

Análise quantitativa dos resultados de testes de controle de qualidade em aceleradores lineares usados em radioterapia

Quantitative analysis of results of quality control tests in linear accelerators used in radiotherapy

Bruno M. Pássaro¹, Heber S. Videira² e Laura N. Rodrigues^{1,3}

¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – São Paulo (SP), Brasil.

²Cyclopet radiofármacos Ltda. – Curitiba (PR), Brasil.

³Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), Brasil.

Resumo

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar e analisar a estabilidade do fator de calibração de três aceleradores lineares, bem como os demais parâmetros dosimétricos normalmente incluídos em um programa de controle de qualidade em radioterapia. A média dos fatores de calibração dos aceleradores para o período de aproximadamente quatro anos para os Clinacs 600C e 6EX foram $(0,998 \pm 0,012)$ e $(0,996 \pm 0,014)$, respectivamente. Para o Clinac 2100CD de 6 MV e 15 MV foi $(1,008 \pm 0,009)$ e $(1,006 \pm 0,010)$, respectivamente, em um período de aproximadamente quatro anos. Os dados dos fatores de calibração foram separados em quatro subgrupos para uma análise mais detalhada do comportamento ao longo dos anos. Através da estatística dos fatores de calibração, verificou-se que para os Clinacs 600C e 2100CD, é esperada uma probabilidade de que em mais de 90% dos casos os valores estejam dentro dos limites aceitáveis segundo o TG-142, enquanto que para o Clinac 6EX é esperado em torno de 85% uma vez que esse acelerador apresentou diversas trocas de componentes. Os valores do $TPR_{20,10}$ dos três aceleradores são praticamente constantes e dentro dos limites aceitáveis segundo o TG-142. Pode-se concluir que um estudo detalhado dos dados do fator de calibração dos aceleradores e do $TPR_{20,10}$, a partir de um ponto de vista quantitativo, é extremamente útil em um programa de garantia de qualidade.

Palavras-chave: controle de qualidade, radioterapia, calibração.

Abstract

The aim of this study is to assess and analyze the stability of the calibration factor of three linear accelerators, as well as the other dosimetric parameters normally included in a program of quality control in radiotherapy. The average calibration factors of the accelerators for the period of approximately four years for the Clinac 600C and Clinac 6EX were (0.998 ± 0.012) and (0.996 ± 0.014) , respectively. For the Clinac 2100CD 6 MV and 15 MV was (1.008 ± 0.009) and (1.006 ± 0.010) , respectively, in a period of approximately four years. The data of the calibration factors were divided into four subgroups for a more detailed analysis of behavior over the years. Through statistical analysis of calibration factors, we found that for the 600C and Clinacs 2100CD, is an expected probability that more than 90% of cases the values are within acceptable ranges according to TG-142, while for the Clinac 6EX is expected around 85% since this had several exchanges of accelerator components. The values of $TPR_{20,10}$ of three accelerators are practically constant and within acceptable limits according to the TG-142. It can be concluded that a detailed study of data from the calibration factor of the accelerators and $TPR_{20,10}$ from a quantitative point of view, is extremely useful in a quality assurance program.

Keywords: quality control, radiotherapy, calibration.

Introdução

A Radioterapia é amplamente utilizada no tratamento do câncer, seja como uma modalidade simples ou em combinação com outros tratamentos, tais como a cirurgia e a quimioterapia. O objetivo da radioterapia consiste na erradicação das células tumorais por meio da radiação ionizante. Como o dano da radiação não é

restrito somente às células tumorais, mas afeta também as células normais, é essencial que a dose liberada nos tecidos sadios seja tão baixa possível para minimizar o risco de efeitos colaterais do tratamento radioterapêutico¹. Portanto, uma abordagem sistemática para a garantia da qualidade de todo processo na radioterapia é essencial, pois é o método mais sensível e eficaz de reduzir acidentes na radioterapia^{1,2}.

Autor correspondente: Bruno Martins Pássaro – Setor de Radioterapia do Instituto de Radiologia do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo – Avenida Dr. Enéas de Carvalho Aguiar, 255 – 3º andar – Cerqueira César – CEP: 05403-900 – São Paulo (SP), Brasil – E-mail: bruno.passar@gmail.com

Após um acelerador linear ser aceito e comissionado, deve-se estabelecer os dados que serão utilizados como referência para os programas de controle de qualidade subsequentes². Estes dados serão utilizados a fim de analisar o desempenho do acelerador a curto, médio e longo prazo. O objetivo de um programa de controle de qualidade é verificar o comportamento do desempenho dos aceleradores lineares com relação às respectivas tolerâncias³.

Os parâmetros do acelerador linear podem desviar-se de seus valores iniciais, como resultado de inúmeras razões: pode haver mudanças inesperadas no fator de calibração do acelerador, devido à avaria do acelerador; quebra mecânica; ou falha de componentes. A substituição de componentes principais (guia de ondas, *bending magnet*, etc.) também pode alterar o fator de calibração do acelerador a partir dos parâmetros obtidos no comissionamento. Além disso, pode haver mudanças graduais, como resultado do envelhecimento dos componentes do acelerador. Estes padrões de falha devem ser considerados quando se estabelece um programa de controle de qualidade periódico^{4,5}.

Material e Métodos

Para a realização do presente trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos disponíveis no Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo:

Três Aceleradores Lineares para feixes de fótons de alta energia, sendo eles:

- Clinac 600C;
- Clinac 6EX (6MV);
- Clinac 2100CD (6MV e 15MV).

Em termos de equipamentos dosimétricos, foram empregados:

- sete conjuntos dosimétricos, constituídos por 4 câmaras de ionização (volume sensível de 0,6 cm³) e 3 eletrômetros.

Três objetos simuladores, sendo eles:

- um sistema de varredura automática 3D;
- dois objetos simuladores de água, um com dimensões de 30x30x30 cm³ e outro com dimensões de 20x20x15 cm³.

Segundo as recomendações dos protocolos nacionais, realizou-se a comprovação de todos os conjuntos dosimétricos utilizados, a fim de assegurar que estes mantinham os seus respectivos fatores de calibração. Os testes foram realizados trimestralmente utilizando uma fonte de referência de ⁹⁰Sr.

A maior parte da análise do estudo em questão foi realizado com o conjunto dosimétrico câmara de ionização Victoreen 580 e eletrômetro PTW para os aceleradores Clinac 600C e Clinac 2100CD, enquanto que para o acelerador Clinac 6EX o conjunto dosimétrico de

maior análise foi para a câmara Scanditronix FC 65 e eletrômetro Dose 1.

Nos casos em que os valores obtidos com os tais conjuntos não apresentavam conformidades com as dosimetrias anteriores, outros conjuntos dosimétricos eram utilizados a fim de corroborar os valores e/ou confirmar se o fator de calibração do acelerador linear em questão sofreu alguma mudança em seu comportamento.

O período de análise dos dados dos testes de controle de qualidade foi aproximadamente de quatro anos. Esse período levou em consideração os seguintes fatos: sabe-se que uma grande quantidade de medidas proporciona uma análise estatística com um maior grau de confiabilidade nos resultados. Ao adotar-se um longo período, se está analisando o comportamento dos fatores em um longo prazo e verificando possíveis necessidades nos níveis de ação ou, até mesmo, a substituição de componentes principais.

A Figura 1 ilustra a metodologia empregada para o cálculo da dose absorvida na água.

Nessas configurações, foram realizadas cinco leituras no conjunto dosimétrico e, em seguida, tirou-se a média dessas leituras e multiplicou-se pelos fatores de correções (pressão e temperatura, recombinação de íons e efeito polaridade) da câmara de ionização. O resultado obtido foi dividido devidamente pela porcentagem de dose profunda (PDP) na profundidade de 10 cm a fim de se obter o fator rendimento na profundidade de dose máxima.

As incertezas do fator de calibração dos aceleradores em questão foram obtidas através do desvio padrão das cinco leituras realizadas com os conjuntos dosimétricos.

Através de um comando do *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) permitiu-se agrupar os dados do fator de calibração quanto a sua porcentagem

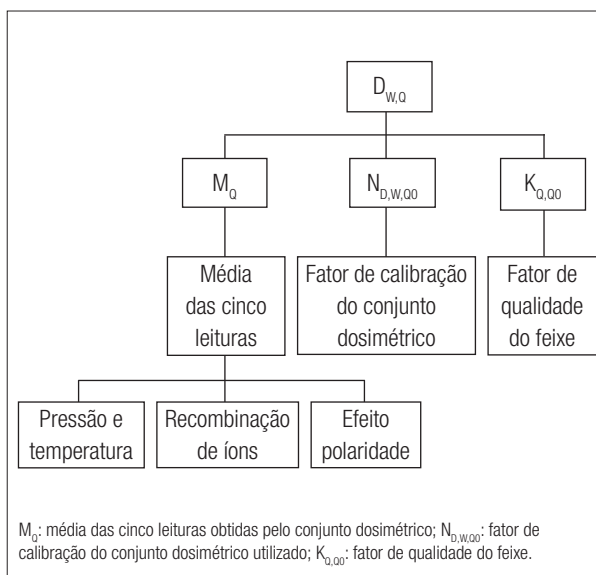


Figura 1. Procedimento dosimétrico para o cálculo do fator de calibração.

e sua frequência em quatro sub-grupos, sendo eles: os valores abaixo de -2% em relação ao comissionamento; os valores entre -2% e o centróide (valor que corresponde a zero de variação); os valores entre o centróide e +2%; e por fim, os valores acima de +2% em relação ao comissionamento.

Outro parâmetro que foi investigado neste trabalho foi o índice de qualidade dos três aceleradores, geralmente realizado quinzenalmente utilizando, em sua grande maioria, os conjuntos dosimétricos descritos anteriormente para cada acelerador. Apenas durante as manutenções preventivas dos aceleradores ou quando houve a necessidade da troca de algum componente foi utilizado o sistema de varredura 3D. Para fótons de alta energia produzidos por aceleradores clínicos, o fator de qualidade Q é determinado pela razão tecido-phantom, $TPR_{20,10}$.

O $TPR_{20,10}$ é definido como a razão das doses absorvida na água no eixo central do feixe nas profundidades de 20 e 10 cm em um objeto simulador de água, obtida com uma distância fonte-detector constante (DFD) de 100 cm e em um tamanho de campo 10 x 10 cm na posição do detector⁶.

Devido à complexidade no esquema dessa medida, o índice da qualidade do feixe foi obtido através da aproximação existente na literatura da PDP em $TPR_{20,10}$ segundo a equação (1):

$$TPR_{20,10} = 1,2661PDP_{20,10} - 0,0595 \quad (1)$$

onde $PDP_{20,10}$ é a razão da porcentagem de dose profunda nas profundidades de 20 e 10 cm respectivamente⁶.

Outra alternativa utilizada para medir a qualidade do feixe foi através da $D_{10,5}$ (razão das doses nas profundidades de 10 e 5 cm) obtida no objeto simulador de 20x20x15 cm³. Este objeto simulador oferece a vantagem de ser prático e versátil, sendo assim bastante útil em um programa de garantia da qualidade.

Para a avaliação da incerteza⁷ da medida do TPR foi utilizada o cálculo de propagação de erros segundo a equação (2):

$$Incerteza = \sqrt{\left(\frac{dA}{A}\right)^2 + \left(\frac{dB}{B}\right)^2} * \frac{A}{B} \quad (2)$$

onde dA é o desvio padrão das leituras obtidas na profundidade de 20 cm e A é a dose nessa mesma profundidade; dB é o desvio padrão das leituras na profundidade de 10 cm e B é a dose nessa profundidade.

Análises e Resultados

Para uma análise mais qualitativa do comportamento do fator de calibração dos três aceleradores lineares, os dados obtidos durante a dosimetria foram plotados em diagramas de dispersão. A Figura 2 referente ao Clinac 6EX ilustra um desses diagramas.

Esta figura mostra o comportamento do fator de calibração do acelerador linear em função do tempo. A calibração do feixe em termos de valores absolutos de dose absorvida é demonstrada como dose por unidade monitora e deve ser igual a 1,00. Os limites de aceitação adotados na análise deste parâmetro são de $\pm 2\%$ e são demonstrados através das linhas pontilhadas.

Na Figura 2 percebe-se que algumas das barras de erros estão maiores quando comparadas com as demais. Essas diferenças aconteceram devido às oscilações nas cinco leituras obtidas por um determinado conjunto dosimétrico, ocasionando, assim, um desvio padrão maior do que as medidas em que as leituras se comportaram mais constantes.

Ainda como mostra a Figura 2, durante o período de análise, houve uma troca da câmara de ionização do acelerador uma vez que os valores obtidos apresentavam

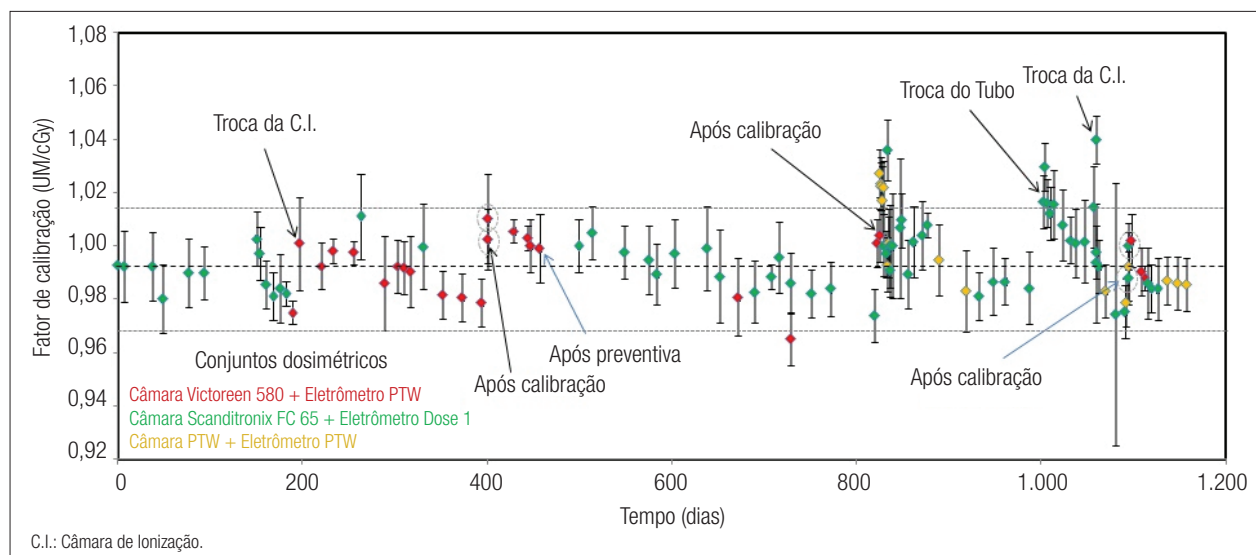


Figura 2. Dosimetrias absolutas do Clinac 6EX a curto, médio e longo prazo.

uma tendência decrescente em dosimetrias realizadas diariamente. Após a troca da câmara de ionização do acelerador, o fator de calibração ainda apresentou algumas oscilações dentro dos limites aceitáveis. Porém, com alguns valores obtidos próximos ao limite inferior de -2% em relação ao valor do comissionamento, foi realizada uma primeira re-calibração para restabelecer a conformidade. Conseqüentemente, verificou-se que o fator de calibração continuou apresentando uma tendência decrescente ao longo do tempo e uma segunda re-calibração foi realizada. Após essa segunda calibração, as dosimetrias passaram a ser realizadas diariamente a fim de acompanhar o comportamento do fator de calibração em um curto intervalo de tempo. Para a confirmação dos resultados obtidos durante os testes, os conjuntos dosimétricos do hospital foram sendo intercalados durante os dias e seus valores

Tabela 1. Análise quantitativa dos subgrupos dos fatores de calibração.

| Fator de calibração | Clinac 600C | Clinac 2100CD* | Clinac 2100CD** | Clinac 6EX |
|-------------------------------|-------------|----------------|-----------------|------------|
| Inferior ao limite de -2% | 4,27% | 0,81% | 0,82% | 0,93% |
| Limite inferior e o centroide | 51,29% | 52,03% | 56,56% | 46,74% |
| Centroide e o limite superior | 33,33% | 44,72% | 36,88% | 41,12% |
| Superior ao limite de +2% | 11,11% | 2,44% | 5,74% | 11,21% |

*Energia de 6 MV; **energia de 15 MV.

confrontados entre si, com a finalidade de excluir qualquer possibilidade dos conjuntos estarem descalibrados.

Com os valores obtidos, foi necessária a substituição do tubo do acelerador, seguida de uma nova troca das câmaras de ionização do acelerador e de uma terceira re-calibração. Depois de realizada essas três etapas, o fator de calibração passou a se mostrar mais constante.

Uma análise mais quantitativa dos dados dos fatores de calibração para os três aceleradores pode ser verificada pela Tabela 1.

Para o Clinac 600C, 4 dos 5 dados obtidos abaixo dos limites foram obtidos sucessivamente e foram tomadas as devidas ações corretivas; 12 dos 13 dados obtidos acima dos limites foram obtidos sucessivamente logo após o acelerador ter sido religado após uma reforma no hospital.

Para o Clinac 2100CD em ambas as energias, o único dado obtido abaixo dos limites pode ser atribuído a uma pequena variação de um determinado conjunto dosimétrico, uma vez que foram realizadas dosimetrias diárias após a obtenção desse dado e todas apresentaram valores dentro dos limites aceitáveis.

Para o Clinac 6EX, 6 dos 12 valores obtidos acima do limite de +2% foram antes da troca do tubo do acelerador, quatro logo após a troca do tubo e os últimos dois logo após a segunda troca da câmara de ionização.

Pela Figura 3 percebe-se a semelhança entre os dados do fator de calibração e uma predominância dos mesmos entre o limite inferior (2%) e o centroide.

Com os resultados obtidos no controle de qualidade do fator de calibração, uma análise quantitativa foi realizada através de alguns parâmetros, tais como a média dos

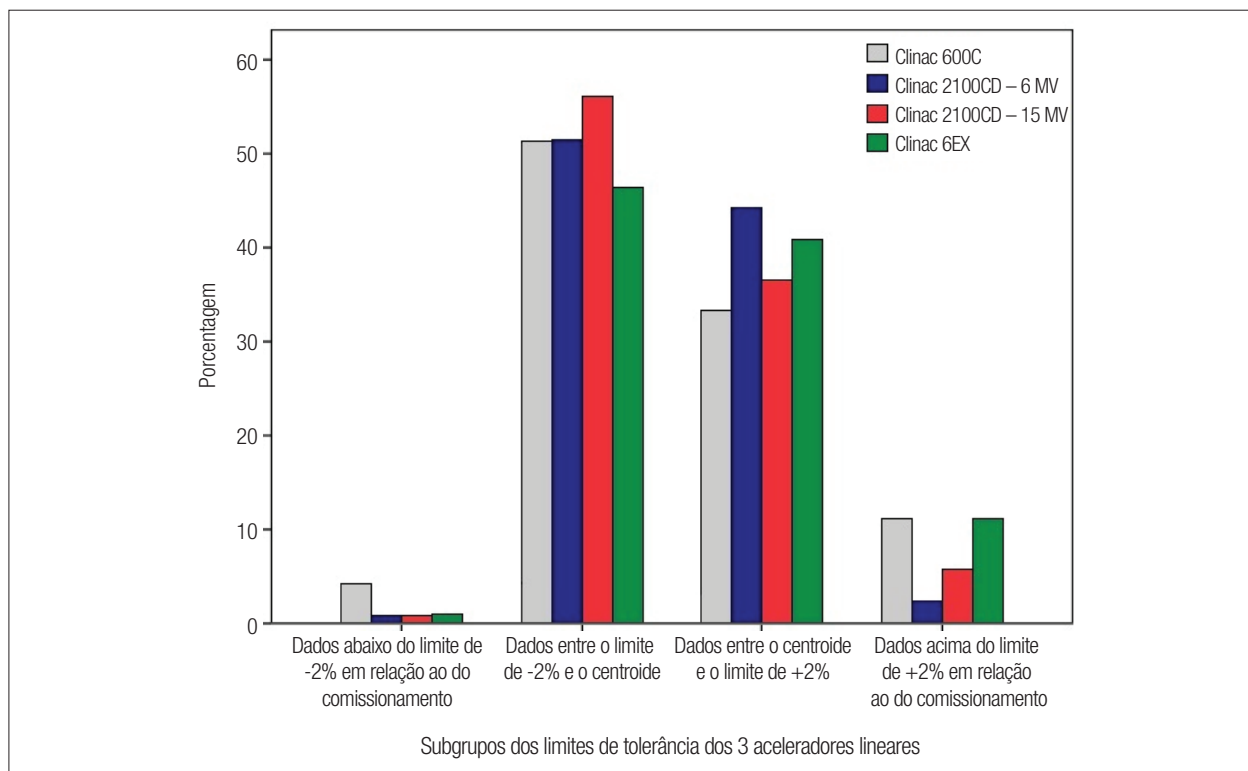


Figura 3. Análise quantitativa dos resultados dos subgrupos dos fatores de calibração para os três aceleradores lineares.

fatores de calibração, seus respectivos desvios-padrões e os limites de $\pm 2\%$ em relação ao valor do comissionamento. Com esses valores em mãos, pode-se estimar qual a probabilidade de se obter o fator de calibração dentro dos limites segundo o TG-142 para os três aceleradores. Essa probabilidade foi determinada para o acelerador Clinac 600C conforme a equação (3).

$$P(0,977 \leq X \leq 1,017)$$

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

$$Z = \frac{0,977 - 0,998}{0,012} = -1,85 \rightarrow P(Z \leq -1,85) = 1 - 0,968 = 0,032$$

$$Z = \frac{1,017 - 0,998}{0,012} = 1,58 \rightarrow P(Z \leq 1,58) = 0,943$$

$$P(0,977 \leq X \leq 1,017) = 0,943 - 0,032 = 0,911$$

$$P(0,977 \leq X \leq 1,017) = 91,10\%$$

onde μ é a média dos valores do fator de calibração e σ é o desvio padrão.

A Tabela 2 apresenta o número de medidas N, a média e os desvios padrão dos fatores de calibração e o resultado dessas probabilidades.

Tabela 2. Número de medidas, média e desvio padrão e cálculo de probabilidade dos fatores de calibração dos três aceleradores.

| | n | Média \pm DP | Probabilidade (%) |
|-----------------|-----|-------------------|-------------------|
| Clinac 600C | 117 | 0,998 \pm 0,012 | 91,10 |
| Clinac 2100CD* | 123 | 1,008 \pm 0,009 | 97,80 |
| Clinac 2100CD** | 122 | 1,006 \pm 0,010 | 95,07 |
| Clinac 6EX | 107 | 0,996 \pm 0,014 | 84,33 |

*Energia de 6 MV; **energia de 15 MV
DP: desvio padrão.

Para o Clinac 6EX, o cálculo se mostrou inferior ao demais aceleradores e pode ser justificado por ser o único acelerador dentro do período de análise em que houve troca de componentes principais.

Através dos valores obtidos durante o período de análise, pode-se concluir que os dados do fator de calibração dos aceleradores mostraram-se em sua grande maioria dentro dos limites permissíveis segundo os protocolos internacionais adotados pelo hospital.

Para os índices de qualidade do feixe, pela Figura 4 nota-se que os parâmetros para os três aceleradores lineares na energia de 6MV estão reprodutíveis tanto para o $TPR_{20,10}$ quanto que para o $D_{10/5}$ em um período de aproximadamente 1.600 dias.

Em apenas uma ocasião para o acelerador Clinac 600C houve um resultado em que o $TPR_{20,10}$ se encontrava fora da conformidade que provavelmente foi devido a uma pequena variação de um dos sistemas dosimétricos, uma vez que esse parâmetro foi investigado com medidas posteriores e os valores já se encontravam dentro dos padrões.

Conclusões

Um estudo detalhado do fator de calibração e dos demais parâmetros dosimétricos dos feixes de radiação englobados no controle de qualidade do ponto de vista quantitativo é extremamente útil e fornece uma visão mais detalhada acerca do comportamento desses fatores, permitindo assim reconhecer erros potenciais nas medidas de dose obtidas em condições de referência.

Com a avaliação e análise da estabilidade do fator de calibração dos três aceleradores lineares no Hospital das Clínicas, bem como os demais parâmetros dosimétricos

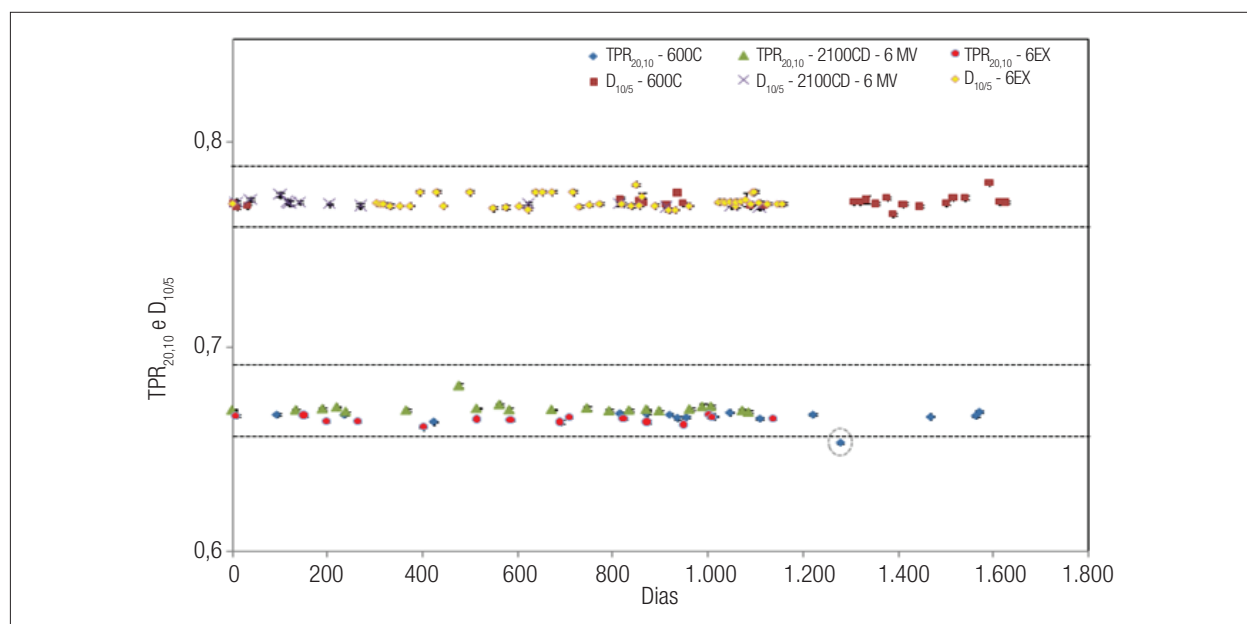


Figura 4. Índice de qualidade do feixe dos três aceleradores investigados neste trabalho para a energia de 6 MV de fótons.

normalmente incluídos em um programa de controle de qualidade em radioterapia, foi possível identificar as eventuais variações acima dos limites permissíveis, com as devidas ações corretivas para restabelecer os parâmetros desejados. Esta análise a curto, médio e longo prazo permitiu a consolidação de todas as ações tomadas para assegurar a estabilidade dos fatores de calibração de uma maneira mais coesa e com a devida segurança, atualmente exigida em todo e qualquer procedimento radioterápico.

Os controles de qualidades realizados em todos os conjuntos dosimétricos devem ser realizados concomitantemente ao controle de qualidade dos aceleradores a fim de assegurar que as possíveis variações encontradas na dosimetria rotineira dos aceleradores não estão sendo influenciadas de alguma forma por um comportamento eventual e anômalo do conjunto de medidas em questão. A realização da dosimetria dos aceleradores com diversos conjuntos dosimétricos foi de fundamental importância na tomada de decisões das ações corretivas adotadas ao longo destes anos.

O estudo mostrou a importância de uma análise criteriosa e sistemática dos resultados obtidos a partir de um programa de Controle de Qualidade (CQ) estabelecido a

fim de prever eventualmente a ocorrência de falhas e/ou anomalias nos aparelhos em questão.

Referências

1. Instituto Nacional do Câncer. TEC-DOC 1151: aspectos físicos da garantia da qualidade em radioterapia. Rio de Janeiro: INCA; 2000.
2. Mayles P, Nahum A, Rosenwald JC. Handbook of radiotherapy physics: theory and practice. Boca Raton: CRC Press; 2007.
3. Kutcher GJ, Coia L, Gillin M, Hanson WF, Leibel S, Morton RJ, et al. Comprehensive QA for radiation oncology: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40 Med Phys. 1994;21(4):581-618.
4. Klein EE, Hanley J, Bayouth J, Yin FF, Simon W, Dresser S, et al. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators. Med Phys. 2009;36(9):4197-211.
5. Podgorsak EB. Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students. Vienna: IAEA; 2005.
6. International Atomic Energy Agency – IAEA. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. Technical Report Series. IAEA-TRS-398. Vienna; 2000.
7. Vuolo JH. Fundamentos da teoria de erros. São Paulo: Edgard Blücher; 1996.