

CALIBRAÇÃO DAS CÂMARAS DE IONIZAÇÃO PARA FEIXES DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA NO BRASIL: A REALIDADE ATUAL*

Ana Figueiredo Maia¹, Linda V.E. Caldas²

Resumo **OBJETIVO:** O objetivo deste trabalho foi estabelecer, no Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, uma metodologia de calibração específica para as câmaras de ionização tipo lápis, que são utilizadas em procedimentos dosimétricos em feixes de tomografia computadorizada, seguindo as mais recentes recomendações internacionais. **MATERIAIS E MÉTODOS:** Foram utilizados, neste estudo, um equipamento de radiação X industrial, várias câmaras de ionização, um sistema de colimação móvel (tipo diafragma) e vários filtros de alumínio de alta pureza. **RESULTADOS:** Foram estabelecidos os campos padrões de radiodiagnóstico descritos na norma internacional IEC 61267, e foi elaborado um procedimento de calibração adequado para as câmaras de ionização tipo lápis. **CONCLUSÃO:** Atualmente, já é possível calibrar apropriadamente as câmaras de ionização tipo lápis no Brasil. O procedimento de calibração foi definido com base nas recomendações internacionais e em testes feitos com duas metodologias distintas.

Unitermos: Câmara de ionização tipo lápis; Metodologias de calibração; Campos padrões.

Abstract *Calibration of ionization chambers for computed tomography beams in Brazil: the present reality.*

OBJECTIVE: The aim of this study was to establish a calibration methodology specific for pencil ionization chambers used in computed tomography dosimetric procedures, in compliance with the most recent recommendations. The study was developed at the Calibration Laboratory of the Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. **MATERIALS AND METHODS:** An industrial x-ray equipment, several types of ionization chambers, a mobile collimator (diaphragm type), and several high purity aluminum filters were utilized in this study. **RESULTS:** Diagnostic radiology standard irradiation fields were established according to IEC 61267 standard, and an adequate calibration procedure for pencil ionization chambers was elaborated. **CONCLUSION:** The appropriate calibration of pencil ionization chambers is already a reality in Brazil. The calibration procedure was defined on the basis of international standards and on a comparative study using two different methodologies.

Keywords: Pencil ionization chamber; Calibration methodologies; Standard beams.

INTRODUÇÃO

A invenção da tomografia computadorizada (TC) foi sem dúvida um grande marco para a medicina no século XX, tanto que seus inventores, Godfrey Hounsfield e Alan Cormack, foram agraciados com o Prêmio Nobel em Medicina. O princípio básico da TC é baseado na possibilidade de se reproduzir um objeto bi- ou tridimensional a partir de múltiplas projeções deste objeto. A imagem tomográfica é formada a partir de um conjunto de projeções de uma região do corpo. As projeções são obtidas por meio de diver-

sas irradiações da região, em ângulos diferentes, por um feixe colimado, e a radiação transmitida é medida por um detector. As medidas do detector são processadas por um computador que faz a reconstrução da imagem.

Embora o potencial diagnóstico da TC seja indiscutível, muitos cuidados devem ser tomados, pois se trata de radiação ionizante e as doses são, quase sempre, mais altas do que as doses nos procedimentos de radiologia convencional⁽¹⁾. Levantamentos vêm mostrando um enorme crescimento do número de tomógrafos em uso. No Reino Unido, estudos mostraram que embora os procedimentos de TC representem apenas 7% do número total de procedimentos médicos que utilizam radiação X, eles são os responsáveis por cerca de 47% da dose coletiva total⁽²⁾.

Para a determinação da dose absorvida em um meio exposto a radiações ionizantes, utiliza-se um dispositivo apropriado,

denominado dosímetro. Dentre os diversos tipos de dosímetros utilizados, existem os baseados na medição da ionização de um gás, como as câmaras de ionização⁽³⁻⁶⁾.

A câmara de ionização utilizada para dosimetria em TC é uma câmara cilíndrica não selada, de comprimento sensível entre 10 e 15 cm, denominada câmara de ionização tipo lápis. Uma das características típicas dessa câmara é que ela apresenta resposta uniforme a radiações incidentes em todos os ângulos ao redor do seu eixo. Portanto, ela é adequada para utilização em equipamentos em que o tubo de raios X rotaciona, como no caso da TC.

A leitura geralmente apresentada por este tipo de câmara é em unidades de dose ou exposição vezes comprimento (mGy.cm ou R.cm), facilitando a determinação do “computed tomography dose index” (CTDI), que é a grandeza dosimétrica mais difundida em TC⁽⁷⁻¹¹⁾.

* Trabalho realizado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Comissão Nacional de Energia Nuclear, São Paulo, SP.

1. Doutora em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear.

2. Doutora em Ciências na Área de Física Nuclear.

Endereço para correspondência: Dra. Linda V.E. Caldas, Avenida Professor Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária, São Paulo, SP, 05508-000. E-mail: lcaldas@ipen.br

Recebido para publicação em 24/6/2005. Aceito, após revisão, em 16/8/2005.

As medidas fornecidas pelos detectores de radiação não são representações absolutas dos valores reais. Para se obter uma estimativa do valor real é necessário efetuar a calibração do instrumento. A calibração do instrumento permite averiguar se o instrumento está funcionando adequadamente, e fornece ao usuário um coeficiente de calibração que é utilizado para converter o valor indicado no instrumento para uma estimativa do valor real. O coeficiente de calibração é o quociente entre o valor real convencional e o valor obtido com o instrumento a ser calibrado, corrigido para as condições ambientais de referência. É necessário efetuar calibrações periódicas, denominadas recalibrações, porque as características dos instrumentos variam com o passar do tempo^(12,13).

A implantação de um procedimento específico para calibração das câmaras de ionização tipo lápis é uma prática muito recente, e poucos laboratórios no mundo oferecem este serviço. Um exemplo disto é que só em 2005 a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), tendo em vista o aumento crescente do uso da técnica da TC no diagnóstico médico, recomendou que o seu laboratório de calibração se capacitasse para fornecer o serviço de calibração de câmaras de ionização tipo lápis até o biênio 2006-2007⁽¹⁴⁾.

O Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI), do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), tem sempre buscado atualizar os serviços de calibração oferecidos, levando em consideração as necessidades dos seus usuários e as mais recentes recomendações internacionais, e se manter informado sobre novos procedimentos e tendências futuras. Este trabalho teve o objetivo, portanto, de implantar no LCI um serviço novo, ainda raro nos laboratórios de calibração do mundo inteiro e inexistente no Brasil (nenhum dos laboratórios de calibração autorizados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) oferece o serviço de calibração das câmaras de ionização específicas para TC). Vale salientar, entretanto, que a demanda por este serviço de calibração já existe no Brasil, e deve aumentar futuramente, uma vez que o número de tomógrafos e

de procedimentos de TC vem crescendo rapidamente no país.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um equipamento de radiação X industrial, marca Pantak/Seifert, modelo Isovolt 160HS, do LCI-IPEN, foi utilizado para o estabelecimento dos campos padrões de TC, assim como de outros campos de radiodiagnóstico convencional. Este equipamento é de alta frequência e tem filtração inerente de 0,8 mmBe. O intervalo da tensão é de 5 a 160 kV e o intervalo de corrente é de 0,1 a 45 mA. O sistema padrão para esses feixes é uma câmara de ionização de placas paralelas Physikalisch-Technische Werkstätten (PTW), modelo 77334, com volume sensível de 1 cm³, e um eletrômetro PTW, modelo Unidos 10001. Esta câmara é um padrão secundário e possui certificado de calibração do laboratório primário Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Alemanha.

Uma câmara monitora PTW, modelo 34014, que é utilizada acoplada a um eletrômetro PTW, modelo Unidos E 10010, foi utilizada durante todas as medidas para verificação da constância da intensidade de radiação X.

O sistema de radiação X possui um sistema de posicionamento a laser, que define precisamente o centro do campo e a distância foco-câmara e possibilita o alinhamento dos detectores de forma simples e precisa.

Os filtros adicionais de alumínio, necessários para o estabelecimento dos cam-

pos padrões, foram confeccionados a partir de um mesmo tarugo de alta pureza (superior a 99,999%), pela técnica da eletroerosão a fio. Os filtros absorvedores de alumínio utilizados nos testes de determinação das camadas semi-redutoras (CSR) possuíam pureza superior a 99,9%.

A câmara de ionização utilizada para determinação das CSR foi uma câmara de ionização dedal, PTW, modelo 31003, com volume sensível de 0,3 cm³. Esta câmara foi utilizada nas medidas de CSR por apresentar baixa dependência energética num amplo intervalo de energias.

Para o estabelecimento dos campos padrões, foi utilizado um colimador com diâmetro de 5,1 cm, posicionado a 37,8 cm do foco do tubo. O campo de radiação obtido, a 1 m do foco do tubo, tem diâmetro de 12,4 cm, com homogeneidade na direção vertical maior do que 97% e na direção horizontal maior do que 94%.

Para possibilitar irradiações parciais das câmaras de ionização tipo lápis, foi utilizado um colimador adicional, tipo diafragma. Este colimador é constituído de quatro placas de chumbo, cada uma com 7 cm de largura, que se deslocam aos pares, permitindo a obtenção de campos retangulares de vários tamanhos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra as características dos feixes de radiodiagnóstico convencional segundo a norma IEC 61267⁽¹⁵⁾. Todos esses campos padrões foram estabelecidos no LCI-IPEN. As qualidades

Tabela 1 Qualidades de radiodiagnóstico segundo a norma IEC 61267⁽¹⁵⁾.

Qualidade da radiação	Tensão (kV)	Filtração total (mmAl)	CSR (mmAl)	Qualidade da radiação	Tensão (kV)	Filtração total (mmAl)	CSR (mmAl)
Feixes diretos				Feixes atenuados			
RQR2	40	2,5	1,0	RQA2	40	6,5	2,4
RQR3	50	2,5	1,5	RQA3	50	12,5	4,0
RQR4	60	2,5	2,0	RQA4	60	18,5	5,7
RQR5	70	2,5	2,5	RQA5	70	23,5	7,1
RQR6	80	2,5	2,9	RQA6	80	28,5	8,4
RQR7	90	2,5	3,3	RQA7	90	32,5	9,1
RQR8	100	2,5	3,7	RQA8	100	36,5	9,9
RQR9	120	2,5	4,5	RQA9	120	42,5	11,5
RQR10	150	2,5	5,7	RQA10	150	47,5	12,8

CSR, camada semi-redutora.

recomendadas para a calibração das câmaras de TC são as qualidades RQR9 e RQA9⁽¹⁶⁾. As demais qualidades serão utilizadas para calibração de outros dosímetros de radiodiagnóstico e também para um estudo mais amplo da dependência energética das câmaras de ionização tipo lápis.

Os valores obtidos para a primeira e a segunda CSR, o coeficiente de homogeneidade, que é a razão entre a primeira CSR e a segunda CSR, e as taxas de kerma no ar em cada qualidade de radiação estabelecida estão apresentados na Tabela 2. Os valores de taxas de kerma no ar em cada qualidade foram determinados com a câmara padrão secundária PTW 77334, e utilizando corrente de 10 mA para os feixes diretos e 20 mA para os feixes atenuados. A partir dos valores das CSR, foram determinados os valores de energia efetiva dos feixes⁽¹⁷⁾, também apresentados na Tabela 2.

Comparando-se os valores de CSR obtidos no LC-IPEN, com os valores listados na Tabela 1, é possível perceber discordâncias em várias qualidades. Atualmente, esta norma está em revisão, e como alguns valores de CSR estão sabidamente equivocados, muito provavelmente novos valores de referência serão apresentados na nova versão. Uma vez que o sistema padrão secundário do LCI para estas qualidades de radiação possui certificado de calibração do laboratório primário PTB, Alemanha, decidiu-se seguir a metodologia adotada até o presente momento neste laboratório: utilizar os parâmetros de tensão e filtração adicional da norma IEC 61267⁽¹⁵⁾, sem fazer nenhum ajuste, na tentativa de se aproximar os valores de CSR dos valores listados nessa norma. Foram, entretanto, aplicados fatores de correção aos coeficientes de calibração do sistema padrão secundário para corrigir as diferenças de CSR obtidas entre os feixes do LCI e do PTB. Vale ressaltar que as CSR do PTB, relatadas no certificado de calibração, também não estão em completa concordância com os valores da norma.

Existem algumas formas de calibração da câmara de ionização tipo lápis, e a diferença principal entre elas é a porção do comprimento sensível da câmara que é

Tabela 2 Características dos feixes de radiação estabelecidos no LCI.

Qualidade da radiação	Primeira CSR (mmAl)	Segunda CSR (mmAl)	Coeficiente de homogeneidade	Energia efetiva (keV)	Taxa de kerma no ar (mGy/min)
RQR2	1,44	1,80	0,80	25,10	13,79
RQR3	1,79	2,38	0,75	27,15	24,06
RQR4	2,09	2,92	0,72	28,80	35,35
RQR5	2,35	3,42	0,69	30,15	47,17
RQR6	2,65	3,99	0,66	31,65	60,39
RQR7	2,95	4,62	0,64	33,05	74,51
RQR8	3,24	5,20	0,62	34,40	89,81
RQR9	3,84	6,31	0,61	37,05	121,80
RQR10	4,73	7,79	0,61	40,75	175,19
RQA2	2,22	2,50	0,89	29,50	5,39
RQA3	3,91	4,15	0,94	37,30	3,39
RQA4	5,34	5,83	0,92	43,25	3,03
RQA5	6,86	7,32	0,94	49,40	3,40
RQA6	8,13	8,54	0,95	54,75	3,99
RQA7	9,22	9,70	0,95	59,70	4,87
RQA8	10,09	10,73	0,94	63,95	5,76
RQA9	11,39	12,16	0,94	71,15	7,93
RQA10	13,02	13,79	0,94	82,10	13,28

CSR, camada semi-redutora.

Tabela 3 Informações técnicas sobre as câmaras de ionização tipo lápis utilizadas neste estudo.

Informações técnicas	Câmaras de ionização tipo lápis			
	C1	C2	C3	C4
Marca	Victoreen	Radcal	Radcal	Radcal
Modelo	660-6	10 × 5-3CT	10 × 5-3CT	10 × 5-3CT
Volume sensível (cm ³)	3,2	3,0	3,0	3,0
Comprimento sensível (cm)	10	10	10	10
	Pré-amplificador			
Marca	—	Radcal	Radcal	Radcal
Modelo	—	9060	9060	9060
	Eletrômetro			
Marca	PTW	Radcal	Radcal	Radcal
Modelo	Unidos 10001	9015	9015	9015

irradiada. Após o estabelecimento dos campos padrões, foram testadas duas metodologias de calibração: com irradiação total do comprimento sensível da câmara, que é a metodologia mais comum para calibração dos dosímetros em geral; e com irradiação parcial do comprimento sensível da câmara, como recomenda a norma IEC 61674⁽¹⁶⁾. Nestes testes foram utilizadas apenas as duas qualidades de radiação recomendadas para a calibração da câmara de ionização tipo lápis, RQR9 e RQA9.

Na maioria dos procedimentos de calibração, toda a área sensível do dosímetro é irradiada. Também é possível calibrar as câmaras de ionização tipo lápis desta forma. Utilizando-se os campos padrões de radiodiagnóstico estabelecidos, foram calibradas quatro câmaras de ionização tipo lápis, descritas na Tabela 3, usando esta metodologia. As câmaras calibradas foram posicionadas perpendicularmente ao eixo anodo-catodo, para evitar o efeito anódico. Os coeficientes de calibração obtidos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 Coeficientes de calibração obtidos para as quatro câmaras de ionização tipo lápis, descritas na Tabela 3, nos campos padrões RQR9 e RQA9, para duas metodologias de calibração distintas: com irradiação total e com irradiação parcial (50%) do volume sensível da câmara sob calibração.

Qualidade da radiação	Coeficiente de calibração			
	C1 ($\times 10^8$ Gy/C)	C2 (adimensional)	C3 (adimensional)	C4 (adimensional)
Irradiação total do volume sensível da câmara				
RQR9	1,022	10,15	10,31	10,00
RQA9	1,005	11,08	11,16	10,24
Incerteza padrão combinada	1,18%	1,51%	1,74%	1,50%
Irradiação parcial (50%) do volume sensível				
RQR9	0,990	9,77	9,87	9,80
RQA9	0,968	10,59	10,82	10,07
Incerteza padrão combinada	1,34%	1,65%	1,85%	1,64%

A segunda metodologia adotada no presente estudo foi aquela descrita por Bochud *et al.*⁽¹⁸⁾. Nesse trabalho, os pesquisadores chegaram à conclusão que os resultados obtidos são melhores quando a calibração é feita irradiando-se 50% do volume sensível da câmara de ionização tipo lápis. Esta é também a recomendação da norma IEC 61674⁽¹⁶⁾. O procedimento de calibração sugerido no presente trabalho é semelhante à metodologia com irradiação completa do volume, mas com a introdução de um sistema de colimação adicional que permite a irradiação parcial da câmara sob calibração.

Para garantir uma colimação precisa, o sistema de colimação deve ser colocado o mais próximo possível da câmara sob calibração. Esta proximidade, no entanto, gera um efeito indesejável: o aumento da contribuição da radiação espalhada na leitura. Este efeito é ainda mais acentuado, porque a parte do volume sensível que está blindada em relação ao feixe primário não é insensível à radiação espalhada. Para a determinação do coeficiente de calibração, é necessário introduzir uma correção para este efeito. Esta correção é efetuada pela determinação da “leitura residual” na câmara de ionização, que é a leitura referente a um campo nulo. Esta leitura residual pode ser estimada por meio de um ajuste linear nas medidas feitas para pelo menos três tamanhos de campos distintos.

Foram calibradas as quatro câmaras de ionização tipo lápis, descritas na Tabela

3, seguindo esta segunda metodologia. Os coeficientes de calibração obtidos também estão apresentados na Tabela 4. Nesses procedimentos de calibração, o sistema de colimação móvel foi posicionado a 6 mm das câmaras sob calibração, que também foram posicionadas perpendicularmente ao eixo anodo-catodo. A abertura horizontal do campo foi mantida fixa em 1,5 cm e a abertura vertical foi variada para permitir a irradiação de comprimentos diferentes da câmara.

Comparando-se os resultados das duas metodologias, observa-se que as diferenças percentuais entre os coeficientes de calibração obtidos nos campos RQR9 e RQA9 estão entre 1,7% e 4,6%. Bochud *et al.*⁽¹⁸⁾ também encontraram desvios, da ordem de 3,5%, entre os coeficientes de calibração obtidos pelas metodologias diferentes. As diferenças obtidas nos coeficientes de calibração são conseqüência da falta de homogeneidade da resposta ao longo do comprimento sensível da câmara, visto que neste tipo de câmara de ionização sempre existe uma queda de sensibilidade nos extremos do comprimento sensível.

Tanto os coeficientes obtidos com irradiação total quanto os obtidos com irradiação parcial do volume sensível da câmara de ionização tipo lápis são corretos; a diferença está no que eles expressam. Quando a câmara é irradiada por completo, obtém-se um coeficiente de calibração médio, como se a queda de sensibilidade da região extrema da câmara

fosse dividida uniformemente ao longo de todo o comprimento sensível. Se, na prática dosimétrica, todo o volume da câmara fosse igualmente irradiado, este coeficiente seria o mais adequado. Entretanto, a maioria das medidas é feita utilizando-se cortes de, no máximo, 1 ou 2 cm de espessura, centrados na câmara de ionização tipo lápis. Sendo assim, os extremos da câmara são muito menos expostos à radiação do que a região central. É mais recomendado, portanto, evitar uma irradiação total do volume sensível da câmara durante o procedimento de calibração, para que seja obtido um coeficiente de calibração mais fiel às características da região central da câmara.

As incertezas padrões combinadas envolvidas em todas as calibrações realizadas durante este projeto foram estimadas segundo as recomendações do “Guia para a expressão da incerteza de medição”, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)^(19,20), computando-se as incertezas envolvidas em todos os parâmetros considerados relevantes no processo de medição. Foi considerado um intervalo de confiança de 95% (fator de abrangência (k) = 2).

CONCLUSÃO

O LCI-IPEN já está capacitado para oferecer um serviço adequado de calibração das câmaras de TC no Brasil. Duas metodologias de calibração foram testadas e comparadas, e um procedimento de calibração foi elaborado utilizando-se a metodologia considerada mais adequada: com irradiação de 50% do volume sensível da câmara de ionização tipo lápis. O LCI, com isso, se adiantou às recomendações internacionais da IAEA, que só em 2005 definiu como meta para o biênio 2006–2007 a implantação do serviço de calibração deste tipo de câmara em seu laboratório.

Agradecimentos

As autoras agradecem o apoio financeiro parcial da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil.

REFERÊNCIAS

1. Shrimpton PC, Wall BF. The increasing importance of X-ray computed tomography as a source of medical exposure. *Radiat Prot Dosim* 1995;57: 413–415.
2. Hart D, Wall BF. UK population dose from medical X-ray examinations. *Eur J Radiol* 2004;50: 285–291.
3. Knoll GF. Radiation detection and measurement. 2nd ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1989.
4. Boag JW. Ionization chambers. In: Kase KR, Bjärngard BE, Attix FH, editors. The dosimetry of ionizing radiation. Orlando, FL: Academic Press Inc., 1987;2:169–243.
5. Rajan KNG. Advanced medical radiation dosimetry. New Delhi: Prentice-Hall of India, 1992.
6. Attix FH. Introduction on radiological physics and radiation dosimetry. 2nd ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1986.
7. Shope TB, Gagne RM, Johnson GC. A method for describing the doses delivered by transmission x-ray computed tomography. *Med Phys* 1981;8: 488–495.
8. Jucius RA, Kambic GX. Radiation dosimetry in computed tomography (CT). *SPIE Proc., Application of Optical Instrumentation in Medicine VI* 1977;127:286–295.
9. Nagel HD. Radiation exposure in computed tomography – fundamentals, influencing parameters, dose assessment, optimization, scanner data, terminology. 2nd ed. Frankfurt: COCIR, 2000;chapt. 2, Fundamentals of CT dosimetry.
10. European Commission. European guidelines on quality criteria for computed tomography. Luxembourg, 1997. (EUR 16262 EN).
11. McNitt-Gray MF. The AAPM/RSNA physics tutorial for residents: topics in CT. Radiation dose in CT. *RadioGraphics* 2002;22:1541–1553.
12. International Atomic Energy Agency. Calibration of dosimeters used in radiotherapy. Technical Reports Series 374. Vienna: IAEA, 1994.
13. International Atomic Energy Agency. Calibration of radiation protection monitoring instruments. Safety Reports Series 16. Vienna: IAEA, 2000.
14. Ibbott G. Report of the 11th Meeting of the SSDL Scientific Committee. *SSDL Newsletter* 2005;50: 4–19.
15. International Electrotechnical Commission. Medical diagnostic X-ray equipment – radiation conditions for use in determination of characteristics. IEC 61267. Geneva: IEC, 1994.
16. International Electrotechnical Commission. Medical electrical equipment – dosimeters with ionization chamber and/or semi-conductor detectors as used in X-ray diagnostic imaging. IEC 61674. Geneva: IEC, 1997.
17. International Organization for Standardization. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doseratemeters and for determining their response as a function of photon energy, part 1: radiation characteristics and production methods. ISO 4037-1. Geneva: ISO, 1996.
18. Bochud FO, Grecescu M, Valley JF. Calibration of ionization chambers in air kerma length. *Phys Med Biol* 2001;46:2477–2487.
19. 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, RJ: ABNT-INMN, 2003.
20. International Organization for Standardization. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Geneva: ISO, 1993.