



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde

**Utilização do “Portal Dosimetry” no Controle de Qualidade em  
Radioterapia**

**TIAGO LOPES DIAS**

**Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre Profissional em Tecnologia das  
Radiações em Ciências da Saúde na Área  
de concentração Processos de Radiação  
na Saúde.**

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto  
Zeituni**

**SÃO PAULO  
2024**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde

**Utilização do “Portal Dosimetry” no Controle de Qualidade em  
Radioterapia**

**TIAGO LOPES DIAS**

**Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde na Área de concentração Processos de Radiação na Saúde.**

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto  
Zeituni**

**SÃO PAULO  
2024**

Fonte de Financiamento: Nenhuma

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

LOPES DIAS, T. **Utilização do “Portal Dosimetry” no Controle de Qualidade em Radioterapia**. 2024. 80 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Lopes Dias, Tiago  
Utilização do “Portal Dosimetry” no Controle de Qualidade em Radioterapia / Tiago Lopes Dias; orientador Carlos Alberto Zeituni. -- São Paulo, 2024.  
80 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde (Processos de Radiação na Saúde) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2024.

1. Radioterapia. 2. Controle da Qualidade. 3. Portal Dosimetry. 4. Colimador Multilâminas. 5. Controle Estatístico de Processo. I. Alberto Zeituni, Carlos , orient. II. Título.

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Autor: Tiago Lopes Dias

Título: Utilização do “Portal Dosimetry” no Controle de Qualidade em Radioterapia

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia das Radiações em Ciência da Saúde, pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

**Data: 25/10/2024.**

### **Banca Examinadora**

Prof. Dr.: Carlos Alberto Zeituni

Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Marco Antonio Rodrigues Fernandes

Instituição: Universidade Estadual Paulista (UNESP) Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Carla Daruich de Souza

Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) Julgamento: Aprovado

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, por todo companheirismo, ensinamentos e apoio em todos os momentos da minha vida.*

*E as minhas avós Abília Dias e Bernarda Lopes por sempre terem sido tão presentes, que me faz ter as melhores lembranças (In memoriam).*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Zeituni por ter dado todo o apoio e suporte que precisei e por ter aceitado me orientar e por todos os ensinamentos, toda disponibilidade e pela amizade.

Ao IPEN e todos os meus professores, em especial a Prof. Dra Carla Daruich, por ter contribuído para meu desenvolvimento profissional e por toda sua disponibilidade.

Ao Hospital Santa Santa Marcelina e ao Grupo RTCON, por terem tornado esse projeto possível.

A equipe de física médica do grupo RTCON do Hospital Santa Marcelina por terem me dado todo o apoio e incentivo necessários, flexibilizando meus horários para ser possível assistir as aulas presenciais, todo o meu agradecimento aos meus amigos físicos.

Ao Lucas Radicchi por ter compartilhado tantas ideias e conhecimento, que inclusive usei nesse trabalho, e sempre estar disponível para discussões sobre controle da qualidade. A Samira Junges e ao Vladimir Medina, com quem passei mais tempo e tive a oportunidade de aprender muito e claro pela amizade, que foi essencial nesse período.

Aos meus amigos físicos Arthur Bernardi, Beatriz da Cunha, Júlio Somazz, Larisse Bonato e Taynah Martins, por toda amizade, companheirismo e conhecimento compartilhado, equipe com uma competência incrível.

A equipe médica da radioterapia do Santa Marcelina, em especial a Dra. Célia Soares que sempre foi solícita, inclusive autorizando também a pesquisa na instituição. Ao Dr. Ciro Moiti pelas conversas e amizade em final de turno e ser uma inspiração como profissional e pessoa.

Ao tecnólogo Denis Oliveira, que desde o início da minha jornada no mestrado me deu toda e qualquer informação, ajuda e incentivo, e amizade, meu agradecimento.

A toda equipe do Hospital Santa Marcelina não mencionada, principalmente aos técnicos e tecnólogos que contribuíram com esse projeto também.

Aos meus colegas e amigos da turma IV do Mestrado Profissional, que foram essenciais, sendo companheiros e solícitos e dividindo momentos bons e as angústias.

A secretaria do IPEN, a Andrea Malavazi, Graziella Feitosa e Sabrina Lopes, por toda presteza e sempre dispostas a ajudar e orientar sobre tudo relacionado ao mestrado.

Aos meus amigos físicos que atualmente trabalham comigo, obrigado pela compreensão, Rita de Cássia e Breno Trindade. E ao Leonardo Rodrigues pela amizade.

A todos os meus amigos que de forma direta ou indireta fazem parte desse ciclo, em especial Elcio Hideki, Giselle Said, Matheus Nunes, Natanael Almeida, Néia Alves.

A todos os meus familiares, ao meu primo Alexandre Dias e ao meu tio César Dias

A minha mãe, Valdeci e ao meu pai, Raimundo, que sempre estiveram comigo de forma incondicional

Aos meus irmãos Adriano Dias e Marcela Dias, e meus sobrinhos Daniel, Isaac, Letícia, Matheus e Samuel, que são parte de mim e motivação diária.

E a Luana Domingos, que sempre me incentivou para meu crescimento pessoal e profissional, inclusive para fazer esse mestrado. E por todo seu companheirismo e amor.

## RESUMO

LOPES DIAS, T. **Utilização do “Portal Dosimetry” no controle de qualidade em radioterapia, 2024.** 80f. Tese (Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

Na implementação da técnica de Radioterapia em Arco Volumétrico Modulado (VMAT), diversas etapas são essenciais a fim de garantir segurança e qualidade dos tratamentos. Além do aceite e comissionamento do acelerador, outras etapas são fundamentais para garantir que o aparelho esteja com um funcionamento adequado, operando de forma a manter suas medidas dosimétricas e mecânicas dentro de recomendações nacionais e internacionais vigentes. A Verificação dos parâmetros iniciais adquiridos da máquina com uma frequência pré-estabelecida para cada teste faz parte de um programa amplo de controle da qualidade que é essencial para o funcionamento seguro do acelerador linear. Este trabalho utilizou o EPID para realizar os principais testes de controle da qualidade do MLC, teste de Isocentro de radiação e determinação do Fator OutPut de dois aceleradores de mesmo modelo e fabricante do Plano de Expansão da Radioterapia (PER-SUS) além de verificar as principais propriedades dosimétricas do “Portal Dosimetry” como detector de radiação, tais como linearidade, reprodutibilidade, dependência com a taxa de dose, efeito memória e respeito a lei do inverso do quadrado da distância. Os resultados foram avaliados de acordo com a metodologia baseada em controle estatístico de processo e foram calculados os Limites de Tolerância e Ação (LT e LA) para todos os conjuntos de testes. Os resultados para os LT e LA foram obtidos a partir de gráficos de controle. Para os testes de MLC, foi obtido valores de tolerância bem menores que os estabelecidos na literatura, exceto para o teste de velocidade do MLC. Os valores de tolerância para o teste Start shot foram menores que 0,5 mm para as duas máquinas. Os dados da caracterização dosimétrica mostraram que o detector é adequado para medidas de controle da qualidade em radioterapia. A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar a importância de buscar alternativas para se definir limites institucionais como forma de avaliar os controles de qualidade das instituições.

Palavras-chave: “Portal Dosimetry”, EPID, SPC, MLC, VMAT, Radioterapia

## ABSTRACT

LOPES DIAS, T. **Use of the Portal Dosimetry in Quality Control in Radiotherapy.** 2024. 80f. Thesis (Professional Master's Degree in Radiation Technology in Health Sciences), Institute of Energy and Nuclear Research, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

In the implementation of the Volumetric Modulated Arc Radiotherapy (VMAT) technique, several steps are essential to ensure the safety and quality of treatments. In addition to the oil and commissioning of the accelerator, other steps are essential to ensure that the device is functioning properly, operating in a way that maintains its dosimetric and mechanical measurements within current national and international recommendations. Verification of the initial parameters acquired from the machine with a pre-established frequency for each test is part of a broad quality control program that is essential for the safe operation of the linear accelerator. This work used the EPID to perform the main quality control tests of the MLC, radiation isocenter test and determination of the Output Factor of two accelerators of the same model and manufacturer of the Radiotherapy Expansion Plan (PER-SUS), in addition to verifying the dosimetric properties of the "Dosimetry Portal" as a radiation detector, such as linearity, reproducibility, dependence on the dose rate, main memory effect and respect for the inverse square law of distance. The results were evaluated according to a methodology based on statistical process control, and the Tolerance and Action Limits (LT and LA) were calculated for all test sets. The results for the LT and LA were obtained from control charts. For the MLC tests, tolerance values were much lower than those established in the literature, except for the MLC speed test. The tolerance values for the Start shot test were lower than 0.5 mm for both machines. The dosimetric characterization data demonstrated that the detector is suitable for quality control measurements in radiotherapy. Based on the results obtained, it was possible to verify the importance of seeking alternatives to define institutional limits as a way to evaluate the quality controls of institutions.

**Keywords:** Portal Dosimetry, EPID, SPC, MLC, VMAT, Radiotherapy

## LISTA DE SIGLAS

AAPM	American Association of Physicists in Medicine
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
CEP	Controle Estatístico de Processos
CUSUM	Cumulative Sum
DLG	Dosimetric Leaf Gap
DRGS	“Dose Rate” “gantry” Speed
EPID	Electronic Portal Imaging Device
IMRT	Intensity-Modulated Radiation Therapy
LA	Limite de Ação
LC	Limite Central
LIC	Limite Inferior de Controle
LSC	Limite Superior de Controle
LT	Limite de Tolerância
MLC	Multi-Leaf Collimator
PD	“Portal Dosimetry”
PF	“Picket Fence”
PSQA	Patient-Specific Quality Assurance
QA	Quality Assurance
ROI	Region of Interest
SAD	Source to Axis to Distance
SPC	Statistical Process Control
SSD	Source to Surface Distance
TECDOC	Technical Document
TG	Task Group
TPS	Treatment Planning system
TRS	Technical Reports Series
UM	Unidades Monitoras
VMAT	Volumetric Modulated Arc Therapy

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1 Objetivos Específicos .....	14
2.2 Justificativa .....	15
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>20</b>
4.1 Caracterização Dosimétrica do “Portal Dosimetry” .....	20
4.1.1 Linearidade da leitura com a dose .....	20
4.1.2 Reprodutibilidade das leituras .....	21
4.1.3 Dependência angular .....	21
4.1.4 Influência da taxa de dose com as leituras .....	22
4.1.5 Resposta do portal em função da distância .....	22
4.1.6 Efeito memória .....	22
4.2 Controle de qualidade do MLC usando o EPID .....	22
4.3 Análise do teste Start Shot usando o “Portal Dosimetry” .....	24
4.4 Fator OutPut com o “Portal Dosimetry” .....	25
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>25</b>
5.1 Avaliação do desempenho do “Portal Dosimetry” .....	25
5.1.1 Linearidade da leitura com a dose .....	26
5.1.2 Reprodutibilidade das leituras .....	29
5.1.3 Dependência angular .....	31
5.1.4 Influência da taxa de dose com as leituras .....	36
5.1.5 Resposta do portal em função da distância .....	38
5.1.6 Efeito memória .....	40
5.2 Controle da Qualidade do MLC .....	42
5.3 Start Shot .....	48
5.4 Fator OutPut com o “Portal Dosimetry” .....	71
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>75</b>
<b>7 LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b> .....	<b>76</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O câncer é um termo que abrange mais de 100 diferentes tipos de doenças malignas que têm em comum o crescimento desenfreado de células, que podem invadir tecidos próximos ou órgãos mais distantes. Dividindo-se rapidamente, estas células têm uma tendência muito agressivas e sem controle, acarretando a formação de tumores, que podem espalhar-se para outras regiões do corpo. Os diferentes tipos de câncer correspondem aos vários tipos de células do corpo. Quando se iniciam em tecidos epiteliais, como pele ou mucosas, são denominados carcinomas. Se o ponto inicial são os tecidos conjuntivos, como osso, músculo ou cartilagem, são designados sarcomas. Outros atributos que diferenciam as diversas modalidades dessa doença são a velocidade de multiplicação das células e a capacidade de invadir tecidos e órgãos vizinhos ou distantes, conhecida como metástase(1,2).

O câncer é uma das maiores causas de morte em adultos no País, conforme estatísticas do Instituto Nacional de Câncer (INCA). Para o Brasil, a estimativa para cada ano do triênio 2023-2025 aponta que ocorrerão 704 mil casos novos de câncer (450 mil, excluindo os casos de câncer de pele não melanoma). O câncer de pele não melanoma será o mais incidente (220 mil), seguido pelos cânceres de mama (74 mil aproximadamente) e próstata (72 mil aproximadamente), cólon e reto (46 mil aproximadamente), pulmão (33 mil aproximadamente) e estômago (21 mil aproximadamente). Para o tratamento dessa neoplasia, destaca-se a radioterapia, que servirá de modalidade de tratamento para cerca de 60 % dos casos, seja paliativa ou curativa (3).

A radioterapia corresponde ao uso da radiação ionizante, produzida por aceleradores ou ainda emitida por radioisótopos, para fins terapêuticos. Pode ser usada para tratamentos de doenças benignas quanto malignas, com a principal finalidade entregar uma dose precisa de radiação em um volume tumoral com o objetivo de controle ou a erradicação da doença, poupando os órgãos normais próximos(4). Ela é considerada uma das principais modalidades de tratamento para doenças malignas, sendo outras a quimioterapia e a cirurgia, a radioterapia depende fortemente de tecnologias modernas e esforço conjunto de uma equipe interdisciplinar(5).

A teleterapia ou radioterapia externa é a modalidade de tratamento em que a fonte de radiação está a uma certa distância do paciente. Outra modalidade de

radioterapia é a braquiterapia, que é definida como a utilização de radioisótopos em que a fonte de radiação é colocada em contato ou próximo à área que necessita receber o tratamento (4,6). Este trabalho se concentrará exclusivamente na teleterapia.

Para teleterapia, utiliza-se diversas técnicas tais como radioterapia em duas dimensões (2D), radioterapia conformacional ou tridimensional (3D), Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT), Radioterapia de Intensidade Modulada Volumétrica em Arco (VMAT) dentre outras(4,6,5).

A radioterapia 2D, é baseada em referências anatômicas e ósseas, como por exemplo radiografias ou imagens portais, geradas a partir de simuladores ou do próprio acelerador. A Radioterapia Tridimensional Conformacionada (3D-CRT) usa imagens tomográficas para a delimitação dos volumes de tratamento e órgãos em risco (OR), nas proximidades do volume de tratamento(4). O IMRT e o VMAT são técnicas que utilizam feixes de fótons não uniformes para modular a dose no tumor poupando com maior eficiência os órgãos em risco, permitindo assim o escalonamento da dose e com isso aumentando as chances de controle tumoral. Enquanto o primeiro utiliza movimento dinâmico do Colimador Multilâminas (MLC), a radioterapia de intensidade modulada em arco combina variação da taxa de dose, velocidade do “gantry” do acelerador em conjunto com movimento dinâmico do MLC (habilidade em variar a velocidade das lâminas)(4,5).

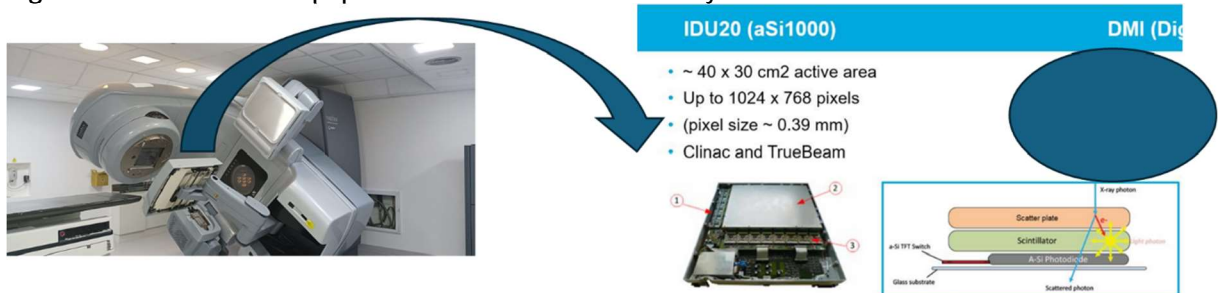
As fluências não uniformes de IMRT e VMAT são asseguradas com ajuda de um Colimador Multilâminas, que é um instrumento formado por várias lâminas de metal de alta densidade, geralmente tungstênio, que quando acoplada a saída do feixe de raios X, reduz significativamente radiação que o atravessa a valores mínimos. É desenhado para ser capaz de formar campos irregulares, para melhor conformar os tumores, com desempenho, precisão, segurança e versatilidade(7). O aceite, comissionamento e Controle da Qualidade de um Colimador multilâminas envolve uma série de testes rigorosos a fim de garantir confiabilidade e segurança no seu uso, como descrito pela “Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie”-NCS (que pode ser traduzido como Comissão Holandesa de Dosimetria Radiação), e sumarizados na Tabela 2 desse mesmo documento(8). Este mesmo documento orienta a implementação de técnicas modernas de tratamento como IMRT. Diversos são os detectores de radiação que podem ser utilizados para realizar essas etapas, que são essenciais para o acelerador ser utilizado em tratamentos clínicos com

segurança. Estes precisam atender às características que são desejáveis em um bom instrumento de medição, tais como: independência energética, linearidade com a dose, reprodutibilidade, boa resolução espacial, estabilidade, que obedeça à lei do inverso do quadrado da distância, independência energética dentre outras(5,9).

Os dispositivos sugeridos pela literatura que atendem às necessidades em questão são, principalmente, câmaras de ionização cilíndricas modelo Farmer ou de volumes intermediários ou pequenos, tipo IC-15 ou “PinPoint”; filmes radiocrômicos, detectores de diodos(9,5) e mais recentemente Dispositivos Eletrônicos de Imagem Portal (EPIDs), como o Dosímetro Portal (“Portal Dosimetry”) da “Varian Medical System”, este último foi validado por alguns pesquisadores(10,11,12).

O “Portal Dosimetry” (PD) é um detector de alta resolução, 0,39 mm, com área ativa de 40 x 30 cm<sup>2</sup> e modelo aSi 1000 (13) utilizado para realizar controle de qualidade de planejamentos de IMRT e VMAT, controle de qualidade de Acelerador Linear (AL), do MLC dentre outros(14,15,16). ele é montado em um braço robótico do AL, como mostra a Figura 1 abaixo:

Figura 1 - Acelerador equipado com o Portal Dosimetry



Fonte: Portal Dosimetry, 2019

Com os avanços tecnológicos na radioterapia, cada vez mais se busca meios de se otimizar os controles da qualidade dos MLCs bem como controle da qualidade de Paciente Específico (PSQA) para IMRT e radioterapia modulada em arco. Dispositivos Eletrônicos de Imagem Portal (EPIDs), como o “Portal Dosimetry”, da Varian Medical System que pode ser utilizado com esse propósito e seu uso pode ser ampliado para vários outros testes como sugerido por Baozhou(17) por ter propriedades dosimétricas desejáveis, ser acoplado diretamente ao acelerador(10,12) o que facilita seu uso e diminui chances de erros de posicionamento do mesmo e consequentemente otimização do tempo de profissionais responsáveis.

Em um programa de garantia da qualidade em radioterapia que possui alta tecnologia é essencial, e além do aceite e comissionamento do acelerador linear, o controle da qualidade do MLC é primordial e pode incluir os testes: precisão no posicionamento, reprodutibilidade, velocidades das lâminas, testes para verificar o efeito da gravidade, transmissão de lâminas, GAP deslizante, Dosimetric Leaf GAP (DLG) ou separação dosimétrica, dentre outros(8); testes para verificação do isocentro da máquina, verificação diária do fator OutPut, dentre outros que são descritos em detalhes por Furnari(7), que detalha também outros testes que são obrigatórios em controle da qualidade de acelerador linear utilizado em radioterapia.

Dentre outros documentos que dão diretrizes de como os testes de segurança, mecânicos, de imagem, dosimétricos e MLC devem ser realizados em um programa de controle da qualidade de aceleradores lineares em radioterapia, estão os documentos publicados pela Associação Americana de Física Médica (AAPM), mais especificamente o Task Group-142 (TG – 142) e TG - 198(15,14) e ainda fornecem sugestões de tolerâncias.

Com o advento das novas tecnologias em radioterapia desenvolvida nos últimos anos, o controle da qualidade dos aceleradores lineares tornou-se cada vez mais rigoroso e amplo e para garantir um tratamento seguro dos pacientes submetidos à essa modalidade de tratamento, sobretudo com a implementação de novas técnicas como IMRT(16) muitos são os testes obrigatórios a serem realizados, com periodicidades definidas, que de maneira simplificada envolve os de segurança, mecânicos, dosimétricos, de imagem e dos colimadores multilâminas(14). Além da realização de uma dosimetria mensal para os feixes de fótons e elétrons com as energias disponíveis no acelerador, seguindo recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA)(18), que orientam a maneira como essas tarefas devem ser realizadas.

## **2 OBJETIVOS**

Utilizar o “Portal Dosimetry” para o desenvolver um programa de controle da qualidade de dois aceleradores lineares (AL 1 e AL 2) da mesma marca e modelo, do Plano de expansão do Sistema Único de Saúde, que passaram por atualizações que permite executar tratamentos de alta complexidade como VMAT, da Instituição Casa

de Saúde Santa Marcelina. Este dispositivo tem como principal vantagem o tempo, praticidade, confiabilidade de execução dos testes, visto que esse detector de medida vem acoplado ao acelerador linear e pode apresentar boas características dosimétricas (linearidade, reprodutibilidade, independência da leitura com a taxa de dose, boa resolução espacial) que também serão estudadas neste trabalho. O programa foi dividido em quatro etapas principais: realizar uma caracterização dosimétrica do detector; utilizar o detector para realizar a verificação diária do fator calibração da máquina (“Fator output”) e controle de qualidade do colimador multilâminas. Para analisar os testes, foi utilizada a metodologia baseada em controle estatístico de processos.

## **2.1 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos têm-se:

- Realizar uma caracterização dosimétrica no PD a partir dos testes de linearidade da resposta; reprodutibilidade das leituras; independência da leitura com a taxa de dose; verificação da dependência direcional ou angular; respeito a lei do inverso do quadrado da distância e verificação do efeito memória. Para os dois aceleradores e energias;
- Desenvolver um programa de controle da qualidade do MLC do AL 1 e AL 2; do isocentro dos aceleradores, o teste Startshot e a determinação do Output da máquina, usando o EPID;
- Aplicar uma metodologia baseada em Controle Estatístico de Processo (CEP) para avaliar os testes quantitativos do MLC: teste “picket fence” e testes de capacidade de entrega do VMAT; teste “start shot” para verificação de isocentro;
- Encontrar a partir de gráficos de controle, limites de tolerância institucionais para os testes de MLC e start shot e comparar os resultados das duas máquinas.

## 2.2 Justificativa

Analisar um dado de controle da qualidade do acelerador linear requer atenção e cuidado. Para cada teste quantitativo deve existir uma tolerância que, se ultrapassada é necessário avaliar as causas para correção ou reparo, com o propósito de reduzir um possível impacto clínico ao paciente de radioterapia. Para garantir a segurança do tratamento, a precisão e exatidão do alvo, a correta entrega de dose e a capacidade do acelerador linear em modular a dose a partir de seu colimador multilâminas e para realizar um tratamento complexo como VMAT, é necessária uma vigilância constante do programa de controle de qualidade, como sugere o TG-142.

Nesse sentido, estabelecer uma metodologia de análise dos dados obtidos do controle da qualidade da máquina é essencial. Este trabalho se destaca em se obter limites de tolerância institucionais, como produto tecnológico, para as duas máquinas, a partir do “Portal Dosimetry”. Isso inclui analisar tendência dos dados obtidos e não somente avaliar um dado a partir de sua tolerância.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Alguns pesquisadores fizeram uma caracterização dosimétrica do “Portal Dosimetry” para melhor entender as características desse detector, destaca se Érika, Kavuma, Mancuzo (10,12,11) dentre as principais propriedades estudadas foram: linearidade, reprodutibilidade da resposta, dependência da leitura com o ângulo de “gantry”, dependência da leitura com a distância, dependência leitura com a taxa de dose e efeito memória. Essa mesma etapa foi seguida nesse trabalho para os dois aceleradores e para as duas energias disponíveis (AL 1 e AL 2, energias de 6 MV e 10 MV). As duas máquinas são do Projeto de Expansão da Radioterapia do SUS (PER-SUS), modelo Clinac CX, com números de série NS 6465 e NS 6564 para o AL 1 e AL 2, respectivamente. Esses aparelhos passaram por upgrade com a instalação do Dosímetro Portal modelo aSi 1000, com área ativa de 40 x 30 cm<sup>2</sup>, resolução de 0,39 mm(13); MLC 120 lâminas, e o AL 2 além dessa atualização, foi equipado com dispositivo de imagem 3D, o Cone Beam (CBCT), que é capaz de realizar uma tomografia pré-tratamento dos pacientes.

Existem muitas ferramentas utilizadas para o gerenciamento da qualidade de produtos ou serviços e que podem ser utilizadas na radioterapia para melhorar os

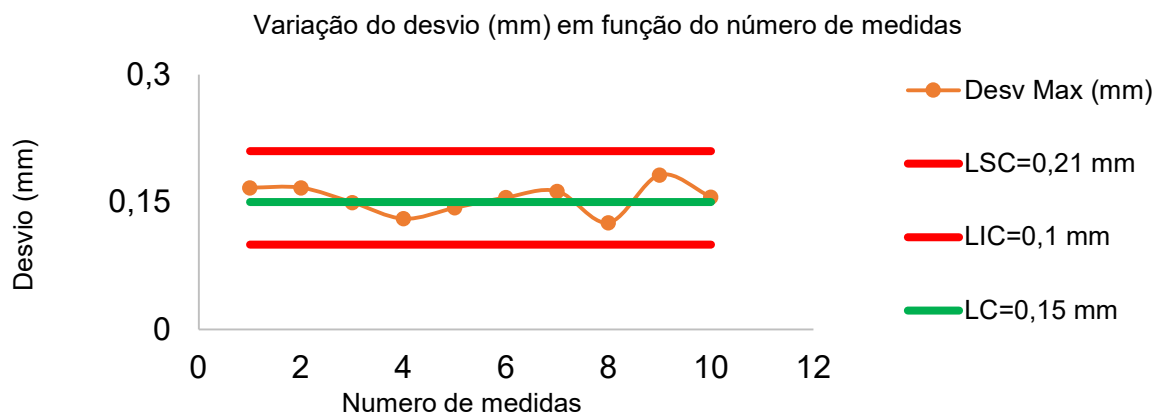
processos de avaliação dos controles de qualidade. A fim de estabelecer a administração e a estabilidade de processos, esses instrumentos da qualidade possibilitam estimar, avaliar, definir e propor resolução para possíveis problemas(19).

Uma dessas ferramentas é o gráfico de controle, que auxilia na realização das estatísticas de processo e esses gráficos podem ser utilizados tanto no monitoramento da alteração quanto na avaliação da estabilidade de um certo processo. Esses gráficos utilizam um conjunto de dados para avaliar as mudanças de um processo por meio de amostragem, sendo possível avaliar se o processo está de acordo com os limites estabelecidos ou se há uma causa de variabilidade que possa ser corrigida(19).

Alguns autores estudaram seu uso no controle de qualidade em radioterapia, destaca - se Raveendran e colaboradores(19) que fizeram uma revisão sobre o tema e estimularam seu uso em controle de qualidade em radioterapia, outros autores como Sanghangthum e colaboradores(21) utilizaram o Controle Estatístico de Processo (CEP) para estudar “Patient-Specific Quality Assurance” (PSQA ) para VMAT e OutPut da máquina e definiram os limites de controle como a tolerância do teste (um aviso) e limites de ação aqueles desvios que podem impactar em nos tratamentos clínicos.

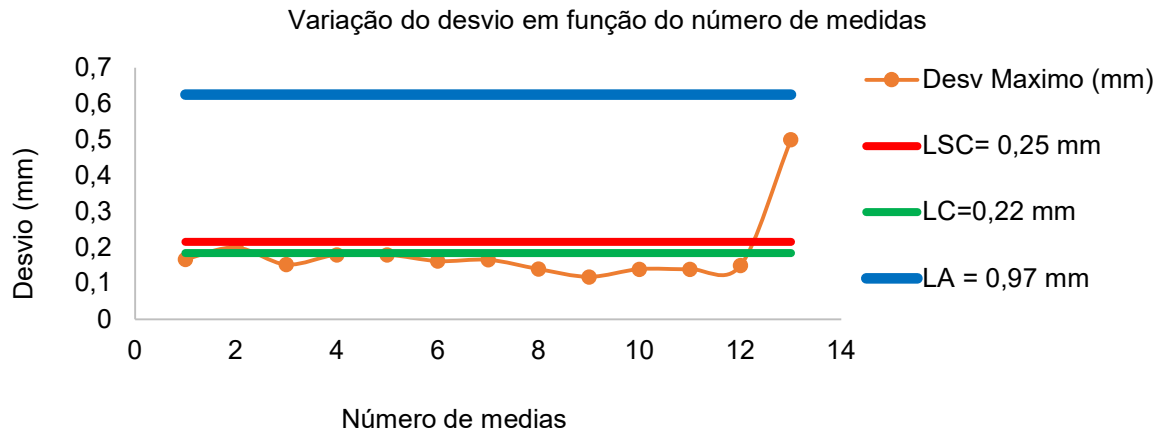
Para confeccionar um gráfico de controle usam se linhas para melhor visualização do processo e permitir conhecer se este está ou não sob controle estatístico. Essas linhas podem ser nomeadas de Linha Média (LM) ou Limite Central (LC); Limite Superior de Controle (LSC); Limite Inferior de Controle (LIC). A Figura 2 ilustra o formato básico de um gráfico de controle, onde as linhas vermelhas ilustram os valores de LSC e LIC, e a linha verde o LC.

Figura 2 - Exemplo hipotético de um gráfico de controle, com a variável em mm



A Figura 3 apresenta um exemplo hipotético de um gráfico que saiu de controle estatístico, indicado por vários pontos seguidos abaixo da média e pelo valor que ultrapassou a linha vermelha.

Figura 3 - Exemplo hipotético de um gráfico de controle, com a variável em mm, que saiu de controle estatístico



Fonte: autoria própria

Alguns trabalhos utilizaram essas ferramentas de Controle Estatístico de Processos (CEP) para definir os critérios de tolerâncias para (PSQA), como o TG-218(22,23) que utilizou a metodologia baseada em processos para sugerir limites institucionais, ou seja, baseados em dados adquiridos na instituição levando em conta o acelerador linear e os detectores disponíveis, a fim de garantir um domínio mais adequado desses limites. Esse documento utiliza os LSC e LIC como a tolerância do teste e define um nível de ação, o qual se ultrapassado precisa ser estudado a razão para tal, esse limite é definido como Limite de Ação (LA).

As equações matemáticas para descrever esses termos estão apresentadas abaixo:

$$\text{Limite Central (LC)} = \frac{1}{n} \sum_{1}^n X \quad (1)$$

Em que X representa os valores medidos e n o número delas.

$$\text{Limite Inferior de Controle (LIC)} = \text{LC} - 2,66 \cdot \overline{mR} \quad (2)$$

$$\text{Limite Inferior de Controle (LIC)} = LC + 2,66.\overline{mR} \quad (3)$$

Na equação dos Limites Inferior e Superior de Controle,  $\overline{mR}$  representa a média das amplitudes móveis, que é a diferença absoluta entre uma medida e a subsequente.

$$\text{Limite de Ação (LA)} = \Delta A = \beta \sqrt{\sigma^2 + (\bar{X} - T)^2} \quad (4)$$

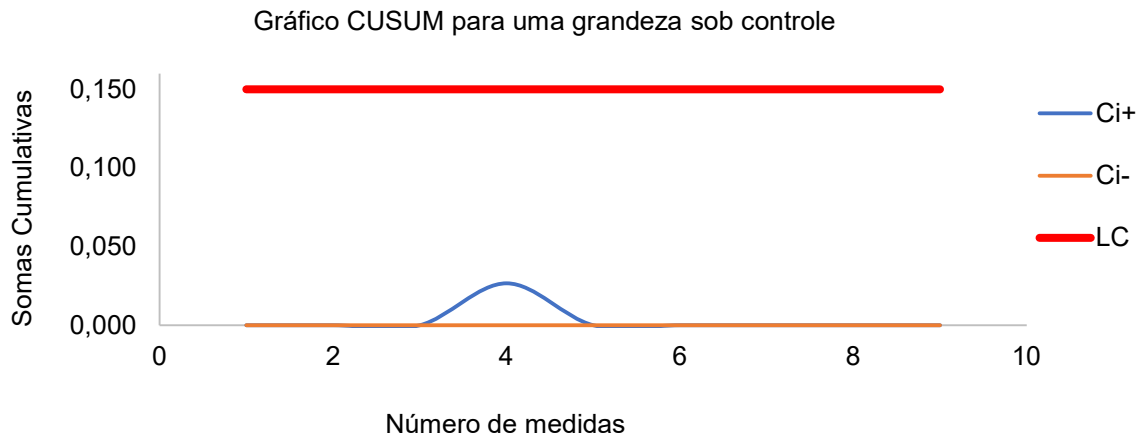
Na equação 4,  $\Delta A$  expressa a diferença entre os LSC e LIC,  $\sigma$  é o desvio padrão e  $\bar{X}$  a média do processo. No valor de  $\beta$  é adotado 6 pelo TG 218, que combina erros tipo I e tipo II (esse valor pode variar até 10)(22).

Neste trabalho foi utilizada a metodologia baseada em processo para avaliar a tendência de um conjunto de testes quantitativos de controle da qualidade que são essenciais para verificar o bom desempenho de um acelerador linear, mais especificamente os testes de MLC como o "Picket Fence" (PF), que é largamente utilizado para verificar posicionamento de lâminas, testes realizados em arcoterapia (VMAT) para acompanhar velocidade de lâminas e entrega de dose sob variação de taxa de dose ("Dose Rate") e velocidade do "gantry" "gantry" Speed" (DRGS) e outro teste de MLC foi realizado sob variação da velocidade de lâminas em conjunto com variação da taxa de dose ("MLC Speed"). Os testes de VMAT realizados neste trabalho podem ser encontrados no "myvarian"(24) com o nome "RapidArc\_QA\_Test\_Procedures\_for\_C-Series", lá é possível verificar também uma metodologia completa de análise e inclusive com uma planilha em excel para verificar os resultados. Essa metodologia baseada em processo foi utilizada também para avaliar testes de Isocentro de radiação, mais especificamente o Startshot colimador para o AL 1 e AL 2. E por fim utilizou-se o "Portal Dosimetry" para medir o "OutPut" diário e fazer uma comparação com o detector matrixx, fabricante IBA. Essa comparação levou em conta os níveis de confiança que são usados para avaliar PSQA do TG - 119(16). Os níveis de confiança podem ser entendidos como valores acima ou abaixo de uma média, em uma distribuição normal de probabilidade, em que as chances de se encontrar um valor nesse intervalo em torno da média é de 95 %(25).

Um outro gráfico de controle que pode ser utilizado é o "Cumulative Sum Control Chart" (CUSUM) que é utilizado quando se tem pequenas variações com

relação à média, ou seja, é utilizado esse modelo quando se pretende monitorar a média de um processo(26), este modelo foi utilizado nesse trabalho para avaliar alguns testes com menor variação entre medidas e esse modelo de análise foi utilizado por alguns autores para avaliar o fator OutPut da máquina(20,21). A Figura 4, ilustra um exemplo de gráfico CUSUM que está sob controle estatístico.

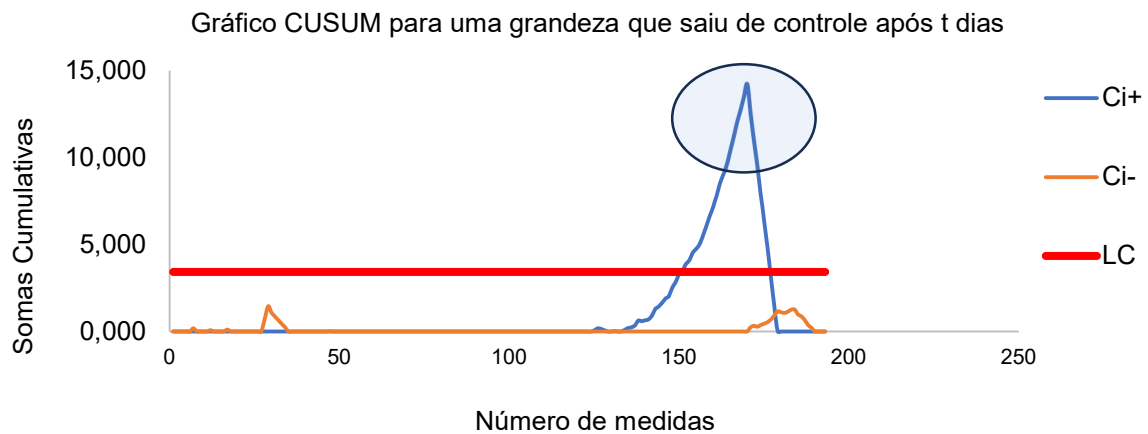
Figura 4 - Exemplo de gráfico CUSUM que está sob controle estatístico, indicado pelos valores de  $Ci+$  e  $Ci-$ , que são valores acima ou abaixo da média, respectivamente, que são contabilizados



Fonte: autoria própria

A Figura 5, mostra um gráfico CUSUM que saiu de controle estatístico, indicado pelo círculo em torno do pico, ou seja valor acima da linha vermelha.

Figura 5 - Exemplo de gráfico CUSUM que saiu de controle estatístico, indicado pelo círculo,  $Ci+$  e  $Ci-$  indicando valores acima ou abaixo da média, respectivamente, que são contabilizados.



Fonte: autoria própria

Devido a grande quantidade de testes para se realizar em um programa de controle da qualidade, é essencial desenvolver meios eficientes para lidar com a quantidade de informações geradas, como trabalhar esses dados. Especificamente, com relação aos testes de MLC existem muitos documentos que mostraram a importância dos testes e critérios de tolerância e metodologias de como executar, o que é fundamental(8,7,27,28), em complemento a isso, esse trabalho se destaca em trazer uma discussão de como definir limites institucionais para controle da qualidade, seja de MLC, seja do OutPut ou Isocentro da máquina semelhança aos critérios do TG – 218, que descreve uma metodologia baseada em processo para estabelecer limites institucionais para controle de qualidade de paciente específico(22).

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização dosimétrica do “Portal Dosimetry”**

Essa etapa do projeto envolveu verificar algumas propriedades dosimétricas essenciais para um detector, como Linearidade da resposta com a dose, Reprodutibilidade das leituras, Dependência direcional (efeito gravidade), Influência da taxa de dose, Resposta em função da distância, Efeito memória nas leituras do EPID. Para melhorar a visualização dos dados, ou seja, para se ter a equivalência de 100 UM (Unidade Monitora) = 100 UC (Unidade de Calibração), as leituras foram multiplicadas por 100. A Unidade Monitora se relaciona com o output da máquina, é um parâmetro utilizado nos aceleradores lineares que está relacionado à dose de radiação entregue, geralmente está associado a calibração do equipamento na de 1 cGy = 1 UM. As leituras foram coletadas no software do “Portal Dosimetry” sobre um Region of Interest (ROI) de 5 x 5 mm<sup>2</sup>, a menos que se mencione o contrário. As tolerâncias para esses testes seguiram as recomendações da Associação Americana de Física Médica (AAPM), mais especificamente o TG-142 e TG - 198(14,15).

#### **4.1.1 Linearidade da leitura com a dose**

Um dos princípios fundamentais de um detector de radiação se diz respeito à linearidade da resposta com a dose, ou seja, se o detector responde de forma proporcional à dose de radiação recebida, e para verificar essa característica foi realizado um conjunto de medidas com a configuração de campo 10 x 10 cm<sup>2</sup>, criado

no sistema de planejamento Eclipse, Distância Fonte Isocentro de 100 cm, com as coordenadas do detector na origem (0,0,0) e escolhido a taxa de dose de 600 cGy/min que é a mais utilizada no setor, tanto para 6 quanto para 10 MV. As Unidades Monitoras foram: 1, 2, 3, 4,5, 10, 20, 50, 100, 200, 300, 500, 800 e 999, para os dois aceleradores e as duas energias de 6 e 10 MV.

#### **4.1.2 Reprodutibilidade das leituras**

Outra característica essencial de um bom detector é a sua reprodutibilidade, ou seja, diante de uma série de medições nas mesmas condições de arranjo experimental as leituras devem se manter com variação menor que 1 %. Esse teste foi realizado com 50 UMs e repetido 10 vezes, no eixo central do detector, coordenadas (0,0,0), um campo 10 x10 cm<sup>2</sup> e taxa de dose de 600 cGy/min foram utilizados, a fim de verificar a constância das medidas.

#### **4.1.3 Dependência angular**

O objetivo desse teste foi verificar a dependência do EPID com o ângulo do “gantry” (parte do acelerador que gira ao redor do paciente), ou seja, verificar se a leitura do detector varia com o ângulo do mesmo. Esse teste tem uma importância fundamental pois em tratamentos rotineiros seja de Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT) ou tratamento convencional, o “gantry” pode ocupar diversas posições. Para verificar esse quesito, foram realizadas as leituras em diversas posições de “gantry”, com SSD=100 cm, campo 10 x10 cm<sup>2</sup>, no eixo central do detector, com coordenadas fixadas em (0,0,0), os ângulos de “gantry” variaram de 0 a 340 graus, com passo de 20 graus, ou seja, o “gantry” dará uma volta completa.

#### **4.1.4 Influência da taxa de dose nas leituras**

Uma variação de leitura com a taxa de dose pode ocorrer, contudo, deve permanecer idealmente dentro de uma variação menor que 1 %, o objetivo desse teste foi verificar a resposta do detector com diferentes taxas de dose. Para verificar esse parâmetro, o teste foi realizado as medidas no eixo central do detector, um campo 10

x 10 cm<sup>2</sup>, SSD=100 cm e variando as taxas de dose de 100 a 600 cGy/min em passo de 100 em 100. Cada uma das 6 taxas de dose foi utilizada 50 UMs.

#### **4.1.5 Resposta do “Portal Dosimetry” em função da distância**

Com o intuito de verificar se a dose no detector obedece a Lei do Inverso do Quadrado da Distância (IQD), realizou-se várias leituras em diferentes distâncias fonte detector, 100, 110,130 e 150 cm com um campo 10 x 10 cm<sup>2</sup> e Unidade Monitora de 50.

#### **4.1.6 Efeito memória**

A fim de verificar o efeito memória do detector, foram realizadas várias leituras com diferentes tamanhos de campo e Unidades Monitoras, começando com doses mais altas seguidos de mais baixas doses. O detector foi posicionado nas coordenadas em (0,0,0) e os tamanhos de campo utilizadas foram 10 x 10, 20 x 20, 25 x 25 cm<sup>2</sup> com Unidades Monitoras variando de 400 a 5 UMs. Esse teste como objetivo verificar a influência de uma leitura nas subsequentes.

### **4.2 Controle da qualidade do Colimador Multilâminas (MLC) usando o EPID**

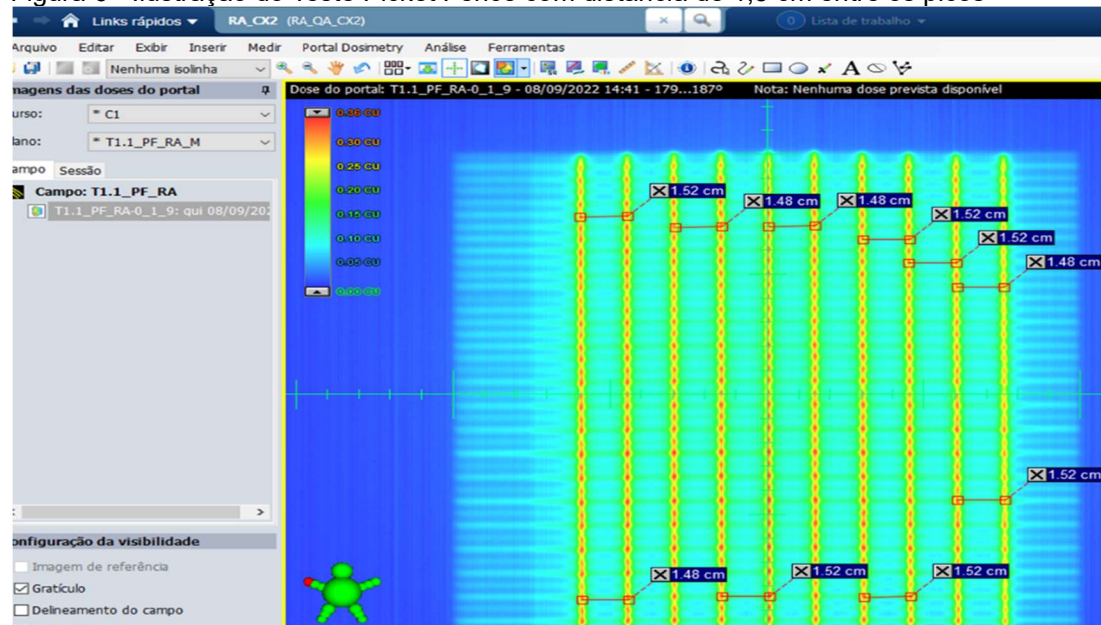
O controle de qualidade do Colimador Multilâminas é essencial para identificar possíveis desvios dos testes com relação a tolerância que possam afetar os tratamentos clínicos. Em um programa de controle de qualidade do MLC é necessário incluir testes como “Picket Fence”, e os testes de capacidade de entrega de dose em VMAT. Neste trabalho foram realizados e analisados esses testes, o período de execução e análise dos controles de qualidade do MLC foi de agosto de 2023 a abril de 2024, exceto para o teste de velocidade de lâminas que foi até setembro de 2024.

Com o objetivo de verificar o funcionamento correto do MLC e a estabilidade dos resultados obtidos alguns testes foram realizados e analisados utilizando o método de Controle Estatístico de Processo (CEP). Dentre os testes realizados foram os de posicionamento de lâminas e sincronicidade dos carros (“Picket Fence”), essa verificação foi realizada de forma estática e dinâmica com o “gantry” igual a zero ( $G = 0^\circ$ ) e de forma estática, mas em diversas angulações a fim de verificar o efeito da

gravidade sobre as lâminas ( $G = 0^\circ$ ,  $G = 90^\circ$ ,  $G = 270^\circ$  e  $G = 180^\circ$ ) e por fim esse teste foi efetuado em arcoterapia (VMAT). A tolerância para esse teste é de 1 mm, baseado no TG -142 da Associação Americana de Física Médica.

A Figura 6 ilustra um exemplo do teste “Picket Fence” que tem separação de 1,5 cm entre os picos, esse padrão obtido a partir do “Portal Dosimetry” evidencia um caso com resultado desejado, com desvios menores que 0,5 cm.

Figura 6 - Ilustração do Teste Picket Fence com distância de 1,5 cm entre os picos

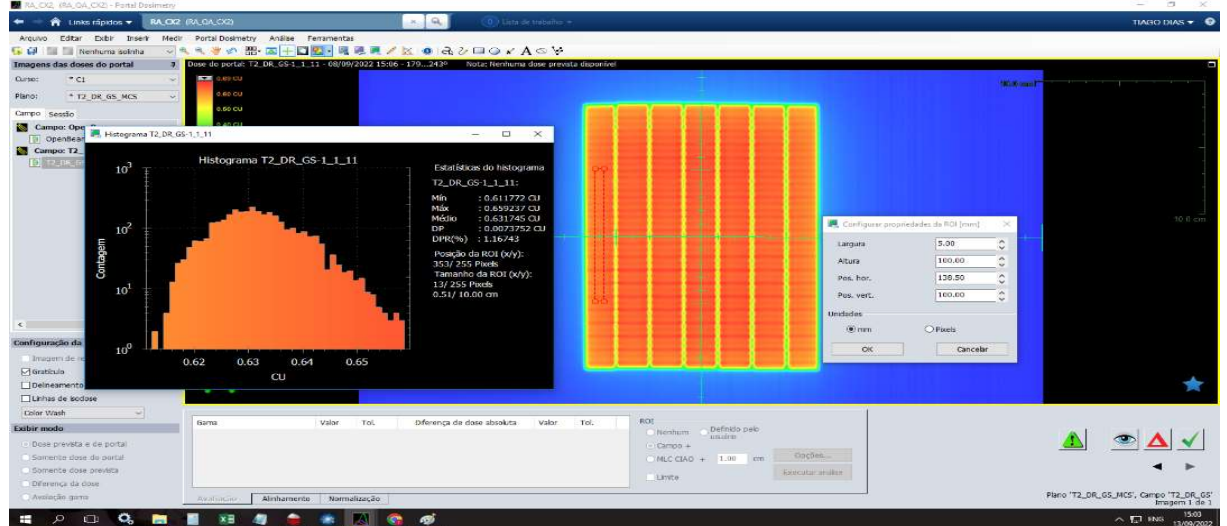


Fonte: autoria própria

Para avaliar a capacidade de entrega de dose do VMAT, um dos testes envolve variar taxa de dose e velocidade do “gantry” do acelerador linear durante o arco modulado (“Dose Rate” – “gantry Speed” - DRGS). Esse teste entrega uma dose com um campo aberto e estático e em seguida é entregue uma dose em VMAT formando várias regiões de dose que tiveram os parâmetros de taxa de dose e velocidade de “gantry” variados. Para analisar o teste compara-se a dose numa área dessa região com exatamente a mesma região de dose do campo aberto (mesma posição do ROI) e o máximo desvio entre essas regiões tem tolerância sugerida de 3 % para o desvio máximo e de 1,5 % para o desvio médio (essa tolerância é sugerida pelo fabricante). A Figura 7 mostra como o ROI é selecionado para ser comparado com a mesma área do campo aberto, em todas as bandas. Os resultados foram todos analisados com um software com um algoritmo baseado em Python, que faz todo esse processo automatizado a partir do arquivo Digital Imaging and Communications in Medicine

(DICOM), a partir dos arquivos de campo aberto e campo com as bandas de dose (29).

Figura 7 - Ilustração de como as bandas são formadas do teste DRGS



Fonte: autoria própria

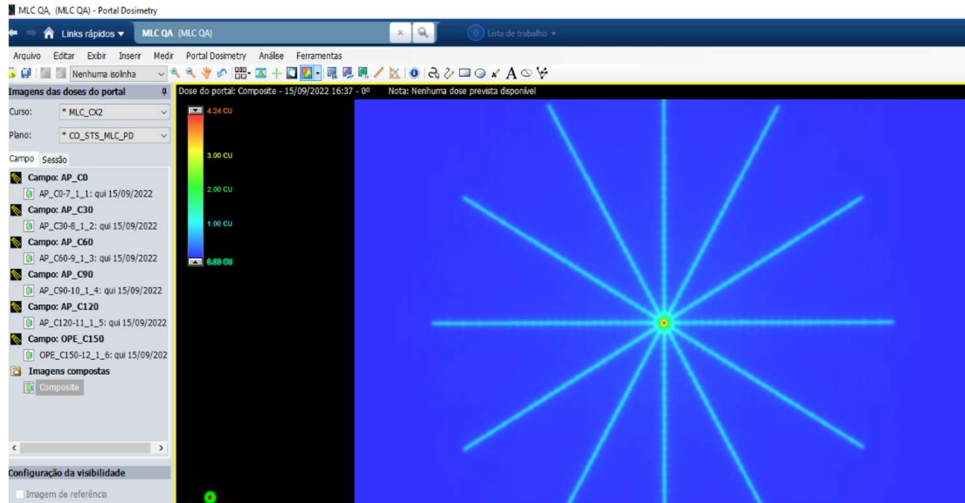
Outro teste para analisar a capacidade de entrega de dose do VMAT, diz respeito a variar taxa de dose e velocidade do MLC durante o arco modulado (“Dose Rate” e “MLC Speed”- DRMLC), que tem o objetivo de verificar a capacidade do colimador multilâminas se ajustar rapidamente durante a entrega de dose, formando várias regiões de dose para serem comparadas com o campo aberto, similar ao teste anterior. A tolerância é de 3 % para o maior desvio é de 2 % para a média das diferenças percentuais.

### 4.3 Análise do teste Start Shot usando o “Portal Dosimetry”

A verificação do isocentro de radiação da máquina pode ser analisado com o EPID. Esse teste tem uma importância crucial pois em tratamentos rotineiros seja de Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT) ou tratamento convencional 3D, o objetivo do teste é verificar se o eixo de rotação do “gantry”, mesa e colimador permanecem o mesmo, para se garantir uma precisão na entrega da dose de radiação. Aqui foi realizado o teste de rotação do colimador, que assumiu as posições de 0°, 30°, 60°, 90°, 120° e 150° com um campo estreito e  $G = 0^\circ$ , com SSD=100 cm, no eixo central do detector, com coordenadas fixadas em (0,0,0).

A Figura 8 exemplifica o resultado obtido a partir do ‘Portal Dosimetry’. Os resultados foram todos analisados com um software com um algoritmo baseado em Python(29) para as duas máquinas. A tolerância para esse teste é de 1 mm, seguindo a recomendação do TG-142.

Figura 8 - Exemplo do teste Start Shot colimador, com angulações variando de 0° a 150°, com intervalos de 30° entre as medidas



Autoria: próprio autor

#### 4.4 Fator OutPut com o “Portal Dosimetry”

A verificação do fator output, que pode ser relacionado com o fator calibração do acelerador linear é realizada diariamente com o “Portal Dosimetry” e o “Matrixx”. Este detector é um sistema de matriz bidimensional de câmaras de ionização, com 1020 detectores organizados em seu interior.

Com o EPID esse teste foi feito com 100 UMs, no eixo central do detector, coordenadas (0,0,0), um campo 10 x10 cm<sup>2</sup> e taxa de dose de 600 cGy/min. A leitura pode ser obtida em Unidades de Calibração (UC). Para o “Matrixx” esse teste é efetuado com campo de 20 x 20 cm<sup>2</sup> e SSD = 100 cm até a profundidade de medida. A tolerância sugerida para o output é 3 % com relação a “baseline”, com LA= 5 %.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Avaliação do desempenho do “Portal Dosimetry”

### 5.1.1 Linearidade da leitura com a dose

Os resultados para linearidade da resposta do “Portal Dosimetry”, em termos de Unidades de Calibração (UC) estão apresentados nas Tabelas 1 e 2 e nos Gráficos 1 e 2, para os dois aceleradores e para as energias 6 e 10 MV. O campo selecionado foi 10 x 10 cm<sup>2</sup>, taxa de dose 600 cGy/min e as leituras foram obtidas com um ROI de 5 x 5 mm<sup>2</sup> no software do “Portal Dosimetry”. Para uma melhor representação visual dos dados, as leituras foram multiplicadas por 100 para simplificar a interpretação, visto que 100 UM equivalem a 100 UC.

Tabela 1 - Linearidade da resposta do “Portal Dosimetry” em função da Unidade Monitor, para o AL 1, energias 6 e 10 MV

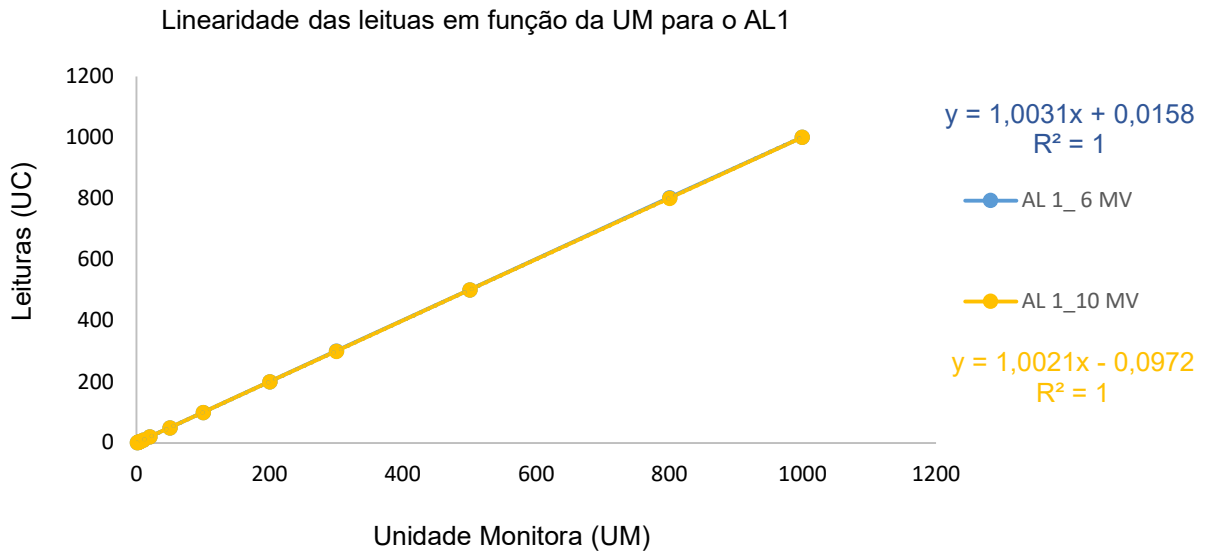
UM	6 MV Leitura (UC)	DPR (%)	UM/Leitura (UC)	10 MV Leitura (UC)	DPR (%)	UM/Leitura (UC)
1	0,988	0,414	0,988	0,970	0,393	0,970
2	1,985	0,277	0,993	2,000	0,313	1,000
3	2,998	0,269	0,999	2,990	0,271	0,997
4	3,977	0,265	0,994	3,970	0,211	0,993
5	4,971	0,245	0,994	4,980	0,193	0,996
10	9,950	0,223	0,995	9,930	0,198	0,993
20	19,913	0,218	0,996	19,850	0,162	0,993
50	50,019	0,196	1,000	49,870	0,153	0,997
100	100,320	0,201	1,003	100,010	0,144	1,000
200	200,850	0,198	1,004	200,300	0,145	1,002
300	301,180	0,196	1,004	300,500	0,139	1,002
500	501,960	0,200	1,004	500,940	0,149	1,002
800	802,880	0,197	1,004	801,400	0,147	1,002
999	1001,500	0,195	1,003	1001,120	0,175	1,002

Fonte: Autoria própria

Pela Tabela 1, é possível verificar que para o Acelerador 1, energias 6 e 10 MV, houve uma relação linear entre leitura e unidade monitor, isso pode ser observado na coluna UM/leitura. Para 1 UM selecionado tem-se desvios na ordem de 3 %, mas para

UMs maiores que 2 UM todos os desvios ficaram abaixo de 1%, o que está dentro do critério estabelecido pelos TG 198 e 142, o que caracteriza o resultado como aceitável.

Figura 9 - Ilustração gráfica representativa da linearidade da resposta do portal em função da unidade monitora



Fonte: Autoria própria

A Figura 9 mostra uma relação linear ideal, levando em conta que  $R^2=1$ . O que torna o resultado para o Acelerador 1 como aceitável.

Tabela 2 - Linearidade da resposta do “Portal Dosimetry” em função da Unidade Monitor, para o AL 2, energias 6 e 10 MV

UM	6 MV Leitura (UC)	DPR (%)	UM/Leitura (UC)	10 MV Leitura (UC)	DPR (%)	UM/Leitura (UC)
1	0,970	0,516	0,970	0,970	0,528	0,970
2	1,990	0,405	0,995	1,980	0,380	0,990
3	3,060	0,255	1,020	3,010	0,304	1,003
4	3,970	0,265	0,993	4,030	0,245	1,008
5	5,090	0,252	1,018	5,030	0,244	1,006
10	10,100	0,183	1,010	10,090	0,212	1,009
20	20,210	0,175	1,011	20,170	0,179	1,009
50	50,710	0,173	1,014	50,590	0,153	1,012
100	101,630	0,163	1,016	101,440	0,144	1,014
200	203,450	0,166	1,017	203,120	0,148	1,016

300	305,170	0,160	1,017	304,810	0,145	1,016
500	508,520	0,155	1,017	507,900	0,156	1,016
800	812,950	0,153	1,016	812,230	0,154	1,015
999	1014,180	0,152	1,015	1013,640	0,150	1,015

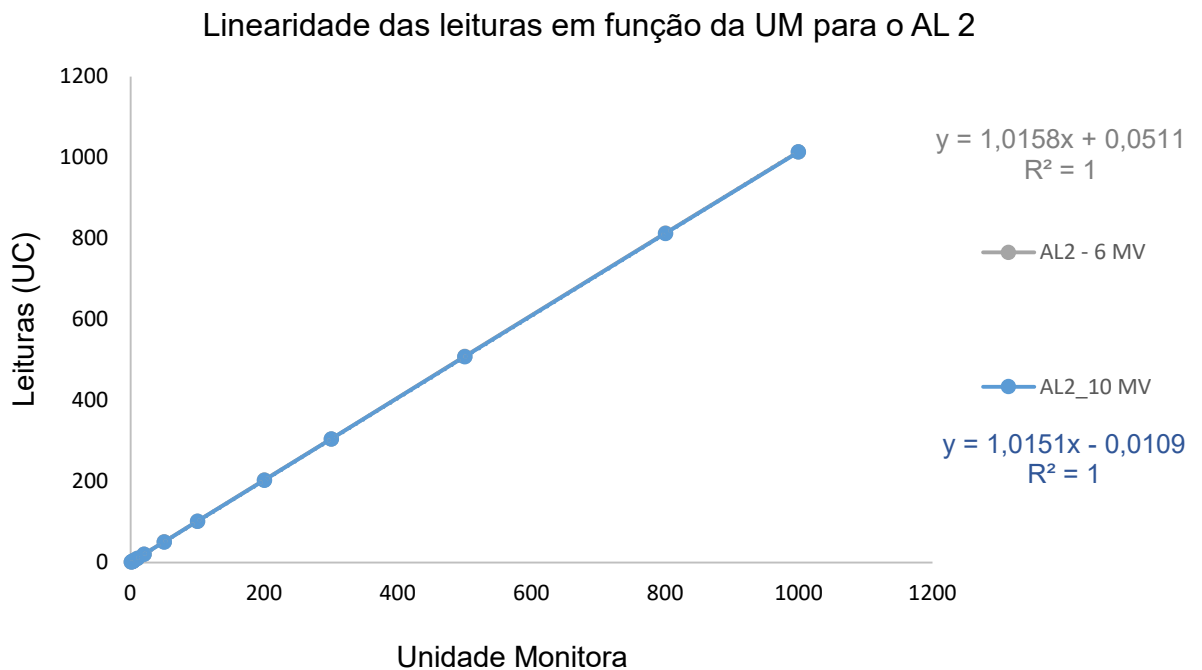
Fonte: Autoria própria

Pela Tabela 2, é possível verificar que para o Acelerador 2, energias 6 e 10 MV, houve uma relação linear entre leitura e unidade monitor, isso pode ser observado na coluna UM/leitura. Para 1 UM selecionado tem-se desvios na ordem de 3 %, mas para UMs maiores que 4 UM todos os desvios ficaram abaixo de 1%, o que está dentro do critério estabelecido pelos TG 198 e 142, o que caracteriza o resultado como aceitável.

A Figura 10 mostra uma relação linear ideal, levando em conta que  $R^2 = 1$ . O que torna o resultado para o Acelerador 2 como aceitável.

Pelas leituras coletados e processadas é possível afirmar que o “Portal Dosimetry” atende à esse pré requisito de detector apropriado.

Figura 10 - Ilustração gráfica representativa da linearidade da resposta do portal em função da unidade monitora



Fonte: Autoria própria

### 5.1.2 Reprodutibilidade

O objetivo desse teste foi avaliar a constância das leituras, foram realizadas 10 leituras consecutivas com 50 UM, com as coordenadas do detector (0,0,0), num campo de 10 x 10 cm<sup>2</sup>, taxa de dose 600 cGy/min. Para avaliação das leituras foi utilizado um ROI de 5 x 5 mm<sup>2</sup> ao longo do eixo central. As leituras foram multiplicadas por 100 para melhor apresentação. Os resultados estão representados nas Tabelas 3 e 4 e nas Figuras com mesma numeração.

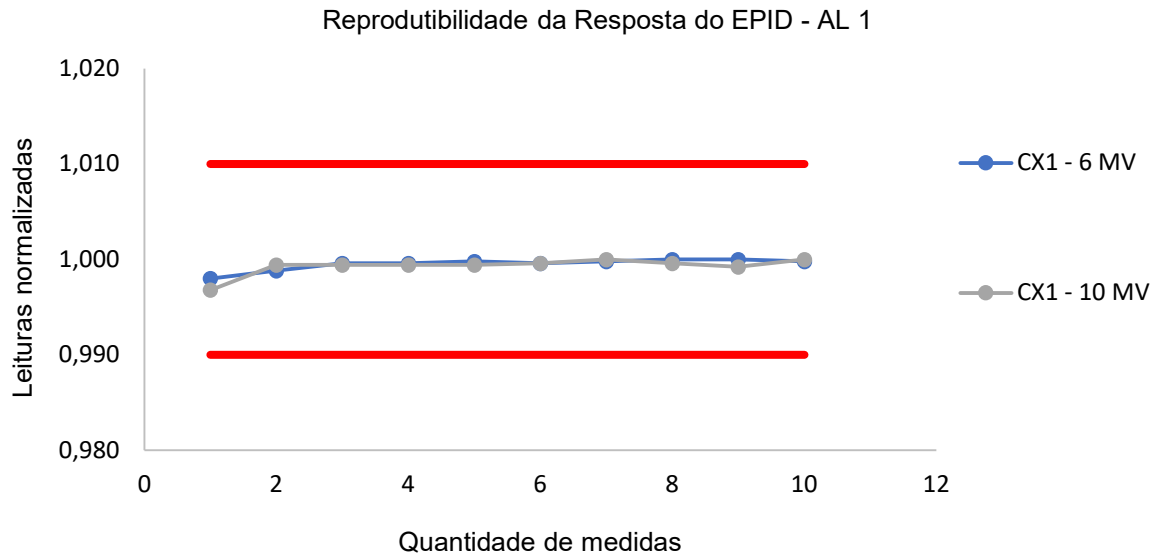
Tabela 3 - Análise da Reprodutibilidade das leituras do detector em função da Unidade Monitor para o AL1

Campo (cm <sup>2</sup> )	AL1 - 6 MV		AL1 - 10 MV	
	Leituras (UC)	DPR (%)	Leituras (UC)	DPR (%)
10 x10	49,720	0,175	49,700	0,152
10 x10	49,760	0,193	49,830	0,149
10 x10	49,800	0,198	49,830	0,162
10 x10	49,800	0,173	49,830	0,155
10 x10	49,810	0,210	49,830	0,137
10 x10	49,800	0,187	49,840	0,163
10 x10	49,810	0,182	49,860	0,167
10 x10	49,820	0,180	49,840	0,159
10 x10	49,820	0,176	49,820	0,156
10 x10	49,810	0,184	49,860	0,155
Mínimo	49,720		49,700	
Máximo	49,820		49,860	
Média	49,795		49,824	
Desvio Padrão	0,031		0,046	

Fonte: Autoria Própria

Pela Tabela 3, que contém os dados do AL1 para 6 e 10 MV, é possível notar uma variação menor que 0,5 %, o que fica mais evidente na Figura 11.

Figura 11 - Gráfico da reprodutibilidade das leituras do “Portal Dosimetry” em função da quantidade de medidas realizadas, as barras vermelhas delimitam a tolerância do teste.



Fonte: Autoria própria

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para o AL 2, mostrando um desvio máximo menor que 0,5 %, o que fica mais bem visualizado na Figura 4.

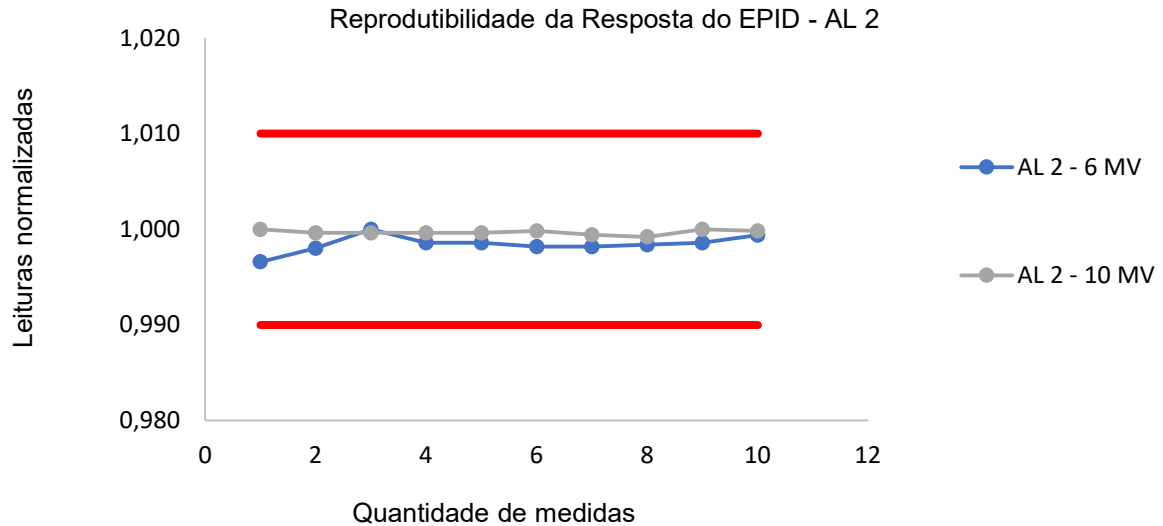
Tabela 4 - Análise da Reprodutibilidade das leituras do detector em função da Unidade Monitor, para o AL2

Campo (cm2)	AL2 - 6 MV		AL2 -10 MV	
	Leituras (UC) x100	DPR (%)	Leituras (UC) x 100	DPR (%)
10 x10	49,650	0,181	50,497	0,150
10 x10	49,720	0,185	50,484	0,150
10 x10	49,820	0,187	50,481	0,153
10 x10	49,750	0,171	50,480	0,152
10 x10	49,750	0,180	50,479	0,162
10 x10	49,730	0,159	50,485	0,152
10 x10	49,730	0,179	50,469	0,151
10 x10	49,740	0,164	50,461	0,157
10 x10	49,750	0,169	50,502	0,148
10 x10	49,790	0,170	50,489	0,143
Mínimo	49,650		50,460	
Máximo	49,820		50,500	

Média	49,743	50,483
Desvio Padrão	0,044	0,013

Fonte: Autoria Própria

Figura 12 - Gráfico da reprodutibilidade das leituras do “Portal Dosimetry” em função da quantidade de medidas realizadas, as barras vermelhas delimitam a tolerância do teste



Fonte: Autoria própria

Pela Tabela 4 e Figura 12 apresentados acima, é possível observar que há uma variação menor que 0,5 % dos dados apresentados, o que caracteriza o resultado como satisfatório, visto que está dentro dos critérios do TG 142(14) que prevê desvio de até 1%. Com isso se pode afirmar que o “Portal Dosimetry” apresenta uma boa reprodutibilidade em suas medidas, o que o caracteriza como adequado nesse quesito.

### 5.1.3 Dependência Angular

O objetivo desse teste foi analisar a dependência angular do detector em função da angulação do “gantry”, como mostra as Tabelas 5 e 6 e as Figuras 5 e 6. O campo utilizado foi 10 x 10 cm<sup>2</sup>, taxa de dose de 600 cGy/min e a irradiação feita com 50 Unidades Monitoras e a obtenção da leitura no software do Portal foi um ROI de 5 x 5 mm<sup>2</sup>. As leituras foram normalizadas pelo valor obtido com o “gantry” a 0°.

A Tabela 5 mostra que o desvio máximo ocorre na angulação de 200°. Os desvios maiores ocorrem no intervalo de, aproximadamente 100 a 250°, como observado também na literatura(10,11).

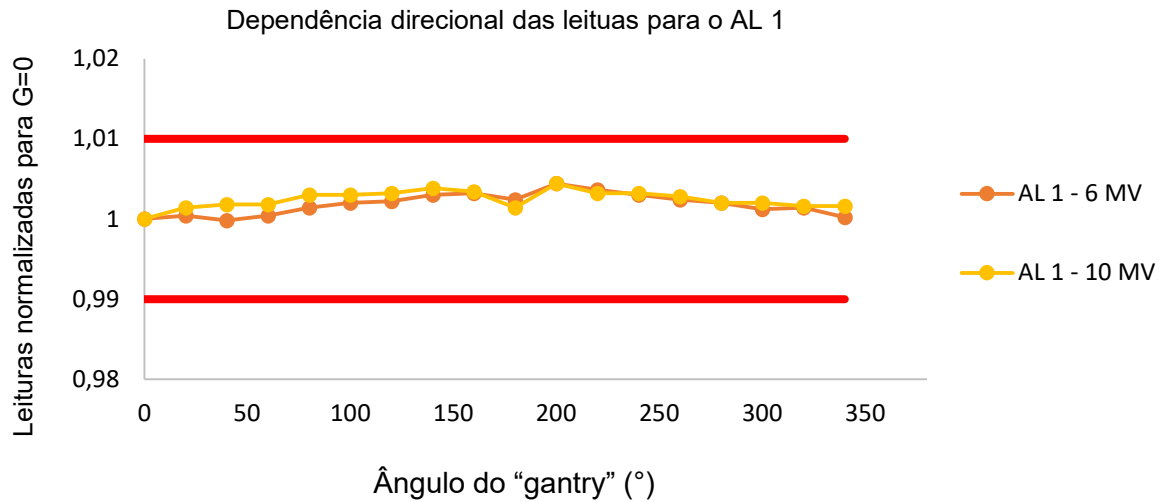
Tabela 5 - Dados para avaliar a dependência direcional para o AL1.

Ângulo "gantry" (°)	AL1 – 6 MV		AL1 – 10 MV	
	Leitura Normalizada (UC)	DPR (%)	Leitura Normalizada (UC)	DPR (%)
0	1,000	0,229	1,000	0,157
20	1,000	0,245	1,001	0,167
40	1,000	0,239	1,002	0,201
60	1,000	0,235	1,002	0,197
80	1,001	0,232	1,003	0,194
100	1,002	0,288	1,003	0,184
120	1,002	0,294	1,003	0,189
140	1,003	0,284	1,004	0,215
160	1,003	0,279	1,003	0,204
180	1,002	0,252	1,001	0,183
200	1,004	0,265	1,004	0,204
220	1,004	0,260	1,003	0,176
240	1,003	0,208	1,003	0,179
260	1,002	0,198	1,003	0,174
280	1,002	0,226	1,002	0,167
300	1,001	0,227	1,002	0,160
320	1,001	0,225	1,002	0,170
340	1,000	0,192	1,002	0,168
Mínimo	1,000		1,000	
Máximo	1,004		1,004	
Média	1,002		1,002	
Desvio	0,001		0,001	

Fonte: Autoria Própria

A Figura 13 evidencia a faixa de maiores desvios, e nota-se que os valores estão abaixo da tolerância, delimitados pela barra vermelha do gráfico.

Figura 13 - Gráfico para ilustrar a dependência das leituras obtidas com o portal em função do ângulo do “gantry”. As barras vermelhas delimitam as tolerâncias do teste



Fonte: autoria própria

A Tabela 6 mostra que o desvio máximo ocorre na angulação de 200°, como para AL 1. Os desvios maiores ocorrem no intervalo de, aproximadamente 100 a 250°, como observado também na literatura(11).

Tabela 6 - Dados para avaliar a dependência direcional para o AL 2.

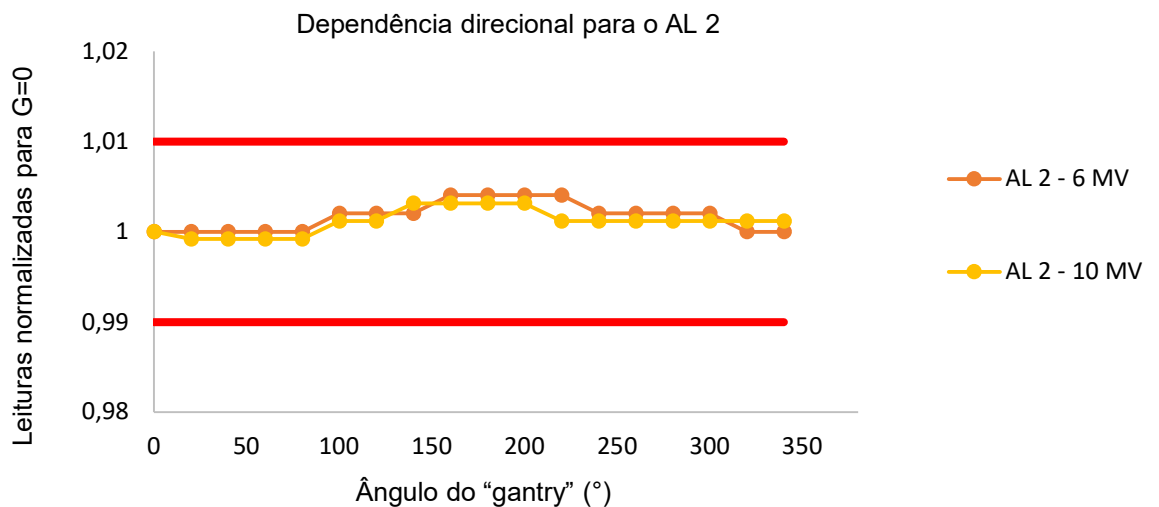
Ângulo “gantry” (°)	AL 2 – 6 MV		AL 2 – 10 MV	
	Leitura Normalizada (UC)	DPR (%)	Leitura Normalizada (UC)	DPR (%)
0	1,000	0,141	1,000	0,158
20	1,000	0,154	0,999	0,185
40	1,000	0,139	0,999	0,194
60	1,000	0,142	0,999	0,19
80	1,000	0,157	0,999	0,182
100	1,002	0,155	1,001	0,187
120	1,002	0,14	1,001	0,141
140	1,002	0,152	1,003	0,183
160	1,004	0,15	1,003	0,181

180	1,004	0,141	1,003	0,184
200	1,004	0,141	1,003	0,172
220	1,004	0,142	1,001	0,172
240	1,002	0,136	1,001	0,172
260	1,002	0,144	1,001	0,166
280	1,002	0,141	1,001	0,175
300	1,002	0,142	1,001	0,166
320	1,000	0,157	1,001	0,166
340	1,000	0,144	1,001	0,179
Mínimo	1,000		0,999	
Máximo	1,004		1,003	
Média	1,002		1,001	
Desvio	0,002		0,001	

Fonte: Autoria Própria

Pela Figura 14, é possível notar que os desvios estão abaixo da tolerância delimitada pelas barras vermelhas. Mesmo ocorrendo um pequeno desvio entre as angulações de 100 a 250°, estes não passam de 0,5 %, o que os caracteriza como aceitáveis para os dois aceleradores, segundo recomendações do TG 198 e TG 142(14,15). Os resultados foram similares para o EPID dos dois aceleradores.

Figura 14 - Gráfico para ilustrar a dependência das leituras obtidas com o portal em função do angulo do “gantry”. As barras vermelhas delimitam as tolerâncias do teste

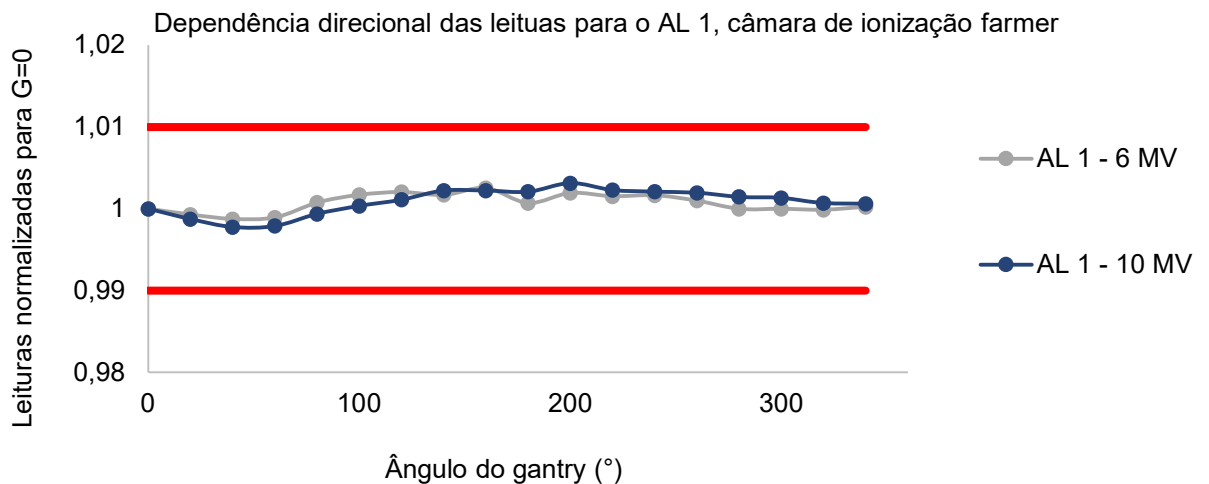


Fonte: autoria própria

Com o objetivo de verificar se o desvio nessa faixa de angulação era devido ao “Portal Dosimetry” ou ao próprio acelerador, foi realizado as mesmas leituras com uma Câmara de Ionização (CI) tipo Farmer, modelo FC – 65P e constatou -se o mesmo padrão observado com o EPID.

A Figura 15 ilustra essas medidas, para o AL 1, com desvios maiores na faixa de 100 a 250°, aproximadamente, mas menores que 0,5 %.

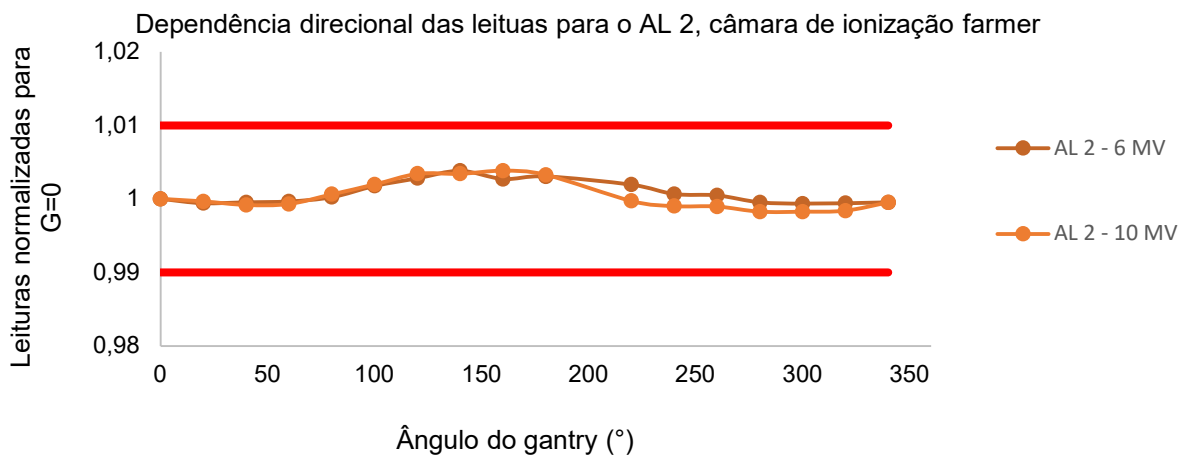
Figura 15 - Gráfico para ilustrar a dependência das leituras obtidas com uma CI em função do ângulo do “gantry”, para o AL 1. As barras vermelhas delimitam as tolerâncias do teste



Fonte: autoria própria

A Figura 16 mostra as leituras medidas a partir de uma CI, para o AL 2, com desvios maiores na mesma faixa de angulação do AL 1, com desvios com relação a angulação zero menores que 0,5 %.

Figura 16 - Gráfico para ilustrar a dependência das leituras obtidas com uma CI em função do ângulo do “gantry”, para o AL 2. As barras vermelhas delimitam as tolerâncias do teste



Fonte: autoria própria

#### 5.1.4 Influência da resposta do “Portal Dosimetry” com a taxa de dose

Para verificar a influência da resposta do detector com uma mudança da taxa de dose, foram realizadas aquisições com todas as taxas de dose dos aceleradores e para as energias 6 e 10 MV. Com coordenadas do detector em (0,0,0), campo 10 x 10 cm<sup>2</sup>, com taxas de dose variando entre 100 cGy/min a 600 cGy/min. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 7 e 8 e nos Gráficos com a mesma numeração.

Tabela 7 - Resultado das medidas para verificar a influência da taxa de dose nas leituras do “Portal Dosimetry” para o AL1

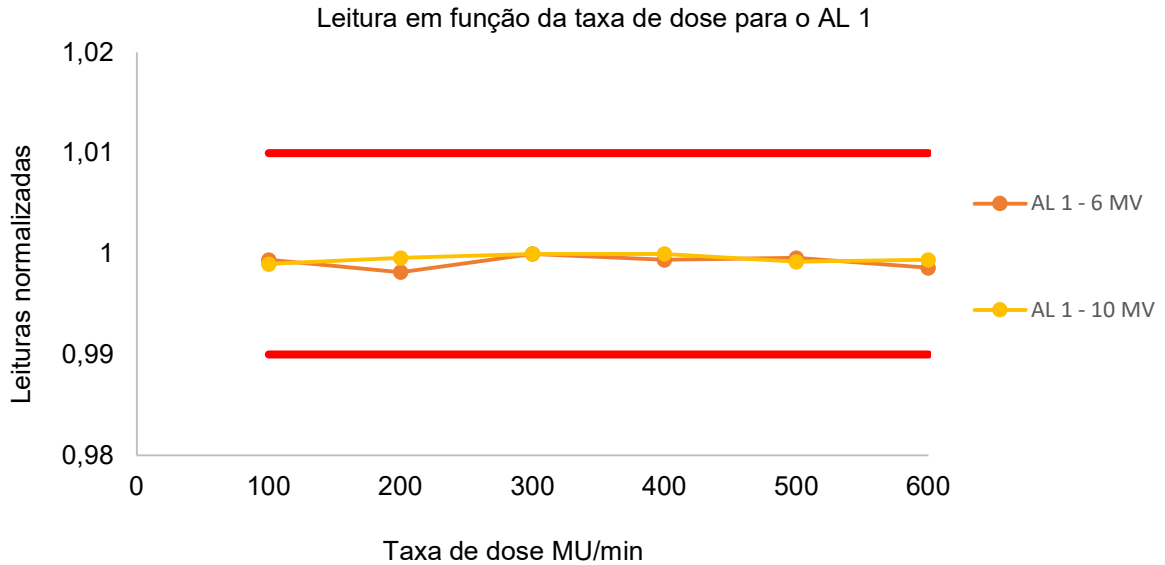
Taxa de Dose (cGy/min)	AL1 – 6 MV		AL1 – 10 MV	
	Leituras (UC)	DPR (%)	Leituras (UC)	DPR (%)
100	0,999	0,386	0,999	0,350
200	0,998	0,382	1,000	0,370
300	1,000	0,353	1,000	0,332
400	0,999	0,352	1,000	0,332
500	1,000	0,331	0,999	0,320
600	0,999	0,309	0,999	0,322
Média	0,999		1,000	
Desvio Padrão	0,001		0,0004	

Fonte: Aatoria Própria

Pela Tabela 7 é possível observar, para o Acelerador 1, que o desvio máximo é menor 0,3 %.

A Figura 17 evidencia o resultado, com as linhas vermelhas do gráfico delimitando um desvio de 1 %.

Figura 17 - Resposta do “Portal Dosimetry” em função da taxa de dose para o AL 1. As linhas vermelhas delimitam o desvio de 1 %.



Fonte: autoria própria

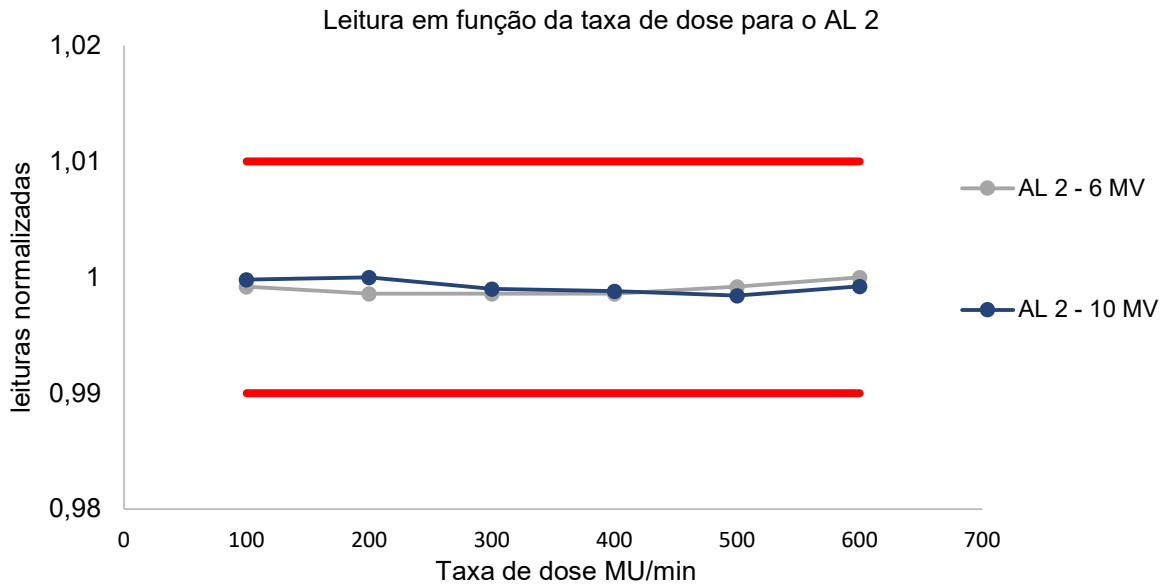
Pela Tabela 8 é possível observar, para o Acelerador 2, que o desvio máximo é menor 0,3 %.

Tabela 8 - Resultado das medidas para verificar a influência da taxa de dose nas leituras do “Portal Dosimetry” para o AL2

Taxa de Dose (cGy/min)	AL 2 – 6 MV		AL 2 – 10 MV	
	Leituras (UC)	DPR (%)	Leituras (UC)	DPR (%)
100	0,999	0,181	1,000	0,206
200	0,999	0,174	1,000	0,211
300	0,999	0,156	0,999	0,153
400	0,999	0,156	0,999	0,152
500	0,999	0,149	0,998	0,158
600	1,000	0,178	0,999	0,167
Média	0,999		0,999	
Desvio Padrão	0,0006		0,0006	

Fonte: Autoria Própria

Figura 18 - Resposta do “Portal Dosimetry” em função da taxa de dose para o AL 2. As linhas vermelhas delimitam o desvio de 1 %.



Fonte: autoria própria

Pelas Tabelas 7 e 8 e pelas Figuras 17 e 18, é possível observar a independência da leitura do “Portal Dosimetry” com a taxa de dose, tendo – se variação máxima entre as medidas menor que 0,5 % (Para os dois aceleradores e energias), caracterizando o resultado como aceitável de acordo com o TG 142.

### 5.1.5 Resposta do EPID em função da distância

O objetivo desse teste foi avaliar se as leituras obtidas no EPID seguem a Lei do Inverso do Quadrado da Distância (IQD), para isso foram realizadas leituras em várias distancias fonte detector com 50 UM, as coordenadas iniciais do detector (0,0,0), que equivale SSD = 100 cm, num campo de 10 x 10 cm<sup>2</sup>, taxa de dose 600 cGy/min. As distâncias foram: 100, 110, 130 e 150 cm. Para avaliação das leituras foi utilizado um ROI de 5 x 5 mm<sup>2</sup> ao longo do eixo central. Para avaliar esse quesito foi traçado um gráfico das leituras em função do inverso do quadrado da distância. Os dados estão representados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Leitura do EPID em função da Distância Fonte Superfície do detector, para o AL 1

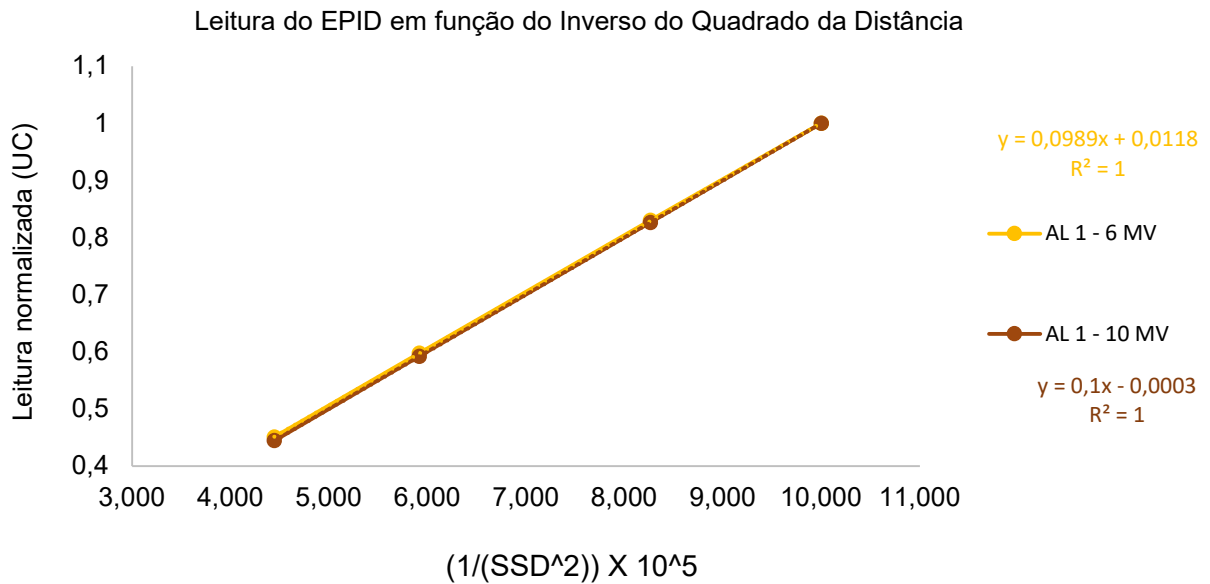
Taxa de Dose (cGy/min)	AL 1 – 6 MV		AL 1 – 10 MV	
	Leituras (UC)	DPR (%)	Leituras (UC)	DPR (%)

100	1,000	0,195	1,000	0,163
110	0,830	0,190	0,826	0,146
130	0,598	0,250	0,592	0,162
150	0,451	0,248	0,444	0,166

Fonte: autoria própria

A partir da Tabela 9 foi confeccionado o gráfico para o Acelerador 1:

Figura 19 - Gráfica da leitura obtido do portal em função do inverso do quadrado da distância para AL 1



Fonte: autoria própria

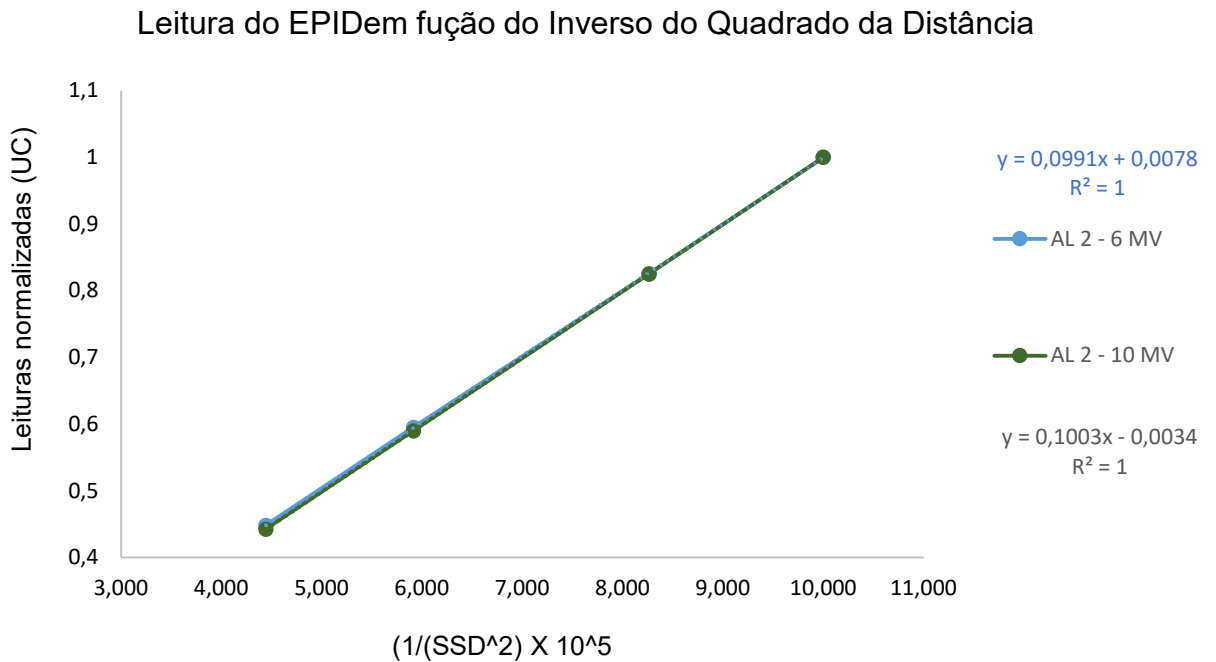
Tabela 10 - Leitura do EPID em função da Distância Fonte Superfície do detector, para o AL2

Taxa de Dose (cGy/min)	AL 2 – 6 MV		AL 2 – 10 MV	
	Leituras (UC)	DPR (%)	Leituras (UC)	DPR (%)
100	1,000	0,192	1,000	0,168
110	0,826	0,190	0,825	0,168
130	0,595	0,210	0,590	0,179
150	0,448	0,219	0,443	0,181

Fonte: autoria própria

A partir da Tabela 10 foi confeccionado o gráfico para o Acelerador 2:

Figura 20 - Gráfica da leitura obtido do portal em função do inverso do quadrado da distância para AL 1



Fonte: autoria própria

A partir da Figuras 19 e 20 é possível concluir que a leitura varia com o Inverso do quadrado da distância, como esperado. As equações da reta mostram isso pelo valor de  $R^2 = 1$  para ambos os aceleradores.

### 5.1.6 Efeito Memória

Para verificar a influência da resposta do detector em medidas sucessivas, o efeito memória, realizou-se algumas irradiações com variação de UM e tamanho de campo, leituras mais altas e com menores valores de UM. Com coordenadas do detector em (0,0,0), taxa de dose a 600 cGy/min. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Avaliação da influência das leituras iniciais em medidas sucessivas, para o AL 1

Campo (cm <sup>2</sup> )	AL 1- 6 MV			AL 1- 10 MV	
	UM	Leitura (UC)	DPR (%)	Leitura (UC)	DPR (%)
10x10	400	400,700	0,124	401,000	0,141
10x10	100	100,000	0,129	100,100	0,148

10x10	5	5,000	0,203	5,000	0,241
20x20	10	10,800	0,131	1,100	0,155
10x10	10	9,900	0,161	9,900	0,207
20x20	100	109,200	0,080	110,000	0,071
25x25	10	11,100	0,164	11,200	0,133

Fonte: autoria própria

Tabela 12 – Avaliação da influência das leituras iniciais em medidas sucessivas, para o AL 2

Campo (cm <sup>2</sup> )	AL 2- 6 MV			AL 2- 10 MV	
	UM	Leitura (UC)	DPR (%)	Leitura (UC)	DPR (%)
10x10	400	401,300	0,145	407,729	0,177
10x10	100	100,100	0,152	101,630	0,174
10x10	5	4,900	0,222	5,014	0,299
20x20	10	10,800	0,122	11,077	0,151
10x10	10	9,900	0,170	10,063	0,204
20x20	100	109,200	0,077	111,521	0,079
25x25	10	11,100	0,135	11,309	0,158

Fonte: autoria própria

A partir das Tabelas 11 e 12 é possível notar, para o AL1 e AL2 que as leituras estão de acordo com o esperado, conforme as leituras obtidas para linearidade e fator campo, sendo assim o detector não apresentou efeito memória que possa influenciar no resultado das leituras, o que o caracteriza como aceitável.

Os resultados apresentados permitiram concluir que, os testes que foram realizados para caracterização dosimétrica do PD tais como linearidade da resposta, reprodutibilidade, dependência angular, influência da taxa de dose, efeito memória, e inverso do quadrado da distância, tiveram seus objetivos atingidos.

No teste de linearidade da resposta, os resultados obtidos tiveram um desvio menor que 1 % para UM maior que 1. Para o teste de reprodutibilidade, os resultados tiveram uma variação máxima menor que 0,5 %. No teste de dependência angular o maior desvio foi de 0,3 %, com relação à angulação de 0° e como este valor foi similar ao medido com uma câmara de ionização, essa diferença pode estar relacionado ao

próprio peso do “gantry”. A taxa de dose não teve influência significativa nas leituras do PD, com desvio máximo entre as leituras de 0,2 %, o que é considerado aceitável. As leituras obedeceram à lei do inverso do quadrado da distância, sendo que a reta traçada entre os pontos obteve uma relação perfeita, o que caracteriza esse resultado como aceitável. E por fim, o efeito memória, a verificação da influência das leituras nas subseqüentes, foi avaliado como aceitável. Os resultados foram similares para o AL 1 e AL 2, evidenciando uma similaridade entre as duas máquinas.

## **5.2 Controle da Qualidade do MLC**

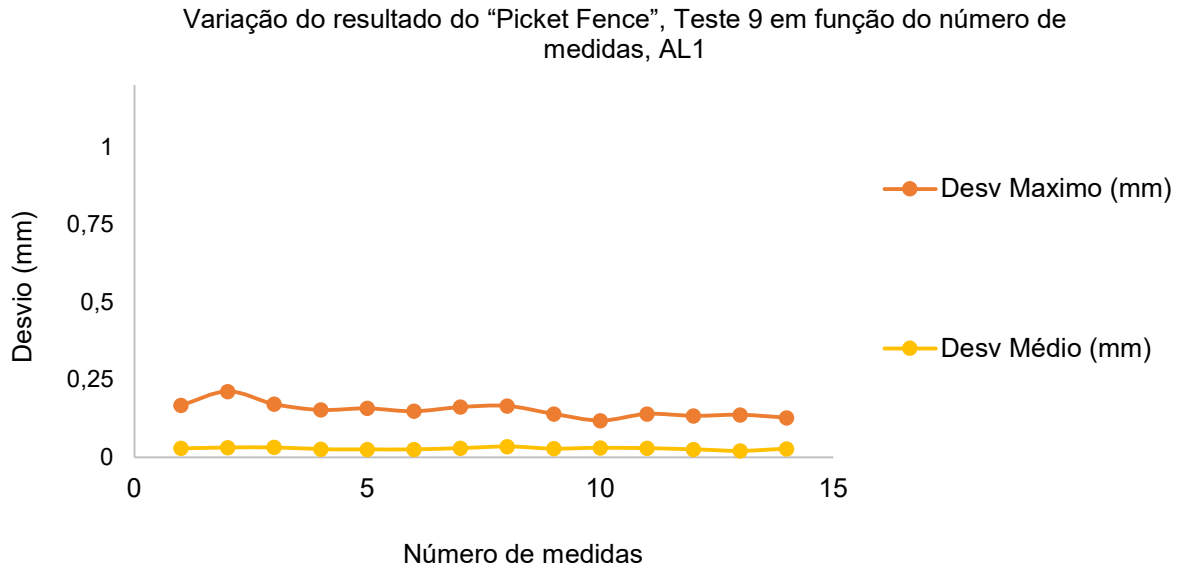
O controle de qualidade do Colimador Multilâminas é fundamental para identificar e corrigir possíveis variações que possam afetar os tratamentos clínicos.

Para verificar o posicionamento de lâminas, um teste essencial é o “Picket Fence”, que pode ser realizado de forma estática ou dinâmica, este último podendo ser executado em radioterapia modulada em arco. Este teste foi executado em várias configurações: de forma dinâmica com “gantry” e colimador 0°; de forma estática com o “gantry” nas angulações 0, 90, 270 e 180 graus e por fim foi efetuado em Radioterapia Modulada em Arco (VMAT).

A Figura 14 mostra os dados obtidos para o desvio médio e desvio máximo, em mm, do posicionamento das lâminas com o teste sendo executado pelo acelerador AL 1 em modo dinâmico, esse teste está disponível no site do fabricante(24), e com o nome “DMLC QA Test Patterns and Procedures Guide”, obtido ao longo do período analisado, nesse conjunto de testes o mesmo vem nomeado como “Test 9 – Continuous Stripes”. Todos os testes apresentados de MLC foram avaliados pelo software(29).

Pela Figura 21 é possível notar que o desvio máximo do teste foi menor que 0,25 mm, abaixo da tolerância de 1 mm.

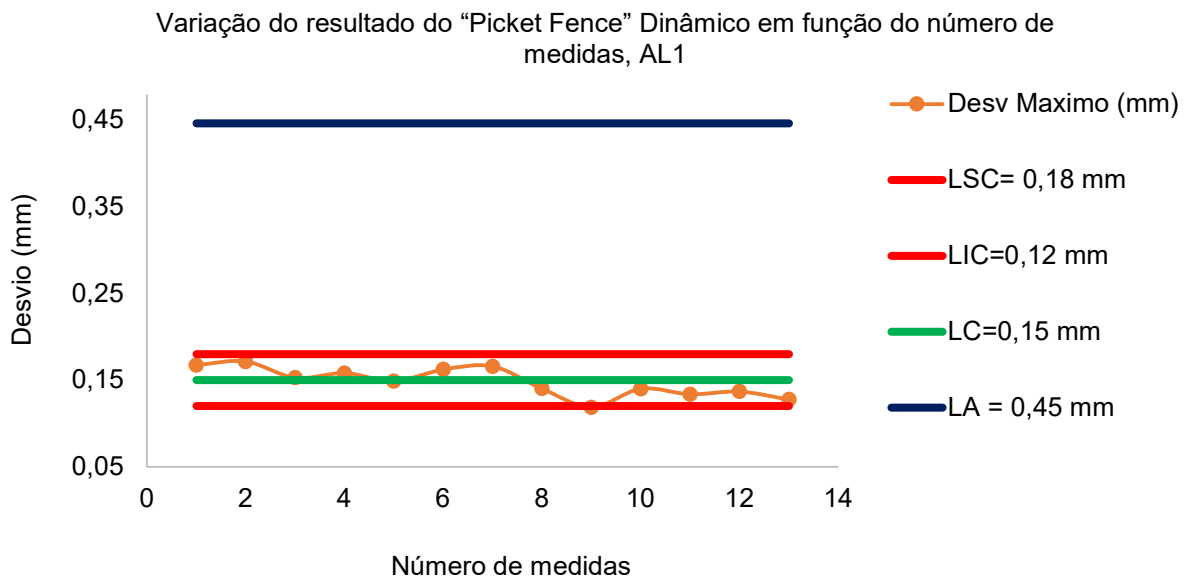
Figura 21 - Resultado do “Picket Fence” realizado de forma dinâmica em função do número de medidas



Fonte: autoria própria

A Figura 22 apresenta os dados a partir da análise feita pelo Controle Estatístico de Processo, com as legendas apresentando o Limite Central (LC); Limite Inferior de Controle (LIC); Limite Superior de Controle (LSC) e Limite de Ação (LA), considerando os valores de LSC de controle como a tolerância do teste seguindo a metodologia baseada em processo apresentada pelo TG 218(22).

Figura 22 - Controle Estatístico de Processo do teste “Picket Fence” Dinâmico para o AL 1



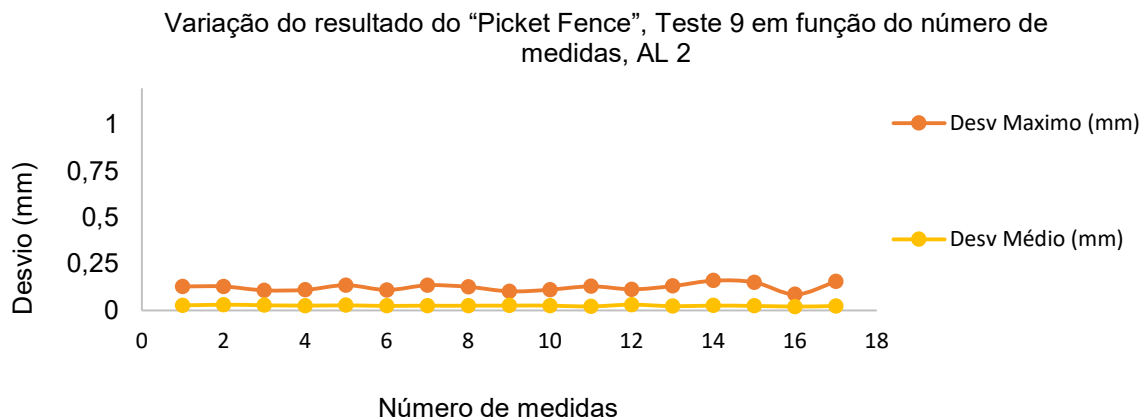
Fonte: autoria própria

Devido a pouca variabilidade do resultado, a tolerância do teste baseada em Controle Estatístico de Processo (CEP) pode ser definida em 0,18 mm, com Limite de Ação de 0,45 mm, este último é menor que metade do valor sugerido pela literatura, este limite é menor que metade da tolerância do teste, pelo TG 142(15).

A Figura 23 mostra os dados do desvio médio e desvio máximo, em mm, do posicionamento das lâminas com o teste sendo executado pelo acelerador AL 2 em modo dinâmico, nas mesmas condições do AL 1.

Pela Figura 16 é possível observar que o desvio máximo do teste foi menor que 0,25 mm, abaixo da tolerância de 1 mm.

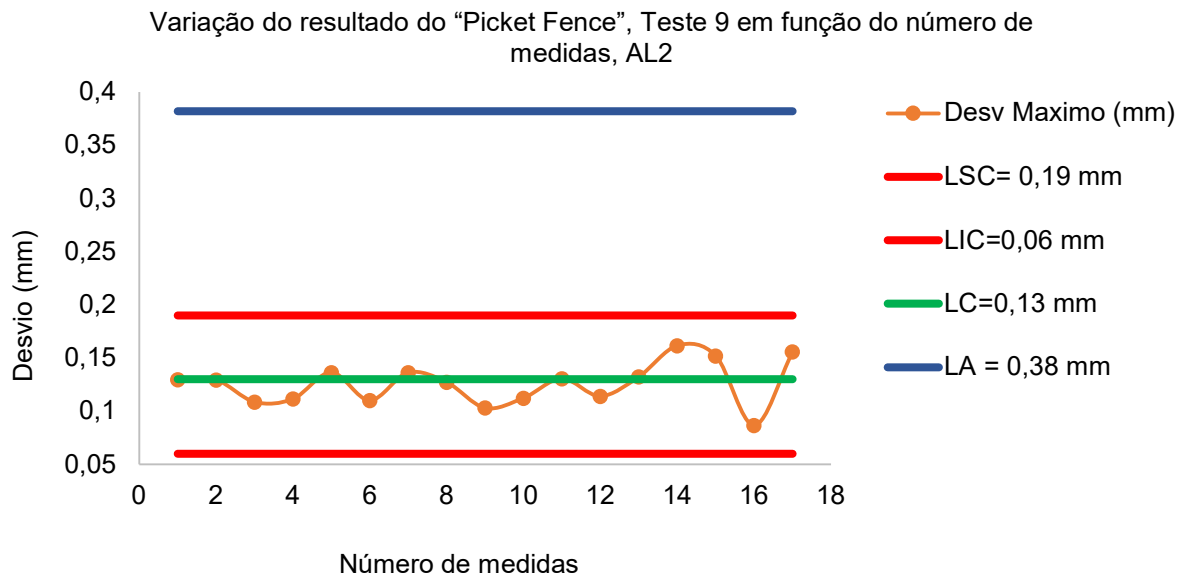
Figura 23 Resultado do “Picket Fence” realizado de forma dinâmica em função do número de medidas



Fonte: autoria própria

A Figura 24 mostra os dados a partir da análise feita pelo Controle Estatístico de Processo, dos quais se pode notar que o desvio médio foi de 0,13 mm, com a tolerância do teste representado pelo LSC de 0,19 mm e LA de 0,38 mm.

Figura 24 - Controle Estatístico de Processo do teste “Picket Fence” dinâmico para o AL 2



Fonte: autoria própria

Os resultados para o teste “Picket Fence” executado em modo dinâmico evidenciam um desvio máximo de posicionamento das lâminas menor que 0,25 mm para as duas máquinas, com o valor médio 0,15 mm e 0,13 mm, respectivamente para o AL 1 e AL 2, com esse valor obtido a partir do CEP. O desvio padrão dos dados brutos foi de 0,02 e 0,03 mm e a tolerância a partir de análise estatística foi de 0,18 e 0,19 mm bem abaixo da tolerância sugerida pelo TG 142(14), que é de 1 mm. Mesmo o Limite de Ação, de 0,45 e 0,38 mm, resulta em um valor que é menor que metade dessa tolerância, isso sugere que definir limites institucionais, a partir de uma análise estatística é adequado e pode evitar que esses parâmetros saiam do controle sem ser percebidos. Uma vez obtido esses parâmetros de controle, isso pode auxiliar a tomada de decisão de quando o MLC precisa ser recalibrado ou passar por alguma manutenção. Daniel e colaboradores e Sandra e colaboradores(30,31) estudaram o posicionamento de lâminas com outro modelo de MLC (“Agility”) utilizando esse conceito para obter limites de controle institucionais e obtiveram valores menores que 0,5 mm.

A Tabela 13 resume os valores encontrados para os limites de controle para as duas máquinas. Nela pode-se notar a similaridade entre os resultados das duas entre as duas máquinas.

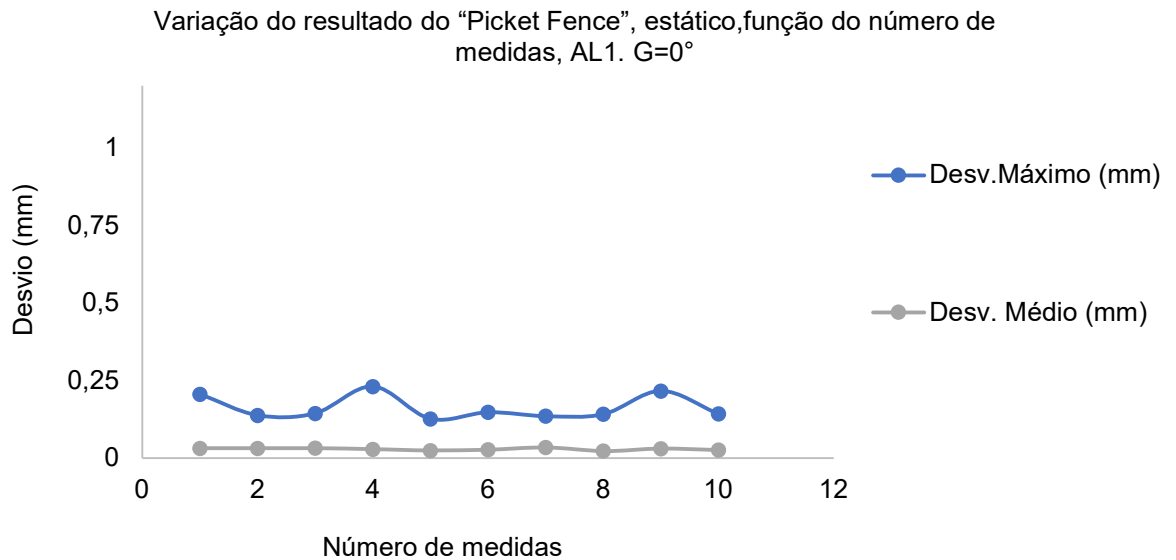
Tabela 13 – resumo dos valores encontrados para os limites de controle para o PF, AL1 e AL2

Limites de controle	AL 1	AL 2	Tolerância (mm)
LSC (mm)	0,18	0,19	1,0
LIC (mm)	0,12	0,06	
LC (mm)	0,15	0,13	
LA (mm)	0,45	0,38	

Fonte: autoria própria

Os resultados dos testes a seguir obtidos do teste “Picket Fence” em função do ângulo de “gantry” para uma possível interferência da gravidade no MLC. A Figura 25 mostra o resultado do teste PF estático para  $G = 0^\circ$  e AL 1, os valores observados são para desvio médio e máximo, conforme legendas do gráfico. Nele se observa um desvio máximo de 0,23 mm.

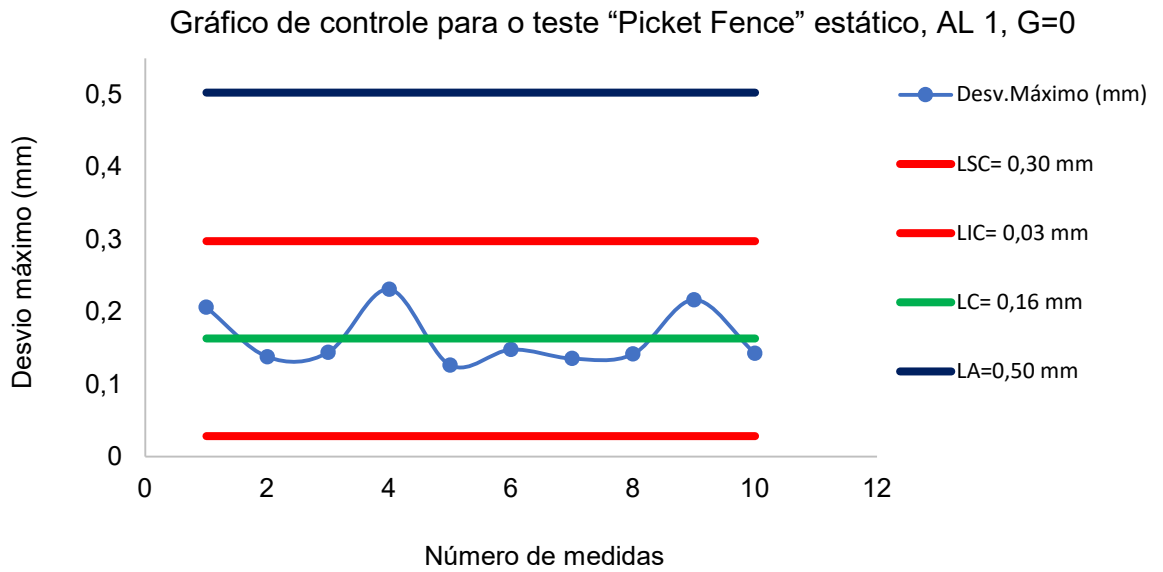
Figura 25 - Resultado do “Picket Fence” estático para o AL 1,  $G = 0^\circ$



Fonte: autoria própria

A Figura 26 apresenta o CEP do desvio máximo para o teste de “Picket Fence” estático,  $G=0^\circ$ . A partir da Figura 19 nota-se que o valor médio do desvio máximo para o teste foi de 0,16 mm, com a tolerância sendo de 0,30 mm e o LA no valor de 0,50 mm, metade do valor de tolerância sugerido pela literatura.

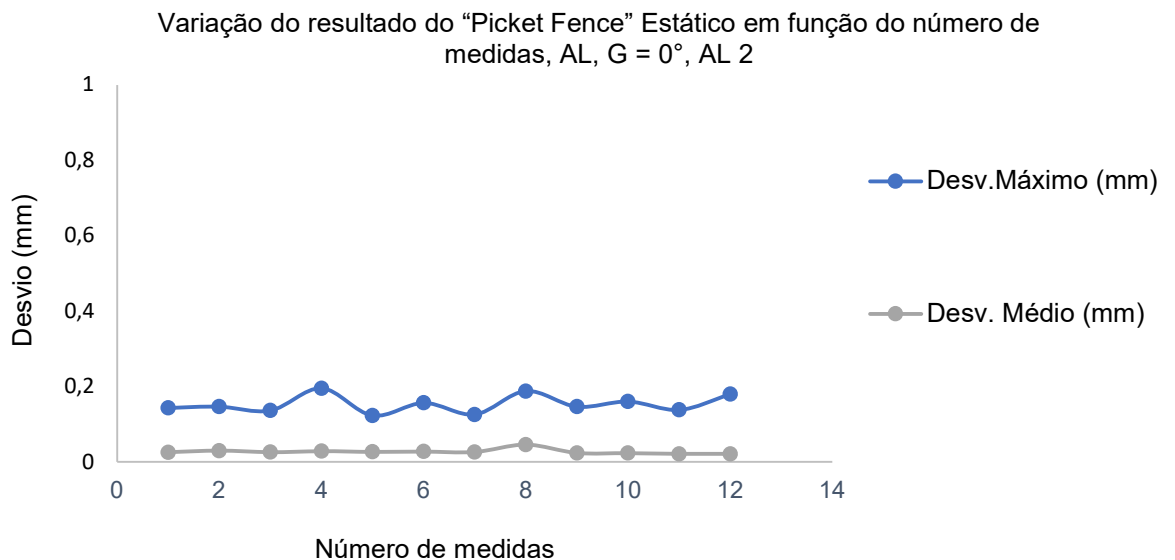
Figura 26 - Gráfico de Controle para teste de “Picket Fence” estático  $G = 0^\circ$



Fonte: autoria própria

A Figura 27 mostra o resultado do teste “Picket Fence” estático para  $G = 0^\circ$  e AL 2, os valores observados são para desvio médio e máximo. O desvio máximo para esse teste no AL 2 foi menor que 0,25 mm, abaixo da tolerância.

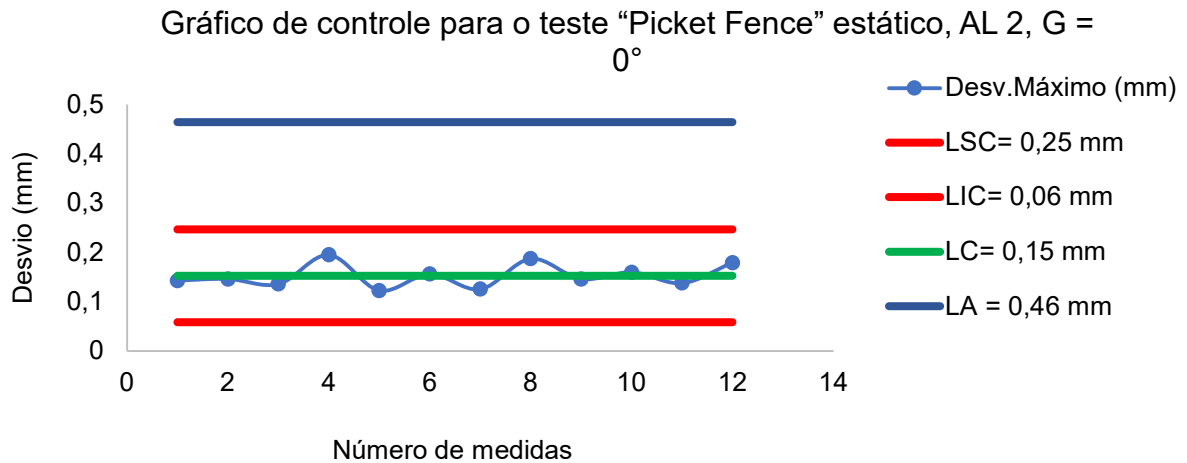
Figura 27 - Resultado do “Picket Fence” estático para o AL 2,  $G = 0^\circ$



Fonte: autoria própria

A Figura 28 ilustra o resultado do CEP para esse teste, com os valores legendados no gráfico. A partir dessa figura observa-se que o valor médio do desvio máximo para o teste foi de 0,15 mm, com a tolerância sendo de 0,25 mm e o LA no valor de 0,46 mm, mais uma vez relativamente menor que a tolerância da literatura.

Figura 28 - Gráfico de Controle para o teste PF estático G = 0°, AL 2

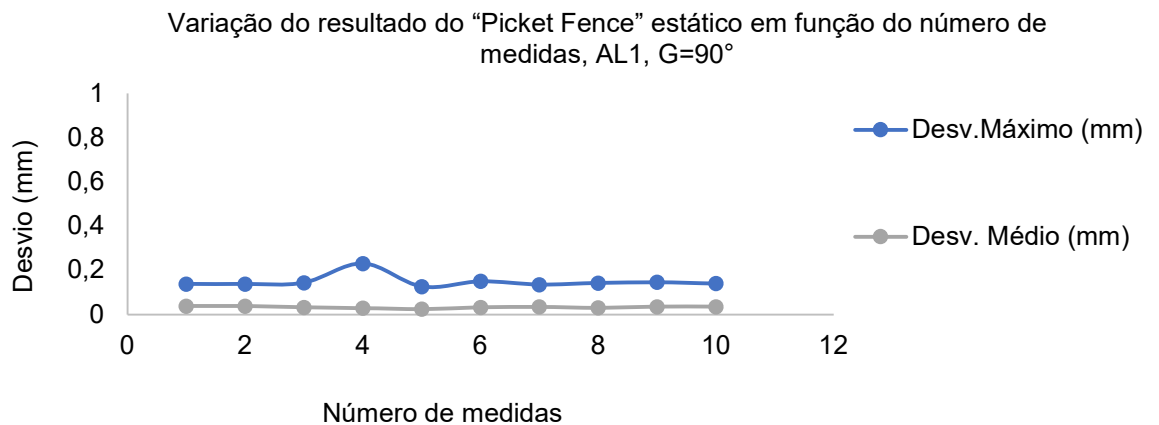


Fonte: autoria própria

A Figura 29, evidencia o resultado do teste "Picket Fence" estático para o AL 1 e com angulação de 90°, as legendas indicam os valores de desvio médio e desvio máximo observado.

A partir da Figura 29 observa-se que o valor do maior desvio foi de 0,23 mm, e embora seja relativamente pequeno com relação a tolerância, precisou ser excluído da análise do CEP por apresentar um desvio maior que o LSC.

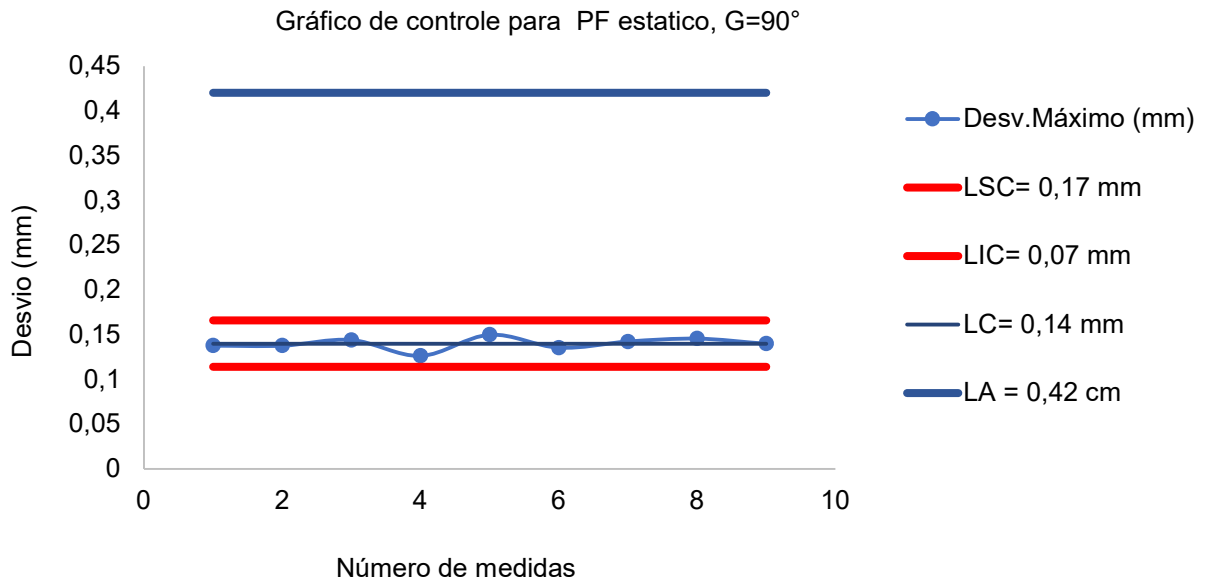
Figura 29 – Resultado do teste "Picket Fence" estático, para G=90°, AL1



Fonte: autoria própria

A Figura 30 mostra o gráfico de controle para o mesmo teste anterior para o AL 1,  $G=90^\circ$ . Nele se observa que o valor médio do desvio foi de 0,14 mm e o LSC foi de 0,17 mm, com o LA no valor de 0,42 mm.

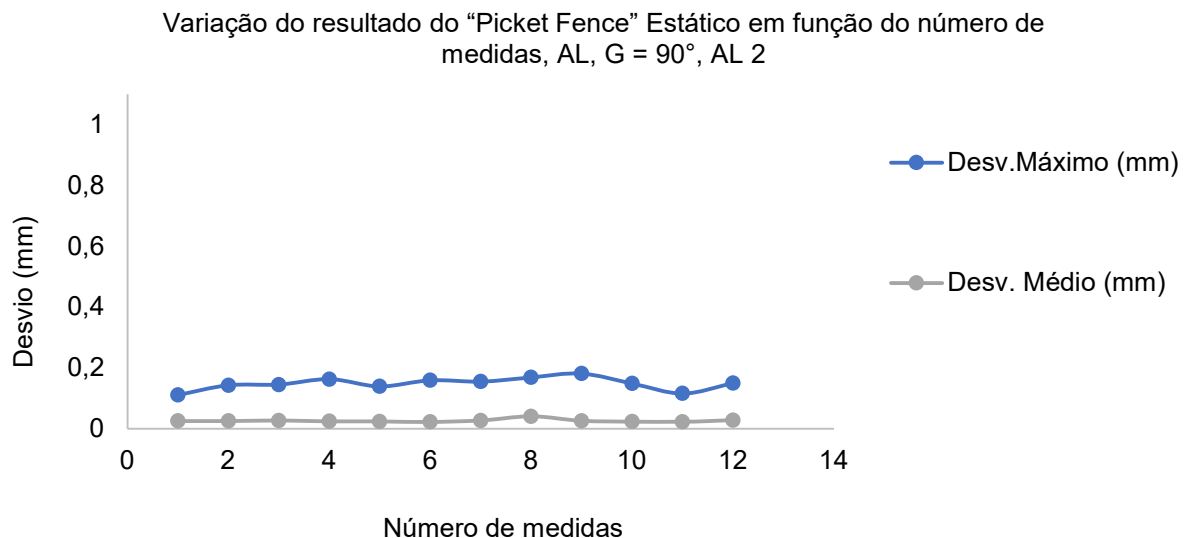
Figura 30 - Controle Estatístico de processo para o teste PF estático,  $G=90^\circ$ , AL1



Fonte: autoria própria

A Figura 31 mostra o resultado do teste “Picket Fence” estático para  $G = 90^\circ$  e AL 2, os valores observados são para desvio médio e máximo. O desvio máximo foi menor que 0,25 mm.

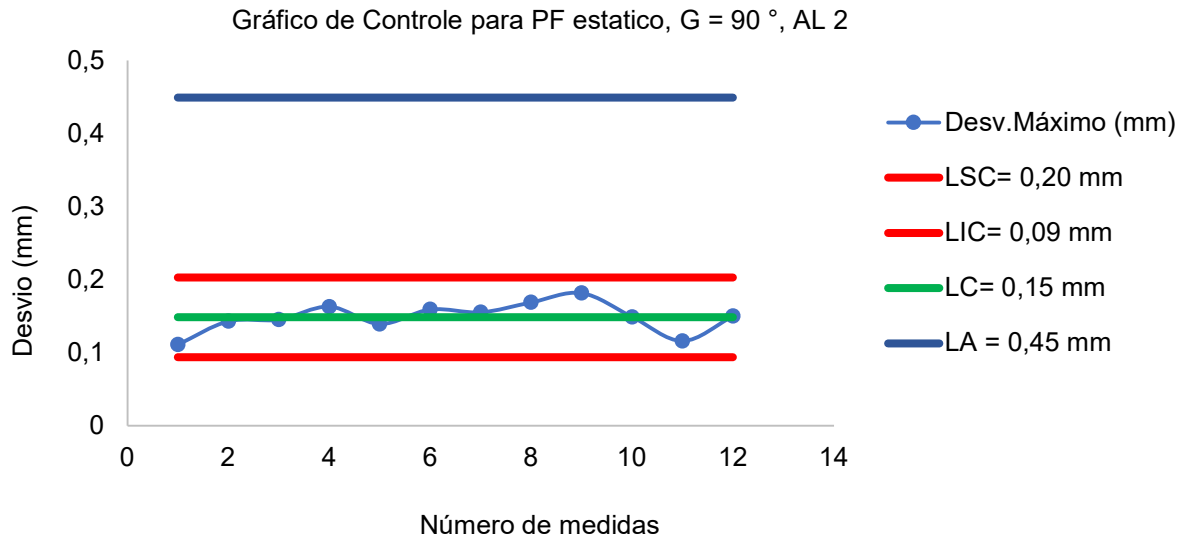
Figura 31 - Resultado do “Picket Fence” estático para o AL 2,  $G=0^\circ$



Fonte: autoria própria

A Figura 32 mostra o gráfico de controle para o teste “Picket Fence” para  $G = 90^\circ$  e AL 2, os valores observados são para desvio máximo. Os valores encontrados para os limites foram de 0,15 mm para o LC, o LSC foi de 0,20 mm e LA de 0,45 mm.

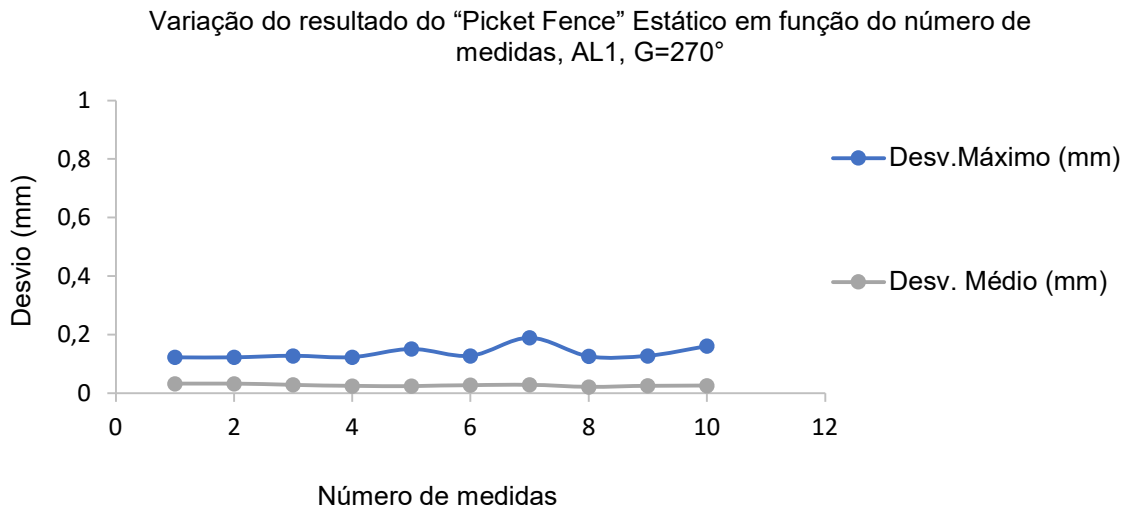
Figura 32 - Gráfico de Controle para o teste PF estático AL 2,  $G = 0^\circ$



Fonte: autoria própria

A Figura 33 mostra os dados obtidos para o teste “Picket Fence” para  $G = 270^\circ$  e AL 1. Os dados são para a média dos desvios e desvio máximo, sendo o desvio máximo menor que 0,25 mm.

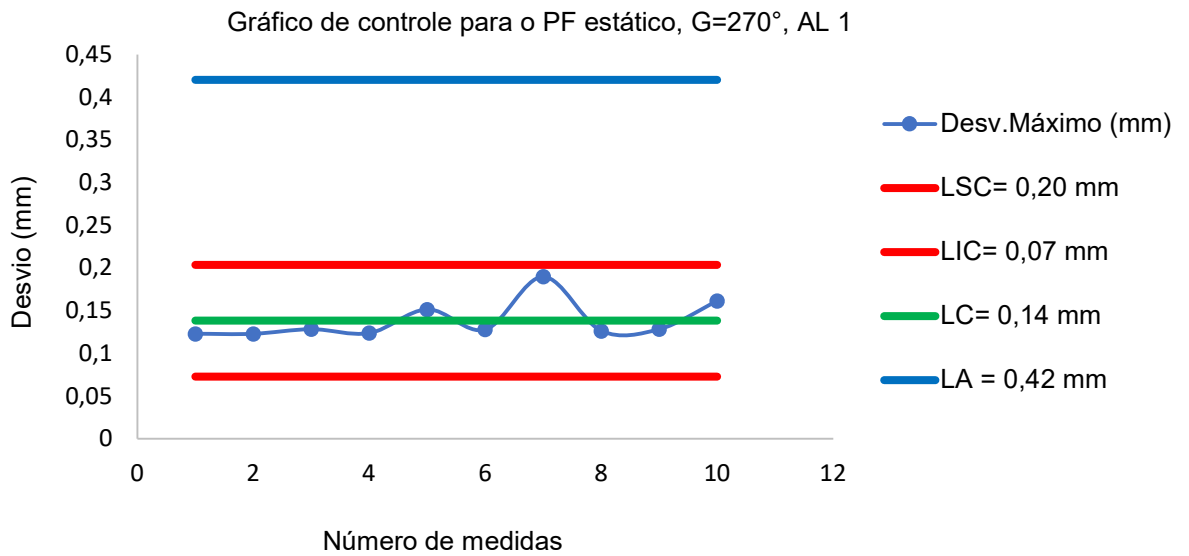
Figura 33 - Resultado dos valores medidos de erro para posicionamento de lâminas, PF estático para  $G = 270^\circ$



Fonte: autoria própria

A Figura 34 mostra o gráfico de controle para o teste “Picket Fence” estático para  $G = 270^\circ$  e AL 1, os valores observados são para desvio máximo. Os limites de controle encontrados foram 0,14 mm para o LC, o LSC foi de 0,20 mm e LA de 0,42 mm.

Figura 34 - Gráfico de Controle para o teste PF estático AL 1,  $G = 270^\circ$

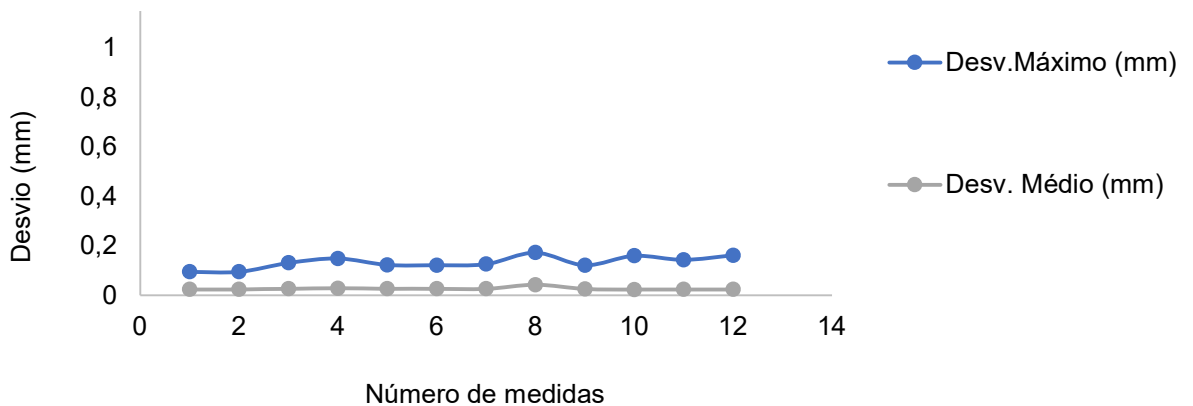


Fonte: autoria própria

A Figura 35 apresenta os valores obtidos para o teste “Picket Fence” para  $G = 270^\circ$  e AL 2. Os dados são para a média dos desvios e desvio máximo, sendo o desvio máximo aproximadamente 0,20 mm.

Figura 35 - Resultado dos valores medidos de erro para posicionamento de lâminas, PF estático para  $G = 270^\circ$

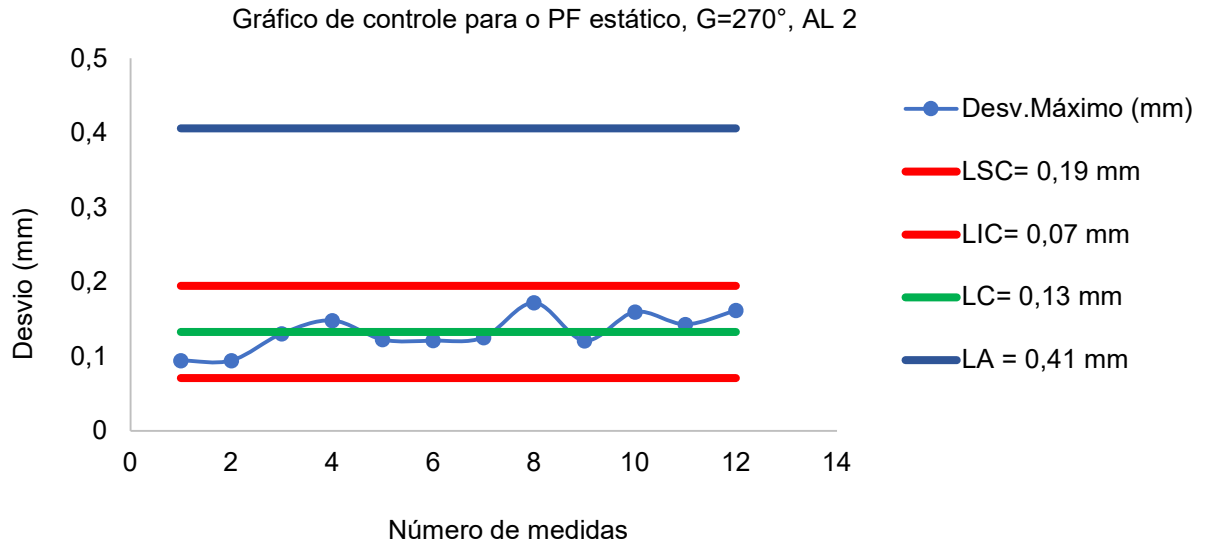
Variação do resultado do “Picket Fence” Estático em função do número de medidas,  $G = 270^\circ$ , AL 2



Fonte: autoria própria

A Figura 36 mostra o gráfico de controle para o teste “Picket Fence” estático para  $G = 270^\circ$  e AL 2, os valores observados são para desvio máximo. Os limites de controle encontrados foram 0,13 mm para o LC, o LSC foi de 0,19 mm e LA de 0,41 mm.

Figura 36 - Gráfico de Controle para o teste PF estático AL 2,  $G = 270^\circ$

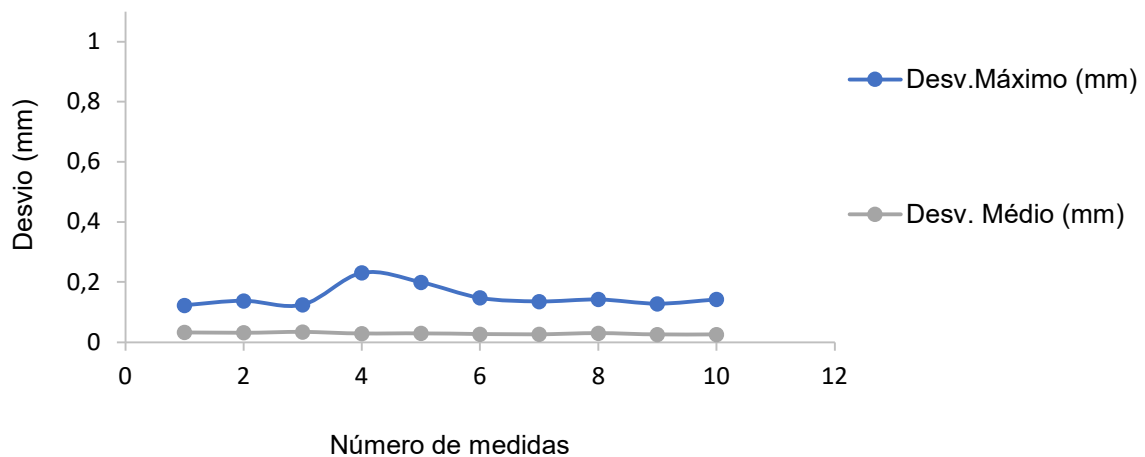


Fonte: autoria própria

A Figura 37 apresenta os valores obtidos para o teste “Picket Fence” para  $G = 180^\circ$  e AL 1. Os dados são para a média dos desvios e desvio máximo, sendo este aproximadamente 0,23 mm para o período analisado.

Figura 37 - Resultado dos valores medidos de erro para posicionamento de lâminas, PF estático para  $G = 180^\circ$

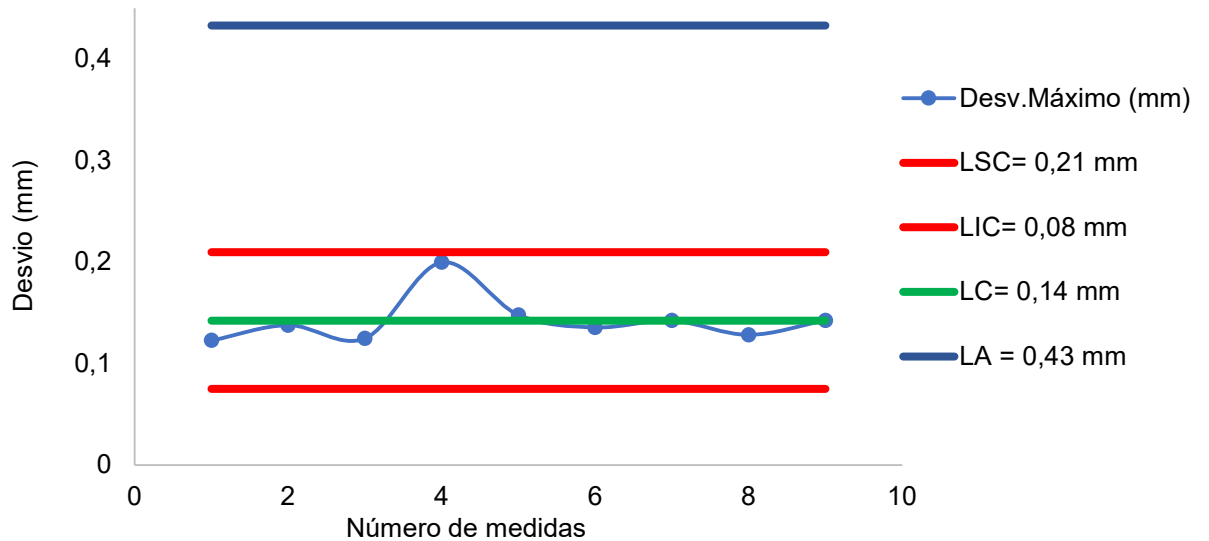
Variação do resultado do “Picket Fence” Estático em função do número de medidas, AL 1,  $G=180$



Fonte: autoria própria

A Figura 38 mostra o gráfico de controle para o teste “Picket Fence” estático para G = 180° e AL 1, no gráfico estão os valores para desvio máximo. Os limites de controle encontrados foram 0,14 mm para o LC, o LSC foi de 0,21 mm e LA de 0,43 mm.

Figura 38 - Gráfico de Controle para o teste PF estático AL 1, G = 180°  
Gráfico de controle para o PF estático, G=180°, AL 1

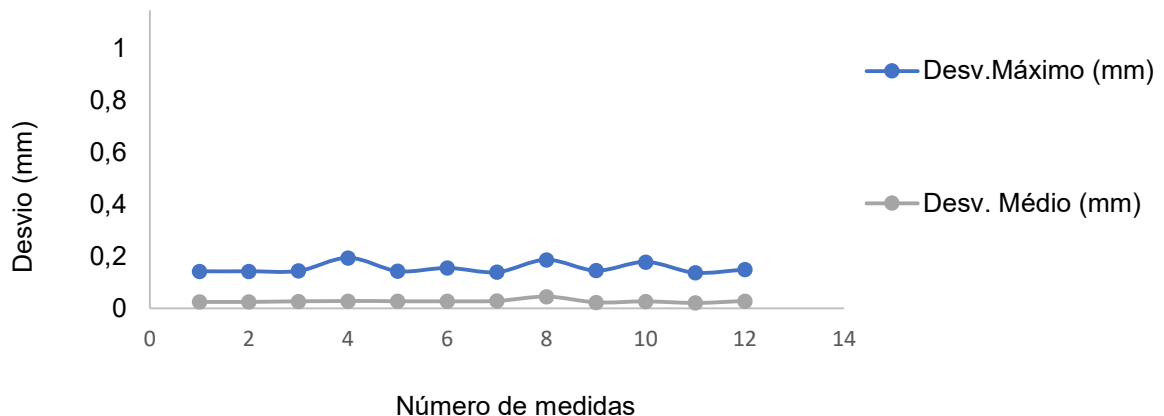


Fonte: autoria própria

A Figura 39 apresenta os valores obtidos para o teste “Picket Fence” para G = 180° e AL 2. Os dados são para a média dos desvios e desvio máximo, sendo o último no valor de 0,19 mm.

Figura 39 - Resultado dos valores medidos de erro para posicionamento de lâminas, PF estático para G = 180°

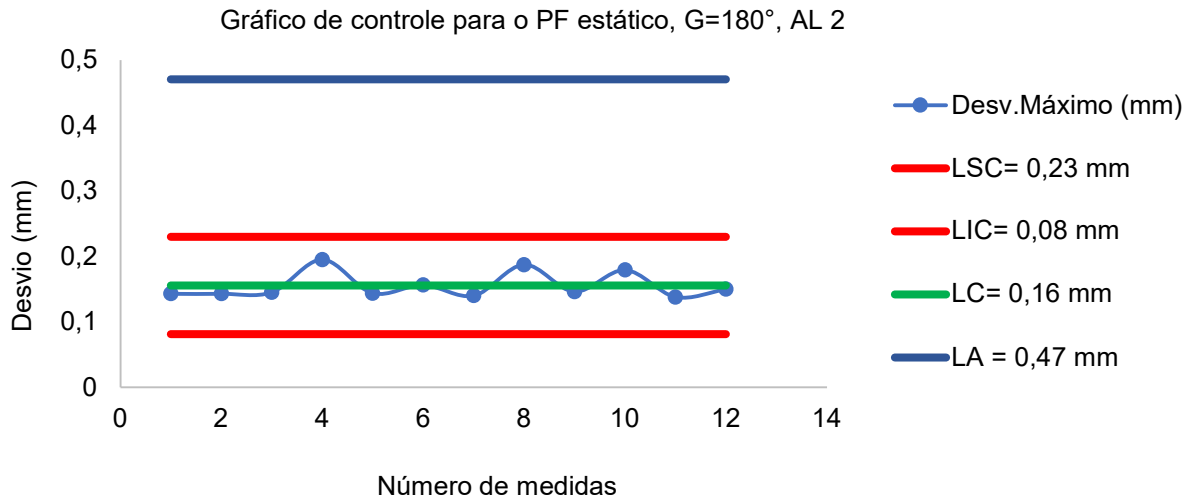
Variação do resultado do “Picket Fence” Estático em função do número de medidas, AL 2, G = 180°, AL 2



Fonte: autoria própria

Figura 40 mostra o gráfico de controle para o teste “Picket Fence” estático para  $G = 180^\circ$  e AL 2, no gráfico estão os valores para desvio máximo. Os limites de controle encontrados foram 0,16 mm para o LC, o LSC foi de 0,23 mm e LA de 0,47 mm.

Figura 40 - Gráfico de Controle para o teste PF estático AL 2,  $G = 180^\circ$



Fonte: autoria própria

Os resultados para o teste “Picket Fence” executado em modo estático evidenciaram um desvio máximo de posicionamento das lâminas menor que 0,30 mm para as duas máquinas e a angulação de “gantry” não influenciou o resultado. com o valor de LC oscilando em torno de 0,15 mm e o LSC em todos os casos foi menor que 0,30 mm e LA menor que 0,50 mm. Esses dados para o PF estático em função do ângulo de “gantry” evidencia que limites institucionais pode ser uma ferramenta adequada para observar se um teste específico está sob controle estatístico.

Os resultados foram similares para as duas máquinas, evidenciando a equivalência delas nesse quesito. A Tabela 14 mostra os dados resumidos de tolerâncias encontrados, foi registrado o maior valor dentre as angulações e não houve diferenças significativas entre elas.

Tabela 14 - Resultado resumido do teste PF, AL e AL 2

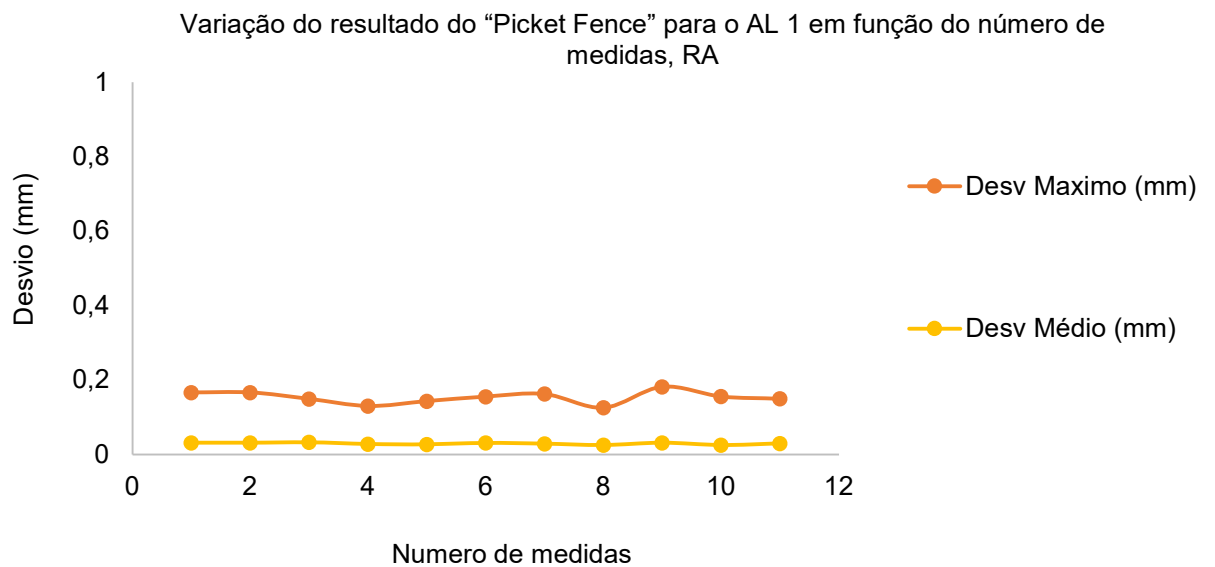
Limites de controle	AL 1	AL 2	Tolerância (mm)
LSC (mm)	0,30	0,25	1,0
LIC (mm)	0,03	0,06	
LC (mm)	0,16	0,15	

LA (mm)	0,50	0,46
---------	------	------

Fonte: autoria própria

Os testes seguintes fazem parte do conjunto de testes executados em RA. A Figura 41 apresenta os valores médio e de máximo, de posicionamento de lâminas obtidos para o teste “Picket Fence” (PF) realizado em RapidArc (RA). Os resultados mostram um erro máximo de posicionamento de lâminas menor que 0,20 mm para o AL 1.

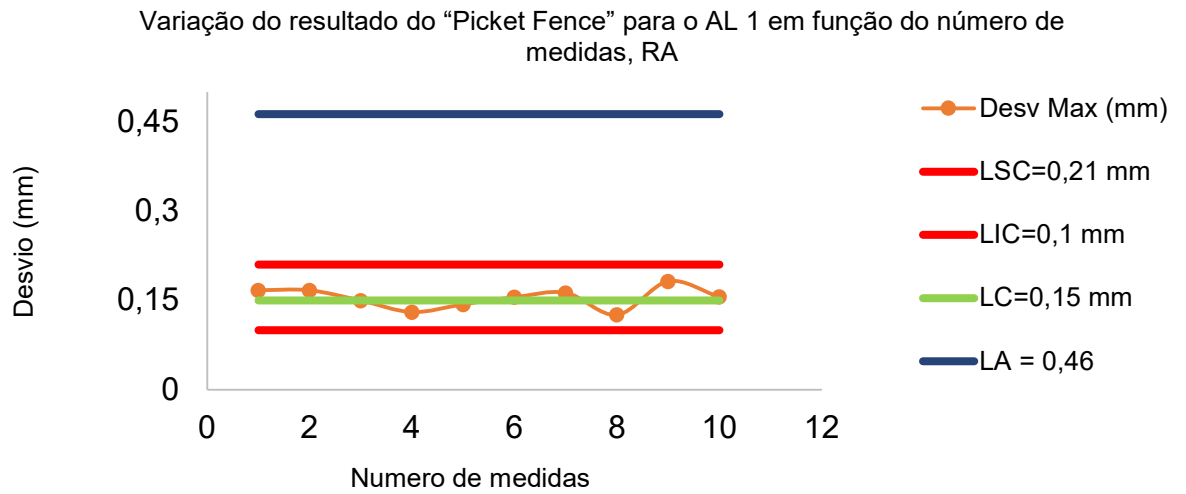
Figura 41 - Resultado do erro de posicionamento de lâminas para o teste PF realizado em RA



Fonte: autoria própria

A Figura 41 mostra o gráfico de controle para o teste “Picket Fence” realizado em arco para o AL 1, no gráfico estão os valores para desvio máximo. Os limites de controle encontrados foram 0,15 mm para o LC, o LSC foi de 0,21 mm e LA de 0,46 mm.

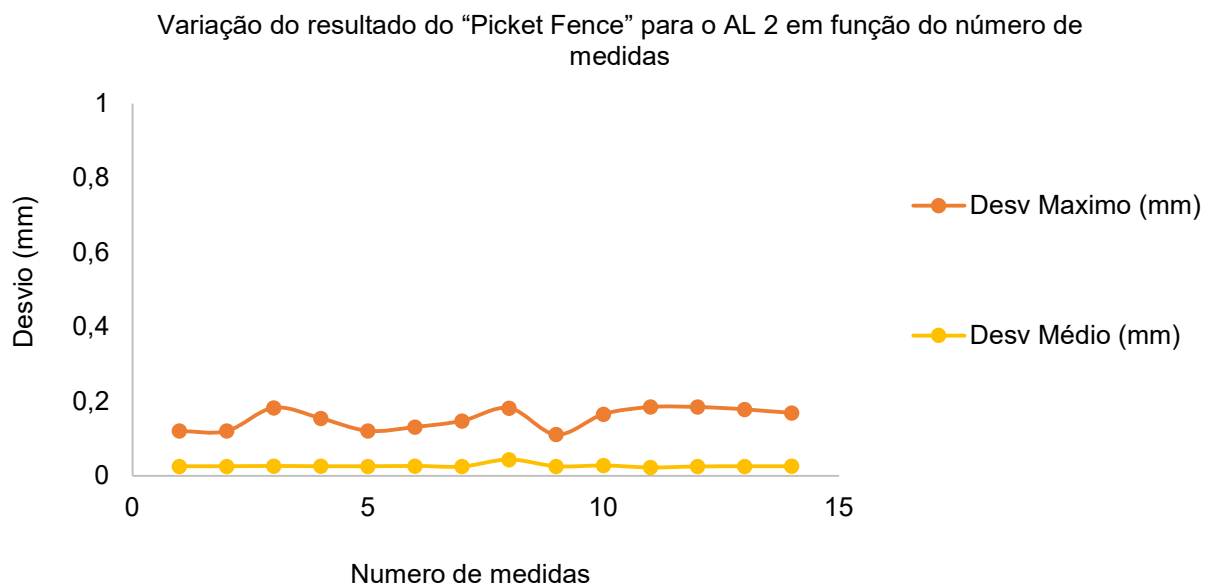
Figura 42 - Gráfico de Controle para o teste PF realizado em RA para o AL 1



Fonte: autoria própria

A Figura 43 apresenta os desvios médio e máximo de posicionamento de lâminas obtidos para o teste "Picket Fence" realizado em RA para o AL 2. É possível notar que o desvio máximo foi menor que 0,20 mm para o período analisado.

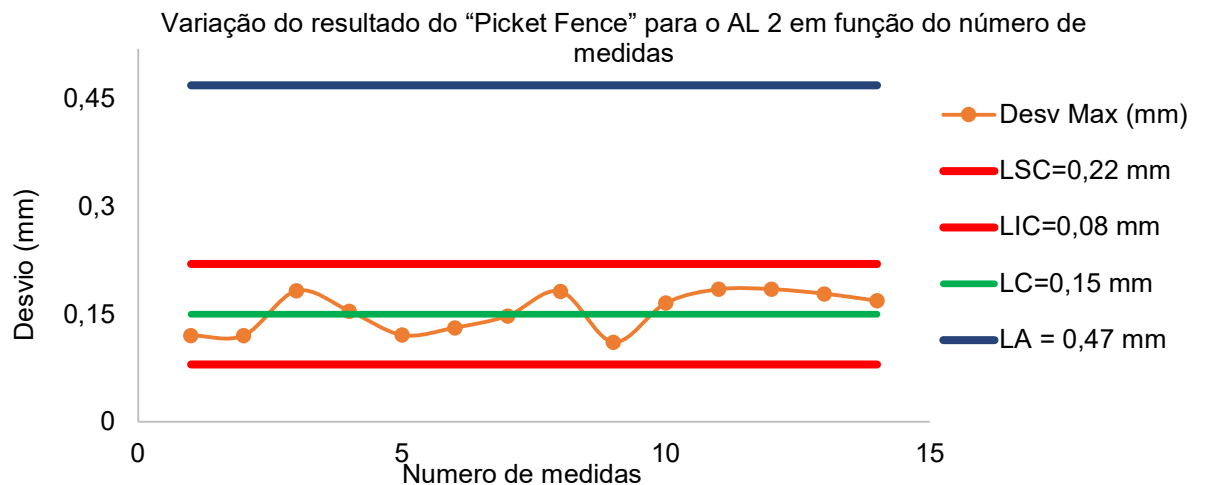
Figura 43 - Resultado do erro de posicionamento de lâminas para o teste PF realizado em RA para o AL 2



Fonte: autoria própria

A Figura 44 apresenta o gráfico de controle para o teste “Picket Fence” realizado em arco para o AL 2, no gráfico os valores analisados são para o desvio máximo. Os limites de controle encontrados foram 0,15 mm para o LC, o LSC foi de 0,22 mm e LA de 0,47 mm.

Figura 44 - Gráfico de Controle para o teste PF realizado em RA para o AL 2



Fonte: autoria própria

Os resultados para o teste “Picket Fence” executado em RA evidenciaram um desvio máximo de posicionamento das lâminas menor que 0,20 mm para as duas máquinas. Com o valor de LC no valor de 0,15 mm e o LSC em todos os casos foi menor que 0,25 mm e LA menor que 0,48 mm para os dois ALs. Esses dados para o PF realizado em RA mostram mais uma similaridade das máquinas e Limites de Tolerância bem mais restritivos que os recomendados pela literatura em geral(14,15,7). Ling e colaboradores(28) encontraram valores de 0,3 mm. A Tabela 15 mostra resumidamente essas tolerâncias encontradas.

Tabela 15 - Resultado resumido do teste PF, AL e AL 2

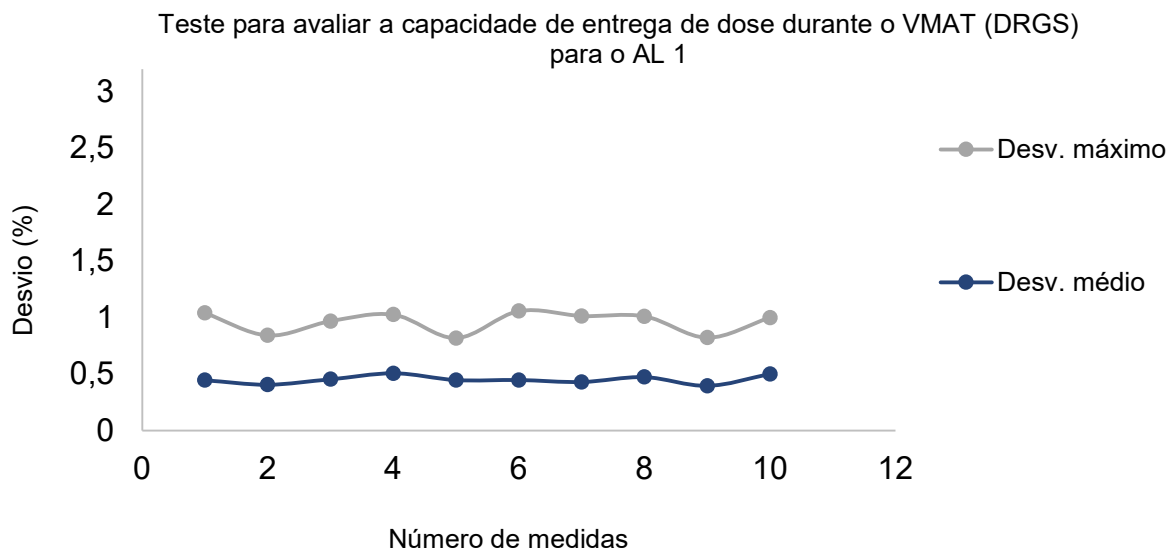
Limites de controle	AL 1	AL 2	Tolerância (mm)
LSC (mm)	0,21	0,22	1,0
LIC (mm)	0,10	0,08	
LC (mm)	0,15	0,15	
LA (mm)	0,46	0,47	

Fonte: autoria própria

Para avaliar a capacidade de entrega de dose do VMAT, um dos testes envolve variar taxa de dose e velocidade do “gantry” durante o arco modulado (“Dose Rate” – “gantry” Speed\_ DRGS). Esse teste é executado similar à entrega de dose do VMAT e formando várias regiões de dose e essas regiões são comparadas e o máximo desvio tem tolerância sugerida de 3 % e a média dos desvios de 1,5 %.

O resultado do teste para o AL 1 está representado na Figura 45, onde se observa que o desvio médio foi de, aproximadamente 0,5 %, ao passo que o desvio máximo ficou em torno de 1 %. A tolerância para esse teste é de 3% para o desvio máximo e 1,5 % para o desvio médio. Os valores obtidos foram, por tanto, bem abaixo desses valores da tolerância do teste. O Ling e colaboradores(28) realizaram esses testes e os resultados foram, para o desvio médio de 0,7 % e foi medido com filme radiocrômico.

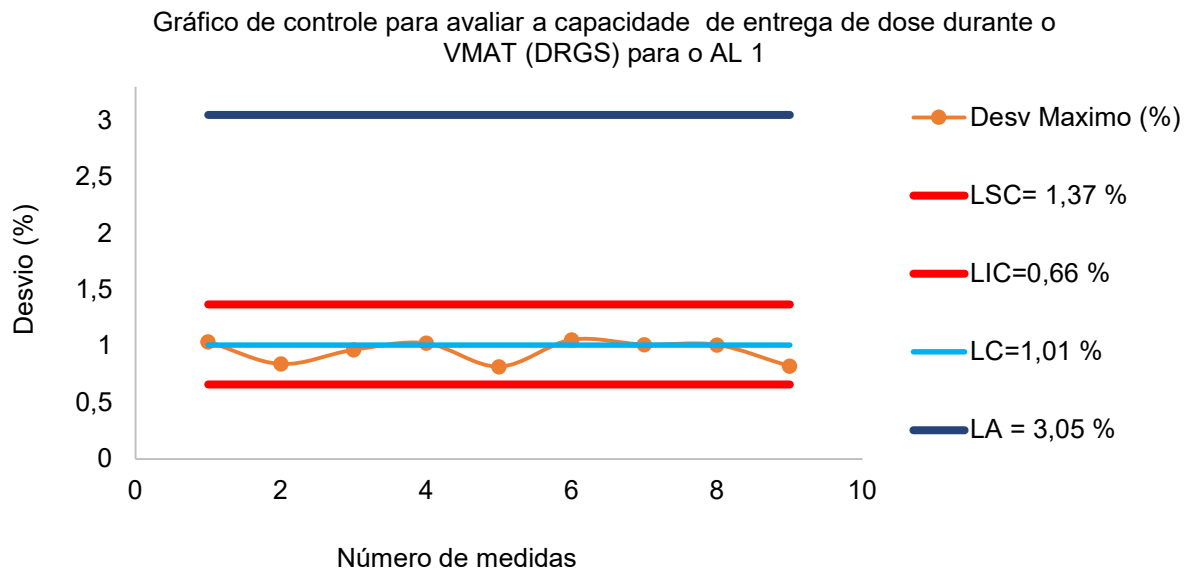
Figura 45 - Teste para avaliar a capacidade de entrega de dose durante o VMAT (DRGS) para o AL 1



Fonte: autoria própria

A Figura 46 apresenta o gráfico de controle para o teste DRGS realizado em arco para o AL 1, no gráfico os valores analisados são para o desvio máximo. Os limites de controle encontrados foram 1,01 % para o LC, o LSC foi de 1,37 %, menos da metade do valor de tolerância sugerido pela literatura e LA de 3,05 %.

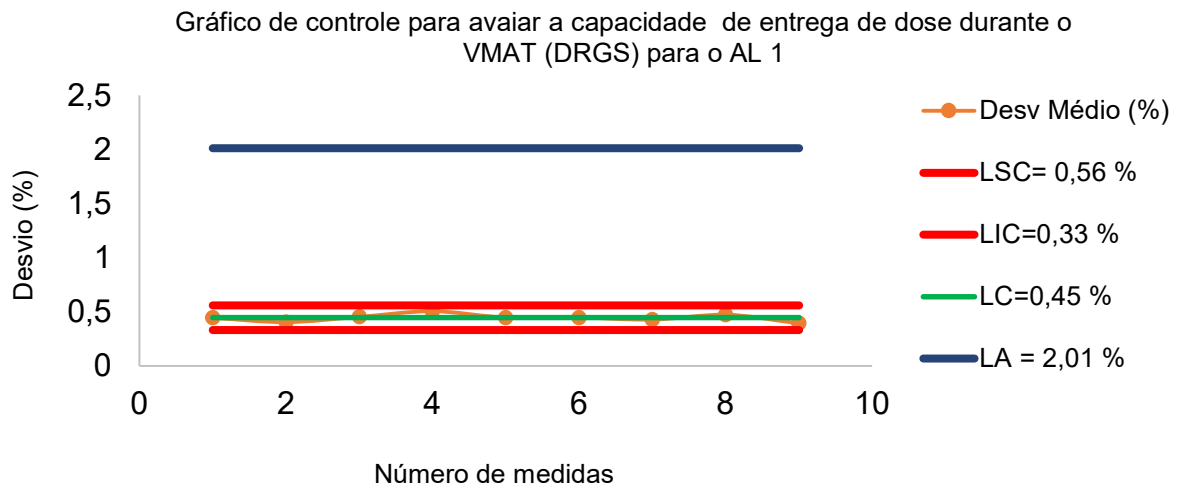
Figura 46 – Gráfico de controle para avaliar o desvio máximo do teste (DRGS), para o AL 1



Fonte: autoria própria

A Figura 47 apresenta os dados de controle para o teste DRGS realizado em arco para o AL 1, no gráfico os valores analisados são para o desvio médio. Os limites de controle encontrados foram 0,45 % para o LC, o LSC foi de 0,56 % e LA de 2,01 %.

Figura 47 - Gráfico de controle para avaliar o desvio médio do teste (DRGS), para o AL 1

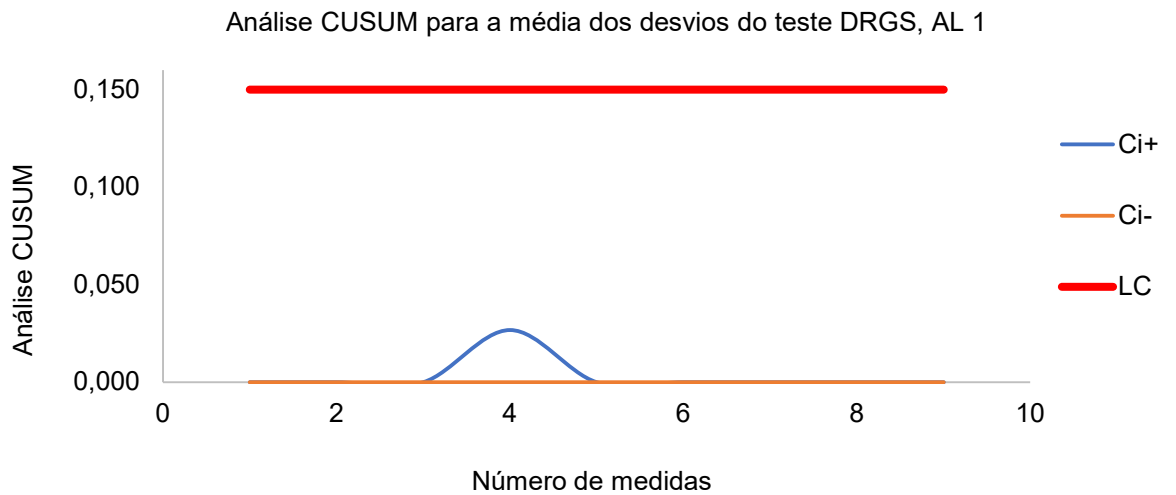


Fonte: autoria própria

Devido a pouca variabilidade dos dados, foi realizado um gráfico de controle mais sensível a pequenas flutuações (o método de “CUSUM”)(26), o resultado está

apresentado na Figura 48. Esse método capta pequenas variações tendenciosas a fim de fornecer informações que levem a concluir que um conjunto de dados sob controle estatístico. Como os dados estão abaixo da linha vermelha, que representa o Limite de Controle, significa que os dados estão sob controle estatístico.

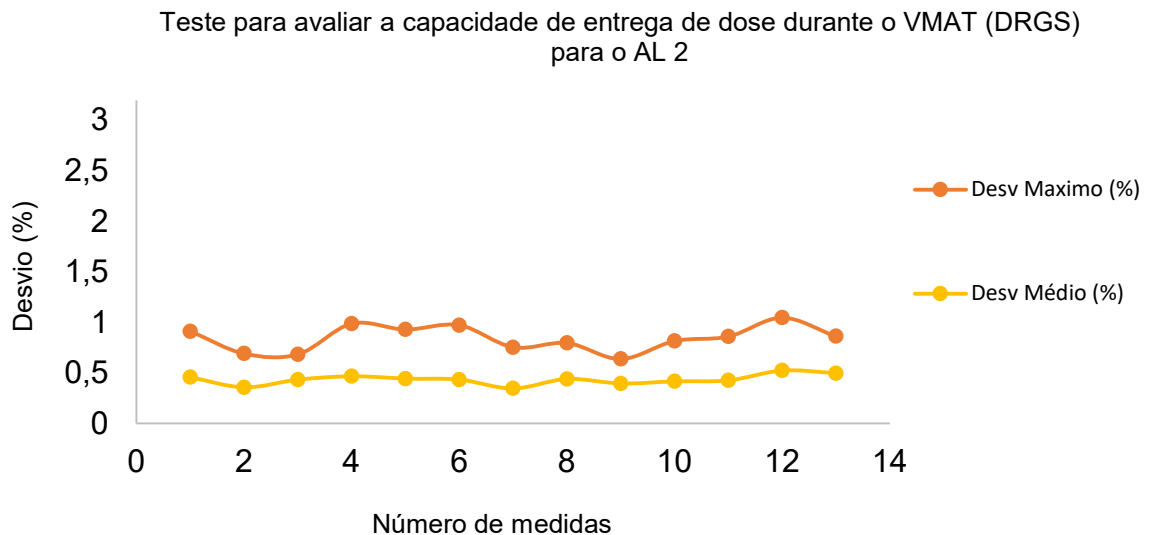
Figura 48 - Gráfico de controle “CUSUM” para o AL 1, onde Ci+ e Ci- são os desvios cumulativos acima ou abaixo da média, respectivamente



Fonte: autoria própria

A Figura 49 mostra o resultado do teste DRGS para o AL 2 onde se observa que o desvio médio oscilou em torno de 0,5 %, ao passo que o desvio máximo variou em torno de 1 %. Esses dados mostram valores, por tanto bem abaixo da tolerância.

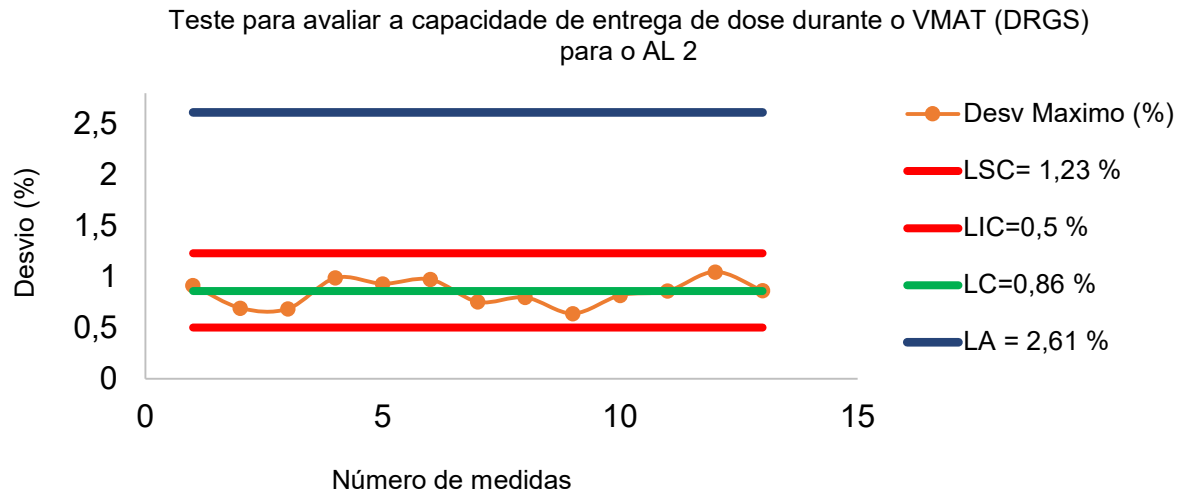
Figura 49 - Teste para avaliar a capacidade de entrega de dose durante o VMAT (DRGS) para o AL 2



Fonte: autoria própria

A Figura 50 apresenta o gráfico de controle para o teste DRGS realizado em arco para o AL 2, os valores analisados são para o desvio máximo. Os limites de controle encontrados foram 0,86 % para o LC, o LSC foi de 1,23 e LA de 2,61 %.

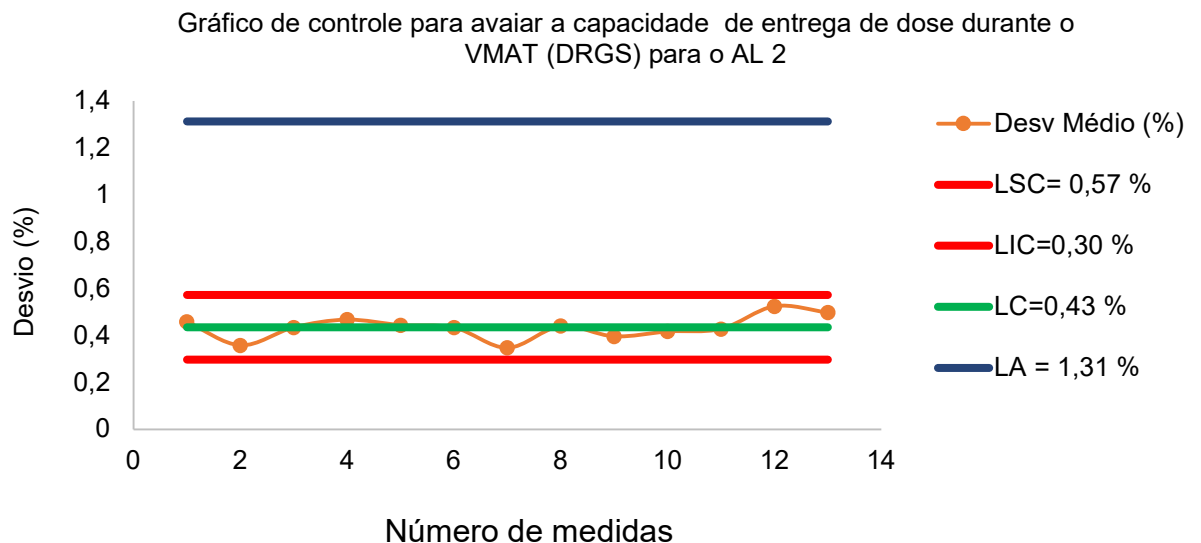
Figura 50 - Gráfico de controle para avaliar o desvio máximo do teste (DRGS), para o AL 2



Fonte: autoria própria

A Figura 51 mostra os dados do gráfico de controle para o teste DRGS realizado em arco para o AL 2, no gráfico os valores analisados são para o desvio médio. Os limites de controle encontrados foram 0,43 % para o LC, o LSC foi de 0,57 % e LA de 1,31 %.

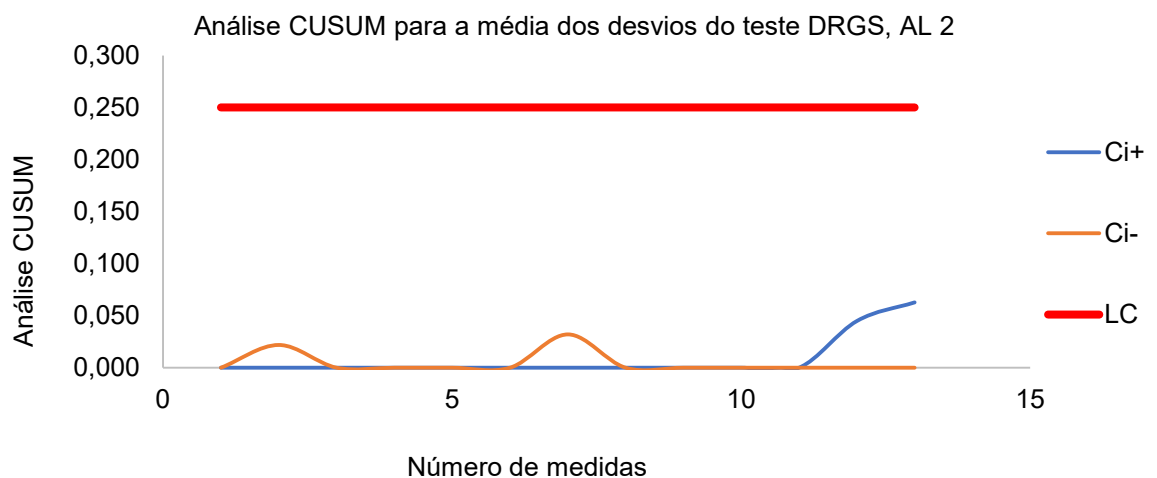
Figura 51 - Gráfico de controle para avaliar o desvio médio do teste (DRGS), para o AL 2



Fonte: autoria própria

A Figura 52 mostra o gráfico de controle para o desvio médio no teste DRGS, nele se observa os valores abaixo dos limites de controle, caracterizando os dados como controlados estatisticamente nessa tarefa. A Figura 45 ilustra o gráfico “CUSUM” para o teste DRGS, onde os valores de C+ e C- são valores cumulativos acima ou abaixo da média, respectivamente.

Figura 52 - Gráfico de controle “CUSUM” para o AL 2, onde Ci+ e Ci- são os desvios cumulativos acima ou abaixo da média, respectivamente



Os resultados para o teste DRGS executado em RA evidenciaram um desvio máximo de uma banda para outra de, aproximadamente, 1 % para as duas máquinas. O valor médio do desvio oscilou em torno de 0,5 % para os dois ALs, esse valor está consistente com os medidos por Ling e colaboradores(28), embora eles tenham realizado a análise com filme radiocrômico. O valor de LSC e LA foram 1,37 % e 3,05% para o AL 1 e 1,23 5 e 2,61 para o AL 2, ou seja, a tolerâncias obtidas usando CEP para esse teste estão abaixo dos valores sugeridos pelo fabricante. O valor de desvio médio nesse teste oscilou em torno de 0,6 % para ambos ALs. Esses resultados permitem afirmar que há uma forte similaridade no resultado dos testes. A Tabela 16 ilustra os limites de controle resumidos para o desvio máximo nesse teste.

Tabela 16 - Tabela resumando os testes DRGS, desvio máximo

Limites de controle	AL 1	AL 2	Tolerância (%)
LSC (%)	1,37	1,23	3,0
LIC (%)	0,66	0,50	

LC (%)	1,01	0,86
LA (%)	3,05	2,61

Fonte: autoria própria

A Tabela 17 mostra os dados resumidos para os limites de controle com relação ao desvio médio.

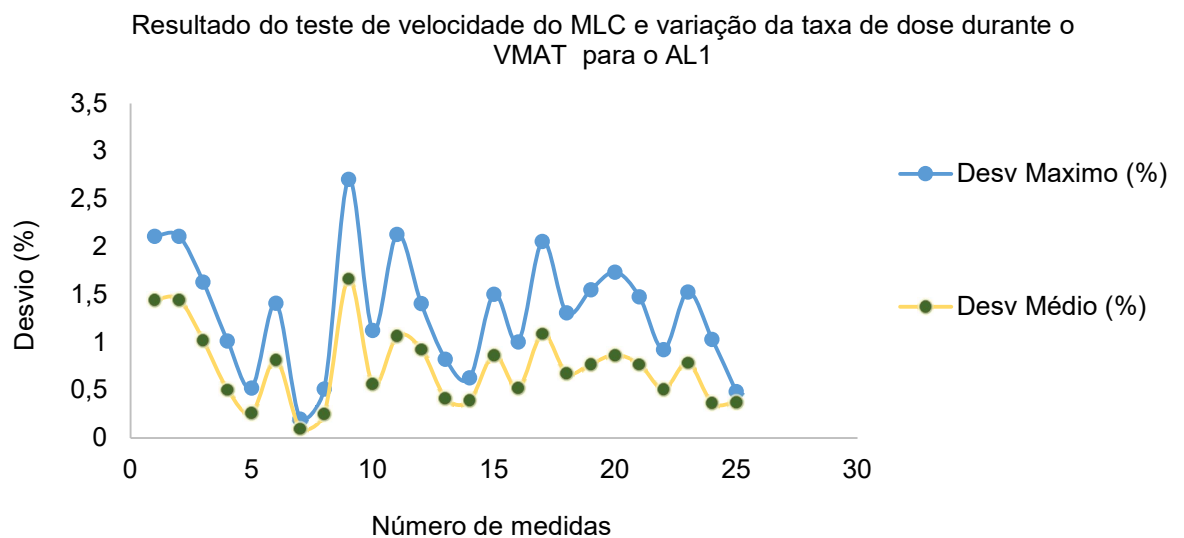
Tabela 17 - Tabela resumando o resultado dos testes DRGS, desvio médio

Limites de controle	AL 1	AL 2	Tolerância (%)
LSC (%)	0,56	0,57	1,50
LIC (%)	0,33	0,30	
LC (%)	0,45	0,43	
LA (%)	2,01	1,31	

Fonte: autoria própria

A Figura 53 apresenta o resultado do teste “MLC Speed” para o AL 1 onde se observa que o desvio médio teve valor máximo de 1,67 %, ao passo que o desvio máximo teve seu maior valor em 2,7 %. Com a mesma tolerância do teste anterior, ou seja, de 2 % para o desvio médio e 3 % para o desvio máximo, esses dados mostram valores, por tanto abaixo da tolerância, mas com uma maior variação entre o menor e o maior desvio. Para ilustrar esse fato foi observado que o menor desvio médio foi de 0,10 % e o menor desvio máximo foi menor que 0,5 %.

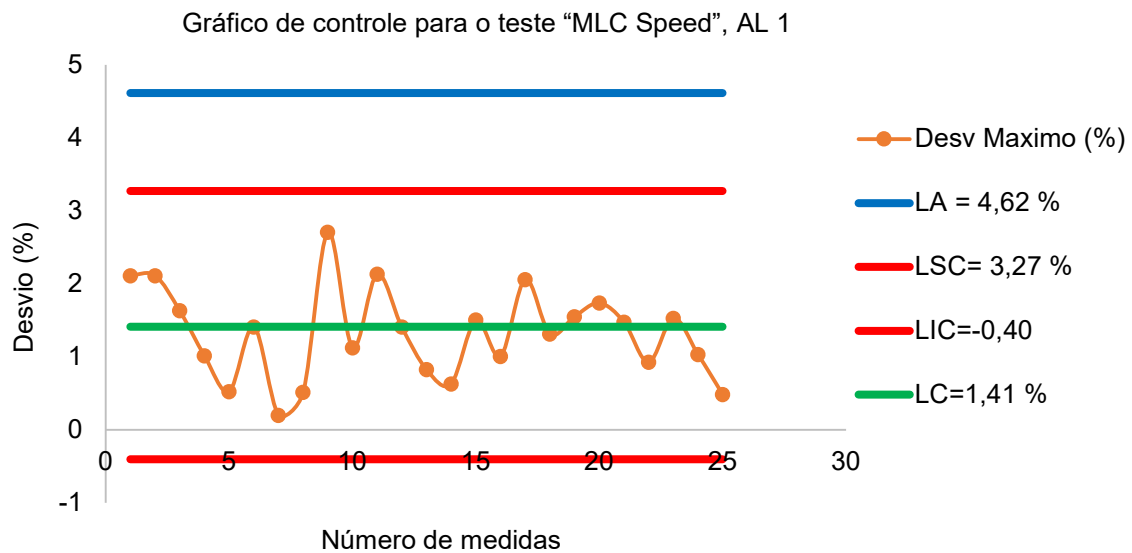
Figura 53 - Teste para avaliar a capacidade de entrega de dose durante o VMAT (“MLC Speed”) para o AL 1



Fonte: autoria própria

A Figura 54 apresenta o gráfico de controle para o teste “MLC Speed” realizado em arco para o AL 1, os valores obtidos são para o desvio máximo. Os limites de controle encontrados foram 1,41 % para o LC, o LSC foi de 3,27 % e LA de 4,62 %. Esses valores de tolerância obtidos para a partir do CEP são maiores que os sugeridos pela literatura, evidenciando a importância de definir limites institucionais baseado em métodos estatísticos apropriados. Embora esses valores encontrados para os limites de tolerância sejam maiores que 3 %, nenhuma medida ultrapassou esse valor.

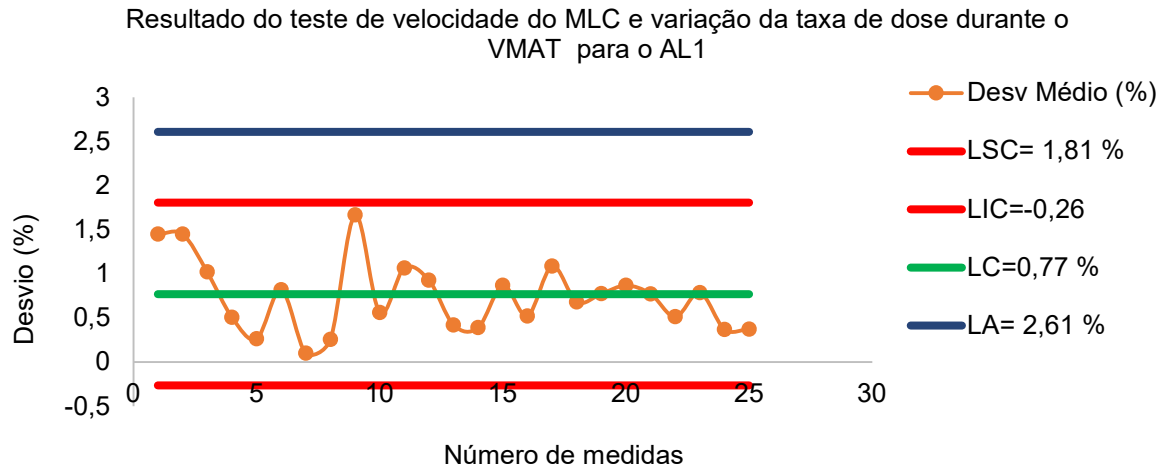
1 Figura 54 - Gráfico de controle para avaliar o desvio máximo do teste “MLC Speed”, para o AL



Fonte: autoria própria

A Figura 55 mostra o gráfico de controle para o desvio médio no teste “MLC Speed”, nele se observa os valores de 0,77 % para o LC, o valor de 1,81 % para LSC e LA de 2,61 %.

Figura 55 - Gráfico de controle para avaliar o desvio médio do teste “MLC Speed”, para o AL 1

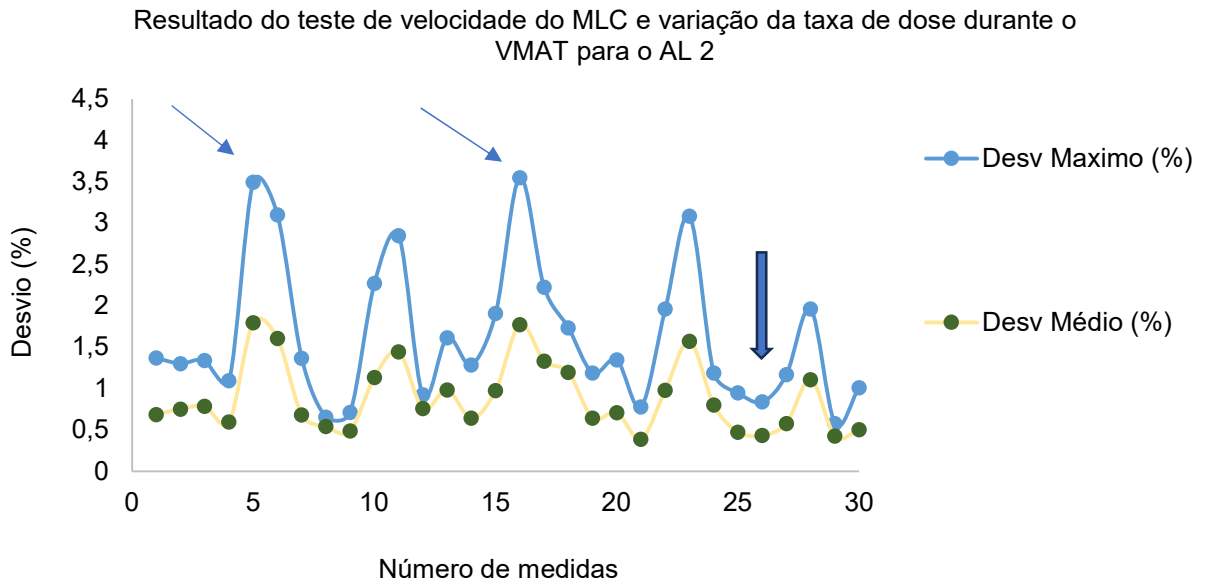


Fonte: autoria própria

A Figura 56 mostra o resultado do teste “MLC Speed” para o AL 2 onde se observa que a média dos desvios teve maior valor em 1,78 %, ao passo que o desvio máximo teve maior valor de 3,50 %. Esses valores ultrapassaram levemente a tolerância do teste, que é de 3 % para desvio máximo, sendo assim esse teste foi o que apresentou maior variação. Em destaque nessa figura estão três setas, as duas da esquerda sinalizam os maiores desvios encontrados para o teste, para o desvio máximo esse valor se aproximou de 3,5 %, sendo o único teste. A terceira seta mais a direita indica quando foi realizado uma instalação de um novo controlador de MLC nessa máquina. Dentre todo o conjunto que ultrapassou levemente a tolerância do fabricante. Por essa razão houve maior atenção na monitoração do mesmo através de manutenções. Após a troca desse novo instrumento, os valores para esse teste apresentaram valores menores, como indicado pela seta. Essa troca ocorreu em maio, o que indica que é preciso observar por mais tempo para se poder afirmar categoricamente que isso foi a razão para os valores terem diminuído.

As duas máquinas que fizeram parte do estudo passaram por upgrade, como mencionado anteriormente. Sendo que para o AL 2 ficou pendente a instalação de um controlador de MLC que fazia parte dessa atualização, mas que houve um problema na entrega (como a peça veio de fora do País, demorou chegar) e isso fez com que o AL 2 operasse sem esse novo controlador que faz parte das novas máquinas, cujo nome é “MLC Controller (CCMC)” que já vem integrado com o console da máquina (o outro é instalado em modulo separado do console).

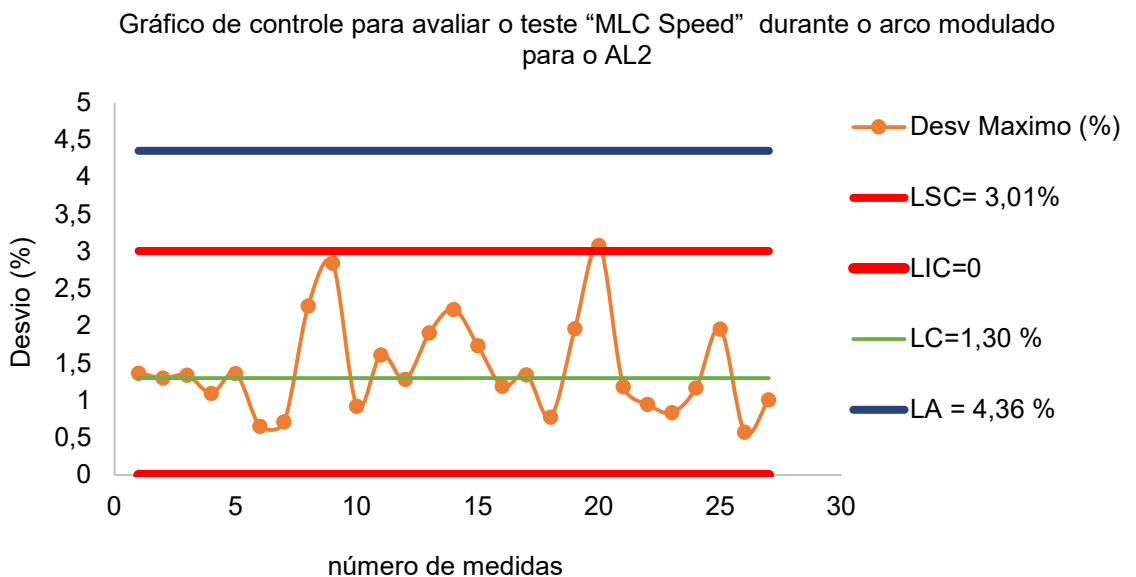
Figura 56 - Teste (“MLC Speed”) para o AL 2, onde as legendas indicam o desvio máximo e médio



Fonte: autoria própria

A Figura 57 apresenta o gráfico de controle para o teste “MLC Speed” realizado em arco para o AL 2, os valores obtidos são para o desvio máximo. Os limites de controle encontrados foram 1,30 % para o LC, o LSC foi de 3,01 % e LA de 4,36 %. Esses valores de tolerância obtidos para a partir do CEP são aproximadamente iguais aos que são sugeridos pelo fabricante, mostrando mais uma vez a importância do comportamento dos dados em cada teste e máquina.

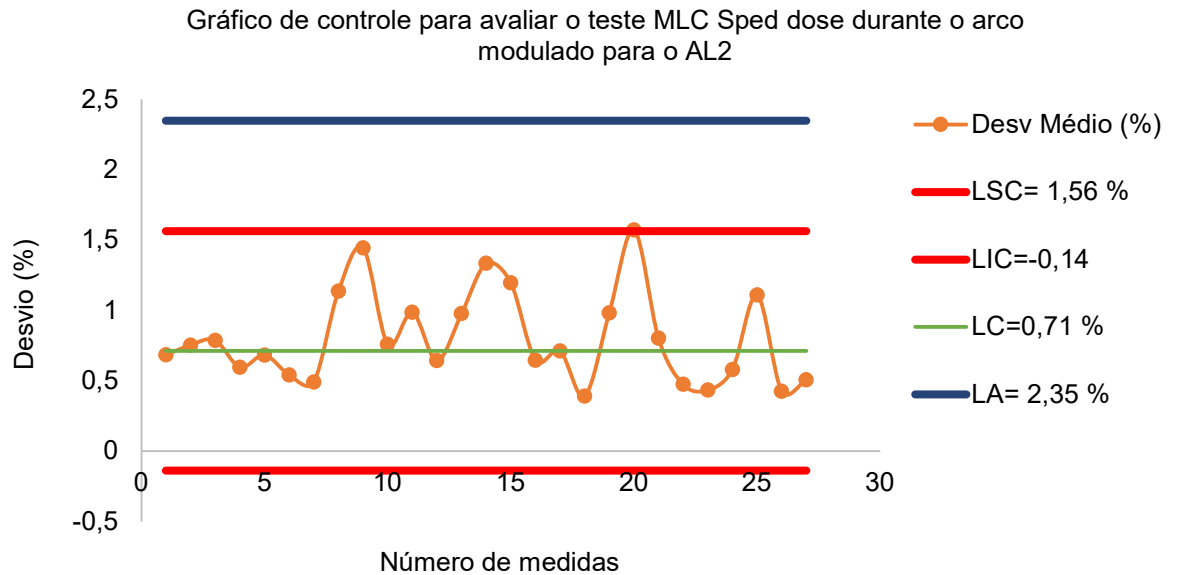
Figura 57 - Gráfico de controle do desvio máximo para o teste “MLC Speed”, AL 2



Fonte: autoria própria

A Figura 58 mostra o gráfico de controle para o desvio médio no teste “MLC Speed” nele se observa os valores de 0,71 % para o LC, o valor de 1,56 % para LSC e LA de 2,35 %, aproximadamente iguais à tolerância sugerida pela literatura.

Figura 58 - Gráfico de controle para avaliar o desvio médio do teste “MLC Speed”, para o AL 2



Fonte: autoria própria

As Figuras 57 e 58 ilustram os limites de controle do teste de velocidade do MLC em arco modulado. Devido aos valores encontrados para o desvio máximo e médio terem sido menores após o upgrade do controlador do MLC, para confecção dos gráficos foi preciso excluir alguns pontos mais extremos e refazer os limites. A coleta dos dados seguirá para se definir se realmente foi essa razão da maior variação. Se confirmado esse fato, isso é um achado importante para os usuários e fabricante.

Vale ressaltar também que, por esse teste ter apresentado uma variação maior, foi realizado uma série de 10 medidas em um mesmo dia (20 de abril 2024) e os resultados foram similares quanto a variação. O controlador foi trocado em maio de 2024, desde então os valores estão reduzidos.

A partir dos resultados para esse teste de velocidade do MLC é possível afirmar que esse foi o teste com maior variação tanto para o AL 1 quanto para o AL 2, isso mostra mais uma vez a importância de se obter limites institucionais a fim de se ter um acompanhamento maior de determinados testes, podendo até ser motivo de aumentar a frequência deles conforme seus resultados. Ling e colaboradores(28)

encontraram, para esse mesmo teste mas medido com filme radiocromico, valores que variaram de -0,8 % a 0,8 % com valores médios de 0,4 %.

As Tabelas 18 e 19 ilustram os resultados resumidos para o AL 1 e AL 2, para o desvio máximo e desvio médio, respectivamente. Esses resultados mostram mais uma vez a equivalência dos ALs.

Tabela 18 - limites de controle para o desvio máximo resumidos para o AL 1 e AL 2

Limites de controle	AL 1	AL 2	Tolerância (%)
LSC	3,22	3,01	3,0
LIC	-0,40	-0,40	
LC	1,41	1,30	
LA (%)	4,62	4,36	

Fonte: autoria própria

Tabela 19 - limites de controle para o desvio médio resumidos para o AL 1 e AL 2

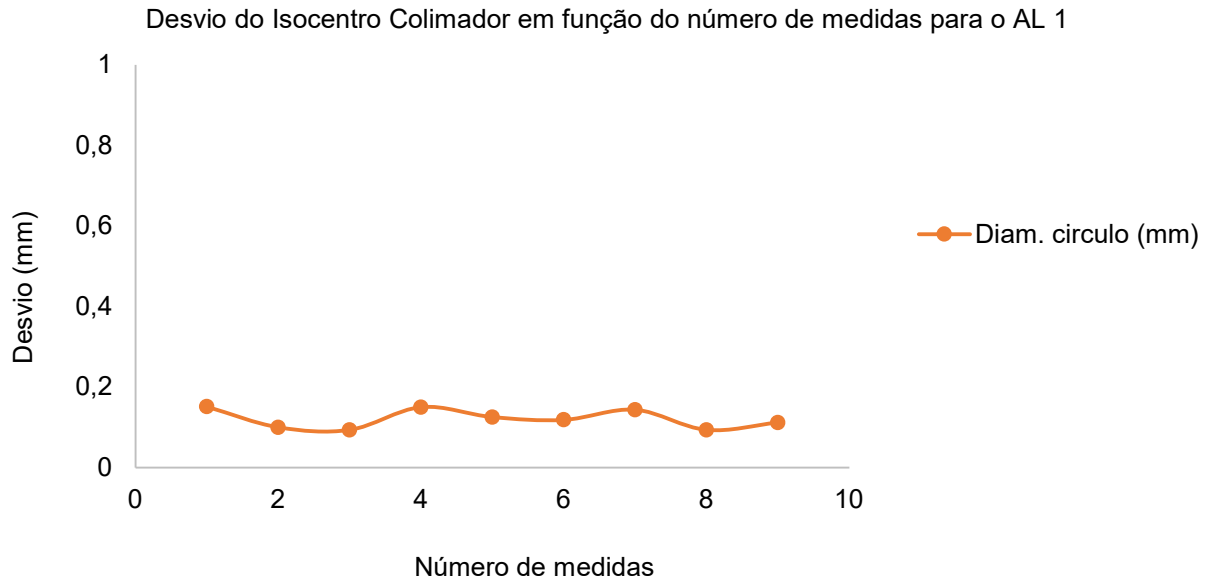
Limites de controle	AL 1	AL 2	Tolerância (%)
LSC (%)	1,81	1,56	1,50
LIC (%)	-0,26	-0,14	
LC (%)	0,77	0,71	
LA (%)	2,61	2,35	

Fonte: autoria própria

### 5.3 Start Shot

A Figura 59 apresenta os dados medidos para o teste Star Shot (Colimador) para verificação do isocentro do AL 1. Nele se observa um desvio máximo menor que 0,25 mm para todos os pontos. A tolerância para esse teste é de 1 mm.

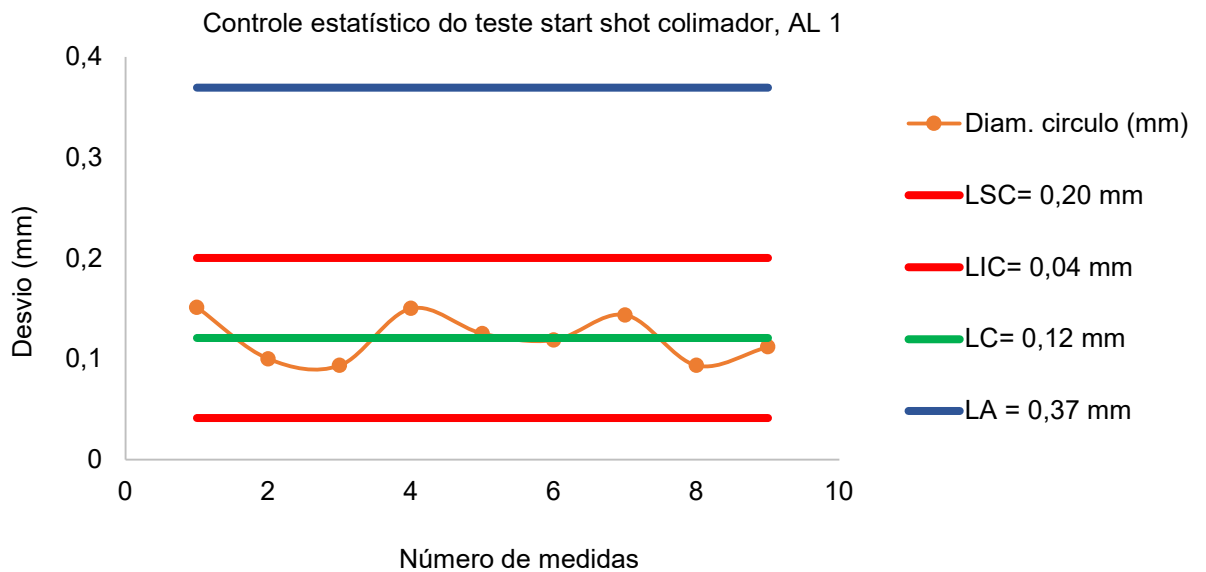
Figura 59 - Dados medidos para avaliar o teste Start Shot colimador para o AL 1



Fonte: autoria própria

A Figura 60 apresenta o gráfico de controle para o desvio médio no teste start shot, nele se observa os valores de 0,12 mm para o LC, o valor de 0,20 mm para LSC e LA de 0,37 mm, bem abaixo de 1 mm, sugerido pelo TG 142 como referência de tolerância, ou seja, embora seja de 1 mm a tolerância do teste, um resultado acima de 0,20 mm já seria motivo de observação, com uma atenção maior em 0,37 mm.

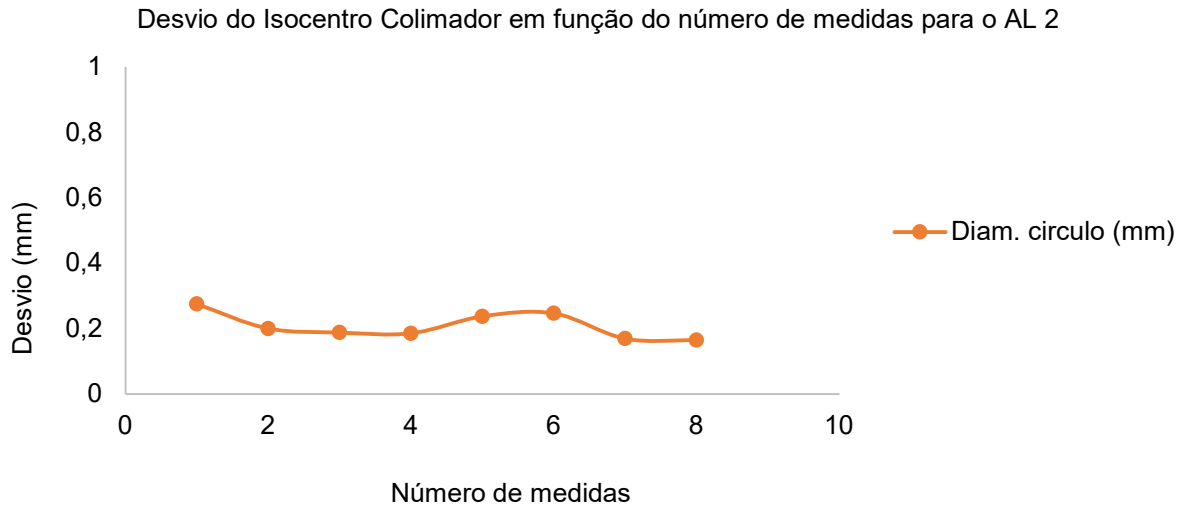
Figura 60 - Gráfico de controle para o teste start shot colimador, AL 1



Fonte: autoria própria

A Figura 61 apresenta os dados medidos para o teste Star Shot (Colimador) para verificação do isocentro do AL 2. Nele se observa um desvio máximo menor que 0,30 mm para todos os pontos.

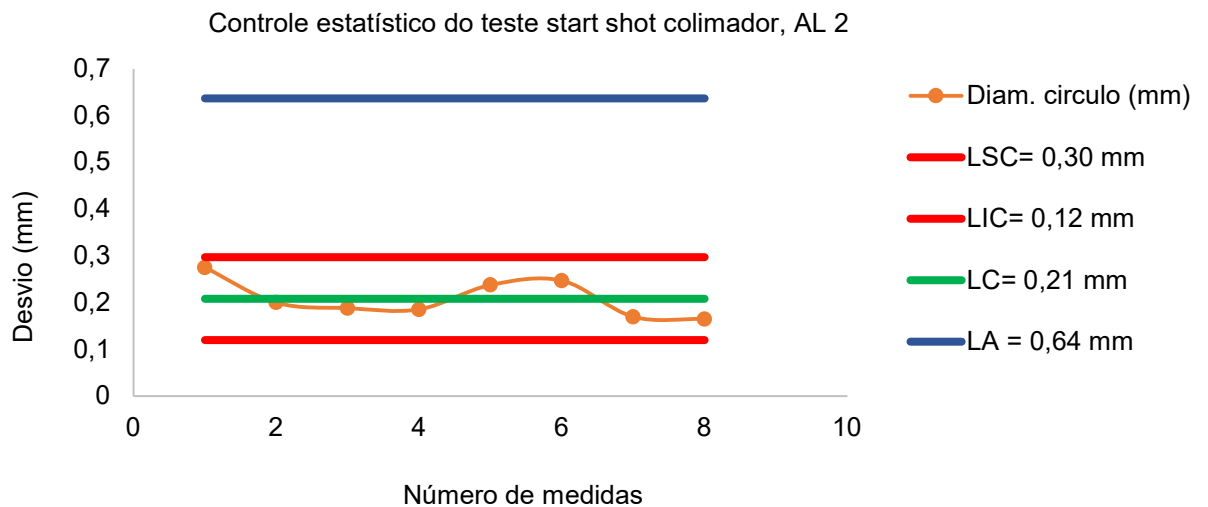
Figura 61 - Dados medidos para avaliar o teste Start Shot colimador para o AL 2



Fonte: autoria própria

A Figura 62 apresenta o gráfico de controle para o desvio, em mm, no teste start shot colimador, nele se observa os valores de 0,21 mm para o LC, o valor de 0,30 mm para LSC e LA de 0,64 mm.

Figura 62 - Gráfico de controle para o teste start shot colimador, AL 2



Fonte: autoria própria

Os valores obtidos para o teste StartShot colimador todos ficaram abaixo de 0,30 mm, para as duas máquinas, menor que metade da tolerância de 1 mm. Os valores de tolerância obtidos a partir do CEP foram 0,20 e 0,30 mm respectivamente para o AL 1 e AL 2 e LA de 0,37 e 0,64 mm. Esse resultado mostra valores próximos entre as duas máquinas, com o AL 2 apresentando valores ligeiramente maiores para os desvios.

Tabela 20 - Tabela resumindo os resultados dos limites de controle do teste Start Shot, AL1 e AL 2

Limites de controle	AL 1	AL 2	Tolerância (mm)
LSC (mm)	0,20	0,30	1,0
LIC (mm)	0,04	0,12	
LC (mm)	0,12	0,21	
LA (mm)	0,37	0,64	

Fonte: autoria própria

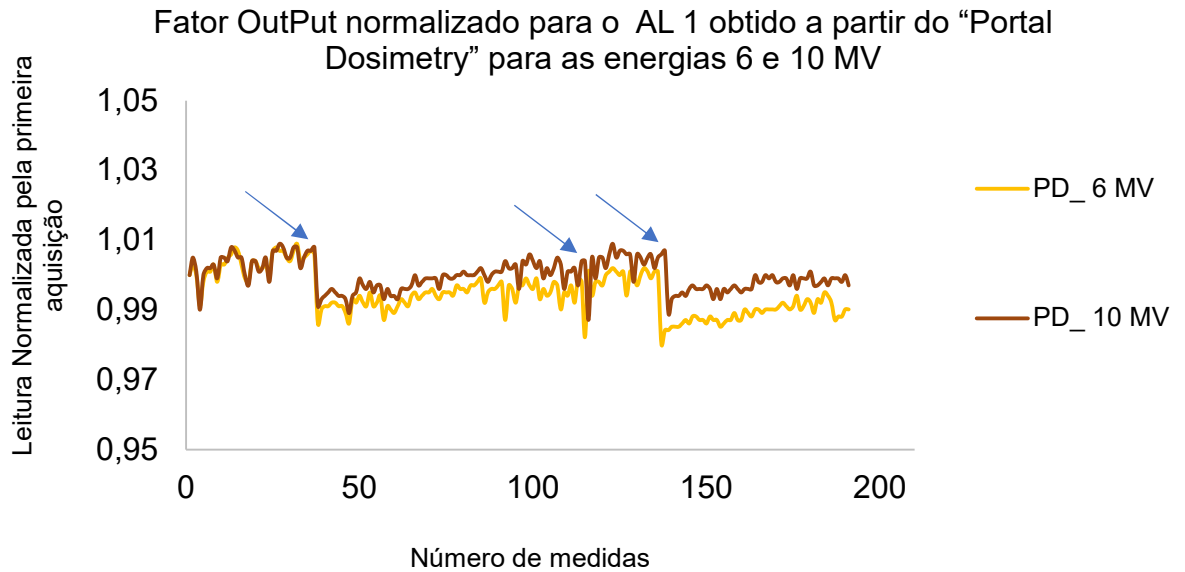
Esses valores indicam que as máquinas possuem valores de tolerância bem menores que 1 mm(14) para isocentro, indicando que possuem uma característica fundamental nesse quesito.

#### 5.4 Fator Output com o “Portal Dosimetry”

A verificação do fator output é realizada diariamente com o “Portal Dosimetry” e o “Matrixx” na Instituição em que foi realizada o estudo. Este detector é um sistema de matriz bidimensional de câmaras de ionização, com 1020 detectores organizados em seu interior.

Com o EPID esse teste é realizado com 100 UMs, no eixo central do detector, coordenadas (0,0,0), um campo 10 x10 cm<sup>2</sup> e taxa de dose de 600 cGy/min. A leitura pode ser obtida em Unidades de Calibração (UC). As Figuras 63 e 64 mostram esses dados ao longo do período analisado, para as duas máquinas e energias 6 e 10 MV. A tolerância sugerida para o output é 3 % com relação a “base line”(14).

Figura 63 - Variação do OutPut diário do PD para o AL 1 e energias 6 e 10 MV

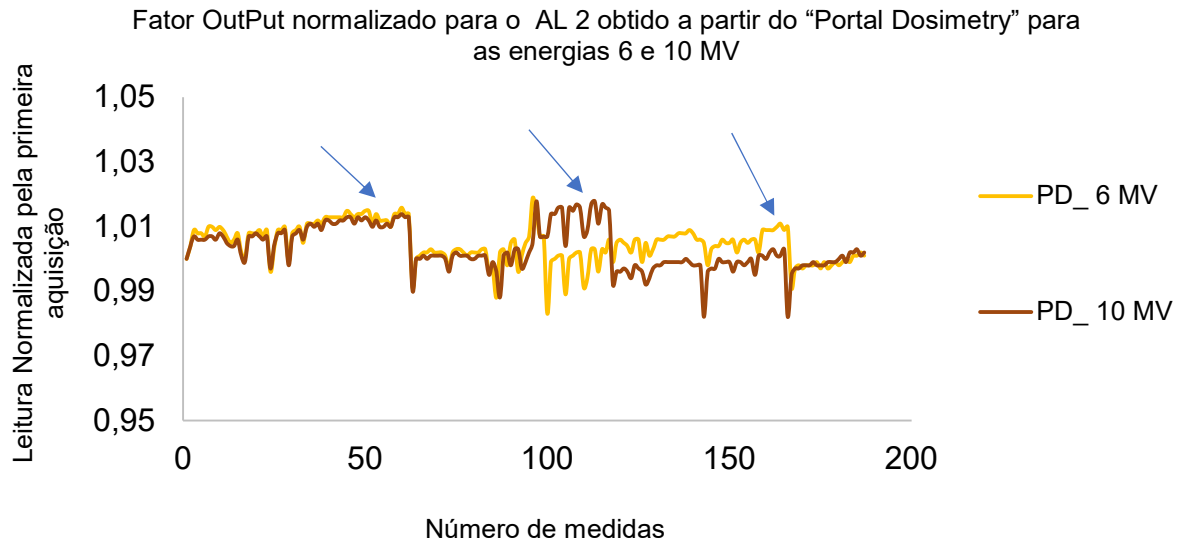


Fonte: autoria própria

Para o AL 1, a média das leituras do output para 6 MV foi de 100,5 UC, com desvio padrão de 0,6 UC, com nível de confiança de 95 % (probabilidade de um valor medido estar dentro desse intervalo) e intervalo de confiança (99,3; 101,7). Para a energia de 10 MV os mesmos dados foram 100,7 para o valor médio e 0,4 para o desvio padrão, com intervalo de confiança em (99,8 ;101,5). As setas nos gráficos indicam novas aquisições de valores de referência devido a manutenções “Portal Dosimetry” ou ajuste no feixe em dosimetria absoluta, expresso pela última seta da esquerda para direita nas Figuras 63 e 64.

Para os dois detectores, o período analisado foi de junho de 2023 a abril de 2024.

Figura 64 - Variação do OutPut diário do PD para o AL 2 e energias 6 e 10 MV

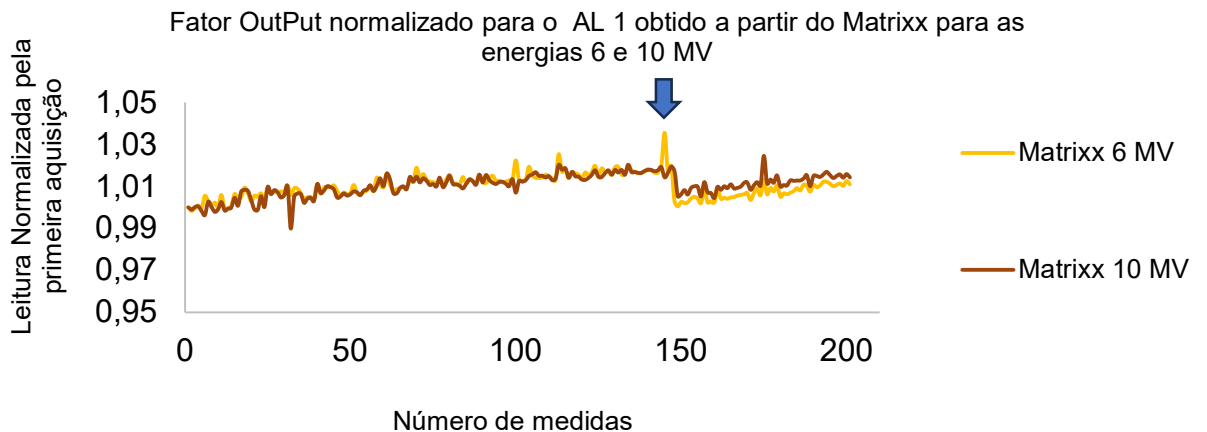


Fonte: autoria própria

Para o AL 2, a média das leituras do Output para 6 MV foi de 101,2 UC, com desvio padrão de 0,6 UC, com intervalo de confiança de (100,0; 102,3). Para a energia de 10 MV os mesmos dados foram 101,1; 0,7 UC e (99,8; 102,5) respectivamente média, desvio padrão e intervalo de confiança.

As medidas com o matrixx foram realizadas no mesmo período, com um campo padrão para o teste nesse detector de 20 x20 cm<sup>2</sup>, 100 UMs, para os dos aceleradores e energias de fótons disponíveis de 6 e 10 MV, com uma água sólida de 5 cm sobre o detector. Os resultados estão disponíveis nas Figuras 65 e 66.

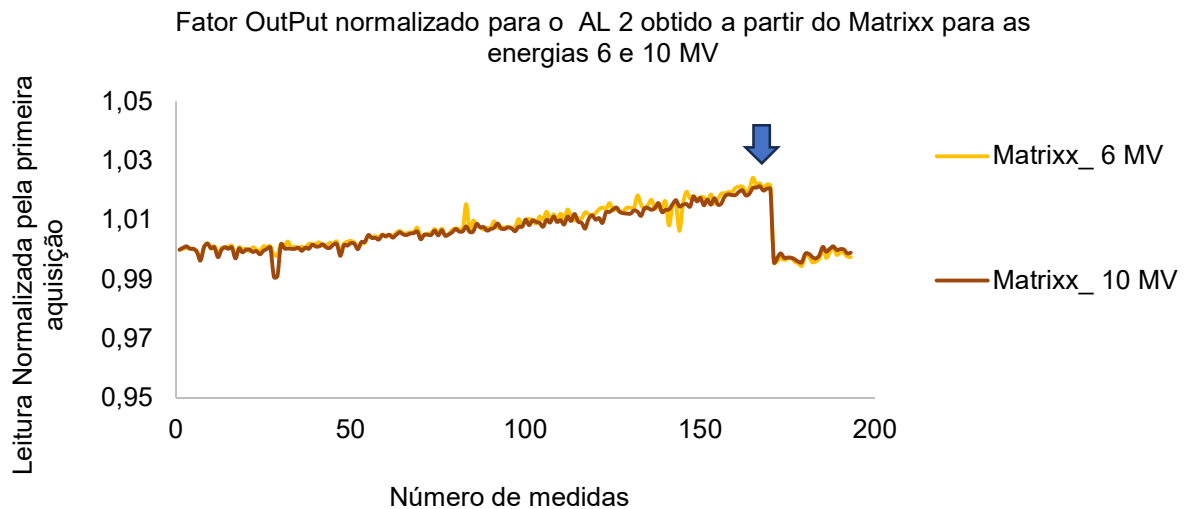
Figura 65 - Variação do Output diário do matrixx para o AL 1 e energias 6 e 10 MV



Para o AL 1, a média das leituras do Output para o matrixx na energia 6 MV foi de 100,6 cGy, com desvio padrão de 0,6 cGy, com intervalo de confiança (99,4 ; 101,6

cGy). Para a energia de 10 MV os mesmos dados foram 102,2 cGy; 0,6 cGy e ( 99,4 ; 101,60 cGy) respectivamente média, desvio padrão e intervalo de confiança. As setas nas Figuras 58 e 69 indicam um ajuste no feixe de 2% em uma dosimetria absoluta, para os dois aceleradores e energias.

Figura 66 - Variação do Output diário do matrixx para o AL 2 e energias 6 e 10 MV



Fonte: autoria própria

Para o AL 2, a média das leituras do Output para o matrixx na energia 6 MV foi de 101,4 cGy, com desvio padrão de 0,7 cGy, com intervalo de confiança ( 99,7 ; 102,6 cGy) . Para a energia de 10 MV os mesmos dados foram 100,6 cGy; 0,7 cGy e (99,3 ; 101,98 cGy) respectivamente média, desvio padrão e intervalo de confiança.

A partir dos Gráficos 58 e 59 é possível notar que, para um número menor de medidas há uma flutuação do output em torno do valor inicial. Mas a partir de um certo ponto o valor tende a aumentar para os aceleradores e as duas energias avaliadas, isso foi observado também pelo Z Saleh e colaboradores(32), que concluíram que isso é devido a um problema chamado “câmara monitora pressurizada” (fuga ao longo do tempo), esse incremento pode indicar quando se deve realizar uma calibração do OutPut. As setas azuis indicam o momento em que o valor retorna ao valor inicial, devido a um ajuste de 2% realizado em uma dosimetria nas máquinas.

Pelos valores observados de desvio padrão, as duas máquinas e energias possuem comportamentos similares, observado também pelos gráficos.

Outra observação evidenciada pelos gráficos é o comportamento das curvas, que podem indicar quando se deve realizar uma calibração do feixe das máquinas, caracterizado pelo leve aumento ao longo do tempo.

Alguns pesquisadores fizeram uma análise baseada no método “CUSUM”(21,20) para avaliar o OutPut das máquinas. Devido a grande quantidade de dados coletados e analisados, é possível, a partir desses dados monitorar o OutPut a partir desse método para o auxílio de dosimetria absoluta(18) e controle do processo, obtendo indícios por exemplo de quando o processo começa a sair de controle. Essa será a próxima etapa desse projeto.

A Tabela 21 resume os resultados para os valores médios e intervalo de confiança para os dois detectores utilizados. Para um nível de confiança de 95 %, nenhum valor do intervalo de confiança ultrapassou 3%.

Tabela 21 - Resuma dos resultados do Output para o Portal Dosimetry (PD) e Matrixx

	AL 1 (6 MV)	AL 2 (6 MV)	AL 1 (10 MV)	AL 2 (10 MV)
PD (média)	99,5	100,5	100	100,5
Matrixx (média)	101	100,7	101,1	100,7
PD (IC)	(98,3; 100,7)	(99,3; 101,6)	(99,1; 100,8)	(99,0; 101,7)
Matrixx (IC)	(99,1; 102,1)	(99,3; 102,1)	(100,0; 102,1)	(99,3; 102)

Fonte: autoria própria

## 6 Conclusões

Os resultados obtidos mostraram que o “Portal Dosimetry” pode ser uma ferramenta poderosa no controle de qualidade em radioterapia e que aliado a métodos estatísticos torna-se mais importante. Os testes dosimétricos realizados nesse trabalho permitiram observar características fundamentais no “Portal Dosimetry” como linearidade de resposta com a dose, independência da leitura com a taxa de dose, reprodutibilidade das leituras, independência direcional, efeito memória e obedece a lei do inverso do quadrado da distância. Esse dispositivo foi utilizado também para

controle da qualidade do colimador multilâminas, verificação do isocentro de radiação através do teste start shot e determinação do fator output diário, todos esses testes para o AL 1 e AL 2. Os métodos estatísticos empregados permitiram afirmar a similaridade entre as máquinas, que é do mesmo fabricante e tem o mesmo modelo.

A partir dos testes da caracterização dosimétrica é possível afirmar que o “Portal Dosimetry” pode ser amplamente utilizado no controle da qualidade em radioterapia, não somente nos testes realizados nessa tese, mas como no auxílio do controle de qualidade anual por exemplo, já que atende propriedades essenciais de um detector. Os desvios encontrados para linearidade, reprodutibilidade, dependência direcional, independência com a taxa de dose todos ficaram abaixo de 1 % para as duas energias disponíveis de fótons (6 MV e 10 MV) e para os dois aceleradores.

Os resultados obtidos para o controle da qualidade do colimador multilâminas e o teste Start Shot mostraram a importância de um método estatístico para avaliar as medidas. Neste trabalho foi utilizado a metodologia de Controle Estatístico de Processos e com isso foi possível verificar que o resultado dos testes estavam todos bem abaixo da tolerância e que por isso foi obtido valores de tolerância institucionais, que garantem uma análise mais abrangente ao invés de julgar um resultado apenas por uma medida. Os resultados obtidos para o “Picket Fence” foram menores de 0,25 mm em todos os casos, com tolerâncias obtidas para esses casos, para as duas máquinas, menor que 0,30 mm, menor que metade do valor da literatura, de modo similar o Start Shot, que também tem tolerância de 1 mm pelo TG 142, o seu resultado permitiu concluir que, para o AL 1 e AL 2 estudados, esses valores foram menores que 0,50 mm, mostrando mais uma vez que avaliar um conjunto de dados de controle de qualidade em radioterapia pode ser adequado para se ter um entendimento melhor do conjunto e tomar decisões mais acertadas a respeito de um resultado específico.

Neste trabalho o PD foi utilizado também para obtenção do OutPut diário da máquina e esses resultados foram comparados com outro detector, o Matrixx, e os resultados foram similares mostrando assim que o EPID pode ser utilizado para esse fim também.

## **7 LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS**

Uma das principais limitações desse trabalho foi, para alguns casos, o número das amostras, que podem ser consideradas pequenas.

Esse trabalho pode ter como perspectivas futuras avaliar o impacto de falhas nos testes estudados aqui nos tratamentos clínicos, que pode ser feito através de inserção de erros nos planejamentos e realizando verificações através de PSQA por exemplo.

Estudar um conjunto maior de testes de MLC que também podem ser realizados com o EPID, dada a sua versatilidade e praticidade, isso pode incluir medir e observar o DLG, Fator Transmissão, Gap Deslizante dentre outros, bem como avaliar o impacto clínico no caso de falha como no item anterior.

Outra perspectiva futura é utilizar o “Portal Dosimetry” de forma mais ampla em testes de controle da qualidade anual, bem como estabelecer limites de controle para esses testes utilizando esse detector. Testes como Linearidade, Reprodutibilidade, OutPut relativo, dependência direcional, fator campo dentre outros.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **O que é câncer?** Disponível em: <<https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/cancer/o-que-e-cancer/o-que-e-cancer>>. Acesso em: 26 maio. 2024.
- [2] WEINBERG, R. A. How Cancer Arises. **Scientific American**, v. 275, n. 3, p. 62–70, set. 1996.
- [3] CÂNCER, I. N. DE. **Estimativa 2023: incidência de câncer no Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Nacional De Câncer, 2023.
- [4] SALVAJOLI, J. V.; SOUHAMI, L.; FARIA, S. L. **Radioterapia em oncologia**. [s.l.] Editora Atheneu, 2013.
- [5] AGENCY, I. A. E. **Radiation Oncology Physics**. [s.l.] International Atomic Energy Agency, 2005. Disponível em: <<https://www.iaea.org/publications/7086/radiation-oncology-physics>>. Acesso em: 5 out. 2024.
- [6] KHAN, F. M. **Khan's the Physics of Radiation Therapy**. Fifth edição ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2014.
- [7] FURNARI, L. **CONTROLE DA QUALIDADE EM RADIOTERAPIA**. São Paulo: Crayon Editorial, 2021, 2021.
- [8] VAN DER WAL, E. et al. **NCS Report 22: Code of practice for the quality assurance and control for intensity modulated radiotherapy**. Delft: NCS, 1 jun. 2013. Disponível em: <<https://radiationdosimetry.org/ncs/documents/code-of-practice-for-the-quality-assurance-and-control-for-intensity-modulated-radiotherapy>>. Acesso em: 26 maio. 2024.
- [9] **Radiation Detection and Measurement, 4th Edition | Wiley**. Disponível em: <<https://www.wiley.com/en-ae/Radiation+Detection+and+Measurement%2C+4th+Edition-p-9780470131480>>. Acesso em: 5 out. 2024.
- [10] WATANABE, É. Y. **Avaliação do dispositivo eletrônico de imagem portal “Portal Dosimetry” no controle de qualidade de radioterapia de intensidade modulada**. Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações—São Paulo: Universidade de São Paulo, 13 ago. 2010.
- [11] KAVUMA, A. et al. Assessment of dosimetrical performance in 11 Varian a-Si500 electronic portal imaging devices. **Physics in Medicine and Biology**, v. 53, n. 23, p. 6893–6909, 7 dez. 2008.
- [12] MANCUZO, A. D. **Evaluación del modelo EPID AS1200 y puesta en funcionamiento de la dosimetría portal para diferentes energías de fotones**. 12 dez. 2017. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluaci%C3%B3n-del-modelo-EPID-AS1200-y-puesta-en-de-la->

Mancuzo/71ca28e30bbc59e5ed950c7c2d3ff8b5d2fcb8c0>. Acesso em: 5 out. 2024

- [13] **Portal Dosimetry 16.1**. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.myvarian.com/s/productdocumentation?lang=undefined>>.
- [14] KLEIN, E. E. et al. Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators). **Medical Physics**, v. 36, n. 9Part1, p. 4197–4212, 2009.
- [15] HANLEY, J. et al. AAPM Task Group 198 Report: An implementation guide for TG 142 quality assurance of medical accelerators. **Medical Physics**, v. 48, n. 10, p. e830–e885, 2021.
- [16] EZZELL, G. A. et al. IMRT commissioning: Multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119. **Medical Physics**, v. 36, n. 11, p. 5359–5373, 2009.
- [17] Practical Implementation of EPID- based QA for Linac. [s.d.].
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy**. Rev. 1 ed. [s.l.] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2024.
- [19] THOALDO, D. **Controle estatístico de processo**. Curitiba, PR: Inter saberes, 2023.
- [20] RAVEENDRAN, V. et al. Moving towards process-based radiotherapy quality assurance using statistical process control. **Physica Medica**, v. 112, p. 102651, 2023.
- [21] SANGHANGTHUM, T. et al. A method of setting limits for the purpose of quality assurance. **Physics in Medicine & Biology**, v. 58, n. 19, p. 7025, set. 2013.
- [22] MIFTEN, M. et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218. **Medical Physics**, v. 45, n. 4, p. e53–e83, 2018.
- [23] MORETTO, G. M.; RIBEIRO, V. A. B.; DOS SANTOS, G. R. Análise gama e medida de dose pontual, baseado na metodologia de controle estatístico de processo. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 13, n. 3, p. 8–14, 2019.
- [24] **Product Documentation**. Disponível em: <<https://www.myvarian.com/s/productdocumentation?lang=undefined>>. Acesso em: 5 out. 2024.
- [25] BEIGUELMAN, B. **Curso Prático de Bioestatística**. Ribeirão Preto, SP: FUNPEC, 2002.
- [26] **Gráfico CUSUM para Somas Cumulativas + Exemplo Excel**. , 27 ago. 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=YLR7I3sacfQ>>. Acesso em: 5 out. 2024

- [27] SANTOS, A. A. DA S. Elaboração de um programa de CQ para MLC no serviço de radioterapia da Fundação Centro de Controle de Oncologia do Estado do Amazonas (FCECON-AM) a partir da leitura do TG 142 e do NCS 22. 14 mar. 2019.
- [28] LING, C. C. et al. Commissioning and Quality Assurance of RapidArc Radiotherapy Delivery System. **International Journal of Radiation Oncology\*Biography\*Physics**, v. 72, n. 2, p. 575–581, 1 out. 2008.
- [29] **Escla QA - Pylinac · Streamlit**. Disponível em: <<https://escla-pylinac.streamlit.app/>>. Acesso em: 3 maio. 2024.
- [30] MEYERS, S. M.; BALDERSON, M. J.; LÉTOURNEAU, D. Evaluation of Elekta Agility multi-leaf collimator performance using statistical process control tools. **Journal of Applied Clinical Medical Physics**, v. 20, n. 7, p. 100–108, 2019.
- [31] LÉTOURNEAU, D. et al. Multileaf collimator performance monitoring and improvement using semiautomated quality control testing and statistical process control. **Medical Physics**, v. 41, n. 12, p. 121713, dez. 2014.
- [32] SALEH, Z. et al. SU-G-TeP2-01: Can EPID Based Measurement Replace Traditional Daily Output QA On Megavoltage Linac? **Medical Physics**, v. 43, n. 6Part26, p. 3663–3663, 2016.

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino**  
**Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000**  
**Fone (11) 2810-1570 ou (11) 2810-1572**  
**SÃO PAULO – São Paulo – Brasil**  
**<http://mprofissional.ipen.br>**

**O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Governo do Estado de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) do Governo Federal.**