

## Aplicação de dois programas computacionais para cálculos de dose absorvida em técnicas radiográficas

**M E S ABRANTES**<sup>1,2,3</sup>, **T A de LIMA**<sup>1</sup>, **M G SILVESTRE**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculdade Universus Veritas de Belo Horizonte – UNIVERITAS  
Rua Diamantina, 567 - Lagoinha.  
31110-320, Belo Horizonte, MG, Brasil,

<sup>2</sup> Faculdade Ciências Médicas de Minas Gerais (FCMMG)/FELUMA  
Pós-Graduação em Higiene Ocupacional/Pós-Graduação em Radioproteção  
Alameda Ezequiel Dias, 275. 2º. andar  
30130-110 - Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>3</sup> Centro Mineiro de Treinamento Ocupacional (CEMTRO)  
Rua Jacuí, 3760 – Bairro Ipiranga  
30160-190 - Belo Horizonte, MG, Brasil

E-mail: marcos.nuclear@yahoo.com.br

**Resumo:** As doses absorvidas em raios X diagnóstico são compostas de parâmetros radiográficos. Elas podem sofrer alterações devido a variação desses parâmetros ou pelo método de cálculo utilizado. Nesse trabalho, foram utilizados os programas CALDose X e PCXMC para determinação de doses absorvidas nos pulmões, tireoide e estômago, fundamentadas em parâmetros radiográficos similares para tórax pósterio-anterior. Os resultados obtidos variaram de doses entre 80% e 100% maior no PCXMC, para pulmões e estômago, em relação ao CalDose X e de até 450% maior no CalDose X, para a tireóide, em relação ao PCXMC.

**Palavras-chave:** Dose absorvida, raios X diagnóstico, simulação computacional, Monte Carlo.

**Abstract:** The doses absorbed in diagnostic X-rays are composed of radiographic parameters. They may change due to the variation of these parameters or the calculation method used. In this work, the CALDose X and PCXMC programs were used to determine the absorbed doses in the lungs, thyroid and stomach, based on similar radiographic parameters for the postero-anterior chest. The results obtained ranged from doses between 80% and 100% higher in PCXMC, for lungs and stomach, compared to CalDose X and up to 450% higher in CalDose X, for thyroid, compared to PCXMC.

**Keywords:** Absorbed dose, diagnostic X-rays, computer simulation, Monte Carlo.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o aumento do uso dos raios X nas aplicações médicas para fins de diagnóstico, tornou-se necessário o conhecimento das doses fornecidas aos pacientes para comparação aos níveis de referência em radiodiagnóstico ou para estimativa do risco à radiação. Processos experimentais e computacionais são amplamente utilizados com esse propósito, neste intuito os programas computacionais tornaram-se importantes para suprir a impossibilidade de medidas “*in-vivo*” em pacientes submetidos aos exames. A validação dos diferentes programas para condições específicas de exposição dos pacientes é determinante para a confiabilidade do seu uso (AIEA, 2002). Desta forma, a verificação dos programas computacionais vem de encontro com a necessidade de se conhecer melhor suas funções, habilidades, tempo de processamento, praticidade de manuseio, tipos de resultados e de que forma é viável em relação ao desenvolvimento de pesquisas ou para ensino. Outro aspecto relevante na determinação de qual programa utilizar é como são comercializados, indicando que nem sempre são viáveis economicamente ou que possuem alguma restrição à sua venda.

Os programas computacionais que calculam a dose absorvida<sup>1</sup> nos órgãos precisam ter tempo de processamento rápido, principalmente se seu uso é para atividades de educação, mas que seus resultados sejam satisfatórios de aproximação da dose real (ABRANTES, 2011). O tempo de processamento depende tanto de um computador, com alto desempenho, e sua associação ao tempo de processamento com a precisão dos resultados.

Esse trabalho, tem como objetivo estudar e mostrar a agilidade, limitação e facilidade, de um programa computacional livre e um programa pago para cálculo de dose absorvida. Foi realizada uma comparação entre os dois programas com intuito de serem analisados perante seus desenvolvimentos, os quais foram delimitados para cálculo nos órgãos pulmões, estômago e tireoide. Essa delimitação é baseada nos parâmetros similares de composição das técnicas radiográficas simuladas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo, foram utilizados dois programas computacionais que se baseiam em probabilidade e estatística de interação da radiação com a matéria, fundamentados nos princípios de Monte Carlo. Os programas utilizados foram o CalDose X versão *on line* (KRAMER, KHOURY, VIEIRA, 2008) de uso livre e PCXMC versão 2.0 (STUK, 2008) com licença de uso e posse de um dos autores.

No estudo foi levado em consideração que as técnicas radiográficas possuem os parâmetros similares e estão fundamentados em tensão (kV), carga aplicada ao tubo de raios X (mA.s), filtração total do tubo de 4,0 mmAl com 10 simulações e 5,0 mmAl com 10 simulações, ângulo do anodo com 17° de material tungstênio, distância foco pele (DFP) de 152,2 cm para o CalDose X e 154,1 cm para o PCXMC, distância entre o foco e o detector/filme de 180 cm, tamanho de campo de irradiação no centro do detector/filme de (35x40) cm<sup>2</sup>, projeção pósterio-anterior (PA) para tórax, valores iguais de kerma no ar calculado pelo CalDose X de acordo com sua curva de rendimento e características do simulador com

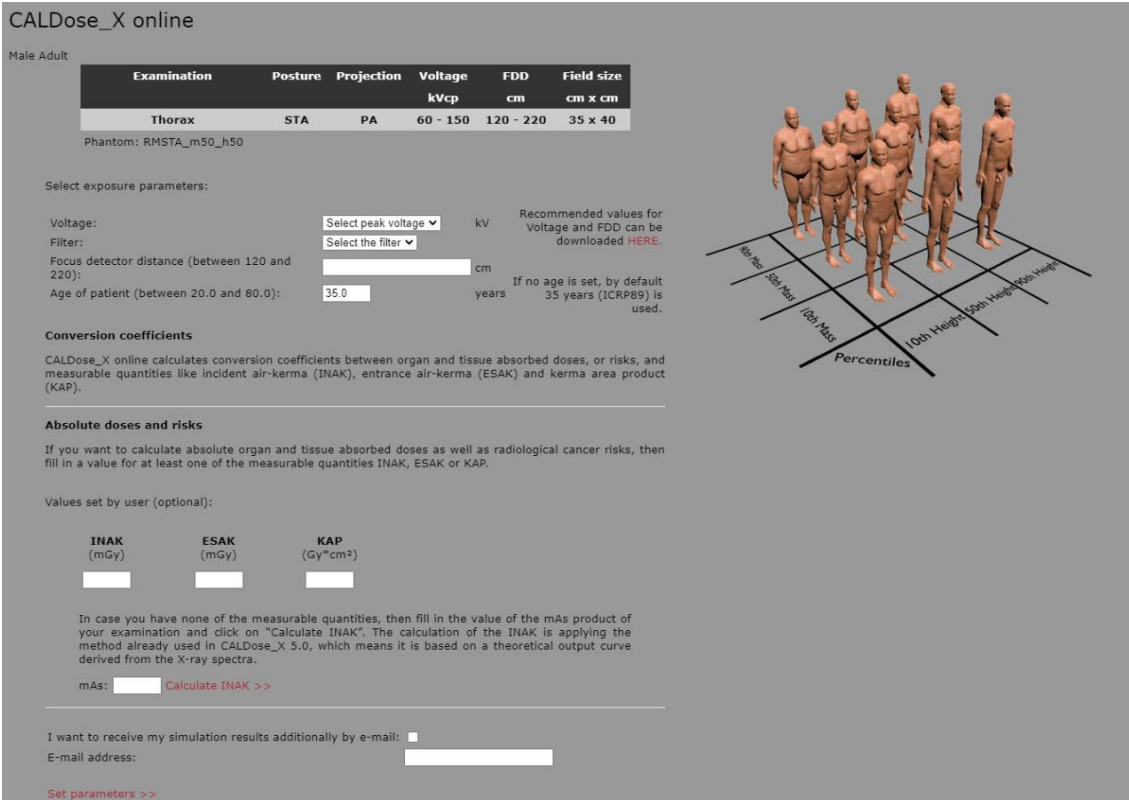
---

<sup>1</sup> Dose absorvida (D) – é definida como o quociente entre a energia média fornecida pela radiação ionizante em uma determinada massa (ICRP, 2007a).

176,4 cm de altura e 79 kg de peso. O parâmetro de tensão foi utilizado entre os valores de 80 a 100 kV e carga aplicada ao tubo de raios X entre 5 a 12,5 mA.s.

### 2.1. Simulações com o CalDose X

Para a simulação foi utilizado a curva de rendimento padrão do programa, que nessa versão *on line* não é disponibilizada. De acordo com o manual a curva de rendimento é dependente da associação da tensão, carga aplicada ao tubo de raios X e a distância foco pele. Na curva de rendimento o programa utiliza a energia espectral média para cada composição dos parâmetros radiográficos para gerar o kerma no ar livre no ar (INAK). O tempo de processamento para a simulação, em média é de 40 segundos, mas pode variar dependendo da transmissão dos dados e processamento na fonte. Na figura 1 é apresentado a tela para inserção dos dados que compõe a técnica radiográfica.



**CALDose\_X online**

Male Adult

Examination	Posture	Projection	Voltage kVcp	FDD cm	Field size cm x cm
Thorax	STA	PA	60 - 150	120 - 220	35 x 40

Phantom: RMSTA\_m50\_h50

Select exposure parameters:

Voltage:  kV Recommended values for Voltage and FDD can be downloaded [HERE](#).

Filter:

Focus detector distance (between 120 and 220):  cm

Age of patient (between 20.0 and 80.0):  years If no age is set, by default 35 years (ICRP89) is used.

**Conversion coefficients**

CALDose\_X online calculates conversion coefficients between organ and tissue absorbed doses, or risks, and measurable quantities like incident air-kerma (INAK), entrance air-kerma (ESAK) and kerma area product (KAP).

**Absolute doses and risks**

If you want to calculate absolute organ and tissue absorbed doses as well as radiological cancer risks, then fill in a value for at least one of the measurable quantities INAK, ESAK or KAP.

Values set by user (optional):

<b>INAK</b> (mGy)	<b>ESAK</b> (mGy)	<b>KAP</b> (Gy*cm <sup>2</sup> )
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

In case you have none of the measurable quantities, then fill in the value of the mAs product of your examination and click on "Calculate INAK". The calculation of the INAK is applying the method already used in CALDose\_X 5.0, which means it is based on a theoretical output curve derived from the X-ray spectra.

mAs:  [Calculate INAK >>](#)

I want to receive my simulation results additionally by e-mail:

E-mail address:

[Set parameters >>](#)

Figura 1 – Tela do CalDose X versão *on line* (KRAMER, KHOURY, VIEIRA, 2008).

Na versão *on line*, esse programa utiliza o simulador MASH para simular o paciente adulto masculino que possui massa dos órgãos e tecidos, baseados nos valores da ICRP 89 (ICRP, 2003; CASSOLA, MELO LIMA, KRAMER, KHOURY, 2010).

## 2.2. Simulações com o PCXMC

Foi inserido no programa PCXMC os valores do espectro nos arquivos de input para geração dos cálculos acompanhado da carga aplicada ao tubo de raios X e os outros parâmetros das técnicas radiográficas.

O programa permite inserir número de fótons para compor uma melhor precisão do erro estatístico das doses. Dessa forma, foi utilizado, para simulação, 2000 fótons para cada intervalado de 10 keV chegando até 150 keV, obtendo um tempo de processamento de 1 minuto com um computador de 1,8 Ghz de processador e 2 Gb de memória RAM. Esse programa utiliza o simulador matemático hermafrodita baseados no simulador de Cristy e Eckerman (CRISTY, 1980; CRISTY, ECKERMAN, 1987) com biótipo adulto com variação de altura, peso e idade. Como esse programa permite variar altura e peso do simulador, INAK, filtração total, diferentemente do CalDose X, foi utilizado os parâmetros das técnicas radiográficas e os dados fornecido pelo CalDose X para a simulação no PCXMC. Na figura 2 é exemplificado uma das telas do PCXMC.

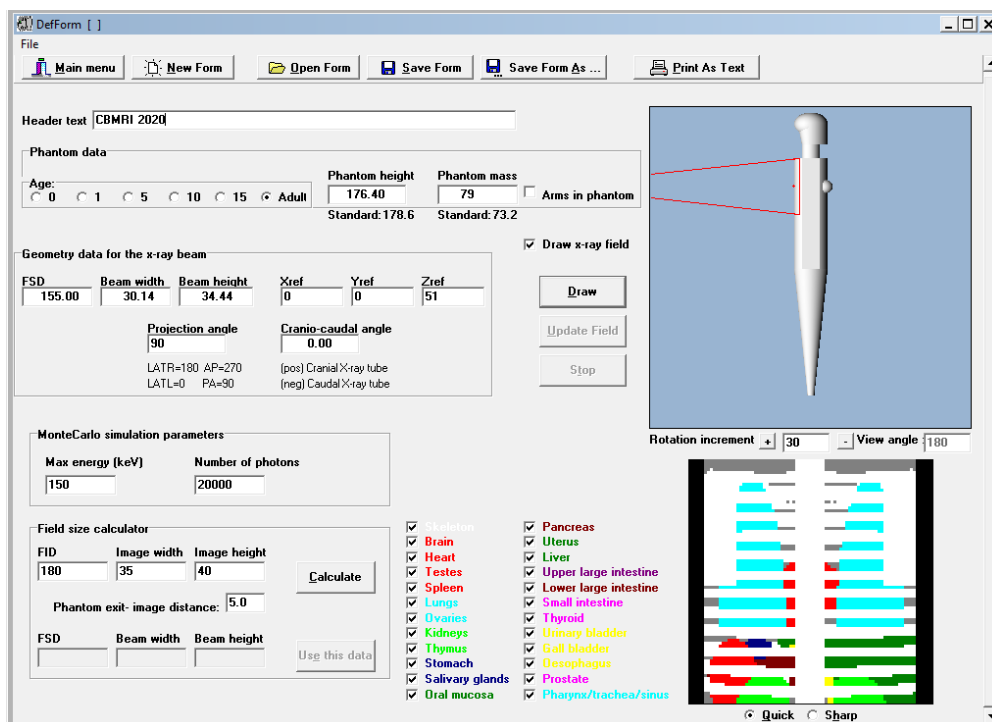


Figura 2 – Tela do PCXMC para inserir os parâmetros radiográficos (STUK, 2008).

Nessa tela permite o usuário inserir o biótipo, distância foco pele, tamanho de campo de irradiação no detector/filme ou no paciente, posição do tamanho de campo com variação de milímetros, ângulo de incidência da técnica, número de fótons e a seleção dos órgãos de interesse para essa técnica radiográfica e conhecer suas doses absorvidas.

### 2.3. Tamanho de campo irradiado nos simuladores

Na figura 3 estão representados o tamanho de campo irradiado nos simuladores do CalDose X e PCXMC.

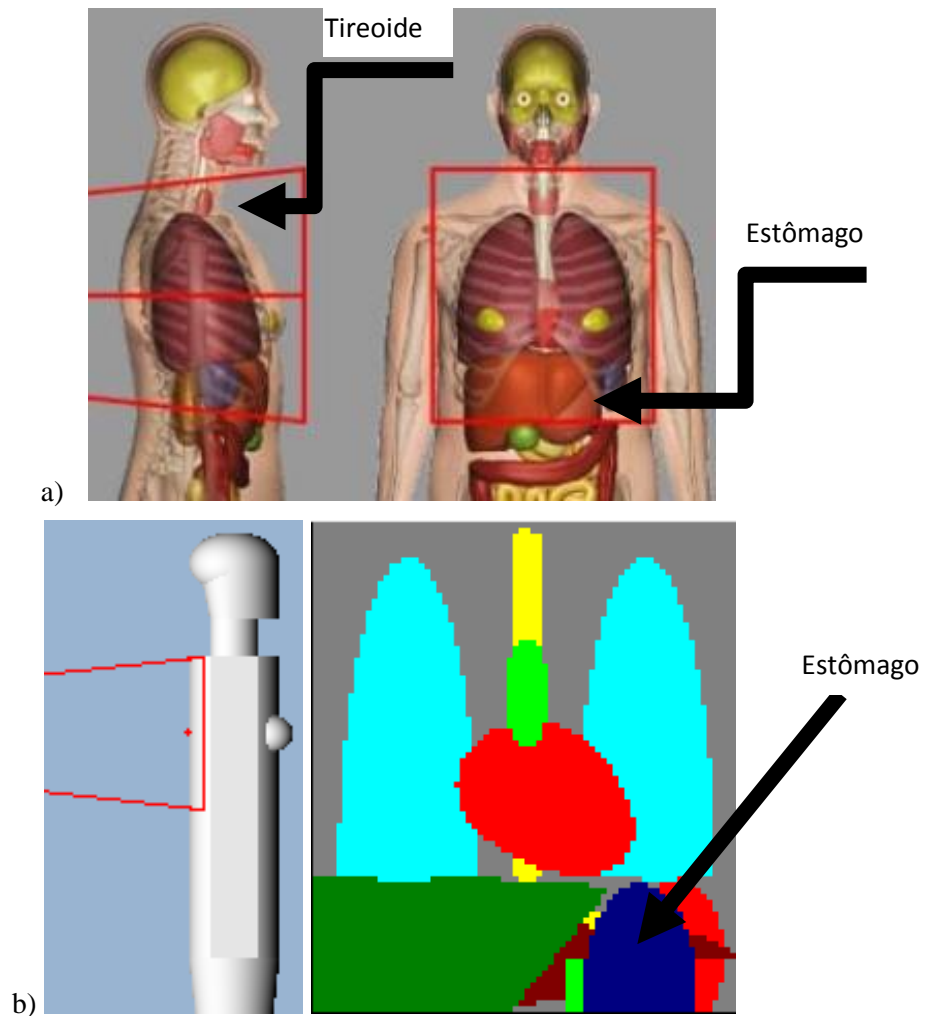


Figura 3 – Tamanho de campo irradiado nos simuladores. a) Área do tórax abrangendo os pulmões, tireoide e parte do estômago no CalDose X (KRAMER; KHOURY; VIEIRA, 2008) e (b) Área do tórax abrangendo pulmões e parte do estômago, sem abrangência da tireoide no PCXMC (STUK, 2008).

De acordo com a figura 3, pode ser verificado que a tireoide está totalmente irradiada e o tamanho do órgão estômago é superior, no simulador do CalDose X (a) em relação ao simulador do PCXMC (b). No PCXMC é permitido posicionar a parte superior do campo de irradiação a partir da vertebra torácica T4, no entanto, o tamanho de campo do CalDose X *on line* é fixo e sem possibilidade de alteração.

### 3. RESULTADOS

Os resultados das doses absorvidas obtidas pelo CalDose X e o PCXMC fornecem diretamente os resultados na grandeza dose absorvida, como indicado na figura 4.

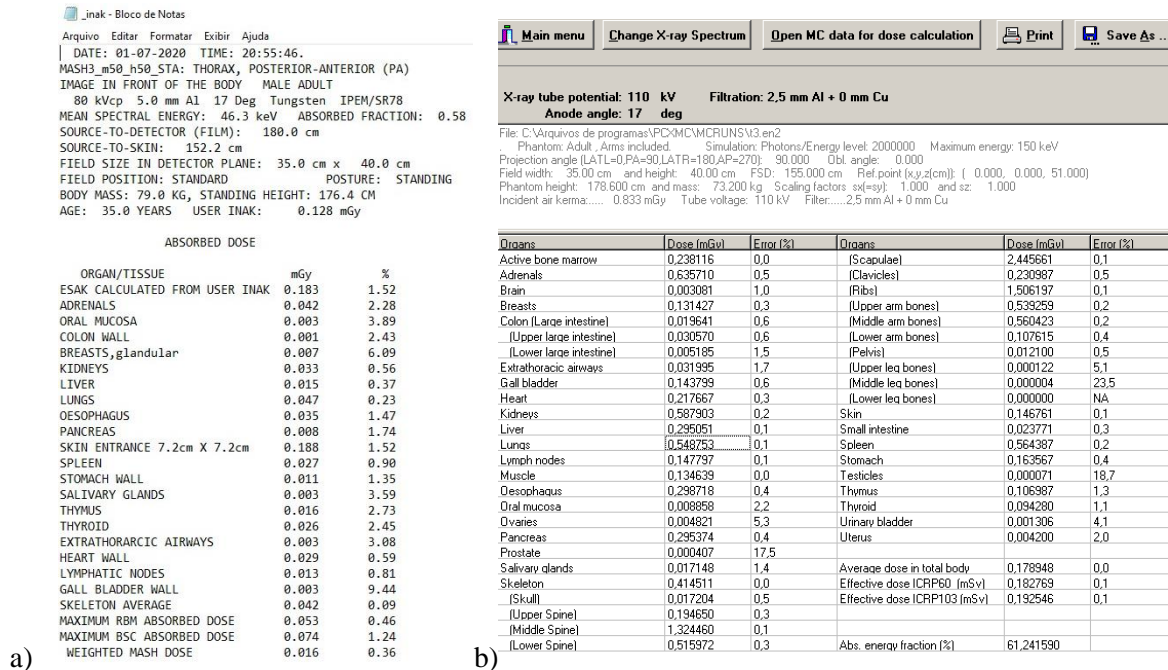


Figura 4 – Tela de resultados do CalDose X (a) (KRAMER; KHOURY; VIEIRA, 2008) e PCXMC (b) (STUK, 2008).

Os parâmetros simulados estão indicados nas tabelas 1 a 4 separadas por filtração total com 4 e 5 mm Al.

Tabela 1 – Parâmetros das técnicas radiográficas simuladas com filtração total de 4 mm Al no CalDose X.

Número da técnica radiográfica	Tensão (kV)	Carga aplicada ao tubo de raios X (mA.s)	Kerma no ar (mGy)	Pulmões (mGy)	E* (%)	Tireoide (mGy)	E* (%)	Estômago (mGy)	E* (%)
1	80	5,6	0,161	0,05	0,23	0,03	2,54	0,01	1,4
2		6,3	0,181	0,06	0,23	0,03	2,54	0,01	1,4
3		7,1	0,204	0,07	0,23	0,04	2,54	0,02	1,4
4		8	0,230	0,08	0,23	0,04	2,54	0,02	1,4
5		9	0,259	0,09	0,23	0,05	2,54	0,02	1,4
6		12,5	0,36	0,12	0,23	0,06	2,54	0,03	1,4
7	90	5	0,183	0,07	0,23	0,04	2,35	0,02	1,31
8		8	0,294	0,11	0,23	0,06	2,35	0,03	1,31
9		10	0,367	0,14	0,23	0,08	2,35	0,04	1,31
10	100	12	0,542	0,23	0,22	0,14	2,24	0,06	1,24

\*- Erro estatístico

Tabela 2 – Parâmetros das técnicas radiográficas simuladas com filtração total de 4 mmAl no PCXMC.

Número da técnica radiográfica	Tensão (kV)	Carga aplicada ao tubo de raios X (mA.s)	Kerma no ar (mGy)	Pulmões (mGy)	E* (%)	Tireoide (mGy)	E* (%)	Estômago (mGy)	E* (%)
1	80	5,6	0,161	0,09	1,1	0,01	16,1	0,02	4,2
2		6,3	0,181	0,10	1,0	0,01	16,1	0,02	4,2
3		7,1	0,204	0,11	1,0	0,01	16,1	0,02	4,2
4		8	0,230	0,12	1,0	0,01	16,1	0,02	4,2
5		9	0,259	0,14	1,0	0,01	16,1	0,03	4,2
6		12,5	0,36	0,20	1,0	0,02	16,1	0,04	4,2
7	90	5	0,183	0,11	0,9	0,01	13,7	0,02	3,8
8		8	0,294	0,18	0,9	0,02	13,7	0,04	3,8
9		10	0,367	0,22	0,9	0,02	13,7	0,04	3,8
10	100	12	0,542	0,35	0,9	0,03	12,2	0,07	3,4

\*- Erro estatístico

Tabela 3 – Parâmetros das técnicas radiográficas simuladas com filtração total de 5 mmAl no CalDose X.

Número da técnica radiográfica	Tensão (kV)	Carga aplicada ao tubo de raios X (mA.s)	Kerma no ar (mGy)	Pulmões (mGy)	E* (%)	Tireoide (mGy)	E* (%)	Estômago (mGy)	E* (%)
1	80	5,6	0,128	0,05	0,23	0,03	2,45	0,01	1,35
2		6,3	0,144	0,05	0,23	0,03	2,45	0,01	1,35
3		7,1	0,163	0,06	0,23	0,03	2,45	0,01	1,35
4	90	5	0,149	0,06	0,22	0,04	2,3	0,02	1,27
5		5,6	0,167	0,07	0,22	0,04	2,3	0,02	1,27
6		6,3	0,188	0,08	0,22	0,05	2,3	0,02	1,27
7		7,1	0,212	0,09	0,22	0,05	2,3	0,02	1,27
8		8	0,238	0,10	0,22	0,06	2,3	0,03	1,27
9	100	9	0,336	0,16	0,22	0,09	2,23	0,04	1,21
10		10	0,374	0,17	0,22	0,10	2,23	0,05	1,21

\*- Erro estatístico

Tabela 4 – Parâmetros das técnicas radiográficas simuladas com filtração total de 5 mmAl no PCXMC.

Número da técnica radiográfica	Tensão (kV)	Carga aplicada ao tubo de raios X (mA.s)	Kerma no ar (mGy)	Pulmões (mGy)	E* (%)	Tireoide (mGy)	E* (%)	Estômago (mGy)	E* (%)
1	80	5,6	0,128	0,08	1,0	0,01	16,1	0,01	4,1
2		6,3	0,144	0,09	1,0	0,01	16,1	0,02	4,1
3		7,1	0,163	0,10	1,0	0,01	16,1	0,02	4,1
4	90	5	0,149	0,10	0,09	0,01	13,7	0,02	3,7
5		5,6	0,167	0,11	0,09	0,01	13,7	0,02	3,7
6		6,3	0,188	0,12	0,09	0,01	13,7	0,02	3,7
7		7,1	0,212	0,14	0,09	0,01	13,7	0,02	3,7
8		8	0,238	0,15	0,09	0,01	13,7	0,02	3,7
9	100	9	0,336	0,23	0,09	0,02	12,1	0,05	3,4
10		10	0,374	0,26	0,09	0,03	12,1	0,06	3,4

\*- Erro estatístico

Os valores de dose absorvidas foram encontradas entre 0,05 a 0,23 mGy, 0,03 a 0,14 mGy, 0,01 a 0,06 mGy, nos pulmões, tireoide e estômago para filtração total de 4 mm Al e 0,05 a 0,17 mGy, 0,03 a 0,10 mGy, 0,01 a 0,05 mGy, nos pulmões, tireoide e estômago para filtração total de 5 mm Al para o CalDose X. Para as doses absorvidas no PCXMC foram encontrados valores de 0,09 a 0,35 mGy, 0,01 a 0,03 mGy, 0,02 a 0,07 mGy, nos pulmões, tireoide e estômago para filtração total de 4 mm Al e 0,08 a 0,26 mGy, 0,01 a 0,03 mGy, 0,01 a 0,06 mGy, nos pulmões, tireoide e estômago para filtração total de 5 mm Al.

Nas tabelas 2 e 4 são observados os valores de erro estatístico maiores para o órgão tireoide do PCXMC devido às incertezas das medições, nesse órgão, por estar fora do campo de irradiação primário, no entanto, os valores tendem a diminuir a medida que os valores de kV aumentam.



De forma à comparar os resultados das doses absorvidas, entre os programas computacionais, foram produzidos os resultados divididos por órgãos como mostrado nas figuras 5 e 6.

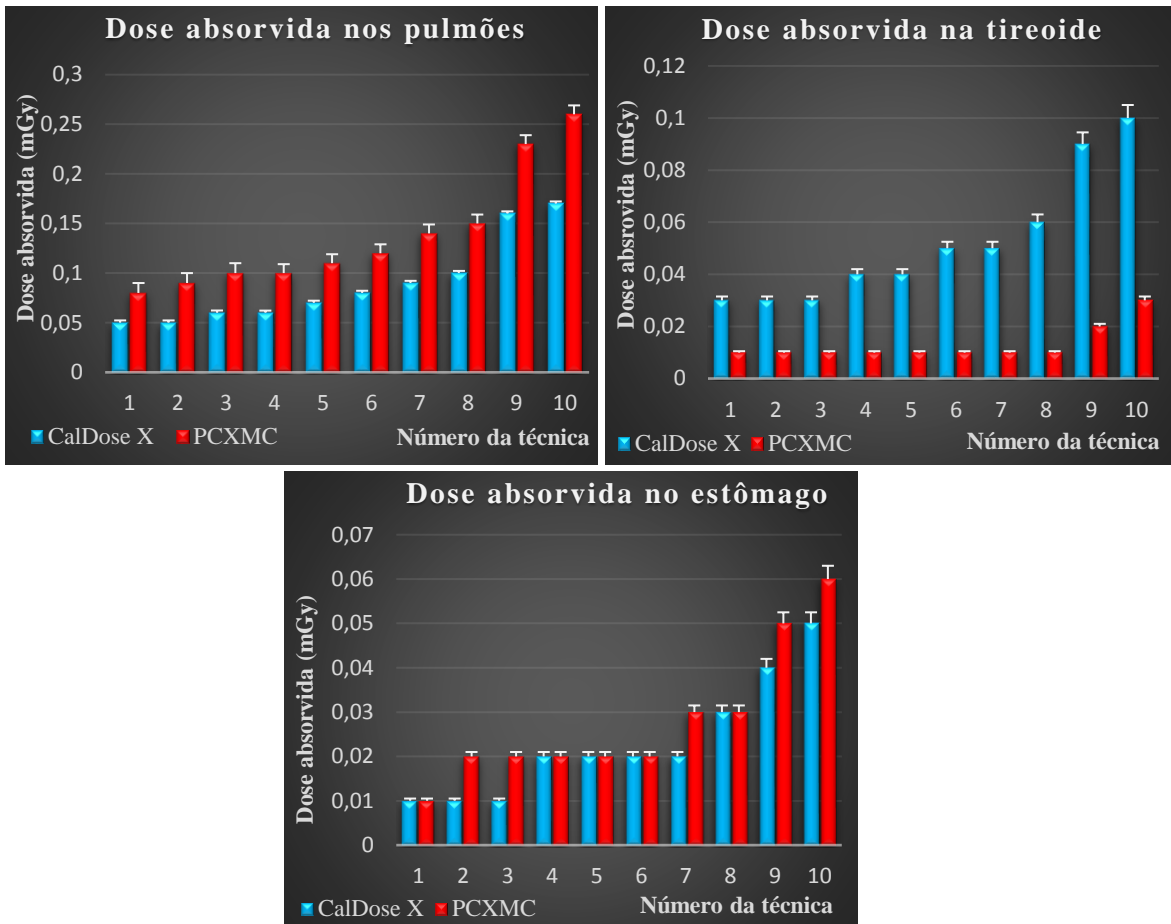


Figura 5 – Dose absorvida nos órgãos pulmões, tireoide e estômago simuladas no CalDose X e PCXMC para filtração total de 4 mmAl.

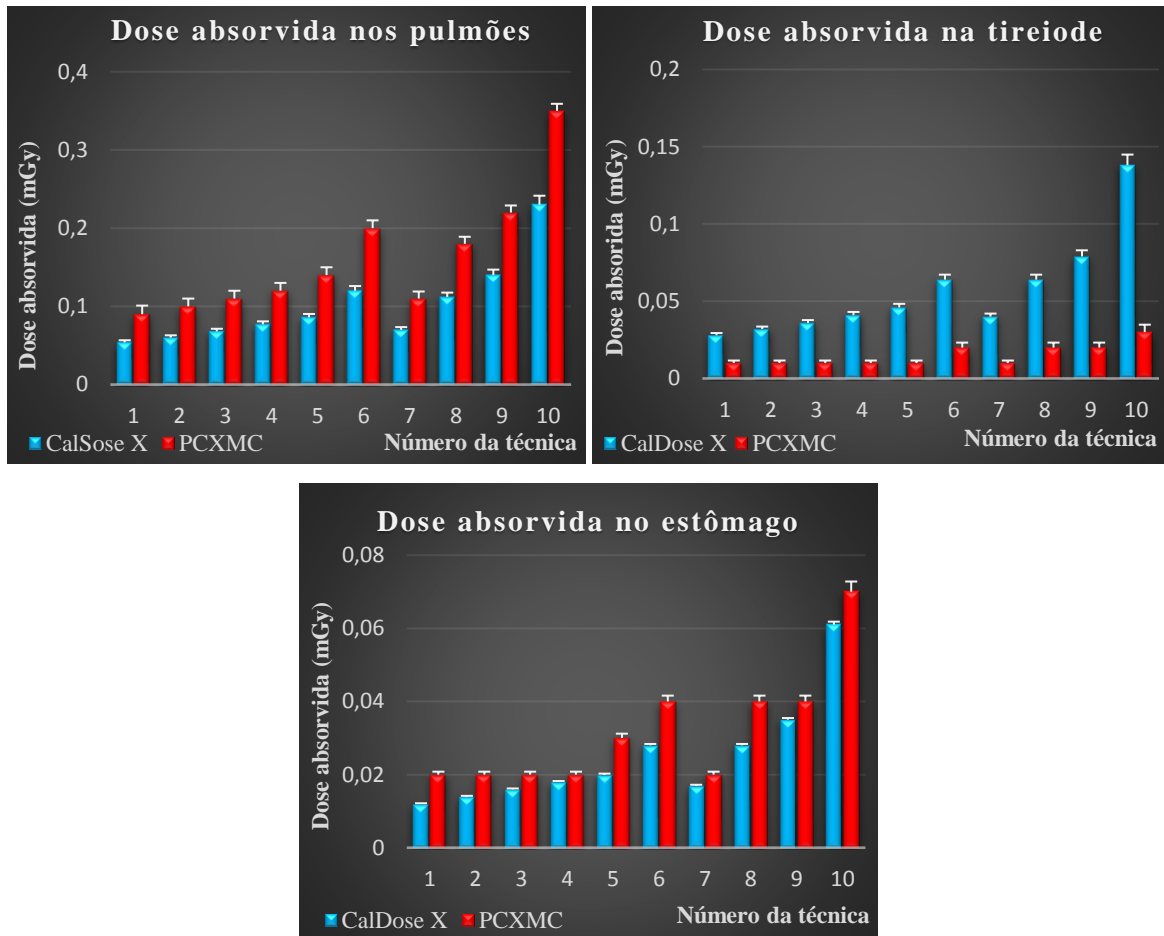


Figura 6 – Dose absorvida nos órgãos pulmões, tireoide e estômago simuladas no CalDose X e PCXMC para filtração total de 5 mmAl.

Foi encontrado variações de doses de até 80% e 100% maior no PCXMC, para pulmões e estômago, em relação ao CalDose X e de até 450% maior no CalDose X, para a tireóide, em relação ao PCXMC.

Ao utilizar o valor da carga aplicada ao tubo de raios X (mA.s) associado aos outros parâmetros que compõe as técnicas radiográficas simuladas, o programa CalDose X, gera o valor de kerma no ar (INAK) baseado em sua curva de rendimento, no entanto, ao introduzir o mesmo valor de kerma no ar no programa PCXMC, esse gera, baseado em sua curva própria de rendimento, valores diferentes da carga aplicada ao tubo de raios X. Nesse intuito, foi estudado a relação da razão entre os mA.s gerados, como indicado na tabela 5.

Tabela 5 – Estudo da razão entre os mA.s dos programas com filtração total de 4 e 5 mm Al.

Filtração total de 4 mm Al				Filtração total de 5 mm Al			
Tensão (kV)	mA.s utilizada para simulações (mA.s) <sup>A</sup>	mA.s associada ao kerma no ar gerado no PCXMC (mA.s) <sup>B</sup>	Razão (B/A)	Tensão (kV)	mA.s utilizada para simulações (mA.s) <sup>A</sup>	mA.s associada ao kerma no ar gerado no PCXMC (mA.s) <sup>B</sup>	Razão (B/A)
80	5,6	10,7	1,9	80	5,6	10,7	1,9
	6,3	12,0	1,9		6,3	12	1,9
	7,1	13,5	1,9		7,1	13,6	1,9
	8	15,3	1,9	90	5	9,4	1,9
	9	17,2	1,9		5,6	10,5	1,9
	12,5	23,9	1,9		6,3	11,8	1,9
90	5	9,3	1,9	100	7,1	13,3	1,9
	8	15	1,9		8	15	1,9
	10	18,7	1,9		9	16,5	1,8
100	12	22	1,8	100	10	18,4	1,8

\* - A – mA.s do CalDose X; B – mA.s do PCXMC.

Foram encontrados valores de razão entre o PCXMC e o CalDose X de 1,8 e 1,9 para as filtrações totais de 4 e 5 mm Al.

#### 4. CONCLUSÕES

O estudo, para as doses absorvidas entre os programas, apresenta variações significativas. As divergências podem ser explicadas pelo uso dos diferentes simuladores e a curva de rendimento utilizada em cada programa.

Em associação à diferença dos simuladores e o tamanho de campo no simulador é observado que a tireoide do CalDose X está inserida dentro do campo irradiado, que nessa versão esse parâmetro não pode ser deslocado, e para o PCXMC a tireoide está fora do campo irradiado indicando que as doses, nesses órgãos, justificam ser maiores no CalDose X. No PCXMC, é permitido o deslocamento e alteração do tamanho de campo, retirando um órgão sem finalidade diagnóstica.

O tamanho do órgão estômago, no CalDose X se mostra superior ao do PCXMC e por essa razão a dose encontrada foi menor como preconiza o conceito e definição de dose absorvida.

As doses absorvidas, nos pulmões, foram encontradas com diferenças significativas as quais podem ser explicadas pela divergência dos simuladores em relação a massa desses órgãos.

Pelo fato dos valores da carga aplicada ao tubo de raios X serem consideravelmente diferentes, sugerem-se que os desenvolvimentos e uso das curvas de rendimentos são próprias de cada programa, no entanto, elas guardam uma similaridade uma da outra e nos dois casos, os dados de composição desse item, não são fornecidos.

Os valores das doses absorvidas mesmo tendo valores estatisticamente próximos demonstram que os programas geram outros procedimentos para compor seus resultados. Como indicado na tela de resultados do CalDose X é utilizado o valor médio para a energia do espectro ao passo que o PCXMC utiliza toda a integração do espectro de energia, retomando a indicação de que para compor os resultados os parâmetros radiográficos são utilizados de forma diferente entre os programas.

Mesmo o programa computacional CalDose X *on line* apresentando limitações de composição dos parâmetros radiográficos, ele se mostra uma ferramenta prática, acessível e sem custo sendo de aplicação na área de pesquisa e de treinamentos. No PCXMC, sua forma ampla de ajuste dos parâmetros que compõe as técnicas radiográficas tornando um programa flexível que justifica seu custo.

Os programas computacionais se mostraram como uma ferramenta importante para o estudo de dose absorvida e como os parâmetros das técnicas radiográficas podem ser otimizadas em função de sua composição, além disso, esses programas são úteis para aprimoramento e treinamento de equipes do setor de raios X de forma ágil.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Centro Mineiro de Treinamento Ocupacional (CEMTRO) por disponibilizar o uso do programa PCXMC.

Os autores agradecem ao grupo SER/UNIVERITAS-BH pelo apoio educacional.

## **REFERÊNCIAS**

- ABRANTES, M. E. S., YORIYAZ, H., OLIVEIRA, A. H. Comparação entre os resultados de dose absorvida em órgãos pelos programas computacionais MCNP 4C, CALDose X e PCXMC nos pacientes submetidos a exames de radiologia diagnóstica. INAC 2011. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR – ABEN. ISBN: 978-85-99141-04-5. 2011.
- CASSOLA, V. F., de MELO LIMA V. J., KRAMER, R. and KHOURY, H. J. FASH and MASH: Female and Male Adult human phantoms based on polygon meSH surfaces. Part I: Development of the anatomy Phys Med Biol 55 133-162. 2010.
- Cristy M. Mathematical phantoms representing children of various ages for use in estimates of internal dose, NUREG/CR-1159, ORNL/NUREG/TM-367. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory; 1980.
- Cristy M, Eckerman KF. Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources. I. Methods. Report ORNL/TM-8381/V1. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory; 1987.título dos artigos citados (opcional);
- IAEA. International Atomic Agency, Radiological Protection for Medical Exposure to ionizing Radiation, Safety Standards. Series n. RS-G-1.5, 2002.

- ICRP - International Commission on Radiological Protection. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89 (Oxford: Pergamon Press), 2003.
- ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Annals ICRP 37 (2-4), 2007a.
- Kramer, H. J. Khoury and J. W.Vieira, CALDose X—a software tool for the assessment of organ and tissue absorbed doses, effective dose and cancer risks in diagnostic radiology, Received 30 June 2008, in final form 29 September 2008 Published 21 October 2008. Online at [stacks.iop.org/PMB/53/6437](http://stacks.iop.org/PMB/53/6437). Último acesso: 17/07/2020. [www.caldose.org](http://www.caldose.org).
- STUK-A231 - Tapiovaara M, Siiskonen T. PCXMC, A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. Helsinki, 2008.