



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE TECNOLOGÍA MÉDICA

PROGRAMA DE GARANTÍA DE CALIDAD EN
SISTEMA DE COLIMACIÓN MULTILÁMINAS
(MLC) EN ACELERADOR LINEAL CLINAC VARIAN
21 EX DE LA FUNDACIÓN ARTURO LÓPEZ PÉREZ
PROYECTO DE TESIS PROFESIONAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE TECNÓLOGO
MÉDICO CON MENCIÓN EN RADIOLOGÍA Y FÍSICA MÉDICA

AUTOR: Claudio Aravena Plaza

TUTOR: T.M. Alexis Troncoso.

ASESOR ESTADÍSTICO: Dra. Ana María Salazar B.

2014

AGRADECIMIENTOS

En primera oportunidad agradecer a mi Tutor de Tesis TM y Profesor Alexis Troncoso, por la dedicación, compromiso y ayuda constante en todo lo que respecta la tesis, por disponer de su tiempo para trabajar durante los meses de Tesis, así como la simpatía y respeto con el cual trabaja diariamente.

Agradecer también al servicio de Radioterapia de la Fundación Arturo López Pérez por las facilidades para trabajar en el desarrollo de esta tesis, por los insumos y el tiempo de uso de las instalaciones, así como la calidez y buen trato que todos los miembros de este servicio entregaron durante mi estadía.

Agradezco a la Dr. Ana María Salazar por la ayuda constante en el diseño metodológico y análisis de los datos, sin lugar a duda su ayuda le otorga un peso estadístico importante al presente trabajo.

Agradezco a mi compañera de caminos Jacqueline Morales, por soportar todo el tiempo dedicado y las muchas conversaciones que tuvo que soportar sobre la tesis, su compañía y ayuda han sido de importancia en la redacción y diseño de este trabajo de tesis.

Agradezco a Andre Micke, por la colaboración en la instalación y ayuda para utilización del Software FilmQA Pro 2014, ya que su ayuda fue útil y significativa en los resultados finales de la tesis.

Claudio Aravena Plaza.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de tesis a mi familia, padres, hermanos, abuelos, tíos y tías a mi bisabuela, que me acompañan día a día en el diario vivir, que han formado y contribuido a lo que soy y que de a poco se han ido haciendo parte de cada uno de los pasos que voy dando en la vida.

También dedico este trabajo a mi compañera Jacqueline Morales, que es parte del camino que escogí y quien me apuntala día a día y hace de mi vida un espacio de convicción e ideas que convergen en un camino común de lucha cotidiana.

1-. ÍNDICE

1. Índice.....	pág. 4
2. Resumen	pág. 6
3. Introducción.....	pág. 7
4. Marco Teórico.....	pág. 8
I. Principios Básicos de Radioterapia externa:	pág. 8
1.1. Definición de Estructuras Anatómicas.....	pág. 8
1.2. El Acelerador Lineal Clínico.....	pág. 10
1.3. Radioterapia Conformacional (CRT).....	pág. 14
II. Sistemas de Colimación en LINAC.....	pág. 16
2.1. Colimador primario fijo.....	pág. 16
2.2. Mandíbulas de Colimación Secundaria.....	pág. 16
2.3. Bloques Protectores individuales.....	pág. 17
2.4. Sistema de Colimación Terciara.....	pág. 18
III. Programa de Garantía de Calidad:.....	pág. 28
3.1. Garantía de Calidad para un Sistema MLC.....	pág. 29
5. Problema de Investigación:	pág. 35
6-. Objetivos:	pág. 36
6.1. Objetivo General.	pág. 36
6.2. Objetivos Específicos.	pág. 36
7. Material y Métodos.....	pág. 37
8. Resultados.	pág. 59
9. Discusión.	pág. 89

10. Conclusión.pág. 100

11. Referencias.pág. 102

12. Anexo 1.pág. 105

2-. RESUMEN

En Chile ha crecido fuertemente el uso de Aceleradores lineales, así como sofisticados Sistemas computarizados de colimación de Múltiples Láminas (MLC). Si bien la tecnología ha comenzado a evolucionar, las normativas no han generado estos cambios por lo que resulta importante tener un control de la calidad en estos sistemas de colimación que corroboren el estado en el que se encuentran. Es por esta razón que en el siguiente trabajo se evaluó un programa de control de calidad para el MLC Millennium 80 del Acelerador lineal Clinac Varian 21 EX de la Fundación Arturo López Pérez, el cual fue sometido a la realización de pruebas del tipo geométricas y dosimétricas utilizando las tolerancias propuestas por la Sociedad española de Física Médica. En el caso de las Pruebas Geométricas, fueron realizadas en el tiempo en tres oportunidades calculando la media aritmética, la desviación estándar y el error absoluto de la medición realizada mediante la utilización del Software para Control de calidad FilmQA Pro 2014 mediante placas irradiadas y mediante medición manual, donde ninguna de las pruebas excede de la tolerancia propuesta. Para el caso de las pruebas Dosimétricas fueron realizadas una vez en el tiempo, porque se compara los valores obtenidos en la prueba mediante el MLC y el Colimador Convencional, obteniendo resultados positivos. Se concluye que el MLC del equipo se encuentra en condiciones de calidad acorde a lo propuesto por la Sociedad de Física Médica, por lo tanto se propone la aplicación del programa de Garantía de Calidad para evaluarse en el tiempo y considerarse dentro de los criterios de calidad del mismo equipo.

3-. INTRODUCCIÓN

En el último tiempo en Chile ha existido un crecimiento en las técnicas y equipamiento usados en Radioterapia, este crecimiento ha llevado consigo la utilización de Aceleradores lineales para la realización de los tratamientos.

Dentro de los componentes de los Aceleradores Lineales, son los Sistemas de Colimación los cuales a partir de su funcionamiento se constituyen en un determinante de la dosis absorbida por el paciente y de la protección radiológica, esto último especialmente en aquellas zonas del cuerpo que no deben ser irradiadas. El aumento creciente de la tecnología ha llevado a la utilización de un Sistema de Colimación de Múltiples Láminas (MLC) en el que se automatiza el proceso de colimación, razón por la cual surge la necesidad de tener un Programa de Garantía de Calidad para el MLC, que certifique su correcto funcionamiento.

En la normativa chilena dentro de las pruebas exigidas no se solicitan pruebas específicas para el MLC¹. Sumado esto a que dentro de la Fundación Arturo López Pérez el MLC fue cambiado el año 2012 por un MLC MilleniumTM 80 para el que no existe un Programa de Garantía de calidad que permita monitorizar las condiciones en las que se encuentra dicho equipo. Por lo mencionado anteriormente es que este estudio de carácter descriptivo se propone evaluar un programa de garantía de calidad del equipamiento de radioterapia para el sistema de colimación MLC en el Acelerador Lineal CLINAC VARIAN 21 EX de la Fundación Arturo López Pérez, propuesto por la Sociedad Española de Física Médica.

4. MARCO TEÓRICO

I. Principios Básicos de Radioterapia externa

Dentro de las técnicas para el tratamiento del cáncer, la radioterapia externa resultar ser una de las técnicas más importante usadas a la hora de tratar un determinado cáncer y muchos más hoy en día donde un porcentaje alto de la población chilena sufre de esta patología². Es así también como con el paso del tiempo nuevas tecnologías han ido incorporándose dentro de esta disciplina con óptimos resultado desde el punto de vista de la calidad de los tratamientos y la posibilidad de cumplir el objetivo propuesto en un alto porcentaje. El presente tópico presenta una revisión de conceptos importantes que permiten dar una base al presente proyecto de investigación.

1.1. Definición de Estructuras Anatómicas

Son las imágenes anatómicas adquiridas mediante métodos de imagen variados tales como la Tomografía Computada (TC), la Resonancia Nuclear Magnética (RM), entre otros que permiten al médico oncólogo poder delimitar el volumen de interés para realizar el tratamiento, ya sea el volumen tratado o el mismo volumen blanco. Pero claramente un cuerpo no se mantiene del todo estático, existiendo zonas del cuerpo en constante movimiento, es por esta razón que a la hora de delimitar los volúmenes se debe tener en cuenta los cambios relativos de posición de los volúmenes y de los haces durante el tratamiento, ya que estos llevaran a posibles imprecisiones durante la ejecución de este.

Es por esta razón que el ICRU ha reportado en los documentos número 50³ y 62⁴ con respecto a la delimitación de volúmenes que se realiza en radioterapia, tomando en

consideración las variaciones de posición debido al movimiento del cuerpo. Los volúmenes definidos por ambos documentos son los siguientes:

1.1.1. **Gross Target Volume (GTV):** es el volumen tumoral macroscópico, o sea la extensión de un tumor maligno palpable o visible. Esta visualización se puede obtener mediante métodos de imagen.

1.1.2. **Clinical Target Volume (CTV):** es el volumen de blanco clínico, es una suma entre el GTV con el margen local de la lesión subclínica. Pudiendo ser aquel donde solo existe una enfermedad subclínica. Como por ejemplo los ganglios linfáticos y vías de diseminación de un tumor maligno.

1.1.3. **Internal Target Volume (ITV):** este concepto fue recomendando en el informe 62 de la ICRU, en el que se propone delimitar un margen interno (IM) al CTV para compensar posibles movimientos fisiológicos, y variación en tamaño, forma y posición durante la terapia en relación a un punto de referencia interna y su sistema de coordenadas correspondiente. El volumen que queda dentro de este margen interno es denominado ITV.

1.1.4. **Planning Target Volume (PTV):** este es un concepto geométrico que se usa para planificar el tratamiento, con este volumen se seleccionan los tamaños de campos, las configuraciones de los haces, teniendo en cuenta todas las posibles variaciones geométricas, con tal de que la dosis prescrita sea depositada en el CTV.

1.1.5. **Treated Volume (TV):** es un volumen encerrado por la curva de isodosis seleccionada y especificada por el Médico oncólogo como la apropiada para conseguir el propósito del tratamiento.

1.1.6. **Irradiated Volume (IV):** es el volumen que recibe una dosis significativa en relación a la tolerancia del tejido normal.

1.1.7. **Organ at risk (OR)**: son tejidos normales cuya sensibilidad a la radiación puede influir significativamente en la planificación del tratamiento o en la dosis prescrita.

1.1.8. **Planning Organ at Risk Volume (PRV)**: tal como el CTV necesita un margen geométrico para procurar que la dosis prescrita sea depositada en él, un órgano de riesgo (OR) debe tener también un margen geométrico para procurar que no reciba una dosis más allá de su tolerancia. Este volumen contenido dentro de este margen, que contiene al órgano de riesgo se conoce como PRV.

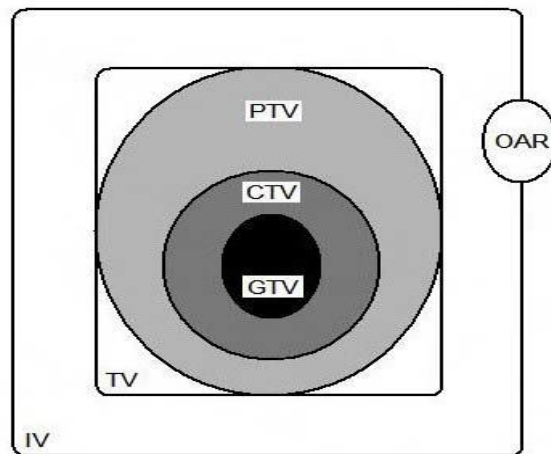


Figura N° 1: Se representan los volúmenes propuestos por el informe N° 50 de la ICRU.

1.2. El Acelerador Lineal Clínico

Los Aceleradores lineales de uso clínico hoy en día en los servicios de Radioterapia son de uso común. Estos Aceleradores principalmente funcionan por medio de la aceleración de electrones que impactan un blanco de Tungsteno, formando Rayos X de frenado y de alta energía, desde los 4 a 25 MV. Y también tienen la posibilidad de realizar tratamiento con electrones, los cuales esta vez no impactan el blanco, sino más bien se aceleran y se dirigen hacia el paciente, es decir, estos equipos pueden realizar dos tipos de tratamiento y a diferentes energías. En el caso de los tratamientos por fotones, éstos pueden

alcanzar profundidades de hasta 70 mm, como es el caso de energías bajas como 6 MV y mayores profundidades al aumentar la energía del Haz. Cuando el tratamiento es por electrones, estos debido a su alto LET⁵ interaccionan de inmediato con la materia, produciendo ionización directa lo que solo permite su uso para tratamiento superficiales.

El equipo posee diversas piezas que enlazadas permiten que este cumpla su función⁶. Estas piezas son:

1.2.1. Guía aceleradora de electrones: Las energías con las cuales se realizan los tratamientos están del orden de los MV, es por esta razón que los electrones deben ser fuertemente acelerados, y lo son en esta estructura a través de un campo eléctrico alterno de alta frecuencia. Esta guía ubicada en el mismo gantry, donde lo electrones son llevado a través de la guía focalizándose magnéticamente.

1.2.2. Suministro de potencia por microondas: El Klistrón o magnetrón es quien debe generar las microondas de alta potencia, las que a través de la guía de onda aceleradora permiten acelerar a los electrones a MV.

1.2.3. Haz pulsado: La energía suministrada al sistema para la producción y aceleración del haz de electrones, es obtenida a través de la red eléctrica, es el generador quien produce la alta potencia necesitada la que se descarga en los dispositivos del equipo. Todo esto dura milisegundos, en donde se forma un haz que no es continuo, sino que es pulsado.

1.2.4. Fuente termoiónica de electrones: Los electrones son producidos por efecto termoiónico y son pre-acelerados del orden de los 150 KeV hasta llegar a la guía aceleradora.

1.2.5. Sistema de deflexión magnético acromático: La guía aceleradora se encuentra en posición horizontal, por lo que la dirección de la trayectoria de los electrones es la misma, o sea estos deberán ser curvados para dirigirlos al blanco o al paciente propiamente tal. Esto se puede lograr haciendo pasar los electrones por un cavidad de alto vacío que se encuentra acoplada a la guía de la onda, la cual posee en su interior dos electroimanes quienes generan un campo magnético transversal. Estos electroimanes tiene una alta eficiencia en dirigir hacia la ventana a los electrones independiente de la dirección y energía de estos. El diseño de los electroimanes es acromático lo que permite tener mucha más eficiencia a la hora de dirigir los electrones, posee un sistema de colimación capaz de limitar la anchura espectral y la divergencia angular del haz. Dentro de todo, este sistema de electroimanes acromáticos permite tener mayor estabilidad en los haces ante los cambios sucesivos de energía.

1.2.6. Ventana de salida refrigerada: los electrones luego de ser desviados e interactuado con el blanco en el caso de fotones pasarán por una ventana, la cual posee un material refrigerante formada por dos finas láminas metálicas, la idea es reducir la temperaturas altas provocadas luego de la interacción de los electrones con el blanco.

1.2.7. Blanco: Generalmente los blancos están compuestos de varios materiales, generalmente son Tungsteno, Grafito y Cobre. El primero debido a su alto número atómico favorece la producción de rayos X, también posee un elevado punto de fusión lo que es bueno ya que no se daña por la altas temperaturas provocadas por la colisión de electrones en él. Considerar que la zona de impacto se produce específicamente en este material. Luego tenemos grafito, este se usa especialmente para disminuir el peso del blanco y que de esa forma alcanza con mayor facilidad la

velocidad de giro necesaria y el cobre permite disipar en gran medida el calor producido.

1.2.8. Hojas homogeneizadoras: debido a que el espectro de energía del haz es como una curva gaussiana, es que se necesita aplanar con tal de corregir este efecto y de esa forma evitar que se vea afectada la calidad del tratamiento. Se dispone de un filtro aplanador especialmente para fotones, que es más grueso en la parte central y tiene forma cónica lo que permite que el haz de fotones en la salida sea uniforme.

Con respecto a los sistemas de colimación que son parte del Cabezal del equipo, se abordarán en detalles en el capítulo II del Marco Teórico.

En la imagen N°2 se presenta un esquema del Acelerador Lineal Clínico.

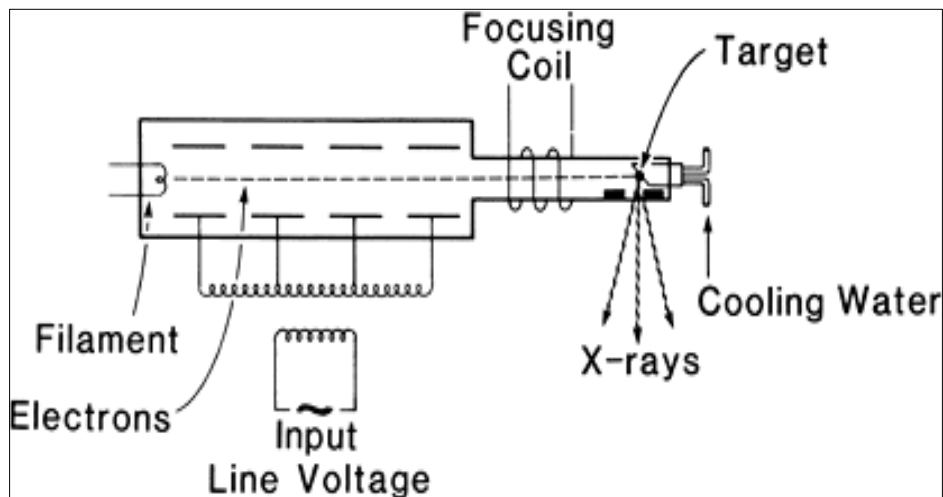


Figura N° 2: En la figura se representa un esquema de un acelerador lineal, en función de sus piezas más importantes.

1.3. Radioterapia Conformacional (CRT)

Esta modalidad tiene como fin la conformación, hasta donde sea posible, de la dosis de prescripción al volumen blanco de planificación (PTV) y evitar al máximo dosis a tejidos sanos.

Existen varias formas para poder realizar esta modalidad, una de las más utilizadas es la de bloquear las áreas de un campo rectangular o cuadrado, donde existen los tejidos no comprometidos, estos pueden ser delimitados con imágenes en 2D y en técnicas más modernas con imágenes en 3D. Las imágenes en 2D pueden ser con placas convencionales de rayos X, en las cuales se forman los campos reales a irradiar en el paciente con colimadores multiláminas o bloques protectores. Para seguir optimizando la dosis en los órganos blancos y disminuir la dosis en tejidos sanos se pueden hacer múltiples campos, ingresando por diferentes direcciones y apuntando hacia el volumen blanco.

Para mejorar aún más la conformación en el tratamiento y la distribución de dosis es que es muy común usar modificadores o compensadores del haz de radiación, tales como, cuñas o filtros compensadores. Esta modalidad también se puede realizar mediante el uso de imágenes en 3D. Es tal que este tipo se usa para la definición de volúmenes en 3D, al igual que las distribuciones de dosis. Las imágenes pueden ser obtenidas mediante CT, MR y PET. El desafío de lograr una buena conformación permitirá dar dosis altas al PTV, aumentando la probabilidad de control tumoral sin un incremento en la morbilidad⁷.

Entonces, el tratamiento con intensidad uniforme usando campos irregulares a partir de colimadores multiláminas (MLC) o de bloques de acuerdo a la proyección geométrica del PTV es lo que se conoce como Radioterapia Conformacional Convencional o CRT 3D.

Para obtener la dosis óptima en CRT 3D hay muchos obstáculos. La principal limitación es el conocimiento de la extensión del tumor. A pesar de los modernos avances en las

imágenes, el CTV, a menudo no es totalmente visible a pesar que el médico lo marca en base a su experiencia, lo que se visualiza finalmente es principalmente la extensión macroscópica de la lesión que es el GTV. Por lo tanto un error absoluto en la definición del CTV, hace perder la idea de la conformación. Y mucho más crítico en este tipo de modalidad CRT 3D, donde en comparación con tratamientos con campos generosamente anchos y arreglos de haces simples, claramente un error absoluto disminuye la precisión de la delimitación de volúmenes, pudiendo ser el tratamiento no efectivo.

Existen también otras limitaciones como el movimiento del paciente, el movimiento de los órganos críticos y puntos de referencia durante la exploración, la simulación y el tratamiento. Todos estos pueden dar errores absolutos sistemáticos y aleatorios que deben tenerse en cuenta cuando se diseña el PTV. Por esta razón, se debe considerar en el diseño de los campos de conformación para tratar adecuadamente el PTV, el perfil del haz transversal, la penumbra, y transporte de radiación lateral como una función de la profundidad, distancia radial, y la densidad del tejido. Por lo tanto, los márgenes suficientes se deben dar entre el esquema PTV y el límite del campo para asegurar la dosis adecuada para PTV en cada sesión de tratamiento.

Es por esta razón que la optimización de un plan de tratamiento CRT 3D tiene que ser evaluado no sólo en términos de la distribución de la dosis (por ejemplo, los histogramas de volumen de dosis) sino también en términos de características de dosis-respuesta de la enfermedad dada y los tejidos normales irradiados.

Por esta razón es que se debe tener cuidado para la definición de los volúmenes de destino, considerando las limitaciones inherentes e incertidumbres en cada paso del proceso. El PTV final debe basarse no sólo en los datos de imágenes dadas y otros estudios de

diagnóstico, sino también en la experiencia clínica que se ha obtenido en el manejo de esta enfermedad.

II. Sistemas de Colimación en LINAC

En la práctica de la radioterapia es importante resolver en tanto como sea posible que los órganos de riesgo no reciban dosis, mientras se administra la dosis prescrita en el tejido blanco. Sin lugar a duda ha sido el gran reto para la terapia con radiaciones, y se logra en gran medida con el avance de la tecnología. A continuación se presenta una revisión de cada componente participante en los sistemas de colimación presente en un LINAC.

2.1. Colimador primario fijo⁸

El colimador primario define el mayor tamaño de campo circular disponible y es una abertura cónica mecanizada en un bloque de blindaje de tungsteno. El espesor del bloque de blindaje está generalmente diseñado para atenuar la intensidad del haz de rayos X primario promedio de un valor menor o igual a 0,1% del valor inicial (tres capas décimo-valor (TVLs)). Según las recomendaciones de IEC, la fuga máxima no debe exceder el 0,2% del valor de haz abierto.

2.2. Mandíbulas de Colimación Secundaria⁹

Este mecanismo de colimación está compuesto por 4 mandíbulas de colimación agrupados de a pares. Estas son de metal, generalmente de aleaciones entre Tungsteno y Plomo alcanzando espesores de 8 cm. Estos 2 pares de mandíbulas se dividen en Mandíbulas Superiores (*Upper Jaws*) y Mandíbulas Inferiores (*Lower Jaws*), la que se define solo por la posición en la que se encuentran, es decir, las mandíbulas superiores están por sobre las

mandíbulas inferiores y limitan el campo en el eje Y, en cambio las mandíbulas superiores se encuentran por debajo de las mandíbulas inferiores y limitan el campo en el eje X del plano. La combinación y cierre de las mandíbulas permite bloquear un determinado campo de irradiación, alcanzando campos de $0 \times 0 \text{ cm}^2$ hasta campos de $40 \times 40 \text{ cm}^2$ en el isocentro, porque el equipo se puede rotar en el eje central sin alterar las posiciones de este sistema. Con respecto a los bordes de los bloques estos deben ajustarse a la divergencia del haz, con la idea de disminuir el posible aumento de penumbra producto de la transmisión ocurrida en las mismas mandíbulas.

En general, los fabricantes de Linacs agregan a estos sistemas de colimación campos de luz visible, con la idea de definir el centro geométrico y los lados del campo de radiación. Visto la importancia del campo de luz visible, obliga el ajuste periódico para corroborar la coincidencia de los campos.

Los campos generados con colimadores convencionales son cuadrados y rectangulares, es por esta razón que se han creado mecanismos para hacer campos asimétricos, la idea es dar a cada mandíbula independencia, pudiendo lograr que la distancia al eje central de haz de cada mandíbula sea diferente.

2.3. Bloques Protectores individuales¹⁰

La colimación primaria y las mandíbulas no son capaces de generar campos irregulares, que son los más usados para la CRT 3D y IMRT, es por esta razón que ante la necesidad de bloquear zonas se usan bloques de material atenuador generando campos irregulares que logran una conformación que es capaz de aumentar la probabilidad de que la dosis prescrita llegue al PTV y que los órganos de riesgo reciban dosis muy por bajo de su tolerancia.

Estos bloques son dispuestos bajo el sistema de colimación del equipo en un soporte para bloques conocido como bandeja de bloques, Los espesores usados para su conformación serán acorde a las características del material que se use para producirlo, pero en general estos bloques deben permitir que solo un 5% de la radiación incidente en ellos los atraviese. Se usan modernas aleaciones, pero la más conocida es el Cerrobend™ o conocido también como Material de Wood, el que está compuesto por distintos materiales como Bismuto (50%), Plomo (26,7%), Estaño (13,3%), Cadmio (10%), este material tiene una densidad de $9,64 \text{ g/cm}^3$ y un punto de fusión de 70° C .

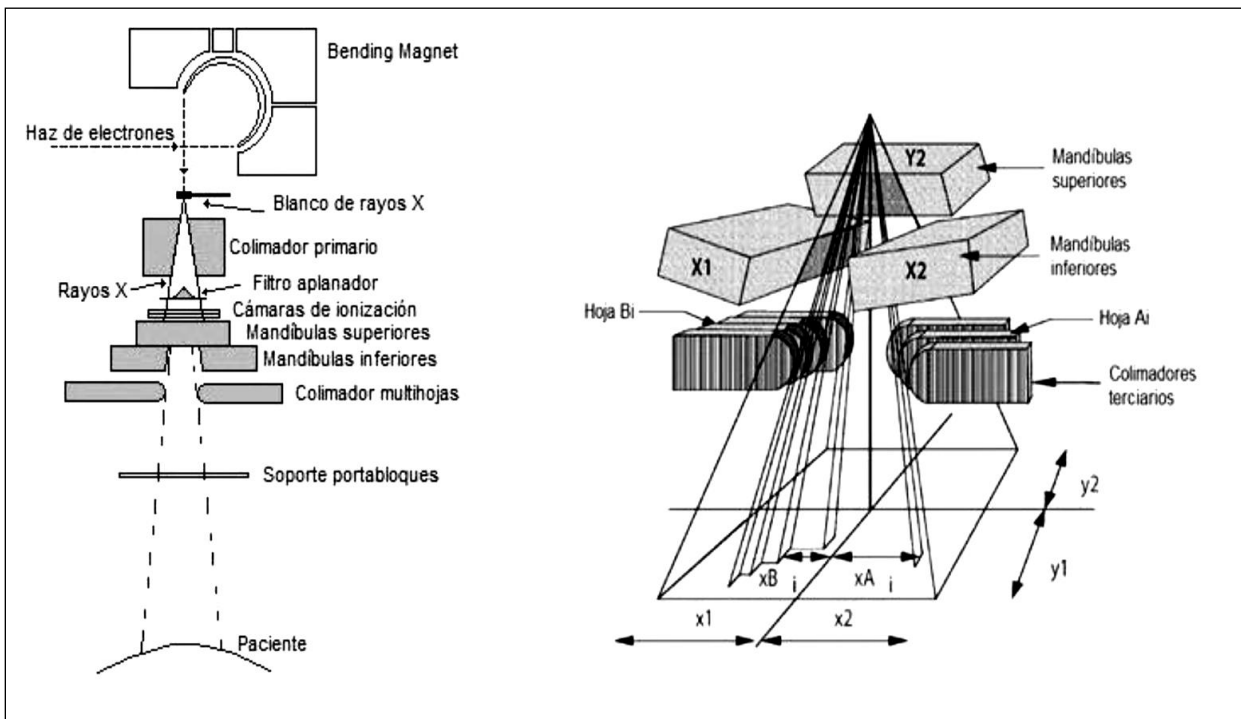


Figura N°4: **A-** La imagen representa de forma esquemática los tipos de colimación presente en un Acelerador Lineal. **B-** La imagen de la derecha representa de forma esquemática la disposición de los colimadores secundarios en relación a un sistema MLC.

2.4. Sistema de Colimación Terciara¹¹

De la colimación secundaria sabemos que son un sistema de mandíbulas superiores e inferiores que conforman y delimitan campos rectangulares y campos cuadrados. Esto nos presenta un problema importante, considerando que en la mayoría de los tratamientos los campos son irregulares, por lo que para poder conformar dichos campos se usan protectores de material atenuador llamado Cerrobend™. Estos bloques son dependientes del tratamiento y de un determinado haz, por lo que dificulta no tan solo el cálculo exacto de la dosis en el paciente, sino además se lentifica el proceso. Es por esta razón que se trabajó en un sistema electrónico para la conformación de los campos irregulares el cual da más control a la hora de diseñar el tratamiento ya que es manejado por un computador, lo que se traduce en el tiempo, en un aumento de la rapidez del proceso. Este es un sistema de colimación de múltiples láminas (MLC).

El MLC es un sistema de colimación compuesto por láminas móviles, que pueden bloquear algunas fracciones del haz de radiación. Los MLCs más típicos tienen de 40 a 120 hojas que están dispuestas en pares. Las cuales por el movimiento y el control de un gran número de estrechas y colindantes láminas individuales, pueden generar casi cualquier forma de campo deseado.

Cuando mencionamos las ventajas, podemos darnos cuenta desde ya que hace del proceso uno más rápido, permite que el operador no ingrese a la sala de tratamiento y puede corregir de forma fácil la forma del campo. Los gastos pueden verse disminuidos, ya que en la mayoría de los tratamientos no se deben usar los bloques protectores. Se acorta considerablemente el tiempo tratamiento importante para el paciente ya que deberá permanecer menos tiempo en la posición. Se pueden sumar otras ventajas tales como el control constante y el ajuste continuo de la forma del campo durante la irradiación en la radioterapia conformacional 3D.

2.4.1. Configuración del MLC

Las configuraciones del MLC se pueden clasificar en función de si son sustitutos totales o parciales de la mandíbula superior, las mandíbulas inferiores, o como configuraciones de colimación terciarios:

2.4.1.1. Reemplazo de la mandíbula superior:

Esta configuración es la usada por el MLC utilizado por Elekta™, en el que se divide la mandíbula superior en un conjunto de láminas, las cuales se mueven en la dirección del eje de rotación del gantry. Un colimador “Back-up” ubicado debajo de las hojas y por encima de las mandíbulas inferiores aumenta la atenuación proporcionada por las láminas individuales.

El diafragma “back-up” es esencialmente una mandíbula superior delgada que se puede configurar para seguir las hojas del MLC si están dispuestas para formar un borde recto, o de lo contrario, se colocan en la posición de la lámina más externa, si las hojas forman una contorno irregular.

La ventaja de la configuración de sustitución de la mandíbula superior es que el rango de movimiento de las hojas requeridas para atravesar la anchura del campo colimado es más pequeño. Permitiendo una longitud de hoja más corta que entrega un diámetro del cabezal de tratamiento más compacto. La desventaja de tener un MLC tan cercano a la fuente consiste principalmente en que la anchura de la hoja debe ser algo menor y las tolerancias en las dimensiones de las hojas y el trayecto de las hojas debe ser más estrecha que en las otras configuraciones. Las hojas de este colimador tienen distancia de recorrido total de 32,5 cm, lo que significa que pueden extenderse 12,5 cm a través de la línea central.

2.4.1.2. Reemplazo de la mandíbula inferior:

Las mandíbulas inferiores se pueden dividir en un conjunto de láminas. Este diseño se utilizado por Siemens™ y es de doble centrado. Ambos extremos y los lados de las láminas coinciden con la divergencia del haz. Eso significa que el MLC se mueva a lo largo de la circunferencia de un círculo centrado en el blanco de rayos X del acelerador lineal, tal que el extremo del colimador es siempre tangente al radio del círculo.

Las hojas de Siemens MLC pueden extender 10 cm a través de la línea central del campo, que permite un recorrido máximo de la hoja de 30 cm.

2.4.1.3. Configuraciones de tercer nivel:

Este diseño fue propuesto por Varian™ y fue elegido para evitar largos tiempos de inactividad del servicio y del equipo en el caso de un mal funcionamiento del sistema MLC. La idea consiste en que el MLC puede ser posicionado justo por debajo del nivel de las mandíbulas superior e inferior. Esto permite mover de forma manual las láminas fuera de los campos al producirse un fallo, pudiendo seguir el tratamiento, reemplazando este mismo por bloques individuales y protectores de Cerrobend™. En la figura N°4 se presentó la disposición las mandíbulas X e Y y el MLC. La desventaja más importante de poner el MLC como colimación terciara es añadir volumen y disminuir el espacio al isocentro mecánico, alejando el MLC de los rayos X, por lo que se hace necesario aumentar el tamaño de las hojas lo que lleva a una distancia de desplazamiento más larga. La distancia de la parte inferior de éstos al nivel del isocentro es de cerca de 42 cm.

Este diseño se conoce como de mono-enfoque, que significa que los lados de las hojas permanecen alineados con la divergencia del haz. Para la otra dimensión, es decir, el extremo de las hojas, la forma es redondeada para tener en cuenta la divergencia

Las láminas del colimador Varian en el trayecto están dispuestas sobre un carro que sirve para extender su movimiento a través del campo. Sin embargo, la distancia entre la lámina más extendida y la lámina más retraída en el mismo lado sólo puede ser 14,5 cm.

2.4.2. Características físicas de un Sistema MLC Millennium™.

En este trabajo se usará un MLC Millennium™ 80. Las láminas que conforman este sistema están dispuestas en dos bancos enfrentados, cada una de estos está compuesta con 40 láminas numeradas. El material con el cual se fabrican principalmente es el Tungsteno y están diseñadas para atenuar al menos un 95% de la radiación incidente.

Principales características:

- **Desplazamiento independiente:** Cada una de las hojas tiene movimiento independiente con motor propio controlado por computador.
- **Orientación del desplazamiento:** El movimiento de las hojas es en la dirección "X" (paralelo al movimiento de las mandíbulas inferiores).
- **Retracción máxima:** 20.1 cm.
- **Extensión máxima sobre línea media (Midline overtravel):** -20.0 cm.
- **Amplitud:** Diferencia máxima entre la lámina más extendida y la más retraída del mismo banco 15.0 cm.
- **Máximo tamaño de campo:** 40 x 40 cm²
- **Anchos de láminas:** Las láminas proyectan anchos a una distancia de referencia de 100 cm del foco. Para el Millennium 80 las lámina 1 y 40, 1.4cm; las hojas 2 - 39, 1.0 cm.

- **Altura de la hoja:** 60.0 mm
- **Radio de curvatura en el extremo:** 80.0 mm

2.4.3. Posición respecto al campo luminoso¹²

Los Colimadores multiláminas (MLC) con doble foco (Siemens diseño) tienen los extremos de las láminas planas que siguen a la divergencia del haz. Los extremos de las láminas de las marcas Elektra y Varian MLC en sus extremos tienen un diseño redondeado, tal como se muestra en la figura N°5.

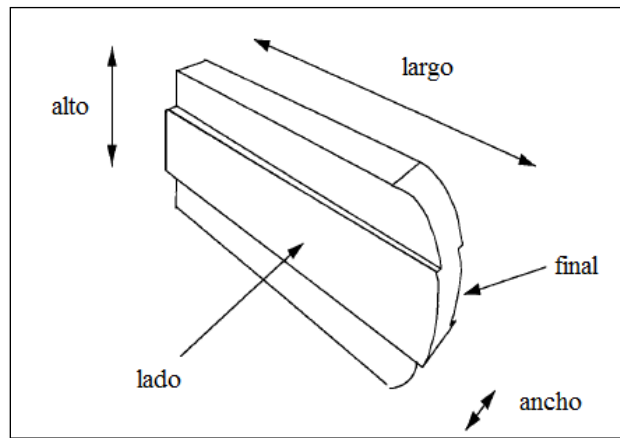


Figura N° 5: En la figura se hace una representación gráfica de la forma que poseen las láminas del MLC, destacando la curvatura que posee en uno de los extremos.

Los haces de radiación son divergentes tanto en la dirección x (paralela al movimiento de las láminas) como en la dirección y (perpendicular al movimiento de las láminas). Para el sistema MLC Millennium las hojas se desplazan linealmente en un plano perpendicular al eje central del haz. Sin embargo debido a la divergencia del haz, la transmisión de la radiación en el extremo de la lámina varía como una función de la posición de la misma. Para minimizar este efecto cada lámina tiene un extremo redondeado tal que la transmisión

en este extremo es aproximadamente la misma independientemente de la posición de la lámina.

2.4.4. Propiedades dosimétricas

Para llevar a cabo tratamientos de CRT 3D es importante el conocimiento de las propiedades dosimétricas del sistema MLC utilizado, ya que el desconocimiento de alguno de estos parámetros podría tener un gran impacto en el momento de administrar la dosis. A continuación se describirán algunos de estos parámetros:

2.4.4.1. Transmisión:

Ocurren tres tipos de transmisión en los sistemas MLC: Transmisión a través de las láminas (Atenuación), transmisión entre láminas adyacentes y transmisión entre los extremos de láminas enfrentadas. La transmisión a través de las láminas se conoce como atenuación, la cual debería ser cero, pero eso en la práctica no es real y existen valores cercanos al cero. Esta depende del número atómico (Z) y de la densidad del material, es por esta razón que se usan el Tungsteno para su fabricación ya que cumple con estas condiciones. El Tungsteno se usa debido a que posee un alto número atómico y una alta densidad (19.3 g/cm^3), lo que le da la propiedad y característica de ser un eficiente material atenuador de radiación ionizante. Además el Tungsteno se caracteriza por ser razonablemente económico, por presentar un coeficiente de dilatación térmico bajo, por ser un material bastante rígido y fácil de manipular. Cabe destacar que la lámina no está compuesta en su totalidad por Tungsteno, sino que presenta aleaciones con otros metales tales como: níquel, hierro y cobre, los cuales confieren una densidad de 17 a 18.5 g/cm^3 final¹³.

En general la mayor transmisión a través de las láminas ocurre en los tratamientos con intensidad modulada (IMRT) en comparación con CRT convencional o 3D, debido a que se aumenta considerablemente el número de campos para lograr una óptima distribución de dosis.

2.4.4.2. Fuga interlámina¹⁴:

Este es un tipo de transmisión en la que existen dos situaciones a tener en cuenta:

- Entre los lados de las láminas adyacentes.
- Entre los extremos de las láminas.

Para evitar la fricción entre cada lámina por su movimiento independiente, debe existir una separación que es de alrededor 0.1 mm, la cual sería considerada principalmente la responsable de la fuga entre dos láminas adyacentes. Es por esto que este valor debe minimizarse lo más posible, quedando por bajo el 3%.

Con el fin de minimizar la fuga entre los lados, es necesario solapar las láminas por lo general por el perfil lateral de forma especial y para reducir al mínimo las fugas entre los extremos y los extremos cuando están opuestos cerrados, es importante saber que la transmisión disminuye al aumentar la distancia de fuera del eje (Off-Axis Distance).

Existen también configuraciones especiales, particularmente en los MLC MilleniumTM donde cada láminas tiene una forma conocida como el diseño “Tongue and Groove”.

2.4.4.3. Efecto Matchline:

Este efecto consiste principalmente debido a la forma curva que tienen los extremos de las láminas del MLC. Se presenta debido a una transmisión extra de la intensidad incidente en la zona donde se unen los extremos opuestos de las multiláminas. Esto ocurre

principalmente cuando se usa varios campos como en la técnica Step and Shoot, creando líneas de altas dosis entre segmentos adyacentes conocidas como matchlines.

2.4.4.4. Efecto Tongue and Groove:

Para disminuir la transmisión interlámina se justifica el diseño de cada una de las láminas de los MLC, pero en este diseño se presenta el efecto de Tongue and Groove. La idea fue desarrollada para que las láminas adyacentes queden unidas disminuyendo a cabalidad la transmisión interlámina, pero ese espacio que queda entre dos láminas adyacentes genera una subdosificación que es debida al diseño de éstas cuando se utilizan campos con segmentos adyacentes por la parte lateral de las láminas. Mencionado en otras palabras la suma de las fluencias de los dos segmentos no es igual a la fluencia del campo total abierto, se obtiene una línea de subdosificación puesto que esa pequeña región siempre está cubierta ya sea por el tongue o por el groove, nunca recibirá la fluencia completamente¹⁵.

2.4.4.5. Penumbra:

La penumbra consiste en la zona del haz de radiación en que la intensidad de esta cambia rápidamente a medida que se aleja del eje central del haz. Son las curvas de isodosis quienes caracterizan el comportamiento de un determinado haz con la materia, es por esta razón que la penumbra se puede establecer en función de ellas, donde se define como la distancia entre la curva del 80% y 20% de las curvas de isodosis de un determinado haz. La Penumbra es la suma de dos contribuciones: la predominante es la penumbra geométrica, y la transmisión a través de las hojas también es importante.

La penumbra se produce porque el área en el blanco de Tungsteno en la cual impactan los electrones para formar los rayos X, es de carácter finito. Es decir, que el punto focal tiene

una extensión. Lo que la proyección de este punto focal en un en un plano perpendicular al eje del haz hace que se presente un ligera borrosidad en el extremo del campo.

El valor de la penumbra depende de la energía del haz y de la profundidad en que se analice el campo. En el sistema MLC la penumbra lateral y transversal dependen principalmente de la distancia fuente - colimador, del tamaño del punto focal y del diseño del extremo y los lados de las hojas.

2.4.4.6. Reproducibilidad y Precisión:

Es de suma importancia tener gran precisión y reproducibilidad en las posiciones de las hojas para garantizar un buen tratamiento. La reproducibilidad es la medida de qué tan exactamente se logra la misma posición independientemente del número de veces programadas. La precisión es un concepto que indica qué tan cerca están los extremos de las hojas respecto a las posiciones programadas. Estas características técnicas están determinadas principalmente por las capacidades del hardware y software utilizados.

2.4.4.7. Porcentaje de dosis en profundidad (PDD)¹⁶:

Una forma de caracterizar la distribución de dosis en el eje central del haz es la normalización de la dosis a una determinada profundidad con respecto a la dosis, a una profundidad de referencia. El porcentaje de dosis en profundidad se puede definir como el cociente, expresado como un porcentaje, de la dosis absorbida a una profundidad d y la dosis absorbida a una profundidad de referencia fija d_0 , a lo largo del eje central del haz. El Porcentaje de Dosis en Profundidad (P) se calcula con la Fórmula N° 1¹⁷, que se representa a continuación:

$$PDD(d) = \frac{D_d}{D_0} \times 100$$

Para las energías altas, es decir, en el caso de los aceleradores lineales, la distancia de referencia D_0 se considera D_{max} la cual es característica para cada energía usada. Una serie de parámetros afectan la distribución de la dosis en profundidad en el eje central. Estos incluyen la calidad del haz o de la energía, la profundidad, el tamaño del campo y la forma, la distancia de fuente a la superficie, y la colimación del haz.

III. Programa de Garantía de Calidad

El programa de control de calidad asume diversas acciones que se deben realizar con la idea de certificar la calidad estandarizada de un servicio, proceso o acción. Dentro de este programa de control de calidad deben ir especificadas una diversidad de acciones siendo las que más destacan las pruebas que se deben realizar específicamente como elemento práctico y de corroboración de patrones para comparar si es que estos resultados se ajustan o no dentro de los estandarizados como calidad, estas pruebas reciben el nombre de Control de Calidad (QC) ¹⁸.

Dentro de las pruebas que son parte del control de calidad (QC) tendremos de tres tipos:

- **Pruebas de aceptación:**

Este tipo de pruebas son las que se realizan una vez que el equipo ha sido instalado y está listo para comenzar en funcionamiento. Pero claro, la idea es que antes de esto se corrobore que este se encuentre en un buen estado. Y para eso, las pruebas que se realicen deberán ser comparadas con valores de referencia que son propuestos por el fabricante del equipo. En el caso que los valores de estas pruebas no se encuentren dentro de las tolerancias propuestas

por el fabricante, el responsable del equipo puede pedir el cambio de este. Por eso resulta de importancia que estas pruebas se realicen en conjunto con un representante del fabricante.

- **Pruebas de Referencias:**

Las pruebas de referencias son pruebas que se realizan una vez instalado el equipo, la idea de estas es que sean la referencia que tendrá el equipo cada vez que estas mismas se vuelvan a realizar. Es importante mencionar que éstas pueden ser las mismas usadas para la aceptación, como pueden ser otras adicionales que no se consideran de aceptación. La frecuencia o periodicidad de estas pruebas puede ser semanal, mensual, semestral e incluso anual.

- **Pruebas Rutinarias:**

Este tipo de pruebas son las que se realizan todos los días de forma rutinaria, antes de que se comience a utilizar, la idea es que cualquier desperfecto que pudo haber sido ocasionado el día anterior, sea corregido de forma inmediata antes de que el equipo se ponga a trabajar. Estas pruebas están a cargo del personal que utiliza el equipo de diariamente.

3.1. Garantía de Calidad para un Sistema de colimación multiláminas (MLC)

Los MLC son modernos sistemas de colimación que permiten bloquear la radiación incidente y formar campos irregulares que son importantes para las Técnicas de CRT 3D. Esta técnica descrita en los capítulos anteriores es dependiente del funcionamiento de este Sistema de Colimación, es por eso que resulta relevante corroborar de forma empírica el funcionamiento correcto de este.

En la normativa de los distintos países los organismos fiscalizadores no exigen pruebas de control de calidad para estos sistemas, en Chile ocurre exactamente lo mismo¹, pero aun

así, resulta de relevancia para los servicios el poder tener un registro del correcto funcionamiento de éste, además de un programa de control de calidad que supervise y corrija cualquier desperfecto o mal funcionamiento que no permita entregar tratamientos óptimos a los pacientes. Si bien no existe normativa, existen pruebas que se proponen para el control de calidad de un MLC estático, las cuales son las siguientes:

3.1.1 Pruebas de Aceptación y Referencia para el Sistema de Colimación de Múltiples Láminas (CML) estático¹⁹.

Como ya fue mencionada las pruebas de aceptación en gran medida pasarán a ser la referencia del equipo, cuando estas pruebas se realicen con la periodicidad establecida. Dentro de estas pruebas encontraremos las siguientes:

3.1.1.1 Pruebas Geométricas:

Las pruebas geométricas hacen referencia específicamente la disposición del mismo MLC, dentro del equipo, entendiendo que este se dispone como tercera estructura de colimación.

Los MLCs se encuentran acoplados al cabezal del equipo de Radioterapia por lo tanto este mismo repercute en los ejes de rotación del colimador, el mismo brazo y la mesa, y es de relevancia ya que esta intersección es una determinante del isocentro que es a su vez es el centro de rotación del equipo. Si consideramos que en los MLC del Tipo Varian son accesorios adicionales del equipo, se introducen una vez que el equipo ya a ha estado en funcionamiento, por lo que ese trabajo puede alterar la correcta alineación de estos, por lo que resulta necesario el poder determinar a través de pruebas geométricas el estado de la alineación geométrica de toda la unidad. Las pruebas a realizar son las siguientes:

➤ **Coincidencia de los ejes de radiación y luminoso del MLC con el eje mecánico del colimador en el plano del isocentro.**

- **Objetivo:**

- ✓ “Verificar la coincidencia entre los ejes de radiación y luminoso, definidos con las láminas del MLC, y el eje de giro del colimador”.

- **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa

➤ **Coincidencia de los ejes de radiación y luminoso del MLC con el eje mecánico del Gantry en el plano del isocentro.**

- **Objetivo:**

- ✓ “Verificar la coincidencia entre los ejes de radiación y luminoso, definidos con las láminas del MLC y el giro del gantry del equipo en el plano del isocentro”.

- **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa

➤ **Alineación del MLC con los colimadores.**

a) **Alineación con las mandíbulas inferiores:**

- **Objetivo:**

- ✓ Comprobar que todas las láminas del carro B están alineadas con el colimador X2. Y que las láminas del carro A estén alineadas con el colimador X1.

- **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa

b) Alineación con las mandíbulas superiores:

- **Objetivos:**

- ✓ Comprobar que todas las láminas del carro B están alineadas con el colimador Y2. Y que las láminas del carro A estén alineadas con el colimador Y1.

- **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa

➤ **Posicionamiento de las láminas**

- **Objetivos:**

- ✓ Verificar que la posición del sistema de láminas sea correcta dentro del MLC. Verificando el correcto posicionamiento acorde a una posición, y cuando se requiere de un tamaño de campo determinado.

- **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa

➤ **Repetibilidad en el posicionamiento de las láminas.**

- **Objetivos:**

- ✓ Verificar con las proyecciones del campo luminoso, que las láminas se colocan a las posiciones preseleccionadas.

- **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa.

➤ **Dispositivo de entrada.**

- **Objetivo:**

- ✓ Verificar que el conformado diseñado en el sistema de planificación y cálculo (SPC) se copia correctamente y que el software del MLC lo reproduce adecuadamente.

- **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa

3.1.1.2. Pruebas Dosimétricas

➤ **Rendimiento en profundidad**

- **Objetivo:**

- ✓ Obtener los rendimientos en profundidad en el eje del haz para el campo de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ a SSD de 100 cm, con los Colimadores Convencionales y el MLC.

- **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa

➤ **Perfiles**

- **Objetivo:**

- ✓ Estimar el valor porcentual de un perfil de radiación

- **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa

➤ **Factores de campo**

• **Objetivo:**

- ✓ Determinar el factor campo definido como la relación entre un campo cualquiera respecto a un campo de referencia, que en nuestro caso es $10 \times 10 \text{ cm}^2$ obtenido con los colimadores convencionales y con el MLC retraído.

• **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa

➤ **Transmisión**

• **Objetivo:**

- ✓ Medir la trasmisión de las láminas de MLC promediando entre las zonas cubiertas por las láminas y las zonas entre láminas consecutivas.

• **Prueba del tipo:**

- ✓ Cuantitativa

5-. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La evolución de la tecnología ha llevado consigo a que nuevas técnicas sean utilizadas dentro de la radioterapia externa en la radioterapia conformacional 3D. Para que estas técnicas sean realmente posibles es necesaria la utilización de Sistemas de Colimación de Múltiples láminas (MLC) quienes a través de sistemas computarizados son capaces recrear una variedad de campos irregulares pudiendo cumplir de una forma más óptima con el objetivo de la radioterapia externa. Estos sistemas de colimación presentan una importante misión que cualquier desperfecto llevará consigo a problemas en los tratamientos que se realizan en los pacientes. Ahora la tecnología aumenta pero en Chile las normativas que regulan y autorizan las instalaciones de radioterapia no han cambiado, lo que hace que no existan pruebas ni controles exigidos para los MLC. Mucho más, el MLC del ALE de la Fundación Arturo López Pérez fue cambiado el año 2011, por lo que no presenta un programa de garantía de calidad que certifique su correcto funcionamiento.

6-. OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar el programa de garantía de calidad del equipamiento de radioterapia para el sistema de colimación MLC Millennium 80 en Acelerador Lineal VARIAN 21 EX de la Fundación Arturo López Pérez.

Objetivos Específicos

- Realizar pruebas de tipo geométrica y dosimétrica en el Sistema de Colimación MLC Millennium 80 en Acelerador Lineal VARIAN 21 EX.
- Comparar los valores obtenidos para cada prueba, con los valores de tolerancia propuestos por la Sociedad de Física Médica Española, publicados en abril del año 2005 en la Revista de Física Médica España.
- Caracterizar las condiciones de calidad del Sistema de Colimación MLC Millennium 80 en Acelerador Lineal VARIAN 21 EX.

7.-MATERIAL Y MÉTODOS

El siguiente estudio es del tipo descriptivo, en el cual se propone evaluar un programa de garantía de calidad para un Sistema de Colimación de Múltiples Láminas (MLC) del tipo Millennium 80 de marca Varian instalado en el Acelerador Lineal Clinac Varian 21 EX, así como, monitorizar las condiciones en las que se encuentre dicho equipo. Este es un estudio del tipo cuantitativo, donde las mediciones y controles a realizaron de forma prospectiva durante el año 2014. Para el caso de las pruebas geométricas se realizaron mediciones en tres oportunidades calculando la Media Aritmética, la desviación estándar y error absoluto de la medición que consiste en la diferencia matemática entre el valor verdadero convencional y el promedio de las tres mediciones realizada, valor que posteriormente se comparó con las tolerancias propuestas. La importancia, del error absoluto radica en el hecho que indica el grado de aproximación y nos da indicio de la calidad de la medida y además, hace referencia a la imprecisión que acompaña a la medición. En el caso de las pruebas dosimétricas está solo fueron realizadas una sola vez, realizando una comparación entre los valores obtenidos con el MLC y los Valores Obtenidos con los Colimadores Convencionales. Todos estos valores fueron tabulados y comparados con la tolerancia de referencia.

6.1. Materiales:

6.1.1. Acelerador Lineal:

El equipo a utilizar es un acelerador lineal Modelo CLINAC 21 EX de Varian Oncology Systems, PAL. Este acelerador lineal produce haces de fotones de 6 MV y 18 MV, así

como haces de electrones de 6 MeV, 9 MeV, 12 MeV, 15 MeV, 18 MeV. Posee un sistema de colimación terciaria del tipo MLC Millennium 80.



Figura N° 6: En la imagen a continuación se presenta el Acelerador Lineal Clinac Varian 21 EX de la Fundación Arturo López Pérez, en el que se realizará el presente trabajo.

6.1.2. Sistema MLC

Sistema de MLC Millennium 80 instalado en Acelerador Linear CLINAC VARIAN 21 EX. El cual fue descrito en el Capítulo II del Marco Teórico.

6.1.3. Sistema de Planificación:

El sistema de planificación que se utilizó fue XIO versión 4.6. Elekta. Este sistema es desarrollado fundamentalmente para la planificación de tratamiento de radioterapia Conformacional 3D. Además son compatibles con Arco terapia conformacional dinámica y cirugía estereostática.

Este sistema de planificación ofrece más algoritmos de cálculos para satisfacer todas las necesidades de planificación como Clarkson, FFT Convolución, Multigrad Superposición, Fast Superposición pudiendo escogerse el algoritmo más adecuado. XIO es compatible con el sistema DICOM pudiendo recibir imágenes de TC, RM, Ultrasonido y PET o PET-CT.



Figura N° 7: La imagen representa el sistema de planificación de tratamiento XIO que se usará para la planificación computarizada de los planes de control de calidad del MLC.

6.1.4. Fantoma PMMN

El fantoma a utilizar es del tipo RW3. El material que lo constituye se hace llamar agua sólida, debido a que posee una densidad electrónica similar a la del agua, y por ende similar a la del cuerpo humano. El RW3 está conformado por Poliestireno usado para alta energía con fotones y electrones. En el caso de fotones está permitido irradiarlo desde la energía de Co-60 hasta 25 MV y en el caso de electrones se puede irradiar desde los 4 MeV hasta los 25 MeV.

Las características de las placas son las siguientes:

- Área: 300 x 300 mm +/- 1 mm
- Espesor:
 - ✓ 1 mm +/- 0,05mm
 - ✓ 2 mm +/- 0,05mm

- ✓ 5 mm +/- 0,05mm
- ✓ 10 mm +/- 0,05mm
- ✓ 20 mm +/- 1 mm
- Densidad Másica: 1,045 g/cm³
- Densidad electrónica (e/g): 3,386 x 10²³
- Concentración electrónica: 3,539 x 10²³



Figura N°8: En la imagen se observa el fantoma de placas PMMN de RW3 que se usará para irradiación de películas radiográficas.

6.1.5. Películas

Una de las películas a utilizar será una Kodak EDR2, Eastman Kodak Company, New York, USA. Esta película fue lanzada al mercado el año 2001. Con respecto al tamaño de sus granos de AgBr son una décima parte comparada con la XV. En esa misma comparación el contenido de plata es la mitad, además están distribuidas de manera más uniforme, lo que la hace más sensibles y con menos ruido en las lecturas. Están diseñadas para aplicaciones oncológicas, son buenas para realizar dosimetría relativa y, con una adecuada calibración, dosimetría absoluta. Su rango de respuesta es amplio, desde 25 a 400 cGy con una dosis de saturación de 700 cGy.



Figura N° 9: En la imagen se observa la caja de películas que serán usadas en el presente Proyecto de investigación.

La segunda película a utilizar será la X OMAT-V. La emulsión de la película X OMAT-V está compuesta de granos de plata con forma irregular con un tamaño promedio de $2 \mu\text{m}$, la cobertura de plata es de aproximadamente $4,2\text{g}/\text{m}^2$. En densitometría, la máxima absorción de luz dentro de la película ocurre entre los 380 nm y 420 nm y se satura en los 300cGy. Esta película es una de las películas más usadas para medir las distribuciones de dosis relativa, debido a su disponibilidad, sin embargo la dosis de saturación es comparativamente baja con el valor de la EDR2, por lo que en muchas situaciones se debe hacer una disminución de la dosis²¹. Las dimensiones de éstas será de $33 \times 41 \text{ cm}^2$.

6.1.6. Cámara de ionización:

La cámara de ionización a utilizar será del Tipo Farmer modelo WDIC 70 N°110. Los factores de calibración de la cámara de ionización a una energía de 150 kV donde el HLV en mm de aluminio será de 5.0 y en cobre es de 0.2 es de $4,89 [\text{R} / \text{nC}_{(\text{lect})}]$ cuando se mide como Kerma en aire. Ahora si se mide la dosis absorbida pero en agua, usando energía del orden de Co-60 el factor de calibración es de $0.0464 [\text{Gy}/ \text{nC}_{(\text{lect})}]$.



Figura N° 10: En la imagen vemos la cámara de ionización sumergida en agua, tal como se usa para la medición de dosis según el protocolo 398²⁰, y que se usará como parte del control de calidad del MLC.

6.1.7. Electrómetro.

El electrómetro que se usará es de modelo MAX 4000 n°.E 050112. Este dispositivo que se usará trabaja con voltajes de colección entre 0 V y 400 V en incrementos de 50 V con polaridad positiva o negativa. Presenta lecturas en carga, corriente, exposición, dosis y tasas de exposición y dosis en unidades de nC, nA, R, Gy, R/min, Gy/min.



Figura N° 11: En la imagen se observa el electrómetro que se usará en el presente Proyecto de investigación.

6.1.8. Reveladora de Películas Radiográficas.

La relevadora que se usará será la X-ray Film Processor JP-33, la cual posee un sistema de transporte continuo. El proceso de revelado demora entre 90 a 120 segundos. Puede revelar películas de diferentes tamaños desde las más pequeñas de 10 cm x 10 cm hasta las más grandes de 35 cm x 130 cm.



Figura N° 12: Se observa la relevadora automática que se usará para el revelado de placas en el presente Proyecto de investigación.

6.1.9. Digitalizador de películas.

Se utilizó el digitalizador de películas VXR-16 DosimetryPRO— (VIDAR Systems Corporation, Hendon, VA, USA) es un scanner diseñado especialmente para digitalizar películas radiográficas con alta calidad en aplicaciones médicas. Captura imágenes en escala de grises de 16 bit, tiene una resolución espacial de hasta 285 DPI y un rango de densidades ópticas de 0 a 3.65.

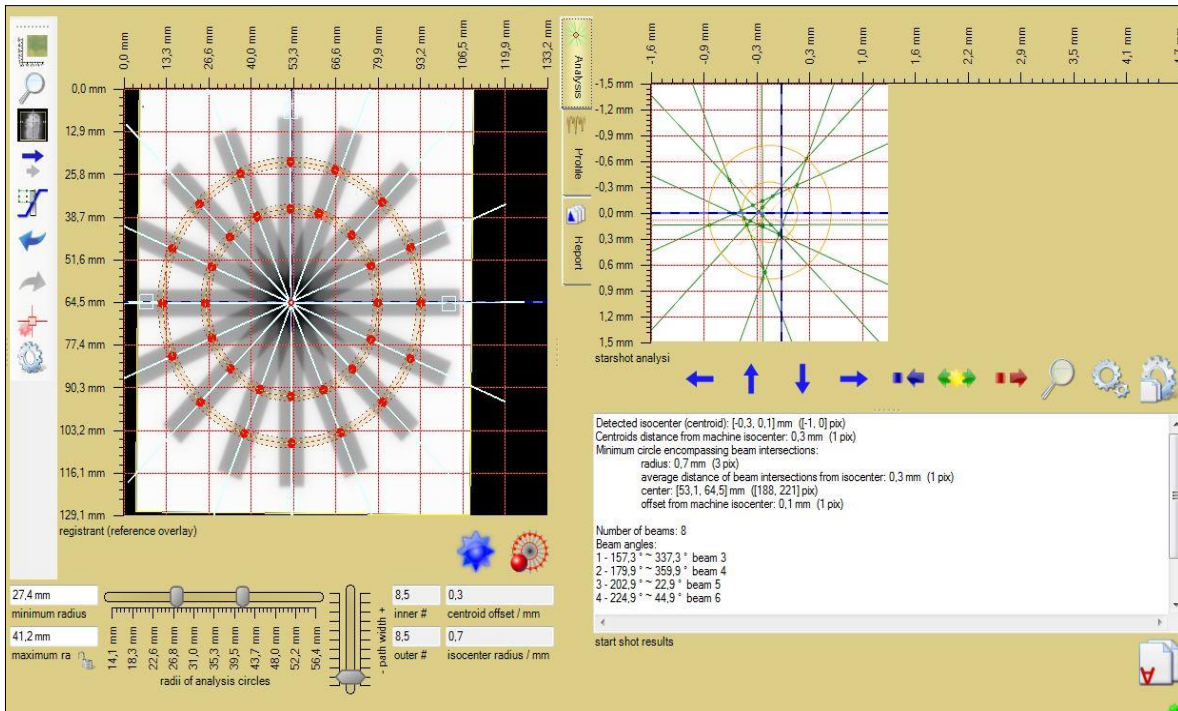


Figura N°13: Se observa la digitalizadora de películas que se usará, para trabajar de forma computacional con las películas irradiadas y de esa forma optimizar las mediciones.

6.1.10. Software FilmQA Pro 2014

FilmQA Pro es una herramienta de análisis cuantitativo especializado diseñado específicamente para simplificar y agilizar el proceso de control de calidad IMRT en todo tipo de entornos. Esto le permite escanear o abrir imágenes de película expuesta y calcular la dosis, además de poder medir ángulos y distancias construir perfiles de dosis en la placa expuesta. Este Software es de descarga gratuita, en la cual se otorga una licencia de operación de prueba, extendida cuando se contacta al distribuidor mediante correo electrónico. Cabe señalar que ese software tiene otras versiones, siendo la 2014 la versión actualizada.

Figura N°14: Se observa la ventana del Software FilmQA PRO 2014 utilizado para análisis y procesamiento de películas radiográficas.



6.2. Métodos:

6.2.1. Prueba Geométricas:

6.2.1.1. Coincidencia de los ejes de radiación y luminoso del MLC con el eje mecánico del colimador en el plano del isocentro del Equipo.

➤ *Procedimiento n°1:*

- *Se dispuso el gantry del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX en 0°.*
- *Se colocó sobre la camilla una película radiográfica marca Kodak EDR2 a la distancia foco-superficie (DFS) de 98 cm, isocentro a 100 cm.*
- *Sobre ella se marcó la proyección de los láseres. Para marcarlos se verificó que estos coincidan con el isocentro del equipo.*

- *Se cerraron todas las láminas del MLC Millennium 80 dejando una pequeña abertura de 0,5 cm (0,25 cm por lado) entre cada par de láminas opuestas del MLC Millennium 80.*
- *Para evitar la transmisión a través del MLC Millennium 80 se cerró el colimador convencional del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX hasta una abertura de 2 cm (1 cm por lado) x 26 cm.*
- *Se rotó el colimador desde la posición 0° hasta 150°. Exponiendo la película radiográfica Kodak EDR2 en el 0° y luego cada 30°.*
- *Sobre la misma película se vuelven a realizar exposiciones cada 30°, rotando en sentido contrario el MLC Millennium 80, desde la posición 345° hasta la 195°.*
Los factores de irradiación dispuestos en anexo 1.

➤ ***Observaciones procedimiento N°1:***

- *En la película radiográfica se observó una estrella obtenida de las líneas derivadas de cada exposición sobre la película radiográfica Kodak EDR2.*
- *Los datos fueron procesados por el Software FilmQA PRO 2014, mediante la digitalización de las placas obtenidas.*

➤ ***Procedimiento N° 2:***

- *Se repitió el procedimiento N° 1, pero con la parte lateral de las láminas, para ello se dejaron abiertas las dos láminas centrales del MLC Millennium 80, lo cual representa una abertura de 2 cm en el plano del isocentro de la unidad.*

- *Se cerraron el resto de las láminas del MLC Millennium 80, obteniendo una abertura del colimador convencional de 3 cm x 26 cm.*
 - *Se realizaron exposiciones rotando el MLC Millennium 80 cada 45° desde 0° hasta 135° en sentido horario y en sentido anti-horario cada 44° desde 337° hasta 203° (se escogieron estos estos ángulos para que la imagen obtenida en forma de estrella sea lo más simétrica posible con respecto a las exposiciones obtenidas en 45°). Los factores de irradiación dispuestos en anexo 1.*
- ***Observaciones procedimiento N°2:***
- *Se observó una imagen en estrella obtenidas con las líneas derivadas de cada exposición sobre la placa radiográfica Kodak EDR2.*
 - *Los datos fueron procesados por el Software FilmQA PRO, mediante la digitalización de las placas obtenidas.*
- ***Procedimiento N° 3:***
- *Se realizaron los mismos procedimientos anteriores para comprobar la coincidencia con el eje del haz luminoso, con la diferencia que la proyección del haz se realiza con una DFS de 100, no isocéntrico.*
 - *En lugar de exponer a una placa radiográfica Kodak EDR2, se dibujó sobre una hoja de papel milimetrado, la proyección luminosa del campo definido por el MLC Millennium 80.*
 - *Se usaron los mismos ángulos detallados en las dos pruebas anteriores.*

➤ **Observaciones Procedimiento N° 3**

- *La imagen dibujada en ambos casos, representó la misma forma que la imagen obtenida mediante la irradiación de las películas.*
- *Los datos fueron obtenidos de forma manual, medidos mediante regla y transportador con resolución de 0,5 mm y 1° respectivamente.*

Las pruebas detalladas se realizaron tres veces entre los meses marzo a junio.

6.2.1.2. Coincidencia de los ejes de radiación y luminoso del MLC con el Gantry en el plano del isocentro.

➤ **Procedimiento:**

- *Se colocó una película radiográfica Kodak EDR2 de modo que quedara paralela al eje del haz de radiación, de tal manera que el isocentro del equipo quedó de forma aproximada en el centro de la película Radiográfica Kodak EDR2.*
- *Las láminas del MLC Millennium 80 y las mandíbulas del Acelerador lineal CLINAC Varian 21 EX se disponen igual que en la prueba 4.2.1.1.*
- *Los ángulos de giro que usó el gantry del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX fueron los mismos usados en la prueba 4.2.1.1 realizada en el procedimiento 1. Los factores de irradiación dispuestos en anexo 1.*

➤ **Observaciones Procedimiento:**

- *En la película radiográfica Kodak EDR2 se observó la figura de una estrella obtenida de las líneas derivadas de cada exposición sobre la placa radiográfica.*
- *Los datos fueron obtenidos por el Software FilmQA PRO, mediante la digitalización de las placas obtenidas.*

Las pruebas detalladas se realizaron tres veces entre los meses marzo a junio.

6.2.1.3. Alineación del MLC con los colimadores:

6.2.1.3.1 Alineación del MLC con las mandíbulas inferiores:

➤ Procedimiento:

- *El colimador y el gantry del Acelerador Lineal CLINAC VARIAN 21 EX se dispuso en 0°.*
- *Se colocaron todas las láminas del carro B del MLC Millennium 80 en la posición de -1 cm y la mandíbula opuesta a dicho carro, mandíbula X2 del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX en la posición abierta de 1 cm. (Cuando se denota con signo negativo de algún valor de posición, este refiere a que la lámina atravesó la línea que denota el cierre del MLC).*
- *Con la proyección del haz luminoso del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX sobre un papel, se midió la separación de todas las láminas del MLC Millennium 80 de la mandíbula.*
- *Se verificó lo mismo con el haz de radiación, para esto en estas mismas condiciones, se irradió una película radiográfica Kodak EDR2 centrada sobre*

los ejes principales del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX, a una distancia DFS de 100 cm. Los factores de irradiación dispuestos en anexo 1.

➤ **Observaciones Procedimiento:**

- *Se observó en la placa radiográfica Kodak, así como en el papel la separación entre la posición de todas las láminas del MLC Millennium 80 respecto a la mandíbula.*
- *La prueba se repitió para evaluar el carro A del MLC Millennium 80 y el colimador XI del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX.*
- *Los datos fueron obtenidos por el Software FilmQA PRO 2014, mediante la digitalización de las placas obtenidas y también mediante medición manual con regla de una resolución de 0,5 mm.*

6.2.1.3.2. Alineación del MLC con las mandíbulas superiores:

➤ **Procedimiento:**

- *Se posicionaron todas las láminas del MLC Millennium 80 en la posición de 7 cm, excepto las láminas A4 y B23 que se posicionan a -6,5 cm.*
- *El tamaño de campo definido por las mandíbulas del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX fue de 15 cm x 29 cm.*
- *Se expuso una película Kodak EDR2 en estas condiciones. Los factores de irradiación dispuestos en anexo 1.*

- *Se midieron las distancias entre la lámina A4 y la mandíbula Y2 y la entre la lámina B23 y la mandíbula Y1 a diferentes separaciones del centro del haz, para asegurar que las mandíbulas del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX estén alineadas con el MLC Millennium 80.*

➤ **Observaciones Procedimiento:**

- *Se debe ver en la película irradiada, las líneas sobre las que se han medido las distancias entre las láminas del MLC Millennium 80 y las mandíbulas del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX.*
- *Los datos fueron obtenidos por el Software FilmQA PRO, mediante la digitalización de las placas obtenidas y también mediante medición manual con regla de una resolución de 0,5 mm.*

Las pruebas detalladas se realizaron tres veces entre los meses marzo a junio.

6.2.1.4 Posicionamiento de las láminas

➤ **Procedimiento N°1:**

- *Las posiciones que se verificaron cubrieron todo el rango del recorrido de una lámina de MLC Millennium 80, las que aquí se proponen son las siguientes: 20 cm, 16 cm, 12 cm, 8 cm, 4 cm, 0,5 cm, -4 cm, -8 cm, -12 cm y -16 cm.*

- *Se creó un archivo definiendo las diferentes posiciones seleccionadas, de modo que todas las láminas del MLC Millennium 80 se coloquen automáticamente en las posiciones seleccionadas.*
- *Se alineó una plantilla de papel milimetrado con el eje del haz a DFS de 100 cm con el brazo y el colimador del acelerador lineal CLINAC VARIAN 21 EX a 0°.*
- *Se comprobó que las láminas se encuentran en la posición seleccionada midiendo la separación entre la proyección del campo luminoso y la posición de la lámina del MLC Millennium 80.*

➤ **Procedimiento N°2:**

- *Para realizar esta prueba con el campo de radiación se seleccionaron una serie de campos, de modo que entre las láminas del carro del MLC Millennium 80 que conforma un campo y las láminas del carro opuesto del MLC Millennium 80 que conforman el campo consecutivo quedará una separación de 2 mm.*
- *Se marcará la proyección de los láseres y se irradiarán varios campos en una película Kodak EDR2 de Dimensiones, a DFS de 90 cm y 10 cm de profundidad en el maniquí de PMMA.*
- *Se irradiaron los campos seleccionados anteriormente en una placa de dimensiones 33 x 41 cm². Los cuales son propuestos en la Tabla N°1, y los factores de irradiación dispuestos en el anexo 1.*

Tabla N°1: En la tabla a continuación se proponen 8 tamaños de campos para la realización de la prueba 4.2.1.4.

Campo 1	Campo 2	Campo 3	Campo 4	Campo 5	Campo 6	Campo 7	Campo 8
B/A	B/A	B/A	B/A	B/A	B/A	B/A	B/A
20/-15,1	14,9/-10,1	9,9/-5,1	4,9/-0,1	-0,1/4,9	-5,1/9,9	-10,1/14,9	-15,1/20

➤ **Observaciones Procedimiento N°2:**

- *Se comprobó visualmente que la separación entre las láminas de carros opuestos del MLC Millennium 80 se mantiene para todas las láminas y en todas las posiciones, esto nos permitió verificar el correcto posicionamiento de las láminas del MLC Millennium 80.*
- *Los datos fueron obtenidos por el Software FilmQA PRO, mediante la digitalización de las placas obtenidas y también mediante medición manual con regla de una resolución de 0,5 mm.*

Las pruebas detalladas se realizaron tres veces entre los meses marzo a junio.

6.2.1.5 Repetibilidad en el posicionamiento de las láminas.

Esta prueba consistió en repetir 5 veces la primera parte de la prueba 4.2.1.4, donde con las proyecciones del campo luminoso de algunas posiciones se verificaba que las láminas del MLC Millennium 80 se colocan en las posiciones preseleccionadas. Lo ideal es que se seleccionen posiciones centrales y posiciones distantes del centro.

Estas pruebas se realizaron tres veces entre los meses marzo a junio.

6.2.1.6 Dispositivo de entrada.

➤ **Procedimiento:**

- *Se utilizó la conformación de un campo irregular diseñado como parte del tratamiento de un paciente.. El campo seleccionado para verificar, fue impreso en papel milimetrado, y de esa forma se verificó la existencia de alguna desviación en la posición de forma más precisa.*

➤ **Observaciones:**

- *A partir de la indicación de posición del software del propio MLC Millennium 80 se comprobó la coincidencia entre la posición de cada lámina con el conformado diseñado en la planilla. Mediante la superposición de la proyección del campo luminoso sobre dicha planilla.*

Estas pruebas se realizaron tres veces entre los meses marzo a junio.

6.2.2. Pruebas Dosimétricas:

6.2.2.1. Rendimiento en profundidad:

➤ **Procedimiento:**

- *Esta prueba se realizó en fantoma de placas de RW3. Se Introdujo la cámara de ionización tipo Farmer modelo WDIC 70 N°110 en su interior.*
- *Se obtuvo el rendimiento en profundidad en el eje del haz para los campos, $10 \times 10 \text{ cm}^2$, a la DFS 100 cm, conformados con el MLC más los colimadores y los Colimadores con el MLC retraído.*

- *La medida se realiza en sentido ascendente, desde la posición inicial de la cámara de ionización tipo Farmer modelo WDIC 70 N°110 situada a 20 cm de profundidad hasta la superficie del agua. Se adquirieron las siguientes distancias: 20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm, 4 cm, 3.5 cm, 3 cm, 2 cm, 1.5, y 1 cm. Estas profundidades fueron realizadas para fotones de dos energías, tanto para 6 MV como para 18 MV. Los factores de irradiación dispuestos en anexo 1.*
- *En todas las medidas la abertura del MLC Millennium 80 es la recomendada por el software (software del MLC).*

➤ ***Observaciones Procedimiento:***

- *Todos los valores obtenidos fueron normalizados al valor correspondiente a la profundidad de $D_{m\acute{a}x}$, que para el caso de 6 MV es de 1,5 cm y para 18 MV es de 3,5 cm.*
- *Se compararon los Rendimientos en profundidad obtenidos con MLC Millennium 80 con los obtenidos con los colimadores estándar.*

6.2.3.2. Perfiles:

➤ ***Procedimiento:***

- *Se irradiará el fantoma de placas con Cámara de Ionización del Tipo Farmer modelo WDIC 70 N°110 ubicada a 10 cm de profundidad y DFS de 90 cm. Tanto para el campo conformado solo con los colimadores, así como para un campo conformado por el MLC y el colimador convencional.*

- *Luego para obtener el perfil, se desplazó la camilla, primero en sentido positivo y luego en el sentido negativo. Los valores medidos en el eje horizontal serán los siguientes 8 ; 7,5 ; 7 ; 6,5 ; 6 ; 5,5 ; 5 ; 4,5 ; 4 ; 3,5 ; 3 ; 2 ; 1 ; 0 ; -1 ; -2 ; -3 ; -3,5 ; -4 ; -4,5 ; -5 ; -5,5 ; -6 ; -6,5 ; -7 ; -7,5 ; -8. Los factores de irradiación dispuestos en anexo 1.*

Observaciones:

- *Se compararon los perfiles de campos obtenidos con MLC Millennium 80 con los obtenidos con los colimadores estándar.*

6.2.3.3. Factores de campo

➤ **Procedimiento:**

- *Se determinará el factor campo definido como la relación entre un campo cualquiera respecto a un campo de referencia, que en este caso se usará un campo de 10 x 10 cm² obtenido con los colimadores convencionales y con el MLC Millennium 80 retraído.*
- *Los campos estudiados serán 4x4 cm², 6x6 cm², 8x8 cm², 10x10 cm², 14 x14 cm², 20x20 cm², 24x24 cm², obtenidos con el MLC Millennium 80.*
- *La profundidad de la medida con la cámara de ionización del Tipo Farmer modelo WDIC 70 N°110 es de 10 cm en el fantoma de placas de agua sólida RW3, a la DFS de 90 cm. Los factores de irradiación dispuestos en anexo 2.*

➤ **Observaciones Procedimiento:**

- *Se compararán los factores de campos obtenidos con MLC Millennium 80 con los obtenidos con los colimadores estándar.*

6.2.3.4. Transmisión:

➤ **Procedimiento:**

- *Esta medida se realizó con una cámara de ionización cilíndrica Farmer tipo, usando un campo de 10 x 10 cm² detenido con las mandíbulas. La cámara se colocó en un fantoma de placa de agua sólida RW3 sobre el eje del haz en el isocentro y a 10 cm de profundidad tanto para la energía de 6 MV como para la de 18 MV.*
- *Como un primer paso se hicieron medidas con los MLC retraídos, es decir, con el campo abierto. Luego conservando el mismo campo de 10 x 10 cm² y la misma posición de la cámara (con su eje perpendicular al movimiento de las hojas) se obtuvieron datos con las MLC cerradas.*
- *Para asegurar que la medida fuera un promedio de la radiación de fuga y de transmisión, se colocó también la cámara con un desplazamiento de ± 5 mm a lo largo del eje de la misma, para el sistema MLC. Los factores de irradiación dispuestos en anexo 2.*

➤ **Observaciones:**

- *La transmisión será la relación que se establece entre el valor medido con el MLC cerrado y el campo de 10 x 10 abierto. Al multiplicar por 100 se obtiene el porcentaje que se transmite, tanto interlámina como entre ambos carros.*

6.2.4. Procesamiento de los datos.

Los datos obtenidos se dividen acorde al tipo de prueba, ya sea ésta del tipo geométrico o dosimétrico. En el caso de los datos obtenidos mediante pruebas geométricas se procesaron mediante un sistema mixto de medición, el cual consiste en la utilización del software FilmQA PRO y de forma manual a través de reglas y transportadores, así como con ayuda de papel milimetrado calculándose para cada caso. La regla posee una resolución de medición de 0,5 mm, y el transportador a usar solo de 1°. Para el caso de las pruebas dosimétricas se utilizó el fantoma de placas RW3, Cámara de Ionización del Tipo Farmer modelo WDIC 70 N°110, el electrómetro dispuesto en 300 volt y se medirá la carga en nC. Esto debido que en todas las pruebas se busca obtener una relación entre la medición obtenida por el colimador convencional y el MLC.

7-. RESULTADOS

7.2.1. Prueba Geométricas:

7.2.1.2. Coincidencia de los ejes de radiación y luminoso del MLC con el eje mecánico del colimador en el plano del isocentro de la Unidad.

Esta prueba consta de tres procedimientos, en el procedimiento 1 se dispuso un campo formado al dejar retraídas las láminas de ambos carros a una distancia de 0,5 cm en cada una y girando en distintos ángulos el MLC hasta formar la estrella que vemos en la figura N°15 a continuación, producto de las doce irradiaciones realizadas.

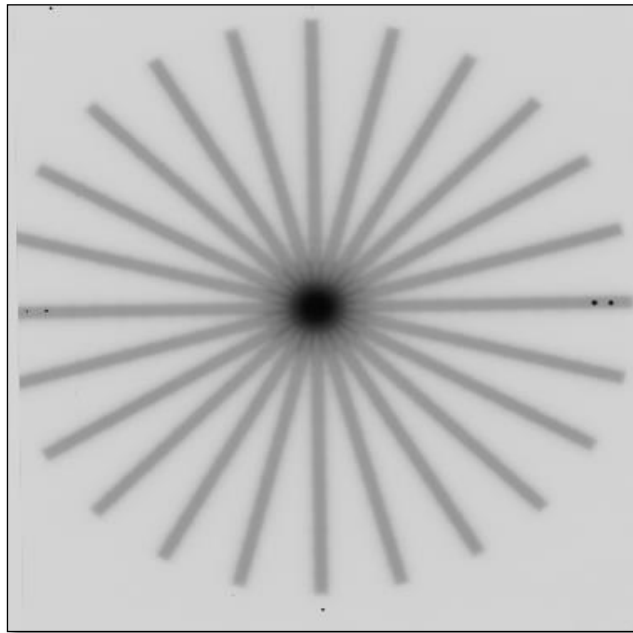


Figura N°15: Coincidencia de los ejes de radiación del MLC con el eje mecánico del colimador en el plano del isocentro de la Unidad. La imagen presenta puntos negros a los cuatro lados, que indican las proyecciones de los láseres, mientras que el punto que se ubica en la región superior derecha indica la orientación de la película.

Esta imagen fue digitalizada y procesada mediante el software destinado a control de calidad llamado FilmQA PRO 2014. En las imágenes siguientes se observa el análisis de las películas que realiza el software, desde la identificación de los haces hasta la identificación del eje de giro del MLC como se observa en las figuras N° 16 y N°17 respectivamente.

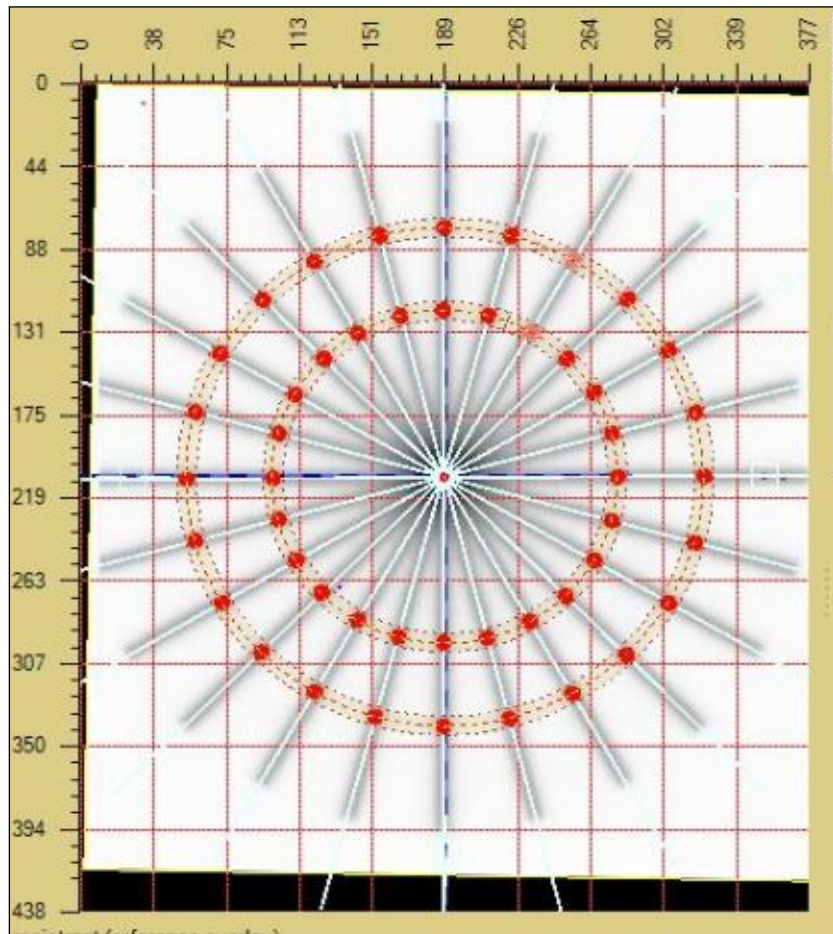


Figura N°16: La imagen presenta el análisis de reconocimiento de haces que realiza el software. Se le debe asignar al software el plano del isocentro y mediante la herramienta “Analyzer ultrastar”, será capaz de realizar este análisis, entregando algunos datos.

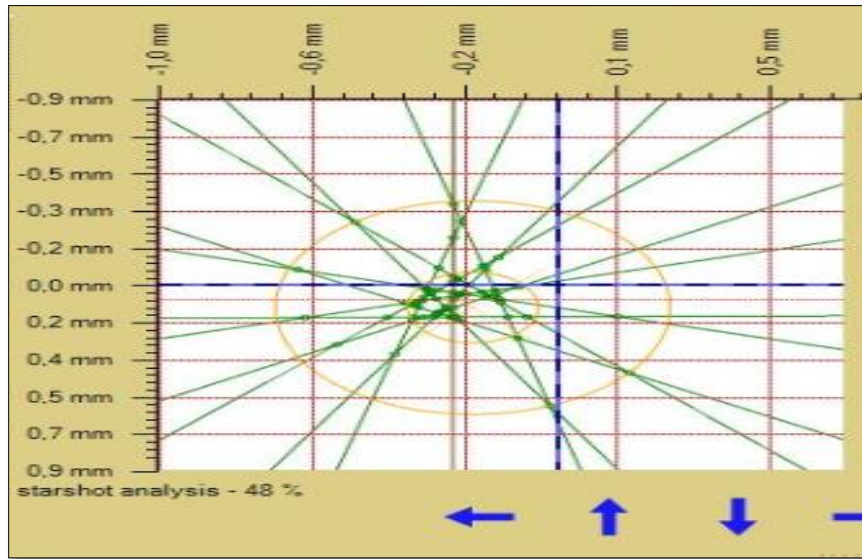


Figura N°17: En la imagen de observa, un análisis detallado de los giros que realiza el MLC ante los distintos campos irradiados. Se compara con esto la real alineación que existe entre el eje de giro del MLC y el Isocentro del equipo ya que se detecta el isocentro (líneas azules perpendiculares) y el eje de giro del colimador. Además se puede observar la angulación de todos los haces, que son representados por una línea de distinto color.

```

Detected isocenter (centroid): [-0,3, 0,1] mm ([-1, 0] pix)
Centroids distance from machine isocenter: 0,3 mm (1 pix)
Minimum circle encompassing beam intersections:
  radius: 0,5 mm (2 pix)
  average distance of beam intersections from isocenter: 0,2 mm (1 pix)
  center: [53,0, 61,7] mm ([188, 211] pix)
  offset from machine isocenter: 0,2 mm (1 pix)

Number of beams: 12
Beam angles:
1 - 135,0 ° ~ 315,0 ° beam 2
2 - 149,6 ° ~ 329,6 ° beam 3
3 - 165,0 ° ~ 345,0 ° beam 4
4 - 179,6 ° ~ 359,6 ° beam 5
5 - 195,2 ° ~ 15,2 ° beam 6
6 - 210,0 ° ~ 30,0 ° beam 7
7 - 225,5 ° ~ 45,5 ° beam 8
8 - 240,1 ° ~ 60,1 ° beam 9
9 - 255,5 ° ~ 75,5 ° beam 10
10 - 270,1 ° ~ 90,1 ° beam 11
11 - 285,2 ° ~ 105,2 ° beam 12
12 - 300,1 ° ~ 120,1 ° beam 1

```

Figura N°18: El recuadro entrega información entregada por el software, detectando la posición del isocentro en mm, además entrega otros parámetros importantes, como la distancia entre el eje de giro del MLC y el isocentro del equipo, además del número de haces y los respectivos ángulos de cada uno de ellos.

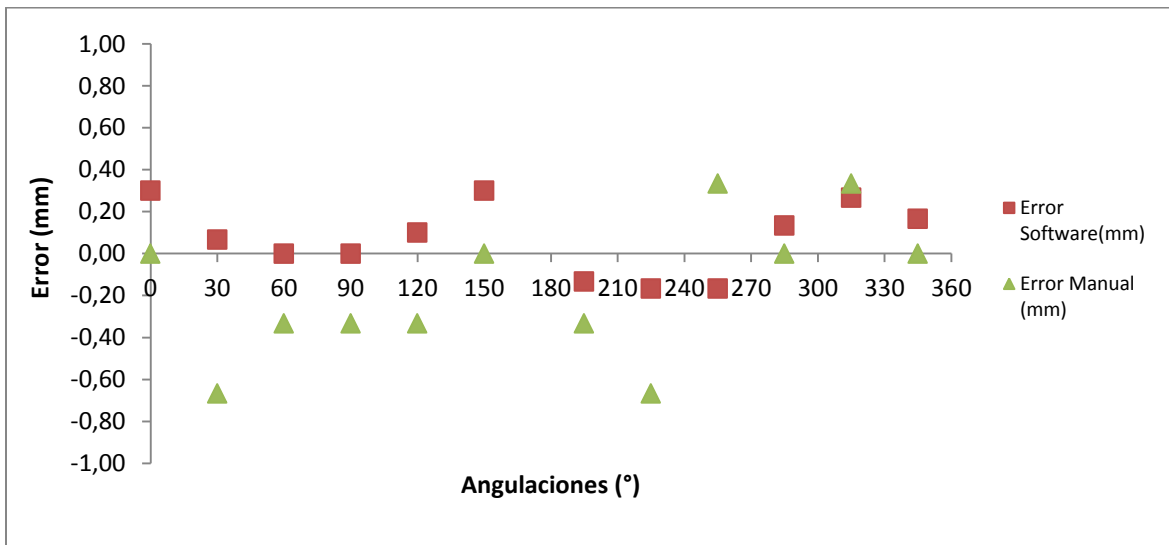
De los datos obtenidos por el procesamiento, que se usaron para el análisis fueron los ángulos de giro del colimador en cada haz y la distancia entre el eje de giro del colimador y el isocentro del equipo. Estos datos fueron obtenidos durante los meses de marzo a junio del 2014 en tres oportunidades de los cuales se presentan en la siguientes tabla para la distancia entre el eje de giro MLC e isocentro del equipo, la media, la desviación estándar el error absoluto y la tolerancia. En el caso de los ángulos de giros se presentan los resultados en el tiempo mediante el gráfico N°1, comparando los valores obtenidos con el Software y mediante medición manual.

Tabla N°2. *Distancias entre el eje de giro del colimador MLC con el eje del Equipo en el Isocentro, medido mediante Software FilmQA Pro 2014.*

	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Error absoluto (mm)	Tolerancia (mm)
Distancia entre eje de giro MLC e isocentro del equipo	0,85	0,33	0,85	2

Gráfico N°1. Errores absolutos por ángulos de Giro realizados con el MLC, medidos con FilmQA

Pro 2014 y de forma manual durante los meses de Marzo a Junio del 2014.



La tolerancia propuesta para esta prueba es de $\pm 1^\circ$ del valor de giro asignado en el MLC. En el gráfico N°1 se observa que los ángulos propuestos no superan la tolerancia propuesta, tanto al ser medidos con Software, así como por medición manual, obteniéndose una diferencia algo mayores al medir de forma manual.

Para el procedimiento 2, se dispuso de un campo horizontal, formado mediante la retracción de la láminas centrales de ambos carros del MLC, luego se irradiaron 8 haces, manteniendo el tamaño y la forma del campo, en distintos ángulos del MLC, sin mover el gantry. La imagen también tiene forma de estrella, tal como se aprecia en la Figura N°19

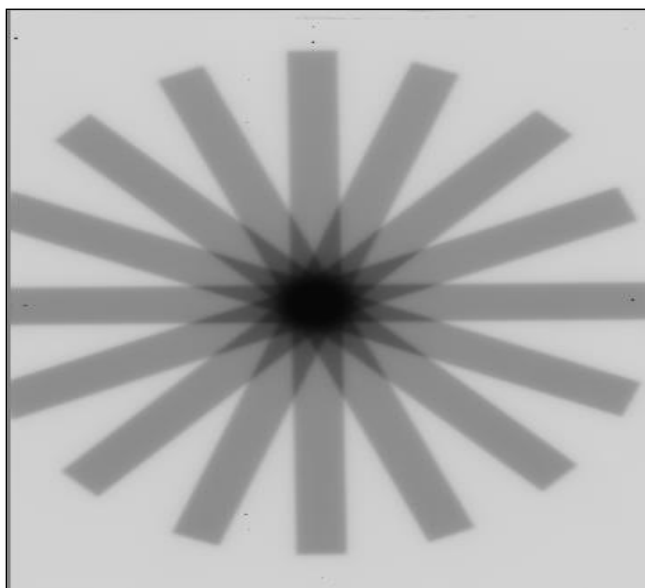


Figura N°19: Coincidencia de los ejes de radiación del MLC con el eje mecánico del colimador en el plano del isocentro del equipo. La imagen presenta puntos negros a los cuatro lados de la imagen, que indican las proyecciones de los láseres, mientras que el punto que se ubica la región superior derecha indica la orientación de la película. Obtenida con el borde lateral de las láminas centrales del MLC de ambos carros.

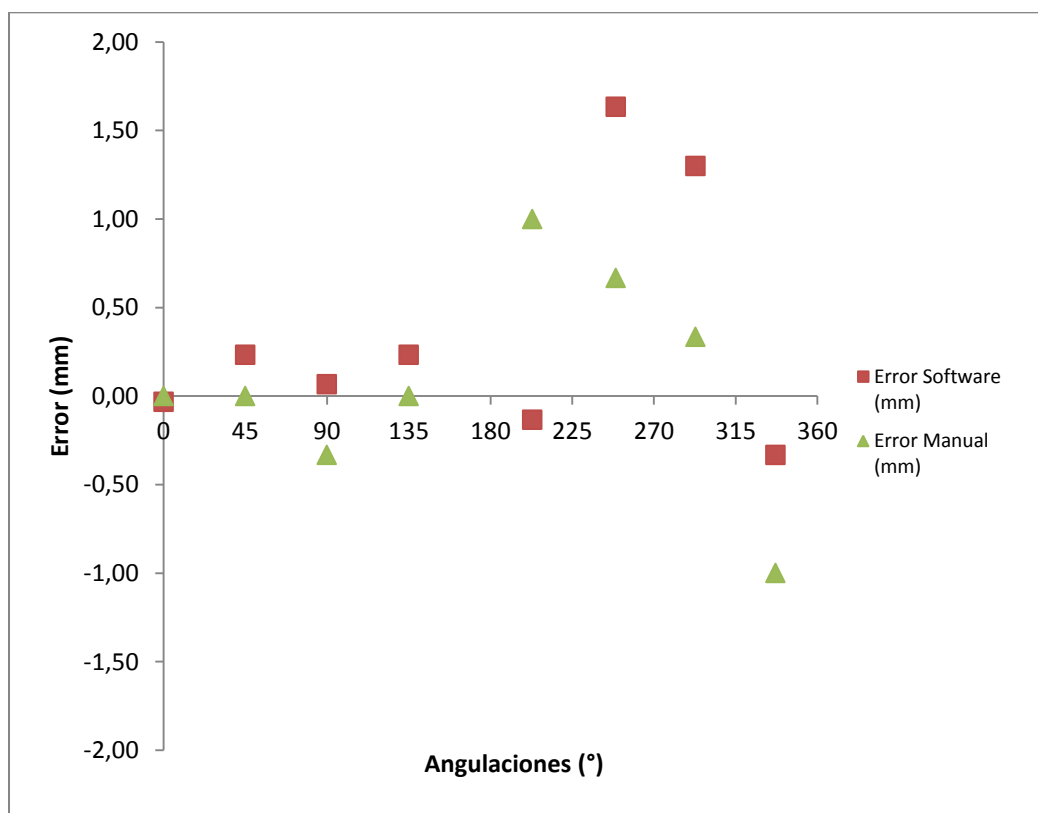
Esta imagen fue digitalizada y procesada mediante el software destinado a control de calidad llamado FilmQA PRO 2014 tal como en el Procedimiento 1. Los datos obtenidos mediante el procesamiento fueron los ángulos de giro del colimador en cada haz y la distancia entre el eje de giro del colimador y el isocentro del equipo. Estos datos fueron obtenidos durante los meses de marzo a junio del 2014 en tres oportunidades de los cuales se presentan en la siguiente tabla la media, la desviación estándar el error absoluto y la tolerancia propuesta para la distancia entre el eje de giro del MLC y el isocentro del equipo,

y una gráfica de los errores absolutos obtenidos con los ángulos de giro del MLC tanto para la medición con Software, así como para la medición manual.

Tabla N°3. Distancias entre el eje de giro del MLC con el eje del Equipo en el Isocentro. (Láminas centrales retraídas).

	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Error absoluto (mm)	Tolerancia (mm)
Distancia entre eje de giro MLC e isocentro del equipo	0,91	0,68	0,91	2

Gráfico N°2. Errores absolutos por ángulos de Giro realizados con el MLC, medidos con FilmQA Pro 2014 y de forma manual durante los meses de Marzo a Junio del 2014. (Láminas centrales retraídas).



Del Gráfico N°2 se puede observar las distintas angulaciones observadas en el tiempo, mediante el error absoluto, relacionado a cada ángulo propuesto. La tolerancia propuesta para esta prueba es de $\pm 1^\circ$, del cual la mayoría de los valores obtenidos al girar el MLC no la superan, con la excepción de los ángulos 249° y 293° que se escapan de la tolerancia al ser medido por software. Al comparar ese valor con su par obtenido por medición manual nos damos cuenta que este no supera la tolerancia, lo que nos permite pensar que la diferencia excesiva en esos ángulos de giro se produce para alguna alteración en el procedimiento de análisis de las placas tanto en su digitalización o mediante el software.

En el caso del procedimiento 3, se pretende corroborar el objetivo anterior, pero esta vez utilizando la proyección del haz, para esto se utilizó un papel milimetrado, y a través del dibujo obtenido por la proyección del campo luminoso en el papel, se registraron los mismo parámetros a evaluar que en los dos procedimientos anteriores, los que se pueden observar en la Figura N° 20.

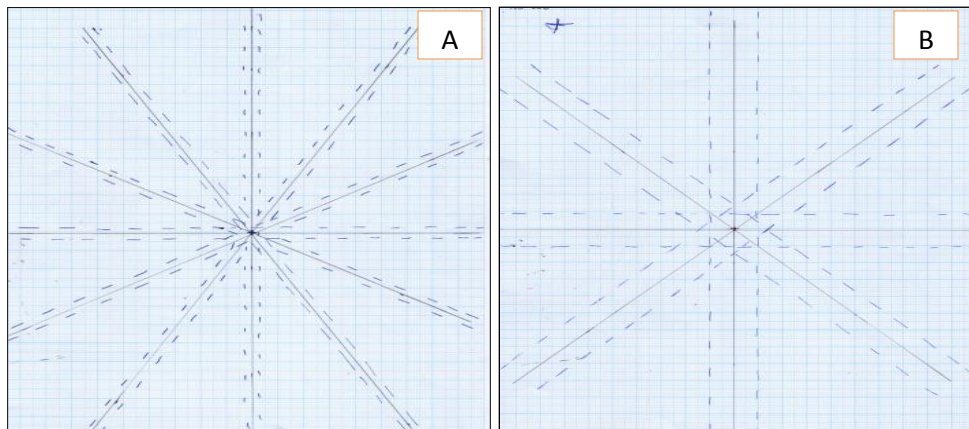


Figura N°20: Coincidencia de los ejes de radiación proyectados por el campo luminoso del MLC con el eje mecánico del colimador en el plano del isocentro del equipo. El dibujo A representa el campo conformado al retraer todas las láminas en 0,5 cm. El dibujo B

representa la retracción de las láminas centrales de ambos carros, conformando un campo de 3 cm de ancho.

Estos datos fueron obtenidos durante los meses de marzo a junio del 2014 en tres oportunidades de los cuales se presentaran en las siguientes tablas, a través de la media, la desviación estándar, el error absoluto y la tolerancia propuesta, para las distancias entre el eje de giro del MLC y el isocentro del equipo proyectado con el haz luminoso. En el caso de los ángulos de giro, obtenidos mediante la proyección del haz luminoso se presentan en los gráficos N°3 y N°4.

Tabla N°3. Distancias entre el eje de giro del MLC con el eje del Equipo en el Isocentro, con proyección del haz luminoso.

	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Error absoluto (mm)	Tolerancia (mm)
Distancia entre eje de giro MLC e isocentro del equipo con la proyección del haz luminoso	1,00	0,00	1	2

Tabla N°4. Distancias entre el eje de giro del MLC con el eje del Equipo en el Isocentro, con proyección del haz luminoso. (Láminas centrales retraídas).

	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Error absoluto (mm)	Tolerancia
Distancia entre eje de giro MLC e isocentro del equipo con la proyección del haz luminoso	1,33	0,58	1,33	2

Gráficos N°3. Errores absolutos por ángulos de Giro realizados con el MLC con proyección del haz luminoso, medido con transportador.

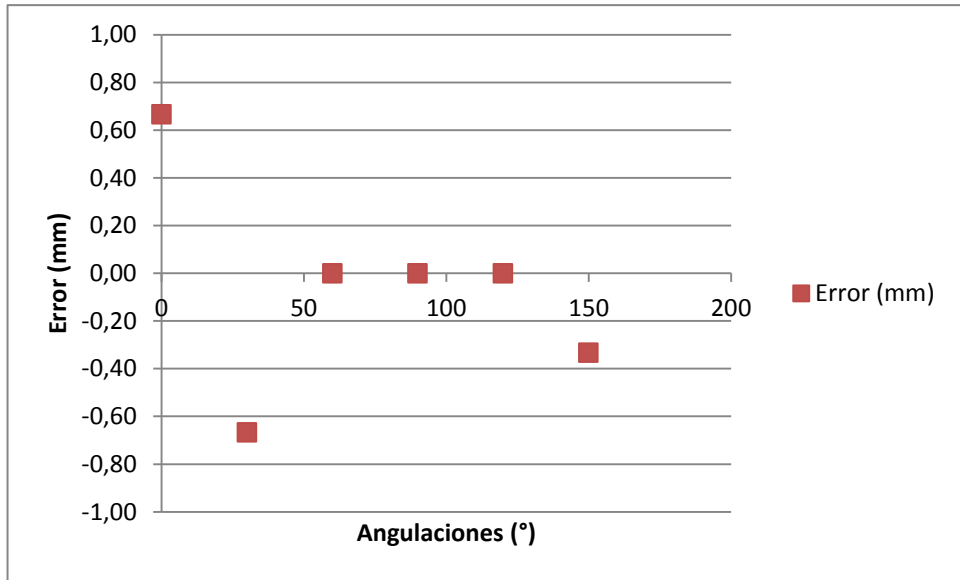
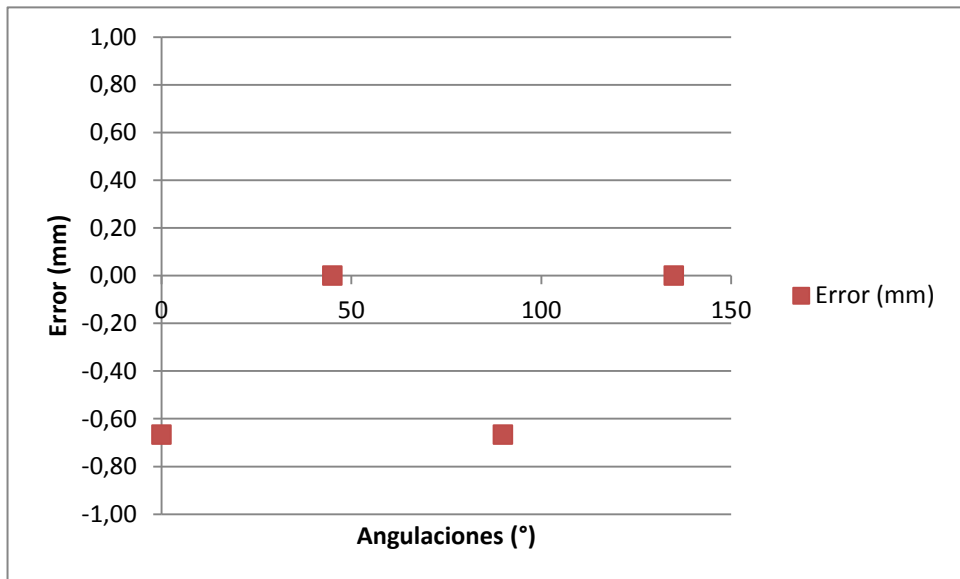


Gráfico N°4. Errores absolutos por ángulos de Giro realizados con el MLC con proyección del haz luminoso, medido con transportador. (Láminas centrales retraídas).



En el caso de los giros evaluados con la proyección del haz, las tolerancias propuestas son $\pm 1^\circ$, al igual que en las pruebas de giro realizadas por irradiación de placas radiográficas. En los gráficos N°3 y N°4 se observa que en ninguno de los dos casos se supera la tolerancia propuesta para cada angulación evaluada.

7.2.1.3. Coincidencia de los ejes de radiación y luminoso del MLC con el eje mecánico del Gantry en el plano del isocentro.

En esta prueba, se repitieron los ángulos de giros usados en el giro del colimador del procedimientos 1, pero la Película Radiográfica va dispuesta perpendicular a la camilla. El procesamiento de la imagen se realizó manual mediante regla y transportador y también mediante la utilización del software FilmQA PRO 2014, tal como se analizaron las imágenes de estrella de la prueba anterior. La imagen que se obtiene al igual que en las pruebas de giro de MLC, representa una estrella tal como se observa en la Figura N° 21.

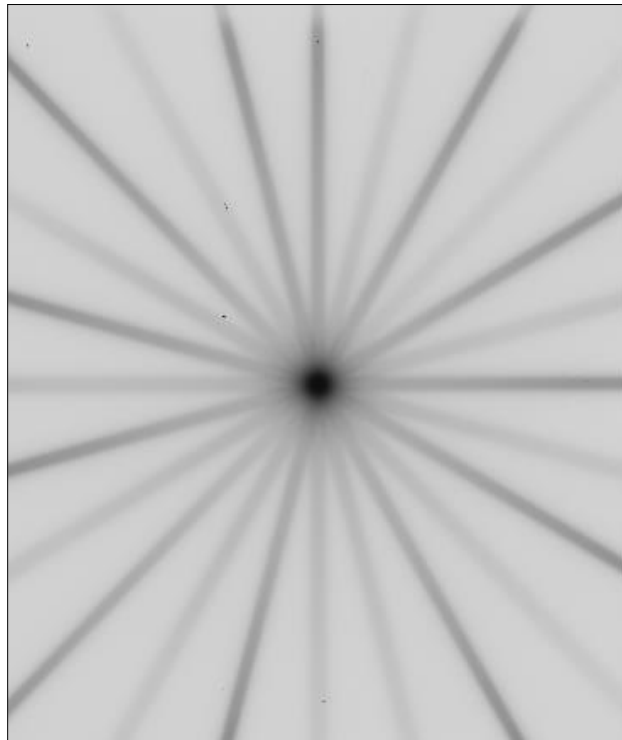


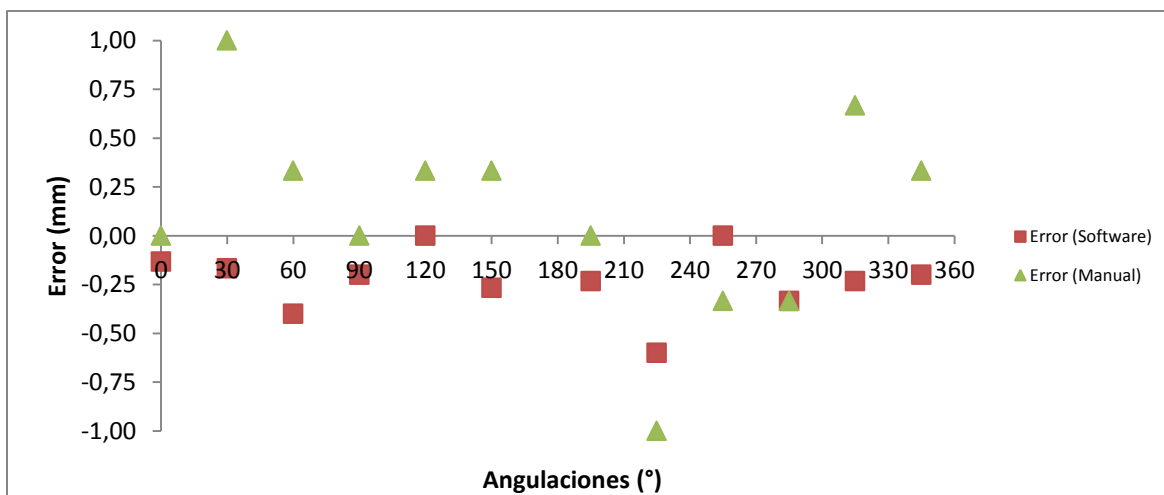
Figura N° 21: Coincidencia de los ejes de radiación y luminoso del MLC con el eje mecánico del Gantry del equipo en el plano del isocentro.

Los datos obtenidos mediante el procesamiento fueron los ángulos de giro del colimador en cada haz y la distancia entre el eje del colimador y el isocentro del equipo. Estos datos fueron obtenidos durante los meses de marzo a junio del 2014 en tres oportunidades de los cuales se presentan en la siguiente tabla para la distancia entre el eje de giro del MLC y el isocentro del equipo, la media, la desviación estándar, el error absoluto y la tolerancia. Para los ángulos de giro se presenta el Grafico N°5 que compara el error absoluto y la tolerancia respectiva, tanto para la medición con Software, así como la medición manual.

Tabla N°5. Distancias entre el eje de giro del colimador MLC con el eje del Equipo en el Isocentro.

	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Error absoluto (mm)	Tolerancia (mm)
Distancia entre eje de giro MLC e isocentro del equipo	0,68	0,23	0,68	2

Gráfico N°5. Errores absolutos por Ángulos de Giro realizados con el gantry, medido con FilmQA Pro 2014 y de forma manual durante los meses de Marzo a Junio del 2014



Las tolerancias propuestas para las pruebas de giro del gantry son de $\pm 1^\circ$ del indicado en el gantry. De la cual se observa que al medir con el software y mediante medición manual no existen ángulos que sobrepasen la tolerancia propuesta, además se corrobora que mediante el software se obtienen diferencias menores que mediante medición manual.

7.2.1.4. Alineación del MLC con los colimadores:

7.2.2.3.1 Alineación del MLC con las mandíbulas inferiores:

En esta prueba se evaluó la alineación del MLC con las mandíbulas inferiores dispuestas en el eje X, se evaluó el Carro A con la mandíbula X2 y el carro B con la mandíbula X1. Se irradió una placa radiográfica EDR2 dejando las láminas del carro B en la posición -1 cm y la Mandíbula X2 en la posición 1 cm. El mismo procedimiento se realizó en otra placa para el Carro A y la Mandíbula X1, donde las posiciones de las láminas fueron de -1 cm y la posición de la mandíbula X2 fue de 1 cm. En la Figura N° 22 se observa, la placa radiográfica expuesta bajo estas condiciones.

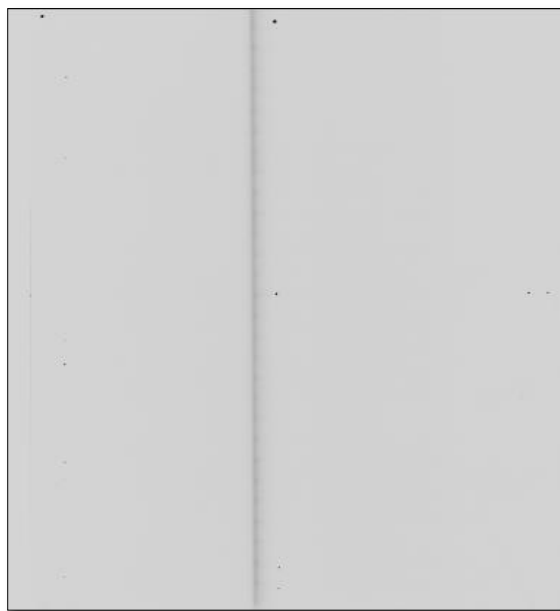


Figura N°22: Alineación del MLC del carro A con la mandíbula X1 del colimador convencional. Las láminas del carro A del MLC están en la posición -1 cm, es decir, atravesando el eje donde se cierra MLC, en cambio la mandíbula X1 se encuentra retraída en 1 cm. La franja oscura que se observa en la película representa la radiación que pasa entre ambas.

En la imagen de la película se puede observar una franja vertical desplazada del centro de la placa, en la cual se midió el grosor de esta y su valor se usó de indicador para esta prueba. Para el análisis de las placas una vez digitalizadas se usó el software FilmQA PRO 2014, la herramienta “profile”. Una vez establecida una distancia con el software, esta distancia se debe multiplicar por un factor de magnificación, que se obtiene al relacionar los valores de la escala que está presente en la imagen con los valores reales de esa escala, presentes en la película. En la Figura N° 23, se representa la medición que se realiza con el software en la placa radiográfica digitalizada con el software FilmQA PRO 2014.

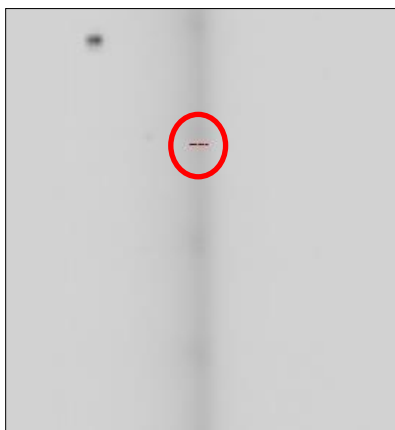


Figura N° 23: Se observa una zona de la película la cual posee la franja vertical que debe ser evaluada. En esta imagen podemos una pequeña línea roja encerrada en círculo, la cual delimita la distancia de la franja vertical de la película que se midió en esta prueba.

También la medición se hizo de forma manual mediante regla, además el mismo procedimiento se realizó para la el carro A con la mandíbula X1. Estos datos fueron obtenidos durante los meses de marzo a junio del 2014 en tres oportunidades de los cuales se presentan en las siguientes tablas la media, la desviación estándar, el error absoluto y la Tolerancia.

Tabla N°6. Distancias de franja vertical como indicador de alineación entre el Carro A del MLC y la mandíbula X1 medida con FilmQA Pro 2014 y por medición manual.

	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Error absoluto (mm)	Tolerancia (mm)
Distancia máxima medida con Software.	1,43	0,21	1,43	2
Distancia Máximas con medición manual.	1,50	0,00	1,50	2

Tabla N°7. Distancias de franja vertical como indicador de alineación entre el Carro B del MLC y la mandíbula X2 medida con FilmQA Pro 2014 y medición manual.

	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Error absoluto (mm)	Tolerancia (mm)
Distancia máxima medida con Software	1,48	0,15	1,48	2
Distancias Máximas con medición manual	1,50	0,00	1,50	2

Este mismo procedimiento, también se realizó para la proyección del haz, en la cual, antes de irradiar las películas se alineaba un papel milimetrado, y se dibujó en este la proyección que el haz luminoso formó. Estas pruebas fueron realizadas para ambos carros, es decir, se evaluó el Carro B con la mandíbula X2 y el Carro A con la Mandíbula X1. Obteniendo los siguientes resultados.

Tabla N°8. Distancias de franja vertical como indicador de alineación entre el Carro A del MLC y la mandíbula X1 medida con regla a través de la proyección del campo luminoso.

	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Error absoluto (mm)	Tolerancia (mm)
Distancia máxima	2,00	0,00	2,00	2

Tabla N°9. Distancias de franja vertical como indicador de alineación entre el Carro B del MLC y la mandíbula X2 medida con regla a través de la proyección del campo luminoso.

	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Error absoluto (mm)	Tolerancia (mm)
Distancia máxima	1,67	0,29	1,67	2

Las Tolerancias propuestas para esta prueba es que la franja vertical irradiada en la película debe ser máximo 2 mm. Y en el caso de la franja obtenida mediante la proyección del haz luminoso está no debe superar los 2 mm. Si comparamos el error absoluto con la tolerancia en ninguna de los casos se obtiene un valor superior a la tolerancia. Pero si se evidencia que existe un error absoluto menor, medido mediante el Software, para el caso de las placas irradiadas.

7.2.2.3.2 Alineación del MLC con las mandíbulas superiores:

Esta prueba corresponde a la alineación del MLC con la mandíbulas superiores dispuestas en el eje Y. En esta prueba se irradia una sola placa tal como fue explicado en el procedimiento de la prueba 6.2.1.3.2. La imagen formada es la siguiente.

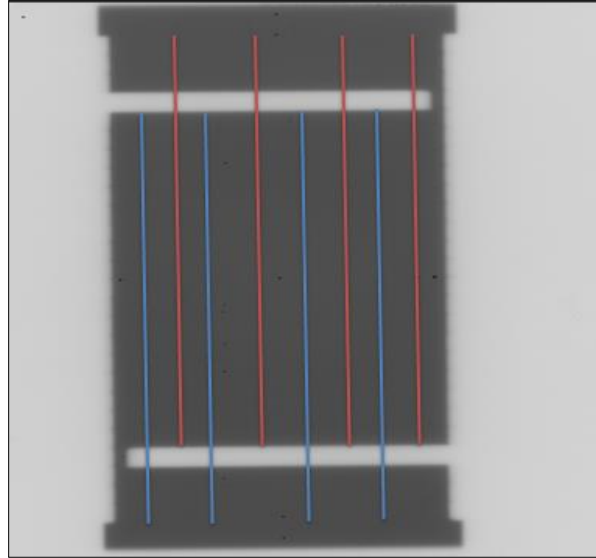


Figura N° 24: En esta imagen se observan las láminas del MLC en la posición de 7 cm con excepción de las láminas A4 y B23 que se posicionan a -6,5cm, el tamaño de campo de 15x 29 cm. Y las líneas que relacionan las láminas del MLC A4 con Y2 y B23 con Y1.

El esquema siguiente²² de la Figura N°25 se representa la disposición de las láminas, así como la forma en la que se analiza la imagen.

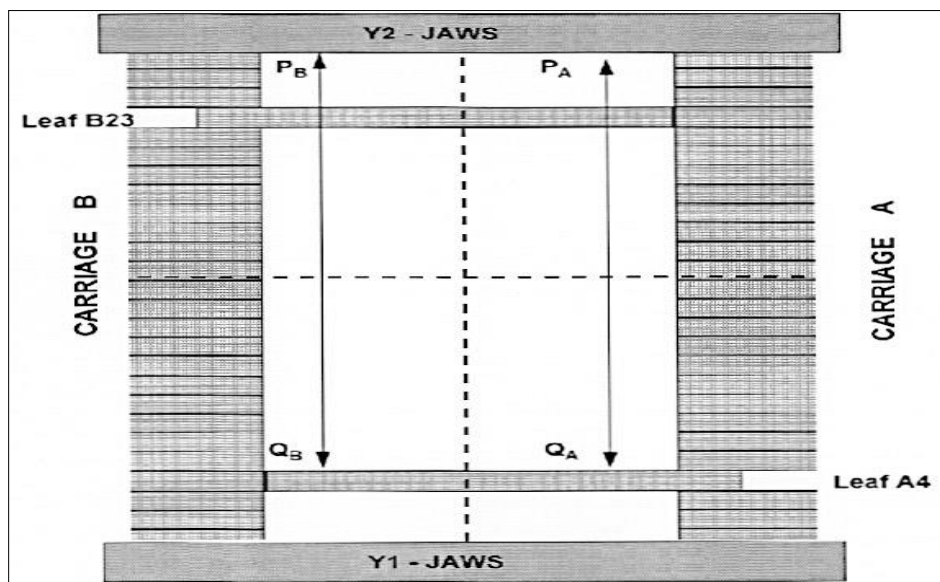


Figura N°25: En esta imagen se representa la disposición de las láminas de ambos carros. Se observan líneas como la formada por P_B y Q_B , así como P_A y Q_A . Estas líneas se miden y se comparan los valores entre ellas, las diferencias son el indicador de esta prueba.

En esta prueba se midieron las distancias de las líneas trazadas de Y1 hasta el borde inferior de lámina B23, en la que se realizaron más de una línea, y se calculó la variación de estas a través de la diferencia matemática. También la medición se realizó mediante el software FilmQA Pro 2014, a través de la herramienta de “profile”, al igual que la distancia medida en la prueba de alineación de las láminas del MLC con las mandíbulas inferiores.

Este procesamiento se observa en la Figura N°26.

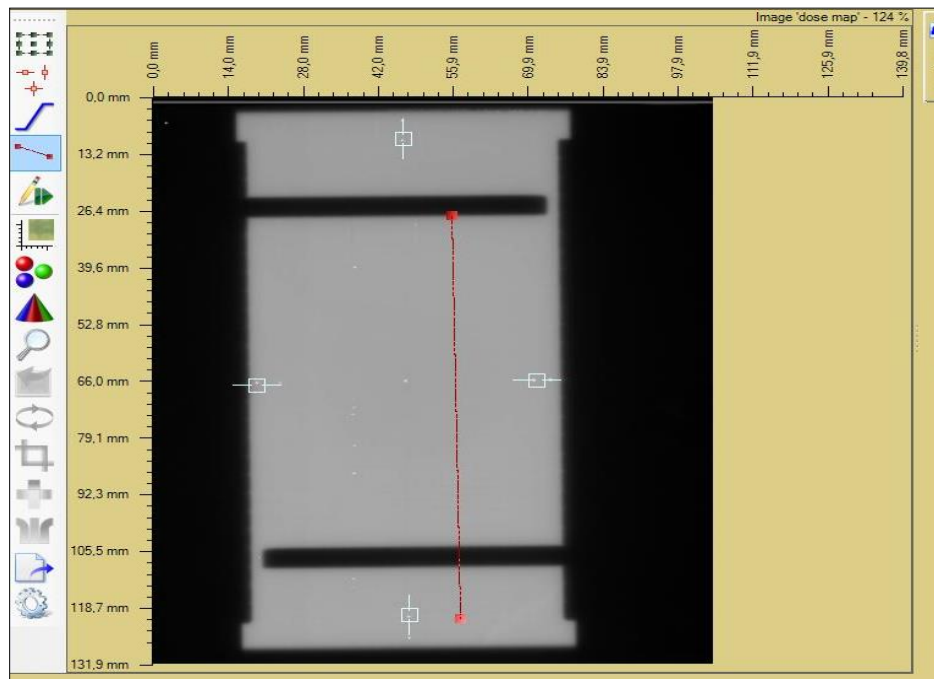


Figura N°26: Se presenta la imagen siendo procesada por el software. Se observan los ROI posicionados sobre los puntos marcados que representan el isocentro del equipo, y la línea

roja sobre la imagen es una de las distancias que se mide desde el borde inferior de B23 y el borde superior de la mandíbula Y1.

Los valores de las distintas líneas se relacionan y compararon matemáticamente. El mismo procedimiento se realizó para la Mandíbula Y2 y el borde superior de la lámina A4. Esta prueba se repitió 3 veces, donde los resultados obtenidos mediante la relación matemática se representan en la siguiente tabla. Los puntos seleccionados al medir con regla, no son los mismo seleccionados por el software, por ende el resultado es comparable solo interpretando ambos valores. En la siguiente tabla se presenta la media, la desviación estándar de las mediciones repetidas en el tiempo.

Tabla N°10. Distancias entre Lámina A4 e Y2 y Lámina B23 e Y1, como indicador de alineación entre MLC y Mandíbulas Superiores, medidas mediante FilmQA Pro 2014.

	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Tolerancia (mm)
Distancia A4 e Y2	0,20	0,25	1
Distancia B23 e Y1	0,17	0,27	1

Tabla N°11. Distancias entre Lámina A4 e Y2 y Lámina B23 e Y1, como indicador de alineación entre MLC y Mandíbulas Superiores, medidas mediante regla.

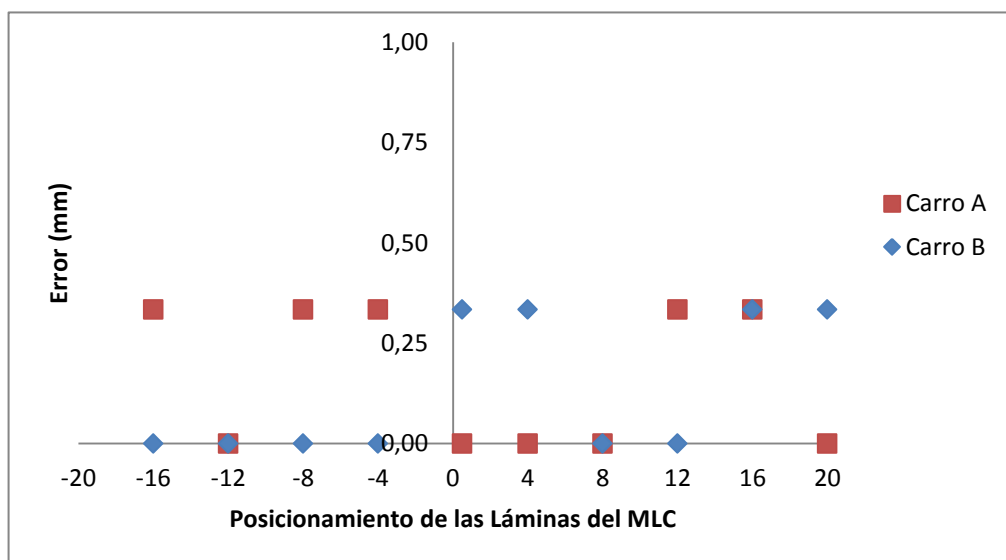
	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Tolerancia (mm)
Distancia A4 e Y2	0,28	0,35	1
Distancia B23 e Y1	0,06	0,10	1

Las Tolerancias propuestas para esta prueba es que las diferencias obtenidas entre las relaciones que se realizan entre cada línea no superen 1 mm. La que evaluadas en el tiempo con el promedio y la desviación de las mediciones no superan la tolerancia.

7.2.1.5. Posicionamiento de Láminas

Esta Prueba consta de dos procedimientos, en el procedimiento 1 se utiliza la proyección del haz para cuantificar la correcta posición de las láminas. Esta proyección se evalúa mediante papel milimetrado y regla. Estos datos fueron obtenidos durante los meses de marzo a junio del 2014 en tres oportunidades de los cuales se presentan en el Gráfico N°6 las variaciones obtenidas en el tiempo para las distintas posiciones que deben tomar las láminas de ambos carros. Estas diferencias son expresadas mediante el error absoluto obtenido para los valores tanto del carro B como el Carro A.

Gráfico N°6. Diferencia de la posición indicada con la obtenida de las láminas del MLC a distintas posiciones para el Carro A del MLC y el Carro B del MLC.



La tolerancia propuesta para esta prueba es que la posición asignada no varíe en más de 1 mm. Del gráfico anterior se desprende que para ninguna posición evaluada en el tiempo tanto para el carro A, como el B, que no superan la tolerancia propuesta.

En el procedimiento 2 de esta prueba, se evalúa la correcta posición de las láminas mediante la irradiación de placas por haces con distintos campos separados cada uno del otro por 2 mm. Esta prueba se realizó en una placa de las siguientes dimensiones, la cual la imagen formada es la siguiente.

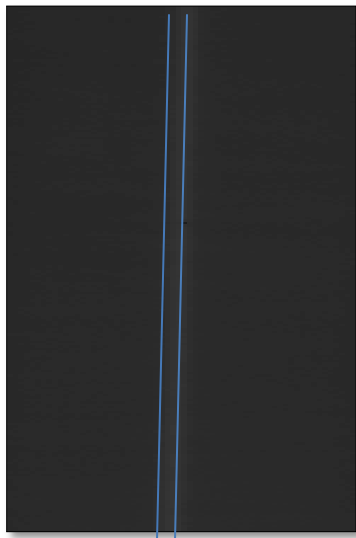
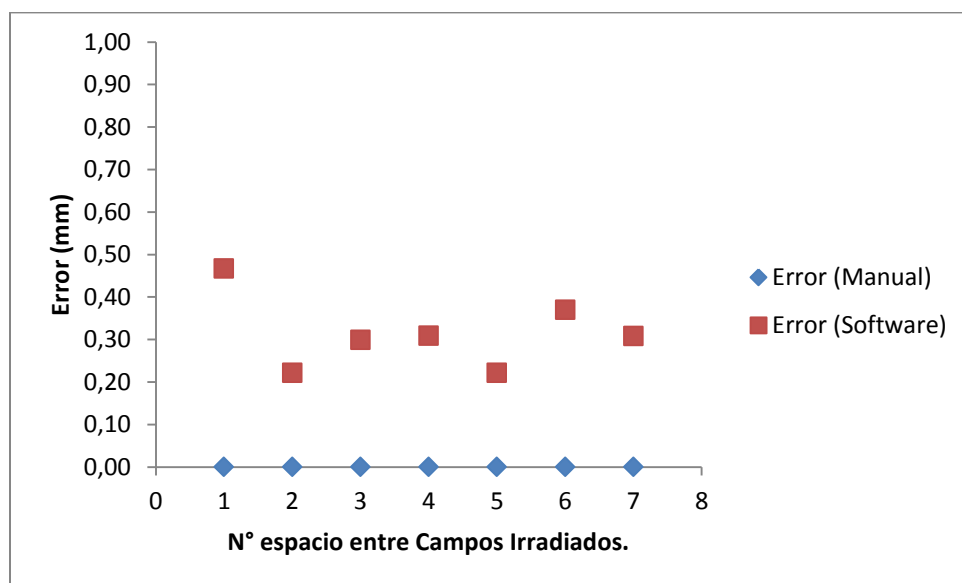


Figura N° 27: Se observa distintos campos irradiados sobre esta placa y entre cada uno de ellos una franja radio opaca, marcada en la imagen por dos líneas azules, la cual es la separación entre ambos campos.

Esta imagen fue digitalizada y analizada mediante el software FilmQA Pro 2014, midiendo la franja radio opaca que se visualiza entre cada campo de irradiación con la herramienta “profile”. Los valores obtenidos deberán multiplicarse por un factor que lleve el resultado de la medición del software a valor real, debido a que la imagen para ser compatible con el

software pierde calidad, lo que se traduce en una pérdida de las dimensiones. Los resultados son los siguientes y se presentan en el Gráfico N°7 que compara el error absoluto obtenido mediante la medición a través del Software FilmQA Pro 2014 y por medición manual de los datos obtenidos durante los meses de Marzo a Junio del 2014.

Gráfico N°7. Error absoluto en la distancia indicada con la obtenida de las láminas del MLC entre distintos campos irradiados sobre una misma Película y medidos mediante FilmQA Pro 2014 y por medición manual.



La distancia entre cada campo debería ser de 2 mm, ya que ese es el espacio dejado entre cada campo irradiado. Pero se tolera que exista un aumento hasta de 1 mm de los dos que debiese haber. Del gráfico N°7 se observa al considerar el error absoluto evaluado en el tiempo, que en ninguno de los casos se supera la tolerancia propuesta. Pero se evidencia que al usar el software las diferencias superan a las diferencias obtenidas por medición manual, lo que refleja diferencias entre las distancias establecidas entre cada campo, lo que

no se evidencia en la medición manual, sugiriendo que la medición por software representa más la realidad.

7.2.1.6. Repetibilidad en el posicionamiento de las láminas.

Esta prueba consistió en verificar la reproducibilidad del posicionamiento de las láminas, lo cual para esto se repitió el procedimiento 1 de la prueba de Posicionamiento de las láminas. Esta prueba fue realizada tres veces durante los meses de Marzo a Junio del 2014, lo que permitió el cálculo de la media, la desviación estándar las cuales se pueden observar en las tablas siguientes.

Tabla N°12. Repetibilidad del posicionamiento de las láminas del Carro A, evaluadas el 29 de Abril 2014.

Posiciones Carro A del MLC	Promedio (mm)	Desviación Estándar
16 cm	0,00	0,00
4 cm	0,00	0,00
0,5 cm	0,00	0,00
-12 cm	0,00	0,00

Tabla N°13. Repetibilidad del posicionamiento de las láminas del Carro B, evaluadas el 29 de Abril del 2014.

Posiciones Carro B del MLC	Promedio (mm)	Desviación Estándar
16 cm	0,00	0,00
4 cm	0,00	0,00
0,5 cm	0,00	0,00
-12 cm	0,00	0,00

Tabla N°14. Repetibilidad del posicionamiento de las láminas del Carro A, evaluadas el 22 de Mayo del 2014.

Posiciones Carro A del MLC	Promedio (mm)	Desviación Estándar
16 cm	1,00	0,00
4 cm	0,00	0,00
0,5 cm	0,00	0,00
-12 cm	0,00	0,00

Tabla N°15. Repetibilidad del posicionamiento de las láminas del Carro B, evaluadas el 22 de Mayo del 2014.

Posiciones Carro B del MLC	Promedio (mm)	Desviación Estándar
16 cm	0,00	0,00
4 cm	0,00	0,00
0,5 cm	0,00	0,00
-12 cm	0,00	0,00

Tabla N°16. Repetibilidad del posicionamiento de las láminas del Carro A, evaluadas el 5 de Junio del 2014.

Posiciones Carro A del MLC	Promedio (mm)	Desviación Estándar
16 cm	0,00	0,00
4 cm	0,00	0,00
0,5 cm	0,00	0,00
-12 cm	0,00	0,00

Tabla N°17. Repetibilidad del posicionamiento de las láminas del Carro B, evaluadas el 5 de Junio del 2014.

Posiciones Carro A del MLC	Promedio (mm)	Desviación Estándar
16 cm	1,00	0,00
4 cm	-1,00	0,00
0,5 cm	0,00	0,00
-12 cm	0,00	0,00

Tolerancia propuesta para esta prueba al repetir las posiciones seleccionadas no debe superar 1 mm de variación. Pero al revisar las desviaciones de los valores obtenidos para cada carro evaluadas en el tiempo podemos observar que no existe variación de la posición tras repeticiones sucesivas, es decir, repiten la posición las 5 veces seleccionadas, independiente del valor de posición en el que se conforman.

7.2.1.7. Dispositivo de entrada.

En esta prueba se pretende verificar que el traspaso de las conformaciones realizada con el XIO para el MLC, sean ejecutadas de buena forma, es por esto que se verificaron 4 campos irregulares elegidos al azar. Esto consistió imprimir en un papel milimetrado el campo y luego de haberlo trasferido al ALE, se corrobora mediante la proyección del haz del campo con el campo impreso. En la siguiente tabla se presentan los resultados de esta prueba como la media, la desviación estándar, el error absoluto y la Tolerancia, calculados con los datos obtenidos durante los meses de Marzo a Junio del 2014, en tres oportunidades.

Tabla N°18. Conformación de la figura para la verificación del Software controlador del MLC.

Figura	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Error absoluto (mm)	Tolerancia (mm)
Distancias	0,33	0,58	0,33	1

La Tolerancia propuesta para esta prueba, es que el valor medido no debe superar 1 mm de la posición de las láminas al conformar la figura del campo. Lo que al considerar el error absoluto obtenido este no supera la tolerancia propuesta.

7.2.2. Prueba Dosimétricas:

7.2.2.1. Rendimiento en Profundidad.

Se evaluaron las diferencias entre los rendimientos en profundidad del campo obtenido con el MLC y el mismo obtenido con los colimadores convencionales. La zona de análisis debe ser la comprendida entre la distancia de Dosis Max (Dmax) y la mayor profundidad que es 20 cm. En los siguientes gráficos se presentan las diferencias porcentuales obtenidas tanto para los haces de fotones de 6 MV y para los haces de fotones de 18 MV.

Gráfico N°8. Diferencia porcentual de los Rendimientos en Profundidad entre Colimador Convencional y MLC más Colimador Convencional a distintas profundidades para una energía de 6 MV

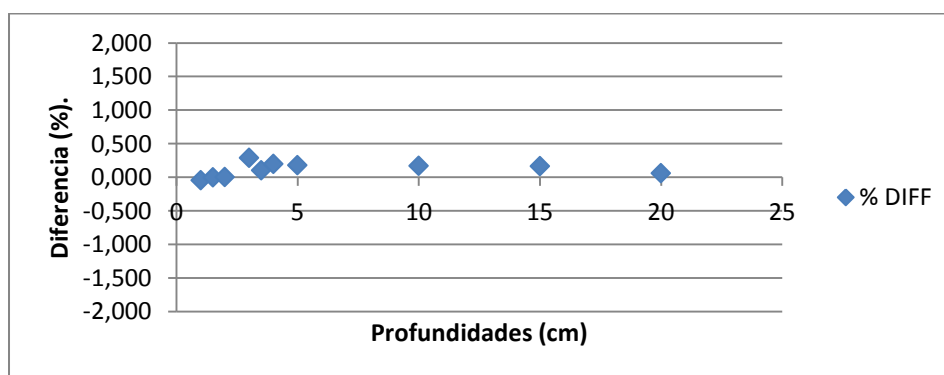
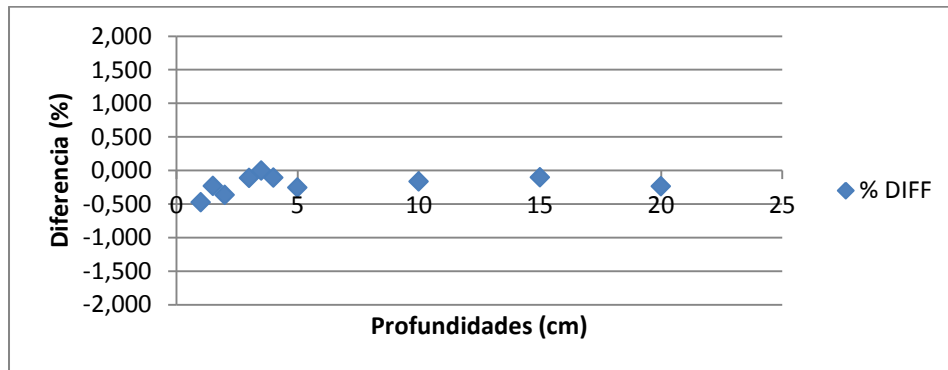


Gráfico N°9. Diferencia porcentual de los Rendimientos en Profundidad entre Colimador Convencional y MLC más Colimador Convencional a distintas profundidades para una energía de 18 MV.



Al comparar las curvas obtenidas para cada energía entre la obtenida con el MLC más Colimador Convencional y colimador Convencional. Se puede observar la diferencia de forma práctica.

La tolerancia propuesta para esta prueba, plantea que las diferencias obtenidas entre el colimador convencional y el MLC no deben superar el 2%. Del gráfico N°8 y N°9 se puede observar que las diferencias para las distintas profundidades entre el MLC y los Colimadores Convencionales no superan el 1%.

7.2.2.2. Perfiles.

El perfil obtenido fue en el plano longitudinal para haces de fotones de 6 MV y para 18 MV en un campo de 10 x 10, el cual se obtuvo moviendo la camilla en dirección horizontal tanto en sentido positivo como negativo. Se realizó una comparación porcentual entre los valores obtenidos con el MLC y el Colimador Convencional que se pueden observar en los siguientes gráficos.

Gráfico N°10. Diferencia porcentual de los Rendimientos en Profundidad entre Colimador Convencional y MLC más Colimador Convencional a distintas profundidades para una energía de 6 MV.

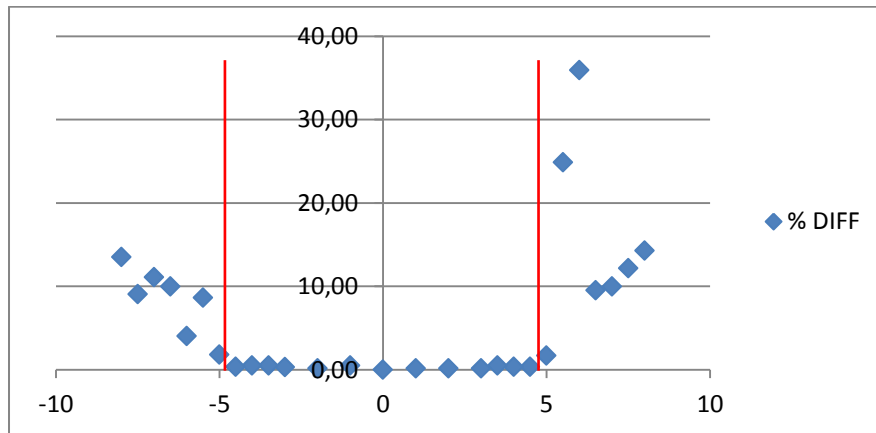
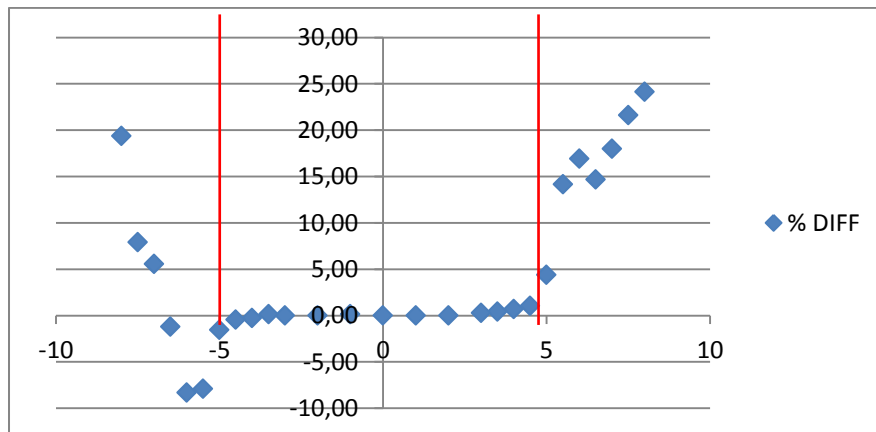


Gráfico N°11. Diferencia porcentual de los Rendimientos en Profundidad entre Colimador Convencional y MLC más Colimador Convencional a distintas profundidades para una energía de 18 MV.



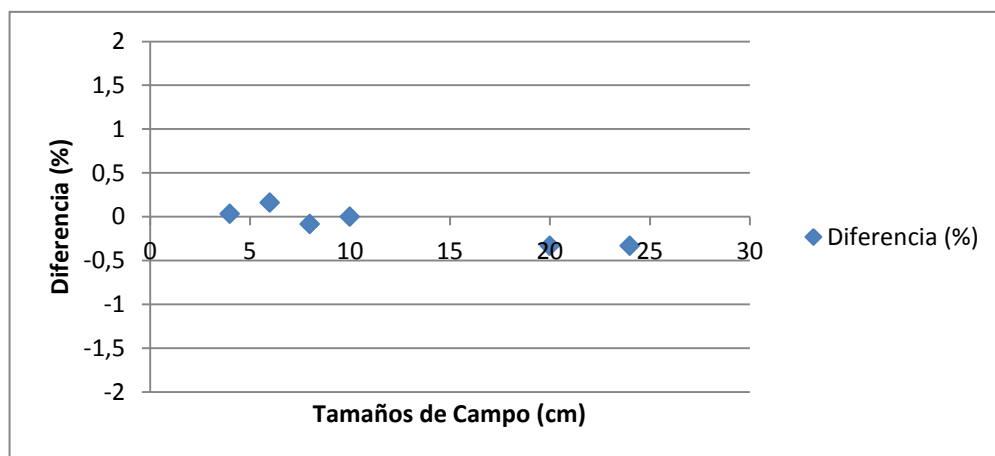
La tolerancia propuesta para esta prueba, plantea que las diferencias obtenidas entre el colimador convencional y el MLC no deben superar el 2%. Observando en los dos gráficos

podemos apreciar que la variación no supera el 2%, en las distancias longitudinales que se corresponden con el tamaño de campo sugerido de forma aproximada entre las líneas rojas.

7.2.2.3. Factor de Campo.

En el Gráfico N°12 se muestra el factor de campo para los campos obtenidos con los colimadores convencionales y con el MLC. La diferencia se presenta normalizada al valor de cada campo y en porcentaje. Además es importante considerar que esta prueba fue realizada para haces de fotones de 6 MV.

Gráfico N°12. Diferencia porcentual de los Factores de Campo obtenidos con el Colimador Convencional y MLC más Colimador Convencional para distintos tamaños de campo, con Energía de 6 MV.



La tolerancia propuesta para esta prueba, plantea que las diferencias obtenidas entre el colimador convencional y el MLC no deben superar el 2%. En el gráfico N°12 se observa que las diferencias para esta prueba no superan el 1%.

7.2.2.4. Transmisión

Se considera la transmisión a la relación porcentual que existe entre un campo abierto de valores determinado conformado con el colimador convencional y MLC retraído, con el mismo campo cerrado solo con el MLC. Ahora de los distintos tipos de transmisión que existe, lo que podemos obtener aquí es un promedio debido a que las mediciones con la cámara de Ionización fueron obtenidas en el centro del haz o sea entre láminas y luego fueron desplazadas ubicándose en el centro de una lámina tanto para el lado derecho como para el izquierdo. Los resultados de transmisión se muestran en la siguiente tabla tanto para haces de fotones de 6 MV y para 18 MV.

Tabla N°19. Transmisión promedio del MLC.

	MLC Posición 0,0 10x10	MLC Posición 0,0 10x10	MLC Posición 0,0 10x10	Promedio	Desviación Estándar
Transmisión (%) 6 MV	1,63	1,56	1,63	1,60	0,041
Transmisión (%) 18 MV	1,62	1,62	1,62	1,62	0

La Tolerancia propuesta para esta prueba, plantea que las diferencias obtenidas entre el colimador convencional y el MLC no deben superar el 3%. La transmisión promedio como resultado de todas las fuentes de transmisión existente no supera la tolerancia para la energía de 6 MV y tampoco para la Energía de 18 MV. A pesar de que para obtener estos valores se desplazó la cámara en el eje longitudinal.

8-. Discusión

Con los resultados obtenidos por medio de la realización de las pruebas anteriores geométricas y dosimétricas se pueden decir que el Acelerador Lineal Varian Clinac 21Ex de la Fundación Arturo López Pérez, cumple con la especificaciones de calidad, permitiendo establecer un estado de referencia inicial. A continuación se realizará una descripción y comparación en detalle de los resultados obtenidos para los distintos tipos de prueba.

8.1. Prueba Geométricas:

Con respecto a las pruebas geométricas es importante considerar el objetivo de cada una de ellas para realizar un respectivo análisis. En la prueba de coincidencia del eje de giro del MLC en relación al isocentro del equipo tanto para sus tres procedimientos, tenemos que el equipo en las tres mediciones temporales no supera la tolerancia propuesta, es decir, ante los distintos giros el equipo mantiene prácticamente constante su posición con respecto al isocentro del Gantry. Esto se confirma comparando el error absoluto de la medición en el tiempo con la tolerancia propuesta, la cual no la excede. Las mediciones realizadas en las placas irradiadas se obtuvieron con medición manual y mediante el SoftwareQA Pro 2014 y en ambas mediciones los resultados no superan la tolerancia propuesta, ahora bien los valores obtenidos mediante la medición manual presentan un error absoluto mayor, debido a la menor resolución de medición del instrumento, por ende el realizar la medición con el software facilita la obtención de los resultados y el análisis del mismo. Para el caso del procedimiento 3, en la cual se usa la proyección del haz luminoso para corroborar la constancia del eje del MLC con el isocentro del Equipo, se utilizan menos ángulos de giro

en el MLC que cuando se irradian las placas, esto debido a un aumento en la demanda de tiempo, y debido a que la imagen dibujada dificulta su interpretación por la gran cantidad de líneas trazadas, lo que una disminución de 12 a 6 y de 8 a 4 para cada dibujo será óptima. Independiente de las recomendaciones ambas figuras no superan las tolerancias propuestas.

En la caso de la Prueba 2 que consiste en verificar la coincidencia del eje del MLC con el isocentro del Gantry, cuando el Gantry está en movimiento las mediciones obtenidas mediante los dos métodos no superan los valores de tolerancia propuestos aunque se repite lo visto en la prueba 1, donde el error absoluto es mayor para las mediciones manuales. Es importante tener presente que en esta prueba la dificultad se presenta en el Centraje de la placa, es importante, que esté sea óptimo, ya que una mala alineación, no permitiría el análisis correcto de esta.

Para las pruebas de Alineación del MLC con las mandíbulas Inferiores tanto para el Carro B y Carro A del MLC no superan las tolerancias propuestas, es por esta razón que podemos decir que el Carro B y la mandíbula X2 se encuentran alineadas, lo mismo para la el Carro A y la Mandíbula X1. Estas mediciones se realizaron de forma manual y usando el software FilmQA Pro 2014. Donde al igual que en las dos pruebas anteriores la medición con el Software presenta un error absoluto menor, lo que permite un distancia más fidedigna de la línea vertical que se logra apreciar en la placa radiográfica. Para la Alineación del MLC con las Mandíbulas Superiores la figura realizada permite hacer una rápida evaluación de la alineación. En la cual los datos obtenidos fueron medidos con medición manual y mediante el Software FilmQA Pro 2014, obteniendo valores que no superan la tolerancia propuesta.

Con respecto a los valores, efectivamente al igual que lo obtenido en las pruebas anteriores el medir con el Software facilita el análisis y precisa más los valores en relación con la medición manual.

En la prueba 4 correspondiente al posicionamiento de las Láminas Procedimiento 1, es una prueba que demanda tiempo, porque se necesita ingresar muchas veces a la sala de examen, ya que se deben ir cambiando las posiciones de las láminas del MLC, por ende, se recomienda realizarla de dos personas para facilitar su realización en el tiempo. Además se recomiendan posiciones que abarquen todas las distancias que pueden tener las láminas del MLC. La medición se realiza con la proyección del campo luminoso y se mide por medición manual mediante regla, al tabular los datos se obtuvo que los valores en el tiempo no superan la tolerancia propuesta, comparando el error absoluto obtenido en el tiempo con los límites permitidos expresados en la tolerancia propuesta. En el procedimiento 2 del Posicionamiento de las Láminas tenemos que se necesita irradiar varios campos, en una misma, placa, ahora bien, visto que los campos van desde los 20 cm del carro B hasta los 20 cm del carro A, se recomienda utilizar una placa de las siguientes dimensiones 33 x 41 cm² para evitar las entradas sucesivas y de esa manera disminuir el tiempo de la prueba, de lo contrario se deberá realizar en tres placas radiográficas, por ende el tiempo aumenta considerablemente debido que a que se deberá entrar tres veces para centrar cada una de estas. La medición realizada se hizo de forma manual y mediante el Software FilmQA Pro 2014, en la cual las tolerancias propuestas no son superadas al realizar la comparación del error absoluto, con la tolerancia propuesta. En esta prueba visto que las distancias a medir son tan pequeñas cuando se mide con regla, es muy operador dependiente lo que su medición y error absoluto no evidencia diferencias, cosa contraria sucede al medir con el

Software FilmQA Pro 2014, que evidencia diferencias, mucho mayores que los valores obtenidos por medición manual, aun así al comparar el error absoluto con la tolerancia propuesta, el primero es inferior, por ende podemos decir que el posicionamiento de las láminas es correcto.

La prueba de Repetibilidad del Posicionamiento de las láminas consiste en una repetición del procedimiento 1 de la prueba de Posicionamiento de las láminas, con el objetivo de evaluar la correcta posición de las láminas al indicarle de forma sucesiva una misma posición. Esta prueba se hace midiendo la proyección del haz luminoso con regla o papel milimetrado. Visto que si el procedimiento 1 fuera repetido a cabalidad, el tiempo demandado sobrepasaría la posibilidad de realizarlo en el tiempo se propone tomar solo algunas posiciones tanto centrales como distantes del eje central, tanto para el carro A como el B, así como repetir cada posición cinco veces. Realizando este procedimiento los resultados no superaron la tolerancia propuesta, donde se obtiene que independiente de la posición que tiene la lámina, está posición se repite las 5 veces que es seleccionada en el día que se realiza la prueba. Si se hace un promedio de las desviaciones estándar obtenidas se tiene que este valor para cada posición en el tiempo es de 0, lo que habla de la excelente reproducibilidad de las láminas. La prueba de Software es una prueba que permite verificar que el traspaso de la información obtenida desde el planificador, hasta el controlador del MLC sea el correcto, y para eso se utilizó un campo al azar obtenido de un tratamiento a paciente, verificando que la proyección del haz luminoso coincida con el campo impreso a tamaño real en un papel milimetrado, de los resultados evaluados 3 veces en el tiempo se observa que los valores obtenidos, el error absoluto no superan la tolerancia propuesta, además es importante considerar que este parámetro se evalúa en el servicio de forma

periódica, sin medir las variaciones, para la autorizaciones de los tratamientos de todos los pacientes en algunos de sus campos, por ende su incorporación en un programa de control de calidad no aumentaría considerablemente el tiempo de realización del control de calidad.

Las pruebas geométricas se pueden diferenciar no tan solo acorde al objetivo e indicador que representan, sino que además se pueden diferenciar en relación a la fuente de la que se obtienen los datos, y es aquí donde tenemos dos: placas radiográficas de exposición directa de alta energía y papel milimetrado para dibujo de la proyección del haz luminoso. Es en las primeras donde es importante considerar que el número de placas a utilizar es alto por ende la frecuencia de realización de estas pruebas, en relación a la viabilidad financiera del programa de control de calidad propone que estas pruebas se realizan espaciadas en el tiempo, mediante una frecuencia semestral. El Tecnólogo Médico encargado del Control de Calidad del Acelerador Lineal en La Fundación Arturo López Pérez cree que es importante monitorizar las condiciones de calidad y establecer un marco de referencia inicial para el MLC, ya que su uso es de relevancia en los tratamientos de Radioterapia Conformacional que se realiza diariamente en el servicio.

8.2. Prueba Dosimétricas.

En las pruebas dosimétricas se midieron 4 parámetros, en los cuales más que establecer valores de dosis exactos, se realizó una comparación entre los valores obtenidos en carga (nC) desde las cámara de ionización y el electrómetro, cuando se usaban los colimadores convencionales y el MLC. Con respecto a la primera prueba que es la prueba de rendimiento en profundidad, está no se puede confundir con PDD, ya que aquí solo se está usando algunos valores de carga obtenidos con la cámara de ionización a distintas

profundidades (desde Dmax a 20 cm), y estableciendo una comparación entre los valores obtenidos entre el MLC y los colimadores convencionales, ahora bien es posible estimar un comportamiento similar, debido a que la dosis y la carga son directamente proporcionales. Al interpolar estos valores para una energía determinada y para ambos colimadores en una misma curva, se puede observar que la figura de la curva es muy parecida a la curva que forma la PDD, pero lo interesante radica en que la comparación entre el rendimiento de ambos Colimadores, es que ambas curvas se pueden superponer, dando cuenta de la casi imperceptible variación que se establece entre ambos Colimadores con respecto al rendimiento en profundidad. Los gráficos N°13 y N°14, representan el rendimiento en profundidad para 6 MV y para 18 MV, donde en cada gráfico se puede observar una curva de color rojo que representa a los Colimadores Convencionales, y sobre de ella una curva azul que representa los valores obtenidos con el MLC. Esto para cada energía de Fotones.

Gráfico N°13. Curvas de rendimiento en profundidad para el Colimador Convencional y MLC más Colimador Convencional para una energía de 6 MV.

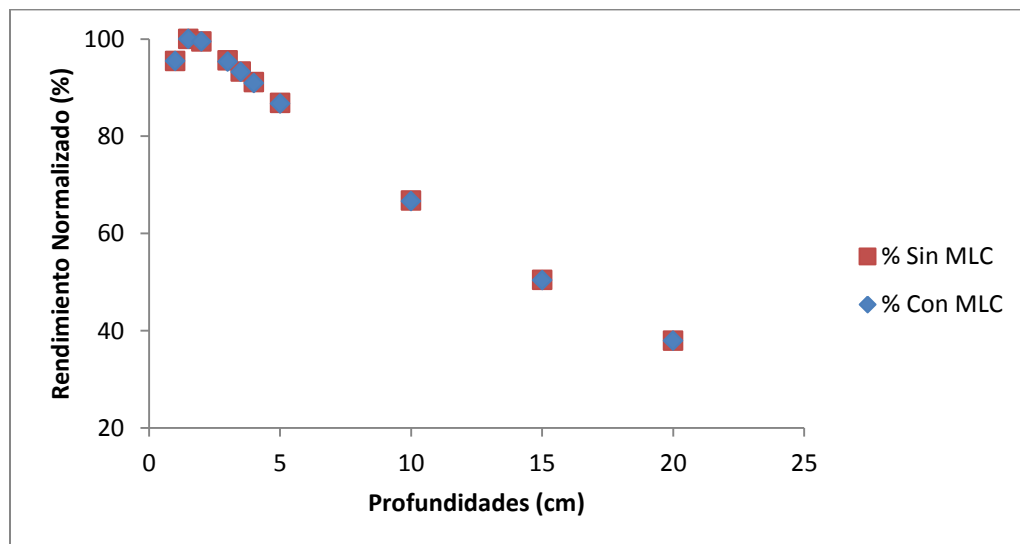
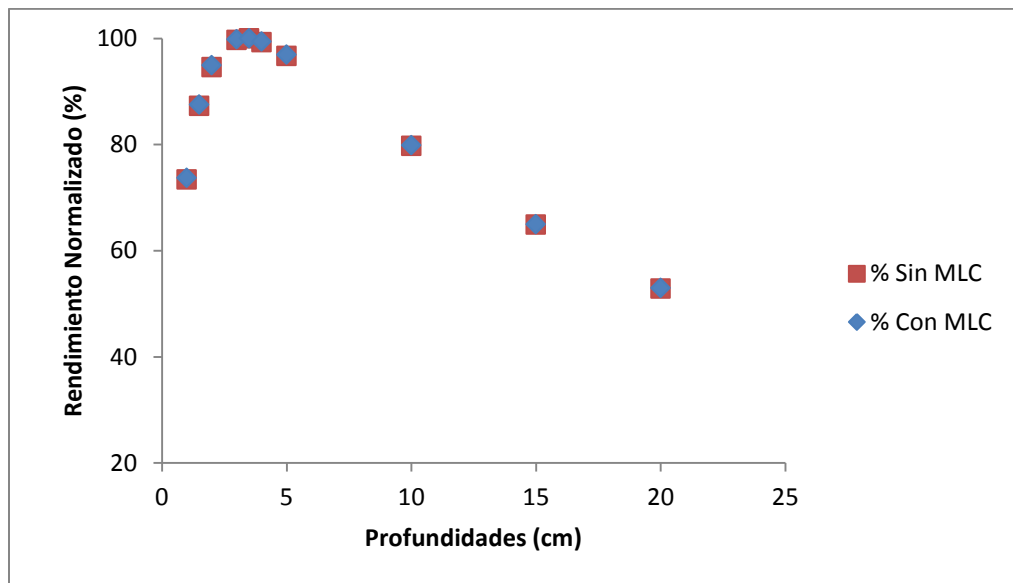


Gráfico N°14. Curvas de rendimiento en profundidad para el Colimador Convencional y MLC más Colimador Convencional para una energía de 18 MV.



Otro parámetro interesante que tenemos, es que las variaciones para energía de fotones de 6 MV presenta diferencias pequeñas en comparación con las diferencias establecidas para la energía de 18 MV, donde se pone en manifiesto que la contribución de la radiación dispersa es mayor, cuando aumentamos la energía. Además se puede apreciar para las energías de 6 MV que los valores obtenidos de carga son mayores para el colimador convencional, esto cambia cuando tenemos energía de 18 MV donde las diferencias tienden a ser negativas, o sea la contribución de los campos realizados con el MLC aumentan la medición en relación al campo realizado solo con los Colimadores Convencionales. Esto se debe a que el campo formado con el MLC, además está formado con los Colimadores Convencionales, por ende tiene doble atenuación, generando mayor dispersión que es la que contribuye al aumento.

La prueba siguiente fue la realización de un perfil longitudinal del haz de radiación, esta prueba habitualmente se realiza con un detector de diodos, que es capaz de obtener información inmediata de cómo se comporta el haz en todo el campo de irradiación. Ahora bien se decidió aplicar una forma alternativa para realizar la construcción de un perfil debido a la no disposición de este detector. Esta consistió en disponer la cámara de ionización paralela al eje transversal del campo, y para obtener este perfil, se comenzó a mover la camilla, irradiando siempre bajo las mismas condiciones, en cada posición de la camilla cuando iba siendo movida. Este método es eficaz ya que permite comparar los valores de perfil obtenidos tanto para el colimador convencional con el MLC, que es el objetivo principal de esta prueba. Ahora debido a la poca cantidad de datos que se pueden obtener, no se puede a través de este método calcular el tamaño de campo y la penumbra generada para ambos lados, debido que a se deben interpolar los datos faltantes, asumiendo la linealidad de esos datos, lo cual es poco preciso el cálculo. Estos perfiles fueron calculados para ambas energías, donde en ambas al realizar la comparación se establecía una variación por debajo de la tolerancia propuesta como se pudo apreciar en los resultados anteriores. En las siguientes imágenes podemos observar los perfiles obtenidos para 6 MV y para 18 MV, comparando en cada uno los valores tanto para el MLC como el Colimador Convencional y ratificando la utilidad de esta prueba ya que se corrobora que las diferencias obtenidas no superan la tolerancia propuesta. Es importante señalar que el tamaño de campo usado fue de $10 \times 10 \text{ cm}^2$, pero la camilla se desplazó más allá de estas distancias, es por eso que en la imagen N°15 y N°16 presentada en los resultados se evidencia una pequeña variación que no supera la tolerancia propuesta aproximadamente dentro del tamaño de campo, pero a medida que se sobrepasa esta diferencia aumenta

considerablemente, ya que ese tamaño de campo cuando es realizado con el MLC, esta doblemente atenuado ya que también se establece una campo con los Colimadores Convencionales, obteniendo una diferencia con respecto al campo solo conformado con los Colimadores Convencionales.

Gráfico N°15. Perfil longitudinal para haz de 6 MV.

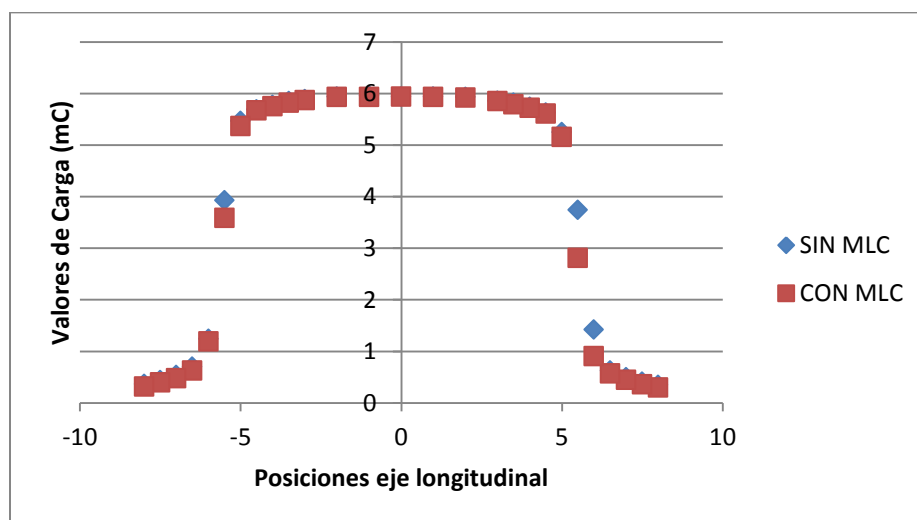
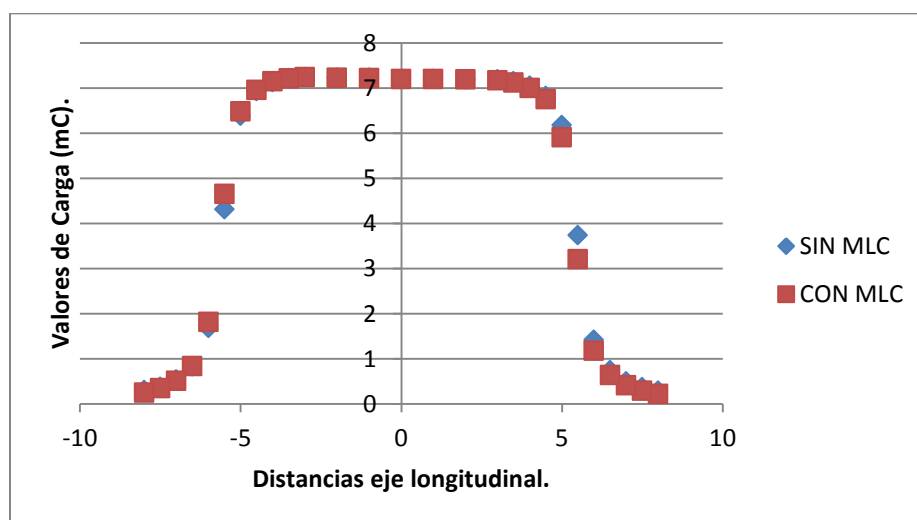


Gráfico N°16. Perfil longitudinal para haz de 18 MV.



Los Factores de Campo también son un parámetro a evaluar importante, ya que son uno de los factores considerados dentro del cálculo de la dosis. Aquí se estableció una comparación entre los valores obtenidos con el MLC y el Colimador Convencional, para distintos tamaños de campo donde la tolerancia propuesta se cumple, pero se evidencia levemente que a medida que disminuye el tamaño de campo mayor es la diferencia entre los factores de campo. Esto se debe a la contribución de la radiación dispersa, que al ser el campo más pequeño es más fácil de detectar por la cámara de ionización.

La última prueba es la de la Transmisión la que puede ser medida por variados métodos, aquí se optó, por un método que da cuenta de la transmisión que se obtiene como promedio de todas las transmisiones que ocurren dentro del sistema. Ya sea interlámina, intralámina y entre bancos opuestos de láminas, es por esto que se dispuso la cámara de ionización en tres posiciones, correspondientes a una zona interlámina y dos zonas bajo una lámina, y siempre bajo la zona entre bancos de láminas. Se utiliza valores de carga (nC) de la cámara de ionización ya que se establece una comparación del campo abierto con el MLC retraído y luego con el MLC cerrado. La transmisión lograda da cuenta de lo propuesto, ya que no supera el 2% siendo lo propuesto un 3%. Como se mencionó existen otros métodos para poder cuantificar la transmisión, pero este método se hace sencillo ya que se puede realizar con los mismos elementos propios del control de calidad de fotones y no demanda un tiempo excesivo.

El cálculo del error absoluto, solo se realizó para algunas pruebas geométricas y esto justificado acorde a:

1-. El tiempo de trabajo del presente estudio se limita solo a cuatro meses, por lo que las pruebas dosimétricas no alcanzaron a ser repetidas en más oportunidades, ya que para calcular el error absoluto específicamente se necesita tener el promedio de una serie de repeticiones.

2-. En el caso de las pruebas de Alineación del MLC con las mandíbulas superiores, no se calcula ya que la tolerancia propuesta no va acorde a un valor verdadero establecido, ya que el indicador es una diferencia matemática que se establece entre los valores obtenidos entre cada medición. Y en el caso de la prueba de repetibilidad, se considera un mejor indicador la reproducibilidad de la posición y esto se puede evaluar solo promediando las desviaciones estándar obtenidas en el tiempo para cada posición, calculada en la discusión.

3-. El no repetir las pruebas dosimétricas, se realizó por dos razones una por el tiempo del estudio y la otra porque lo que se evalúa es una comparación entre lo obtenido mediante los colimadores convencionales y el MLC. Y como el primero se encuentra constantemente monitorizado por parte del chequeo diario y mensual del Programa de Garantía de Calidad del Acelerador Lineal de la Fundación Arturo López Pérez, pareciese ser suficiente para la comparación, el realizar una sola medición.

Pero a pesar de estas justificaciones se propone realizar estas pruebas en el tiempo y poder establecer un registro de la variabilidad de estas pruebas en un tiempo determinado.

9.-Conclusiones

1. Todas las pruebas geométricas realizadas verifican que el MLC está perfectamente acoplado al gantry del Equipo, bien centrado y alineado con las mandíbulas del Acelerador Lineal y que las láminas se colocan correctamente en las posiciones predeterminadas.
2. El uso del Software FilmQA Pro 2014 de procesamiento de imágenes facilita el análisis y hace la medición más precisa en comparación con la medición manual.
3. Los factores de campo, los rendimientos en profundidad, los perfiles obtenidos con el MLC, no representan diferencias importantes respecto de los valores obtenidos con las mandíbulas propias del acelerador.
4. Con el fin de asegurar en el tiempo, la constancia de estos parámetros que definen el estado de referencia inicial de un MLC a lo largo de la vida útil de funcionamiento, es que se propone un programa de Garantía de Calidad con pruebas, tolerancia y frecuencia, acordes al costo, viabilidad y tiempo. En la tabla N°19 se propone un resumen del programa.
5. El estudio presenta las siguientes limitaciones, la más importante es el tiempo, ya que limita la posibilidad de repetición de las pruebas y la posible observación de estas en el tiempo. Otra limitación consiste en que para las pruebas manuales existe solo un observador, el cual presenta un sesgo importante. Y desde el punto de vista

técnico en el caso de las pruebas dosimétricas, los instrumentos utilizados no son los más tecnológicos, lo que limita la cantidad de información obtenida en las pruebas de rendimiento en profundidad y construcción de perfiles. Aún se con lo realizado se puede obtener información necesaria para cumplir los objetivos del presenta trabajo de investigación, así como monitorizar las condiciones de calidad en las que se encuentra este.

Tabla N°19. Resumen de pruebas, tolerancias, y perioricidad para el Programa de Garantía de calidad Propuesto.

Prueba	Tolerancia	Perioricidad
1.1 Alineación de los ejes de Radiación y Luminoso del MLC con eje Mecánico del Colimador.	2 mm	Semestral
1.2 Alineación de los ejes de Radiación y Luminoso del MLC con el eje mecánico del Brazo.	2 mm	Semestral
1.3 Alineación del MLC con los Colimadores.	2mm /1 mm*	Semestral
1.4 Posicionamiento de las láminas.	± 1 mm	Mensual/Semestral**
1.5 Repetibilidad en el posicionamiento de las láminas.	± 1 mm	Mensual
1.6 Dispositivo de entrada.	± 1 mm	Semanal
2.1 Rendimiento en Profundidad.	Dif < ± 2%	Semestral
2.2 Perfiles.	Dif < ± 2%	Semestral
2.3 Factores de Campo.	Dif < ± 2%	Semestral
2.4 Transmisión.	< 3%	Semestral

*La primera tolerancia corresponde a la alineación con las mandíbulas inferiores y la segunda a la alineación con las mandíbulas superiores.

** La primera frecuencia es para el procedimiento 1 y la segunda frecuencia es para el procedimiento 2.

Es importante considerar que éstas pruebas han sido realizados en un MLC determinado, del Tipo MilleniumTM 80 de la Marca Varian instalado en una Acelerador Lineal CLINAC VARIAN 21 EX, por ende, de pretender aplicar este programa, deberá ser adaptado acorde al MLC y las características del equipo usado en el servicio de Radioterapia, que decida realizarlo.

10-.REFERENCIAS

1. Ministerio de Salud. Radoterapia Oncológica. Norma General Técnica n° 51. Santiago, Chile: Subsecretaría de Salud Pública, Departamento de Enfermedades No Transmisibles. Unidad de Cáncer; 2011.
2. Departamento de estadísticas e información de salud. [Internet]. Santiago: 2011. Available from: <http://www.deis.cl/estadisticas-de-natalidad-y-mortalidad/>.
3. ICRU. Prescribing, recording and reporting photon beam therapy. Technical Report 50, Bethesda: International Commission on Radiation Units and Measurements, 1993.
4. ICRU. Prescribing, recording and reporting photon beam therapy. Technical Report 62, Bethesda: International Commission on Radiation Units and Measurements, 1999.
5. Biocancer [Internet]. México: Domingo Navarro Bosch; 2004. Available from: <http://www.biocancer.com/journal/222/generalidades-en-oncologia-radioterapica-i-radiobiologia>.
6. Beltrán Vilagran M, Saéz Picó C. Programa de garantía de calidad del equipamiento de radioterapia. Pruebas para un colimador multiláminas. Revista de Física Médica. 2005 Abril; 6(1). p.19.
7. Khan F. The Physics of Radiation Therapy. 3a ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2003. p. 467.
8. Canon GM. Caracterización física y dosimétrica de un sistema DMLC para uso en Radioterapia de Intensidad. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física; 2011. p.20.

9. Podgorsak EB. Radiation Oncology Physics. In IAEA, editor. Radiation Oncology Physics. VIENNA: International Atomic Energy Agency; 2005. p. 123-160.
10. A. Taherkhani. V.Changizi. Evaluation of the physical characteristic of Cerrobend blocks used for radiation therapy. Iranian Journal of Radiation Research. 2010 September; 8(2).
11. Matjaž Jeraj VR. Multileaf collimator in radiotherapy. Radiology and Oncology. 2004; 38(4).
12. Canon GM. Caracterización física y dosimétrica de un sistema DMLC para uso en Radioterapia de Intensidad. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física; 2011. p.27-28.
13. Arthur Boyer, Cedric Yu. Basic Applications of Multileaf Collimators. AAPM Report. American Association of Physicists in Medicine, Radiation Therapy Committee; 2001. Report No.: N° 72.
14. Galvin JM, Smith A, Lally B. Characterization of a multi-leaf collimator system. Int J Radiat Oncol Biol Phys; 1993. p. 92-181.
15. Jun Deng CMM. The MLC tongue-and-groove effect on IMRT dose distributions. Physics in Medicine and Biology. 2001; 46. p.1039–1060.
16. Khan F. The Physics of Radiation Therapy. 3a ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2003. p. 159-177.
17. Khan F. The Physics of Radiation Therapy. 3a ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2003. p .161.
18. OIEA. Aspectos físicos de la garantía de calidad en Radioterapia: Protocolo de Control de Calidad Viena: Sección de Dosimetría, Física Médica y Sección de América Latina; 2000.

19. Beltrán Vilagran M, Saéz Picó C. Programa de garantía de calidad del equipamiento de radioterapia. Pruebas para un colimador multiláminas. Revista de Física Médica. 2005 Abril; 6(1). p.21.
20. OIEA. Determinación de la dosis Absorbida en Radioterapia con haces de Fotones Externos. Colección de Informes Técnicos N° 398. Viena; 2005.
21. Cáceres Luis. Implementación de un protocolo de control de calidad para el tratamiento del paciente específico de radioterapia de intensidad modulada (IMRT) usando la película kodak EDR-2. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Física; Diciembre de 2009.
22. Cephas D Mubata. A quality assurance procedure for the Varian multi-leaf collimator. The Joint Department of Physics, the Royal Marsden NHS Trust and Institute of Cancer Research, Fulham Road. London; Phys. Med. Biol. 42 (1997) 423–431.

Anexo 1

Factores Técnicos y de exposición para cada prueba realizada.

Tabla N°20: Factores Técnicos “Coincidencia de los ejes de radiación y luminoso del MLC con el eje mecánico del colimador en el plano del isocentro del Equipo”. (1)

Energía	6 MV
Ángulo Gantry	0°
Tamaño de Campo. (Y x X)	26 x 1 cm ²
Ángulo Colimador.	0°, 30°, 60° 90°, 120°, 150°, 345°, 315°, 285°, 255°, 225°, 195°.
Tamaño Película Radiográfica.	Kodak EDR2 24 X 30,5. cm ²
Unidades Monitor.	100 UM
Tasa (UM /min)	400
SSD	98 cm

Tabla N°21: Factores Técnicos “Coincidencia de los ejes de radiación y luminoso del MLC con el eje mecánico del colimador en el plano del isocentro del Equipo” (2)

Energía	6 MV
Ángulo Gantry	0°
Tamaño de Campo. (Y x X)	3 x 26 cm ²
Ángulo Colimador.	0°, 45°, 90° 135°, 337°, 293°, 249°, 203°
Tamaño Película Radiográfica.	Kodak EDR2 24 X 30,5. cm ²
Unidades Monitor.	100 UM
Tasa (UM /min)	400
SSD	98 cm

Tabla N°22: Factores Técnicos “Coincidencia de los ejes de radiación y luminoso del MLC con el eje mecánico del Gantry en el plano del isocentro”.

Energía	6 MV
Ángulo Gantry	0°, 30°, 60° 90°, 120°, 150°, 345°, 315°, 285°, 255°, 225°, 195°.
Tamaño de Campo. (Y x X)	26 x 1 cm ²
Ángulo Colimador.	0
Tamaño Película Radiográfica.	Kodak EDR2 24 X 30,5. cm ²
Unidades Monitor.	100
Tasa (UM /min)	500

Tabla N°23: Factores Técnicos “Alineación del MLC con las Mandíbula Inferior Derecha”.

Energía	6 MV
Ángulo Gantry	0°
Tamaño de Campo. (Y x X)	UL/LL (20/20) LW/RW (1/8)
Ángulo Colimador.	0
Tamaño Película Radiográfica.	Kodak EDR2 24 X 30,5. cm ²
Unidades Monitor.	400 UM
Tasa (UM /min)	500
SSD	100 cm

Tabla N°24: Factores Técnicos “Alineación del MLC con las Mandíbula Inferior Izquierda”.

Energía	6 MV
Ángulo Gantry	0°
Tamaño de Campo. (Y x X)	UL/LL (20/20) LW/RW (8/1)
Ángulo Colimador.	0
Tamaño Película Radiográfica.	Kodak EDR2 24 X 30,5. cm ²
Unidades Monitor.	400 UM
Tasa (UM /min)	500
SSD	100 cm

Tabla N°25: Factores Técnicos “Alineación del MLC con las Mandíbulas Superiores”.

Energía	6 MV
Ángulo Gantry	0°
Tamaños de Campo. (Y x X)	29 x 15 cm ²
Ángulo Colimador.	0 °
Tamaño Película Radiográfica.	Kodak EDR2 24 X 30,5. cm ²
Unidades Monitor.	200 UM
Tasa (UM /min)	500
SSD	100 cm

Tabla N° 26: Factores Técnicos “Posicionamiento de Láminas 2”.

Energía	6 MV.
Ángulo Gantry	0°
Tamaño de Campo.	Campo 1 UL/LL (13/13) LW/RW (20/-2)
	Campo 2 UL/LL (13/13) LW/RW (14,9/-2)
	Campo 3 UL/LL (13/13) LW/RW (9,9/-2)
	Campo 4 UL/LL (13/13) LW/RW (4,9/-0,1)
	Campo 5 UL/LL (13/13) LW/RW (-0,1/4,9)
	Campo 6 UL/LL (13/13) LW/RW (-2/9,9)
	Campo 7 UL/LL (13/13) LW/RW (-2/14,9)
	Campo 8 UL/LL (13/13) LW/RW (-2/20)
Ángulo Colimador.	0°
Tamaño Película Radiográfica.	Kodak X OMAT-V x. cm ² .
Unidades Monitor.	400 UM x Campo.
Tasa (UM /min)	500
SSD	90 cm.

Tabla N°27: Factores Técnicos “Rendimientos en Profundidad”.

Energía	6 MV y 18 MV
Ángulo Gantry	0°
Tamaños de Campo. (Y x X)	10 x 10 cm ²
Ángulo Colimador.	0 °
Unidades Monitor.	50 UM
SSD	100 cm
Profundidad de la Cámara	20 cm; 15 cm; 10 cm; 5 cm; 4 cm; 3,5 cm; 3 cm; 2,5 cm; 2 cm; 1,5 cm.

Tabla N° 28: “Perfiles”

Energía	6 MV y 18 MV.
Ángulo Gantry	0°
Tamaños de Campo. (Y x X)	10 x 10 cm ²
Ángulo Colimador.	0 °
Unidades Monitor.	50 UM
SSD	90 cm
Posiciones Longitudinales Cámara	8 cm; 7,5 cm; 7,5 cm; 7 cm; 6,5 cm; 6 cm; 5,5 cm; 5 cm; 4,5 cm; 4 cm; 3,5 cm; 3 cm; 2 cm; 1 cm; 0 cm. -8 cm; -7,5 cm; -7,5 cm; -7 cm; -6,5 cm; -6 cm; -5,5 cm; -5 cm; -4,5 cm; -4 cm; -3,5 cm; -3 cm; -2 cm; -1 cm;

Tabla N°29: Factores Técnicos “Factores de Campo”.

Energía	6 MV
Ángulo Gantry	0°
Tamaños de Campo. (Y x X)	Campo 1 : 4 x 4 cm ² Campo 2: 6 x 6 cm ² Campo 3: 8 x 8 cm ² Campo 4: 10 x 10 cm ² Campo 5: 20 x 20 cm ² Campo 6: 24 x 24 cm ²
Ángulo Colimador.	0 °
Unidades Monitor.	50 UM x Campo
Tasa (UM /min)	400
SSD	90 cm

Tabla N°30: Factores Técnicos “Transmisión”.

Energía	6 MV
Ángulo Gantry	0°
Tamaños de Campo. (Y x X)	10 x 10 cm ²
Ángulo Colimador.	0 °
Unidades Monitor.	300 UM
Tasa (UM /min)	300
SSD	90 cm