}{A_p G_p e^{-\mu_p h}} \quad (6)$$

onde:

- **cont** é a contagem obtida com a fonte descontado o BG;
- **$A_p$**  é a atividade da fonte;
- **$G_p$**  é o fator de ângulo sólido subtendido pelo detector e a fonte pontual; e
- **$e^{-\mu_p h}$**  é o fator de atenuação do meio entre a fonte e o detector.

Nas medidas foram utilizadas duas fontes emisoras de partículas  $\beta$ , cujas características estão apresentadas na tabela 1.

TABELA 1. Fontes de partículas  $\beta$  utilizadas na determinação da eficiência intrínseca do detector

Radionuclídeo	$^{204}\text{Tl}$	$^{45}\text{Ca}$
$E_{\text{máx}}$ (MeV)	0,766	0,252
$T_{1/2}$	3,81(a)	165(d)
Atividade (kBq)	4,56	4,06
Erro%	5	10
Calibração	05/05/95	01/03/95

A atividade da fonte ( $A_p$ ) foi fornecida pelo Laboratório de Metrologia de Radioisótopos do Serviço de Calibração e Dosimetria do IPEN, considerando um fator de retroespalhamento de 12 %.

A eficiência intrínseca ( $\epsilon$ ) média para o detector, foi determinada utilizando-se a média ponderada dos 5 valores de ( $\epsilon_p$ ). Na tabela 2 são apresentados os valores de ( $\epsilon$ ) para cada fonte.

TABELA 2. Eficiência intrínseca do detector

Radionuclídeo	$\epsilon$
$^{204}\text{Tl}$	$0,66 \pm 0,03$
$^{45}\text{Ca}$	$0,18 \pm 0,02$

**Eficiência do Sistema Fonte-detector.** Considerando o arranjo formado por um detector cilíndrico com raio de 2,25 cm e espessura de 0,3 cm acoplado na direção axial de um volume de amostragem composto por um cilindro com raio de 2,25 cm e altura de 4,25 cm, a partir da equação (2), a eficiência do arranjo fonte-detector foi calculada para as fontes de  $^{204}\text{Tl}$  e  $^{45}\text{Ca}$ , emisoras de partículas  $\beta$ , simulando uma fonte gasosa.

Na tabela 3, são apresentados os valores de eficiência global do sistema para cada fonte, bem como: o fator geométrico (G); o fator de auto-absorção ( $f_a$ ); e a eficiência intrínseca do detector ( $\epsilon$ ).

TABELA 3. Eficiência global do sistema - valores calculados

Fonte	$^{204}\text{Tl}$	$^{45}\text{Ca}$
(G)	0,167	0,167
( $f_a$ )	0,939	0,805
( $\epsilon$ )	$0,66 \pm 0,03$	$0,18 \pm 0,02$
( $\eta$ )	$0,104 \pm 0,005$	$0,024 \pm 0,003$

### PARTE EXPERIMENTAL

A determinação experimental da eficiência global, para comparação com os resultados teóricos, foi realizada utilizando-se fontes pontuais, emissoras de partículas  $\beta$ .

A razão para a utilização de fontes pontuais na parte experimental, é que uma fonte gasosa requer um equipamento experimental e um sistema de exaustão, não disponíveis quando da elaboração do trabalho. No entanto, se considerarmos que a fonte volumétrica gasosa está dispersa homogeneamente dentro do volume de medida e, sendo a densidade do gás semelhante a do ar, se efetuarmos medidas em diversos pontos do volume com uma fonte pontual, e em seguida somarmos todas as medidas, a eficiência obtida será semelhante à medida obtida com a fonte gasosa.

O arranjo experimental, conforme figura 5, constou de um detector cintilador plástico acoplado a uma fotomultiplicadora, ambos instalados em um suporte de polietileno, acoplado diretamente a um volume de amostragem, também de polietileno. A fonte pontual foi colocada em diversas posições dentro do volume de amostragem, de modo a varrer todo o volume.

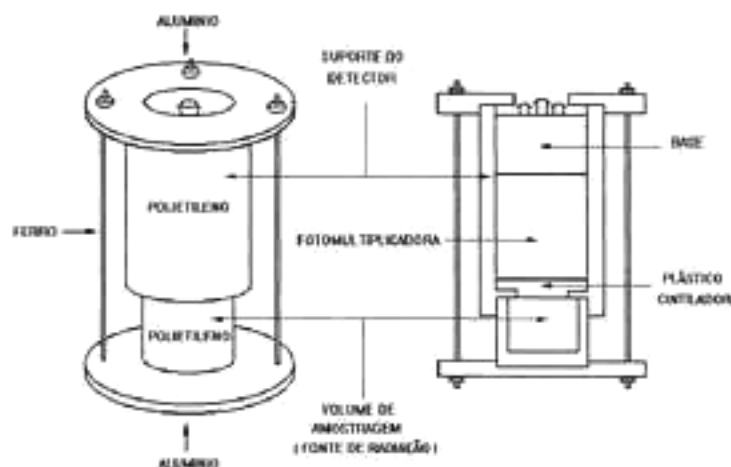


Figura 5. Arranjo Experimental

O detector utilizado foi um cintilador plástico, à base de polímero estireno, de  $45 \times 3$  mm (diâmetro e espessura), produzido no Laboratório de Desenvolvimento

de Plásticos Cintiladores do IPEN, acoplado a uma fotomultiplicadora bialcalina RCA- 6342A.

Para o levantamento de dados, foram utilizadas 2 fontes radioativas emissoras de partículas  $\beta$ , com energia da ordem de grandeza das partículas emitidas pelo  $^{133}\text{Xe}$ . As principais características das fontes estão na tabela 1.

Para variar a posição da fonte foram confeccionados dois apoios, instalados no interior do volume de medida, conforme indicado na figura 6.

A varredura vertical foi efetuada utilizando-se anéis de plástico, com o mesmo diâmetro do volume de amostragem, espessura de 1 milímetro e altura de 5 milímetros, e a varredura horizontal foi obtida com o auxílio de uma régua milimetrada que além de suporte, serviu como guia para definir a posição radial da fonte pontual.

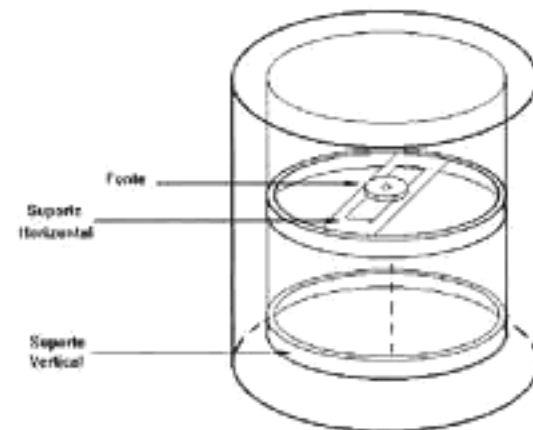


Figura 6. Arranjo da fonte dentro do volume de medida

Antes de serem realizadas as medidas, o cilindro de medida foi dividido hipoteticamente em pequenos volumes e foi assumido que em cada volume existe uma fonte.

Foi considerado um arco de  $10^\circ$  ( $\Delta\theta$ ) para cada pequeno volume não central, o que equivale a dividir os anéis em torno do volume central em 36 partes iguais, perfazendo um total de 36 pequenos volumes por anel.

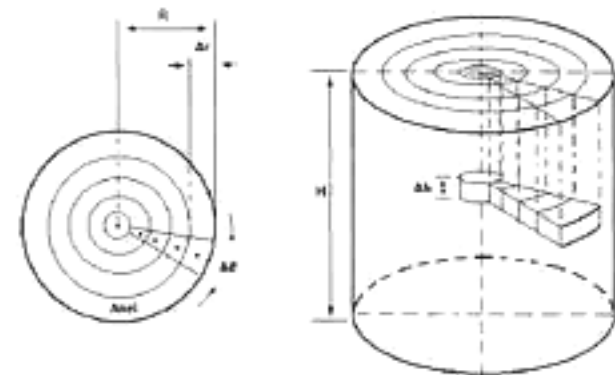


Figura 7. Distribuição dos pequenos volumes com fontes pontuais

Da figura 7, pode-se observar que os pequenos volumes que compõem o volume de medida não são todos iguais. No entanto, como estamos considerando uma concentração constante, se quisermos obter uma contagem total que represente uma fonte volumétrica a partir da soma das contagens de cada pequeno volume, torna-se necessário estabelecer um fator de normalização para cada contagem, de modo a corrigir a diferença entre os volumes. Assumindo que a fonte volumétrica tenha a concentração ( $C_1$ ) da fonte no volume 1, utilizando um fator de normalização dado por  $V_i/V_1$ , onde  $V_i$  é o  $i$ -ésimo volume, a contagem total obtida com uma fonte volumétrica com concentração  $C_1$ , será dada por:

$$\text{Cont}_{\text{total}} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \delta_i \text{Cont}_{j,i} \frac{V_i}{V_1} \quad (7)$$

$$i = 1 \rightarrow \delta_i = 1$$

$$i \neq 1 \rightarrow \delta_i = 36$$

onde  $i$  representa a posição da fonte no sentido radial,  $j$  representa a posição da fonte no sentido azimutal e  $\text{Cont}_{j,i}$  é a contagem obtida na posição  $j,i$ .

Devido a simetria radial (vide figura 7)  $\delta_i$  para  $i = 1$  representa os pequenos volumes centrais e  $\delta_i$  para  $i \neq 1$  representa os pequenos volumes não centrais formados a partir de um arco de  $10^\circ$ .

Para cada fonte pontual foram efetuadas 45 medidas dentro do volume de amostragem, sendo 5 na direção radial e 9 na direção azimutal.

Foram realizadas três medidas em cada posição da fonte pontual no volume de amostragem. O BG foi determinado a partir de 78 medidas de 5 minutos cada, resultando num valor de 261 cpm.

Aplicando os fatores de normalização as contagens obtidas com as fontes pontuais, conforme equação 7 obteve-se os resultados de contagem total, para cada fonte, mostrados na tabela 4.

TABELA 4. Contagem total

Fonte	Contagem Total (cpm) x $10^7$
$^{204}\text{Tl}$	$2,280 \pm 0,004$
$^{45}\text{Ca}$	$0,433 \pm 0,002$

Vale ressaltar que as contagens totais foram obtidas considerando:

- simetria radial dos pequenos volumes e

- uma fonte com atividade específica  $A_p/V_1$ , uniformemente distribuída no volume de amostragem.

Seguindo o que foi estabelecido inicialmente, a partir da contagem total, obtida pela somatória das contagens com a fonte pontual em diversas posições dentro do volume de amostragem, e considerando a concentração da fonte radioativa constante em todo o volume, reescrevendo a equação (1), temos que a eficiência do sistema fonte-detector será:

$$\eta = \frac{\text{Cont}_{\text{total}}}{A_c V_{\text{amost}}} \quad (8)$$

onde:

- $\text{Cont}_{\text{total}}$  é a taxa de contagem total, obtida através da somatória das contagem com a fonte pontual (descontado o BG);
- $A_c$  é a atividade específica da fonte, ou seja, a atividade da fonte pontual dividida pelo volume de referência ( $A_p/V_1$ ); e
- $V_{\text{amost}}$  é o volume de amostragem, igual a  $67,6 \text{ cm}^3$ .

Na tabela 5 são comparados os valores de eficiência obtidos experimentalmente e através do cálculo.

TABELA 5. Comparação da eficiência experimental com a eficiência calculada

Fonte	Eficiência Calculada	Eficiência Experimental	Desvio%
$^{204}\text{Tl}$	$0,104 \pm 0,005$	$0,108 \pm 0,006$	3,8
$^{45}\text{Ca}$	$0,024 \pm 0,003$	$0,023 \pm 0,002$	4,2

## CONCLUSÕES

A partir da tabela 5 podemos concluir que as medidas efetuadas apresentam uma boa concordância com os valores previstos, consequentemente, validando a metodologia aqui desenvolvida.

As fontes pontuais de  $^{45}\text{Ca}$  e  $^{204}\text{Tl}$  foram escolhidas por emitirem partículas  $\beta$  com energias semelhantes às partículas emitidas pela fonte de  $^{133}\text{Xe}$ . No entanto, como estas energias não são exatamente iguais, e visando também estender a metodologia para outras fontes radioativas gasosas, a seguir serão discutidos os efeitos da variação da energia nos fatores utilizados para determinar a eficiência do sistema. Nesta discussão, também será considerada a variação da profundidade do volume de amostragem.

1. O fator geométrico ( $G$ ), conforme desenvolvido neste trabalho, pode ser aplicado, independentemente do tipo de radiação, para qualquer situação envolvendo

uma geometria cilíndrica e um detector com face circular.

2. No arranjo utilizado o *fator de auto-absorção* ( $f_a$ ), obtido para a menor energia, no caso a fonte de  $^{45}\text{Ca}$  ( $E_{\text{máx}} = 0,252 \text{ MeV}$ ), não chega a alterar o resultado final da eficiência em 20 %. No entanto, deve-se observar que, à medida que se aumenta a profundidade do volume de amostragem, a influência do fator de auto-absorção tende a ser mais acentuada. Da figura 3 observamos que, para a mesma fonte, considerando um volume de amostragem com profundidade de 16 cm, o fator de auto-absorção resultante será de 48,2 %. Já para energias maiores, como a fonte de  $^{204}\text{Tl}$  ( $E_{\text{máx}} = 0,766 \text{ MeV}$ ), o efeito do fator de auto-absorção não é tão significativo, pois considerando-se um volume de amostragem com profundidade de 16 cm, o fator de auto-absorção resultante será de 93,4 %.
3. A *eficiência intrínseca do detector* ( $\epsilon$ ), obtida através de medidas experimentais, varia consideravelmente com a energia das partículas  $\beta$ . Como se pode observar da tabela 2, no caso específico da fonte de  $^{45}\text{Ca}$  ( $E_{\text{máx}} = 0,252 \text{ MeV}$ ), a eficiência intrínseca do detector encontrada foi de 18 %, já a eficiência para a fonte de  $^{204}\text{Tl}$  ( $E_{\text{máx}} = 0,766 \text{ MeV}$ ) foi de 66 %.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARVALHO, Marcos R. de. Metodologia para Determinação da Eficiência de um Monitor de Gases Emissores de Partículas  $\beta$ . CNEN-IPEN/SP. São Paulo, 1995 (Dissertação de Mestrado);
- [2] DAHLQUIST, G.; Björck, Å. Numerical Methods. New Jersey, Prentice-Hall. (1969).6, 269, 290;
- [3] TSOULFANIDIS; N. Measurement and Radiation Detection of Radiation. New York, Hemisphere Publishing Corporation. (1983). 115, 195, 247.
- [4] KNOLL, Glenn F. Radiation Detection and Measurement John Wiley & Sons, Inc., 1989. Cap. 4;

## ABSTRACT

This work presents a methodology to determinate the efficiency of air monitors used to measure the concentration of noble gas in nuclear power stations. Efficiency values, theoretically determined, were compared with experimental data, using punctual  $\beta$  sources.