

Câmara de ionização de placas paralelas para radiação-X de radiografia convencional e mamografia*

Plane-parallel ionization chamber for X-radiation of conventional radiography and mammography

Alessandro Martins da Costa¹, Linda V. E. Caldas²

Resumo **OBJETIVO:** Desenvolver uma câmara de ionização de placas paralelas de dupla face para determinação de kerma no ar e taxa de kerma no ar em campos de radiação-X utilizados em radiografia convencional e mamografia. **MATERIAIS E MÉTODOS:** A câmara desenvolvida tem janelas de entrada de poliéster aluminizado, elétrodos internos e anéis de guarda de alumínio em uma face (face A) e de grafite na outra (face G). Neste trabalho foram testadas as características operacionais de linearidade, dependência angular e energética de resposta. **RESULTADOS:** A linearidade de resposta foi de 0,86% para a face A e de 0,92% para a face G. Para ângulos de incidência da radiação de 0° a $\pm 5^\circ$, a variação da resposta relativa foi menor que 0,8% para ambas as faces da câmara. A dependência energética de resposta foi de 0,8% para a face A nas qualidades de raios-X para diagnóstico convencional e de 2,4% para a face G da câmara nas qualidades de raios-X para mamografia. **CONCLUSÃO:** Esta câmara pode ser utilizada rotineiramente na determinação de kerma no ar e taxa de kerma no ar em feixes de raios-X utilizados em radiografia convencional e mamografia. **Unitermos:** Raio-X convencional; Mamografia; Controle da qualidade; Câmara de ionização.

Abstract **OBJECTIVE:** To develop a double-faced plane-parallel ionization chamber for measurement of air kerma and air kerma rate in X-radiation fields utilized in conventional radiography and mammography. **MATERIALS AND METHODS:** The chamber has entrance windows made of aluminized polyester film, inner and guard electrodes of aluminum at one side (face A) and graphite at the other side (face G). The present study evaluated operational characteristics as regards response linearity, angular and energy dependence. **RESULTS:** The linearity of response was 0.86% for face A and 0.92% for face G. For radiation incidence angles, of 0° to $\pm 5^\circ$, the response variation was less than 0.8% for both faces of the chamber. The energy dependence of response was 0.8% for face A on X-ray qualities for conventional radiography, and 2.4% for the face G of the chamber on X-ray qualities for mammography. **CONCLUSION:** This chamber can be utilized on a routine basis for measurement of air kerma and air kerma rate in X-ray beams utilized in conventional radiography and mammography.

Keywords: Conventional radiography; Mammography; Quality control; Ionization chamber.

Costa AM, Caldas LVE. Câmara de ionização de placas paralelas para radiação-X de radiografia convencional e mamografia. *Radiol Bras.* 2008;41(1):39–43.

INTRODUÇÃO

Um programa de garantia da qualidade em radiodiagnóstico pode levar à produção de radiografias de alta qualidade e exposição mínima do paciente⁽¹⁻⁴⁾. A garantia da

qualidade em radiodiagnóstico é constituída, entre outros, pelas avaliações da qualidade da imagem, pelas análises de rejeição de filme, pelas avaliações de dose em paciente e pelas medições dos parâmetros físicos dos vários componentes do sistema de raios-X. Vários testes de controle da qualidade são necessários para garantir que os equipamentos de raios-X estão funcionando corretamente.

Os testes de controle da qualidade para equipamentos de raios-X convencionais e mamográficos devem incluir uma estimativa da dose de entrada na pele representativa dos exames praticados no serviço e os valores obtidos devem ser comparados com os níveis de referência de radiodiagnóstico apresentados no regulamento nacional⁽³⁾. Deve ser enfatizado que os níveis de refe-

rência de radiodiagnóstico não são limites regulamentados, mas devem ser vistos como um dispositivo prático para promover um melhor controle da qualidade local.

Uma estimativa acurada da dose de entrada na pele requer uma medição acurada do kerma no ar incidente⁽⁵⁾ no plano da entrada da pele e também da camada semi-redutora (CSR) do feixe⁽⁶⁾. O kerma no ar incidente é convertido para dose de entrada na pele mediante aplicação de um fator de retroespalhamento apropriado^(7,8). O controle dos seguintes parâmetros é particularmente importante: tensão no tubo (kVp), reprodutibilidade e linearidade da taxa de kerma no ar com o produto corrente no tubo-tempo de exposição (mAs). As características desses parâmetros podem variar com o tempo; logo, os testes precisam ser

* Trabalho realizado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN-CNEN), São Paulo, SP, Brasil.

1. Doutorado em Tecnologia Nuclear, Professor Doutor do Departamento de Física e Matemática da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo (FFCLRP-USP), Ribeirão Preto, SP, Brasil.

2. Doutorado em Física Nuclear, Pesquisadora do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN-CNEN), São Paulo, SP, Brasil.

Endereço para correspondência: Dr. Alessandro Martins da Costa. Departamento de Física e Matemática, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo. Avenida Bandeirantes, 3900. Ribeirão Preto, SP, Brasil, 14040-901. E-mail: amcosta@usp.br

Recebido para publicação em 11/5/2007. Aceito, após revisão, em 19/6/2007.

realizados em intervalos regulares. Conseqüentemente, é necessário aprender como uma imagem é influenciada por esses parâmetros e como as características deles podem ser medidas utilizando-se ferramentas apropriadas.

O kerma no ar incidente, a CSR, a reprodutibilidade e a linearidade da taxa de kerma no ar em função do mAs são geralmente determinados utilizando-se câmaras de ionização calibradas⁽⁶⁾. O conhecimento das limitações de uma câmara de ionização é essencial para a sua correta utilização⁽⁹⁾. As especificações do projeto de uma câmara de ionização devem ser cuidadosamente entendidas pelo usuário e corretamente levadas em conta antes de aceitar qualquer medição como válida⁽¹⁰⁾.

No Brasil tem havido um interesse crescente em se projetar e construir câmaras de ionização de baixo custo, mostrando a viabilidade de construção de detectores de radiação utilizando-se materiais disponíveis no mercado nacional.

Foram desenvolvidas, inicialmente, câmaras de ionização para radiação-X⁽¹¹⁾ e radiação beta⁽¹²⁾, respectivamente, pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro, e pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

No Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares foram construídas câmaras de ionização de placas paralelas para radiação-X de energias baixas e beta⁽¹³⁾, elétrons de energias altas⁽¹⁴⁻¹⁶⁾, tomografia computadorizada^(17,18), radioproteção⁽¹⁹⁾, e câmaras de extrapolação para radiação-X e beta de aplicadores dermatológicos e oftálmicos utilizados em braquiterapia^(20,21).

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma câmara de ionização de placas paralelas de dupla face para determinação de kerma no ar e taxa de kerma no ar em campos de radiação-X usados em radiografia convencional e mamografia. Uma face dessa câmara de ionização é apropriada para medições em radiografia convencional (face A) e a outra é apropriada para medições em mamografia (face G).

A câmara desenvolvida foi testada e calibrada em feixes padrões de raios-X, de acordo com as recomendações internacionais⁽²²⁻²⁴⁾. Foram testadas as características operacionais de linearidade, dependência angular e energética de resposta, segundo

procedimentos aplicados a outras câmaras de ionização^(13,14,17,19-21,25,26).

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi projetada e construída uma câmara de ionização de placas paralelas de dupla face para utilização em feixes de radiação-X de diagnóstico convencional e de mamografia. A câmara tem janelas de entrada de poliéster aluminizado (1,7 mg/cm²), eletrodos internos e anéis de guarda de alumínio (face A) e de grafite (face G), e volume sensível de ar de 2,5 cm³. A Figura 1 mostra um diagrama esquemático da câmara desenvolvida.

As correntes de ionização foram medidas usando-se os eletrômetros mostrados, e suas características relevantes, na Tabela 1.

Para os testes, a câmara de ionização desenvolvida no presente trabalho foi acoplada a um eletrômetro PTW Unidos. A tensão de polarização foi de + 400 V. A eficiência de coleção de íons é melhor que 99% em + 400 V para ambas as faces da

câmara⁽²⁷⁻²⁹⁾. A corrente de fuga é menor que 2 fA e a precisão é melhor que $\pm 0,05\%$ para ambas as faces da câmara.

Foram utilizados os seguintes sistemas de irradiação: equipamento de raios-X Rigaku Denki, modelo Geigerflex, potencial constante, com um tubo Philips, modelo PW 2184/00, janela com 1 mm de berílio e alvo de tungstênio, que opera até 60 kV; equipamento de raios-X Medicor Mövek Röntgengyara, modelo Neo-Diagnomax, monofásico, retificação de onda completa, com alvo de tungstênio, que opera até 125 kV em modo radiográfico e até 100 kV em modo fluoroscópico.

As características dos sistemas de raios-X são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

A Tabela 4 mostra as características dos sistemas padrões de referência com os quais a câmara foi calibrada.

Como as câmaras utilizadas neste trabalho não são seladas, todas as medições foram corrigidas para as condições de referência de temperatura e pressão, ou seja, 20 °C e 101,3 kPa.

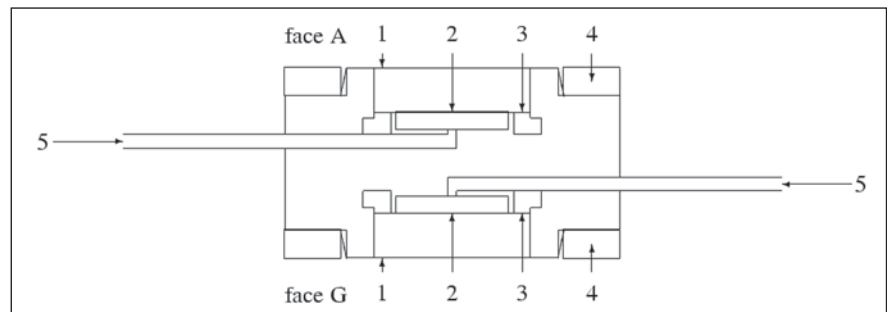


Figura 1. Diagrama esquemático da câmara desenvolvida: 1, janelas de entrada (eletrodos externos); 2, eletrodos coletores (eletrodos internos); 3, anéis de guarda; 4, anéis de fixação das janelas de entrada; 5, cabos. O volume sensível de ar é 2,5 cm³.

Tabela 1 Características dos eletrômetros utilizados.

Fabricante	Modelo	Tensão na câmara	Acurácia das medições
PTW-Freiburg	Unidos	+ 400 V	$\leq 0,5\%$ leitura + 1 dígito
Radcal Corporation	9015	+ 260 V	4% leitura + 1 dígito

Tabela 2 Características do sistema Rigaku-Denki para as qualidades de mamografia: filtração inerente, 1 mmBe; filtração adicional, 0,06 mmMo. Distância foco-câmara: 100 cm.

Qualidade	Potencial gerador (kV)	Camada semi-redutora (mmAl)
RXM25	25	0,33
RXM28	28	0,34
RXM30	30	0,35
RXM35	35	0,38

Tabela 3 Características do sistema Medisor Mövek Röntgenyara para as qualidades de diagnóstico convencional: filtração inerente, 0,8 mmAl; filtração total, 2,5 mmAl. Distância foco-câmara: 50 cm.

Qualidade	Potencial gerador (kV)	Camada semi-redutora (mmAl)
RQR 3	50	1,8
RQR 5	70	2,4
RQR 7	90	3,1

Tabela 4 Características dos sistemas padrões utilizados.

Qualidade	Câmara	Volume (cm ³)	Eletrômetro
Mamografia	Placas paralelas Radcal 10x5-6M (Conversor 9060)	6,0	Radcal 9015
Diagnóstico convencional	Placas paralelas PTW 77334	1,0	PTW Unidos

A avaliação e a expressão das incertezas de medição foram realizadas de acordo com as recomendações dadas no texto “Guia para a expressão da incerteza de medição”⁽³⁰⁾.

RESULTADOS

Determinou-se a relação linear entre a corrente de ionização e a taxa de kerma no ar irradiando-se sequencialmente as duas faces da câmara na qualidade de raios-X de mamografia RXM35 (Tabela 2) e variando-se a corrente no tubo. A câmara foi posicionada a uma distância de 100 cm da fonte, tomando-se como ponto de referência o centro das superfícies das janelas de

entrada. As taxas de kerma no ar foram determinadas utilizando-se o sistema padrão para raios-X de mamografia (Tabela 4). Os dados obtidos são apresentados na Figura 2. As retas representam os resultados de ajustes lineares a estes dados. A incerteza obtida para o coeficiente angular, isto é, a incerteza obtida na linearidade de resposta foi de 0,86% para a face A e de 0,92% para a face G.

Tabela 5 Resposta relativa da câmara em função do ângulo de inclinação.

Ângulo de inclinação (°)	Face A	Face G
- 5	1,002 ± 0,004	0,992 ± 0,004
0	1	1
+ 5	1,002 ± 0,004	0,992 ± 0,004

Para o estudo da dependência angular da câmara também foi utilizada a qualidade de radiação de mamografia RXM35. A câmara foi irradiada no ar, à taxa de kerma no ar de 59,5 mGy/min, com a distância foco-câmara de 100 cm, tomando-se como referência a superfície das janelas de entrada. A resposta foi medida variando-se o ângulo de incidência entre 0° e ± 5°, onde 0° significa uma irradiação frontal. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5. As respostas foram normalizadas para 0° e correspondem à média de cinco medições sucessivas. Pode-se observar que a câmara cumpre a exigência da norma IEC⁽²³⁾: limite de variação de resposta de ± 3,0% devido a uma variação do ângulo de incidência de ± 5°. A variação máxima de resposta foi de 0,8%.

As qualidades de raios-X utilizadas na calibração da câmara são dadas nas Tabelas 2 e 3. As irradiações foram efetuadas no ar e a câmara foi posicionada à distância de calibração, tomando-se com referência as superfícies das janelas de entrada. Os coeficientes de calibração foram obtidos utilizando-se os sistemas padrões para cada faixa de energia (Tabela 4). Os coeficientes

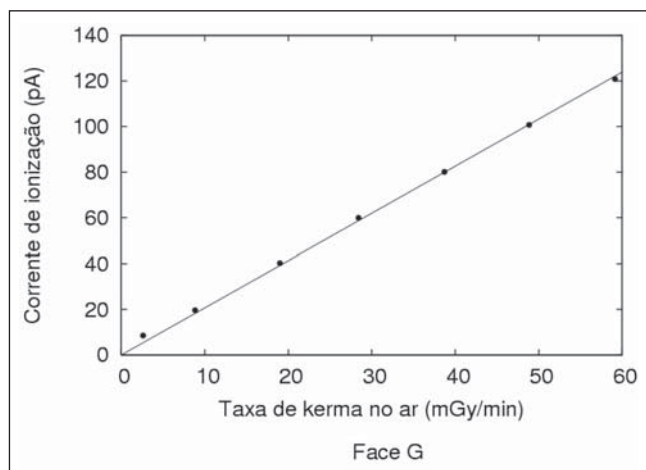
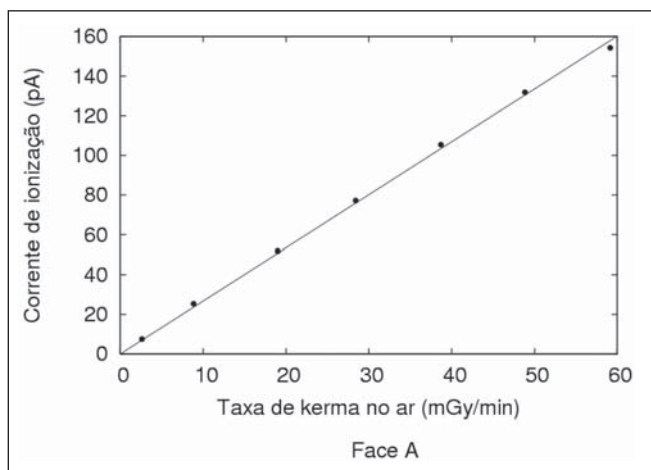


Figura 2. A: Linearidade de resposta, face A, na qualidade de raios-X de mamografia RXM35. A reta é o resultado de um ajuste linear aos dados. As incertezas nos valores de corrente de ionização são menores que 2%. **B:** Linearidade de resposta, face G, na qualidade de raios-X de mamografia RXM35. A reta é o resultado de um ajuste linear aos dados. As incertezas nos valores de corrente de ionização são menores que 2%.

de calibração obtidos para a face A da câmara nas qualidades de raios-X diagnóstico convencional e para a face G nas qualidades de radiação-X de mamografia são mostrados em função da camada semi-redutora nas Figuras 3A e 3B. Nessas figuras as escalas verticais à direita representam os fatores de correção normalizados para a qualidade de referência em cada caso.

A dependência energética de resposta foi de 0,8% para a face A nas qualidades de raios-X para diagnóstico convencional e de 2,4% para a face G da câmara nas qualidades de raios-X para mamografia. Pode-se observar que câmara cumpre a exigência da norma IEC⁽²³⁾: limite de variação de resposta de $\pm 5\%$ com a qualidade da radiação.

DISCUSSÃO

Para um desempenho consistente na qualidade da imagem produzida com técnicas manuais, a linearidade da taxa de kerma no ar com o mAs para uma dada kVp deve ser menor ou igual a 20%⁽⁶⁾. É importante que a linearidade medida seja uma característica do equipamento de raios-X e não seja afetada pela falta de linearidade de resposta ou imprecisão da câmara de ionização utilizada na medição. Se todas as incertezas de medição forem aleatórias e distribuídas normalmente, pode-se reduzir a incerteza padrão para qualquer valor do mAs, aumentando-se o número de medições. A precisão é melhor que $\pm 0,05\%$ para

ambas as faces da câmara desenvolvida neste trabalho, o que limita o número de exposições necessárias para a medição da linearidade da taxa de kerma no ar com o mAs e não contribui acentuadamente para a incerteza na medição. A incerteza obtida na linearidade de resposta da câmara desenvolvida neste trabalho é uma incerteza sistemática e não pode ser minimizada repetindo-se as medições. Esta incerteza é pequena (menor que 1%) quando comparada com o critério de desempenho de um equipamento de raios-X (menor ou igual a 20%). Assim, a linearidade de resposta da câmara não afeta a determinação da linearidade da taxa de kerma no ar com o mAs de um equipamento de raios-X.

A taxa de kerma no ar para uma dada kVp e um dado mAs não deve variar mais que 10% em quatro exposições consecutivas⁽⁶⁾, isto é, sua reprodutibilidade deve ser menor ou igual a 10%. A precisão da câmara desenvolvida neste trabalho é muito melhor que esta precisão aceitável para a taxa de kerma no ar de um equipamento de raios-X e não influencia adversamente a medição da reprodutibilidade.

As câmaras de ionização de placas paralelas são projetadas para serem utilizadas com a janela de entrada de frente para a fonte de radiação e de forma perpendicular ao eixo do feixe. Como na prática, ao se posicionar a câmara, pode ocorrer uma pequena variação no ângulo de incidência da radiação, foi testada a dependência angular da câmara desenvolvida neste traba-

lho. Pode-se notar que a variação de resposta devida a uma pequena variação do ângulo de incidência da radiação não introduz uma incerteza significativa nas medições.

A dependência energética de resposta de uma câmara de ionização é uma das principais fontes de incerteza na determinação do kerma no ar e da CSR de um feixe de raios-X para uma dada kVp. A câmara de ionização utilizada deve ter uma dependência energética de resposta mínima para cada intervalo de energia que compreende os equipamentos de raios-X tratados. A dependência energética de resposta é mínima para a face A da câmara de ionização desenvolvida neste trabalho nas qualidades de raios-X de diagnóstico convencional e para a face G nas qualidades de raios-X de mamografia. A face A pode ser utilizada para medições de kerma no ar e taxa de kerma no ar e na determinação da CSR nas qualidades de raios-X de diagnóstico convencional e a face G nas qualidades de raios-X de mamografia.

CONCLUSÕES

Os testes de desempenho mostraram que a câmara de ionização desenvolvida neste trabalho pode ser utilizada rotineiramente na determinação de kerma no ar e taxa de kerma no ar em um programa de controle da qualidade de equipamentos de raios-X. A vantagem dessa câmara é que ela pode ser utilizada tanto para medições em radiografia convencional como em mamografia.

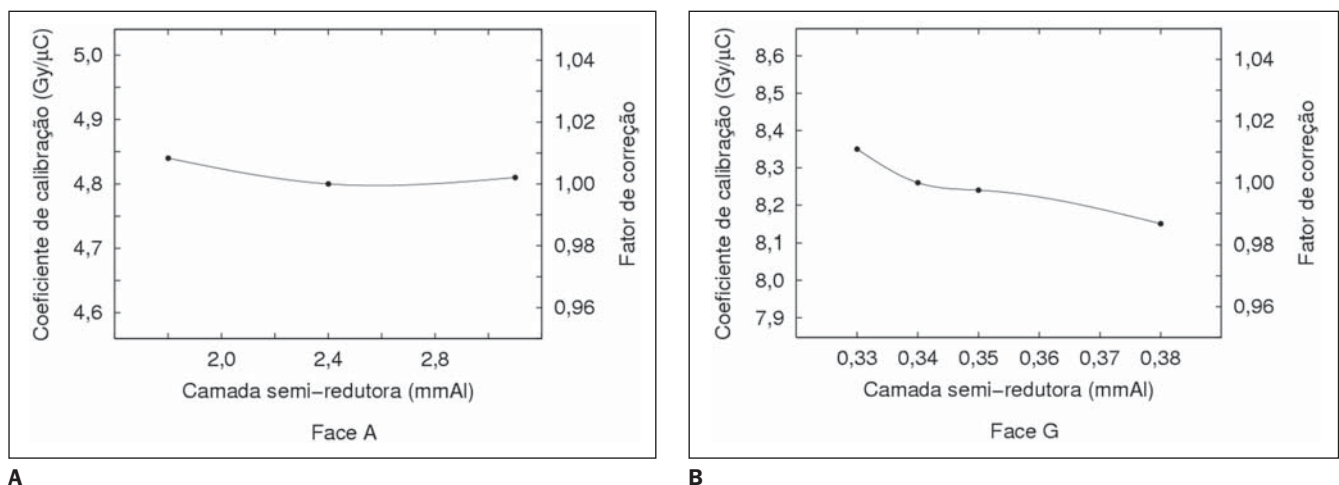


Figura 3. A: Coeficientes de calibração para as qualidades de raios-X de diagnóstico convencional e fatores de correção normalizados para a CSR de 2,4 mmAl. As incertezas são menores que 3%. **B:** Coeficientes de calibração para as qualidades de raios-X de mamografia e fatores de correção normalizados para a CSR de 0,34 mmAl. As incertezas são menores que 2%.

grafia, bastando selecionar a face apropriada. Normalmente utiliza-se um tipo de câmara de ionização para medições em radiografia convencional e um outro tipo de câmara em mamografia.

A construção dessa câmara mostra a viabilidade da construção de detectores de radiação utilizando-se materiais disponíveis no mercado nacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), pelo apoio financeiro parcial.

REFERÊNCIAS

- World Health Organization. Quality assurance in diagnostic radiology. Geneva: WHO; 1982.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organisation, Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development, Pan American Health Organization, World Health Organization. International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115. Vienna: IAEA; 1996.
- Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância Sanitária. Diretrizes de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico. Portaria nº 453, 1 de junho de 1998. Diário Oficial da União, Brasília, 2 de junho de 1998.
- International Atomic Energy Agency, Pan American Health Organization, World Health Organization. Radiological protection for medical exposure to ionizing radiation. Safety Standards Series No. RS-G-1.5. Vienna: IAEA; 2002.
- International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 74: Patient dosimetry for X rays used in medical imaging. J ICRU. 2005;5(2).
- Brasil. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Radiodiagnóstico médico: segurança e desempenho de equipamentos. Brasília: Anvisa; 2005.
- Petoussi-Henss N, Zankl M, Drexler G, et al. Calculation of backscatter factors for diagnostic radiology using Monte Carlo methods. Phys Med Biol. 1998;43:2237–50.
- European Commission. European protocol on dosimetry in mammography. Report EUR 16263 EN. Luxembourg: EC; 1996.
- Wagner LK, Cerra F, Conway B, et al. Energy and rate dependence of diagnostic x-ray exposure meters. Med Phys. 1988;15:749–53.
- DeWerd LA, Wagner LK. Characteristics of radiation detectors for diagnostic radiology. Appl Radiat Isot. 1999;50:125–36.
- Austerlitz C, Nette P, Cordilha A. Construção, calibração e teste de uma câmara de ionização para medidas de exposição X e gama entre 40 e 1250 keV. Rev Fis Aplic Instr. 1986;1:320–8.
- Silva I. Projeto e construção de uma câmara de extrapolação para dosimetria beta. (Dissertação de Mestrado). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 1985.
- Albuquerque MPP, Caldas LVE. New ionization chambers for beta and X-radiation. Nucl Instrum Meth A. 1989;280:310–3.
- Souza CN, Caldas LVE, Sibata CH, et al. Two new parallel-plate ionization chambers for electron beam dosimetry. Radiat Meas. 1996;26:65–74.
- Bulla RT, Caldas LVE. Determinação de dose absorvida em feixes de elétrons utilizando câmaras de ionização de placas paralelas. Radiol Bras. 2004;37:171–7.
- Bulla RT, Caldas LVE. Comparação entre fatores de calibração em termos de dose absorvida no ar para uma câmara de ionização de placas paralelas. Radiol Bras. 2006;39:203–7.
- Maia AF, Caldas LVE. A new extended-length parallel-plate ionization chamber. Phys Med Biol. 2005;50:3837–47.
- Maia AF, Caldas LVE. Calibração das câmaras de ionização para feixes de tomografia computadorizada no Brasil: a realidade atual. Radiol Bras. 2006;39:209–13.
- Vivolo V. Desenvolvimento de um sistema de referência para determinação do equivalente de dose pessoal e da constância de feixes de radiação-X. (Tese de Doutorado). São Paulo: Universidade de São Paulo; 2006.
- Dias SK, Caldas LVE. Development of an extrapolation chamber for the calibration of beta-ray applicators. IEEE T Nucl Sci. 1998;45:1666–9.
- Oliveira ML, Caldas LVE. A special mini-extrapolation chamber for calibration of $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ sources. Phys Med Biol. 2005;50:2929–36.
- International Atomic Energy Agency. Calibration of dosimeters used in radiotherapy, Technical Reports Series No. 374. Vienna: IAEA; 1994.
- International Electrotechnical Commission. IEC 61674: Medical electrical equipment dosimeters with ionization chambers and/or semi-conductor detectors as used in X-ray diagnostic imaging. Geneva: IEC; 1997.
- International Electrotechnical Commission. IEC 61267: Medical diagnostic X-ray equipment: radiation conditions for use in the determination of characteristics. Geneva: IEC; 2005.
- Caldas LVE. A sequential Tandem system of ionisation chambers for effective energy determination of X-radiation fields. Radiat Prot Dosim. 1991;36:47–50.
- Caldas LVE, Albuquerque MPP. Angular dependence of parallel-plate ionisation chambers. Radiat Prot Dosim. 1991;37:55–7.
- Geleijns J, Broerse JJ, Zweers D. General ion recombination for ionization chambers used under irradiation conditions relevant for diagnostic radiology. Med Phys. 1995;22:17–22.
- Das JJ, Akber SF. Ion recombination and polarity effect of ionization chambers in kilovoltage x-ray exposure measurements. Med Phys 1998; 25:1751–7.
- International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. Technical Reports Series No. 398. Vienna: IAEA; 2002.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial. Guia para a expressão da incerteza de medição. 3ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, Inmetro; 2003.