

## METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM MONITOR DE GASES EMISSORES DE PARTÍCULAS $\beta$

M. R. de Carvalho e A. J. Soares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)  
Caixa Postal: 11049, 05422-970, São Paulo, SP, Brasil

### RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para determinar a eficiência de monitores de ar utilizados para medir a concentração de gases nobres, emissores de partículas  $\beta$ , instalados em usinas nucleares. Os valores de eficiência, determinados teoricamente, foram comparados com dados experimentais, utilizando-se fontes pontuais emissoras de partículas  $\beta$ .

Descritores: monitor de radiação, instrumentação, monitor de ar, radiação  $\beta$ , gases nobres, calibração.

### INTRODUÇÃO

Em instalações nucleares, os contaminantes radioativos presentes no ar compreendem uma diversa gama de elementos e se apresentam em diversas formas físico/químicas. Os gases nobres (Ar, Xe, e Kr) são uma parcela específica destes contaminantes, cuja principal característica é o fato de serem inertes, não sendo retidos com eficiência por filtros.

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

A atividade específica ( $A_C$ ) 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:

### ABSTRACT

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

Key words: radiation monitor, instrumentation, air monitor,  $\beta$  radiation, noble gases, calibration.

$$A_C = \frac{Cont_{total}}{\eta \cdot V} \quad (1)$$

onde:

$Cont_{total}$  = Taxa de contagem total (fonte - BG); e

$\eta$  = Eficiência do sistema de medida.

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

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

### EFICIÊNCIA CA

Dado u  
espessura bem  
recipiente cilínd  
gasosa emissor  
mostrado na  
adaptado na  
extremidades d  
eficiência do sis

1. A concentra  
constante  
medida;
2. As emissõ  
isotrópicas;
3. O espalha  
paredes do

Figura 1

Tais con  
a realidade  
considerarmos  
de amostragem  
e que o gás rad  
densidade é bai  
de espalhament

A partir  
do sistema fonte  
três fatores:

- fator geomé
- fator de auto
- eficiência do

Desta  
eficiência ( $\eta$ ) po  
relação:

## 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  $\beta$ , conforme mostrado na figura 1, 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.



Figura 1 - Arranjo fonte-detector

Tais considerações não fogem muito a realidade do caso experimental, se considerarmos que as dimensões do volume de amostragem são relativamente pequenas, e que o gás radioativo está imerso no ar, cuja densidade é baixa o suficiente para os efeitos de espalhamento serem desprezados.

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 do detector ( $\epsilon$ ).

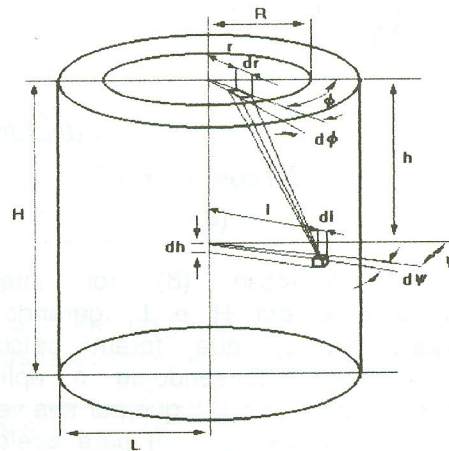
Desta forma, matematicamente, a eficiência ( $\eta$ ) pode ser expressa pela seguinte relação:

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

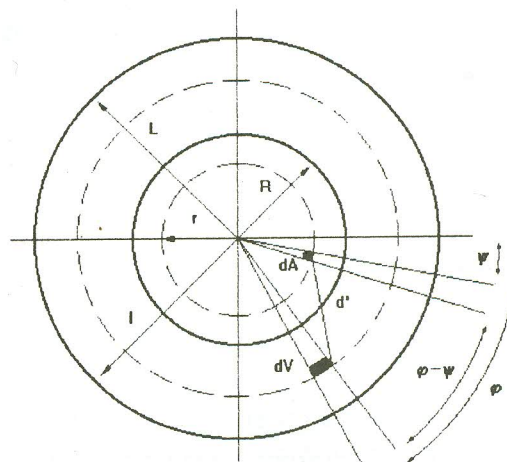
**Fator Geométrico.** Na definição do sistema fonte-detector, foi assumido que o detector é volumétrico, no entanto, para efeitos de fator de ângulo sólido, podemos considerar que o detector é superficial.

Assumindo uma fonte volumétrica cilíndrica, com raio  $L$  e altura  $H$ , e um detector de raio  $R$ , conforme ilustrado na figura 2, temos que o elemento de ângulo sólido, será dado por [2]:

$$G = \frac{1}{4\pi V_s V_s} \int dV_s \int dA_d \frac{\cos \omega}{d^2} \quad (3)$$



2.a



2.b

Figura 2 - Arranjo geométrico e parâmetros usados no cálculo do ângulo sólido fonte-detector

Das figuras 2.a e 2.b tiramos que:

$$d = \sqrt{h^2 + l^2 + r^2 - 2rl \cos(\psi - \phi)} \quad (4)$$

$$\cos \omega = \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2 + l^2 - 2rl \cos(\psi - \phi)}} \quad (5)$$

$$dV_s = ldlhd\psi \quad (6)$$

$$dA_d = r dr d\phi \quad (7)$$

Substituindo as equações (4), (5), (6) e (7) na equação (3), obtem-se a seguinte expressão para o fator de ângulo sólido:

$$G = \frac{1}{4\pi H L^2} \int_0^H \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left[ \frac{h l r}{(h^2 + l^2 + r^2 - 2rl \cos(\psi - \phi))^{\frac{3}{2}}} dh dl dr d\phi d\psi \right] \quad (8)$$

A equação (8) foi integrada analiticamente em H e L, gerando seis integrais triplas, que foram calculadas numericamente, utilizando-se o aplicativo MATHCAD para pc's [3], que por sua vez usa o Método de Romberg [4] para acelerar a convergência do processo de integração.

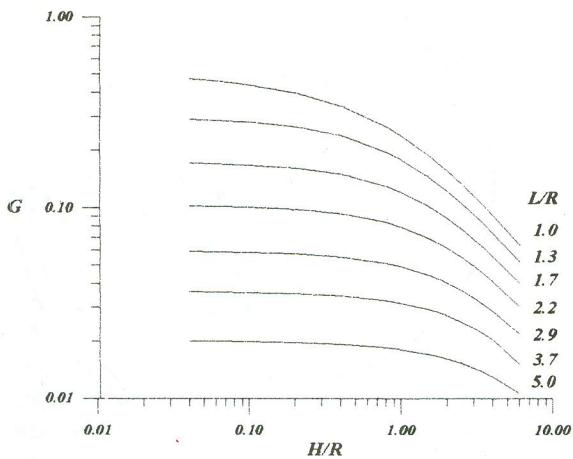


Figura 3 - Fator geométrico calculado

Os resultados obtidos através da equação (8) são mostrados na figura 3, onde no eixo x temos a profundidade da fonte

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

Tendo em vista que o único trabalho encontrado na literatura, realizado por Manchuk, V. A. [5], apresenta apenas um gráfico (vide figura 4), sem mencionar valores que permitam uma melhor comparação, decidimos verificar a consistência do cálculo, comparando o fator geométrico calculado, com resultados encontrados na literatura, para um arranjo mais simples, formado por uma fonte pontual e um detector circular plano.

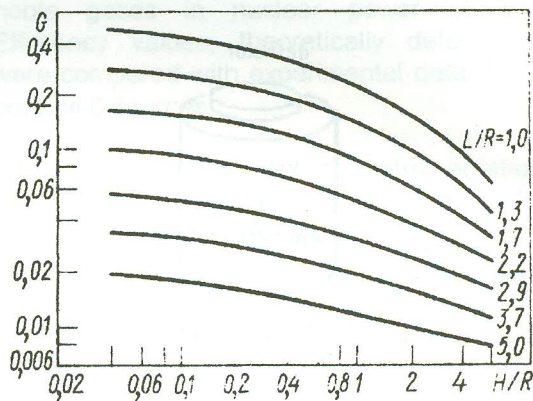


Figura 4 - Fator geométrico obtido por Manchuk

Os dados apresentados na tabela 1, foram calculados a partir da equação (9), e representam o ângulo sólido de um arranjo formado por um detector circular coaxial a uma fonte pontual, colocada à uma distância h do detector.

$$\Omega = 2\pi - 2h \int_0^{\pi} \left[ \frac{h^2 + l^2 + Rl \cos(\phi)}{(h^2 + l^2 - l^2 \cos^2(\phi))} \frac{1}{\sqrt{h^2 + R^2 + l^2 + 2Rl \cos(\phi)}} \right] d\phi \quad (9)$$

Os resultados obtidos foram normalizados pelo raio r do detector e

comparados com Masket, A. V. H.

Tabela 1 - Ângulo

| Posição da Fonte |     |
|------------------|-----|
| h/r              | Ω   |
| 0.1              | 0.0 |
| 0.5              | 0.1 |
| 1.0              | 0.5 |

comparados com os resultados obtidos por Masket, A. V. H., et al. [6].

Tabela 1 - Ângulo sólido detector circular-fonte pontual

| Posição da Fonte |     | Fonte Pontual |         |
|------------------|-----|---------------|---------|
| h/r              | l/r | Este Trabalho | Masket  |
| 0,1              | 0,0 | 5,65799       | 5,65789 |
| 0,5              | 0,1 | 3,45972       | 3,45972 |
| 1,0              | 0,5 | 1,63710       | 1,63710 |
| 1,5              | 1,0 | 0,74723       | 0,74723 |
| 2,0              | 1,5 | 0,39438       | 0,39438 |
| 2,5              | 2,5 | 0,23818       | 0,23818 |
| 3,0              | 3,0 | 0,15822       | 0,15822 |
| 3,5              | 3,0 | 0,11240       | 0,11240 |
| 4,0              | 3,5 | 0,08384       | 0,08384 |
| 4,5              | 4,0 | 0,06490       | 0,06490 |
| 5,0              | 4,5 | 0,05170       | 0,05170 |

**Fator de Auto-absorção.** Tendo a fonte gasosa dimensões razoáveis, apesar de constituir um meio de baixa densidade (densidade do ar), existe uma parcela de partículas  $\beta$  que deixam a fonte e não atingem o detector, sendo "absorvidas" na própria fonte. Assumindo uma fonte uniformemente distribuída com emissão de partículas perpendiculares à superfície do detector, a atenuação de partículas pela fonte pode ser expressa pela seguinte equação [2]:

$$f_a = \frac{1}{\mu h \rho} \left( 1 - e^{-\mu h \rho} \right) \quad (10)$$

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.

Na tabela 2 são apresentados alguns radionuclídeos emissores de partículas  $\beta$  e seus respectivos coeficientes de atenuação, calculados a partir da relação empírica da equação (11) [2].

$$\mu = 17. E_{\max}^{-1,14} \quad (11)$$

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

A partir da equação (10), tomando os valores de coeficiente de atenuação obtidos da tabela 2, foram calculados os fatores de auto-absorção para diversas fontes emissoras de partículas  $\beta$  em volume de amostragem com diversas profundidades. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 3 considerando as fontes gasosas com densidade semelhante à do ar ( $\rho_{\text{ar}} = 1,293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ).

Tabela 2 - Coeficientes de atenuação

| Radionuclídeo            | $E_{\max}$ (MeV) | $\mu$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) |
|--------------------------|------------------|----------------------------------|
| $^{45}\text{Ca}$         | 0,252            | 81,819                           |
| $^{133}\text{Xe}$        | 0,347            | 56,816                           |
| $^{90}\text{Sr}$         | 0,546            | 33,888                           |
| $^{85}\text{Kr}$         | 0,67             | 26,836                           |
| $^{204}\text{Tl}$        | 0,766            | 23,037                           |
| $^{85\text{m}}\text{Kr}$ | 0,82             | 21,316                           |
| $^{135}\text{Xe}$        | 0,92             | 18,695                           |
| $^{41}\text{Ar}$         | 1,198            | 13,836                           |
| $^{90}\text{Y}$          | 2,27             | 6,677                            |

Tabela 3 - Fator de auto-absorção para fontes gasosas uniformemente distribuídas em um volume de ar

| Radionuclídeo            | Fator de auto-absorção ( $f_a$ ) |       |       |       |       |
|--------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                          | h (cm)                           |       |       |       |       |
|                          | 2                                | 4,25  | 6     | 10    | 16    |
| $^{45}\text{Ca}$         | 0,901                            | 0,805 | 0,740 | 0,617 | 0,482 |
| $^{133}\text{Xe}$        | 0,930                            | 0,859 | 0,809 | 0,708 | 0,588 |
| $^{90}\text{Sr}$         | 0,957                            | 0,912 | 0,879 | 0,810 | 0,719 |
| $^{85}\text{Kr}$         | 0,966                            | 0,930 | 0,903 | 0,845 | 0,767 |
| $^{204}\text{Tl}$        | 0,971                            | 0,939 | 0,916 | 0,865 | 0,795 |
| $^{85\text{m}}\text{Kr}$ | 0,973                            | 0,944 | 0,922 | 0,874 | 0,809 |
| $^{135}\text{Xe}$        | 0,976                            | 0,950 | 0,931 | 0,888 | 0,829 |
| $^{41}\text{Ar}$         | 0,982                            | 0,963 | 0,948 | 0,916 | 0,870 |
| $^{90}\text{Y}$          | 0,991                            | 0,982 | 0,975 | 0,958 | 0,934 |

**Eficiência Intrínseca do Detector.** Em todo detector de radiação  $\beta$ , em princípio, a origem de um pulso de tensão está ligada com um quantum de radiação que interage no seu volume ativo. Para partículas carregadas em um detector cintilador, a interação predominante será a excitação dos átomos. Após percorrer uma pequena fração de sua trajetória, a partícula deixa ao longo do seu

caminho uma grande quantidade de átomos excitados, que emitindo fótons, coletados em uma fotomultiplicadora, resultam em um pulso de tensão.

Desta forma, seria fácil obter-se um arranjo em que todas as partículas carregadas incidentes no detector venham a interagir no mesmo. Nestas condições, podemos dizer que a eficiência do detector seria de 100 %.

No entanto, nem todas as partículas incidentes no detector interagem com ele, e mesmo aquelas que interagem nem sempre perdem 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 determinar a atividade de um radionuclídeo, todas as contagens registradas pelo detector, independente da energia da partícula, devem ser consideradas, mas, conforme vimos acima, algumas partículas são perdidas. Para corrigir esta perda, torna-se necessário utilizar a eficiência intrínseca do detector ( $\epsilon$ ), que é definida por [7]:

$$\epsilon = \frac{\text{part. registradas por unidade de tempo}}{\text{part. que incidem o detector por unidade de tempo}} \quad (12)$$

Como se pode perceber, a eficiência intrínseca de um detector, está intimamente ligada à fonte de radiação e ao arranjo eletrônico utilizado em um experimento. Portanto, a partir do arranjo fonte-detector, a eficiência intrínseca do detector foi determinada experimentalmente.

O detector utilizado no arranjo experimental foi um cintilador plástico cilíndrico, de 45 x 3 mm (diâmetro e espessura).

Geralmente a eficiência de um detector não é uniforme em toda a sua extensão. Assim sendo, a eficiência foi determinada posicionando-se uma fonte pontual em 5 pontos diferentes, localizados num plano paralelo ao detector e distante 1 cm do mesmo. A eficiência total foi calculada pela média de todas as medidas. Na figura 5

são apresentados mais detalhes do posicionamento da fonte pontual.

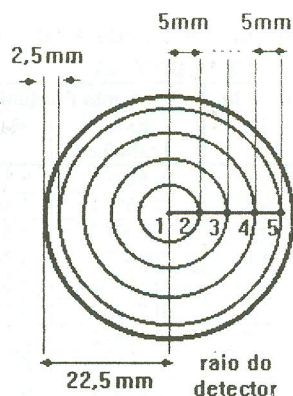


Figura 5 - Posicionamento da fonte pontual.

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.

Foram utilizadas três fontes emissoras de partículas  $\beta$ , cujas características estão apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 - Fontes de partículas  $\beta$  utilizadas na determinação da eficiência intrínseca do detector

| Radionuclídeo          | $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ | $^{204}\text{Tl}$ | $^{45}\text{Ca}$ |
|------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|
| $E_{\text{máx}}$ (MeV) | 0,546 - 2,27                   | 0,766             | 0,252            |
| $T_{1/2}$              | 27,7(a),64(h)                  | 3,81(a)           | 165(d)           |
| Atividade(kBq)         | 3,79                           | 4,56              | 4,06             |
| Erro%                  | 5                              | 5                 | 10               |
| Calibração             | 01/03/95                       | 05/05/95          | 01/03/95         |

Para determinação do valor numérico da eficiência, reescrevemos a equação (12) de uma forma mais apropriada, ou seja:

$$\epsilon_p = \frac{\text{cont}}{A_p G_p e^{-\mu \rho h}} \quad (13)$$

onde:

**cont** é a contagem obtida com a fonte descontado o BG;

**A<sub>p</sub>** é a atividade da fonte;

**G<sub>p</sub>** é o fator de ângulo sólido subtendido pelo detector e a fonte pontual; e

**e<sup>-μph</sup>** é o fator de atenuação do meio entre a fonte e o detector.

O fator de ângulo sólido (**G<sub>p</sub>**) foi calculado conforme estabelecido no item anterior e a atividade da fonte (**A<sub>p</sub>**) foi fornecida pelo Laboratório de Metrologia de Radioisótopos do Serviço de Calibração e Dosimetria do IPEN, considerando um fator de retroespalhamento de 12 %.

A atenuação entre a fonte e o detector foi calculada a partir do coeficiente de atenuação (**μ**), apresentado na tabela 2. Para a fonte de <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y o fator de atenuação foi calculado pela média dos fatores de atenuação do <sup>90</sup>Sr e do <sup>90</sup>Y, uma vez que estes radionuclídeos estão em equilíbrio radioativo.

Na tabela 5 são apresentados os valores de atividade das fontes (**A<sub>p</sub>**), os fatores de atenuação e fator geométrico (**G<sub>p</sub>**) para cada ponto.

Na tabela 6 são apresentados os valores de eficiência do detector para cada ponto.

Tabela 5 - Atividade, fator de atenuação e fator geométrico das fontes pontuais

| Radionuclídeo             | <sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y | <sup>204</sup> Tl | <sup>45</sup> Ca |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------|
| <b>A<sub>p</sub>(kBq)</b> | 4,24                              | 5,11              | 4,55             |
| <b>e<sup>-μph</sup></b>   | 0,974                             | 0,971             | 0,917            |
| <b>G<sub>p</sub></b>      | 1                                 | 0,297             | 0,297            |
|                           | 2                                 | 0,292             | 0,292            |
|                           | 3                                 | 0,274             | 0,274            |
|                           | 4                                 | 0,239             | 0,239            |
|                           | 5                                 | 0,182             | 0,182            |

Tabela 6 - Eficiência do detector

| Radionuclídeo        | <sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y | <sup>204</sup> Tl | <sup>45</sup> Ca |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------|
| <b>ε<sub>p</sub></b> | 1                                 | 0,82              | 0,68             |
|                      | 2                                 | 0,83              | 0,69             |
|                      | 3                                 | 0,84              | 0,68             |
|                      | 4                                 | 0,81              | 0,62             |
|                      | 5                                 | 0,85              | 0,64             |

A eficiência intrínseca média para o detector, foi determinada utilizando-se a média ponderada de todos os valores de **ε<sub>p</sub>**, dada por:

$$\varepsilon = \frac{\sum_1^5 \varepsilon_p G_p}{\sum_1^5 G_p} \quad (14)$$

Na tabela 7 são apresentados os valores de **ε** para cada fonte.

Tabela 7 - Eficiência intrínseca do detector

| Radionuclídeo                     | <b>ε</b>    |
|-----------------------------------|-------------|
| <sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y | 0,83 ± 0,04 |
| <sup>204</sup> Tl                 | 0,66 ± 0,03 |
| <sup>45</sup> Ca                  | 0,17 ± 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 seguintes fontes radioativas emissoras de partículas β, na forma gasosa: <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y, <sup>204</sup>Tl e <sup>45</sup>Ca

Na tabela 8, são apresentados os valores de eficiência global do sistema para cada fonte, bem como:

- o fator geométrico (**G**);
- o fator de auto-absorção (**f<sub>a</sub>**); e
- a eficiência intrínseca do detector (**ε**).

Tabela 8 - Eficiência global do sistema - valores calculados

| Fonte                  | <sup>90</sup> Sr + <sup>90</sup> Y | <sup>204</sup> Tl | <sup>45</sup> Ca |
|------------------------|------------------------------------|-------------------|------------------|
| <b>(G)</b>             | 0,167                              | 0,167             | 0,167            |
| <b>(f<sub>a</sub>)</b> | 0,947                              | 0,939             | 0,805            |
| <b>(ε)</b>             | 0,83 ± 0,04                        | 0,66 ± 0,03       | 0,17 ± 0,02      |
| <b>(η)</b>             | 0,131 ± 0,006                      | 0,104 ± 0,005     | 0,023 ± 0,003    |

É importante observar que o fator de auto-absorção ( $f_a$ ) para a fonte de  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  foi calculado pela média dos fatores de auto-absorção do  $^{90}\text{Sr}$  e do  $^{90}\text{Y}$ , uma vez que estes radionuclídeos estão em equilíbrio radioativo.

## 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 uma fonte pontual 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 6, 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.

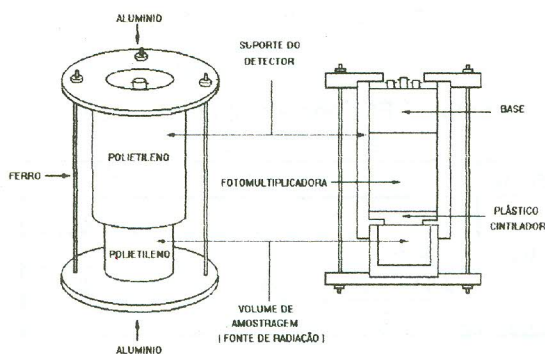


Figura 6 - Arranjo Experimental

O detector utilizado foi um cintilador plástico, à base de polímero estireno, de 45 x 3 mm (diâmetro e espessura), produzido no Laboratório de Desenvolvimento de Plásticos Cintiladores do IPEN, acoplado a uma fotomultiplicadora bialcalina RCA- 6342A.

O arranjo eletrônico utilizado esta apresentado na figura 7.

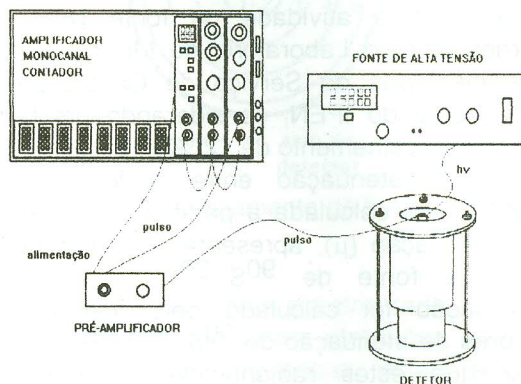


Figura 7 - Arranjo Eletrônico

Para o levantamento de dados, foram utilizadas 3 fontes radioativas emissoras de partículas  $\beta$ , confeccionadas no Laboratório de Metrologia de Radioisótopos do Serviço de Calibração e Dosimetria do IPEN. As principais características das fontes utilizadas estão na tabela 5.

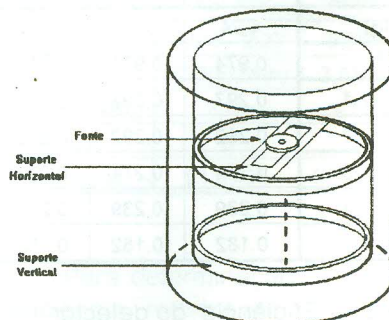


Figura 8 - Arranjo da fonte dentro do volume de medida

Para variar a posição da fonte foram confeccionados dois apoios, instalados no

interior do volume de medida, conforme indicado na figura 8.

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.

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.

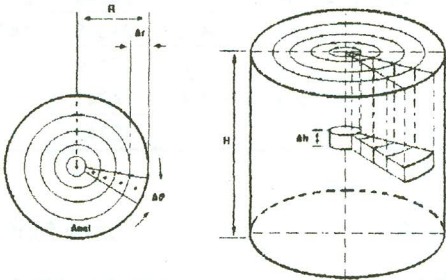


Figura 9 - Distribuição dos pequenos volumes com fontes pontuais

Da figura 9, 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 ( $V_1$ ) 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:

$$Cont_{total} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \delta_i Cont_{j,i} \frac{V_i}{V_1} \quad (15)$$

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

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

onde a somatória em  $i$  representa a posição da fonte no sentido radial, a somatória em  $j$  representa a posição da fonte no sentido azimutal e  $Cont_{j,i}$  é a  $i$ -ésima contagem medida.

Da figura 9 tiramos que  $\delta_i$  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, 5 na direção radial e 9 na direção azimutal, conforme figura 10.

Apesar de na figura 10 os pontos de medida estarem situados em um mesmo plano, as medidas na realidade foram efetuadas aleatoriamente em diversos planos perpendiculares ao detector a partir da origem do volume de amostragem. Isto foi realizado com o objetivo de distribuir uniformemente as medidas com a fonte pontual em todo o volume de amostragem.

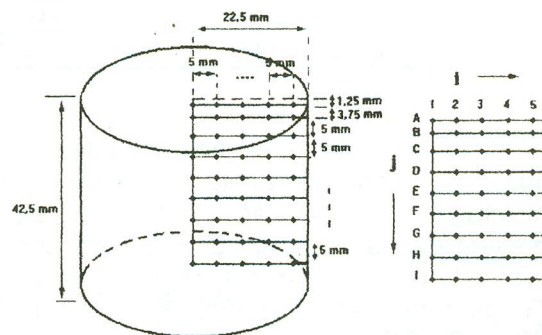


Figura 10 - Posicionamento da fonte pontual no volume de medida

Em todas as tabelas que se seguem, as posições em j e i referem-se as posições indicadas na figura 10.

Na determinação do volume ocupado pela fonte pontual foi considerado que:

- a fonte ocupa o centro do volume;
- para o volume central foi utilizado um raio de 2,5 mm e uma altura de 2,5 mm para a posição A1, e uma altura de 5 mm para as demais posições (B1 até I1); e
- para os volumes não centrais foi utilizado um arco de 10°, uma largura de 5 mm e uma altura de 2,5 mm na linha A e nas demais linhas uma altura de 5 mm.

Na tabela 9 são apresentados os volumes, em mm<sup>3</sup>, considerados em cada posição de medida conforme figura 10.

Tabela 9 - Volumes ocupados pela fonte

| V <sub>ji</sub> | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| A               | 49,087 | 10,908 | 21,817 | 32,725 | 43,633 |
| B-I             | 98,175 | 21,817 | 43,633 | 65,450 | 87,266 |

A partir dos volumes apresentados na tabela 11 foram calculados os fatores de normalização  $V_i/V_1$ , apresentados na equação 15, onde o volume  $V_1$  foi definido como o volume obtido a partir da posição B1. Na tabela 10 são apresentados os fatores de normalização para todas as medidas.

Tabela 10 - Fatores de normalização

| j\i | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| A   | 0,500 | 0,111 | 0,222 | 0,333 | 0,444 |
| B-I | 1,000 | 0,222 | 0,444 | 0,667 | 0,889 |

Foram realizadas três medidas em cada posição da fonte pontual no volume de amostragem. Nas tabelas 11, 12 e 13 são apresentadas as contagens (C<sub>i,j</sub>), em cpm, para cada ponto do volume, já descontado o BG, para as fontes de <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y, <sup>204</sup>Tl e <sup>45</sup>Ca. O BG medido foi de 261 cpm, determinado a partir de 78 medidas de 5 minutos cada.

Tabela 11 - Contagens obtidas com a fonte de <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y.

| j\i | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| A   | 87052 | 87795 | 87173 | 83774 | 67485 |
| B   | 78069 | 78295 | 76244 | 65848 | 51427 |
| C   | 60390 | 60350 | 56778 | 48008 | 38424 |
| D   | 46078 | 45006 | 42975 | 35772 | 30162 |
| E   | 35094 | 33756 | 32521 | 28429 | 24492 |
| F   | 27569 | 26700 | 25325 | 22948 | 20649 |
| G   | 22050 | 21715 | 20608 | 18857 | 17616 |
| H   | 17840 | 17706 | 16915 | 16003 | 15156 |
| I   | 14897 | 14825 | 14263 | 13577 | 13180 |

Tabela 12 - Contagens obtidas com a fonte de <sup>204</sup>Tl.

| j\i | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| A   | 92407 | 92279 | 88267 | 82336 | 69403 |
| B   | 79601 | 80017 | 75176 | 61710 | 46437 |
| C   | 59776 | 59980 | 55306 | 44145 | 34915 |
| D   | 44361 | 43738 | 39785 | 33066 | 26686 |
| E   | 32949 | 32187 | 29592 | 26540 | 21838 |
| F   | 25281 | 21664 | 23440 | 21315 | 18228 |
| G   | 19946 | 19573 | 19397 | 17139 | 15416 |
| H   | 16207 | 16064 | 15405 | 14241 | 13084 |
| I   | 13471 | 13313 | 12902 | 12340 | 11266 |

Tabela 13 - Contagens obtidas com a fonte de <sup>45</sup>Ca.

| j\i | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| A   | 27633 | 28659 | 25658 | 18790 | 10724 |
| B   | 21096 | 20942 | 15681 | 16812 | 9419  |
| C   | 15498 | 13882 | 10719 | 10407 | 7040  |
| D   | 10482 | 9389  | 7654  | 5301  | 5451  |
| E   | 7234  | 6745  | 5469  | 4232  | 3372  |
| F   | 5193  | 4819  | 4204  | 3339  | 2658  |
| G   | 4746  | 3494  | 3111  | 2684  | 2184  |
| H   | 2846  | 2787  | 2528  | 2166  | 1874  |
| I   | 2217  | 2201  | 2005  | 1772  | 1597  |

Aplicando os fatores de normalização da tabela 10 e as contagens das tabelas 11, 12 e 13, na equação 15, obtêm-se os resultados de contagem total para cada fonte, mostrados na tabela 14.

Tabela 14 - Contagem total

| Fonte                              | Contagem Total<br>(cpm) x 10 <sup>7</sup> |
|------------------------------------|---|
| <sup>90</sup> Sr + <sup>90</sup> Y | 2.318 ± 0,004                             |
| <sup>204</sup> Tl                  | 2.280 ± 0,004                             |
| <sup>45</sup> Ca                   | 0,433 ± 0,002                             |

Vale ressaltar que as contagens totais apresentadas na tabela 14, 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:

$$\eta = \frac{Cont_{total}}{A_c V_{amost}} \quad (16)$$

onde:

- **Cont<sub>total</sub>** é a taxa de contagem total, obtida através da somatória das contagens com a fonte pontual (descontado o BG);
- **A<sub>c</sub>** é a atividade específica da fonte, ou seja, a atividade da fonte pontual dividida pelo volume de referência ( $A_p/V_1$ ); e
- **V<sub>amost</sub>** é o volume de amostragem, igual a 67.593,329 mm<sup>3</sup>.

Na tabela 15 são apresentados os valores de eficiência experimental para as três fontes utilizadas, bem como os valores de atividade específica.

Tabela 15 - Eficiência experimental

| Fonte                              | Atividade Específica<br>(dmp/mm <sup>3</sup> ) | Eficiência Fonte-detector |
|------------------------------------|--|---------------------------|
| <sup>90</sup> Sr + <sup>90</sup> Y | 2594,225                                       | 0,132 ± 0,007             |
| <sup>204</sup> Tl                  | 3121,283                                       | 0,108 ± 0,006             |
| <sup>45</sup> Ca                   | 2779,037                                       | 0,023 ± 0,002             |

Na tabela 16 são comparados os valores de eficiência obtidos experimentalmente e através do cálculo.

Tabela 16 - Comparação da eficiência experimental com a eficiência calculada

| Fonte                             | Eficiência Calculada | Eficiência Experimental | Desvio % |
|-----------------------------------|----------------------|-------------------------|----------|
| <sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y | 0,131<br>± 0,006     | 0,132<br>± 0,007        | 0,8      |
| <sup>204</sup> Tl                 | 0,104<br>± 0,005     | 0,108<br>± 0,006        | 3,8      |
| <sup>45</sup> Ca                  | 0,023<br>± 0,003     | 0,023<br>± 0,002        | 0        |

A partir da tabela 16 podemos concluir que as medidas efetuadas apresentam uma boa concordância com os valores previstos, conseqüentemente, validando a metodologia aqui desenvolvida.

## CONCLUSÕES

Considerando cada um dos fatores utilizados no cálculo da eficiência fonte-detector, podemos chegar às seguintes conclusões:

1. O *fator geométrico* (G), conforme desenvolvido neste trabalho, pode ser aplicado, independentemente do tipo de radiação, para qualquer situação envolvendo um detector superficial em forma de disco e uma fonte pontual ou volumétrica.
2. No arranjo utilizado o *fator de auto-absorção* (fa), obtido para a menor energia, no caso a fonte de <sup>45</sup>Ca ( $E_{máx} = 0,252$  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 tabela 3, para a mesma fonte, considerando um volume de amostragem com profundidade de 16 cm, o fator de auto-absorção resultante provocará uma alteração de 51,8 % na eficiência global. Para energias maiores, como a fonte de <sup>204</sup>Tl ( $E_{máx} = 0,766$

MeV), o efeito do fator de auto-absorção é menor. Considerando-se um volume de amostragem com profundidade de 16 cm, o fator de auto-absorção resultante provocará uma alteração de 21,1 % na eficiência global.

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 7, no caso específico da fonte de  $^{45}\text{Ca}$  ( $E_{\text{máx}} = 0,252 \text{ MeV}$ ), a eficiência intrínseca do detector encontrada foi de 17 %, já a eficiência para a fonte de  $^{204}\text{Tl}$  ( $E_{\text{máx}} = 0,766 \text{ MeV}$ ) foi de 66 %.

## REFERÊNCIAS

- [1] CARVALHO, Marcos R. Metodologia para Determinação da Eficiência de um Monitor de Gases Emissores de Partículas  $\beta$ . CNEN-IPEN/SP. São Paulo, 1995 (Dissertação de Mestrado).
- [2] TSOULFANIDIS; N. Measurement and Radiation Detection of Radiation. New York, Hemisphere Publishing Corporation. (1983). 115, 195, 247;
- [3] MATHCAD 3.0 User's Guide. Copyright © 1991 by MathSoft, Inc., 201 Broadway. Cambridge. June, 1991.
- [4] DAHLQUIST, G.; Björck, Å.. Numerical Methods. New Jersey, Prentice-Hall. (1969).6, 269, 290;
- [5] MANCHUK, V. A.; Zhileikin, Ya. M. and Berezin, B. I. "Geometry Factor for a Plane Detector and Volume Cylindrical Source". Atomnaya Energiya, Vol. 37, No 6, 501; December (1974);
- [6] MASKET, A. V. H.; Maclin, R. L. and Schmitt, H. W.. "Table of Solid and Activations". November (1956). (ORNL - 2170);
- [7] KNOLL, Glenn F. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, Inc., 1989. Cap. 4.