



Uso das câmaras de ionização 450P e 451P para levantamentos radiométricos de salas de raios X

E. B. Souto; M. K. Elbern

PRO-RAD Consultores em Radioproteção S/S Ltda, 94.910-000, Cachoeirinha-RS, Brasil

ebsouto@prorad.com.br

RESUMO

Câmaras de ionização são instrumentos de medida utilizados em levantamentos radiométricos (monitoração do risco ocupacional radiação ionizante) para fins de caracterização, ou não, de atividades insalubres. É item obrigatório no Programa de Prevenção de Riscos Ambientais de instalações que trabalham com radiação ionizante, conforme determina o Ministério do Trabalho e Emprego. O uso das câmaras de ionização modelos 450P e 451P para levantamentos radiométricos de salas de aplicação de raios X para diagnóstico foi considerado inadequado por alguns profissionais devido ao tempo de resposta e à dependência energética. O presente trabalho tem por objetivo demonstrar que estes instrumentos são, sim, apropriados para tal, desde que operados corretamente. Estes equipamentos medem a tensão provocada pela corrente elétrica gerada dentro da câmara em um resistor instalado em série com o circuito de polarização. O circuito elétrico equivalente é uma fonte de corrente alimentando um circuito RC paralelo. A representação matemática da tensão sobre o resistor é uma equação diferencial de primeira ordem. Desta forma, o valor verdadeiro da medida somente será fornecido após um tempo infinito. Portanto, é necessário fazer a correção da medida em função do tempo de medida. Além disso, há de aplicar um fator de calibração para a energia da radiação.

Palavras-chave: câmara de ionização, levantamento radiométrico, raios X.

ABSTRACT

Ion chambers are radiation detectors used for radiometry (monitoring occupational risk ionizing radiation) to verify accordance with Brazilian Labor Law. The use of ion chambers models 450P and 451P for diagnostic x-ray rooms was considered inadequate by some professionals due to response time and energy dependence. This paper aims to demonstrate that these instruments are appropriate for this, since correctly operated. These equipments measure the electric current generated inside the chamber by the radiation. The equivalent electric circuit is a current source feeding a parallel RC circuit. The mathematical representation of the voltage across the resistor is a first-order differential equation. Then, the actual measurement value, theoretically, only will be provided after an infinitely large time. Therefore, any measurement must be correct according to irradiation time. Also, it is necessary to apply a calibration factor for radiation energy.

Keywords: ion chamber, radiometry, x-ray.

1. INTRODUÇÃO

Câmaras de ionização são detectores de radiação utilizados para a realização de levantamentos radiométricos (monitoração do risco ocupacional radiação ionizante). A partir dos quais, avalia-se os níveis de radiação nos postos de trabalho e outros ambientes da instalação para comparação com os Limites de Tolerância estabelecidos na legislação, caracterizando-se as atividades desenvolvidas naqueles locais como insalubres ou não. No Brasil, o levantamento radiométrico é item obrigatório no Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA) de instalações que utilizam radiações ionizantes, conforme determina o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) [1].

Assim como todo serviço de Engenharia no Brasil, Laudos de Insalubridade e Laudos que servem de subsídios para elaboração de Laudos Técnicos de Condições Ambientais de Trabalho (LTCATs) para fins de Aposentadoria Especial implicam em responsabilidades Cíveis e Criminais [2]. Dado isso, o profissional responsável pelo levantamento radiométrico deve conhecer a câmara de ionização que utiliza, seus recursos e o modo como realiza as medidas. Do contrário, podem ser cometidos graves erros de avaliação, pondo em risco a saúde de trabalhadores e de indivíduos do público.

O uso das câmaras de ionização modelos 450P e 451P para levantamentos radiométricos de salas de aplicação de raios X para diagnóstico foi considerado inadequado por alguns profissionais devido ao tempo de resposta [3,4] e à dependência energética [3]. O presente trabalho tem por objetivo demonstrar que estes instrumentos são, sim, apropriados para tal, desde que saiba-se operá-los.

2. CÂMARAS 450P E 451P

As câmaras de ionização objeto deste trabalho foram inicialmente fabricadas pela Victoreen Instrument Company, que posteriormente foi comprada pela Lafayette Pharmaceutical, assumindo o nome de Inovision. Atualmente a fabricação pertence à Fluke Biomedical, líder mundial na fabricação de instrumentos eletrônicos de medida.

As câmaras 450P e 451P estão no rol dos chamados “instrumentos de campo” (“*survey meters*”). São compactas, robustas e de fácil manuseio e uso, ao contrário dos equipamentos para uso em laboratório, que são mais pesados e utilizam cabos e conectores.

Suas dimensões (21 x 11,4 x 21,3 cm³) e massa (1,2 kg) [5] facilitam seu transporte e deslocamento entre os pontos de medida. O volume ativo da câmara é pressurizado a 6 atmosferas [5], conferindo equivalência à 2.100 cm³.

Estes modelos de câmara de ionização possuem a mesma eletrônica associada e dois modos de uso: Integral e Taxa. Além disso, permitem que o usuário não necessite estar permanentemente junto ao instrumento durante a realização das medidas, o que é muito interessante sob o ponto de vista de proteção radiológica.

3. RESPOSTA NO TEMPO – ASPECTOS TEÓRICOS

O princípio de funcionamento de uma câmara de ionização é bastante simples e está descrito na literatura [6-9]. Estes instrumentos consistem de um compartimento com gás e dois eletrodos. Quando a radiação atravessa esse gás acaba por ionizar as moléculas desse gás, produzindo elétrons e íons. Aplicando-se uma tensão entre os eletrodos (tensão de polarização), cria-se um

campo elétrico capaz de coletar esses elétrons e íons. A corrente elétrica resultante deste processo tem relação direta com a intensidade da radiação incidente.

3.1. RESTRIÇÕES AO USO DO MODO INTEGRAL

Neste modo de operação, a integral da corrente elétrica gerada na câmara durante a exposição à radiação é proporcional à Exposição (ou dose) total. Neste caso não existe o conceito de resposta no tempo, o qual será visto posteriormente.

O uso deste modo de operação em levantamentos radiométricos de salas de radiologia diagnóstica possui sérios problemas práticos: a incerteza da medida e a calibração do instrumento.

Todo instrumento com mostrador digital possui uma incerteza intrínseca de ± 1 no último dígito (conhecida por resolução do instrumento). Assim, nas câmaras de ionização, a incerteza relativa dependerá do nível de radiação que se está medindo. A Tabela 1 apresenta o exemplo de uma câmara de ionização modelo 450P, cujo menor valor indicado é de $1 \mu\text{R}$. Como pode ser visto, para que o valor medido tenha uma incerteza razoável, deve-se partir da premissa de que os valores medidos sejam sempre superiores a $10 \mu\text{R}$.

Tabela 1: Incerteza intrínseca do mostrador digital da câmara 450P.

Exposição medida (μR)	Incerteza (μR)	Incerteza percentual (%)
1	± 1	100
10	± 1	10
100	± 1	1

O exemplo a seguir ilustra a inconveniência do uso do Modo Integral para avaliar blindagens de salas de radiologia convencional. Suponha-se uma sala com carga de trabalho de $320 \text{ mA}\cdot\text{min}/\text{sem}$. Para a câmara indicar seu menor valor ($1 \mu\text{R}$) em um local considerado Área Livre (restrição de $0,5 \text{ mSv}/\text{ano}$ [10]) seria necessário realizar uma exposição com carga elétrica de, aproximadamente, 20 mAs . Como foi visto, para esta medida a incerteza intrínseca do mostrador digital é de 100%. Para reduzir esta incerteza para 10% necessitaríamos de 200 mAs .

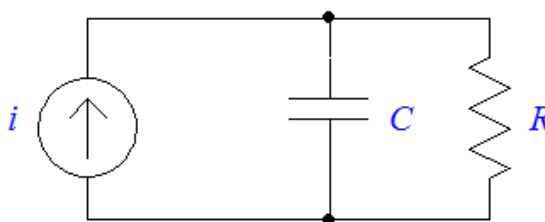
Em engenharia, ao avaliar-se uma grandeza, costuma-se registrar valores significativos até uma ordem de grandeza inferior (dez vezes menos). Desta forma, na segunda situação do exemplo acima, a incerteza para o Nível de Registro (0,05 mSv/ano) seria de 100%. Então, analogamente, para obtermos medidas com incerteza intrínseca de 1% para o Limite de Tolerância e 10% para o Nível de Registro, necessitaríamos de 2.000 mAs.

Note-se que, em ambos os casos, o tempo de irradiação é longo, contribuindo para a deterioração precoce do tubo de raios X. Uma alternativa para diminuir o tempo de irradiação seria utilizar câmaras de ionização com menor indicação mínima, por exemplo, 0,01 nGy [11] ou 5 nGy [12]. Todavia isso implica outro grande entrave: a calibração dos equipamentos. A calibração de doses desta magnitude é complexa e o Brasil parece não possuir laboratórios capazes de realizar este serviço.

Por esses motivos a eletrônica associada ao Modo Integral das câmaras 450P e 451P não é apresentada neste trabalho.

3.2. ELETRÔNICA ASSOCIADA AO MODO TAXA

Neste modo de operação mede-se a intensidade da corrente elétrica produzida na câmara durante a exposição, a qual é muito fraca, da ordem de pico Ampères ou menos. Um dos dispositivos mais utilizados para medir correntes desta magnitude chama-se eletrômetro. Suscintamente trata-se de um resistor de alto valor instalado em série com o circuito de polarização da câmara; sobre este resistor mede-se a tensão desenvolvida pela passagem da corrente elétrica. O circuito elétrico equivalente é uma fonte de corrente alimentando um circuito RC paralelo (Figura 1). Onde R representa a resistência interna do eletrômetro, C representa a capacitância parasita do eletrômetro e da câmara e a fonte de corrente i representa a corrente gerada pela radiação dentro da câmara [8-9].

Figura 1: Circuito elétrico equivalente de uma câmara de ionização 450P ou 451P

A exposição proveniente de equipamentos de raios X pode ser modelada matematicamente como uma função salto. Para tempos $t < 0$ não há emissão de radiação e a função é igual à zero. No instante $t = 0$, quando se aciona o equipamento de raios X, surge uma taxa de Exposição constante na câmara de ionização. Esta taxa de Exposição constante provocará uma corrente elétrica também constante em intensidade. A resposta de circuitos RC excitados com fontes de corrente com funções salto é trivial. A representação matemática da tensão sobre o resistor é uma equação diferencial de primeira ordem [13, 14]:

$$v(t) = R.i.(1 - e^{-t/R.C}) \quad (1)$$

Onde:

- v:** tensão sobre o resistor do eletrômetro
- C:** capacitância parasita do eletrômetro e da câmara
- i:** corrente elétrica produzida na câmara
- R:** resistência do eletrômetro
- t:** tempo de irradiação

Através de calibração, o fabricante relaciona a tensão medida no eletrômetro com a taxa de Exposição à qual a câmara de ionização foi submetida, sendo possível reescrever a Equação 1 da seguinte forma:

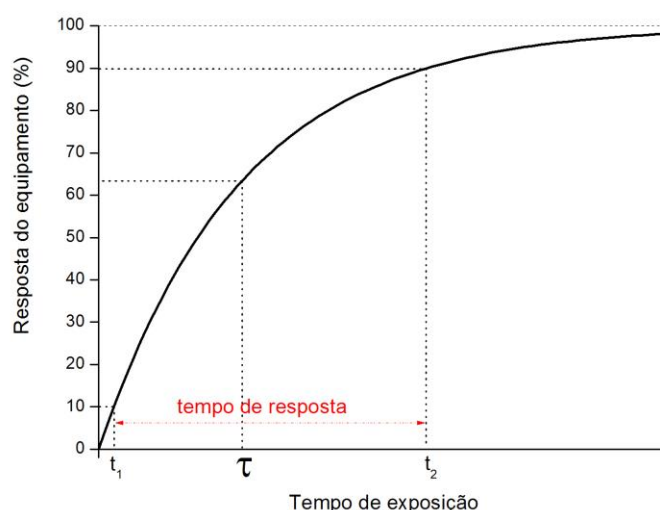
$$X(t) = X_{verdadeira}(1 - e^{-t/R.C}) \quad (2)$$

Onde:

- X:** taxa de exposição
- C:** capacitância parasita do eletrômetro e da câmara
- R:** resistência do eletrômetro
- t:** tempo de irradiação

Como pode ser facilmente observado, o valor verdadeiro da medida, teoricamente, somente será fornecido após um tempo infinitamente grande (Figura 2). Portanto, para qualquer tempo de medição, é necessário utilizar a Equação 2 para corrigir o valor mensurado.

Figura 2: Resposta das câmaras 450P e 451P em função do tempo de exposição



Em eletrônica, o produto R.C é chamado de Constante de Tempo (τ) e permite determinar a resposta no tempo de um circuito RC. Entretanto, em suas especificações, o fabricante das câmaras 450P e 451P expressa a resposta no tempo através do termo Tempo de Resposta (Δt), definindo-o como o tempo necessário para o instrumento passar da indicação de 10% da resposta plena até 90% da mesma. Desta forma, a partir da Figura 2 podemos escrever um conjunto de três equações que possibilitam relacionar matematicamente a Constante de Tempo e o Tempo de Resposta:

$$0,1 = 1 - e^{-t_1/\tau} \quad (3)$$

$$0,9 = 1 - e^{-t_2/\tau} \quad (4)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (5)$$

Onde:

t_1 : tempo para indicação de 10% da resposta plena

t_2 : tempo para indicação de 90% da resposta plena

τ : constante de tempo

Δt : tempo de resposta

Através deste sistema de equações e conhecendo o Tempo de Resposta (Δt) de cada escala das câmaras de ionização [5], determina-se as Constantes de Tempo (τ) para cada escala (Tabela 2).

Tabela 2: Tempo de Resposta e Constante de Tempo para as câmaras 450P e 451P.

Escala		Tempo de resposta (Δt)	Constante de tempo (τ)
(mR/h)	(mSv/h)	(s)	(s)
0 – 0,5	0 – 0,005	5	2,28
0 – 5	0 – 0,05	2	0,91
0 – 50	0 – 0,5	1,8	0,82
0 – 500	0 – 5	1,8	0,82
0 – 5.000	0 – 50	1,8	0,82

3.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE LEITURAS NO MODO TAXA

Mesmo aplicando-se o fator de correção para o tempo de exposição utilizado – não importa qual for este tempo – o uso destes equipamentos requer alguns outros cuidados. Quando a radiação cessa, a corrente elétrica na câmara cai a zero e o sinal do eletrômetro diminui com a mesma Constante de Tempo de subida. Há, portanto, necessidade de se verificar qual a máxima indicação apresentada no mostrador do instrumento durante a irradiação. Além disso, o Tempo de Resposta (Δt) somente é válido quando não ocorre a troca de escala [5].

Os mostradores das câmaras 450P e 451P possuem duas indicações: uma digital, com 2 ½ dígitos, e outra do tipo analógica, com 100 segmentos de barras. Conforme o manual de instruções [5], o mostrador digital é indicado para medidas de exposições contínuas, como medições ambientais e medidas em fluoroscopia, pois o mostrador é atualizado uma vez por segundo, velocidade suficiente para o olho humano distinguir números distintos. Já o mostrador analógico é atualizado a cada 0,15 s na menor escala e a cada 0,05 s nas demais escalas, de modo que é impossível ao olho humano distinguir indicações distintas. Por esta razão há um modo de operação chamado “freeze mode”, que utiliza um dispositivo eletrônico conhecido como Detector de Pico. Este dis-

positivo fixa no segmento de barras a maior indicação efetuada, sendo possível realizar a leitura da medida máxima após o término da exposição. Ademais, quando há troca de escala o mostrador permanece na escala maior para nova exposição.

4. RESPOSTA NO TEMPO – VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de verificar experimentalmente a resposta no tempo, três câmaras previamente calibradas foram irradiadas com diferentes tempos de exposição com equipamentos de raios X para medicina diagnóstica. Concomitantemente mediu-se o tempo de exposição com medidor não invasivo marca Unfors, modelo Xi, também previamente calibrado.

Os tempos de exposição foram escolhidos aleatoriamente, limitados às opções disponíveis nos equipamentos de raios X utilizados, em quantidade suficiente para caracterizar graficamente a resposta no tempo. As geometrias e técnicas radiográficas utilizadas foram determinadas experimentalmente para que não houvesse mudança de escala no mostrador das câmaras.

Os resultados são apresentados graficamente nas Figuras 3, 4 e 5.

Figura 3: Resposta da câmara de ionização modelo 450P, série 3302

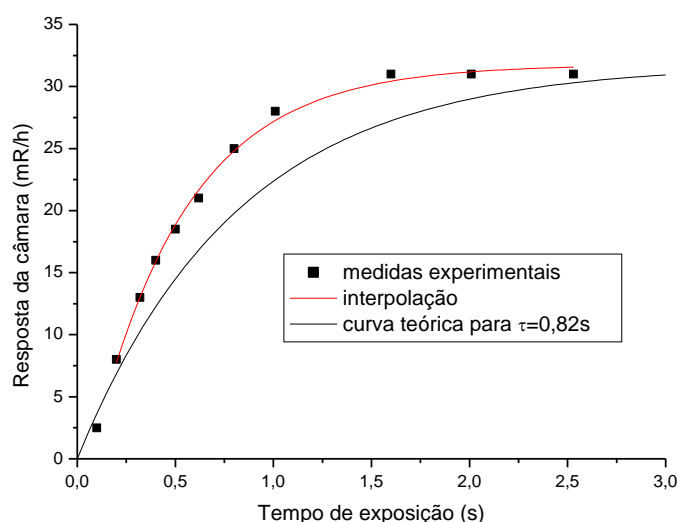


Figura 4: Resposta da câmara de ionização modelo 451P, série 2333

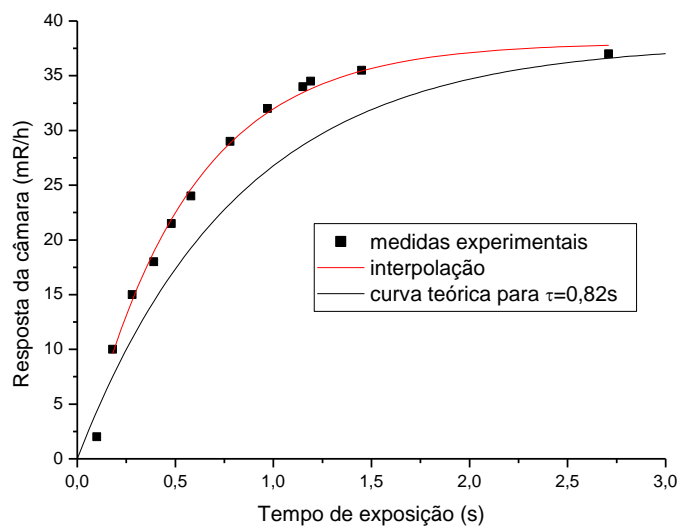
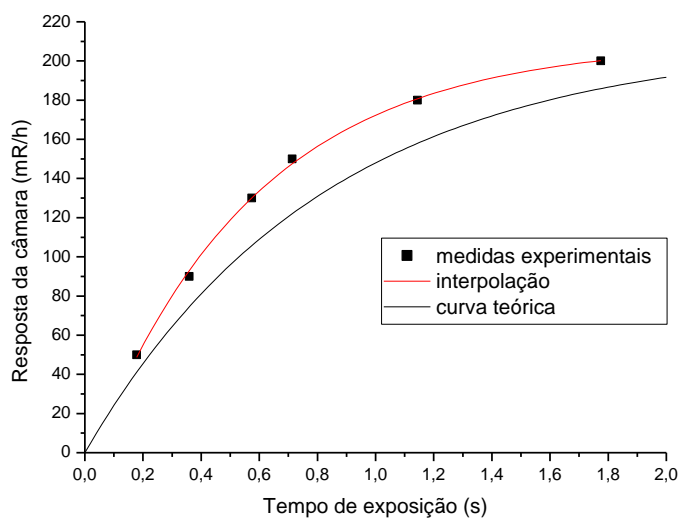


Figura 5: Resposta da câmara de ionização modelo 450P, série 2331



5. DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA

Outro ponto de contestação ao uso destas câmaras de ionização refere-se à dependência energética, que seria inadequada [3]. Contudo, a variação da resposta de detectores de radiação em função da energia da radiação é facilmente corrigida através de calibração.

A calibração estabelece a relação entre os valores indicados por um instrumento e os valores correspondentes da grandeza estabelecidos por padrões [15]. Os laboratórios de calibração expõem as câmaras de ionização a taxas de dose conhecidas (VVC - Valor Verdadeiro Convencional) com diferentes energias (ou Qualidades). No certificado de calibração são apresentados o VVC e a indicação do instrumento para cada energia. O quociente entre estes dois valores chama-se “fator de calibração”.

Como exemplo utilizaremos o certificado da câmara modelo 451P, série 2333, calibrada pelo Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN/CNEN-SP [16]. A Tabela 3 apresenta os dados fornecidos pelo certificado de calibração e o fator de calibração calculado.

Tabela 3: Dependência energética da câmara 451P, série 2333, calibrada em 14/02/2011

Qualidade	Energia média (keV)	VVC (mGy/h)	Indicação do Instrumento (R/h)	Fator de Calibração (mGy/h / R/h)
ISO-N60	48	22,6	2,00	11,3
ISO-N80	65	12,2	1,16	10,5
ISO-N100	83	6,22	0,58	10,7
ISO-N150	118	51,8	5,31	9,8

Como o feixe de raios X é um espectro contínuo, pode-se utilizar o maior valor calculado como um “fator de calibração geral”, o que vai a favor da segurança.

6. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais demonstram que a resposta no tempo das câmaras de ionização modelos 450P e 451P está de acordo com o princípio de funcionamento de câmaras de ionização descrito em livros de instrumentação há décadas. Provou-se que é possível realizar medidas cor-

retas com qualquer tempo de exposição, bastando aplicar o fator de correção para o tempo de medição e o fator de calibração (em energia) sobre a leitura efetuada.

Conclui-se, pois, que as câmaras de ionização modelos 450P e 451P são perfeitamente adequadas e práticas para levantamentos radiométricos em salas de aplicação de raios X, desde que operadas corretamente.

REFERÊNCIAS

1. Brasil. Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora NR-09 – Programa de Prevenção de Riscos Ambientais – PPRA* (1978, alterada em 1994).
2. Brasil. Conselho Federal de Engenharia e Agronomia. *Resolução 345, de 27/07/1990* (1990).
3. Navarro MVT, Ferreira MJ: Ofício N° 02/2006 – Projeto DIVISA/CEFET, Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia, Salvador, Brasil (2006).
4. Pereira EG: Reflexões sobre o uso de câmaras de ionização em levantamentos radiométricos em instalações para diagnóstico médico/odontológico. VI Congresso Brasileiro de Física Médica, Rio de Janeiro, 2001.
5. Fluke Biomedical. **Victoreen® 451P & 451P-DE-SI Ion Chamber Survey Meter Operators Manual**, Cleveland, 2005, Fluke Biomedical Radiation Management Services.
6. Brasil. Ministério da Saúde. *Portaria 453, de 01/06/1998, da Secretaria de Vigilância Sanitária* (1998).
7. Estado de São Paulo. Centro de Vigilância Sanitária. *Portaria CVS-18, de 07/10/2009* (2009).
8. Estado de Santa Catarina. Secretaria de Estado da Saúde. *Formulário 7.1 Versão 2.0 26/04/2012 – Cadastro de Prestadores de Serviço em Radiologia* (2012).
9. Knoll, GF: **Radiation Detection and Measurement**, 1979, John Wiley & Sons, Inc.
10. Ahmed, SN: **Physics and Engineering of Radiation Detection**, 2014, Academic Press.
11. Sanz AT: **Instrumentación Nuclear**, Madri, 1970, Servicio de Publicaciones de La Junta de Energia Nuclear.

12. Cember H, Johnson TE: **Introduction to Health Physics**, Nova Iorque, 2009, McGraw Hill Professional.
13. Scott RE: **Linear Circuits – Part 1/Time-Domain Analysis**, Londres, 1964, Addison-Wesley Publishing Company.
14. Nilsson JW, Riedel SA, **Circuitos Elétricos**, São Paulo, 2008, Prentice Hall Brasil.
15. Brasil. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. *Portaria 232, de 08/05/2012*, do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO (2012).
16. IPEN/CNEN-SP. Certificado de Calibração da câmara de ionização marca Fluke Biomedical, modelo 451P, série 2333 (2011).