

GARANTIA DA QUALIDADE EM FÍSICA DA
RADIOTERAPIA

Carlos Eduardo de Almeida

Leo Franco
Colaborador

1. INTRODUÇÃO

Conceitualmente um Programa de Garantia da Qualidade (PGQ) deve ser abrangente, partindo de uma definição clara dos objetivos, dos *constraints*, da documentação de todo o processo, de forma a permitir a seleção e o acompanhamento dos parâmetros a serem controlados, sua periodicidade, sua forma de medir, de interpretar, de analisar e de documentar os dados.

Assim, o PGQ define os limites aceitáveis de cada parâmetro e o Programa de Controle da Qualidade (CQ) executa de forma estruturada e periódica as medições para garantir que as premissas pré-estabelecidas e as condições definidas no comissionamento estão de acordo. Cada equipamento emissor de radiação ou de medição tem suas particularidades e limite operacionais, mas o princípio básico que define o programa embora seja o mesmo, os parâmetros e os tipos de medições podem ser similares, porém distintos. de

Almeida e Sibata (1979) ainda na época do cálculo manual, já registrava a importância do “double check” das fichas de planejamento identificando as fontes de erro mais frequentes. Com advento dos computadores esses erros passaram a ser reduzidos, porém, o nível de complexidade dos equipamentos e das técnicas de tratamento cresceram de forma bem rápida, exigindo outros componentes de controle além do simples “double check” das fichas de tratamento como parte do PQG e CQ.

Na verdade, os tipos de erro que podem ocorrer num ambiente clínico envolvem diferentes membros da equipe e diferem no resultado e no impacto ao paciente, por exemplo:

- se o rádio-oncologista comete um erro, normalmente pode afetar um único paciente;
- se o dosimetrista comete um erro, pode afetar um paciente ou a localização do tumor;
- se o tecnólogo comete um erro, pode afetar uma sessão de tratamento;
- entretanto, se o físico comete um erro na calibração, pode afetar muitos pacientes até que seja percebido.

A organização de um programa de Garantia da Qualidade (PQQ) deve envolver a parte clínica porém a responsabilidade legal cabe ao diretor do Departamento de Rádio-oncologia e ao Físico especialista liderar, treinar e conduzir os profissionais envolvidos no PGQ, além de analisar os dados e apresentá-los ao Comitê de Qualidade.

Um programa de QA ou de CQ deve procurar evitar estes erros por meio de auditorias periódicas interna, buscando a sua origem e analisando o processo como um todo. Não se deve analisar a falha em si pois em geral um erro tem sempre como falha algum ponto da cadeia do processo, e muitas vezes algum sinal que foi subestimado ou umaserie de sinais.

Isto tem ocorrido com maior frequência nos equipamentos digitais que possuem alto nível de automação, nos quais os controles e informações são superestimados como se fossem infalíveis, ou quando as sinalizações não são valorizadas.

A concepção dos programas de QA e de CQ associados, se inicia a partir da análise do projeto de cada máquina e das características do equipamento de medição, devendo estar atento para:

- garantir a consistência dos dados de performance diária ao longo do tempo e da manutenção dentro das tolerâncias pré-definidas;
- definir os níveis de ação a partir do não atendimento dos níveis de tolerância;
- identificar os componentes que influenciam a qualidade do feixe, ou seja, a fluência de energia do feixe, sua homogeneidade e sua estabilidade a curto, médio e longo prazo;
- reconhecer os parâmetros externos mais sensíveis a flutuações das grandezas ambientais como temperatura, pressão e umidade, além das flutuações na rede elétrica etc.;
- identificar os componentes que sofrem mais desgastes mecânicos;
- acompanhar os parâmetros que indiquem a expectativa de vida média dos componentes principais;
- avaliar permanentemente se o treinamento da *staff* é adequado ao nível de tecnologia em uso e realizá-lo de forma efetiva e periódica.

2. ACELERADOR LINEAR

Na estrutura do Linac, é importante entender e monitorar o papel de alguns componentes mais críticos como, por exemplo:

- o valor da corrente do filamento que libera elétrons a serem injetados pelo canhão na guia de onda;
- o valor da tensão na Thyatron (válvula eletrônica que, no seu interior, ao invés de usar vácuo como nas válvulas comuns, usa um gás ionizável, como vapor de mercúrio, néon ou xenônio, e estabelece uma alta tensão, sendo, portanto, uma válvula controladora da tensão);

- as possíveis alterações na razão D20/D10, que estão relacionadas a mudanças na qualidade do feixe e podem ser um indicador do mal funcionamento da Klystron (amplificador de potência de micro-ondas que opera pelo princípio de velocidade de modulação para transmissão de sinais em alta frequência e que alimenta o guia de onda de forma a acelerar os elétrons);
- a câmara de transmissão (em geral dupla com quatro quadrantes), selada ou aberta neste caso com conexão ao ambiente, portanto, sensível à temperatura e à pressão ambiente, devem ser controladas pois monitora a taxa de dose;
- a posição mecânica do *flattening filter* (que torna o feixe plano na distância de tratamento);
- a repetitividade do movimento dos (Colimadores Multi Laminas) MLC (que define os campos estáticos e dinâmicos); os motores dos colimadores MLC (que mantêm a distância e a velocidade de deslocamento dos colimadores e sua geometria dinâmica) durante o movimento do *gantry*;
- o espelho que reflete o campo luminoso (e sua correlação com o campo de radiação, pois o campo luminoso projetado é utilizado para definir o campo de radiação na superfície do paciente);
- a simetria dos colimadores multilâminas e seus movimentos lineares livres;
- a estabilidade e o nível da mesa (eventual desgaste devido ao peso de pacientes obesos);
- o isocentro mecânico (importante para a correta entrega da dose, principalmente em campos pequenos);
- a estabilidade do feixe nas condições de tratamento;
- a homogeneidade do campo de radiação (embora seja controlada em parte pela câmara de transmissão);
- a estabilidade da energia média do feixe;
- a consistência do sistema de gestão, por exemplo, Aria (Varian) ou Mosaic (Elekta), quanto à identificação dos pacientes e ao registro das doses diárias.

Dica:

- Deve-se acompanhar o valor da tensão na Thyatron mensalmente; e quando este valor começar a aumentar, é indicativo de que a válvula começa a dar sinais de vida curta. Normalmente, ela tem uma vida média de 2 a 4 anos, dependendo do número de pacientes tratados diariamente.

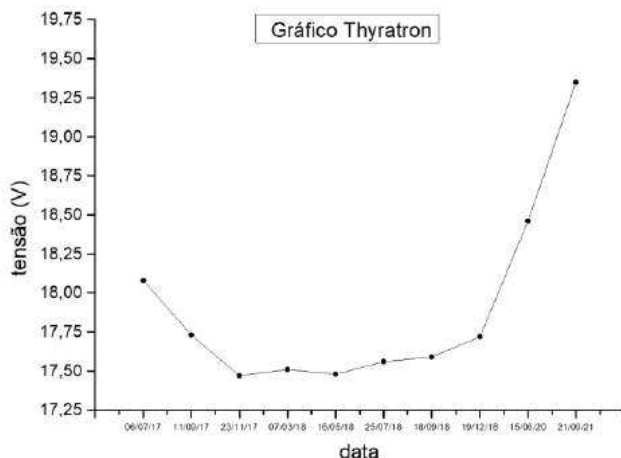


Figura 1 – Evolução do comportamento da vida útil de uma Thyratron para um número 50 pacientes diários.

Fonte: Autores.

Observa-se neste caso uma demanda crescente de aumento de tensão, indicando que a vida útil da Thyratron está terminando.

Dicas:

- Em situação similar a esta, deve-se providenciar a aquisição de outra Thyratron, pois o custo financeiro diário de uma máquina parada pode ser significativo e para o paciente a interrupção do tratamento não é desejável.
- Na Magnetron os sinais de vida curta são difíceis de prever, pois em geral são tardios. Quando começam a dar “sparks”, normalmente não duram muito tempo, talvez apenas mais alguns dias ou poucas semanas.
- Tanto a Thyratron como a Magnetron são válvulas e possuem o que se denomina de “vida de prateleira”. Portanto, ao serem colocadas em funcionamento depois de um certo período sem uso, podem dar um “spark” e parar de funcionar ou funcionar por pouco tempo. Caso tenha uma dessas válvulas de reserva, não fique muito tempo sem usar, coloque em funcionamento pelo menos a cada 6 meses, pois os dados mostram que assim a chance de dar “sparks” logo de início diminui consideravelmente.
- Filamento: provoca queda na taxa de dose e a diminuição consistente de sua corrente pode significar um processo de deterioração. A sua vida média em geral é de 1-5 anos dependendo do número de pacientes pode sendo tratados diariamente.

- Câmara de transmissão: Os testes diários podem indicar uma flutuação excessiva ou reduzida na resposta da câmara de transmissão ou do feixe e precisa ter sua causa identificada. Ajustes no valor da alta tensão aplicada à câmara resolve o problema na maioria das vezes. Sua expectativa de vida é alta e sua troca é rápida, porém seu custo é elevado.
- A corrente do “bending” tem seus valores registrados e tolerâncias bem definidas devem ser observadas nas manutenções periódicas.
- Os motores dos MLC: Deve-se criar um plano “ouro” de tratamento com (Terapia com Intensidade Modulada) IMRT e checar mensalmente com o array sua constância, assim como realizar o teste do “picket fence” e testes recomendados pelo fabricante.

	sem IMRT	com IMRT	SRS/SBRT
Procedimento			
Output diário dos feixes de raios X	3%	3%	3%
Output diário dos feixes de elétrons	3%	NA	NA
Localização do laser	2 mm	1,5 mm	1,0 mm
Indicador de distância	2 mm	2 mm	2 mm
Indicador de tamanho de campo	2 mm	2 mm	1,0 mm
Interlock da porta	funcional	funcional	
Intercomunicação visual e sonora	funcional	funcional	funcional
Interlock estereotático	NA	NA	funcional
Monitor de área	funcional	funcional	funcional
Indicador de feixe ligado	funcional	funcional	funcional

Tabela 1 – Procedimentos e tolerâncias recomendadas dos principais parâmetros a serem verificados diariamente.

Fonte: AAPM (2009).

Dicas:

- A tendência atual é de que os testes mensais e anuais contenham apenas parâmetros que não foram medidos e acumulados nas medições diárias ou que tenham sido parcialmente incorporados ao longo do tempo, otimizando assim o tempo e evitando duplicações desnecessárias.
- Vários dos testes diários podem ser feitos pelo tecnólogo ou pelo dosimetrista, sendo que a análise dos dados deve ser obrigatoriamente feita pelo Físico responsável.
- Os testes mensais podem ser feitos pelos dosimetristas com supervisão direta do Físico responsável.
- Os testes anuais devem ser feitos exclusivamente pelo Físico responsável.

3. BRAQUITERAPIA

A braquiterapia é um procedimento, em geral, invasivo, podendo ser classificada como baixa (LDR), com taxa de dose entre 0,4 e 2 Gy/h, média (MDR), com taxa de dose de 2 a 12 Gy/h, e alta (HDR), com taxas de dose maiores que 12 Gy/h.

A braquiterapia de alta taxa pode usar fontes de ^{192}Ir ou ^{60}Co , ambas emissoras de alta taxa de dose, sendo o tratamento feito de forma remota (ou seja, não há manuseio da fonte). Com as fontes de baixa taxa de dose, como o ^{125}I , por exemplo, o tratamento é feito através de implantes permanentes, com exposições ocupacionais mensuráveis, porém muito baixas.

Um dos objetivos na área de rádio oncologia externa é procurar garantir que a dose prescrita no volume de tratamento seja entregue de forma correta no órgão onde deve ser aplicada, bem como nos tecidos normais em volta, de forma a preservá-los máximo possível. Na braquiterapia, esta situação é muito crítica, pois os gradientes de dose são maiores e o impacto na distribuição espacial da dose pode ser significativo.

É importante que sejam indicadas as grandezas comumente usadas na Braquiterapia:

- Atividade (A): quantidade de material expresso em Curie (Ci) = $3,7 \times 10^{10}$ ou Becquerel (Bq);
- Taxa de dose: para não ser confundido com dose;
- Constante de taxa de exposição ou constante gama Γ : a taxa de exposição por mili curie de qualquer elemento a 1 m de distância;
- Taxa de exposição (X) = ΓA ;
- “*Source strength*”: especificado como a taxa de kerma no ar a uma distância de 1 metro, sendo $1U = 1 \mu\text{Gy}/\text{h}/\text{m}^2$.

Dicas:

- Duas fontes podem ter a mesma Atividade nominal em Ci ou Bq, porém, dependendo do tipo de material usado no seu encapsulamento, a taxa de dose pode ser diferente, visto que a absorção e o espalhamento são diferentes.
- Muita atenção deve-se ter com as grandezas e unidades que são inseridas no TPS. Esta é uma das fontes mais frequentes de erros.

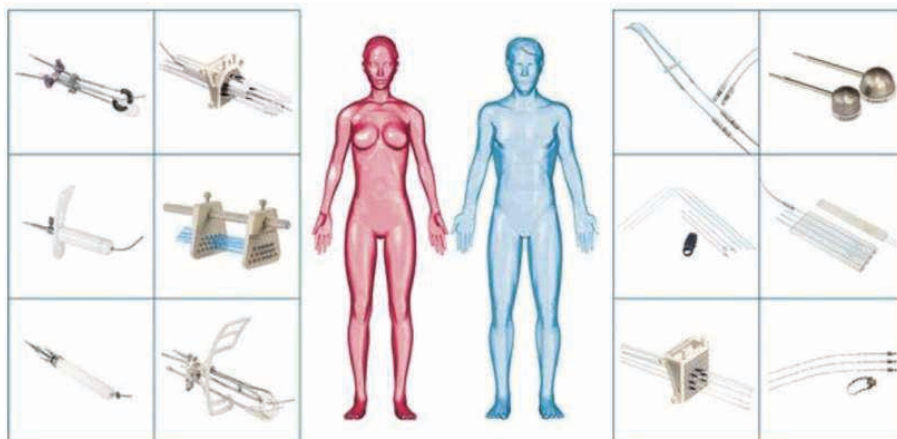


Figura 2 – Tipos de aplicadores que são usados para o tratamento de tumores específicos de homens e mulheres.

Fonte: Elekta (2022).

Atualmente as fontes seladas são inseridas em cateteres de forma remota, chegando até o interior dos aplicadores já posicionados no interior do órgão a ser tratado. Em seguida, imagens são obtidas com um aparelho de raio X, tomógrafo ou MRI, (aplicadores específicos são disponíveis para cada um dos sistemas de imagem) em todos os casos usando uma fonte falsa, e a informação é inserida no sistema de planejamento para definição do volume de tratamento. Como resultado, uma distribuição espacial bem típica pode ser observada, como descrita na Figura 3.

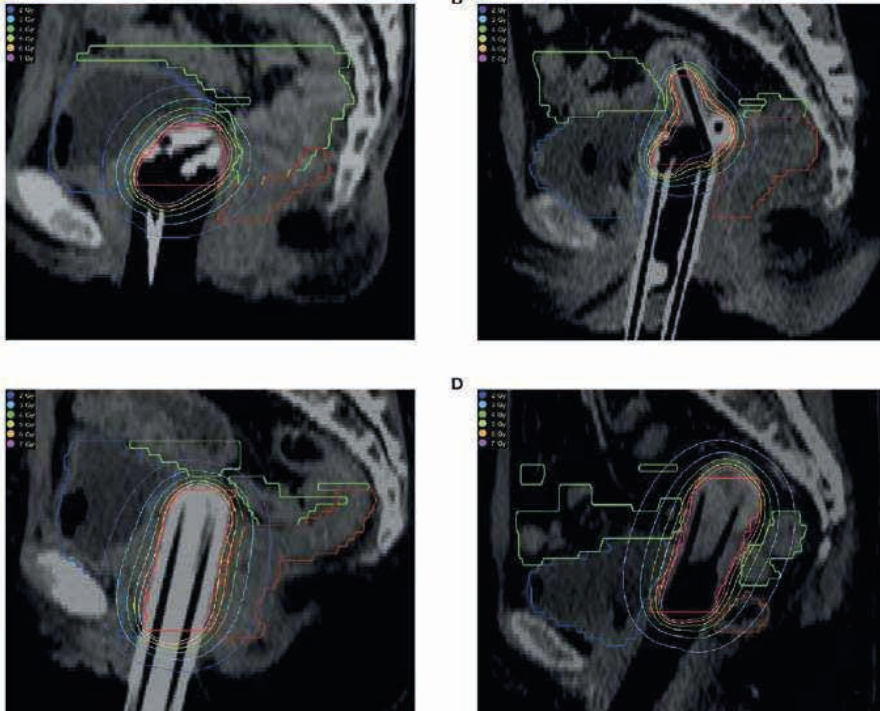


Figura 3 – Exemplo típico de curvas de isodose de quatro aplicadores diferentes usado para o tratamento do câncer de colo de útero. No sentido horário: ovoide duplo, aplicador tipo tandem, aplicador multicanal e tandem com agulhas. As cores indicam as curvas de isodose da órgão: vermelha (CTV), azul (bexiga), marrom (reto) e sigmoide (verde).

Fonte: Elekta (2022).

Como anteriormente afirmado, é importante que a performance do equipamento de tratamento se mantenha constante, respeitando as tolerâncias ao longo da sua vida de uso clínico. Os pacientes são tratados de acordo com as especificações e as medições de sua performance, cujos valores são definidos a partir dos testes quando do aceite e do comissionamento.

O controle da qualidade CQ, previsto no programa de garantia da Qualidade PGQ, deve incluir verificações periódicas de vários parâmetros obtidos durante o comissionamento, tendo como objetivo identificar desvios superiores aos níveis de tolerância preestabelecidos e, caso ultrapassem estes valores, ativar de pronto as ações corretivas.

Dentre os pontos mais importantes que devem ser incorporados e registrados, destacam-se:

- a definição dos parâmetros a serem verificados;
- os testes específicos e suas tolerâncias;
- as ações requeridas quando as tolerâncias são excedidas;
- o equipamento de medição a ser usado e sua confiabilidade;
- a geometria da medição;

- a frequência da medição;
- o membro da staff que deverá realizar o teste;
- o formato da documentação a ser apresentada ao Comitê de Qualidade;
- a documentação relativa ao paciente:
 - a identificação pessoal,
 - as imagens com a posição das fontes e aplicadores,
 - a dose prescrita,
 - a folha de dados do equipamento,
 - o comprimento do cateter usado,
 - os pontos de parada inicial, intervalos e parada final da fonte no cateter,
 - o plano de tratamento provado pelo rádio oncologista,
 - a dose total e por fração, a dose nos órgãos críticos e observância dos “constraints” de dose;
 - a ficha clínica da enfermagem de alta do paciente.

Como resultado, espera-se a execução de programas bem estruturados, com a análise crítica dos dados, a implantação de ações corretivas e uma consciência individual da cultura de segurança possa reduzir consistentemente potenciais incidentes e acidentes, além do enfoque em ações preventivas.

Dicas:

- Quando fontes radioativas são usadas, a determinação da taxa de dose nas condições de referência é muito crítica, pois as doses são depositadas a curta distância e o efeito de gradiente é muito importante.

Isótopo	Meia-vida	Forma física	Aplicações
^{137}Cs	30 anos	Tubos e agulhas	LDR intersticial e intracavitário
^{60}Co	5,26 anos	esferas	HDR intracavitário
^{125}I	60 dias	sementes	LDR intersticial
^{103}Pa	17 dias	sementes	Intersticial
^{198}Au	2,7 dias	sementes	Intersticial
^{90}Sr	28,9 anos	placas	superficial e ocular
^{192}Ir	74,2 dias	sementes	Intracavitária, intraluminal, intersticial, superficial e intravascular

Tabela 2 – Radioisótopos mais usados com suas formas físicas e aplicações.

Fonte: Adaptada de Clifford et al. (2002).

(a) Braquiterapia de alta taxa de dose com fontes de ^{192}Ir ou ^{60}Co

O uso da técnica com HDR, seja com fontes de ^{192}Ir ou ^{60}Co , requer a observância de vários pontos críticos que devem ser considerados e acompanhados periodicamente, sendo alguns deles mencionados na tabela abaixo.

Item	Materiais e métodos	Frequência
Os resultados dos cálculos de doses	Double-check, independentemente dos valores	Cada paciente
Protocolo de tratamento	Os aplicadores devem ser identificados individualmente por causa da sua geometria e blindagem	Cada paciente
DVH	Dose volume histogramas	Quando troca de software
Integridade do software	Testar com casos <i>benchmarks</i> selecionados	A cada 6 meses ou quando houver dúvida
Integridade física dos aplicadores e blindagens	Verificação com imagem de raio X em geometria pré-definida	Inicialmente e a cada 6 meses
Alarmes visuais e sonoros	Visual	Diário
Recolhimento manual da fonte	Com fonte falsa	Semestral
Monitor de área	Visual	Antes do tratamento
<i>Interlock</i> da porta	Visual	Antes do tratamento
Obstrução no cabo	Usar a fonte falsa	Antes do tratamento
Data, relógio e atividade (superimportante). Atenção: ao horário deverão e à atividade da fonte indicada	Double-check visual. Verificar manualmente o valor da atividade usando a equação $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$	Antes do tratamento
Estabilidade do sistema de medição câmara-poço, cabo e eletrômetro	Usar uma fonte de referência ou irradiar num feixe de fótons em condições geométricas bem definidas. Campo de radiação $10 \times 10 \text{ cm}^2$, distância fonte-superfície de 100cm, e número fixo de MU (unidades monitoras)	Trimestral

Tabela 3 – Algumas recomendações consideradas importantes como parte do programa de Garantia da Qualidade.

Fonte: Autores.

Dicas:

- Não trocar de staff (tecnólogos e físicos) sem que seu treinamento esteja atualizado.
- Como a taxa dose é crítica, ela deve ser medição quando do recebimento da fonte e comparada com os dados do fabricante com sistema de medição (câmara de ionização tipo poço) calibrado e rastreado à rede de metrologia.
- Fontes de baixa taxa de dose tipo ^{137}Cs e ^{60}Co se ainda em uso, devem ser testadas semestralmente.
- Verificar para cada paciente se o cateter está livre para a passagem da fonte falsa e da verdadeira.
- O tempo de trânsito (entrada e saída da fonte) deve ser constante e verificado a cada troca de fonte. Sua importância no valor da dose entregue passa a ser ligeiramente mais significativa com o decaimento da fonte.
- A repetibilidade da posição da fonte deve ser confirmada através de imagem com filme.
- O retorno da fonte ao cofre de armazenagem deve ser garantido através do sinal no console de controle enviado pelo monitor do aparelho, porém, na dúvida, deve ser usado um detector portátil.
- Quanto ao funcionamento do monitor da sala, deve-se fazer um “double-check” sobre a retirada da fonte do paciente com um monitor portátil.
- Identificar distorções na qualidade das imagens obtidas que serão inseridas no planejamento.
- Pré-definir os níveis de radiação aceitáveis para os pacientes liberados com fontes de LDR tipo ^{125}I usadas como implantes definitivos.
- Obter a documentação de todo o processo de tratamento de cada paciente.
- Manter o livro de registro de incidentes atualizado.

- Garantir procedimentos escritos e processos bem documentados, como uso da câmera poço, aquisição de imagem, entrada de dados no TPS, cálculo da dose, validação das doses, ficha de tratamento e ficha controle de liberação.
- Manter atualizado o procedimento de emergência caso a fonte fique presa no cateter com a ativação do sistema manual.
- Deve-se destacar mais uma vez que a maior fonte de erros está relacionada ao uso incorreto das unidades da grandeza fornecidas pelo fabricante e sua inserção no TPS, uma vez que a grandeza “source strength” pode ser especificada de formas diferentes.
- É importante também comparar os valores medidos das novas fontes com o histórico da instituição, relativizando para cada atividade nominal.

Para maiores detalhes, ver de Almeida (2011) e de Almeida, Followill e Sibata (2013).

4. SIMULADORES CT

Com mais frequência, os tomógrafos são usados como peça fundamental para os tratamentos modernos, por permitir com detalhes a obtenção das diferentes densidades e a geometria espacial de forma que as heterogeneidades dos tecidos possam ser consideradas no cálculo da dose no volume alvo.

A reconstrução da imagem é feita através da medição da intensidade do feixe transmitida pelo meio e captada pelos detectores diametralmente opostos ao tubo gerador de raios X. Como resultado, a atenuação linear é obtida da seguinte equação:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

Onde:

$I(x)$ = a intensidade do feixe medição após atravessar uma profundidade x

I_0 = a intensidade inicial do feixe na superfície do paciente

μ = o coeficiente de atenuação linear

x = espessura do meio

A variação do coeficiente é representada por uma escala de cinza na imagem, transformada em uma escala adimensional que relaciona o valor da atenuação na água para o mesmo espectro de raios X pela seguinte equação:

$$\text{Valores de CT} = 1000 * \left(\frac{\mu - \mu_{\text{água}}}{\mu_{\text{água}}} \right) \quad (2)$$

Os valores de CT são correlacionados aos valores de atenuação linear relativos ao da água e do ar, sendo adimensionais, dado que consiste numa razão entre dois valores da mesma grandeza e com a mesma unidade, chamada de unidade Hounsfield (HU). Esta denominação homenageia o Físico Geoffrey Hounsfield, agraciado com o Prêmio Nobel pelo desenvolvimento do CT. Devido a variações na fluência de energia gerada por cada tubo do tomógrafo, é importante que cada equipamento tenha sua curva determinada durante o comissionamento e após cada troca de tubo.

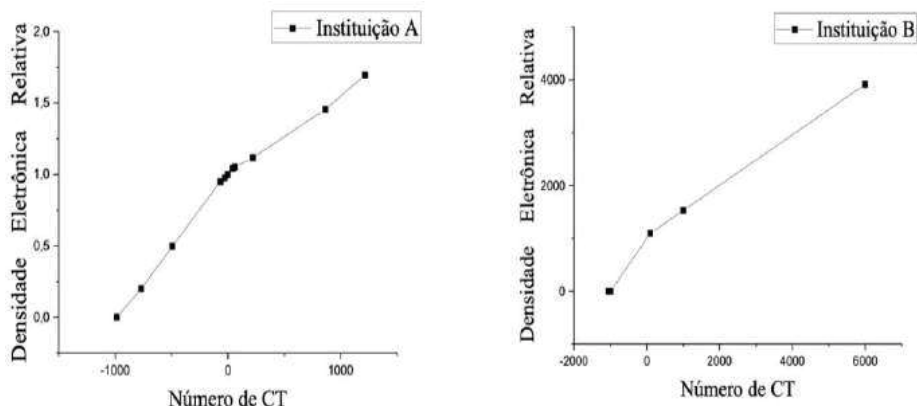


Figura 4 – Curva de calibração típica de dois tomógrafos, onde as curvas de calibração especificadas em unidades de Hounsfield (número de CT versus densidade eletrônica relativa) onde se observa uma variação entre elas.

Fonte: Martins (2021).

Dicas:

- Parâmetros específicos devem ser observados com atenção, tais como:
 - o alinhamento do laser no “gantry” com o centro da imagem;
 - a exatidão dos chamados CT “numbers” com relação à água, ao músculo e ao ruído inerente às imagens;
 - a confiabilidade com a informação espacial nas direções x e y, de forma a se identificar distorções nas imagens;
 - a confiabilidade nos cortes e no formato a ser usado para transferir as imagens para o TPS.

Procedimento	Tolerância
Exatidão do número de CT	+/- 5 HU
Ruído na imagem	Verificar especificações fabricante
Integridade espacial nos eixos X e Y	+/- 1 mm
Alinhamento do laser do <i>gantry</i> com o centro da imagem	+/- 2 mm

Tabela 4 – Recomendação simplificada preliminar para alguns dos testes mais importantes a serem feitos, com as frequências diárias, mensais e anuais..

Fonte: AAPM (2003).

É importante saber se os seus valores de densidade eletrônica, de massa e Densidade Eletrônica Relativa (DER) estão compatíveis com valores típicos publicados antes de introduzir os dados no TPS.

Material Simulado	Densidade em massa (g/cm ³)	Densidade eletrônica (x10 ²³ elétrons/cm ³)	DER (relativo à água)
Pulmão em inspiração	0,205	0,668	0,200
Pulmão em expiração	0,507	1,658	0,496
Tecido adiposo	0,960	3,171	0,949
Mama	0,990	3,261	0,976
Água	1,000	3,340	1,000
Músculo	1,060	3,483	1,043
Fígado	1,070	3,526	1,056
Osso trabecular	1,160	3,730	1,117
Osso cortical	1,530	4,862	1,456
Osso compacto	1,820	5,663	1,696
Titânio	4,510	12,48	3,735

Tabela 5 – São apresentados os valores típicos das densidades obtidas em um tomógrafo usando o fantoma *Electron Density Phantom 062M (2021)* da CIRS (Computerized Imaging Reference Systems Inc. – Norfolk, Virgínia, EUA).

Fonte: Santos (2021).

5. SISTEMAS DE IMAGEM ACOPLADOS AO ACELERADOR

A unidade de detecção e o processador podem fazer parte do *gantry* do acelerador, sendo a imagem capturada, arquivada e armazenada em disco rígido dedicado para uso clínico.

O processador digital substitui as imagens de baixa resolução obtidas com o feixe de alta energia, resultando em imagens de melhor qualidade e cerca de 1 s mais rápidas usando baixas doses. O sistema é formado por um écran fluoroscópico transferindo as imagens para uma câmara projetada por um espelho a 45 graus. A câmara deve ser calibrada diariamente e o detector a cada mês.

A técnica “Imaging Guided Radiation Therapy” (IGRT) é um conceito que foi introduzido para equacionar o potencial de:

- uso de campos menores,
- doses maiores por fração,
- acompanhamento do movimento do alvo durante o tratamento,
- manutenção das margens dentro do planejado.

Portanto, é fundamental preservar ao máximo os tecidos sadios com o uso frequente de imagens obtidas durante o tratamento. Em alguns casos é necessária até mesmo uma avaliação diária dos deslocamentos dos órgãos para observar se estão dentro das margens, sendo sua posição ajustada caso se configure um movimento para fora dos limites estabelecidos para aquele alvo em tratamento.

Sistemas de marcadores refletivos colocados na superfície (SMS) também são usados, capturando sinais por uma vídeo câmara que acompanha o movimento do paciente.

Também são utilizados frequentemente sistemas não invasivos usando ultrassom tipo Accuity Elekta (2022) e sistemas invasivos permanentes com três emissores de radiofrequência diferentes e captados por uma antena tipo Calypso - Varian (2022) que permitem uma análise bem cuidadosa do posicionamento diário do alvo clínico.

Dicas:

- O que devemos observar:
 - a consistência do espaçamento dos cortes tomográficos,
 - a qualidade da imagem obtida,
 - o tempo de vida útil dos écrans,
 - a correlação entre as imagens e os movimentos dos órgãos,
 - as doses relativas a cada sessão de tratamento e se devem ser ou não incorporadas à dose total do paciente,
 - a deterioração do espelho associado ao sistema de fluoroscopia.
 - potenciais distorções nas imagens.

(a) Sistemas de dosimetria eletrônica Portal (EPID)

Os sistemas EPID são usados com muita frequência para verificações dosimétricas em tratamentos com a técnica IMRT e como parte dos programas de PGQ. É importante entender o seu projeto, os tipos de detectores usados, como calibrá-los e o seu comportamento a fim de garantir o grau de exatidão desejado aos seus resultados. Métodos rápidos de avaliação são recomendados de forma a minimizar o tempo de coleta de dados. Maiores detalhes ver em, da Silveira (2018).

Dicas:

- Os sistemas devem ser calibrados periodicamente para garantir a qualidade das imagens, evitando repetições.
- Os sistemas on-board-image (OBI) precisam ser calibrados periodicamente de forma a garantir que o sistema digital de processamento de imagem esteja adequado.
- Alguns sistemas enviam mensagens periódicas indicando a necessidade de ajustes.
- Quando se tratar de diodos, deve-se atentar para sua vida útil devido ao desgaste causado pela radiação, devendo ser realizada uma calibração cruzada com câmaras de ionização quando são utilizados para QA paciente específico.

6. RADIOTERAPIA ESTEREOTÁTICA (SRS)

A radioterapia estereotática ou radiocirurgia são técnicas que usam campos bem pequenos, múltiplos feixes coplanares ou não coplanares e altamente conformados para tratar alvos bem localizados com altas doses, em alguns casos doses únicas, buscando reduzir as doses nos tecidos normais ao seu redor.

Doses únicas com SRS vêm sendo usadas também em tumores benignos, desordens funcionais, metástases e reforço de dose.

Dicas:

- Como as margens são bem pequenas, a imobilização do paciente é de suma importância, seja com parafusos fixados na calota craneana ou máscaras rígidas.
 - A monitoração da posição do alvo e de uma possível movimentação deve ser contínua de forma a garantir que o feixe esteja bem direcionado para o alvo.

- Tomografias e ressonâncias são feitas com a mesma orientação, de acordo com o mesmo protocolo, ou seja, início da cabeça para o pé ou do pé para a cabeça.
- Imagens obtidas pós-fixação do frame garantem uma boa qualidade no tratamento.
- Deve-se verificar o movimento angular da mesa girando em torno de um ponto e o gantry também em torno de um ponto deve estar dentro das especificações definidas no protocolo de tratamento e PGQ específico.
- Marcadores fiduciais nos frames são de extrema importância para a localização e o deslocamento do alvo.
- Usar detectores com dimensão suficientemente pequena para não ser afetado pelo efeito de volume é altamente desejável. Para mais detalhes, ver TRS nº 483 (IAEA, 2017) e consultar os capítulos 7 e 24.

7. ACESSÓRIOS DE TRATAMENTO

Os acessórios são muito usados para indicar a direção do feixe e a posição do isocentro, e posicionar ou imobilizar o paciente. Dentre eles, o “*breast board*”, os “*lasers*” “*cross hairs*”, os leitores digitais de ângulo no *gantry*, os cones para uso dos feixes de elétrons, os filtros compensadores, os filtros dinâmicos, os materiais tipo “*bolus*”, os colimadores multilâminas, o apoio de cabeça e o “*vac-lock*” são provavelmente os que exigem uma maior atenção.

Dicas:

- Verificar a integridade física e a confiabilidade de cada acessório deve fazer parte do programa de PGQ, com frequências específicas para cada um.
- Alguns já possuem testes recomendados bem definidos pelo fabricante, como para MLC, filtro dinâmico e ângulo do “gantry”.
- Os demais devem ser definidos de acordo com sua função e frequência de uso, por exemplo, os testes com os “interlocks” dos colimadores de elétrons, as bandejas e os filtros físicos, que são manuseados diariamente, devem ser feitos mensalmente, e o “bolus” diariamente, além da limpeza e da verificação da sua espessura.
- Nos sistemas de imobilização é importante verificar se existem fissuras e/ou distorções que possam comprometer sua rigidez mecânica e afetar a reprodutibilidade de posicionamento do paciente.

8. SISTEMA DE PLANEJAMENTO (TPS)

A entrada dos dados no TPS deve preceder de uma clara identificação e entendimento do algoritmo usado, sua versão e as recomendações do fabricante quanto à forma de adquirir os dados e de inserir adequadamente no TPS.

Dicas:

- Os dados típicos de entrada exigidos para o TPS são, por exemplo:
 - energia nominal;
 - tipo de radiação;
 - distância fonte-isocentro;
 - distância fonte superfície do fantoma (DFS);
 - maior campo nas direções X e Y;
 - número de perfis necessários e as profundidades correspondentes;
 - tamanho do campo de referência;
 - distância fonte-superfície do fantoma na configuração de calibração;
 - profundidade de calibração;
 - dose e unidades monitoras na calibração;
 - modelo do acelerador para estar de acordo com o espaço de fase;
 - tamanho do ponto focal do alvo, pois está relacionado à penumbra, parâmetro importante para os campos pequenos.

Com esses dados e os parâmetros de campo, pode-se calcular os dados de qualquer feixe pelo TPS com campo aberto. O processamento dos dados avalia o tamanho dos perfis, tendo pelo menos 7 cm de leitura após o fim da penumbra, e se os perfis atendem o mínimo de dados necessários.

Ao fim do processamento, o TPS apresenta para análise os seguintes dados:

- a energia média radial para o feixe;
- o perfil de intensidade;
- os parâmetros de campo aberto;
- a contaminação de elétrons;
- o espectro energético;
- as curvas e os perfis processados;
- o retro espalhamento do colimador;

- os perfis e Percentuais de Dose Profunda (PDDs) calculados;
- o histograma e erro gama médio do PDD e perfil de campo aberto;
- a comparação das curvas medições e processadas em diferença percentual de dose.

(b) *Testes de validação do TPS*

O processo de validação do sistema de planejamento deve seguir as recomendações do TECDOC n° 1583 (IAEA, 2008) quanto à análise de diferentes elementos em separado, antes da avaliação final com heterogeneidade e tratamento modulado.

Para simplificação, a análise total da validação, deve ser observado as recomendações de documentos bem estabelecidos quanto à tolerância sugerida para o aceite do TPS, a partir da literatura e da especificidade do feixe comissionado. Um conjunto de critérios para sua validação como, por exemplo, são apresentados na tabela 6.

Tipo de Fantoma	Situação analisada	Tolerância percentual para dose pontual
Homogêneo	Campos quadrados	1,5 %
	Gantry angulado	1,5 %
	DFS variado	2,0 %
	Campos colimados e assimétricos	2,5 %
Heterogêneo	Fantoma em fatias	3,0 %
	Fantoma antropomórfico	3,0 %

Tabela 6 – Tolerâncias para validação do comissionamento do feixe 6XSRS.

Fonte: Autores.

9. SISTEMA DE MEDIÇÃO: ELETRÔMETRO + CABO + DETECTOR + CONECTOR

(a) *Eletrômetro*

Testes preliminares devem ser realizados quando do recebimento do equipamento e periodicamente, principalmente, antes de se iniciar o processo de medição da grandeza dose absorvida ou kerma no ar nas condições de referência ou mesmo em medições relativas. Alguns deles são recomendados a seguir e maiores detalhes no podem ser encontrados no Capítulo 12.

- fuga elétrica pré e pós-irradiação;
- consistência dos tempos de aquecimento e equilíbrio após troca datensão;
- consistência entre as escalas analógicas ou digitais em ambos os modos de leitura, corrente ou carga;
- proteção do conector de entrada com a capa apropriada ou papelalumínio.



Figura 5 – Visão típica de um eletrômetro onde chama a atenção o protetor do seu conector de entrada, importante para preservar o sistema de umidade e poeira.

Fonte: Standard Imaging (2022).



Figura 6 – Verificação da cor da sílica gel, um bom indicador das condições de umidade: quando a cor está azul, está correto, quando se torna rosa, a sílica precisa ser trocada ou regenerada numa estufa a 35 °C.

Fonte: PTW (2022).

(b) Cabo

Como um dos componentes mais importantes, é em geral, maior fonte de problemas, por esta razão sugere-se que se faça pelo menos:

- teste de continuidade com multímetro entre as extremidades do cabo e suas correspondentes conexões;

- inspeção visual de todo o cabo para identificar amassados, cortes etc.;
- limpeza dos conectores com álcool isopropílico, tendo cuidado para não deixar fiapos de algodão;
- manutenção da estanqueidade dos conectores com as capas metálicas ou revestidas de papel de alumínio preso por uma borracha.



Figura 7 – Visão no sentido horário de um conector tri axial com sua capa metálica protetora; do conector de entrada no eletrômetro protegido com folha de alumínio; da extremidade de um cabo sem capa metálica, mas com proteções de alumínio; e da parte posterior do Quickchek protegido com *tape* em todas as entradas que possam ser caminho para umidade e poeira.

Fonte: Foto. Autores

(c) Câmara de Ionização

Alguns testes devem ser conduzidos assim que a câmara for adquirida e posteriormente ao longo do seu uso, tais como (maiores detalhes no capítulo 12):

- radiografia inicial para verificar a posição do eletrodo e possíveis fissuras na parede ou no eletrodo;
- linearidade de resposta com a dose;
- sensibilidade a pequenas variações de sinal;

- dependência direcional;
- fuga elétrica;
- conexão com o ambiente, se câmara for aberta;
- estabilidade a curto e médio prazo;
- tempo de estabilização;
- estabilidade do coeficiente de calibração através do uso de uma fonte de referência ou de calibrações cruzadas com outras câmaras e com outros eletrômetros.



Figura 8 – Exemplo de uma radiografia típica nos planos anterior e lateral de uma câmara cilíndrica (as imagens mostram um alinhamento muito bom do eletrodo com o eixo da câmara).

Fonte: Foto - Autores.

Dica:

- Para avaliar a conexão do volume sensível com o ambiente, coloque a câmara dentro da fonte de referência e aproxime um secador de cabelo rapidamente que cederá calor devendo refletir de imediato no valor de leitura da escala de corrente.

10. CONJUNTO ELETRÔMETRO + CABO + CÂMARA

O sistema câmara + cabo + eletrômetro é responsável pela qualidade do resultado da medição da grandeza de interesse e requer uma atenção muito especial. Embora as

características fundamentais de cada um dos componentes já tenham sido discutidas anteriormente e em detalhe no capítulo 12, alguns pontos serão aqui ressaltados e devem ser considerados nos programas de Garantia e Controle da Qualidade.

Dicas:

- Com muito cuidado para evitar um curto, verifique o valor real da alta tensão aplicada, comparando com o valor nominal fornecido pela câmara. Se tiver dúvida de como fazer, não faça, peça ajuda.
- Embora os amplificadores operacionais possuam uma linearidade excelente, o capacitor pode introduzir uma não linearidade se tiver uma fuga além da absorção dielétrica típica que não interfere no valor final.
- Use uma fonte de referência de ^{90}Sr ou ^{137}Cs com leituras corrigidas para temperatura, pressão e decaimento da fonte, colocando a câmara na mesma posição, ou seja, com a marca de referência apontada para a marca na parte externa da fonte.



Figura 9 – Geometria do teste de estabilidade a longo prazo de uma câmara cilíndrica tipo Farmer PTW (2022) (com uma fonte teste de ^{137}Cs e com um termômetro inserido na cavidade do irradiador para ajustar sua resposta a uma temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ambiente e considerar o valor da pressão de referência.

Fonte: Foto Autores.

Teste de Fuga e Repetitividade

DATA:

Câmara de Ionização:

Eletrômetro:

Fonte Cs-137:

Teste de Fuga

Tempo = min

Tensão	L1 (nC)	L2 (nC)	Fuga (%)	Condição
V = -300 V	168,600	168,900	0,178	OK

Teste de Repetitividade

Leituras	L1 (nC)	L2 (nC)	L3 (nC)	L4 (nC)	L5 (nC)	L6 (nC)	L7 (nC)	L8 (nC)	L9 (nC)	L10 (nC)
nC	40,970	40,970	40,970	40,970	41,000	40,970	40,970	41,040	41,000	40,990

Média	SD%	P(mbar)	T(°C)	$\phi_{P,T}$	mmHg
40,985	0,06	918,70	25,1	<input type="text" value="1,122"/>	<input type="text" value="0,00"/>

Leitura Média Corrigida para $\phi_{P,T}$, Decaimento da Fonte e Data de Referência

Data de referência: Dias decorridos:

Leitura de referência: nC Meia-vida do Cs-137: dias

$L_{MC} =$ nC Desvio (%) Condição Feito por:

Figura 11 – Exemplo típico do resultado de um controle periódico do sistema de medição usando afonte de referência.

Fonte: Autores.

Dicas:

- Caso não tenha disponível uma fonte de referência, selecione uma energia de fótons como padrão e, nas condições de referência (DFS, campo e profundidade), realize periodicamente (a cada 3 meses) leituras com o segundo sistema do departamento para analisar a concordância.
- Caso seu segundo sistema câmara + cabo + eletrômetro também esteja fixo no console de comando, troque o eletrômetro, mantenha a câmara e analise a repetibilidade dos dados, em seguida, correlacione com os dados históricos e registre.
- Realize calibrações cruzadas periódicas com outras câmaras usadas para medir a grandeza dose absorvida na água de forma a estabelecer um sistema de confiabilidade cruzada.
- Verifique a fuga elétrica pré e pós-irradiação do sistema, identificando qual componente pode ser responsável pela fuga, cujo valor típico deve ser inferior a 10^{-15} A.

11. SISTEMAS USADOS PARA VERIFICAÇÃO DIÁRIA

Os sistemas usados para verificações diárias usando diodo ou câmaras devem ser acompanhados e calibrados periodicamente (pelo menos uma vez por mês) ou todas as

vezes em que se observe alguma tendência nos dados com relação aos valores originais, mesmo que seja inferior a 1 %.

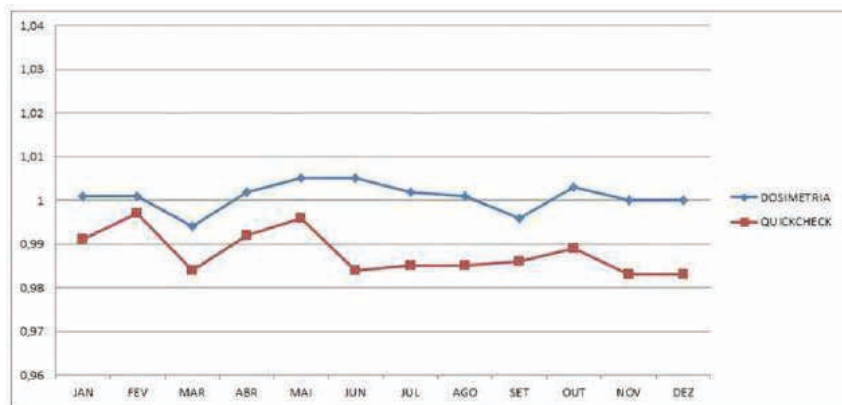


Figura 12 – Gráfico típico onde se observa uma tendência de redução na resposta do sistema Quickcheck, PTW (2022), demonstrando um erro sistemático com relação aos valores medidos com câmara de ionização. Embora o desvio padrão dos dados coletados mensalmente tenha sido inferior a 0,7 % num feixe de raio X de 6 MV, campo 10 cm x 10 cm, a ausência de calibração periódica do Quickcheck permitiu que se estabelecesse um erro sistemático detectado na auditoria interna anual.

Fonte: Autores.

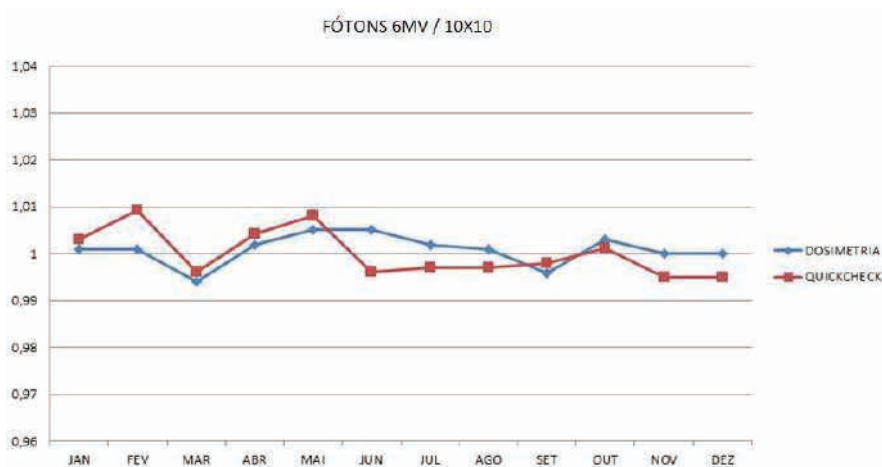


Figura 13 – Gráfico com os mesmos valores agora renormalizados para um valor médio estabelecido depois de meses de observação medidos pela câmara de ionização. O desvio padrão máximo observado é de menos de 0,7 %

Fonte: Autores.

12. SISTEMA USADOS PARA VARREDURA DE FEIXES

Normalmente são compostos de um tanque de acrílico de 40 x 40 x 40 cm³ preenchido com água, um detector se deslocando em duas ou três dimensões, um detector fixo de referência colocado lateralmente, um sistema de nivelamento eletrômetro de dois canais, sistema de conversão analógico digital com processadores software de controle e transferência de dados para um computador. Alguns sistemas também oferecem uma bomba mecânica para encher e esvaziar o tanque, em que é possível a leitura de filmes e acessórios que são fixados no *gantry*, permitindo varreduras bidimensionais no ar.

Ao testar estes sistemas, antes de serem usados, é importante confirmar os dados dos fabricantes para evitar a aquisição de dados distorcidos.

Os principais pontos que devem ser observados são:

- exatidão;
- linearidade melhor do que 1%;
- repetibilidade de posicionamento com valor aceitável de 0,5 mm para um deslocamento de 200 mm, medindo inicialmente no ponto central, em seguida nas extremidades e finalmente em dois pontos intermediários;
- desvio padrão da média dos valores medidos de ionização numa dada profundidade menor do que 1,5 % na região de trabalho.

Dicas:

Caso o sistema não esteja funcionando e as leituras para campos diferentes estejam discordantes, pode haver um problema de umidade:

- Deixe o sistema, por exemplo, 2D-ARRAY seven29, ligado por ao menos 12 horas em sala com controle de umidade. Aconselha-se deixá-lo ligado durante uma noite na sala do acelerador.
- Depois de aquecido nesse período, realize uma pré-irradiação, de acordo com o manual do usuário.
- Tente realizar o zero e analise os dados obtidos.
- Se continuar com problema, contate o fabricante para ajuda.

Relatório AAPM	Título	Objetivo
TG nº 142	Quality Assurance of medical accelerators	Frequências, limites e tolerâncias. Um update do TG nº 13 e do TG nº 40 em função da evolução tecnológica, incluindo colimadores assimétricos, MLC, filtros virtuais e dinâmicos, bem como os sistemas de imagens associados ao Linac.
TG nº179	Quality assurance for image-guided radiation therapy utilizing CT-based technology	Revisa os sistemas de imagem KV, incluindo funcionalidade, testes de aceite e QA.
TG nº 147	Quality assurance for non-radiographic localization and positioning systems	Focaliza nos sistemas de posicionamento e verificação, incluindo câmeras infravermelho, SMS e sistema de radiofrequência.
TG nº 135	Quality assurance for robotic radiosurgery	Define padrões para radiocirurgia robótica e para organizar um programa de QA.

Tabela 7 – Referências gerais e específicas úteis para consulta e formulação de um programa de QA.

Fonte: Autores.

13. DETECTORES DE ESTADO SÓLIDO

(a) Diodo

Devido à perda de sensibilidade com o histórico de dose, sua vida útil será menor, além de uma dependência importante com taxa de dose e sensibilidade a variação da temperatura e da fluência de energia, de forma que pelo menos um teste importante deve ser feito periodicamente:

Dica:

- Verificação cruzada com câmaras de ionização em condições de referência deve ser feita a cada mês.

(b) Diamante

Considerando a robustez deste detector com baixa dependência com temperatura, energia e taxa de dose pelo menos um teste importante deve ser feito:

Dica:

- Verificação cruzada com câmaras de ionização em condições de referência deve ser feita trimestralmente.

14. KEY POINTS

1. Importância de um programa de Garantia da Qualidade e de Controle da Qualidade.
2. Os componentes mais importantes de um acelerador.
3. O papel da tomografia no planejamento de tratamento
4. Controle da qualidade dos feixes FF e FFF
5. Vida média de alguns componentes principais de um acelerador
6. Controle da qualidade das fontes de braquiterapia
7. Importância de ter um plano de ação para verificação do TPS
8. Integridade física dos acessórios
9. A refrigeração do alvo do LINAC
10. Fonte de HDR ^{192}Ir devem ser calibradas quando chegam e a câmara calibrada periodicamente
11. Diferença entre os campos luminoso e de radiação
12. Como proteger o eletrômetro, os cabos e conectores da umidade

REFERÊNCIAS

AAPM. Committee Task Group n° 66. **Quality assurance for computer-tomography simulators in Radiation Oncology**. Medical Physics, v. 30, n. 10, p. 2762-2792, 2003.

AAPM. Committee Task Group n° 135. **Quality assurance for robotic radiosurgery**. Medical Physics, v. 38, n. 6, p. 2914-27936, 2011.

AAPM. Committee Task Group n° 142. **Quality assurance of medical accelerators**. Medical Physics, v. 36, n. 9, p. 4197-4212, 2009.

AAPM. Committee Task Group n° 147. **Quality assurance for non-radiographic localization and positioning systems**. Medical Physics, v. 39, n. 4, p. 1728-1747, 2012.

AAPM. Committee Task Group n° 179. **Quality assurance for image-guided radiation therapy utilizing CT-based technologies**. Medical Physics, v. 39, n. 4, p. 1946-1963, 2012.

da SILVEIRA T.B. **Dosimetria in vivo utilizando EPID**. Tese Doutorado IRD. 2018

CLIFFORD, C. K. S.; PEREZ, C. A.; BRADY, L. W. **Radiation oncology management decisions**. Philadelphia: Lippincott, Williams and Wilkis, 2002.

Catálogo CIRS (Computerized Imaging Reference Systems Inc. – Norfolk, Virginia, EUA). 2022

de ALMEIDA C.E. e SIBATA C.H. Avaliação dos erros durante o cálculo manual das doses ABFM1979

de ALMEIDA C. E. **The Brazilian National Quality Control Program in Radiation Oncology.** NCI. 1988.

de ALMEIDA, C. E. **The need for quality control in high dose rate brachytherapy.** In: IVANOV, O. Applications and experiences of quality control. London: Intechweb.org, 2011. p 11-26.

de ALMEIDA, C. E; FOLLOWILL, D.; SIBATA, C. Quality Audits in Brachytherapy. In: VENSELAAR, J.; MEIGOONI, A. S.; BALTAS, D.; HOSKIN, P. J. **Comprehensive Brachytherapy: Physical and Clinical Aspects.** Flórida: CRC Press, 2013. p 461-474. Elekta Catálogo. (2022).

IAEA. Technological Reports Series nº 398: Absorbed dose determination in external beam radiotherapy. Vienna: IAEA, 2000.

IAEA. Technological Reports Series nº 483: **Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy-An International Code of Practice for Reference and Relative Dose Determination.** Vienna, Austria: IAEA, 2017.

IAEA. TECDOC-1583. **Commissioning of Radiotherapy Treatment Planning Systems: Testing for Typical External Beam Treatment Techniques.** Report of the Coordinated Research Project (CRP) on Development of Procedures for Quality Assurance of Dosimetry Calculations in Radiotherapy. Vienna, Austria: IAEA, 2008.

SANTOS, M. R. **Comissionamento e Validação do feixe de alta taxa de dose no acelerador TrilogyTM para tratamentos hipofracionados com correção de heterogeneidade. Tese (Mestrado em Física Médica) – Programa de Pós-Graduação em Física Médica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2021.**

MARTINS, Paola. **Avaliação experimental dos algoritmos de cálculo de dose dos sistemas de planejamento: Mônaco, Eclipse e CAT3D. Tese (Mestrado em Física Médica) – Programa de Pós-Graduação em Física Médica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2021.**

PTW, Catálogo (2022)

Standard Imaging Catálogo (2022)

Varian, Catálogo (2022)