

OS DESAFIOS PARA A IMPLANTAÇÃO DE UM PADRÃO PRIMÁRIO PARA AS GRANDEZAS EXPOSIÇÃO E KERMA NO AR

Carlos Eduardo de Almeida

Laura Natal Rodrigues

Colaboradora

Karla Padrão

Colaboradora

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é descrever de forma integrada e sequencial os esforços que levaram à implantação do padrão primário no Laboratório Nacional de Metrologia do Brasil e sua rastreabilidade à rede metrológica internacional através das comparações realizadas com o Bureau Internacional de Pesos e Medições (BIPM).

Como já definido anteriormente no Capítulo 3, o instrumento que apresenta as melhores características para medições absolutas da grandeza exposição no ar, de acordo com sua definição, é a câmara de ionização cavitária com volume conhecido.

A grandeza Exposição, X , como definida pelo ICRU Report 33 (Wyckoff et al., 1980), é resultado do quociente de dQ e dm , sendo dQ o valor absoluto da carga produzida por íons do mesmo sinal na massa de ar quando os elétrons (négatrons ou pósitrons) liberados pelos

fótons numa massa de ar dm estão completamente parados no ar.

A unidade pelo sistema SI é o C/kg, mas sua unidade especial era o Roentgen, usado por muito tempo, com o valor numérico igual a $2,58 \times 10^{-4}$ C kg⁻¹.

Medições da grandeza Exposição e, como consequência, do Kerma no ar têm uma grande importância, pois constituem a base metrológica, estando relacionadas às calibrações em dose absorvida dos feixes de fótons e elétrons de alta energia usados na radioterapia, aos estudos de radiobiologia e das medições em radioproteção, que ainda são inteiramente dependentes da grandeza kerma no ar. A câmara de ionização de grafite puro padrão primário do LNMRI foi construída no Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf (OFS), na Áustria, e cedida por Dutschmid (1986).

Durante o ano de 1986, ela foi extensivamente comparada durante 9 meses com o padrão do BIPM, conforme relatado por de Almeida e Niatel (1986), sendo em seguida implantado no LNMRI e relatado por de Almeida et al. (1990) e (1996) em arranjo experimental desenhado e construído exclusivamente para tal propósito.

2. DIMENSÕES E CARACTERÍSTICAS DOS PADRÕES LNMRI E BIPM

2.1 Padrão do LNMRI

O Padrão primário do LNMRI é uma câmara cilíndrica de grafite construída pelo OFS, com seu volume definido pelo mesmo laboratório e construída de grafite ultrapuro (99,99%) com um bom sistema de isolantes para minimizar a fuga os efeitos de polarização, garantindo uma ótima estabilidade a longo prazo e uma qualidade metrológica compatível com padrões semelhantes.

O seu volume sensível foi estimado pelo OFS a partir das dimensões físicas internas da câmara, definido com uma incerteza de 0,1 % após a subtração do volume do eletrodo, de acordo com a Figura 1, e o volume sensível adicional na base do eletrodo, como descrito na Figura 2.

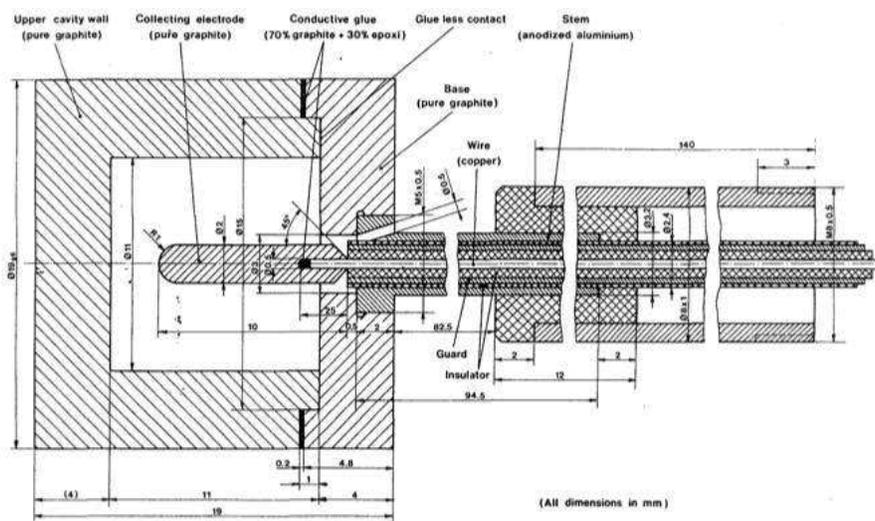


Figura 1 – Apresenta o diagrama físico da câmara cilíndrica.

Fonte: Autores.

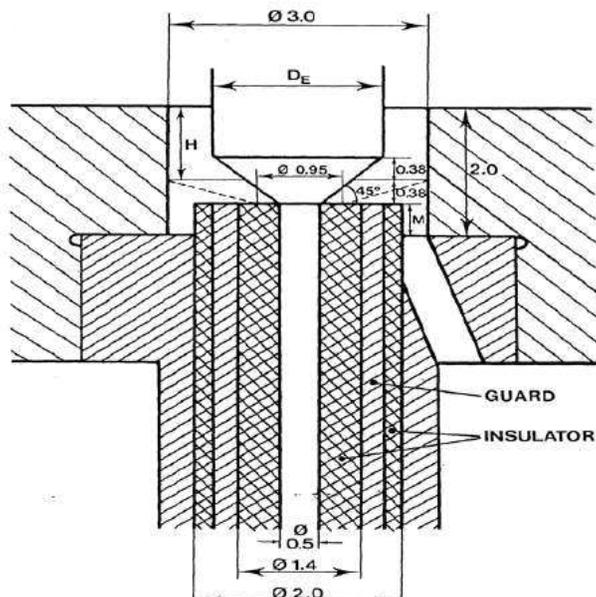


Figura 2 – Apresenta uma visão da região do anel de guarda e do eletrodo adicionadas para calcular o volume residual adicional da câmara nesta região.

Fonte: Autores.

PADRÃO LNMRI		CCO1-110	
		Valores nominais	
Câmara	Altura externa mm	19	
	Diâmetro externo mm	19	
	Altura interna mm	11	
	Diâmetro interno mm	11	
	Espessura parede mm	4	
Eletrodo	Diâmetro mm	2	
	Comprimento mm	100	
Volume	Cavidade de ar cm ³	1,076 +/- 0,0003	
	Parede	Materiais	Grafite ultrapuro-EK 51
		Espessura mm	4
		Densidade g-cm ⁻³	1.71
	Impurezas	<1,5 x 10 ⁻⁴	
Isolante		Polietileno	
Tensão de operação	V	300 V	
Capas diâmetro externo	27, 35, 43, e 51 mm	Grafite ultrapuro-EK 51	

Tabela 1 – Uma descrição completa do padrão do LNMRI, câmara cilíndrica de grafite, suas dimensões, composição da parede, capas, isolantes e as condições de operação usadas.

Fonte: Autores.

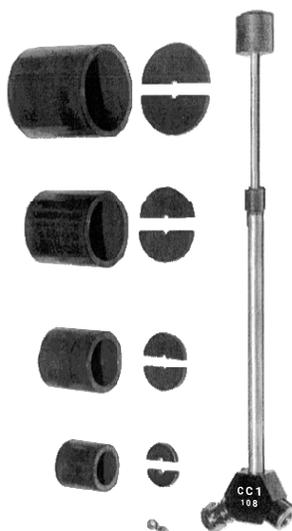


Figura 3 – Mostra com detalhes a câmara com as capas de grafite usadas para a determinação da atenuação da parede usando o método de extrapolação. Observa-se os complementos de grafite que são adicionados na base da câmara após a inserção de cada capa para preservar as condições de espalhamento.

Fonte: Autores.

ARRANJO EXPERIMENTAL NO LNMRI

As condições experimentais construídas no LNMRI e descritas por de Almeida et al. (1990, 1996) compreenderam a criação de um ambiente fechado com $3 \times 3 \times 2\text{m}^3$, paredes de vidro dentro do bunker da unidade de Cobalto e piso suspenso de madeira, de forma a reduzir as variações de temperatura, devido ao ar-condicionado, no máximo em $\pm 0,1 \text{ oC}$. A temperatura foi monitorada por dois termopares, um colocado próximo à câmara e o outro na extremidade da sala.

Abaixo do piso de madeira foi colocado como isolante de 10 cm de isopor, de forma a minimizar o calor emanado do solo. A umidade foi mantida em torno de 55 % por um desumidificador, sendo monitorado continuamente por um transdutor de umidade, e a pressão foi medida por um transdutor de pressão calibrado. A temperatura foi monitorada por dois termistores, um colocado na extremidade da sala e outro próximo a câmara de ionização de forma que as medições só seriam iniciadas quando os dois apresentasse o mesmo valor. Se a temperatura variasse mais que o “default” de $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ entre suas leituras sucessivas, a fuga seria medida novamente para assegurar um valor abaixo de 0,1 % e reiniciar as medições de corrente, temperatura, pressão e umidade simultaneamente. A câmara foi fixada num suporte tipo IAEA montado na superfície da base móvel de uma fresa, sendo o movimento longitudinal medido por um transdutor de posição com resolução

de 0,1 mm. Como a unidade Picker modelo VIM-60 foi projetada para trabalhar com SSD de 60 cm, um colimador cônico com 7 cm de chumbo foi colocado a 50 cm da fonte, de forma a se obter um nível de uniformidade adequado no campo $10 \times 10 \text{ cm}^2$ a 100 cm, conforme a Figura 4.



Figura 4 – Mostra o colimador adicional divergente e a câmara posicionada no centro do feixe de radiação da fonte de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ a 100 cm.

Fonte: Autores.

A distância da fonte ao plano de referência foi mantida usando um indicador de luz e definida por uma barra de aço inoxidável com 75 cm, sendo feito um “double-check” com um telêmetro de alta resolução posicionado lateralmente, como mostra a Figura 5.

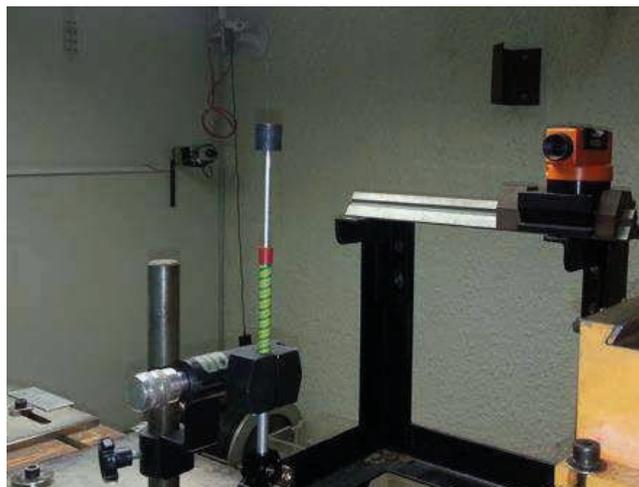


Figura 5. O centro da câmara posicionada a 100 cm de distância da fonte foi verificado com sistema óptico colocado numa base fixa para comprovar que o centro da câmaras dos LNMRI e do usuário estejam na mesma distancia;

Fonte: Autores.

Atividade da fonte	102.1 TBq em 3 de maio 1985
Dimensões da fonte	
Diâmetro	20 mm
Altura	20 mm
Distância fonte-câmara	100 cm
Tamanho do campo no plano de referência	10 x 10 cm ²
Umidade relativa	55 %
Temperatura e Pressão	Medições ao longo das medições

Tabela 2 – Especificações gerais do arranjo do LNMRI.

Fonte: Autores.

2.2 Padrão BIPM

A câmara do BIPM descrita por Boutillon e Niatel (1973) é uma câmara de grafite de placas paralelas com eletrodo coletor no centro da cavidade entre as paredes. O volume foi determinado através das medições de seu comprimento, do coletor e da espessura das paredes com um comparador Abbe bastante sensível (exatidão de 0,1 µm), realizando assim medições ao longo das superfícies. A espessura da cavidade foi medição subtraindo a espessura das paredes frontal e posterior, sendo obtido um volume efetivo de 6,811 cm³, com uma incerteza de 0,081 % e um desvio padrão de 0,011%.

PADRÃO BIPM	TIPO PILL BOX
Dimensões	
Diâmetro externo da cavidade	44,99 mm
Espessura	5,13 mm
Diâmetro interno do coletor	40,98 mm
Espessura	1,019 mm
Volume sensível	6,8116 cm ³
Espessura da parede anterior	2,827 mm
Espessura da parede posterior	2,831 mm
Espessura da parede posterior	2,75 mm
Material da parede	Grafite
Densidade	1,84 g-cm ⁻³
Impureza	<10 ppm

Tabela 3 – Especificações gerais do padrão do BIPM.

Fonte: Autores.

ARRANJO EXPERIMENTAL NO BIPM

A câmara é colocada num feixe colimado de raios gama de uma fonte de ^{60}Co à distância de 1,1201 m, campo de radiação de 10 cm de diâmetro, ou seja, duas vezes o diâmetro da câmara. O arranjo experimental foi desenhado de forma a manter a contribuição da radiação espalhada ao mínimo possível, conforme Perroche e Boutillon (1991). Entretanto, a maior contribuição de radiação espalhada da ordem de 8 % se origina na própria fonte, além dos colimadores e do ar entre a fonte e a câmara.

A câmara foi montada numa base de fresa mecânica e seu deslocamento conferido por uma escala micrométrica.

A corrente de ionização foi medida nas duas polaridades pelo método de Townsend, sendo as leituras registradas automaticamente. Como a câmara era ventilada, as condições ambientais foram medidas com um termistor próximo à câmara e um transdutor de pressão no mesmo ambiente.

Um bloqueador de feixe foi usado para manter a fonte na mesma posição, de forma a evitar um mal posicionamento da fonte entre as medições com as duas câmaras. As medições eram realizadas no mesmo dia e, sistematicamente, as medições com a câmara do LNMRI eram feitas primeiro, embora sem que fosse observada nenhuma tendência.

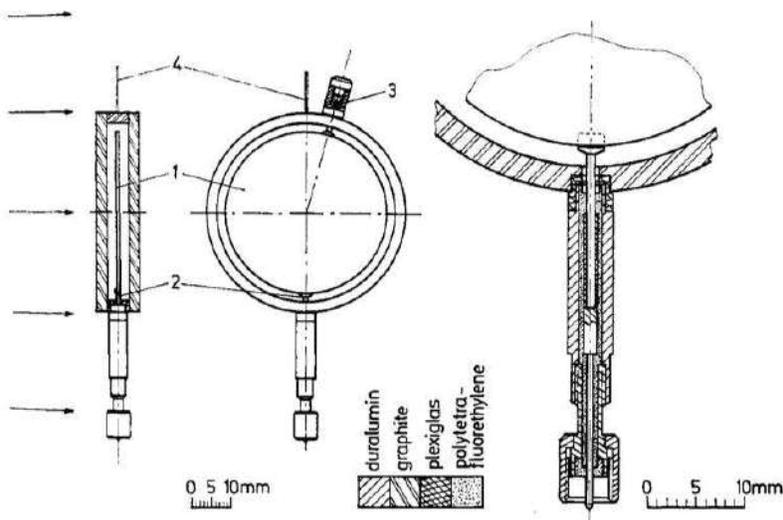


Figura 6 – Diagrama detalhado do padrão do BIPM onde se observa os vários elementos usados na sua construção.

Fonte: Adaptado de Boutillon and Niatel(1973).

Atividade da fonte	1 T Bq
Dimensões da fonte	
Diâmetro	5,6 mm
Altura	4,9 mm
Distância fonte-câmara	1120 mm
Tamanho do campo no plano de referência – diâmetro	100 mm
Umidade relativa	50 % a 21 °C
Taxa de kerma	3,546 µA em 1 de janeiro de 1986
Razão entra I+ e I-	1,0002
Tempo de leitura	22 s
Potencial V	+/- 80
Temperatura e Pressão	Medições ao longo das medições

Tabela 4 – Especificações gerais do arranjo experimental do BIPM.

Fonte: Autores.

2.3 Formalismo para a determinação das grandezas Exposição e Kerma no ar a partir das medições experimentais

O formalismo proposto por Allisy (1967) e estendido por Boutillon e Niatel (1973) levou em conta as dimensões da cavidade, a presença da parede e do eletrodo central, além dos vários fatores de correção derivados empiricamente, como as condições ambientais e de medições.

Assim, de acordo com o princípio de Bragg-Gray, a medição da ionização no centro da câmara, na sua ausência, é definida pela relação a seguir:

$$X = I / \rho \nu s_{c,a} (\mu_{en} / \rho_{ar} / \mu_{en} / \rho) c \prod K_j \quad (1)$$

Onde:

I = corrente de ionização resultante da coleção dos íons produzidos no ar dentro da cavidade da câmara, levando em conta a atenuação do ar entre a fonte e a câmara

ν = volume sensível da câmara no qual as cargas são produzidas e coletadas = 1,0176

ρ = densidade do ar nas condições de medição, levando em conta o fator de compressibilidade do ar que corrige o seu desvio da lei do gás perfeito

$s_{c,a}$ = razão do *stopping power* restrito entre o grafite e o ar, calculado com base na teoria de Spencer-Attix, levando em conta o valor médio da energia no espectro de elétrons

gerado pelo efeito Compton, considerando como a energia de corte 17,5 keV, o tamanho da cavidade e a energia média de excitação de 78 eV para o carbono e 85,7 eV para o ar $(\mu_{en}/\rho)_{ar}/(\mu_{en}/\rho)_C$ = razão entre os coeficiente de absorção massa-energia para o ar e o grafite copilados do trabalho de Hubbel e Seltzer (1995) = 0,9985.

ΠK_j = produto de vários fatores de correção:

k_l = correção para a fuga;

k_h = correção para a presença de vapor de água, uma vez que X é definido para ar seco;

k_{st} = correção para espalhamento na haste da câmara;

k_{rn} = correção devido a não uniformidade radial do feixe;

k_{an} = correção devido a não uniformidade axial do feixe;

k_w = correção devido à atenuação da parede da câmara;

k_{cep} = ponto de origem dos elétrons;

$k_{t,p}$ = correção da massa de ar para temperatura e pressão de referência.

A determinação da taxa de kerma no ar K a partir das medições da exposição X segue o formalismo abaixo:

$$K_{air} = X / 1 - g W / e \quad (2)$$

Onde:

X = exposição;

g = fração de energia perdida pelo efeito *bremmstrahlung* = 0,02

W = energia média necessária para produzir um par de íons;

e = carga elétrica de um elétron;

W/e = 33,7 J/C.

DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE CORREÇÃO

k_l = correção para a fuga de pré-irradiação e pós-irradiação nas duas polaridades positivas e negativas, que deve ser menor de 0,1 % do sinal;

k_{rn} = correção devido a não uniformidade radial do feixe medido com filme ou microcâmara no plano da medição;

k_{an} = leva em conta a variação da fluência de fótons, de acordo com a lei do inverso do quadrado da distância, supondo que o feixe seja simétrico;

k_{cep} = centro médio de origem dos elétrons liberados pelos fótons ao atravessar somente a parede, resultando na sua atenuação. Pode ser calculado levando em conta o alcance dos elétrons no grafite e o coeficiente de atenuação linear medido em condições boa geometria;

k_{st} = correção para espalhamento na haste da câmara, medido de acordo com a técnica sugerida por Boutillon e Niatel (1973) de colocar uma haste falsa na posição diametralmente oposta à da câmara;

kh = correção para a presença de vapor de água, uma vez que X é definido para ar seco na faixa de 40 a 60 %;

ks = avaliação da eficiência de coleção dos íons, tendo como parâmetro a recombinação volumétrica estimada de acordo com o seguinte formalismo:

$$I_s - I_v/I_s = P(I_s V) = a/V + b I_s/V^2 \quad (3)$$

Onde:

I_s = corrente de saturação;

I_v = valor médio da corrente medição com ambas as polaridades;

a/V = recombinação inicial;

$b I_s /V^2$ = recombinação volumétrica.

As medições são realizadas no ar com oito tensões diferentes.

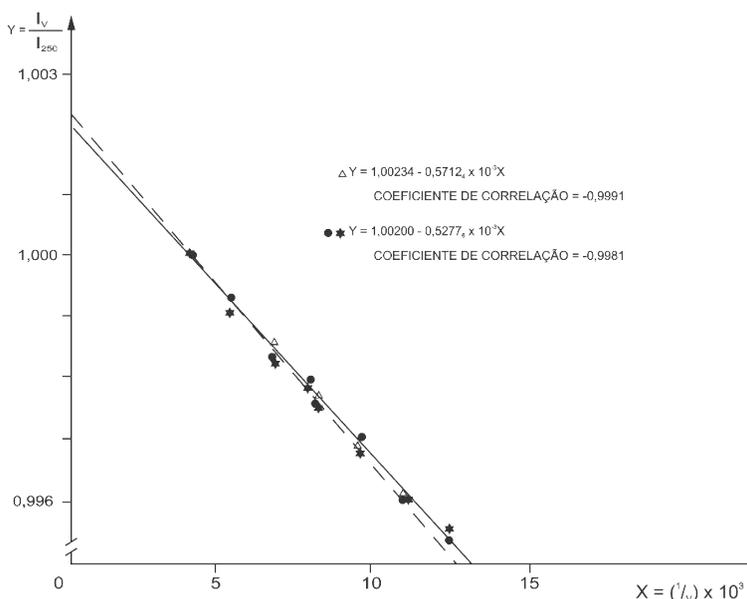


Figura 7. Estimativa da correção por recombinação: Δ = dados obtidos no LNMRI e $*$ = dados obtidos no BIPM.

Fonte: de Almeida and Niatel (1986).

Kw: ATENUAÇÃO DA PAREDE,

A medição definida experimentalmente usando cinco capas de grafite com espessura conhecida (Tabela 1) e graficamente relacionadas à corrente, sendo seu valor determinado por extrapolação, levando em conta KCEP que representa o ponto médio de produção dos elétrons na parede. Esse ponto foi definido como sendo localizado a 0,78 mm do interior da cavidade.

O valor experimental por extrapolação linear encontrado foi de 1,0125, e o novo valor calculado por Monte Carlo, que, segundo Rogers (2020) já inclui o KCEP, foi de 1,0126, levando em conta a não linearidade da função, descrita por Rogers e Bielajew (1990), como mostra a Figura 7.

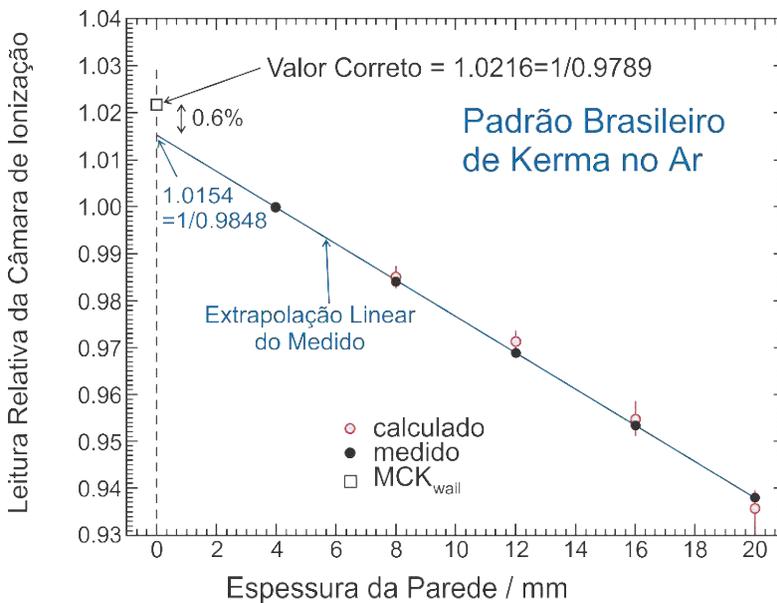


Figura 8 – Determinação experimental da correção da atenuação da parede de grafite:

- = valor calculado por Monte Carlo
- = valores medidos experimentalmente por de Almeida e Niatel (1986)
- = valor estimado para K_{wall} , já incluído KCEP, de acordo com Rogers (2020).

Fonte: Rogers (2020).

Correção pela presença de vapor de água no ambiente K_H : de acordo com a recomendação do CCMRI, a grandeza Exposição é definida para a ionização no ar livre de vapor de água.

Correção para temperatura e pressão $K_{t,p}$: quando diferentes das condições de referência, impactam no valor da massa de ar e, por consequência, na produção dos íons.

Fatores de Correções		Valores atuais
Perdas por recombinação	ks	1,0023
Espalhamento na haste	kst	1,000
Não uniformidade radial	k _{rn}	1,000
Não uniformidade axial	k _{an}	1,000
Atenuação na parede	kw	1,0125
Densidade do ar	ρ	1,29403 kg·m ⁻³
Stopping power	S _{c,a}	1,0007
Potencial de excitação médio	I _{ar}	85,7 eV
Potencial de excitação médio	IC	78,0 eV
Energia de corte	s	17,5 keV
Coeficiente de absorção massa-energia	(μ _{en} /ρ _{ar}) / (μ _{en} /ρ)C	0,9985
Coeficiente de atenuação	μ _{ar}	0,007530 m ⁻¹
Fração de energia perdida por <i>bremstrahlung</i>	g	3,2 x 10 ⁻³
Energia necessária para produzir um par de íons	W/e	33,97 J C ⁻¹

Tabela 57 – Fatores de correção e constantes físicas.

Fonte: Autores.

OBSERVAÇÕES SOBRE OS VALORES DOS FATORES DE CORREÇÃO

Desde a primeira comparação, em 1986, o BIPM trocou a sua fonte de Cobalto de 6 TBq para uma fonte de 170 TBq. Como consequência, alguns fatores para a câmara do BIPM foram refeitos como, por exemplo, k_{an}, k_{rn}, k_s, k_w e s_c, levando em conta não só o novo espectro, mas ainda uma melhoria nos processos e métodos de cálculo e a diferença na razão entre o feixe espalhado e primário, anteriormente de 8 %, e agora definido em 14 %, mais próximo dos valores publicados por Kessler e Burns (2018).

Para fins de comparação com o padrão do LNMRI, os valores de k_w da câmara do BIPM foram desmembrados em k_{sc}, k_{att} e k_{cep} e utilizados nas comparações seguintes, não tendo influenciado seus valores finais, conforme apresentado na tabela 2.

No novo cálculo dos novos valores de K_{wall} e K_{scat} por Monte Carlo, para os padrões do LNMI e BIPM, o cálculo independente de K_{CEP} não é mais necessário, pois o formalismo de transporte de elétrons já leva em conta este parâmetro, segundo Rogers (2020).

PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO

Uma série de medições são realizadas com ambas as polaridades para o valor de tensão apropriada para cada padrão. Cada série de medição é dividida em cinco subgrupos contendo cinco medições cada.

- **o desvio padrão a curto prazo da média de um grupo** é dado pelo desvio padrão relativo das leituras individuais dentro do grupo dividido pela raiz quadrada das cinco leituras.
- **o desvio padrão a médio prazo da média de um grupo** é dado pelo desvio padrão relativo do valor médio da corrente de cada grupo. Neste caso os valores médios de cada grupo são tratados como valores individuais.
- **o desvio padrão a médio prazo da média (mean) das séries** é dado pela razão entre o desvio a médio prazo da média dos grupos e a raiz quadrada do número de grupos.

Uma análise comparativa entre os três conceitos permitirá uma avaliação de alguma tendência dentro da série de medições. Por exemplo: Valores típicos são $2,9 \times 10^{-4}$ para curto prazo, $2,7 \times 10^{-4}$ para a média do grupo e $1,0 \times 10^{-4}$ para as séries contendo 5 grupos.

3. RASTREABILIDADE AO BIPM

Três comparações de kerma no ar foram feitas realizadas: na primeira, de Almeida e Niatel (1986), foi observado um desvio menor que 0,2 % entre as câmaras do LNMRI e do BIPM para as medições mensais durante o período de 9 meses; na segunda, relatada por Allisy-Roberts, Boutillon e Rodrigues (1996) e na terceira, relatada por Allisy-Roberts et al. (2005), os desvios observados nas três comparações se mantiveram muito consistentes com a primeira, ou seja, 0,2 %, sendo os valores individuais apresentados no quadro a seguir.

ANO	K _{LNMRI} /K _{BIPM}	U _C *	REFERÊNCIA
1986	1,0006	0,0026	de Almeida e Niatel (1986)
1996	1,0004	0,0023	Allisy-Roberts et al. (1996)
2005	1,0007	0,0022	Allisy-Roberts et al. (2005)

Tabela 68 – Histórico dos resultados das comparações.

*U_C = incerteza combinada.

Fonte: Autores.

Quando as comparações com os padrões dos Laboratório nacionais foram realizadas usando os valores individuais de cada laboratório obtidos no BIPM, com câmaras similares o padrão do LNMRI, atingiu-se concordância da ordem de 0,2%.

Neste caso, como os fatores de correção são bastante similares para todas as câmaras, as diferenças observadas, embora pequenas, podem ser resultado das incertezas na determinação do volume. No caso da SZDM, cujo resultado ficou abaixo dos outros, o valor

da correção de não uniformidade axial usado foi de 3×10^{-3} , enquanto os outros usaram 2×10^{-4} .

LABORATÓRIO	K_{LAB} / K_{BIPM}
LNMRI - Laboratório Nacional do Brasil (de Almeida and Niate., 1986)	1,0006 - 1,0004 -1,007
BEV - Laboratório Nacional da Áustria (Allisy et al., 1995)	1,0029
OMH - Laboratório Nacional da Hungria (Perroche et al., 1994)	1,0025
UDZ - Laboratório Nacional da República Tcheca (Perroche et al., 1993)	0,9992
SZMDM - Laboratório Nacional da Sérvia (Perroche e Spacik, 1992)	0,9982

Tabela 7 – Histórico das comparações feitas com padrões similares *

Fonte: Autores.

Os resultados do padrão do LNMRI nas comparações internacionais conduzidas pelo BIPM com os 24 laboratórios primários estão em perfeito acordo com os outros laboratórios da rede metrológica internacional, sendo o desvio padrão de todos eles 0,2 %, conforme os resultados apresentados na Figura 8.

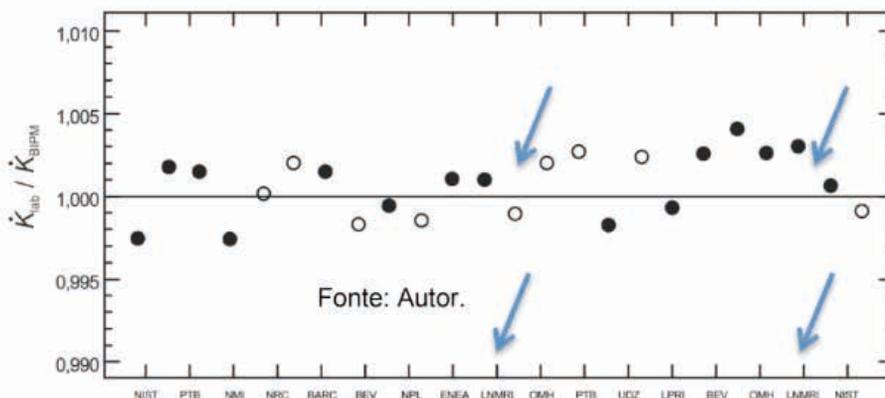


Figura 9 – Resultados temporal das comparações diretas entre os padrões primários e das indiretas com instrumentos padrão ou de transferência.

Fonte: Autores.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas comparações realizadas nos anos de 1986, 2002 e 2005, os resultados mostraram coerentes com o padrão do BIPM e com câmaras similares de outros laboratórios.

Por ocasião das comparações realizadas em 2002 e 2005, o padrão primário brasileiro foi calibrado em termos de dose absorvida na água no feixe de ^{60}Co . Com a experiência adquirida durante décadas com a grandeza kerma no ar, foi possível fornecer para os usuários tanto o coeficiente de calibração NK como a razão CK ($=\text{NK} / \text{NDw}$), relatada por Rodrigues e Siqueira (2011).

Dessa forma, a transição para o TRS n° 398 (IAEA, 2000) foi realizada paulatinamente até que o comportamento da maioria das câmaras de ionização dos usuários fosse bem determinado e bem conhecido.

O próximo passo será reestabelecer a confiança a médio-longo prazo da câmara COI-110, avaliando a estabilidade a curto, médio e longo prazo, e tentar recuperar a câmara CC01-108 e incluir o novo valor de K_{wall} .

Em seguida, realizar uma nova comparação que deverá ser feita com o BIPM utilizando os novos fatores de correção e constantes físicas.

Por exemplo:

Câmaras CCO1-110

- K_{wall} : atenuação e espalhamento na parede de 1,0216 incluindo KCEP calculado usando Monte Carlo, de acordo com Rogers (2020), em substituição a 1,0125 obtido por extrapolação linear, relatado por de Almeida e Niatel (1986), sem considerar a não linearidade de função, conforme descrito mais tarde por Rogers e Bielajew (1990).

Câmara BIPM

- Novas condições experimentais com mudanças numéricas de fatores e constantes físicas, relatadas por Kessler e Burns (2018), como:
- Novo procedimento estatístico
- Nova fonte de ^{60}Co com diferentes atividades e dimensões
- Nova distância fonte-câmara agora de 100 cm
- k_{wall} : novo fator de atenuação e espalhamento na parede de 1,0011 calculado por Monte Carlo
- k_{an} : novo fator de não uniformidade axial de 1,0020 calculado por Monte Carlo
- K_{rn} de 1,0015, em substituição a 1,000
- μ/ρ a,c de 0,9989, em substituição a 0,9985
- s_{ca} de 0,9928, em substituição a 1,0010
- g de 0,0031, em substituição a 0,0032
- ρ de 1,2930, em substituição a 1,294
- k_{s} de 1,0022, em substituição a 1,0023.

REFERÊNCIAS

ALLISY, A. Contribution à la mesure de l'exposition produite par les photons émis par le Co-60. *Metrologia*, v. 3, n. 2, p. 41-51, 1967.

ALLISY-ROBERTS, P. J.; BOUTILLON, M.; RODRIGUES, L. N. Comparison of the standards of fair-kerma of the LNMRI and the BIPM for 60 Co gamma rays. *Rapport BIPM-96/3*, 1996.

ALLISY-ROBERTS, P. J.; BOUTILLON, M.; WITZAN, J. Comparisons of the standards for airkerma of the BEV and the BIPM for gamma 137 Cs and 60 Co gamma rays. *Rapport BIPM-95/5*, 1995.

ALLISY-ROBERTS, P. J.; KESSLER, C.; MELLO DA SILVA, C. N. Comparison of the standards of air-kerma of the LNMRI and the BIPM for 60 Co gamma rays. *Rapport BIPM-2005/01*, 2005.

BOUTILLON, M.; NIATEL M. T. A study of a graphite cavity chamber for absolute measurements of 60 Co gamma rays. *Metrologia*, v. 9, n. 4, p. 139-146, 1973.

de ALMEIDA, C. E.; MALAMUT, C.; RODRIGUES, L. N. Experimental arrangement and data acquisition system at the LNMRI for exposure and air kerma measurement of Cobalt- 60 gamma rays. *Journal of Medical Physics*, v. 21, n. 1, p. 1-5, 1996.

de ALMEIDA, C. E.; NIATEL, M. T. Comparisons between IRD and BIPM exposure and air kerma standards for cobalt-60 gamma rays. *Rapport BIPM-86/12*, 1986.

de ALMEIDA, C. E.; RODRIGUES, L. N.; CECATTI, E. R.; MALAMUT, C. Exposure and air-kerma standards for cobalt-60 gamma rays. *Revista de Física Médica Aplicada e Instrumentação*, v. 5, n. 2, p. 211-228, 1990.

DUFTSCHMID, K. 1986. (Private communication.)

HUBBELL, J. H.; SELTZER, S. M. Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 98. Report NISTIR-5632, NIST, 1995.

IAEA. Technological Reports Series n° 398: Absorbed dose determination in external beam radiotherapy. Vienna: IAEA, 2000.

KESSLER, C. BURNS, D. T. Measuring conditions and uncertainties for the comparison and calibration of national dosimetric standards at the BIPM. *Rapport BIPM-06*, 2018.

PERROCHE, A-M.; BOUTILLON, M. Measuring conditions used of ionization chambers at the BIPM. *Rapport BIPM-91/5*, 1991.

PERROCHE, A-M.; BOUTILLON, M.; CSETE, I. Comparisons of the standards for air kerma of the BEV and the BIPM for gamma 137 Cs and 60 Co gamma rays. *Rapport BIPM-94/13*, 1994.

PERROCHE, A-M.; BOUTILLON, M.; KOVAR, I.; WAGNER, R. Comparisons of the standards of the air kerma standards of the UDZ and the BIPM 60 Co radiation. *Rapport BIPM-93/1*, 1993.

PERROCHE, A-M.; JOKIC, V. S. Comparisons of the air kerma standards of the SZMDM and theBIPM for 60 Co radiation. Rapport BIPM-92/3, 1992.

RODRIGUES, L. N.; SIQUEIRA, P. M. D. Comparação das razões CK obtidas por diferenteslaboratórios de dosimetria. Revista Brasileira de Física Médica, v. 4, n. 4, p. 7-14, 2011.

ROGERS, D. W. Monte Carlo Calculation of the Kwal factor for the CC-01 primary standard of theLNMRI, 2020 (private communication).

ROGERS, D. W.; BIELAJEW, A. F. Wall attenuation and scatter corrections for ion chambersmeasurements versus calculations. Phys. Med. Biol., v. 35, n. 8, p. 1065-1078, 1990.

WYCKOFF, H. O.; ALLISY, A.; FRÄNZ, H.; JENNINGS, W. A.; KELLERER, A. M.; LIDÉM, K.; ROSSI, H. H. Report 33: Radiation qualities and units. Journal of the ICRU, v. 17, n. 2, 1980.