4
SISTEMA DE CONTAGEM DE COINCIDÊNCIA EM RETARDO

4.1.
Histórico

Anteriormente ao advento da espectrometria alfa, os pesquisadores dedicados ao estudo das condições de desequilíbrio das séries de urânio e de tório dispunham de diversas técnicas radiométricas para a determinação de ^{231}Pa e sua eventual discriminação em relação aos isótopos de tório, embora nenhuma dessas técnicas fosse relevantemente específica para isótopos isolados.

Giffin et al. (1963) reportou um sistema específico e de alta sensibilidade para a determinação do ^{231}Pa, baseado na determinação de um de seus filhos, ^{219}Ra, com meia-vida de 4 s. Esse mesmo sistema viabilizou também a determinação de ^{228}Th através de um de seus filhos, ^{220}Ra, com meia-vida de 55 s. Esse sistema está fundamentado na medida dos sinais de coincidência em retardo produzidos pelo decaimento de cada um dos isótopos de radônio, para os respectivos isótopos de meia-vida curta do polônio. O ^{219}Rn e o ^{220}Rn decaem respectivamente para ^{215}Po ($t_{1/2}$ = 1,8 ms) e ^{216}Po ($t_{1/2}$ = 150 ms) e, através da rápida transferência do radônio para uma célula de contagem, as diferenças no decaimento de cada par polônio-radônio podem ser utilizadas na identificação característica do isótopo de radônio.

Giffin et al. (1963) adotou um sistema de circulação fechada para retirar e transferir o gás radônio de uma solução ácida contendo os pais para uma célula de cintilação, onde foi monitorada a atividade das partículas alfa. A eletrônica do sistema foi ajustada para registrar somente uma contagem no canal relativo ao ^{219}Rn, especificamente no caso de duas contagens ocorrerem separadas por um intervalo de tempo inferior a 11 ms. Normalmente, qualquer contagem isolada abriria a *janela* no canal do ^{219}Rn. Entretanto, a não ser que uma segunda contagem seja registrada dentro de um intervalo de 11 ms, a *janela* se fechará e, portanto, evento algum será registrado nesse canal. Para o canal referente ao ^{220}Rn, a constante de tempo (intervalo de tempo) foi elevada para 580 ms, de forma a permitir o decaimento do ^{216}Po.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

Cada canal também dispunha de um tempo de retardo, cuja função era prevenir a abertura imediata da *janela*, possibilitando o disparo do contador na região inicial do pulso. Foi adotado um retardo de 25 μs para o canal do ^{219}Rn, e o retardo no canal do ^{220}Rn serviu ainda para um propósito adicional: nesse canal, o retardo foi elevado para 21 ms, de forma a filtrar qualquer evento referente ao ^{215}Po, ou seja, todos os átomos de ^{215}Po provenientes do decaimento do ^{219}Rn deverão ter decaído antes da abertura da *janela* do canal do ^{220}Rn.

A radiação de fundo total (BG) da câmara de cintilação (de volume igual a 2 L) correspondeu a uma contagem de 2,5 cpm (contagem por minuto). Uma vez que a câmara era ativa somente durante uma pequena fração do intervalo de tempo, o *background* no canal relativo ao ^{220}Rn se limitou a 0,15 cpm. A extremamente reduzida constante de tempo para o polônio no canal do ^{219}Rn manteve seu *background* menor que 0,01 cpm.

Giffin et al. (1963) derivou expressões para o cálculo da fração de eventos randômicos de coincidência de ocorrência esperada em cada canal. Essas correções estão fundamentadas na taxa de contagem total e na fração de tempo na qual cada circuito estava em atividade, ou seja, quando cada *janela* estava aberta. Esses eventos randômicos de coincidência foram subtraídos da taxa de contagem medida, a fim de que fossem determinadas as taxas de contagens efetivas devidas ao ^{220}Rn ou ao ^{219}Rn. Nesse caso, o fator de correção é:

$$Y = \frac{[(b.c.) - (a.c.)]^2 t_g}{1 - [(b.c.) - (a.c.) t_g]}$$

onde y é a taxa de contagem randômica de coincidência, b.c. a taxa de contagem total, a.c. é a taxa de contagem de pós-coincidência em ambos os canais, e tg é a constante de tempo (tempo no qual a *janela* fica aberta) para cada canal.

Apesar do sucesso obtido com essa técnica refinada, dado algum proveniente de amostras naturais foi até então publicado. Problemas associados ao borbulhamento do gás através das amostras dissolvidas em ácidos fortes produziram variações nos resultados; e o advento da espectrometria alfa promoveu expectativas de uma sensibilidade mais elevada e uma especificidade técnica maior para a determinação do ^{231}Pa e do ^{228}Th.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

Felizmente, a técnica detalhada foi publicada por Giffin et al. (1963), e, baseado nesse trabalho, foi desenvolvido um sistema para a determinação de ^{224}Ra ($t_{1/2}$ = 3,7 dias) e de ^{223}Ra ($t_{1/2}$ = 11,4 dias).

4.2. Características do Sistema

Medidas dos quatro isótopos de rádio (^{223}Ra, ^{224}Ra, ^{226}Ra e ^{228}Ra) têm sido facilitadas por um sistema de contagem de coincidência em retardo baseado no primeiro trabalho de Giffin et al. (1963). A medida dos isótopos de rádio pela contagem de coincidência em retardo foi primeiro descrita por Moore e Arnold (1996); desde então esse sistema tem-se tornado a técnica estado-da-arte para medir isótopos de rádio de meia-vida curta.

As amostras são coletadas para passar através de uma coluna acrílica revestida com fibra de vidro impregnada com MnO_2 (fibra-Mn) que adsorve o rádio. A fibra-Mn é lavada, parcialmente seca, e colocada em um sistema fechado. Hélio é circulado pela fibra-Mn para expulsar o ^{219}Rn e ^{220}Rn gerados pelo decaimento de ^{223}Ra e ^{224}Ra através de uma célula de cintilação de 1,1 L, onde partículas alfa do decaimento de Rn e seus filhos são registrados por um tubo fotomultiplicador (TFM) conectado à célula de cintilação, conforme a Figura 4. Sinais do TFM são enviados ao sistema de coincidência em retardo.

O sistema de coincidência em retardo utiliza a diferença das constantes de decaimento do ^{219}Rn e ^{220}Rn, filhos do Po de meia-vida curta, para identificar as partículas alfa derivadas do decaimento de ^{219}Rn e ^{220}Rn e para determinar as atividades de ^{223}Ra e ^{224}Ra na fibra-Mn. Por causa dos eventos de coincidência que são requeridos para registrar uma contagem, os *backgrounds* dessas contagens são extremamente baixos, na ordem de 0,02 contagens por minuto (cpm) para ^{224}Ra e 0,003 cpm para ^{223}Ra. Normalmente, o erro esperado para as medidas de Ra de meia-vida curta é de ± 10% baseado na propagação dos erros de contagem, contagem de calibração, correções dos eventos de coincidência, e variação de amostra para amostra na extração (Moore, 1996).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

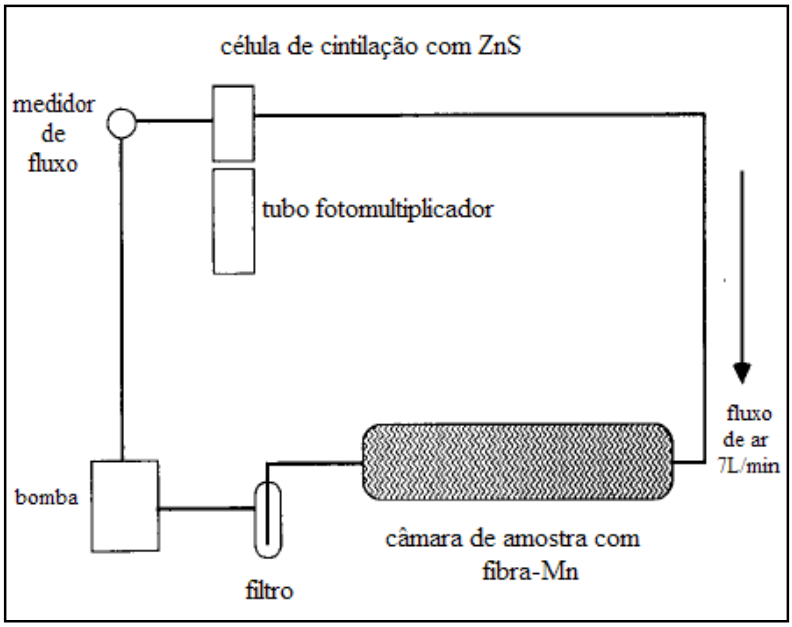

Figura 4: Diagrama esquemático do sistema de circulação, fora de escala. (Adaptado de Rama et al., 1987).

Diversos tipos de detectores de cintilação foram utilizados, sendo um deles descrito como uma célula de vidro acrílico com 12,5 cm de diâmetro e volume de 1,6 L, dispondo de tubos de entrada e de saída, um em cada extremidade. Montada sobre um tubo fotomultiplicador de mesmo diâmetro, a célula é revestida internamente com ZnS ativado com prata e externamente com tinta refletora, sendo ainda recoberta por fita adesiva preta, com exceção da janela, segundo a Figura 5 abaixo.

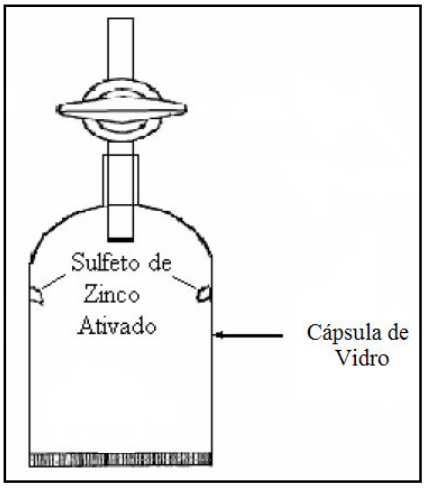

Figura 5: Célula de cintilação utilizada no sistema de contagem de coincidência em retardo. (Adaptado de Araújo, 2005).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

Outro tipo de célula foi construído a partir de um erlenmeyer, sendo mantidas as mesmas especificações anteriores para os tubos de entrada e de saída, além do tubo fotomultiplicador (TFM). O erlenmeyer, escolhido de forma a apresentar diâmetro de abertura suficientemente grande, foi vedado por uma rolha de borracha com dois orifícios, visando a conexão com os tubos de entrada e de saída. Em sua base, o erlenmeyer teve acoplado um tubo fotomultiplicador, fixado por um anel de polietileno com 1,5 cm de espessura, selado com cera preta.

Similarmente ao primeiro aparato, uma pequena bomba de diafragma promoveu a circulação de gás hélio ao longo da fibra de manganês e através da célula de cintilação a uma taxa de escoamento de 5 a 7 L min^{-1}, sendo essa última controlada através de válvula específica. A uma taxa de escoamento de 6L min^{-1}, a maior parte do decaimento do ^{219}Rn tem lugar no decorrer da primeira passagem do gás através do detector. Em função da recirculação sistemática do gás através do sistema, o ^{220}Rn alcança um estado estável no interior do sistema após 2 minutos de circulação contínua.

Qualquer partícula alfa detectada na célula de cintilação produz um sinal, o qual é direcionado para um registrador de contagem total, bem como para os circuitos 220 e 219. A estabilização do circuito 219 é obtida quando o sinal é retardado em 0,15 ms. Em seguida, o sinal abre uma *janela*, a qual permanece aberta por 5,6 ms, o que equivale, aproximadamente, a 3 meias-vidas do ^{215}Po.

Qualquer segunda contagem detectada dentro desse intervalo de tempo será registrada obrigatoriamente no canal 219. A contagem em si se deve mais provavelmente ao decaimento do ^{215}Po, mas ela não seria registrada se o decaimento do ^{219}Rn não tivesse aberto a *janela*.

Todos os sinais são também direcionados ao circuito 220, onde são retardados por 10 ms, de forma a permitir o decaimento de qualquer polônio produzido a partir do ^{219}Rn. Em seguida, o circuito é aberto por 600 ms, correspondente a aproximadamente 4 meias-vidas do ^{216}Po, de forma que, se um sinal ocorrer no decorrer da abertura da *janela,* é registrado na abertura do canal 220, segundo a Figura 6 a seguir.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

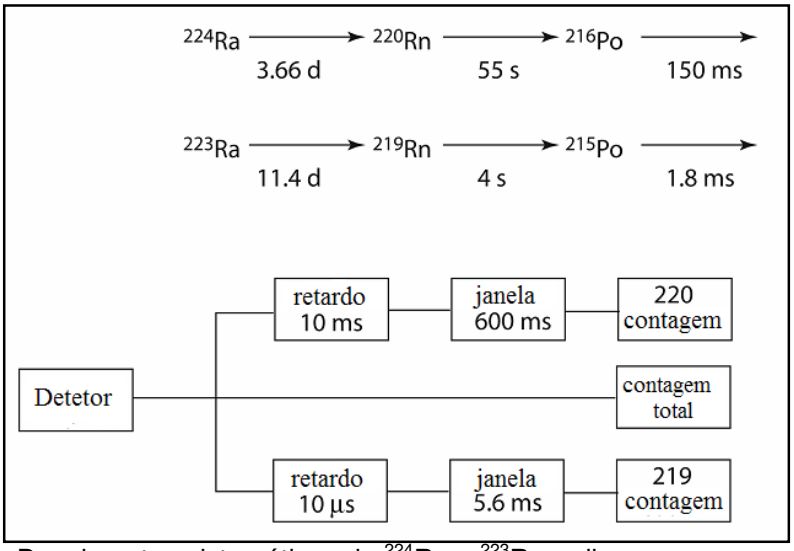

Figura 6: Decaimentos sistemáticos de ^{224}Ra e ^{223}Ra e diagrama esquemático do circuito de coincidência em retardo. (Adaptado de Moore e Arnold, 1996).

A ocorrência de *crosstalk* (a presença de um sinal indesejado proveniente de um acoplamento acidental) entre os canais é mínima. O retardo no circuito 220 previne de forma efetiva qualquer registro de sinais oriundos do par ^{219}Rn/^{215}Po no circuito. Alguns eventos referentes ao par ^{220}Rn/^{216}Po são captados no circuito 219, por ser o intervalo de retardo de 5,6 ms longo o suficiente para que tenha lugar nessa *janela* cerca de 2,5% do decaimento do ^{220}Rn a ^{216}Po.

Entretanto, esse percentual é posteriormente subtraído juntamente com as contagens de coincidência randômicas. Para a determinação de baixas atividades de ^{219}Rn na presença de altas atividades de ^{220}Rn, a eficiência do sistema para determinar ^{220}Rn é reduzida pelo acoplamento de um reservatório de gás ao circuito. Dessa forma, ocorre uma redução da taxa de contagem global e, em conseqüência, das taxas de contagem de coincidência randômica e de *crosstalk* referentes ao ^{219}Rn.

Além de viabilizar a identificação clara do ^{223}Ra ou do ^{224}Ra presentes na fibra de manganês, o contador de coincidência em retardo apresenta a vantagem de trabalhar com *backgrounds* extremamente reduzidos. Após a correção devida da presença de eventos de coincidência randômicos, as contagens típicas de *background* no canal 220 se situam na faixa de 0,02 a 0,05 cpm. Já para o canal 219, a taxa de contagem de *background* é da ordem de 0,001 a 0,003 cpm, ou 2-4 contagens por dia.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

Por exemplo, seria esperável que uma taxa de contagem total de 4 cpm produzisse um taxa de contagem 220 (taxa de coincidência randômica) correspondente a 0,15 cpm, mesmo na ausência de ^{220}Rn. Por outro lado, para o ^{219}Rn, as mesmas condições produziriam uma taxa de coincidência randômica de 0,0015 cpm. Para viabilizar ao máximo a taxa de coincidência randômica, o *background* total deve ser o menor possível.

Devido ao fato de que a taxa de coincidência randômica aumenta com o quadrado da taxa de contagem total, esse sistema não é adequado para a determinação de altas atividades de ^{220}Rn ou ^{219}Rn. A taxa de coincidência randômica é equivalente a um *background* e deve ser subtraída da taxa de contagem líquida, dessa forma aumentado o erro associado aos dados.

Um ajuste final relacionado ao ^{219}Rn e a seu filho deve ser realizado para os dados de ^{220}Rn. Se os decaimentos de dois átomos de ^{219}Rn ocorrem durante o intervalo de abertura da janela do canal do ^{220}Rn, o segundo decaimento, bem como o decaimento do ^{215}Po, serão registrados no canal 220. No caso, é feita uma correção de segunda ordem, a partir da atividade corrigida de ^{219}Rn e da eficiência do detector.

4.3. Extensibilidade da Técnica

De forma análoga à verificada com ^{223}Ra, a determinação com alto grau de sensibilidade de ^{224}Ra promove uma forma de determinação também de seus pais. O ^{228}Ra ($t_{1/2}$ = 5,7 anos) decai para ^{228}Th ($t_{1/2}$ = 1,9 anos) e os isótopos de tório são eficientemente retidos pela fibra de manganês (Moore, 1976; Reid et al., 1979). As determinações de ^{224}Ra levadas a efeito após ter sido alcançado seu equilíbrio com o ^{228}Th (cerca de vinte dias) na fibra de manganês na realidade são determinações desse último. Esses dados permitem também o cálculo do excesso de ^{224}Ra na água.

Determinações adicionais de ^{228}Th no decorrer de um período de 3 a 9 meses, devidas ao seu crescimento a partir do ^{228}Ra na fibra de manganês, podem ser utilizadas na avaliação da atividade inicial de ^{228}Ra coletada pela fibra de manganês. Com o objetivo de completar o quarteto de rádio, pode ser feita a determinação direta de ^{226}Ra na fibra de manganês, através da técnica desenvolvida por Butts et al. (1988). Todas essas opções oferecem uma forma eficiente e simples de se determinar ^{223}Ra, ^{224}Ra, ^{228}Th, ^{228}Ra e ^{226}Ra sem tratamento químico da fibra de manganês (Moore, 1996).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

4.4. Background

A maior vantagem do sistema de coincidência em retardo é a redução das contagens de background nas janelas 220 e 219. Para um sistema tendo um background total nominal de 1 contagem por minuto (cpm), o background total do canal 220 deverá ser da ordem de 0,01 cpm e o canal 219 deverá tipicamente ter um background total de < 1 contagem por dia. Quando esses backgrounds totais nos canais 220 e 219 são corrigidos para eventos de coincidência, ou seja, dois eventos aleatórios ocorrendo a um tempo constante da janela, os backgrounds da rede usualmente reduzem a números muito próximos de zero. Não obstante, é importante para monitorar o background total, fornecendo uma indicação de contaminação do sistema. Também medidas de background total são requeridas para calcular a contagem total de ^{224}Ra (Moore, 2008).

4.5. Padrões

Para Moore (2008), a calibração do sistema requer que a eficiência de cada canal seja determinada por medidas com materiais de referência padrão preparados da mesma forma que as amostras. Por causa de suas meias-vidas curtas, ^{224}Ra e ^{223}Ra não podem ser usados como padrões a longo prazo. Em substituição a esses, a fibra-Mn pode ser preparada com um parente de meia-vida longa de ^{224}Ra ou ^{223}Ra. O ^{228}Ra em equilíbrio com ^{228}Th pode ser usado para ^{224}Ra e ^{223}Ra; entretanto, a atividade deverá mudar em resposta ao decaimento de ^{228}Ra. Dessa forma, os padrões devem ser medidos imediatamente após o preparo. As medidas devem continuar todos os dias nos 3 primeiros dias. Esse procedimento é importante para determinar se o Th adsorveu igualmente à fibra-Mn. Se a atividade de um padrão diminuir durante os primeiros dias, isso indica que o Ra foi adsorvido mais efetivamente que o Th. Se a atividade aumentar com o tempo, isso indica que o Th foi adsorvido mais efetivamente que o Ra. Caso a atividade do padrão não se mantenha constante durante os primeiros dias, ele deverá ser descartado e outro será preparado. Em alguns casos, o problema está na umidade do padrão; sendo ele lavado e seco parcialmente e novamente medido.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

Segundo Moore (1996), a qualidade dos padrões é considerada como crucial para a verificação do sistema também por promover uma outra checagem, no caso, dos procedimentos estatísticos adotados na correção devida à ocorrência de eventos randômicos de coincidência, bem como para *crosstalk* entre os canais de ^{219}Rn e de ^{220}Rn, respectivamente.

4.6. Eficiência

Para Moore (2008), a eficiência total da célula é a probabilidade de registrar uma contagem de um decaimento alfa que ocorre enquanto a célula está contando. Para o decaimento do radônio em uma célula purgada com hélio, a eficiência é normalmente 0,8 a 0,9.

A eficiência verdadeira total do sistema é a probabilidade de registrar uma contagem de um decaimento alfa proveniente do sistema (célula de contagem, coluna de fibra-Mn, tubulação, bomba), considerando-se o decaimento que ocorre fora da célula. Se a razão do volume da célula para o volume total do sistema é 0,8, a eficiência total do sistema para uma eficiência da célula de 0,85 é 0,68.

A eficiência aparente total do sistema é a probabilidade de registrar uma contagem seguindo o decaimento de ^{224}Ra ou ^{223}Ra na fibra. Desde que haja dois rápidos decaimentos alfa para cada decaimento de Ra na fibra, a eficiência aparente do sistema (considerando uma eficiência total do sistema de 0,68) é 1,36.

A eficiência do canal 220 é a probabilidade de registrar uma contagem no canal 220 de um decaimento de ^{224}Ra na fibra. Considera-se que a probabilidade de detecção do evento de coincidência ^{220}Rn-^{216}Po é o quadrado da eficiência da célula vezes a razão do volume da célula pelo volume total do sistema. No exemplo acima deverá ser 0,85 x 0,85 x 0,80 = 0,58. Este está próximo ao limite prático para a eficiência de medida de ^{223}Ra ou ^{224}Ra.

A eficiência do canal 219 deverá ser ligeiramente menor que a eficiência do 220 porque os 4 s de meia-vida do ^{219}Rn resulta em algum decaimento de ^{219}Rn dando lugar antes ao movimento do gás da coluna de fibra-Mn à célula.

Segundo Moore (1996), para um volume total do sistema de 1-3 L e com uma taxa de escoamento de 6 L min^{-1}, a meia-vida de 55 s do ^{220}Rn é longa o suficiente para que ocorra o nivelamento da atividade em todos os setores do sistema 5 minutos após ter sido iniciada a circulação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

A razão de volume entre o detector e o sistema total para os detectores de 1,1 L corresponde a 0,77, de tal forma que a eficiência do detector para ^{220}Rn ou ^{216}Po deve ser 0,61. Essa eficiência é o produto da eficiência de detecção de ^{220}Rn e ^{216}Po em coincidência, de tal forma que a eficiência de detecção de um ou outro é de 0,78. A eficiência mais baixa para o ^{223}Ra é devida ao decaimento do ^{219}Rn, o qual ocorre antes que o gás alcance o detector e devido ao fato de que o tempo de residência de 16 s no detector permite somente que 94% do decaimento do ^{219}Rn ocorra no decorrer da primeira passagem.

As taxas de contagem em cpm nos canais 219 e 220 correspondem às taxas de contagem no respectivo canal subtraída das respectivas taxas de coincidência randômicas. No exemplo, a eficiência do detector para ^{219}Rn e ^{215}Po é 0,8. Essa eficiência é multiplicada por dois, uma vez que são duas as partículas alfa produzidas pelo decaimento de cada átomo de ^{219}Rn.

Exemplificando, se a eficiência para um evento isolado é 0,7, então a eficiência para um evento de coincidência será de 0,49. Eventos isolados que não correspondam a eventos de coincidência aumentam a taxa de contagem total e, dessa forma, o número de contagens que devem ser subtraídas como coincidências randômicas.

Uma alta eficiência de detecção é fundamental para a obtenção de dados mais consistentes. A probabilidade de registro (ou seja, a eficiência) de um evento de coincidência corresponde ao produto das probabilidades de registro de um evento para cada membro do par.

4.7. Medidas de ^{223}Ra e ^{224}Ra por Contagem de Coincidência em Retardo

O rádio é extraído da água do mar por meio de uma coluna acrílica recheada com fibra de vidro impregnada com dióxido de manganês (fibra de Mn), segundo a Figura 7 abaixo (Moore, 1976). O procedimento adotado em sua determinação se baseia no fato de que o radônio produzido pelo decaimento do rádio é quantitativamente expelido da fibra de manganês (Butts et al., 1988; Rama et al., 1987).

Neste sistema, o hélio circula através da fibra de manganês para remover o ^{219}Rn e ^{220}Rn gerados pelo decaimento do ^{223}Ra e ^{224}Ra. Ambos atravessam uma célula de *Lucas*, onde as partículas alfa oriundas do decaimento do Rn e seus filhos serão captadas por um tubo fotomultiplicador (TFM) anexado à célula.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

Os pulsos gerados pelo TFM serão então encaminhados para um sistema de coincidência em retardo adotado pioneiramente por Giffin et al. (1963) e adaptado para as medidas de rádio por Moore e Arnold (1996).

O rádio é incorporado à água salgada sempre que essa entra em contato com sedimentos. Ao apresentarem caracteristicamente em sua composição isótopos de tório adsorvidos, os sedimentos se constituem em uma fonte contínua de filhos do rádio com meia-vida curta, de forma muito similar aos padrões, os quais fornecem uma fonte contínua de ^{220}Rn e ^{219}Rn.

Devido ao fato de a maioria dos sedimentos apresentarem uma atividade muito maior de ^{232}Th em relação ao ^{235}U, a atividade inicial de ^{224}Ra será consideravelmente maior que a de ^{223}Ra.

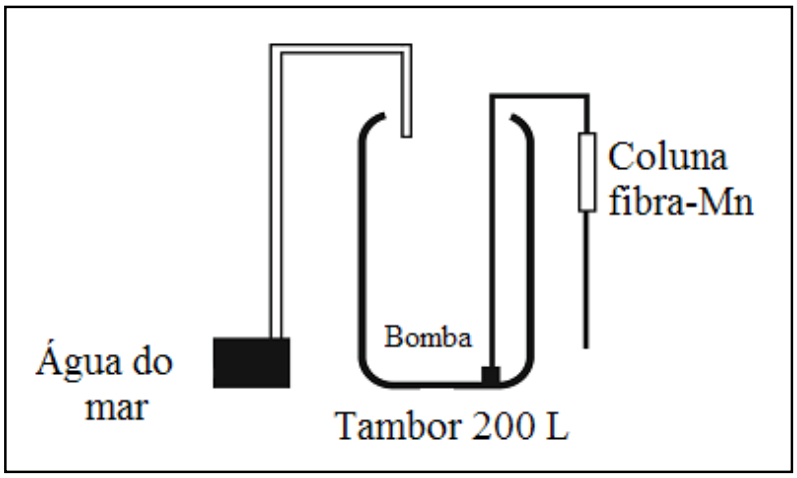

Figura 7: Amostragem de isótopos de rádio.

A coluna de amostra, contendo a célula e linha são nivelados com pelo menos 5 volumes da célula de hélio. A circulação é então programada para bombear o hélio através da coluna de amostra de baixo para cima através da amostra. A razão da vazão é monitorada usando um barômetro (Moore, 2008).

4.7.1. Fluxo com Hélio

A faixa de partículas alfa no ar é consideravelmente menor que no gás hélio. Quando a câmara de contagem é purgada com hélio ao invés do ar, mais partículas alfa do decaimento do radônio podem alcançar as paredes da câmara e interagir com o sulfeto de zinco. Segundo Moore (2007), testes de eficiência foram feitos entre corridas utilizando hélio e ar, segundo a Tabela 1. Os resultados confirmaram a importância do uso de hélio como gás de contagem.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

Para cada sistema a eficiência média aparente total usando ar foi somente 55-69% da eficiência usando hélio; a eficiência 220 foi somente 26-43% da eficiência usando hélio. A eficiência 220 diminuiu muito, mais que a eficiência total porque a eficiência 220 é o produto da eficiência da célula de medida do decaimento de ^{220}Rn e ^{216}Po em coincidência.

Tabela 1: Resultados de corridas de padrões em quatro sistemas utilizando hélio e ar como gás carreador.

Padrão	Sistema	Data	Gás Carreador	Eficiência 220	Eficiência Total
H_7	1	22-Jan-07	He	0,46	1,19
H_7	1	23-Jan-07	He	0,46	1,10
H_7	1	02-Fev-07	He	0,48	1,18
			Média	0,47	1,16
H_7	1	22-Jan-07	Ar	0,20	0,79
H_7	1	24-Jan-07	Ar	0,20	0,77
H_7	1	29-Jan-07	Ar	0,18	0,73
			Média	0,19	0,77
H_9	2	22-Jan-07	He	0,31	0,82
H_9	2	23-Jan-07	He	0,30	0,84
H_9	2	02-Fev-07	He	0,31	0,83
			Média	0,31	0,83
H_9	2	22-Jan-07	Ar	0,08	0,53
H_9	2	24-Jan-07	Ar	0,09	0,43
H_9	2	29-Jan-07	Ar	0,08	0,42
			Média	0,08	0,46
H_{12}	3	20-Jan-07	He	0,26	0,81
H_{12}	3	22-Jan-07	He	0,25	0,77
H_{12}	3	23-Jan-07	He	0,26	0,77
			Média	0,26	0,78
H_{12}	3	20-Jan-07	Ar	0,09	0,46
H_{12}	3	22-Jan-07	Ar	0,08	0,49
H_{12}	3	24-Jan-07	Ar	0,08	0,42
H_{12}	3	29-Jan-07	Ar	0,08	0,42
			Média	0,08	0,45
H_{13}	4	20-Jan-07	He	0,36	0,86
H_{13}	4	22-Jan-07	He	0,33	0,77
H_{13}	4	23-Jan-07	He	0,33	0,76
			Média	0,34	0,80
H_{13}	4	20-Jan-07	Ar	0,16	0,57
H_{13}	4	22-Jan-07	Ar	0,15	0,63
H_{13}	4	24-Jan-07	Ar	0,14	0,50
H_{13}	4	29-Jan-07	Ar	0,14	0,49
			Média	0,15	0,55

Fonte: Moore, 2007.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA

É também requerido um tempo de permanência do gás no detector da ordem de 10-15 segundos, visando possibilitar o decaimento de 80-90% dos átomos de ^{219}Rn no decorrer de uma única passagem e uma taxa de escoamento da ordem de 6 L min^{-1} é indicada para deslocar mais de 80% do ^{219}Rn do cilindro de fibra de manganês com 200 mL de volume para o interior do detector, o que faz com que o volume mínimo do detector alcance um valor aproximadamente igual a 1 L.

4.7.2. Segunda e Terceira Corridas

Uma semana após a primeira corrida, a atividade de ^{224}Ra diminui aproximadamente 75%, mas o ^{223}Ra deverá ter diminuído somente 35%. Realiza-se então, uma recontagem das amostras por um longo período de tempo após 7-10 dias para produzir uma melhor contagem de ^{223}Ra. A baixa atividade de ^{224}Ra durante a segunda contagem significa a correção de 2,5% devido aos eventos de ^{224}Ra que aparecem no canal 219 que deverá ser reduzido consideravelmente. Depois de 25 dias a atividade de ^{224}Ra deverá ser <1% da atividade inicial e ^{224}Ra deverá estar essencialmente suportado pelo ^{228}Th na amostra. Então, uma nova recontagem neste tempo irá medir ^{228}Th (Moore, 2008).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621170/CA