



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
LICENCIATURA EN FÍSICA CON MENCIÓN EN FÍSICA MÉDICA**

Puesta en servicio clínico de la unidad de Braquiterapia de alta tasa de dosis con fuente de ^{60}Co SagiNova; en el Centro Nacional de Radioterapia “Nora Astorga” en el periodo de marzo-abril 2018.

Autora: Br. Saray María Medina Mendieta.

Tutor: MSc. Roger E. Portillo Morales.

Asesor: MSc. Francisco J. Hernández Flores.

Managua Nicaragua, junio de 2019.

2. Dedicatoria

A mis padres, Saul y Gema, mi aliento a superar cada meta.

A mis hermanos, los que siguen mis pasos, deseo ser ejemplo de su superación.

A mi familia, que aportan siempre a mi vida.

Bienaventurado el que encuentra sabiduría, el que logra inteligencia, pues es más rentable que la plata, más provechosa que el oro. (Proverbios 3:13-14.)

3. Agradecimientos

A Dios por brindarme sabiduría, perseverancia y fuerzas para poder lograr concluir esta etapa de mi vida.

A mis padres, Saul Medina y Gema Mendieta, por guiarme, apoyarme y acompañarme en todo este proceso, por ser el logro que ellos tanto merecen.

A mi familia por creer en mí y apoyarme en todos los momentos de mi vida.

A mi tutor, MSc. Roger Portillo, por su disposición de compartir sus conocimientos, su total apoyo y comprensión en cada momento.

A mi asesor, MSc. Francisco Hernández, por el apoyo incondicional brindado, su guía y colaboración en todo el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos, por compartir mis logros, creer en mí y apoyarme todo el tiempo.

A todos mis maestros durante el camino universitario, que alimentaron con sus conocimientos mi vida, ya que sin su guía no estaría culminando esta etapa.

A las autoridades del Centro Nacional de Radioterapia "Nora Astorga" por permitirme realizar este estudio y hacer uso de todos sus recursos; de igual forma gracias a todo el personal en el mismo por el apoyo en el proceso.

4. Resumen.

El objetivo del presente trabajo es realizar las pruebas de puesta en servicio clínico a la unidad de Braquiterapia de Alta tasa de Dosis SagiNova con fuente de ^{60}Co , en el Centro Nacional de Radioterapia para el tratamiento de pacientes con cáncer ginecológico; en el cual a inicios del año 2018 se vio en la necesidad de adquirir una unidad de Braquiterapia, para poder tratar a las pacientes que lo necesiten en el país y no tener que enviarlas al exterior; por lo tanto, es necesario realizar las pruebas de aceptación clínica de la unidad para asegurarse que cumpla con las especificaciones establecidas por el proveedor, los estándares de calidad establecidos. Se realizaron un total de 22 pruebas que son tanto de aspectos mecánicos, dosimétricos, y de seguridad; encontrándose buenos resultados, una vez calibrada la fuente de ^{60}Co y determinada la tasa de referencia de Kerma en aire con un error de 1,96% y 2,9% los cuales son menores que el $\pm 5\%$ permitido según el certificado de calibración. Por lo tanto, se concluye que la unidad de Braquiterapia SagiNova se encuentra apta para su uso clínico.

5. Índice

2. Dedicatoria	2
3. Agradecimientos.....	3
4. Resumen.....	4
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas.....	8
Acrónimos	9
Capítulo I.....	10
7. Introducción.....	10
8. Planteamiento del Problema.....	11
9. Justificación.....	12
10. Objetivos.....	13
10.1. Objetivo General	13
10.2. Objetivos Específicos.....	13
Capítulo II.....	14
11. Antecedentes.....	14
12. Marco Teórico	16
12.1. Braquiterapia	16
12.1.1. Tipos de Braquiterapia	16
12.1.1.1. Braquiterapia Intracavitaria	16
12.1.1.2. Braquiterapia Intersticial.....	16
12.1.1.3. Braquiterapia Superficial	16
12.1.1.4. Según la tasa de dosis:	17
12.2. Fuentes Radiactivas para Braquiterapia	17
12.2.1. Iridio 192 (^{192}Ir).....	17
12.2.2. Cobalto 60 (^{60}Co)	18
12.3. Calibración de fuente de Braquiterapia.....	19
12.3.1. Especificación de la intensidad de la fuente.....	20
12.3.2. Calibración utilizando cámara de ionización de pozo.....	20
12.3.3. Calibración utilizando técnicas de medidas en aire.....	23
12.4. Unidad de carga diferida SagiNova.	27
12.4.1. Unidad de administración de tratamiento (TDU).....	27
12.4.2. Unidad de control de tratamiento (TCU).....	30

12.5.	Aplicadores.....	31
12.5.1.	Controles de calidad de los aplicadores.....	32
12.6.	Vigilancia Radiológica.....	33
13.	Hipótesis	35
Capítulo III	36
14.	Diseño y Experimentación.....	36
14.1.	Materiales.....	36
14.2.	Método.	37
Capítulo IV	56
15.	Resultados.....	56
16.	Análisis y Discusión.	75
17.	Conclusiones.....	79
18.	Recomendaciones.	81
19.	Bibliografía.....	82
20.	Anexos I.....	83

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema decaimiento energético del ^{192}Ir .	18
Figura 2. Esquema fuente Iridio 192.	18
Figura 3. Esquema decaimiento energético ^{60}Co .	18
Figura 4. Esquema fuente de Cobalto 60 por E&Z BEBIG modelo Co0.A86.	19
Figura 5. Diagrama cámara de pozo TW 33005.	21
Figura 6. Carga normalizada versus posición pausada de la fuente en una cámara de ionización de pozo.	22
Figura 7. Diagrama cámara Farmer 30013.	24
Figura 8. Unidad de administración de tratamiento.	28
Figura 9. Vista frontal Unidad de administración de tratamiento.	28
Figura 10. Vista trasera Unidad de administración de tratamiento.	29
Figura 11. Vista lateral Unidad de administración de tratamiento.	29
Figura 12. Panel de control de tratamiento (TCP).	30
Figura 13. Consola de control de tratamiento (TCC).	31
Figura 14. (a) Cilindro vaginal. (b) Cilindro vaginal segmentado.	31
Figura 15. Aplicador fletcher.	32
Figura 16. Aplicador Tándem + anillo.	32
Figura 17. Accionamiento botón parada de emergencia.	39
Figura 18. Posicionamiento llaves en la consola.	40
Figura 19. Monitor de radiación de sala de tratamiento.	41
Figura 20. Indicador salida de la fuente.	42
Figura 21. Verificación sistema de enclavamiento de la puerta.	43
Figura 22. Ilustración zonas de medición para monitoreo de área.	44
Figura 23. Radiación de fuga.	45
Figura 24. Sistema video vigilancia.	46
Figura 25. Sistema de intercomunicación.	46
Figura 26. Error selección de canal de tratamiento.	47
Figura 27. Manivela retorno manual de la fuente.	48
Figura 28. Verificación tubos de transferencia.	49
Figura 29. Visualización aplicadores.	49
Figura 30. Posicionamiento de la fuente, a) Método autorradiográfico, b) y c) método óptico.	51
Figura 31. Montaje punto de máxima eficiencia en cámara de pozo.	52
Figura 33. Medición tasa de referencia Kerma en aire mediante cámara Farmer.	54
Figura 32. Medición tasa de referencia Kerma en aire mediante cámara de pozo.	54
Figura 34. Método para verificar tip-distance.	55
Figura 35. Tabla desintegración fuente	60
Figura 36. Análisis de película posicionamiento de la fuente usando ImageJ	61
Figura 37. Análisis de película aplicador intrauterino usando ImageJ	69
Figura 38. Análisis película aplicador vaginal utilizando ImageJ.	69

Lista de Tablas

Tabla 1. Especificación de fuente ^{60}Co en unidad SagiNova.	27
Tabla 2. Tipos de pruebas experimentales.....	38
Tabla 3. Pruebas de seguridad	56
Tabla 4. Monitoreo de área.....	57
Tabla 5. Consideraciones para tasa de dosis anual.....	58
Tabla 6. Resultado monitoreo de área.....	59
Tabla 7. Pruebas mecánicas.....	59
Tabla 8. Pruebas posicionamiento óptico.....	61
Tabla 9. Resultado posicionamiento mediante método autorradiográfico.....	61
Tabla 10. Pruebas Dosimétricas.....	62
Tabla 11. Resultados de las mediciones para la determinación del punto de máxima eficiencia de la cámara de pozo.....	62
Tabla 12. Valores utilizados en las condiciones de medición.....	64
Tabla 13. Mediciones tomadas con HV 100% (400 Volt)	65
Tabla 14. Mediciones tomadas con HV 50% (200 Volt).....	65
Tabla 15. Tasa de referencia de Kerma en aire.....	65
Tabla 16. Valores utilizados en las condiciones de medición.....	65
Tabla 17. Resultado de promedio de mediciones por cada distancia entre fuente-cámara.....	66
Tabla 18. Corrección por la atenuación de los fotones primeros en aire (K_{air}) para fuente de Braquiterapia de ^{60}Co . Fuente: Tomado de TECDOC 1274, Tabla XI.....	66
Tabla 19. Factores de corrección por no-uniformidad (K_n) para cámaras de ionización tipo Farmer (radio interno 3.15 mm, longitud 24.1 mm). Fuente: Tomado de TECDOC 1274, Tabla IX.....	66
Tabla 20. Tasa de referencia de Kerma en aire para cada distancia utilizada.....	67
Tabla 21. Tasa de referencia Kerma en aire mediante método con cámara tipo Farmer.....	67
Tabla 22. Comparación de tasas de referencia de Kerma en aire medidas respecto a la reportada como referencia.....	67
Tabla 23. Comparación de los resultados obtenidos en método con Cámara de Pozo y Cámara Farmer.....	67
Tabla 24. Dependencia del tiempo de exposición y la carga colectada.....	68
Tabla 25. Resultados obtenidos tip-distance utilizando ImageJ.....	69
Tabla 26. Incertidumbres para distancia Fuente-Cámara= 0,05m.....	70
Tabla 27. Incertidumbres para distancia Fuente-Cámara= 0,10m.....	71
Tabla 28. Incertidumbres para distancia Fuente-Cámara= 0,15m.....	71
Tabla 29. Incertidumbres para distancia Fuente-Cámara= 0,2m.....	71
Tabla 30. Incertidumbres para distancia Fuente-Cámara= 0,25m.....	72
Tabla 31. Incertidumbres de medidas tomadas a HV 100%.....	72
Tabla 32. Incertidumbres de medidas tomadas a HV 50%.....	73

Acrónimos

d Distancia medida.

dref Distancia referencia 1m.

K_{air} Factor de corrección por atenuación de los fotones primarios por el aire entre la fuente y la cámara.

K_n Factor de corrección por no-uniformidad.

K_r Tasa de referencia de Kerma en aire.

K_{recom} Corrección por recombinación.

K_{scatt} Corrección por la radiación dispersa por las paredes, el piso, el arreglo de la medición, el aire.

K_{TP} Corrección por densidad del aire (Temperatura y presión).

M_u Carga colectada durante un tiempo t y corregida por presión y temperatura.

N_{elec} Factor de calibración del electrómetro.

N_k Factor de calibración de Kerma en aire de la cámara de ionización a esa energía de fotones.

N_{kr} Factor de calibración de tasa de Kerma en aire de la cámara de pozo.


Q Carga.

TCC Consola de control de tratamiento.

TDU Unidad de administración de tratamiento.

TCP Panel de control de tratamiento.

TOE Trabajador ocupacionalmente expuesto.

 Posición de llaves en la consola que permite la salida de la fuente.

Capítulo I

7. Introducción.

El Centro Nacional de Radioterapia Nora Astorga, es el único centro hospitalario del país que cuenta con servicios de tratamientos radioterapéuticos para la asistencia de padecimientos oncológicos, desde el inicio de sus actividades en el año 1992. Se cuenta con dos equipos de cobaltoterapia para tratamientos de radiación externa, a su vez con sistemas de planificación de tratamientos, equipos para realizar controles de calidad y dosimetría de los haces; hasta septiembre del año 2017 se contaba con una unidad para tratamientos mediante fuentes radiactivas encapsuladas colocadas en el interior de las cavidades, denominada braquiterapia de alta tasa de dosis utilizando fuente de Iridio 192 (^{192}Ir).

Debido a la situación económica de nuestro país y con el objetivo de ofrecer a los pacientes el tratamiento óptimo se adquirió una unidad de braquiterapia con fuente de Cobalto 60 (^{60}Co), lo cual viene a reducir los costos de envío y recambios de fuentes en braquiterapia, ya que el tiempo de semivida de este radio isotopo es de 5.27 años en cambio el tiempo de semivida del ^{192}Ir es de 74 días, lo que significa que durante el periodo de cinco años se realizarían aproximadamente 20 intercambios de fuente de ^{192}Ir , ya que en un tiempo de vida media del ^{60}Co existen aproximadamente 24.7 vidas medias del ^{192}Ir .

La puesta en servicio clínico de la unidad de braquiterapia de alta tasa de dosis con fuente de ^{60}Co consiste en realizar pruebas de aceptación clínica de la unidad de braquiterapia para asegurarse que cumpla con las especificaciones establecidas por el proveedor, los estándares de calidad de acuerdo a la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en ingles), y los acápites establecidos en las Guías para la implementación del reglamento técnico de protección contra las radiaciones ionizantes en la práctica de la radioterapia (CONEA, MINSA); de igual manera, durante este procedimiento se realizan las respectivas mediciones dosimétricas y reportes de control de calidad de dicha unidad.

El presente trabajo monográfico describirá en detalle el desarrollo de las actividades para llevar a cabo la puesta en servicio clínica de la unidad de braquiterapia SagiNova. En donde se evaluarán las pruebas de seguridad, mecánicas y dosimétricas empleando métodos usados en los protocolos del IAEA TECDOC-1151 [9] y TECDOC-1274s [10].

8. Planteamiento del Problema

En el último trimestre del año 2017 el Centro Nacional de Radioterapia se quedó sin el ingreso de fuentes de ^{192}Ir para tratamientos de braquiterapia de alta tasa de dosis; lo que generó la necesidad de enviar pacientes (72 pacientes) por medio del seguro social a El Salvador, Guatemala y República Dominicana. No obstante, a la necesidad de tratar pacientes en el país y reducir los costos de envíos de los mismos y pago de tratamientos en el extranjero, el Ministerio de Salud a inicios del año 2018 se vio en la necesidad de adquirir una unidad de Braquiterapia SagiNova con fuente de ^{60}Co ; la cual se requiere poner en servicio clínico para tratamientos de braquiterapia ginecológica en el Centro Nacional de Radioterapia “Nora Astorga”.

¿La puesta en servicio clínico de la unidad de braquiterapia SagiNova cumplirá con las exigencias y necesidades de nuestro país? ¿Se obtendrán valores de tolerancia adecuados en las pruebas de aceptación según los protocolos internacionales; la incertidumbre obtenida una vez calibrada la fuente de ^{60}Co será menor respecto los valores reportados en el certificado de calibración de la fuente por el fabricante?

9. Justificación

La braquiterapia como tratamiento terapéutico busca principalmente administrar dosis altas de radiación al tumor, con dosis bajas a los tejidos sanos y órganos de riesgo a su alrededor y en menor tiempo que el tratamiento de radioterapia externa, disminuyendo la afectación a órganos de riesgo, ya que concentra la mayor dosis de radiación en la zona del tumor. Debido a la alta incidencia de cáncer ginecológico en Nicaragua, el ministerio de salud se vio en la obligación de adquirir una nueva unidad de braquiterapia.

El desarrollo de este trabajo monográfico es factible ya que se cuenta con la unidad y equipo necesario para realizar las mediciones y con documentación de referencia para sustentar las bases teóricas y experimentales. La aceptación de la unidad de braquiterapia es comprobar que cumple con la especificación establecida por el proveedor, así como con los estándares de seguridad y dosimétricos. La importancia del mismo está en que al utilizar una fuente de ^{60}Co que administra altas dosis a proximidad del tumor y también debido al semiperiodo del ^{60}Co , la fuente puede ser utilizada hasta por 5 años, que en nuestro país resulta de suma importancia debido a la exigencia de tratamiento y poco presupuesto de inversión a recambio de fuente en menor tiempo.

La puesta en servicio clínico de la unidad de braquiterapia a alta tasa de dosis con fuente de ^{60}Co ayudará a contribuir directamente al tratamiento de cáncer en nuestro país, beneficiando a la población que requiera tratamiento de braquiterapia como complementación a radioterapia externa; también es la primera unidad en el país con este tipo de características utilizando fuente de ^{60}Co .

10.Objetivos

10.1. Objetivo General:

- Efectuar las pruebas de puesta en servicio clínico a la unidad de Braquiterapia de Alta tasa de Dosis SagiNova con fuente de ^{60}Co , en el Centro Nacional de Radioterapia para el tratamiento de pacientes con cáncer ginecológico.

10.2. Objetivos Específicos:

- Realizar pruebas de aceptación para la unidad de Braquiterapia: seguridad, emergencia, mecánicas y dosimétricas.
- Verificar la posición de la fuente ^{60}Co mediante película radiocrómica y cámara para posicionamiento óptico.
- Determinar la Tasa de Referencia de Kerma en Aire (K_r) usando cámara tipo Farmer y cámara de pozo.
- Comparar los resultados obtenidos en método con Cámara de Pozo y Cámara Farmer.
- Verificar la distancia de la punta de los aplicadores a la primera posición de la fuente usando películas Radiocrómicas.

Capítulo II

11. Antecedentes

(Velasco Vázquez & Rivera Montalvo , 2008) [17] en su artículo titulado “Calibración de una Fuente de Iridio-192, Requisito para la Garantía de Calidad en Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis”. Presentan los resultados de mediciones experimentales de la actividad de diferentes fuentes de radiación de ^{192}Ir utilizadas en tratamientos de braquiterapia de alta tasa de dosis; estos resultados fueron comparados con los valores presentados por el fabricante para la actividad de las fuentes de radiación de ^{192}Ir ; en esta comparación se observó que los valores de actividad declarados por el fabricante contra los medidos presentan porcentajes de error que se encuentran por debajo de $\pm 3\%$, cumpliendo con los valores de tolerancia recomendado por el Grupo de Tarea 40 de la Asociación Americana de Físicos en Medicina (AAPM) [17].

En el artículo titulado “Co-60 frente a Ir-192 en braquiterapia de alta tasa de dosis: comparación científica y técnica” (Andrássy, Niatsetsky, & Pérez, 2012) [2] en el cual se realizó un debate acerca de ventajas y desventajas de utilizar una fuente u otra, basándose en sus características geométricas, energéticas, dosimétricas, entre otras, se llegaron a conclusiones tales como; que ambas fuentes originan distribuciones de dosis similares dentro del volumen de tratamiento por lo que las herramientas de optimización y de planificación inversa proporcionan resultados similares, por lo tanto una de las ventajas clínicas y económicas del Co-60 es que se logra el mismo rendimiento que con Ir-192.

(Palmer , PHayman , & et Al. , 2016) [12] en su artículo “Puesta en servicio y control de calidad del nuevo sistema de tratamiento Saginova HDR; Primer año de experiencia en el Reino Unido y Alemania” trabajo que fue desarrollado en dos centros, en Inglaterra y Alemania, implementando un cronograma completo de pruebas de puesta en servicio y control de calidad de un nuevo sistema de tratamiento de braquiterapia HDR, unidad de tratamiento SagiNova y sistema de planificación SagiPlan (Eckert & Ziegler Bebig GmbH), con fuentes de ^{60}Co , en este se obtuvieron de los dos centros, resultados con un rendimiento satisfactorio en todas las pruebas, todos dentro de los límites de aceptación para uso clínico.

“Informe De Aceptación Y Puesta En Servicio Equipo: MICROSELECTRON HDR v2” (Morales López, Peña Sequeira, & Et Al., 2010)[8]. Este documento aborda el proceso que se realizó como actualización de la puesta en servicio clínico de la unidad y del TPS Genie instalado en el Centro Nacional de Radioterapia “Nora Astorga” diseñada para operar con una fuente radiactiva de ^{192}Ir ; se realizaron pruebas electromecánicas y dosimétricas de la unidad, las cuales fueron realizadas con el cambio de fuente número 13, dichos resultados se encontraron dentro de los límites de aceptación, por lo cual se concluyó que la unidad de tratamiento microSelectron HDR Genie era aceptada para el uso clínico de los pacientes con Braquiterapia de alta tasa de dosis.

De acuerdo a lo antes mencionado hasta el año 2010 existe un registro de proceso de puesta en servicio clínico de la unidad de braquiterapia existente en el país. Sin embargo, en el año 2006 se realizó la puesta en servicio clínico de esta primera unidad de braquiterapia a alta tasa de dosis, pero no cuenta con documentación física de dicha puesta en servicio; Por lo tanto, la realización de puesta en servicio de la nueva unidad de braquiterapia contribuiría no solamente al servicio de terapia, sino también a ser un aporte procedimental científico de los nuevos profesionales que se están forjando en el país.

12.Marco Teórico

12.1. Braquiterapia

La braquiterapia es un método de tratamiento en el que se utilizan fuentes radiactivas selladas para administrar radiación a corta distancia mediante diferentes aplicaciones. Con este modo de terapia, se puede administrar una alta dosis de radiación localmente al tumor con una rápida disminución de la dosis en el tejido normal circundante. (Khan, 2010) [7]

En braquiterapia las fuentes pueden insertarse directamente o situarse dentro de guías o aplicadores; estos son de formas muy diversas con objeto de que la disposición final se adapte de manera adecuada a la anatomía y produzca la distribución de dosis buscada; también se denomina “Sistema de carga” a la forma en la que se sitúan las fuentes en el paciente, que puede ser Inmediata o Diferida.

12.1.1. Tipos de Braquiterapia

Existen múltiples formas de administración de braquiterapia, entre ellas según la vía de acceso al volumen a tratar:

12.1.1.1. Braquiterapia Intracavitaria

La técnica intracavitaria implica colocar fuentes radiactivas en aplicadores que se colocan en el interior de las cavidades corporales. Esto se usa comúnmente para el tratamiento de tumores ginecológicos donde el material radiactivo se puede colocar en la cavidad uterina y la vagina.

12.1.1.2. Braquiterapia Intersticial

La técnica intersticial consiste en colocar las fuentes radiactivas selladas dentro del tejido. Utilizada en los implantes de cerebro, de tumores de partes blandas.

12.1.1.3. Braquiterapia Superficial

En esta técnica el material radiactivo se coloca en contacto con la superficie del tumor o lesión que se desea tratar. Es utilizada en el tratamiento de tumores cutáneos (cáncer de piel).

12.1.1.4. Según la tasa de dosis:

12.1.1.4.1. Baja tasa de dosis

Esta es la tasa de dosis empleada para la braquiterapia permanente y manual postcarga, ya que la intensidad con que la radiación es liberada es por un tiempo prolongado, en un rango de tasa de dosis de 0.4-2 Gy/h.

12.1.1.4.2. Media tasa de dosis

Es la tasa de dosis intermedia, no es utilizada a menudo ya que resulta ser excesiva para implantes permanentes y no proporciona los mismos resultados que la técnica a alta tasa de dosis; 2-12 Gy/h es la tasa con la que la radiación es liberada en esta técnica.

12.1.1.4.3. Alta tasa de dosis

En alta tasa de dosis se utilizan fuentes de actividad muy alta, lo que la asocia a altas tasas de dosis que están en el rango mayor a 12 Gy/h; La tasa de dosis en los sistemas de braquiterapia disponible comercialmente se encuentran en el rango de 100-300 Gy/h lo que permite que los tratamientos se den en pocos minutos. Se requiere que el tratamiento se administre mediante técnicas de carga diferida en lugar de carga manual.

12.2. Fuentes Radiactivas para Braquiterapia

Existen numerosas fuentes utilizadas en braquiterapia, en el presente solo se detallarán las utilizadas para braquiterapia a alta tasa de dosis.

12.2.1. Iridio 192 (^{192}Ir)

El ^{192}Ir decae 95.35% por emisión β a una forma metaestable de Platino-192 y, de ésta, por emisión γ a la forma estable del isótopo (Platino-192); el 4.65% restante de las transiciones del Iridio-192 ocurre por captura electrónica a un estado metaestable de Osmio-192 (Ver fig. 1) lo que trae en consecuencia cascadas de rayos X característicos, su periodo de semidesintegración de 74 días; el espectro del Ir-192 se caracteriza por tener una energía media de 0.355 MeV. Permite obtenerse con intensidades específicas muy elevadas, lo que significa que una fuente muy pequeña puede proporcionar tasas de dosis muy altas. (Ver fig. 2). (Khan, 2010) [7]

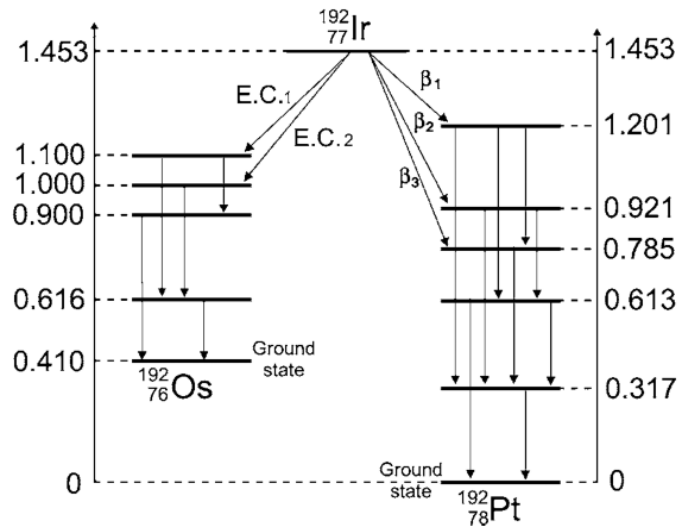


Figura 1. Esquema decaimiento energético del ^{192}Ir . Fuente: E.B.Podgorsak. Radiation Physics for Medical Physicists

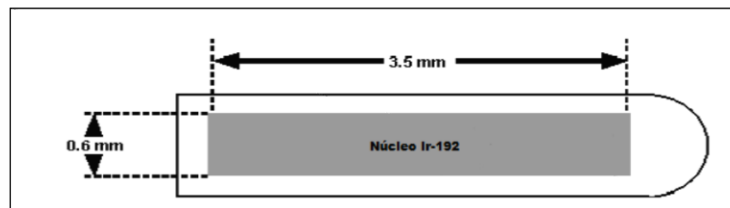


Figura 2. Esquema fuente Iridio 192. Fuente: OIEA, Seguridad Radiológica en Braquiterapia.

12.2.2. Cobalto 60 (^{60}Co)

Cobalto 60 con un periodo de semidesintegración de 5,27 años, se caracteriza por emisión β con una probabilidad de diferentes energías (0.32 MeV y 1.48 MeV), por consiguiente los estados excitados liberan su energía mediante emisión γ (1.173 MeV y 1.332 MeV) para la transición al estado fundamental del nucleído ^{60}Ni (Ver fig.3). Una recién mejoría es que la fuente de ^{60}Co con actividad específica aumentada ha llegado a facilitar el diseño de fuentes miniaturizadas similares a las fuentes convencionales de ^{192}Ir , que permiten la fabricación de pequeñas fuentes requeridas para algunos especiales aplicadores (Ver fig. 4).

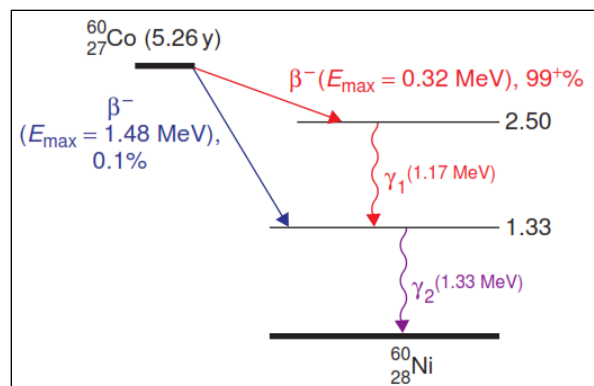


Figura 3. Esquema decaimiento energético ^{60}Co . Fuente: (Khan, 2010)

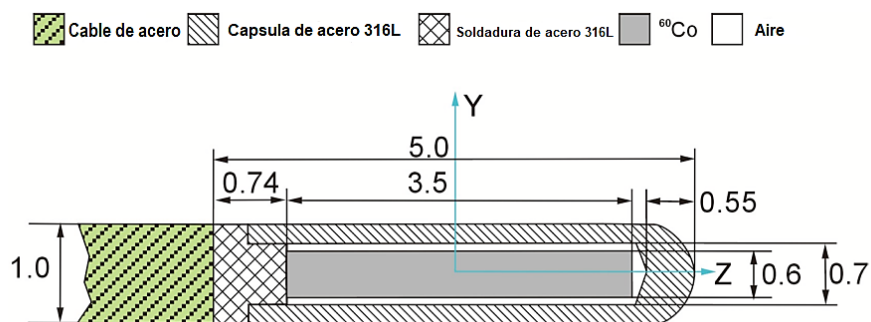


Figura 4. Esquema fuente de Cobalto 60 por E&Z BEBIG modelo Co0.A86. Fuente: ESTRO. *Dose Calculation for Photon-Emitting Brachytherapy Sources with Average Energy Higher than 50 keV: Full Report of the AAPM and ESTRO, AAPM (2012).*

12.3. Calibración de fuente de Braquiterapia.

Recomendaciones internacionales tales como las descritas en TECDOC 1274s [10], TECDOC 1151 [9], y Booklet N°8 [6] indican la necesidad de una verificación de la Tasa de referencia de Kerma en aire de las fuentes previa a su aplicación a los pacientes. Aunque los suministradores comerciales de fuentes de braquiterapia ofrecen siempre una medida de la intensidad de las mismas, no se debe confiar solamente en este valor para la realización de los cálculos de dosis en los pacientes. Cada institución que cuente con un servicio de braquiterapia debe poseer la capacidad de verificar independientemente la intensidad de las fuentes que posea.

Para realizar las verificaciones es necesario utilizar cámaras de ionización que mantengan propiedades como precisión, exactitud, linealidad, tanto como físicas. La precisión en la medida especifica la reproducibilidad de esta sobre similares condiciones y pueden ser estimadas de los datos obtenidos en repetidas medidas. La alta precisión está asociada con una pequeña desviación estándar de la distribución de los resultados medidos.

La exactitud de las medidas dosimétricas es la proximidad de su valor esperado al valor real de la cantidad medida. Los resultados de las medidas no pueden ser absolutamente exactos y la inexactitud de una medida resulta caracterizada como “incertidumbre”. La incertidumbre

es un parámetro que describe la dispersión de la medida del valor de una cantidad; esto es evaluado por métodos estadísticos.[15]

El error de la medida es la diferencia entre el valor medido de una cantidad y el valor real de esa cantidad. Un error tiene un valor numérico y un signo. Típicamente, las medidas erróneas no son conocidas exactamente, pero estas son estimadas en la mejor forma posible, compensando las correcciones, después de aplicar todas las correcciones conocidas, el valor esperado para los errores puede ser cero y la única cantidad concerniente es la incerteza.[15]

12.3.1. Especificación de la intensidad de la fuente

Para la caracterización de la intensidad de las fuentes de braquiterapia se recomienda emplear la magnitud Intensidad de Kerma en Aire, definida como el producto de la Tasa de Kerma en Aire en el seno de aire y el cuadrado de la distancia entre el punto de calibración y el centro de la fuente en el eje bisector de la misma. Se simboliza como S_K y sus unidades son:

$$[S_K] = \text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1} \text{ o } \text{cGy}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1} [9]$$

Esta magnitud es numéricamente igual a la Tasa de Referencia de Kerma en Aire (K_r), aunque difiere por definición de esta última en que S_K puede ser determinada a cualquier distancia donde la fuente pueda ser considerada puntual, mientras que K_r se define específicamente a un metro. Para fuentes lineales tipo alambres o cadenas de semillas de ^{192}Ir se suele emplear la magnitud Intensidad Lineal de Kerma en Aire, definida como la S_K por unidad de longitud de la fuente. [9]

En TECDOC 1274s [10] y TECDOC 1151 [9], se describen los métodos de calibración para fuentes de braquiterapia. Es una estandarización que define los requisitos de los equipos de medición de dispositivos y los pasos para determinar la actividad en términos de intensidad de Kerma en el aire de las diferentes fuentes utilizadas en la braquiterapia; en el presente trabajo se mostrara el procedimiento de calibración para una fuente de ^{60}Co .

12.3.2. Calibración utilizando cámara de ionización de pozo.

Los detectores de pozo (ver fig. 5) son dispositivos que presentan una geometría cilíndrica y constan básicamente de una cavidad central, un electrodo colector y un volumen de aire,

abierto o cerrado, que rodea esta cavidad. En estos detectores, la medida se realiza por comparación de las lecturas producidas por la fuente que se pretende calibrar y por una fuente patrón de la que se conoce la tasa de referencia de kerma en aire (K_R), en este caso los datos proporcionados por el fabricante. Ambas fuentes deben ser idénticas en cuanto a construcción y se deben colocar exactamente en la misma posición dentro del detector.

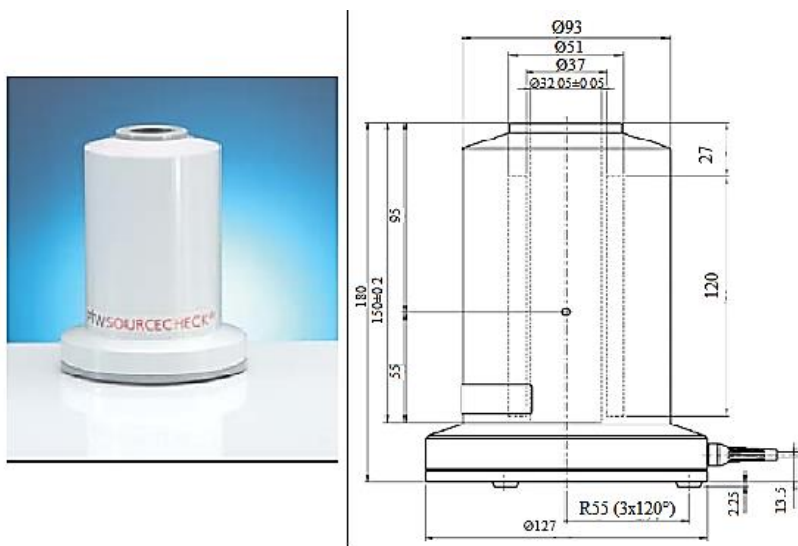


Figura 5. Diagrama cámara de pozo TW 33005. Fuente: PTW, Ionizing Radiation, Detectors.

La cámara de pozo es recomendable para uso clínico porque es sencilla y rápida de usar y tiene una geometría altamente reproducible con lo que se aumenta la precisión de la medida.

Mediante método TECDOC 1274s [10]

- Punto de calibración en el interior de la cámara de pozo.

El punto de calibración de una cámara de pozo está definido como el punto en el cual se coloca el centro de la fuente durante el procedimiento de calibración, véase figura 6; este punto puede diferir de una fuente a otra dependiendo de la longitud de la fuente. Algunas cámaras tienen un espaciador fijo, no removible en el pozo y la fuente se coloca convenientemente encima del espaciador. Otros modelos, por otro lado, tienen un mecanismo para mover y fijar el dispositivo que sostiene la fuente a diferentes alturas y la fuente es entonces colocada en el extremo inferior del sostenedor móvil durante el procedimiento de calibración.

En el certificado de calibración de la cámara se proporciona las condiciones recomendadas para utilizar la cámara, de igual forma los valores de corrección para los diferentes aplicadores que podrían ser utilizados. En el caso de la fuente a calibrar, el modelo y las dimensiones son proporcionados por el fabricante de la fuente.

Para cámaras que sean idénticas a la cámara de pozo estándar del OIEA, el punto de calibración es con la fuente en la posición de respuesta máxima. Con la fuente colocada en este punto, se minimiza la incertidumbre en el Kerma de referencia en aire, debido a la incertidumbre en la posición. Esta posición es dependiente del tipo de fuente y debe ser determinada antes de la calibración. Las medidas son realizadas en diferentes posiciones de la fuente a lo largo del eje de la cámara, insertando un aplicador de longitud conocida y programando posiciones de parada determinadas según el usuario.

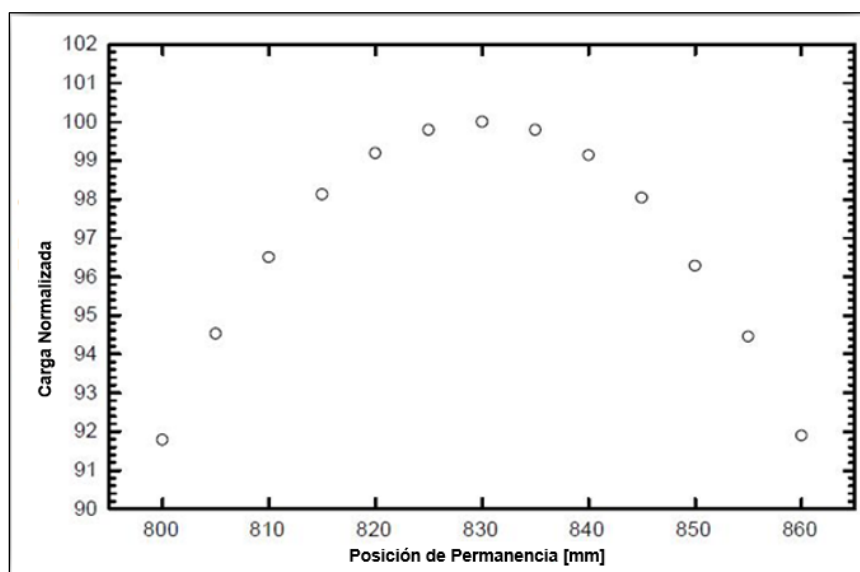


Figura 6. Carga normalizada versus posición pausada de la fuente en una cámara de ionización de pozo. Fuente: OIEA, Tecdoc 1274.

- Correcciones de las medidas.

La corrección por recombinación, k_{recom} , puede determinarse usando la técnica de dos voltajes. Si la relación de voltajes usada en esta técnica es exactamente 2 (por ejemplo si se usa 150V y 300V como es el caso a menudo con cámaras de pozo) entonces la corrección por recombinación puede determinarse:

$$\frac{1}{K_{recom}} = \frac{4}{3} - \left[\frac{Q_1}{(3 \cdot Q_2)} \right] \quad \text{Ecuación (1)}$$

donde Q_1 es la carga colectada con el voltaje más alto y Q_2 al voltaje más bajo. Las cámaras de buena calidad generalmente exhiben efectos por recombinación despreciables para fuentes de braquiterapia.

Las correcciones por la densidad del aire (temperatura y presión) se calculan de acuerdo a:

$$K_{Tp} = \frac{(273,15 + T)}{(273,15 + T_0)} \cdot \frac{101,3}{p} \quad \text{Ecuación (2)}$$

donde T es la temperatura en Celsius y p es la presión en kPa y T_0 es la temperatura de referencia para la calibración (usualmente 20°C). Si el electrómetro ha sido calibrado separadamente, debe aplicarse el factor de calibración del electrómetro, N_{elec} , de lo contrario N_{elec} toma el valor de la unidad.

Para la determinación de la tasa de referencia de kerma en aire (K_R) se emplea la siguiente ecuación:

$$K_R = M_u \cdot K_{TP} \cdot K_{recom} \cdot N_{elec} \cdot N_{Kr} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde

K_R es la tasa de referencia de kerma en aire de la fuente y M_u es la lectura unitaria de la escala, y K_{TP} , K_{recom} y N_{elec} son correcciones por la temperatura y presión, las pérdidas por recombinación y el factor de calibración del electrómetro, respectivamente.

N_{Kr} factor de calibración de tasa de kerma en aire de la cámara de pozo.

Si la cámara y el electrómetro están calibrados como un sistema, entonces N_{elec} es considerado la unidad.

12.3.3. Calibración utilizando técnicas de medidas en aire.

La configuración para una calibración mediante técnica de medida en aire se debe considerar que la fuente tiene que ser insertada en un tubo de transferencia o un catéter que normalmente

se utilice en los tratamientos de braquiterapia, de esta manera la intensidad de la fuente medida incluye el efecto de la atenuación de la radiación resultante de la pared del tubo de transferencia o catéter.

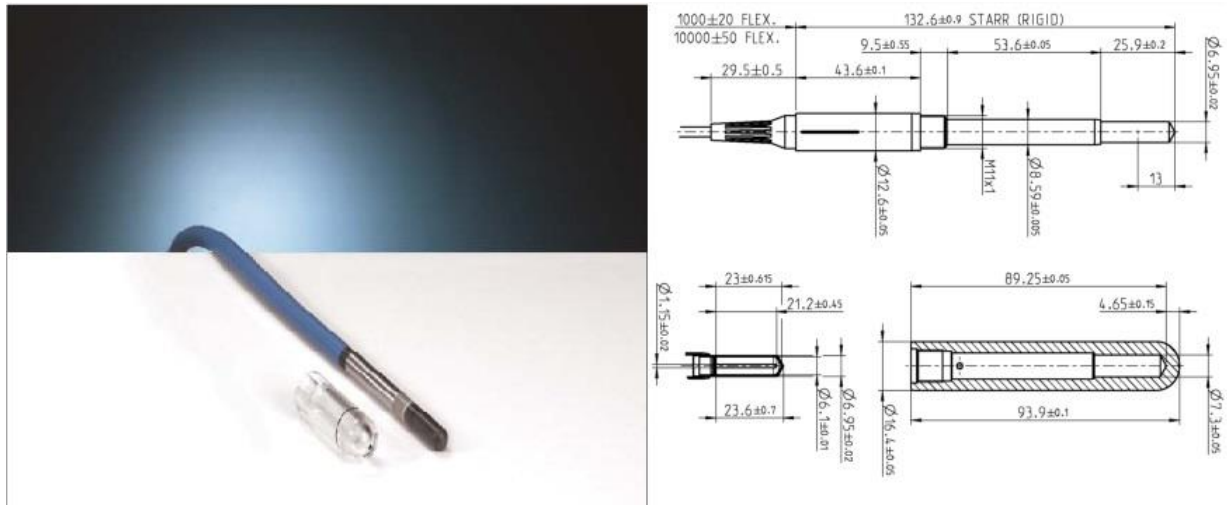


Figura 7. Diagrama cámara Farmer 30013. Fuente: PTW, Ionizing Radiation, Detectors.

Mediante método TECDOC 1151 [9]

La medición con este método debe llevarse a cabo en el seno de aire, a una distancia entre la fuente y la cámara de ionización en la cual ambas puedan considerarse aproximadamente puntuales. La cámara debe colocarse de forma tal que el eje longitudinal de ésta se halle perpendicular a la bisectriz entre el centro de la fuente y el centro de la cámara. Es recomendable emplear cámaras con volumen sensible entre 0,1-1 cm³, como pueden ser las cámaras Farmer.

Si la cámara a utilizar es de 1 cm³ de volumen sensible la distancia d (fuente-cámara) puede ser 10 cm; el rango útil puede ser de 10-20 cm, con un óptimo alrededor de 15 cm, ya que según las recomendaciones esta será generalmente la distancia donde los distintos factores de corrección, cuando se combinan en cuadratura, tienen un valor mínimo. En general, el rango de distancias debe garantizar que la fuente pueda considerarse aproximadamente puntual con una desviación de la ley 1/d² menor de 0,5%, por lo que se recomienda que la distancia fuente-cámara sea mayor o igual a diez veces longitud activa de la fuente.

Se recomienda construir un montaje para la colocación de la fuente (o el aplicador de ésta) y la cámara, el cual permita cambios en la distancia d entre 10-40 cm, de forma que se asegure una exactitud en esta distancia de al menos 1%, y una reproducibilidad mejor del 2% en las lecturas.

Al realizar medidas en múltiples distancias es necesario tomar en cuenta que los cambios en distancia sean precisos y exactos, para derivar la corrección c que produce la “verdadera” distancia centro-a-centro de la fuente a la cámara, d' . La distancia para una lectura es expresada por la siguiente ecuación:

$$d' = d + c \quad \text{Ecuación (4)}$$

donde

d' es la distancia centro-a-centro de la fuente a la cámara tomando en cuenta el corrimiento c en la distancia.

d es la distancia aparente centro-a-centro fuente-cámara.

c es el corrimiento en la distancia (c puede ser positiva o negativa).

La corrección por radiación dispersa a la tasa de kerma en aire, K_s , está incluida en la tasa de kerma en aire medida, $K(d')$, y será determinada mediante:

$$K_{scatt} = 1 - \frac{K_s}{K(d')} = 1 - K_s / (N_k * M_u * k_n) \quad \text{Ecuación (5)}$$

El factor de corrección por no-uniformidad, k_n , toma en cuenta que los electrones que entran a la cavidad de aire son principalmente generados en la pared interior de la cámara. Debido a la no-uniformidad de la fluencia de fotones en la pared, la generación de electrones en la pared varía significativamente de lugar a lugar. El resultado neto de esto es una fluencia electrónica no uniforme en la cavidad de aire de la cámara.

De manera que es necesario tomar en cuenta esta no-uniformidad, para poder convertir la carga medida o la corriente a tasa de kerma en aire a la distancia de medida, es necesario aplicar un factor de corrección por no-uniformidad, k_n .

Corrección por la atenuación de los fotones primarios en aire, K_{air} , es necesario corregir por la atenuación de los fotones primarios entre la fuente y la cámara de ionización. Los valores de K_{air} , a diferentes distancias entre la fuente y la cámara de ionización, están dados en la tabla 18.

Tomando en consideración lo propuesto en TECDOC 1274s [10], la ecuación para determinar la tasa de referencia de kerma en aire a la distancia de 1 m, es la siguiente:

$$K_R = N_k \cdot \left(\frac{M_u}{t} \right) \cdot K_{air} \cdot K_{scatt} \cdot K_n \cdot \left(\frac{d}{d_{ref}} \right)^2 \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde

N_k es el factor de calibración de kerma en aire de la cámara de ionización a esa energía de fotones.

M_u es la carga colectada medida durante el tiempo t y corregida por temperatura y presión ambiente, pérdidas de recombinación y efectos de tránsito durante la transferencia de la fuente en el caso de sistemas de carga diferida.

k_{air} es el factor de corrección por atenuación de los fotones primarios por el aire entre la fuente y la cámara.

k_{scatt} es la corrección por la radiación dispersada por las paredes, el piso, el arreglo de la medición, el aire, etc.

k_n es el factor de corrección por no-uniformidad, tomando en cuenta la fluencia electrónica no uniforme dentro de la cavidad de aire.

d es la distancia de la medida, esto es, la distancia entre el centro de la fuente y el centro de la cámara de ionización.

d_{ref} es la distancia de referencia de 1 m.

12.4. Unidad de carga diferida SagiNova.

El tema de este trabajo es la puesta en servicio de un nuevo sistema de carga diferida a alta tasa de dosis SagiNova, véase tabla 1, diseñado para atender las necesidades actuales para las aplicaciones de braquiterapia de alta tasa de dosis, además ofrece la opción de dos isótopos, ^{192}Ir y ^{60}Co , de acuerdo a las necesidades y preferencias de cada institución. Las distribuciones de dosis basadas en el formalismo TG-43 son equivalentes para el cobalto-60 y el iridio-192. Posee un Sistema de Dosimetría In-Vivo permite la monitorización independiente directa de la dosis para el recto y la vejiga en la consola de control junto con información sobre el tratamiento.

Tabla 1. Especificación de fuente ^{60}Co en unidad SagiNova.

Descripción	Valor
Número de Modelo	Co0.A86
Isotopo	Co-60
Semivida	5,27 años (1925,3 días)
Encapsulamiento de la fuente	Diámetro externo 1,0 mm
	Longitud 4,6 mm
Segmento Radiactivo	Diámetro 0,5 mm
	Longitud 3,5 mm

Fuente: (Eckert & Ziegler BEBIG , Manual de usuario SagiNova®, 2017)[4]

En general, el sistema SagiNova está compuesto principalmente por dos elementos:

12.4.1. Unidad de administración de tratamiento (TDU)

Es uno de los principales componentes de la unidad, véase la figura 8, en este contiene la fuente radiactiva, indexadores de canales que es la interfaz para la conexión de hasta 25 aplicadores o tubos de transferencia, de igual forma luz indicadora de radiación, botón de parada de emergencia, rueda manual (para la retracción manual de la fuente).



Figura 8. Unidad de administración de tratamiento.
Fuente: Manual de usuario SagiNova.

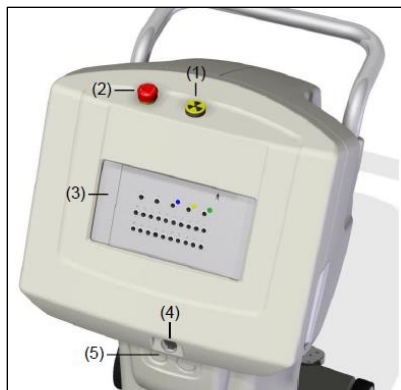


Figura 9. Vista frontal Unidad de administración de tratamiento.
Fuente: Manual de usuario SagiNova.

En la figura 9 se observa:

- (1) Luz del indicador amarillo.
(encendida = fuente en posición de parada / intermitente = fuente en tránsito)
- (2) Botón de parada de emergencia.
- (3) Indexador de canales.
- (4) Conexión para el indicador de posición de la fuente.

(5) Conexión para las sondas de dosimetría in vivo



Figura 10. Vista trasera Unidad de administración de tratamiento.
Fuente: Manual de usuario SagiNova.

En la figura 10 se observa:

- (1) Anillo de protección antirrobo.
- (2) Freno. (verde = liberar freno / rojo = aplicar freno).



Figura 11. Vista lateral Unidad de administración de tratamiento.
Fuente: Manual de usuario SagiNova.

En la figura 11 se observa:

- (1) Rueda manual. (para la retracción manual de la fuente)

12.4.2. Unidad de control de tratamiento (TCU)

- Panel de control de tratamiento (TCP).

Es una interfaz de pantalla táctil, véase figura 12, que permite al usuario iniciar e interrumpir el tratamiento. Un botón de parada de emergencia se encuentra en la parte anterior del panel de igual forma un sistema de interruptor de llave ON/OFF, interruptor de llave de salida de la fuente, INICIAR y STOP.

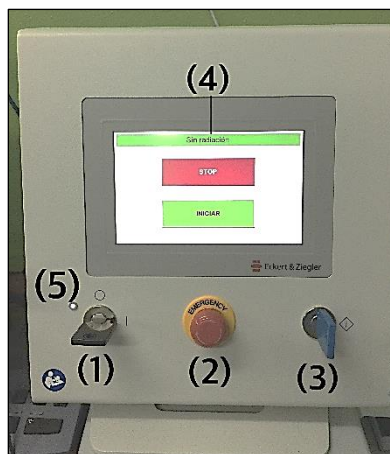


Figura 12. Panel de control de tratamiento (TCP).
Fuente: Propia.

En la figura 12 se observa:

- (1) Sistema de interruptor de llave ON/OFF. (Sistema encendido (ON) = posición I; Sistema apagado (OFF) = posición O)
- (2) Botón de parada de emergencia. (Retrae la fuente al estado de seguridad del sistema y detiene la irradiación)
- (3) Interruptor de llave de salida de la fuente. (Permite la liberación de la fuente = Posición)
- (4) INICIAR. (Inicia el tratamiento / prueba de QA)
- (4) STOP. (Interrumpe el tratamiento / prueba de QA)
- (5) Luz indicadora blanca. (Indica el estado encendido / apagado del sistema)

- Consola de control de tratamiento (TCC).

Sus componentes son: PC con Windows (incluye software), pantalla, ratón, teclado. Véase figura 13; Se encarga de guiar al operador en el manejo del sistema y monitorización, además de indicar el estado actual del sistema.

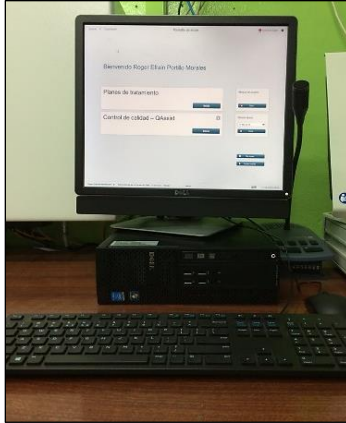


Figura 13. Consola de control de tratamiento (TCC).
Fuente: propia.

12.5. Aplicadores

Proporcionan a la fuente una ruta para administrar el tratamiento de braquiterapia; a continuación, se describen los más utilizados en braquiterapia intracavitaria ginecológica.

Cilindro Vaginal: Consiste en la introducción de un aplicador tipo cilindro en la vagina, conteniendo una sonda para la fuente radiactiva, bien vaginal o uterina. El cilindro tiene una hendidura que permite el encaje o bien de la sonda uterina, o de la vaginal. Los cilindros tienen diámetros variables, desde 2 cm hasta 4,5 cm; La geometría definida de los cilindros asegura una distribución de dosis homogénea en la superficie. Por otro lado, también se cuenta con aplicador vaginal segmentado está diseñado para la braquiterapia vaginal y cervical. El diseño de cuatro segmentos en múltiples anchuras permite un rango de ambas longitudes y diámetros para adaptarse a una variedad de anatomías. Véase figura 14.

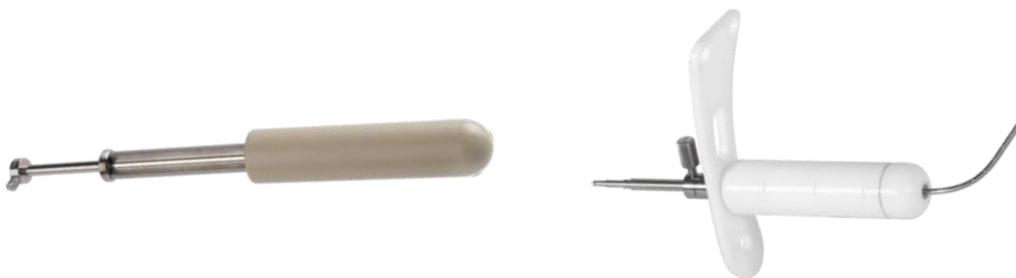


Figura 14. (a) Cilindro vaginal. (b) Cilindro vaginal segmentado. Fuente: Catalogo aplicadores y accesorios Eckert & Ziegler BEBIG.

Feltcher: Se componen de una sonda intrauterina rígida y de un colpostato con ovoides de dimensiones variables, véase figura 15; genera una distribución de dosis precisa para abarcar por completo el endometrio y el cuello uterino. El aplicador está hecho de titanio. Esto lo

hace robusto mecánicamente, con artefactos mínimos en imágenes CT y MR. Una vez en posición, los tubos intrauterinos delgados y los tubos ovoides se unen y se aseguran con tornillos de ajuste para permanecer estables e inmóviles durante el tratamiento.



Figura 15. Aplicador fletcher. Fuente: Catalogo aplicadores y accesorios Eckert & Ziegler. BEBIG.

Tándem + anillo: El tubo y el anillo intrauterinos se pueden insertar fácilmente. Una vez en su lugar, se unen en una geometría fija, permaneciendo estables e inmóviles durante el tratamiento. El aplicador de anillo CT / MR está disponible en conjuntos de 30 °, 45 ° y 60°, con el ángulo definido con relación al eje del aplicador. La geometría fija del aplicador de anillo CT / MR proporciona una distribución de dosis reproducible para la braquiterapia ginecológica. La combinación de un anillo y un tubo intrauterino en ángulo que pasa por el centro del anillo da como resultado una cobertura de dosis dirigida al endometrio y al cuello uterino. Véase figura 16.



Figura 16. Aplicador Tándem + anillo. Fuente: Catalogo aplicadores y accesorios Eckert & Ziegler BEBIG.

12.5.1. Controles de calidad de los aplicadores

Después de recibir una entrega de cualquier equipo para braquiterapia, se debe verificar que el producto entregado esté de acuerdo con las especificaciones previas. Es necesario verificar las propiedades mecánicas de los aplicadores y también que los aplicadores y los tubos de transferencia tengan la longitud correcta, realizar comprobaciones para garantizar que el producto esté funcionando como se describe en las instrucciones de uso. Se debe controlar

cualquier código mecánico, que esté destinado a forzar la conexión de un aplicador específico con un tubo de transferencia específico es por esto que los aplicadores para un dispositivo de irradiación determinado no deben utilizarse con otros dispositivos de irradiación; verificar que la geometría del aplicador se corresponde exactamente con la geometría del aplicador en el programa de planificación del tratamiento. Cuando los aplicadores están protegidos, se deben realizar verificaciones para garantizar que la posición del marcador de protección es correcto, ya que para aplicadores que son más complejos de manejar como por ejemplo el Fletcher, es necesario conocer el uso adecuado de los colpostatos, ya que un montaje incorrecto puede ocasionar efectos no deseados.

Las pruebas recomendadas por el TECDOC 1151 [9] y su procedimiento de realización son las siguientes:

Ubicación de atenuadores: Se verifica mediante radiografías del aplicador en diferentes ángulos, con vistas a comprobar la posición y forma del atenuador, por ejemplo, en ovoides de aplicadores tipo Fletcher-Suit.

Ubicación de la fuente: Esta prueba se suele efectuar mediante una auto-radiografía de la fuente en el aplicador en la posición prevista. Se recomienda fijar el aplicador sobre una película y realizar marcas, de manera que se pueda comprobar, la posición de las marcas dejadas por las fuentes respecto a puntos de referencia del aplicador.

Coincidencia del simulador y la fuente: Las fuentes simuladas que se emplean para la localización de las fuentes reales deben garantizar, en primer lugar, que las características geométricas externas sean idénticas (diámetro y longitud). La coincidencia espacial del simulador y la fuente en el aplicador debe asegurarse con una tolerancia de ± 1 mm.

12.6. Vigilancia Radiológica

Debe realizarse como método de una práctica segura, tanto para el personal ocupacionalmente expuesto como para el paciente. Algunos de los requisitos para una sala de braquiterapia es poseer un sistema de enclavamiento eléctrico que retrae la fuente cuando

la puerta está abierta y no permite la reanudación del tratamiento a menos que la puerta esté cerrada; inaccesibilidad de las llaves de la consola a personas no autorizadas, un monitor de radiación permanente capaz de monitoreo continuo del estado de la fuente, sistemas de visualización e intercomunicación para permitir la observación del paciente durante el tratamiento y controles de área restringida como carteles, cerraduras, alarmas visibles/ audibles, entre otros aspectos. Por lo tanto, es importante realizar pruebas de seguridad con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los dispositivos que garantizan la interrupción del haz de radiación para evitar cualquier tipo de accidente radiológico dentro de la sala de tratamiento de braquiterapia, de igual forma realizar pruebas mecánicas que se enfoquen en verificar que cada uno de los dispositivos mecánicos se encuentre en el correcto estado y funcionamiento con respecto a las tolerancias establecidas para el equipo, y por supuesto de carácter dosimétrico que nos permitan asegurar la correcta entrega de dosis al paciente, así como constatar los valores establecidos por el fabricante en el certificado de calibración.

13.Hipótesis

- Las pruebas de puesta en servicio clínico de la unidad de Braquiterapia de Alta tasa de Dosis SagiNova con fuente de ^{60}Co se encuentran dentro de los niveles de tolerancia establecidos (Funcional, $\pm 5\%$, etc.) en los formalismos y protocolos seguidos en este trabajo [6] [9] [10].

Capítulo III

14. Diseño y Experimentación.

14.1. Materiales.

En el capítulo II se describieron las partes y características de la unidad de carga diferida SagiNova, así como la mención de los protocolos a tomar en cuenta adaptándolos a nuestras condiciones y de algunos detectores dosimétricos que son necesarios para realizar las pruebas de puesta en servicio clínico.

A continuación se detallan los materiales utilizados en la puesta de servicio clínico de la unidad tratamiento SagiNova:

- Cámara de pozo [REF] TW33005 [SN]121825. Fabricante: PTW-Freiburg.
- Cámara Farmer [REF]30013 [SN]8826. Fabricante: PTW-Freiburg.
- Electrómetro UNIDOS webline [REF] T10022 [SN] 002138. Fabricante: PTW-Freiburg.
- Detector Camberra-RADIAGEM 2000.
- Set de aplicadores:
 - Aplicador Cilindro Vaginal
 - Aplicador Anillo
 - Aplicador Fletcher
 - Tubo de transferencia.
- Películas radiocrómica GAFCHROMIC EBT³.
- Barómetro.
- Cámara de indicador óptico del posicionamiento de la fuente.
- Unidad de Rayos X (Arco en C).

14.2. Método.

14.2.1. Pruebas Mecánicas.

Establecen la precisión y exactitud de los movimientos mecánicos de la unidad de tratamiento, enfocándose en verificar que cada uno de los dispositivos mecánicos se encuentre en el correcto estado y funcionamiento. (Ver tabla 2)

14.2.2. Pruebas de Seguridad.

Comprobación de que todos los indicadores, seguridades y paradas de emergencia, en caso de fallo o emergencia en el equipo estén en funcionamiento, con la finalidad de verificar cada uno de los dispositivos que garantizan la interrupción del haz de radiación; estas pruebas están enfocadas en garantizar la seguridad radiológica del personal y del paciente.(ver tabla2)

14.2.3. Pruebas Dosimétricas.

Las pruebas dosimétricas (ver tabla 2) se enfocan en constatar los valores establecidos por el fabricante en el certificado de calibración, y se realiza una nueva calibración para su verificación; encontrando el valor de la tasa de referencia de Kerma en aire ya que la dosis entregada a un paciente que está siendo tratado con braquiterapia es directamente proporcional a la intensidad de la fuente con la cual fue determinada.

Los niveles de tolerancias establecidos para las pruebas que se han realizado experimentalmente dados en este documento han sido reflejados de acuerdo a los estándares de los protocolos Tecdoc 1151 [9], Booklet N°8 [6], así como referencias del manual del fabricante [4], por lo tanto están siendo basados en las normas de los protocolos seguidos y con la ayuda de experiencia de expertos.

Tabla 2. Tipos de pruebas experimentales.

Pruebas de Seguridad		Pruebas Mecánicas		Pruebas Dosimétricas	
Interruptores de emergencia.	Tolerancia: Retracción de la fuente funcional.	Verificación del funcionamiento de manivela de retracción manual de la fuente.	Tolerancia: Funcional de motores de retracción.	Determinación punto de máxima eficiencia (Cámara pozo).	Tolerancia: Punto correcto de máxima colección de carga.
Posición de las llaves de la consola.	Tolerancia: Posición correcta				
Monitor de radiación.	Rango máximo de medición: 999mSv/h				
Indicador de salida de la fuente.	Tolerancia: Luz indicador funcional	Verificación integridad de los tubos de transferencia	Tolerancia: Tubos de transferencia sin daños u alteraciones	Determinación de la tasa de referencia de Kerma en aire.	Tolerancia: $\pm 5\%$
Terminación del temporizador.	Tolerancia: 1 %				
Sistema de enclavamiento de la puerta.	Tolerancia: retracción de la fuente funcional				
Monitoreo de área.	Tasa de dosis permitida: 10 $\mu\text{Sv/h}$	Integridad de los aplicadores.	Tolerancia: Aplicadores sin daños u alteraciones	Entrada-Salida de la fuente.	Tolerancia: 0,02%
Radiación de fuga.	Tolerancia: 5 cm de la superficie de TDU 11.5 $\mu\text{Sv/h}$.				
Verificación del funcionamiento del sistema de video vigilancia.	Tolerancia: video vigilancia funcional				
Verificación del funcionamiento del sistema de intercomunicación con el paciente.	Tolerancia: Intercomunicación funcional	Obstrucción del paso de la fuente.	Tolerancia: Sin Obstrucción	Linealidad	Correlación entre variables.
Verificación canal de tratamiento.	Tolerancia: Canal programado correcto.	Determinación del factor decaimiento.	Tolerancia: $\pm 5\%$		
		Posicionamiento de la fuente (autorradiográfico y circuito cerrado óptico)	Tolerancia: $\pm 2\text{mm}$	Ubicación de la fuente en la primer parada del aplicador (correspondencia tip-distance).	Tolerancia: $\pm 1\text{mm}$

14.3. Procedimientos Pruebas Experimentales.

Se realizó cada una de las pruebas de aceptación para la puesta en servicio clínico que tienen como objetivo asegurar que todos los dispositivos, sean mecánicos, radiactivos o informáticos, usados para la planificación y administración de tratamientos y para el aseguramiento de la calidad funcionen de forma segura; Tales pruebas recomendadas en protocolos ya establecidos, como los citados en este documento TECDOC 1151, TECDOC 1274, BOOKLET N° 8.

A continuación, se da a conocer detalladamente las pruebas realizadas para alcanzar la puesta en servicio del equipo de braquiterapia de alta tasa de dosis SagiNova:

1- Interruptores de emergencia.

Objetivo: Abortar la ejecución del tratamiento y asegurar que la fuente ha sido retraída hacia su posición de seguridad.

Frecuencia: Diaria.

Tolerancia: Retracción de la fuente funcional.

Procedimiento: Durante una exposición de fuente, se presionó el botón de parada de emergencia en el panel de control de tratamiento (TCP), e inmediato la fuente se retrajo; en la consola se observa la indicación de falla, por lo tanto, se asegura que se realiza un registro correcto de la falla.



Figura 17. Accionamiento botón parada de emergencia.

2- Posición de las llaves en la consola.

Objetivo: Verificar la correcta posición de las llaves para modo operación en el panel de control de tratamiento.

Frecuencia: Diaria.

Tolerancia: Posición correcta de las llaves.

Procedimiento: Las llaves fueron colocadas en el panel de control, y se programó la exposición de la fuente, sin embargo, al no girar la llave (azul) a la posición correcta, la fuente no fue liberada.

La función de estas llaves radica en permitir la liberación o salida de la fuente. La llave negra representa el sistema de interruptor ON/OFF (Sistema encendido (ON) = posición I; Sistema apagado (OFF) = posición O), la llave azul Interruptor de llave de salida de la fuente (Permite la liberación de la fuente = Posición \diamond)



Figura 18. Posicionamiento llaves en la consola.

3- Monitor de Radiación.

Objetivo: Verificar que el monitor de radiación detecta la presencia de radiación en la sala.

Frecuencia: Diaria.

Rango máximo de medición: 999mSv/h.

Procedimiento: Durante una exposición de la fuente, se escucha a través del intercomunicador una señal de audio durante una ejecución de fuente, se usa las cámaras de la sala como monitores visuales para observar la luz intermitente indicador amarilla en la unidad de administración de tratamiento (TDU) que indica la fuente expuesta; en el monitor de radiación de la habitación se puede observar que este detecta los niveles de radiación en la misma.



Figura 19. Monitor de radiación de sala de tratamiento.

4- Indicador de salida de la fuente.

Objetivo: Observar que los dispositivos de seguridad e indicación se encuentren en correcto funcionamiento.

Frecuencia: Diaria.

Tolerancia: Luz indicador funcional.

Procedimiento: Se realizó una exposición de la fuente y por medio de las cámaras de video vigilancia se pudo observar luz del indicador amarillo en su estado encendida = fuente en posición de parada e intermitente = fuente en tránsito, de igual forma por medio del intercomunicador escuchar la señal sonora al momento de la salida de la fuente y durante esté expuesta.



Figura 20. Indicador salida de la fuente.

5- Temporizador.

Objetivo: Comprobar que la exposición de fuente continúa hasta que el tiempo transcurrido sea igual al tiempo establecido en el temporizador.

Frecuencia: Trimestral.

Tolerancia: 1%.

Procedimiento: Para esto se empleó un cronómetro manual, se realizó varias exposiciones de fuente con valores de 1 min del temporizador de la unidad, verificando que corresponda al mismo tiempo del cronómetro digital manual utilizado el cual posee una resolución de 1ms (0,001 s). Haciendo uso de dicho cronometro ya que en la institución no se contaba con otro.

6- Sistema de enclavamiento de la puerta.

Objetivo: Verificar el retorno de la fuente a su posición segura en caso de emergencia.

Frecuencia: Diaria.

Tolerancia: Retracción de la fuente funcional.

Procedimiento: Dado que la función de esta prueba es que al abrir la puerta se espera que la fuente retorne a la posición de seguridad; se programa la salida de la fuente en la consola de

la unidad de braquiterapia, una vez que la fuente esta fuera de la posición de resguardo se abre la puerta y la fuente retorna ya que el sistema de enclavamiento de la puerta esta funcional. Se inspecciona la indicación del suceso en el panel de control de la unidad para asegurarse de que se haya realizado un registro correcto, para continuar con las siguientes pruebas se cierra la prueba y se ordena nuevamente activar el sistema en la consola.



Figura 21. Verificación sistema de enclavamiento de la puerta.

7- Monitoreo de Área.

Objetivo: Evaluar la seguridad radiológica del bunker utilizado para sala de braquiterapia.

Frecuencia: Cambio de fuente.

Tolerancia: TOE = 20mSv/año (Dosis permitida en el área 10 μ Sv/h).

Procedimiento: Para llevar a cabo la evaluación de la dosis de fuga del bunker se ubicó un maniquí acrílico en él se insertó el aplicador LAR01-01, dentro de este se posiciona el tubo de transferencias universal LAA 1400GYN. Se creó un plan de tratamientos en el sistema de planificación llamado “Vigilancia_Radiológica” con un tiempo de cinco minutos de exposición. Antes de comenzar a realizar las mediciones de monitoreo de área debe asegurarse que el instrumento de medición tenga certificado de calibración vigente, las baterías con un porcentaje de carga mayor o igual al 50%.

Las medidas se realizaron en los diferentes puntos marcados en la figura 22. En el punto 1 el detector se ubicó a una distancia de 1m de la fuente usando maniquí y sin maniquí las dosis se observaron mediante las cámaras de vigilancia del paciente ya que no se puede acceder al bunker cuando la fuente está fuera de su lugar de resguardo. Los puntos 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 se midieron ubicando el detector a una distancia de 5 cm de la pared y a una de 1.20m, excepto el punto 3 que se midió a la altura del hueco arriba de la puerta por donde pasan los cables que conectan la consola con la unidad de braquiterapia SagiNova. El punto 1 de la figura 22 se realizó con la finalidad de tener un estimado de la dosis en caso que ocurra un incidente con el retorno de la fuente y personal de braquiterapia tenga que intervenir al área con la fuente expuesta.

La estimación de la tolerancia de tasa de dosis permitida en el área se realizó tomando en cuenta que un Trabajador Ocupacionalmente Expuesto trabaja 8 horas al día, cinco días a la semana, 50 semanas al año y sabiendo que el límite de dosis anual para TOEs es de 20 mSv/año.

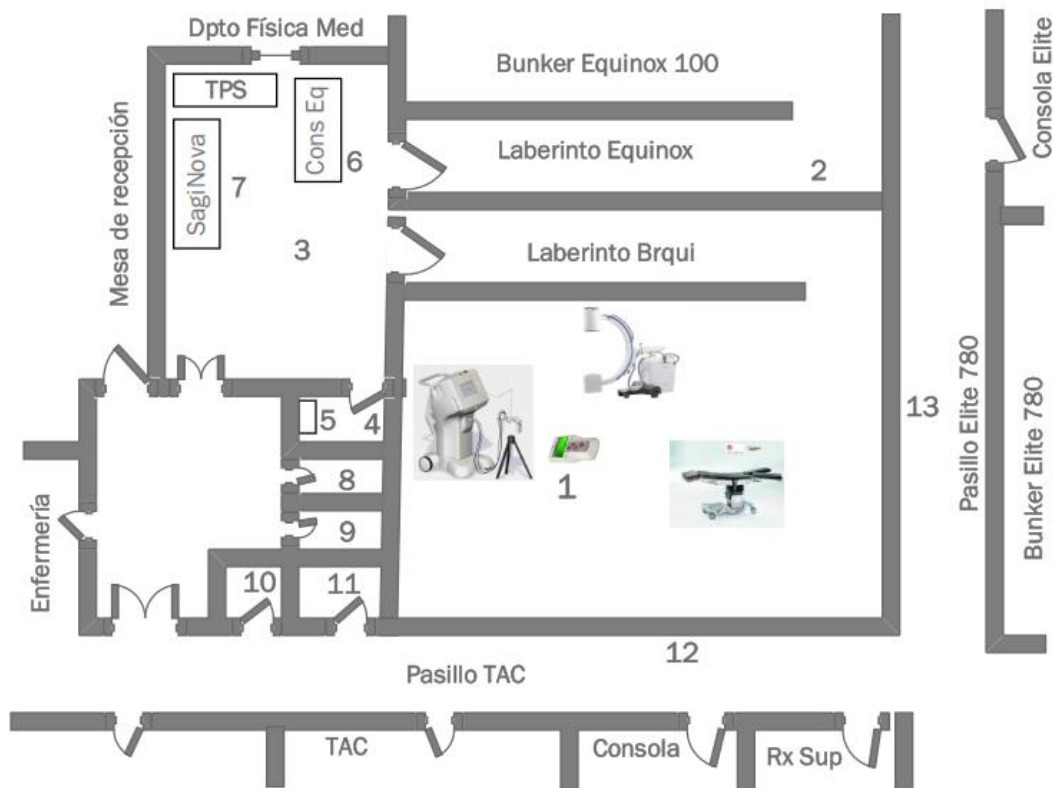


Figura 22. Ilustración zonas de medición para monitoreo de área.

8- Radiación de fuga.

Objetivo: Determinar los niveles de fuga de radiación de la unidad.

Frecuencia: Diaria.

Tolerancia: Tasa de dosis de 11.5 $\mu\text{Sv/h}$ a 5cm de la superficie de la TDU.

Procedimiento: El detector Camberra-RADIAGEM 2000 fue colocado en contacto con la superficie de la unidad de tratamiento SagiNova (5cm de la carcasa) con la finalidad determinar el nivel de fuga de radiación, esta prueba permite constatar que existe fuga de radiación, y así determinar si los valores de tasa de dosis medidos están dentro de los niveles de restricción indicados por las normas IEC, y el proveedor de la unidad el cual esta expresado en los manuales.



Figura 23. Radiación de fuga.

9- Verificación del funcionamiento del sistema de video vigilancia.

Objetivo: Verificar el correcto funcionamiento del sistema de video vigilancia.

Frecuencia: Diaria.

Tolerancia: Video vigilancia funcional.

Procedimiento: En esta prueba se debe verificar que cada una de los sistemas de visualización del paciente y la sala en general, proporcionen una perfecta imagen y cada una

de las herramientas del sistema de video vigilancia funcionen adecuadamente como es el caso del zoom de la cámara, el foco, etc.



Figura 24. Sistema video vigilancia.

10- Verificación del sistema de intercomunicación con el paciente.

Objetivo: Comprobar que el sistema de intercomunicación funcione correctamente.

Frecuencia: Diaria.

Tolerancia: Intercomunicación funcional.

Procedimiento: Durante la instalación de la unidad de tratamiento de braquiterapia SagiNova se instaló un sistema de circuito cerrado de comunicación entre el paciente y el operador, este fue utilizado dentro y fuera de la sala de tratamiento verificando su correcto funcionamiento auditivo, siendo así útil para casos de emergencia o comunicación con el paciente a través del mismo, en el cual la señal auditiva es receptada con claridad evitando una exposición innecesaria.



Figura 25. Sistema de intercomunicación.

11- Verificación del canal de tratamiento.

Objetivo: Verificar el correcto funcionamiento de la unidad de tratamiento en función de que la fuente no salga por otro canal que no sea el seleccionado.

Frecuencia: Diaria.

Tolerancia: Canal programado correcto.

Procedimiento: Se programó el control de calidad diario de la unidad, en el cual es necesario conectar el tubo de transferencia al canal número 2, colocando el tubo de transferencia en el canal número 1 (diferente al programado) dando como resultado un mensaje en la pantalla del monitor del panel de control de tratamiento.

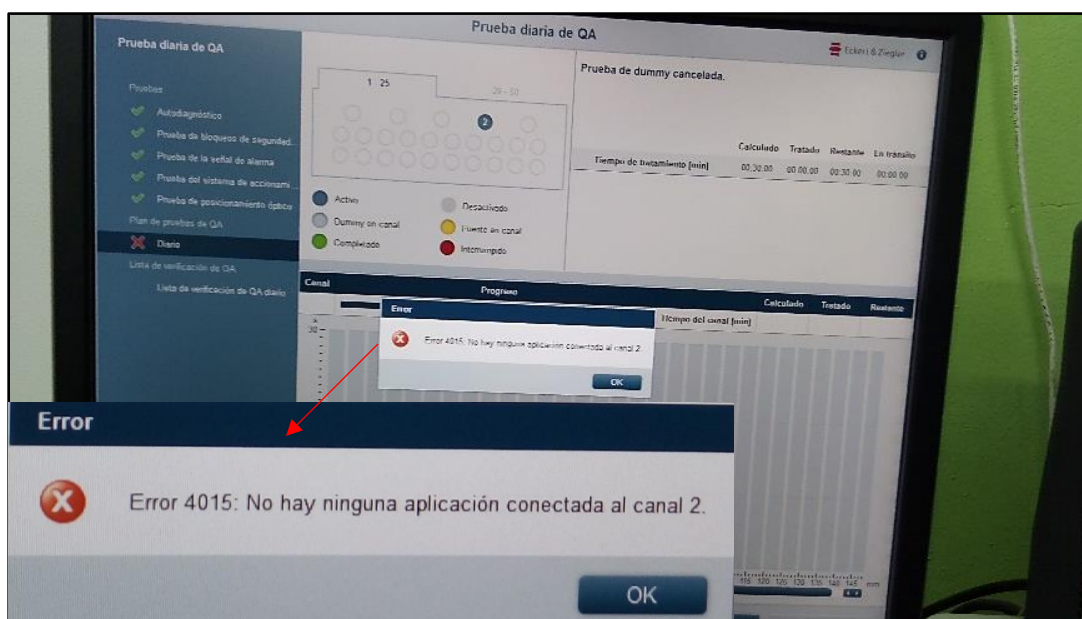


Figura 26. Error selección de canal de tratamiento.

12- Verificación del sistema de retorno manual de la fuente.

Objetivo: Verificar el funcionamiento del sistema de retorno manual de la fuente.

Frecuencia: Diaria.

Tolerancia: Funcional de motores de retracción.

Procedimiento: La unidad de tratamiento SagiNova tiene un accionamiento de la fuente que resulta ser un sistema de accionamiento redundante, en caso de que el accionamiento habitual de la fuente no funcione, se devuelve el sistema a su estado de seguridad mediante un accionamiento secundario.

El accionamiento de la fuente incluye un sistema manual de accionamiento. En caso de que el accionamiento de la fuente y el sistema eléctrico de retracción de emergencia fallen, la fuente se retrae manualmente en la caja protectora de la TDU aislada mediante la rueda manual, comprobando su funcionamiento en el momento de prueba de los motores y sensores de accionamiento cada día en el control diario.



Figura 27. Manivela retorno manual de la fuente

13- Verificación de la integridad de los tubos de transferencia de la fuente.

Objetivo: Verificar la integridad de los tubos de transferencia.

Frecuencia: Diaria.

Tolerancia: Tubos de transferencia sin daños u alteraciones.

Procedimiento: Para esta prueba y siempre que se vaya a utilizar un tubo de transferencia para tratamiento con un paciente, se debe realizar una inspección visual de la misma, incluso agitándola para descubrir la presencia de alguna parte que se haya soltado de la misma, de igual forma se verifica visualmente que los conectores estén limpios.



Figura 28. Verificación tubos de transferencia.

14- Integridad de los aplicadores.

Objetivo: Verificar integridad mecánica de los aplicadores.

Frecuencia: Inicial/Trimestral.

Tolerancia: Aplicadores sin daños u alteraciones

Procedimiento: Se realizó una inspección visual de los aplicadores, también si alguna parte se haya soltado de los mismos, de igual forma se verifica visualmente que los conectores para las guías estén en buen estado. También se utilizó la unidad de rayos X para realizarles radiografía para evaluar el estado de los aplicadores, para descartar anomalías o fisuras que no puedan ser detectadas visualmente, como lo podemos observar en la fig. 29.

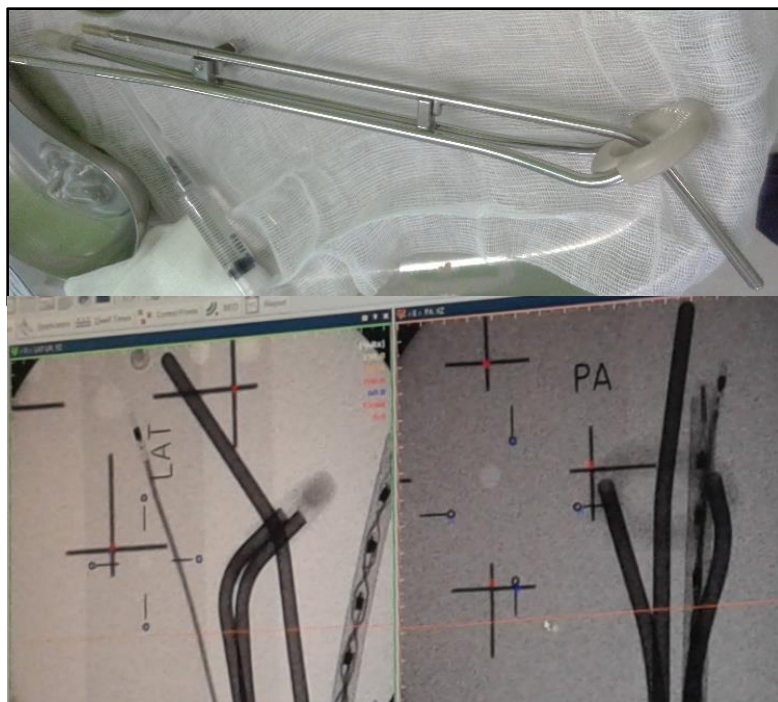


Figura 29. Visualización aplicadores.

15- Obstrucción del paso de la fuente.

Objetivo: Verificar existencia de obstrucción en los tubos de transferencia.

Frecuencia: Trimestral.

Tolerancia: Sin obstrucción.

Procedimiento: Se programa una exposición de la fuente, se coloca y bloquea un catéter obstruido o un catéter que se haya curvado formando una obstrucción con un radio de curvatura demasiado pequeño para que la fuente pueda pasar cerca del extremo. Se verifica que se detecte con la salida la dummy la obstrucción o la restricción debido a que la curvatura es demasiado apretada y en caso de no estar liberado el canal en el panel de control se refleja un aviso que indica el error en el canal indicado.

16- Determinación del factor de decaimiento.

Objetivo: Comprobar que el valor de desintegración de la fuente calculado por el usuario es el mismo que el reportado por el sistema de SagiNova.

Frecuencia: Inicial.

Tolerancia: $\pm 5\%$.

Procedimiento: Para realizar el control del factor de decaimiento se procedió a comprobar que el factor calculado manualmente con un rango de tolerancia de $\pm 5\%$ es el mismo que se reporta en el sistema SagiNova el cual muestra la tasa de desintegración para la fuente Co-60, para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}} * t} \quad \text{Ecuación 7}$$

17- Posicionamiento de la Fuente.

Objetivo: Comprobar el correcto posicionamiento de la fuente.

Frecuencia: Diaria/Trimestral.

Tolerancia: ± 2 mm.

Procedimiento: En esta prueba se utilizaron dos métodos, el primero autorradiográfico en el cual se conectó un aplicador a un tubo de transferencia conectado a la unidad, luego se coloca y sujeta sobre una película radiocrómica; sobre la película, a lo largo de una línea se señala con un marcador varias posiciones de tratamiento. A continuación, se programa el equipo

para que la fuente repose un tiempo relativamente pequeño en cada una de esas posiciones de tratamiento. Tras la marca dejada por la fuente en la película se comprueba la coincidencia entre las posiciones irradiadas y las seleccionadas.

El posicionamiento óptico es el segundo método, y consiste en visualizar mediante una cámara un dispositivo escalado y transparente de posiciones, que fue suministrado por el fabricante, y que conectado a la unidad a través de su tubo de transferencia, permite comprobar que la fuente radiactiva se detiene en las posiciones programadas; en este se conectó el indicador de posición de la fuente a su toma de conexión de red (parte delantera de la TDU), luego el indicador de posición de la fuente al canal 5 (TDU) mediante el tubo de transferencia apropiado.

En la Pantalla de control de calidad en el panel de control de la unidad, se selecciona Más/Prueba de posicionamiento óptico y se presiona Iniciar. La fuente saldrá y se detendrá en tres posiciones específicas del indicador de posición de la fuente: 10 mm, 15 mm y 20 mm. En cada posición se produce y se guarda una imagen de la fuente, a partir de la imagen, se comprueba la localización de la posición de la fuente y el ajuste al valor mostrado, al haber realizado esto, el sistema procesa la entrada del valor seleccionado y proporciona información sobre cómo proceder.



Figura 30. Posicionamiento de la fuente, a) Método autorradiográfico, b) y c) método óptico.

18- Determinación del punto de máxima eficiencia en la cámara de pozo.

Objetivo: Determinar el punto de máxima eficiencia a lo largo de la cavidad de la cámara de pozo.

Frecuencia: Inicial.

Tolerancia: Punto correcto de máxima colección de carga.

Procedimiento: Como la respuesta de la cámara depende fuertemente de la ubicación de la fuente y de su orientación exacta dentro de la cavidad del pozo, antes de realizar la calibración de la fuente se debe verificar el punto de máxima eficiencia de la cámara de pozo, el cual se determinó colocando el centro de la fuente en 27 posiciones a lo largo de la cavidad en pasos de 6 mm en los extremos de esta y en pasos de 2 mm próximas a su centro, con el fin de determinar este punto con la mayor precisión. La fuente permaneció en cada una de las posiciones por un tiempo de 15 segundos. La posición del punto efectivo de lectura es aquella en la cual se hace máximo el valor de la corriente medida por la cámara.



Figura 31. Montaje punto de máxima eficiencia en cámara de pozo.

19- Determinación de la tasa de referencia de Kerma en aire.

Objetivo: Determinar el valor de la tasa de referencia de Kerma en aire de la fuente ^{60}Co de la unidad SagiNova.

Frecuencia: Inicial.

Tolerancia: $\pm 5\%$.

Procedimiento: La tasa de referencia de Kerma en aire a 1 m de la fuente se midió tanto en aire libre con una cámara tipo Farmer para terapia calibrada en términos de N_k para la energía del ^{60}Co , como con una cámara de pozo calibrada en términos de N_{SK} para la energía del ^{192}Ir pero cuyo certificado aporta los correspondientes factores de corrección para ^{60}Co .

Para el método de calibración con cámara tipo Farmer se realizó siguiendo las recomendaciones de bibliografías consultadas tales como TECDOC 1274 [10] y TECDOC 1151 [9]. La medición se configuró colocando la cámara con su caperuza de equilibrio aproximadamente en el centro geométrico del local a una distancia aproximada de 1,6 m del piso y lejos de cualquier otro medio dispersor. La rigidez mecánica, la exactitud geométrica y la reducción de la incertidumbre por dispersión se garantizaron a partir de la utilización del maniquí de plástico MP1 de PTW, el cual provee un mecanismo de barrido lineal con un rango de 0 hasta 25 cm, una apreciación de una décima de milímetro y un soporte para cámaras tipo Farmer. Este mecanismo se colocó en su riel pero por fuera del maniquí, evitando así la dispersión en las paredes y el piso del mismo. Para la colocación de la fuente en el maniquí (Ver fig. 32) se fijó con cintas adhesivas el aplicador universal LAA 1400-GYN(s) conectado al equipo de carga remota, todo el sistema fue nivelado garantizando de esta forma la ortogonalidad del movimiento de la cámara respecto a la fuente.

La cámara y el aplicador se pusieron en contacto al nivel en el que se posicionará la fuente quedando ambos centros a una distancia de 0,97 cm (offset). En este punto se realizó el cero en el mecanismo de posicionamiento y de esta forma para cada posición de la cámara, su distancia a la fuente estará dada por la suma de este valor y lo que marque dicho mecanismo. Aunque la metodología recomienda siete mediciones en el rango de 10 – 40 cm de la fuente, en nuestro caso sólo se realizaron cinco en el rango de 5,97 – 25,97 cm espaciadas 5 cm entre cada una de ellas debido al limitado rango del mecanismo de barrido utilizado. El sistema de medición no presentó fugas relevantes ($<0,1\%$) y los valores de temperatura y presión en el local se mantuvieron prácticamente constantes ($\Delta T < 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\Delta P < 0,1\text{ hPa}$). Se configuró un tiempo de medición de 6 minutos (0,1h) en el temporizador del electrómetro.

Para el método de calibración con cámara de pozo, fueron empleados una cámara de pozo abierta a la atmósfera y un electrómetro calibrados de conjunto (ver certificados en anexos) en términos de tasa de referencia de Kerma en aire N_{Sk} para la calidad del ^{192}Ir . El certificado aporta los correspondientes factores de corrección tanto para la calidad del ^{60}Co como para el tipo de adaptador (T33004. 1.011) y aplicador (LAA 1400-GYN $\varnothing 3\text{mm}$) empleados en la medición. La fuga del set dosimétrico fue determinada colectando una carga y esperando un

tiempo de 10 minutos, se observó que este valor no varió. El valor de corriente que indica el electrómetro igualmente permaneció constante. La cámara fue colocada a más de 1 m del piso y de las paredes con el fin de minimizar los efectos de la dispersión en el local (ver fig. 33). La recolección de datos para este método se realizó enviando la fuente a la posición de punto de máxima eficiencia encontrada en la prueba 18, Se configuró un tiempo de medición de 1 minuto (60s) en el temporizador del electrómetro.

La fuente que está siendo calibrada corresponde a una calibración con trazabilidad secundaria, ya que está siendo calibrada en comparación con otra fuente, en este caso las mismas características proporcionadas por el fabricante, la cual a su vez posee una trazabilidad directa de PTB Germany.

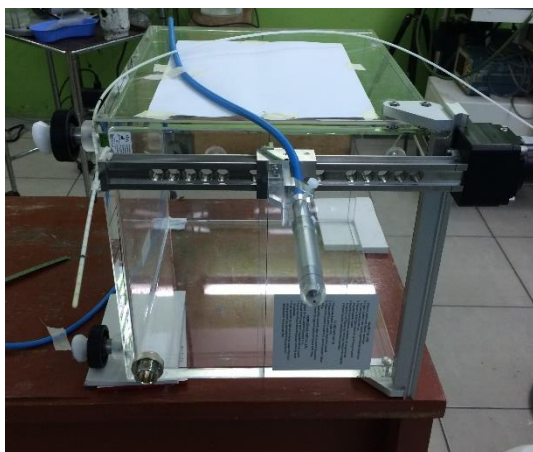


Figura 32. Medición tasa de referencia Kerma en aire mediante cámara Farmer.



Figura 33. Medición tasa de referencia Kerma en aire mediante cámara de pozo.

20- Entrada-salida de la fuente.

Objetivo: Conocer valor de tiempo de entrada-salida de la fuente.

Frecuencia: Inicial.

Tolerancia: 0,02%

Procedimiento: El efecto del tiempo de tránsito aumenta la exposición más allá del debido al tiempo de permanencia, se determina para una geometría específica programando tiempos de permanencia en el rango de 5 a 120 segundos y luego extrapolando.

21- Linealidad.

Objetivo: Verificar la linealidad de la unidad.

Frecuencia: Inicial.

Procedimiento: Se programó diferentes tiempos de permanencia de la fuente en la posición de máxima colección de la cámara de pozo, y se midió con el electrómetro la carga colectada por cada tiempo la cual se graficó y mediante la representación gráfica utilizando la función de correlación lineal por la cual se determinó la correlación entre variables (dosis vs tiempo), si $R^2=1$ se considera una correlación perfecta. Si se aplica el intercepto a los datos de dicha matriz utilizada para evaluar la linealidad se obtiene de esta forma el tiempo de entrada y salida de la fuente.

22- Ubicación de la fuente en la primera parada del aplicador (correspondencia tip-distance).

Objetivo: Verificar la distancia punta del aplicador-primera parada de la fuente.

Frecuencia: Inicial.

Tolerancia: 1mm.

Procedimiento: Para validar los datos del fabricante, se realizaron dos verificaciones correspondientes al cilindro vaginal y el aplicador tándem más anillo, utilizando películas radiocrómicas, a la cual se fijó el aplicador con cinta adhesiva (ver fig. 34) posteriormente se irradio, obteniendo así la marca radiográfica para luego poder ser analizada.

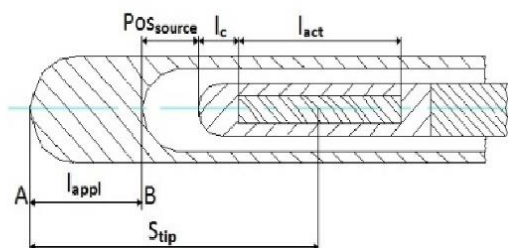
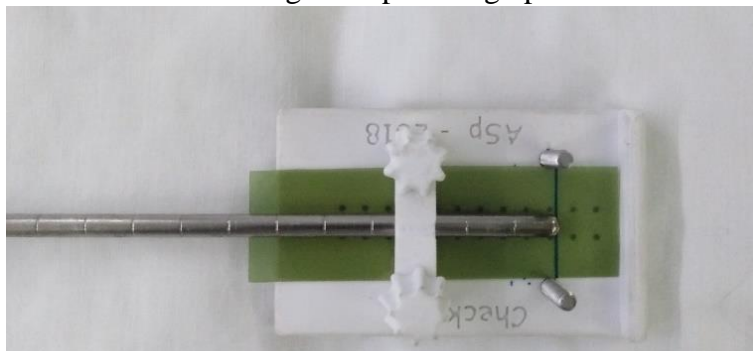


Figura 34. Método para verificar tip-distance.

Capítulo IV

15.Resultados.

Se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, con el fin de verificar el correcto funcionamiento en todos los aspectos necesarios para la puesta en servicio clínico de la unidad de braquiterapia SagiNova.

A continuación los resultados de la aplicación de cada una de las pruebas mencionadas en el capítulo III de este trabajo.

- Pruebas de Seguridad.

La tabla 3 muestra los resultados obtenidos de las pruebas correspondientes a la seguridad de la unidad y del área de braquiterapia.

Tabla 3. Pruebas de seguridad

Nº	Prueba	Acción	Estado	Criterios de aceptación
1	Interruptores de emergencia.	Retracción de la fuente.	Funcional	Funcional.
2	Posición de las llaves de la consola.	Liberar Fuente.	Correcta.	Correcta.
3	Monitor de radiación.	Detectar radiación.	533 μ Sv/h (en el rango).	999 mSv/h
4	Indicador de salida de la fuente.	Luz indicador.	Funcional.	Funcional.
5	Terminación del temporizador.	Finalizar exposición.	$\pm 0,01$ min	1%
6	Sistema de enclavamiento de la puerta.	Retracción de la fuente.	Funcional.	Funcional.
7	Monitoreo de área. (Pto. lectura máx. Tasa de dosis Posición 3 y 13)	Evaluar fuga radiación.	0,28 mSv/año. 0,16 mSv/año.	10 mSv/año.
8	Radiación de Fuga. (5 cm)	Evaluar fuga radiación.	11,1 μ Sv/h.	11,5 μ Sv/h.
9	Verificación del funcionamiento del sistema de video vigilancia.	Visualizar sala.	Funcional.	Funcional.

10	Verificación del funcionamiento del sistema de intercomunicación con el paciente.	Comunicación sala-estación de control.	Funcional.	Funcional.
11	Verificación canal de tratamiento.	Liberar fuente canal programado.	Correcto.	Correcto.

El resultado del valor medido para la prueba de tasa de dosis por fuga en contacto con la superficie de la unidad de tratamiento SagiNova a 5cm de la carcasa del contenedor de la fuente fue de 11,1 $\mu\text{Sv/h}$.

Resultados del monitoreo de área correspondiente a la prueba número 7 de seguridad, se muestra en la **tabla 4 y 6**, el fondo de tasa de dosis en el área es de 0,01 $\mu\text{Sv/h}$, posiciones han sido presentadas gráficamente en la fig.22.

En esta tabla 4 se presenta en la tercera columna el valor medido en cada uno de los puntos, en la siguiente columna se muestra tasa de dosis neta, restando el fondo de la tasa de dosis medida, como se aprecia la posición 1 y 2 poseen el mismo valor de acuerdo a las condiciones de medición que fueron expuestas en el capítulo anterior.

En la última columna de la tabla se presenta la tasa de dosis anual equivalente a cada una de las posiciones, considerando que el trabajador ocupacionalmente expuesto estuviera sus 8 horas labores en estas posiciones y también que la fuente estuviera continuamente irradiando durante 8 horas diarias (poco probable), por lo tanto, para esta estimación de valor de tasa de dosis se está considerando el peor escenario.

Tabla 4. Monitoreo de área.

Posición	Zona de Medida	Tasa Dosis ($\mu\text{Sv/h}$)	Tasa Dosis - Fondo ($\mu\text{Sv/h}$)	Tasa Dosis (mSv/año)
1	Bunker a un metro de la fuente expuesta usando maniquí.	22800	22800	4.56×10^4
	Bunker a un metro de la fuente expuesta sin maniquí.	39600	39600	7.92×10^4

2	Laberinto Equinox 100.	0.02	0.01	0.02
3	Puerta.	0.10	0.09	0.18
	Marco de la puerta.	0.41	0.40	0.80
	Hueco arriba de la puerta.	0.19	0.18	0.36
4	Oficina de Jefe de Técnicos Pared.	0.04	0.03	0.06
5	Oficina de Jefe de Técnicos PC.	0.01	0	0
6	Consola Equinox 100.	0.01	0	0
7	Consola SagiNova.	0.01	0	0
8	Bodega.	0.06	0.05	0.10
9	Baño de enfermería.	0.05	0.04	0.08
10	Cuarto de limpieza.	0.02	0.01	0.02
11	Baño de técnicos.	0.05	0.04	0.08
12	Pasillo TAC.	0.03	0.02	0.04
13	Pasillo Elite 780.	0.24	0.23	0.46

Otro escenario posible para estimar un valor aterrizado a la realidad es considerando el tiempo efectivo de irradiación, es decir, el tiempo que la fuente permanece fuera de su posición de seguridad, considerando la cantidad de exposiciones al día de la fuente (es decir número de pacientes tratados) y el tiempo de irradiación en cada exposición, por lo tanto en la siguiente tabla se muestra las consideraciones tomadas para hacer un cálculo de tasa de dosis al año en las posiciones de medición basadas en el tiempo efectivo de irradiación.

Tabla 5. Consideraciones para tasa de dosis anual.

N° Exposiciones	Tiempo Irradiación por exposición [h]	Tiempo Efectivo Irradiación [h]	Tiempo ocupacionalmente expuesto [días]
12	0.23	2.76	250

En la siguiente tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para la tasa de dosis anual del trabajador ocupacionalmente expuesto, tomando en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas.

Tabla 6. Resultado monitoreo de área.

Zona de Medida	Tasa Dosis - Fondo ($\mu\text{Sv/h}$)	Tasa Dosis (mSv/año)
Bunker a un metro de la fuente expuesta usando maniquí.	22800	4.56E+04
Bunker a un metro de la fuente expuesta sin maniquí.	39600	7.92E+04
Laberinto Equinox 100.	0.01	0.01
Puerta.	0.09	0.06
Marco de la puerta.	0.40	0.28
Hueco arriba de la puerta.	0.18	0.12
Oficina de Jefe de Técnicos Pared.	0.03	0.02
Oficina de Jefe de Técnicos PC.	0.00	0.00
Consola Equinox 100.	0.00	0.00
Consola SagiNova.	0.00	0.00
Bodega.	0.05	0.03
Baño de enfermería.	0.04	0.03
Cuarto de limpieza.	0.01	0.01
Baño de técnicos.	0.04	0.03
Pasillo TAC.	0.02	0.01
Pasillo Elite 780.	0.23	0.16

- Pruebas Mecánicas.

La siguiente **tabla 7** contiene los resultados obtenidos correspondientes a las pruebas mecánicas de la unidad SagiNova y algunos de sus componentes.

Tabla 7. Pruebas mecánicas.

N°	Pruebas	Acción	Estado	Criterios de aceptación.
1	Verificación del funcionamiento de manivela de retracción manual de la fuente.	Motores de retracción	Funcional.	Funcional de motores de retracción.
2	Verificación integridad de los tubos de transferencia.	Sin daños en conectores, quiebres.	Sin daños.	Sin daños u alteraciones.
3	Integridad de los aplicadores.	Sin daños en conectores, fisuras, abolladuras.	Sin daños.	Sin daños u alteraciones.
4	Obstrucción del paso de la fuente.	Sin curvaturas que impidan el paso de la fuente.	Sin obstrucción	Sin obstrucción.
5	Posicionamiento de la fuente (autorradiográfico y circuito cerrado óptico)	Fuente en posiciones programadas.	$\pm 0,56$ mm	± 2 mm.

Para la prueba número 5 se utilizó la ecuación 7, se calculó manualmente el resultado que se muestra a continuación (rango de tolerancia de $\pm 5\%$) y se compara si es el mismo que se reporta en el sistema de control de tratamiento de la unidad SagiNova.

Fecha= 15-03-2019

Fecha referencia= 24-01-2018

Tasa de referencia Kerma en aire (24/01/2018)= 21,91 mGy/h

Días transcurridos= 415.

$$K_R = \left(21,91 \frac{mGy}{h} \right) e^{\left(-\frac{\ln 2}{1925,3} \right) * (415)}$$

$$K_R = 18,87 mGy/h$$

Los valores reportados para el sistema de SagiNova son los que se muestran en la siguiente figura.

Tabla de desintegración

Datos de la fuente

Código del producto: Co0.A86
 N.º de serie: BB-AC720
 Isótopo: Co60
 Constante de la tasa de kerma en aire: 0,306 mGy/h*m²/GBq
 Semivida: 1925,3 días
 Fecha de referencia: 24. ene 2018
 Intensidad de la fuente: 21,91 mGy/h

Fecha	TKRA [mGy/h]	Fecha	TKRA [mGy/h]	Fecha	TKRA [mGy/h]
15. mar 2019	18,87	15. nov 2020	15,14	15. jul 2022	12,17
01. abr 2019	18,75	01. dic 2020	15,06	01. ago 2022	12,10
15. abr 2019	18,66	15. dic 2020	14,98	15. ago 2022	12,04
01. may 2019	18,55	01. ene 2021	14,89	01. sep 2022	11,96
15. may 2019	18,46	15. ene 2021	14,81	15. sep 2022	11,90
01. jun 2019	18,35	01. feb 2021	14,72	01. oct 2022	11,83
15. jun 2019	18,25	15. feb 2021	14,65	15. oct 2022	11,77
01. jul 2019	18,15	01. mar 2021	14,58	01. nov 2022	11,70
15. jul 2019	18,06	15. mar 2021	14,50	15. nov 2022	11,64
01. ago 2019	17,95	01. abr 2021	14,41	01. dic 2022	11,58
15. ago 2019	17,86	15. abr 2021	14,34	15. dic 2022	11,52
01. sep 2019	17,75	01. may 2021	14,26	01. ene 2023	11,45
15. sep 2019	17,66	15. may 2021	14,19	15. ene 2023	11,39
01. oct 2019	17,56	01. jun 2021	14,10	01. feb 2023	11,32
15. oct 2019	17,47	15. jun 2021	14,03	15. feb 2023	11,26
01. nov 2019	17,36	01. jul 2021	13,95	01. mar 2023	11,21
15. nov 2019	17,28	15. jul 2021	13,88	15. mar 2023	11,15
01. dic 2019	17,18	01. ago 2021	13,80	01. abr 2023	11,08
15. dic 2019	17,09	15. ago 2021	13,73	15. abr 2023	11,03
01. ene 2020	16,99	01. sep 2021	13,64	01. may 2023	10,96
15. ene 2020	16,90	15. sep 2021	13,57	15. may 2023	10,91
01. feb 2020	16,80	01. oct 2021	13,50	01. jun 2023	10,84
15. feb 2020	16,71	15. oct 2021	13,43	15. jun 2023	10,79
01. mar 2020	16,62	01. nov 2021	13,35	01. jul 2023	10,73
15. mar 2020	16,54	15. nov 2021	13,28	15. jul 2023	10,67
01. abr 2020	16,44	01. dic 2021	13,20	01. ago 2023	10,61
15. abr 2020	16,36	15. dic 2021	13,14	15. ago 2023	10,55
01. may 2020	16,26	01. ene 2022	13,06	01. sep 2023	10,49
15. may 2020	16,18	15. ene 2022	12,99	15. sep 2023	10,44
01. jun 2020	16,08	01. feb 2022	12,91	01. oct 2023	10,38
15. jun 2020	16,00	15. feb 2022	12,85	15. oct 2023	10,32
01. jul 2020	15,91	01. mar 2022	12,78	01. nov 2023	10,26
15. jul 2020	15,83	15. mar 2022	12,72	15. nov 2023	10,21
01. ago 2020	15,73	01. abr 2022	12,64	01. dic 2023	10,15
15. ago 2020	15,65	15. abr 2022	12,58	15. dic 2023	10,10
01. sep 2020	15,56	01. may 2022	12,50	01. ene 2024	10,04
15. sep 2020	15,48	15. may 2022	12,44	15. ene 2024	9,99
01. oct 2020	15,39	01. jun 2022	12,37	01. feb 2024	9,93
15. oct 2020	15,31	15. jun 2022	12,30	15. feb 2024	9,88
01. nov 2020	15,22	01. jul 2022	12,23	01. mar 2024	9,82

Figura 35. Tabla desintegración fuente

$$\text{Discrepancia relativa} = \frac{K_{R \text{ cal.}} - K_{R \text{ sist.}}}{K_{R \text{ sist.}}} * 100\% = \frac{18,87 \frac{mGy}{h} - 18,87 \frac{mGy}{h}}{18,87 \frac{mGy}{h}} * 100\% = 0,0\%$$

Para la prueba del posicionamiento de la fuente por método de posicionamiento óptico se obtuvieron los siguientes resultados en la **tabla 8**.

Tabla 8. Pruebas posicionamiento óptico.

Distancia Ref. [mm]	Distancia medida [mm]	Desviación [mm]	Criterio de Aceptación
10,0	9,50	-0,05	±2 mm
15,0	14,5	-0,03	±2 mm
20,0	19,5	-0,03	±2 mm

Mediante el método autorradiográfico se presenta en la **tabla 9** los resultados obtenidos, los cuales se obtuvieron programando en el sistema de SagiNova el reposo de la fuente cada 15mm entre paradas. La película radiocrómica posterior a las marcas fueron analizadas utilizando ImageJ mediante el método de cambio de escala para determinar la distancia.

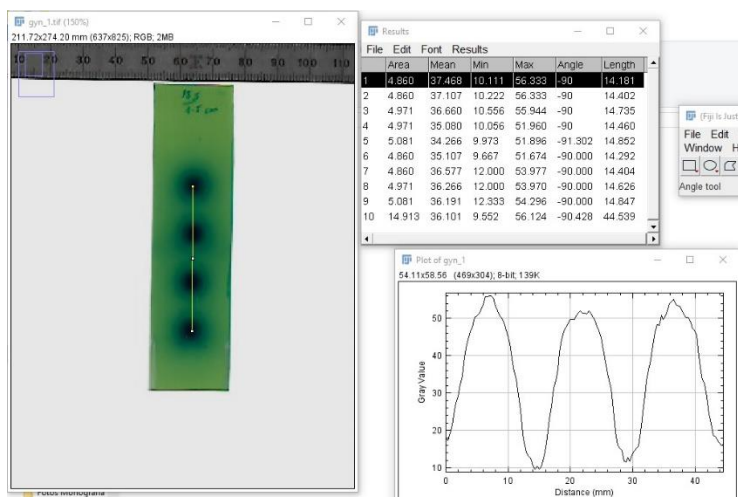


Figura 36. Análisis de película posicionamiento de la fuente usando ImageJ

Tabla 9. Resultado posicionamiento mediante método autorradiográfico.

Posición	Distancia Ref. [mm]	Distancia medida [mm]	Desviación [mm]
Parada 1-2	15,00	14,44	-0,56
Parada 2-3	15,00	14,53	-0,47
Parada 3-4	15,00	14,63	-0,37

- **Pruebas Dosimétricas.**

La **tabla 10** muestra los resultados obtenidos de las pruebas correspondientes al aspecto dosimétrico de la unidad de tratamiento SagiNova

Tabla 10. Pruebas Dosimétricas.

Nº	Pruebas	Acción	Estado	Criterio de aceptación
1	Determinación de la posición de máxima Eficiencia (cámara pozo).	Posición de máxima eficiencia	Posición 13 (53,4mm).	Posición de máxima eficiencia.
2	Linealidad	Dosis vs tiempo.	Correlación entre variables.	Correlación entre variables.
3	Entrada-salida de la fuente.	Tiempo de entrada-salida	0,21s.	0,02 min.
4	Determinación del factor decaimiento.	Valor de factor decaimiento fuente.	0,0 %	0,0%
5	Ubicación de la fuente en la primer parada del aplicador (correspondencia tip-distance).	Correspondencia distancia.	0,27 mm.	±1 mm.
6	Determinación de la tasa de referencia de Kerma en aire. 1- Cámara Pozo. 2- Cámara Farmer.	Determinación de la tasa de referencia de Kerma en aire	1. -1,96%. 2. -2,9%.	±5%.

En la prueba dosimétrica número 1 correspondiente a la determinación del punto máxima de eficiencia de la cámara de pozo, se obtuvieron los resultados de la tabla 11.

Tabla 11. Resultados de las mediciones para la determinación del punto de máxima eficiencia de la cámara de pozo.

Posición	Distancia (mm)	Lectura I (nA)	Respuesta relativa (%)
1	5,40	17,31	80,77
2	11,40	18,07	84,32

3	17,40	19,12	89,22
4	23,40	19,92	92,95
5	29,40	20,51	95,71
6	35,40	20,94	97,71
7	41,40	21,22	99,02
8	43,40	21,29	99,35
9	45,40	21,34	99,58
10	47,40	21,38	99,77
11	49,40	21,41	99,91
12	51,40	21,42	99,95
13	53,40	21,43	100,0
14	55,40	21,42	99,95
15	57,40	21,40	99,86
16	59,40	21,37	99,72
17	61,40	21,30	99,39
18	63,40	21,27	99,25
19	65,40	21,19	98,88
20	67,40	21,11	98,51
21	69,40	21,01	98,04
22	75,40	20,60	96,13
23	81,40	20,02	93,42
24	87,40	19,20	89,59
25	93,40	18,04	84,18
26	99,40	16,56	77,26
27	105,4	14,86	69,34

Como se puede observar la posición de máxima lectura en la cavidad de la cámara de pozo es la número 13 con un valor de distancia 53,4 mm.

Determinación del punto de máxima eficiencia de la cámara de pozo

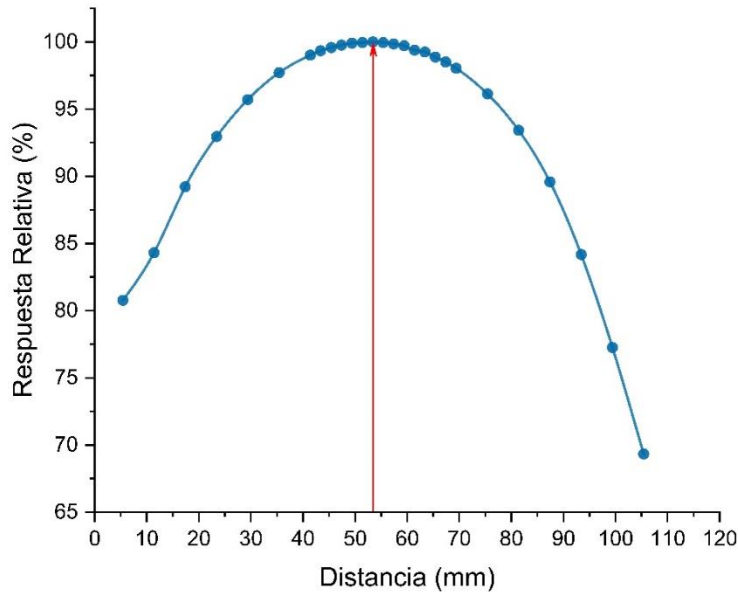


Gráfico 1. Respuesta relativa a la posición de lectura máxima a 53.4 mm (Posición 13).

En la prueba dosimétrica número 2 se utilizaron dos métodos diferentes para determinar el valor de la tasa de referencia de Kerma en aire mediante la ecuación 6 como fue descrito en el capítulo anterior, el primero mediante la utilización de cámara de pozo, resultados se muestran en las tablas 12, 13,14, 15.

Tabla 12. Valores utilizados en las condiciones de medición.

I (nA)	21,44
T (°C)	18,50
P(kPa)	99,34
K_{tp}	1,015
K_{rec}	1,000
N_{sk} (mGy m² h⁻¹ nA⁻¹)	0,9124
Kr ref. actual (26-03-18) [mGym²/h]:	21,43

En la tabla anterior se presentan los datos de valor de la lectura promedio de las mediciones realizadas, la temperatura y presión en condiciones de medición dentro de la sala, el valor de **K_{tp}** fue determinado por la Ec.2 y **K_{rec}** mediante Ec.1, **N_{sk}** dado en el certificado de la cámara y **Kr ref. actual (26-03-18)** valor presentado en la tabla de desintegración de la unidad SagiNova y tomado como referencia a la fecha de medición.

Tabla 13. Mediciones tomadas con HV 100% (400 Volt)

N°	t (s)	I (nA)
1	15,00	21,44
2	15,00	21,43
3	15,00	21,44
4	15,00	21,44
5	15,00	21,43
	Promedio	21,44

Tabla 14. Mediciones tomadas con HV 50% (200 Volt).

N°	t (s)	I (nA)
1	15,00	21,43
2	15,00	21,42
3	15,00	21,43
4	15,00	21,43
5	15,00	21,42
	Promedio	21,43

Tabla 15. Tasa de referencia de Kerma en aire.

Kr medido (26-03-18) [mGym ² /h]	Disc. [%]
21,01	-1,96

El valor de la tasa de referencia de Kerma en aire presentado en la **tabla 15** mediante método de cámara de pozo fue calculado mediante la **Ec.3**, sustituyendo en la misma los datos obtenidos en la medición.

El siguiente método se realizó utilizando una cámara tipo Farmer y los resultados obtenidos mediante este se presentan en las tablas 16, 17, 18, 19, 20, 21.

Tabla 16. Valores utilizados en las condiciones de medición.

T (°C)	18,60
P(kPa)	99,41
K _{tp}	1,014
N _k [mGy/nC]	49,11
Kr ref. actual (28-03-18) [mGym ² /h]	21,42

En la tabla anterior se presentan los datos de la temperatura y presión en condiciones de medición dentro de la sala, el valor de K_{tp} fue determinado por la Ec.2 y N_k dado en el certificado de la cámara y Kr ref. actual (28-03-18) valor presentado en la tabla de desintegración de la unidad SagiNova y tomado como referencia a la fecha de medición.

Mediante la determinación de la Tasa de referencia de Kerma en aire, se empleó el método de distancias múltiples, por cada distancia entre cámara-fuente se realizaron 4 medidas, en la siguiente tabla se presenta el promedio de las mediciones realizadas para cada distancia.

Tabla 17. Resultado de promedio de mediciones por cada distancia entre fuente-cámara.

d (m)	t (s)	M (nC)
0.050	360	11.48
0.100	360	3.447
0.150	360	1.646
0.200	360	0.955
0.250	360	0.626

Tabla 18. Corrección por la atenuación de los fotones primeros en aire (K_{air}) para fuente de Braquiterapia de ^{60}Co . Fuente: Tomado de TECDOC 1274, Tabla XI.

Distancia [m]	^{60}Co
0,1	1,000
0,15	1,000
0,2	1,000
0,25	1,000

El valor de Corrección por la atenuación de los fotones primeros en aire (K_{air}) para la distancia de 0,05m es igual a 1,000 el cual fue tomado de la Tabla 7.8 de la referencia (*Baltas, Sakelliou , & Zamboglou, 2006*) [3].

Tabla 19. Factores de corrección por no-uniformidad (K_n) para cámaras de ionización tipo Farmer (radio interno 3.15 mm, longitud 24.1 mm). Fuente: Tomado de TECDOC 1274, Tabla IX.

Distancia [m]	K_n
0,1	1,009
0,15	1,005
0,2	1,004
0,25	1,003

El valor de Corrección por no-uniformidad (K_n) para cámaras de ionización tipo Farmer para la distancia de 0,05m es igual a 1,016 el cual fue tomado de la Tabla 7.7 de la referencia (*Baltas, Sakelliou , & Zamboglou, 2006*) [3].

Tabla 20. Tasa de referencia de Kerma en aire para cada distancia utilizada.

Distancia d'[m]	M _u [nC]	K _{air}	K _{scatt}	K _n	(d/d _{ref}) ²	N _k [mGy/nC]	Kr ref. medido [mGym ² /h]
0,0597	11,64	1,000	0,999	1,016	0,0036	49,11	20,69
0,1097	3,500	1,000	0,997	1,009	0,0120	49,11	20,79
0,1597	1,670	1,000	0,995	1,005	0,0255	49,11	20,90
0,2097	0,970	1,000	0,991	1,004	0,0440	49,11	20,80
0,2597	0,63	1,000	0,986	1,003	0,0674	49,11	20,78
Promedio							20,79

*M_u = Carga colectada para esa distancia en específico multiplicada por factor de influencia K_{TP} presentado en tabla 16.

*d' = d+c es la distancia centro a centro de la fuente-cámara en contacto (0,0097m) tomando en cuenta el corrimiento c en la distancia (0,05; 0,10...etc.)

*t = 0,1 h.

El valor de la tasa de referencia de Kerma en aire presentado en la **tabla 20** mediante método de cámara Farmer fue calculado mediante la **Ec.6**, sustituyendo en la misma los datos obtenidos en la medición.

Cabe aclarar que algunos de los valores de los factores presentados al momento de cálculo fueron realizados con todos sus números decimales, y no solamente con los presentados en la tabla 20.

Tabla 21. Tasa de referencia Kerma en aire mediante método con cámara tipo Farmer.

Kr medido (28-03-18) [mGym ² /h]	Disc. [%]
20,79	-2,90

Tabla 22. Comparación de tasas de referencia de Kerma en aire medidas respecto a la reportada como referencia.

Método	Kr referencia [mGym ² /h]	Kr medido [mGym ² /h]	Disc. [%]
Cámara Pozo	21,43	21,01	-1,96
Cámara Farmer	21,42	20,79	-2,90

Tabla 23. Comparación de los resultados obtenidos en método con Cámara de Pozo y Cámara Farmer.

Método	Tasa de referencia de Kerma en aire (Kr) [mGym ² /h]	Disc. [%]
Cámara Pozo	21,01	-0,76
Cámara Farmer	20,79	

Para los resultados obtenidos en las pruebas dosimétricas número 3 y 4 se presentan la tabla 24 y el grafico 2.

Tabla 24. Dependencia del tiempo de exposición y la carga colectada.

Q [nC]	t [s]
4.027	15
7.927	30
15.9	60
31.68	120

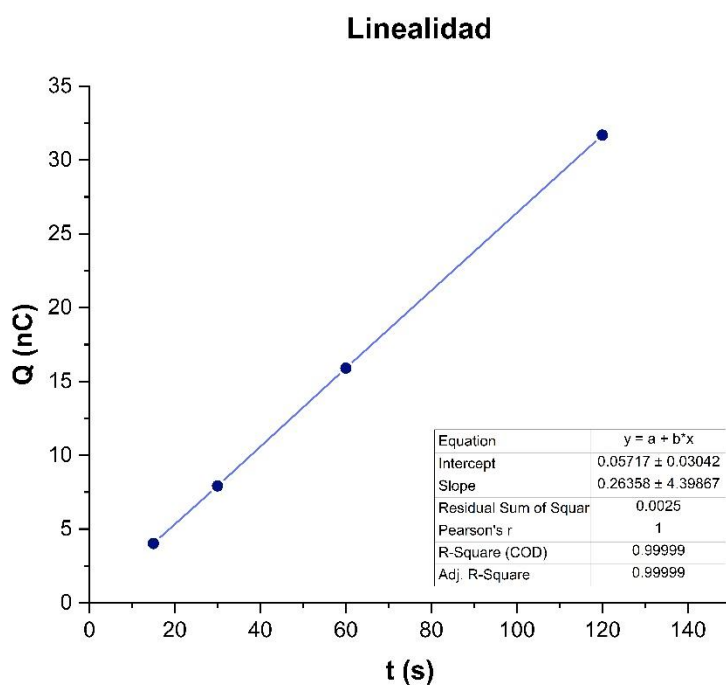


Gráfico 2. Representación del tiempo de exposición y la carga colectada por la cámara.

El valor del cuadrado del coeficiente de correlación lineal en la gráfica 2 es igual a 0,99999 por lo cual la dependencia entre estas magnitudes es lineal. Así mismo el intercepto de la recta con el eje de los tiempos nos indica que existe un retardo de 0,21 segundos.

En la prueba número 5 se obtuvieron de las películas radiocrómicas el análisis de la marcas posterior a la irradiación, se presentan en la tabla 25 los valores referencia de tip-distance proporcionados por el fabricante, en la figura 37 y 38 se muestran los análisis de las películas

radiocrómicas utilizando ImageJ mediante el método de cambio de escala para determinar la distancia y los resultados obtenidos en la medición se presentan en la tabla 26.

Tabla 25. Resultados obtenidos tip-distance utilizando ImageJ.

Aplicador	Stip Ref. [mm]	Distancia medida [mm]	Disc. [%]
Vaginal	6,40	6,10	3,90
Intrauterino	4,80	4,70	0,97

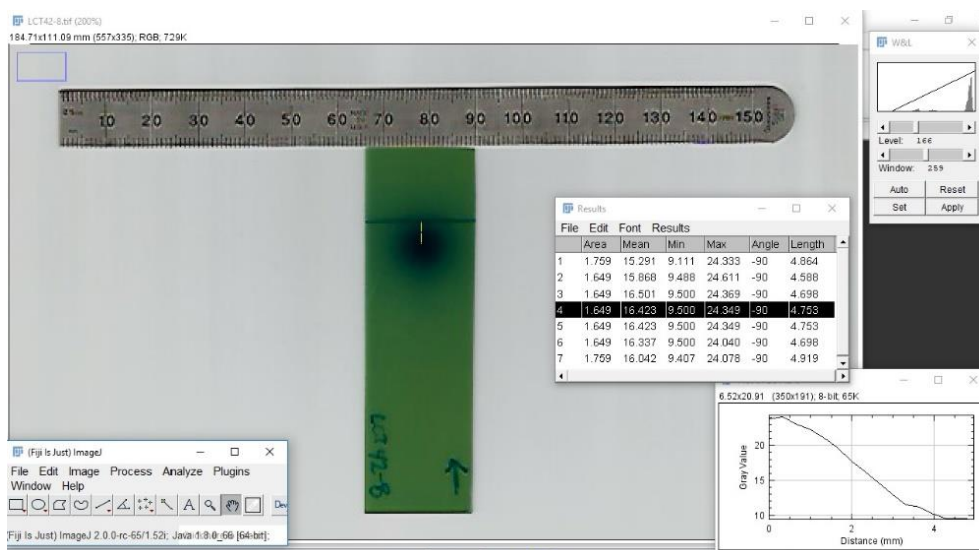


Figura 37. Análisis de película aplicador intrauterino usando ImageJ.

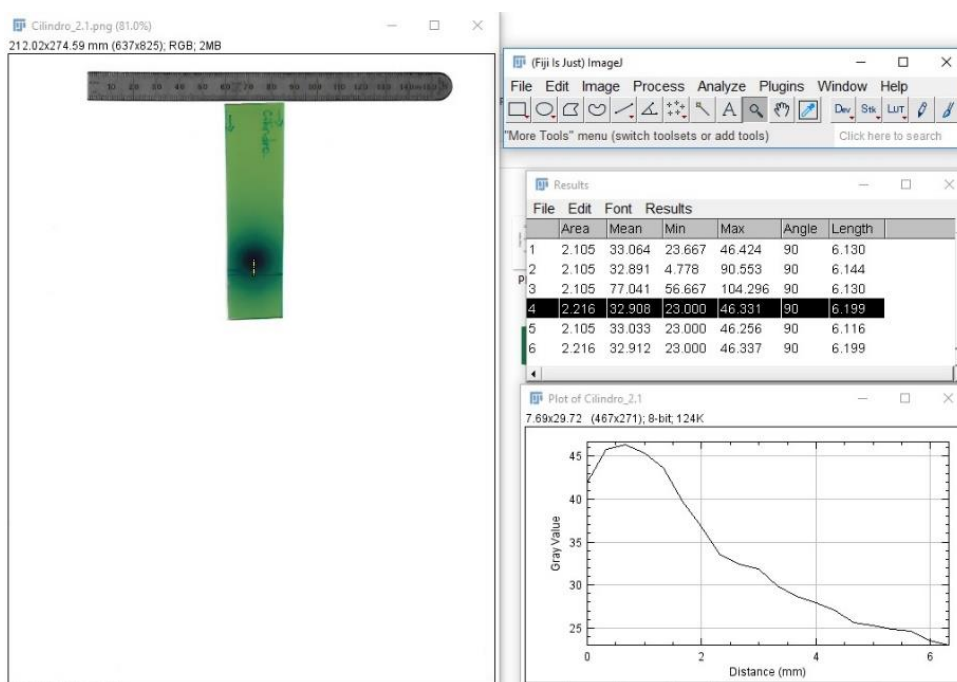


Figura 38. Análisis película aplicador vaginal utilizando ImageJ.

Cálculo de Incertidumbre asociada a los datos dosimétricos determinados experimentalmente.

De acuerdo con las definiciones la incertidumbre es un parámetro asociado al resultado de una medida, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando.

Las incertidumbres de las medidas se expresan como incertidumbres típicas relativas y la evaluación de las incertidumbres típicas se clasifica en tipo A y tipo B. El método de evaluación de las incertidumbres de tipo A es mediante análisis estadístico de una serie de observaciones, mientras que el método de evaluación de las de tipo B se basa en métodos distintos al análisis estadístico de una serie de observaciones.

De la tabla 26 a la 32 fueron evaluadas mediante análisis estadísticos como desviación estándar y evaluación de incertidumbre tipo A, mediante las ecuaciones (11 y 12).

Las tablas N° (26-30); muestran los resultados de las desviaciones estándares y las incertidumbres asociadas a las lecturas medidas en condiciones de referencia para cada una de las distancias utilizadas mediante la determinación de la Tasa de referencia de Kerma en aire por el método utilizando cámara Farmer.

Tabla 26. Incertidumbres para distancia Fuente-Cámara= 0,05m.

d=0,05m					
Medida	M(nC)	P (kPa)	T (°C)	K_{TP}	M_u
1	11,44	99,41	18,60	1,014	11,60
2	11,52	99,41	18,60	1,014	11,68
3	11,51	99,41	18,60	1,014	11,67
4	11,45	99,41	18,60	1,014	11,61
Promedio	11,48	99,41	18,60	1,014	11,64
Desviación estándar	4,06E-02	0	0	0	4,12E-02
U_A	2,03E-02	0	0	0	2,06E-02
U_B		0,28	0,17	0,0028	

Tabla 27. Incertidumbres para distancia Fuente-Cámara= 0,10m.

d=0,1m					
Medida	M(nC)	P (kPa)	T (°C)	K _{TP}	M _u
1	3,42	99,41	18,60	1,014	3,47
2	3,45	99,41	18,60	1,014	3,50
3	3,52	99,41	18,60	1,014	3,57
4	3,40	99,41	18,60	1,014	3,45
Promedio	3,45	99,41	18,60	1,014	3,50
Desviación estándar	5,13E-02	0	0	0	5,21E-02
U _A	2,57E-02	0	0	0	2,60E-02
U _B		0,28	0,17	0,0028	

Tabla 28. Incertidumbres para distancia Fuente-Cámara= 0,15m.

d=0,15m					
Medida	M(nC)	P (kPa)	T (°C)	K _{TP}	M _u
1	1,64	99,41	18,6	1,014	1,66
2	1,59	99,41	18,6	1,014	1,61
3	1,69	99,41	18,6	1,014	1,71
4	1,66	99,41	18,6	1,014	1,69
Promedio	1,65	99,41	18,6	1,014	1,67
Desviación estándar	4,22E-02	0	0	0	4,28E-02
U _A	2,11E-02	0	0	0	2,14E-02
U _B		0,28	0,17	0,0028	

Tabla 29. Incertidumbres para distancia Fuente-Cámara= 0,2m.

d=0,2m					
Medida	M(nC)	P (kPa)	T (°C)	K _{TP}	M _u
1	0,92	99,41	18,6	1,014	0,93
2	0,97	99,41	18,6	1,014	0,98
3	0,99	99,41	18,6	1,014	1,00
4	0,94	99,41	18,6	1,014	0,95
Promedio	0,95	99,41	18,6	1,014	0,97
Desviación estándar	3,00E-02	0	0	0	3,04E-02

U_A	1,50E-02	0	0	0	1,52E-02
U_B		0,28	0,17	0,0028	

Tabla 30. Incertidumbres para distancia Fuente-Cámara= 0,25m.

d=0,25m					
Medida	M(nC)	P (kPa)	T (°C)	K_{TP}	M_u
1	0,66	99,41	18,6	1,014	0,67
2	0,59	99,41	18,6	1,014	0,60
3	0,61	99,41	18,6	1,014	0,62
4	0,64	99,41	18,6	1,014	0,65
Promedio	0,63	99,41	18,6	1,014	0,63
Desviación estándar	3,13E-02	0	0	0	3,17E-02
U_A	1,56E-02	0	0	0	1,59E-02
U_B		0,28	0,17	0,0028	

Las tablas N° (31-32); muestran los resultados de las desviaciones estándares y las incertidumbres asociadas a las lecturas medidas en condiciones de referencia para cada una de las distancias utilizadas mediante la determinación de la Tasa de referencia de Kerma en aire por el método utilizando cámara de pozo.

Tabla 31. Incertidumbres de medidas tomadas a HV 100%.

(HV 100%) +400 V					
Medida	I (nA)	P (kPa)	T (°C)	K_{TP}	M_u
1	21.44	99.34	18.5	1.015	21.751146
2	21.43	99.34	18.5	1.015	21.741001
3	21.44	99.34	18.5	1.015	21.751146
4	21.44	99.34	18.5	1.015	21.751146
5	21.43	99.34	18.5	1.015	21.741001
Promedio	21.44	99.34	18.5	1.015	21.747088
Desviación estándar	5.48E-03	0	0	0	5.56E-03
U_A	2.45E-03	0	0	0	2.49E-03
U_B		0,28	0,17	0,0028	

Tabla 32. Incertidumbres de medidas tomadas a HV 50%.

(HV 50%) +200 V					
Medida	I (nA)	P (kPa)	T (°C)	K _{TP}	M _u
1	21.43	99.34	18.5	1.015	21.74
2	21.42	99.34	18.5	1.015	21.73
3	21.43	99.34	18.5	1.015	21.74
4	21.43	99.34	18.5	1.015	21.74
5	21.42	99.34	18.5	1.015	21.73
Promedio	21.43	99.34	18.5	1.015	21.74
Desviación estándar	5.48E-03	0	0	0	5.56E-03
U_A	2.45E-03	0	0	0	2.49E-03
U_B		0,28	0,17	0,0028	

Para las magnitudes que ameritan incertidumbre tipo B se estimará de distinta manera. Un método de evaluación tipo B es Incertidumbre debida al instrumento calibrado, esta incertidumbre típica se obtiene dividiendo la incertidumbre expandida dada en el certificado de calibración del patrón por el factor de cobertura indicado [13]:

$$u(p) = \frac{U(p)}{k} \quad \text{Ecuación 8}$$

Método por el cual han sido determinadas las incertidumbres para las magnitudes que no pueden ser obtenidas mediante la observación.

En cuanto a la incertidumbre estándar de la corrección de la densidad del aire se expresa en términos de incertidumbre estándar de presión y temperatura:

$$\frac{u_{k_{TP}}}{k_{TP,m}} = \sqrt{\frac{u_p^2}{p_m^2} + \frac{u_T^2}{(273.15 + T_m)^2}} \quad \text{Ecuación 9}$$

En cuanto a la recombinación de iones es esencialmente la misma para todas las mediciones realizadas de tasa de Kerma en aire de dicha fuente, siempre que la cámara se use siempre con el mismo potencial de polarización; por lo tanto, la contribución a la incertidumbre de las variaciones en la recombinación de iones es despreciable.

En cuanto a la incertidumbre asociada por el Nsk para la determinación de la evaluación tipo B se realizó mediante la ecuación 8 que da como resultado 1.7.

El resultado de las incertidumbres asociadas a las magnitudes físicas determinadas mediante mediciones experimentales. Dichas magnitudes están asociadas a los siguientes factores: factor de corrección por presión y temperatura (K_{TP}), factor de calibración de la cámara (Nsk), factor de corrección por los iones de la cámara (K_{recom}); a la incertidumbre de estas magnitudes se les aplico la **ecuación 16** a si se obtuvo la incertidumbre combinada 1,7% este resultado está dentro del 5% aprobado por el protocolo del OIEA TECDOC-1151 para la magnitud medida de Tasa de referencia de Kerma en aire (K_R).

La incertidumbre antes presentada de temperatura y presión fue determinada mediante la ficha técnica proporcionada del equipo mediante la evaluación rectangular. Los métodos empleados para el cálculo de incertidumbre se presentan en el **Anexo V**.

El conocimiento de las incertidumbres en una medición resultan importantes ya saber qué tan precisa es una medición y que tan significativo es el resultado. Para asegurar la confiabilidad de los resultados es importante realizar la trazabilidad y la estimación de la incertidumbre en las mediciones. Esto implica el uso de materiales e instrumentos de medición calibrados, o en su defecto, verificados con patrones de estándares primarios, como se mencionó en el capítulo anterior la trazabilidad de esta calibración es secundaria.

Capítulo V

16. Análisis y Discusión.

Las pruebas de seguridad fueron las primeras en realizarse al momento de la instalación de la fuente, en estas mediciones se obtuvieron buenos resultados, ya que la verificación del funcionamiento del indicador de salida de la fuente constató que cada uno de los indicadores ubicados fuera y dentro de la sala de tratamiento se encuentra en el correcto funcionamiento.

La verificación del funcionamiento de los interruptores de emergencia se comprobó que el regreso de la fuente hacia el contenedor de la unidad de tratamiento es efectivo al presionar cualquiera de los interruptores habilitados; de igual forma cuando el interbloqueo de la puerta no está asegurado o es abierto durando una exposición.

El monitor de radiación de la sala de tratamiento está en estado funcional, ya que detecta los niveles de tasa de dosis en la sala al momento de irradiación.

El sistema de intercomunicación y video vigilancia con el paciente esta perfecta en funcionalidad para cualquier interacción desde la estación de control hacia la sala de tratamiento.

La posición de las llaves en la consola muestra que únicamente puede ejecutarse sus funciones en permitir la liberación o salida de la fuente una vez que se coloca las llaves para modo operación en la consola del panel de control.

La verificación del correcto funcionamiento del temporizador se llegó a constatar que el tiempo del temporizador, el cual fue programado con 1 minuto corresponda al mismo del cronómetro que se utiliza manualmente variando en $\pm 0,01\text{min}$, por lo que está dentro de los niveles de tolerancia de 1%.

En la determinación del factor de decaimiento de la fuente, se comprobó que el factor de

decaimiento de la fuente que reporta el sistema de SagiNova con respecto al calculado manualmente para una fecha aleatoria como se muestra en los resultados tiene 0,0 % de discrepancia relativa.

En la verificación del funcionamiento de la selección del correcto canal de tratamiento se verificó que no se puede dar tratamiento si el tubo de transferencia o la guía de conducción no se encuentra en el canal programado, puesto que se presenta un mensaje que indica el error en el panel de control; es por ello que se puede evidenciar que se encuentra en correcto funcionamiento.

En la prueba de radiación de fuga se verifico el nivel de fuga en contacto con la superficie de la TDU (5cm) de la unidad de tratamiento SagiNova, determinándose un valor de 11,1 $\mu\text{Sv/h}$ el cual se encuentra dentro del valor de tolerancia establecido como referencia que es 11,5 $\mu\text{Sv/h}$.

En la realización de monitoreo de área de acuerdo a los resultados de la tabla 4, tomando en cuenta que un Trabajador Ocupacionalmente Expuesto trabaja 8 horas al día, cinco días a la semana, 50 semanas al año y sabiendo que el límite de dosis anual para TOEs es de 20 mSv/año. Se estimó que la tasa de dosis permitida en el área debería ser menor o igual 10 $\mu\text{Sv/h}$, por lo que todas las áreas donde permanece los TOEs, está por debajo de los 3 $\mu\text{Sv/h}$. El punto número 1 se realizó con el fin de estimar la dosis en caso de que la fuente no retorne a su lugar de resguardo, y se tenga que realizar una intervención para sacar al paciente y retornar la fuente manualmente a la posición de resguardo; por lo tanto, se puede asegurar que los Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos pueden trabajar en las áreas asignadas sin ningún peligro de dosis fuera de los límites establecidos por la NCRP ya que las tasas de dosis encontradas fueron menor al 3 $\mu\text{Sv/h}$.

En cuanto a las pruebas mecánicas se verifica que cada una de estas demuestra que el sistema mecánico del equipo se encuentra en óptimas condiciones para el debido funcionamiento; ya que al verificar la integridad de los tubos de transferencia, guías conductoras y aplicadores se pudo observar su buen estado, sin obstrucciones algunas, quiebres o abolladuras.

La verificación del funcionamiento de la manivela del retorno manual de la fuente también se verificó su estado funcional para cualquier emergencia necesaria esta pueda ser utilizada para resguardar la fuente.

La prueba del posicionamiento de la fuente se obtuvieron resultados dentro de las tolerancias establecidas, ya que en ninguno de los casos estuvo fuera del valor de ± 2 mm, mediante el posicionamiento óptico la fuente este se puede corregir su localización y así no sobrepasar los niveles de tolerancia, en cuanto al posicionamiento mediante uso de película radiocrómica las posiciones programadas con respecto a las medidas fueron menor a 1 mm.

En las pruebas dosimétricas se puede verificar que el punto de máxima de eficiencia dentro de la cavidad de la cámara de pozo según la tabla 11 corresponde a 53,4 mm, resultado que garantiza con su verificación la buena respuesta de la cámara ya que depende fuertemente de la ubicación de la fuente y de su orientación exacta dentro del pozo. La tasa de referencia de Kerma de la fuente reportada por el fabricante es de 21,91 mGym²/h para la fecha de referencia del 24 de enero de 2018, este valor está reportado con una incertidumbre de 3,2 %. De este modo las tasas de Kerma en las fechas 26 de marzo 2018 mediante cámara de pozo y 28 de marzo de 2018 mediante cámara Farmer, resultarán ser según la referencia de 21,43 y 21,42 mGym²/h respectivamente. Como se muestran los resultados en la tabla 22 de las mediciones por ambos métodos resultaron ser 21,01 mGym²/h y 20,79 mGym²/h. En ella se expresan las discrepancias de las mediciones respecto al valor de referencia por el fabricante. Como se aprecia en ninguno de los casos las discrepancias superaron el 3%. Es de notar que en ambos los valores medidos fueron menores a los reportados por el fabricante. Las discrepancias entre el valor medido en aire con cámara Farmer respecto al obtenido con la cámara de pozo es de 0,76%.

En cuanto a la linealidad y tiempo de entrada-salida de la fuente podemos observar de acuerdo a la gráfica 2, que el valor del cuadrado del coeficiente de correlación lineal es igual a la unidad (0.999) por lo cual la dependencia entre estas magnitudes es lineal. Así mismo el intercepto de la recta con el eje de los tiempos nos indica que existe un retardo de 0,21

segundos en el temporizador del equipo correspondiente tiempo de entrada-salida, por lo tanto, de esta manera se confirma que existe linealidad en la dosis impartida por el equipo.

Con respecto a la ubicación de la fuente en la primera parada del aplicador (correspondencia tip-distance), según los resultados e imágenes presentadas, analizadas mediante ImageJ, se muestra que la máxima discrepancia encontrada es de 3,9%.

17. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, llegamos a la siguiente conclusión.

En primer lugar las pruebas que se realizaron para verificar la funcionalidad de los aspectos mecánicos de la unidad resultaron estar correctas y funcionales en su totalidad; en cuanto a las pruebas de seguridad, que ayudan a garantizar la seguridad radiológica del trabajador ocupacionalmente expuesto y el paciente, los resultados fueron satisfactorios corroborando que existen las condiciones necesarias en toda área de braquiterapia, tomando en cuenta que se posee un procedimiento de emergencia (Ver anexos) el cual puede ser efectuado en caso de no retraerse la fuente.

En cuanto a la determinación de la tasa de referencia de Kerma en aire (K_r) se mostró un valor K_r medido 21,01[mGym²/h] mediante cámara de pozo y K_r medido 20,79 [mGym²/h] mediante cámara Farmer; que difieren del valor K_r de referencia -1.96% y -2.9% respectivamente, valores que están dentro del rango de tolerancia comparados por el certificado de la fuente que acepta $\pm 5\%$. Lo que concluye que la fuente esta apta para ser utilizada en el software del sistema de planificación para brindar tratamiento clínico.

Con respecto a la comparación entre valores medidos mediante cámara Farmer y cámara de Pozo según la tabla 23, la discrepancia entre los resultados es de 0,76%, por lo tanto, se puede concluir que en caso de no contar con alguna de ellas en específico, puede ser utilizada la otra para realizar la medición de la tasa de referencia de Kerma en aire; siempre y cuando sea seguida la información de los protocolos y formalismos que en este caso fueron utilizados [6, 9 y 10] los cuales permitieron obtener medidas confiables.

Por último se puede concluir que en cuanto a la correspondencia del Tip-distance los valores medidos en comparación con los de referencia proporcionados por el fabricante la discrepancia encontrada es de 3,9% (0,27mm) por lo que se encuentra dentro de los valores de tolerancia permitidos.

Habiendo garantizado la calidad de todos los aspectos tanto mecánicos, dosimétricos y de seguridad que intervienen en los procesos de puesta en servicio, la efectividad y la seguridad

de los mismos reduciendo así la probabilidad de accidentes, se puede concluir que la unidad de Braquiterapia de alta tasa de dosis con fuente de ^{60}Co SagiNova, es apta para brindar servicio clínico con la esperanza de asegurar la sobrevivencia de las pacientes, habiéndose minimizado los errores dosimétricos.

18.Recomendaciones.

Para el funcionamiento adecuado del área de braquiterapia, es necesario que se tome en cuenta los siguientes aspectos:

- Se capacite a todo el personal que en algún momento pudieran desempeñarse en el área, tanto físicos médicos, enfermeras, técnicos.
- Brindar al personal ocupacionalmente expuesto detalles de lo que es un plan de emergencia, presentar todos los escenarios de posibles incidentes y acciones a realizar.
- Garantizar el programa de retorno de fuente en desuso al proveedor al momento de un recambio de fuente.

19. Bibliografía

- [1] AAPM. (1995). Dosimetry of interstitial brachytherapy sources (Vol. 22). USA: AAPM.
- [2] Andrásy, M., Niatsetsky, Y., & Pérez, J. (2012). Co-60 frente a Ir-192 en braquiterapia de alta tasa de dosis: comparación científica y técnica. *Journal of Medical Physics.*, 125-130.
- [3] Baltas, D., Sakelliou, L., & Zamboglou, N. (2006). *The physics of modern brachytherapy for oncology*. Taylor & Francis Group.
- [4] Eckert & Ziegler BEBIG . (2017). *Manual de usuario SagiNova®*. Alemania: Eckert & Ziegler BEBIG.
- [5] Eckert & Ziegler BEBIG. (2017). *HDR Applicators & Accessories*. Alemania: Eckert & Ziegler BEBIG.
- [6] ESTRO. (2004). *Booklet N°8: A Practical Guide To Quality Control Of Brachytherapy*. Belgium: ESTRO.
- [7] Khan, F. (2010). *The Physics of Radiation Therapy (Cuarta ed.)*. Minnesota.
- [8] Morales López, J., Peña Sequeira, E., & Et Al. (2010). *INFORME DE ACEPTACION Y PUESTA EN SERVICIO EQUIPO: MICROSELECTRON HDR v2*. Managua, Nicaragua.
- [9] OIEA. (2000). *Aspectos físicos de la garantía de calidad en radioterapia: Protocolo de control de calidad*. (Vol. TECDOC 1151). Viena: OIEA.
- [10] OIEA. (2004). *Calibración de fuentes de fotones y rayos beta usadas en braquiterapia*. (Vol. TECDOC 1274). Viena: OIEA.
- [11] OIEA. (Mayo 2008). *Measurement Uncertainty*. Tecdoc 1585. Viena, Austria.
- [12] Palmer, A., PHayman, O., & et Al. . (2016). *Commissioning and Quality Control of the New Saginova HDR Treatment System; First Year Experience from the United Kingdom*.
- [13] Pérez Hernández, M. (2012). *Estimación de incertidumbres*. Guía GUM. España.
- [14] Portillo Morales, R. (2017). *Commissioning of a mHDR Brachytherapy System and Implementation of Transit Dose calculation*. Ancona, Italy.
- [15] R., S. V. (2016). *Calibración de una fuente radiactiva de Iridio-192, expresada en términos de intensidad de Kerma en aire para ser implementada en el servicio de braquiterapia del instituto del cáncer de El Salvador*. Ciudad Universitaria. .
- [16] Sociedad Española de Física Médica. (2014). *Fundamentos de Física Médica; Braquiterapia: bases físicas, equipos y control de calidad*. (Vol. 5). España.
- [17] Velasco Vázquez, A., & Rivera Montalvo, T. (2008). *Calibración de una Fuente de Iridio-192, Requisito para la Garantía de Calidad en Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis*. . Mexico D.F.

20. Anexos I.

Certificado de la fuente radiactiva.

**Zertifikat für umschlossene radioaktive Stoffe
(Afterloader-Quellen)
Certificate for sealed radioactive sources
(afterloading sources)**



Allgemeine Angaben general information				
Zertifikat-Nr. certificate no.	Kunde customer			Auftragsnummer order no.
60418	Centro Nacional de Radioterapia (CNR), Managua, Nicaragua			BBD-SO-17-00704
Produkt-Code product code	Quellennummer (Bezeichnung als Hochradioaktive Quelle) source no. (high-activity-sealed-source no. - HASS)			zertifiziert als radioakt. Stoff in besonderer Form special form certificate
Co0.A86	BB-AC720			n.a.
Nuklid nuclide	Nominalaktivität nominal activity [GBq]	Betriebsbeschränkung [Zyklen] limitation of use [transfers]	empfohlene Nutzungsdauer ^a recommended working life ^a	ISO-Klassifikation ISO- classification
Co-60	74	100 000	5 years	ISO/12/C65444

Mess- und Prüfbericht weitere Informationen siehe Rückseite test report see over leaf for more information.
--

Referenz Luftkerma Leistung ^b Reference air-kerma rate ^b	scheinbare Aktivität ^c apparent activity ^c		Referenzdatum reference date
[mGy/h]	[GBq]	[Ci]	
21.91	71.60	1.94	2018-01-24
Sichtprüfung visual test	Dichtheitsprüfung leakage test		Kontaminationstest contamination test
Datum date passed	Datum date passed		Datum date passed
2018-01-18	2018-01-18		2018-01-18

Bemerkungen, Anlagen notes, annexes
Datumsformat: <u>jjj</u> -mm-tt Date format: <u>yyyy</u> -mm-dd

Dieses Zertifikat entspricht den Anforderungen nach ISO 2919 This certificate complies with the requirements of ISO 2919			
Ausstellungsdatum date of issue	2018-01-24	Unterschrift signature	Name name
			Marja Schlich

Eckert&Ziegler BEBIG GmbH•Robert-Rössle-Str.10•13125 Berlin•Germany•Tel.+49-30-941084-0•Fax +49-30-941084-112•e-mail:info@bebig.com

HDR-Afterloader-Strahler

Die zertifizierten HDR-Strahler wurden für die Afterloader d- Eckert&Ziegler BEBIG GmbH entwickelt. Ihre Bauart wird durch ihren Produktcode spezifiziert. Weitere Details sowie Informationen zur Anwendung sind der Gebrauchsanweisung des Gerätes zu entnehmen.

Zur Bestimmung der Quellstärke der Strahler wird die Referenz-Luftkerma-Leistung⁽¹⁾ $\dot{K}_{ref} = (\dot{K}_{A,100})_0$ in einer Schachlonisationskammer gemessen. Die Angabe der Quellstärke als Luftkerma-Stärke nach AAPM TG-43 erhält man durch folgende Äquivalenz:

$$\frac{S_A}{[U]} = \frac{\dot{K}_{ref}}{[mGy/h]} \cdot \frac{d_0^2}{[m^2]} \cdot 10^3$$

⁽¹⁾ Die „scheinbare Aktivität“ wird durch Division der Messgröße durch die entsprechende Konstante der Luftkermaleistung Γ_2 berechnet.

Tabelle 1:

Nuklid	$T_{1/2}$ in d	Γ_2 in $\mu\text{Gym}^2\text{h}^{-1}\text{GBq}^{-1}$
Co-60	1925,3	306

Die scheinbare Aktivität kann für dieses Nuklid mit ausreichender Genauigkeit auch an Stelle der enthaltenen Aktivität verwendet werden.

Das verwendete Messgerät wird regelmäßig kalibriert, wobei die Kalibrierung auf die Primärstandards der PTB Deutschland rückführbar ist. Die relative kombinierte Messunsicherheit $u(\dot{K}_{ref})/\dot{K}_{ref}$ und wird in Tabelle 2 für den Vertrauensbereich 95% angegeben.

Tabelle 2:

Typ	$u(\dot{K}_{ref})/\dot{K}_{ref}$ in %
Co0.A86	3,2

Vor der Auslieferung erfolgt bei allen Strahlern eine Prüfung gem. ISO 9978 auf Dichtheit und Oberflächenkontamination. Die Tests sind in Tabelle 3 mit Bezug auf die Kapitel dieser Norm spezifiziert.

Tabelle 3:

Typ	Dichtheitstest	Oberflächen-Kontaminationstest
Co0.A86	5.1.2	5.3.1

⁽²⁾ Die Lebensdauer ist limitiert durch die maximale Anzahl der Fahrzyklen und maximal 5 Jahren Nutzung unter normalen Betriebsbedingungen und unter Verwendung von freigegebenen Applikatoren und unter Einhaltung der Systemspezifikation.

HDR-Afterloading Sources

Eckert&Ziegler BEBIG GmbH afterloading units. Their source type is specified by the product code. For additional details as well as information on application refer to the instructions for use of the unit.

In order to determine the source strength, the reference air-kerma rate⁽¹⁾ $\dot{K}_{ref} = (\dot{K}_{A,100})_0$ is measured in a well-type ionisation chamber. Conversion to air-kerma strength according to AAPM TG-43 is defined by the following relation:

$$\frac{S_A}{[U]} = \frac{\dot{K}_{ref}}{[mGy/h]} \cdot \frac{d_0^2}{[m^2]} \cdot 10^3$$

⁽¹⁾ The "apparent activity" is calculated by dividing the measured value by the corresponding air kerma rate constant Γ_2 .

table 1:

nuclide	$T_{1/2}$ in d	Γ_2 in $\mu\text{Gym}^2\text{h}^{-1}\text{GBq}^{-1}$
Co-60	1925.3	306

For this nuclide, data of "apparent activity" may be also used as contained activity with sufficient accuracy.

The measuring device is periodically recalibrated. The calibration is traceable to the primary standards of the PTB Germany. The relative combined uncertainty $u(\dot{K}_{ref})/\dot{K}_{ref}$ is stated in table 2 with confidence level 95%.

table 2:

type	$u(\dot{K}_{ref})/\dot{K}_{ref}$ in %
Co0.A86	3.2

Before shipment, all sources are checked for leak tightness and surface contamination, according to ISO 9978. The tests are specified in table 3 with reference to the corresponding chapter of this standard.

table 3:

type	Tightness	Surface-contamination
Co0.A86	5.1.2	5.3.1

⁽²⁾ The source lifetime is limited due to the maximum number of duty cycles and a maximum of 5 years of use under normal operating conditions with approved applicators and in accordance with device specifications.

ANEXO II. Certificado cámara de pozo.

CALIBRATION CERTIFICATE No. 1704706 (on a comparison measurement)



PTW-Freiburg, Lörracher Str. 7, 79115 Freiburg, Germany ☎ +49-(0)761- 49055-0 FAX +49-(0)761- 49055-70 E-Mail info@ptw.de

Calibration Object

Radiation Detector

Detector [REF] TW33005 [SN] 121825
Detector Type Ionization Chamber

Manufacturer PTW-Freiburg

Customer Canberra Packard
Central Europe GmbH
Wienersiedlung 6
A-2432 Schwadorf

Order No. : AU1703793
Order Date : 2017-11-22

Calibration Results

Calibration Factor for Isotope ^{192}Ir Source Types:
Nucletron microSelectron® / Nucletron microSelectron V2® /
Nucletron Flexitron®
in combination with PTW-Adapter type: T33002.1.009

Reference Air Kerma Rate	$N_{\text{RAKR}} = 9.124 \cdot 10^5 \text{ Gy m}^2 \text{ h}^{-1} \text{ A}^{-1}$
Apparent Activity	$N_{\text{AA}} = 8.295 \cdot 10^{18} \text{ Bq A}^{-1}$ or $N_{\text{AA}} = 2.242 \cdot 10^8 \text{ Ci A}^{-1}$

Source Type Correction Table

Isotope	Source Type	Correction Factor (k_{Source})
^{192}Ir	Eckert&Ziegler BEBIG Ir2.A85-2	1.0000
^{192}Ir	MDS Nordion GammaMed / Varian GammaMedPlus	0.9961
^{192}Ir	Varian Varisource	0.9829
^{60}Co	Nucletron Flexisource Co60	1.0330
^{60}Co	Eckert&Ziegler BEBIG Co0.A86 / Eckert&Ziegler BEBIG GK60M21	1.0340

Source type correction according: $N_{\text{Source}} = N_{\text{RAKR}} \times k_{\text{Source}}$

Uncertainty of comparison measurement 2.8 % (for Nucletron ^{192}Ir source types)
3.0 % (for all other ^{192}Ir source types)
3.4 % (for ^{60}Co source types)

Calibration Date 2017-10-24
Recalibration Interval 2 years (recommended)

Freiburg, 2017-12-19

PTW-Freiburg
Physikalisch-Technische
Werkstätten Dr. Pychlau GmbH

(Signature)

Reference Conditions

Temperature:	293.2 K (20°C)
Air Pressure:	1013.25 hPa
Relative Humidity:	50%
Chamber Voltage/Polarity:	+ 400 V

Measurement Conditions and Set-up

Climatic Conditions	Temperature Range:	(294.2 ± 3) K / (21 ± 3) °C
	Air Pressure Range:	(1000 ± 50) hPa
	Rel. Humidity Range:	(40 ± 20) %
Irradiation Conditions	Isotope:	¹⁹² Ir
	Source Activity:	approx. 5 Ci or 185 GBq
	Comparison Reference:	TW33004-00237
Detector Arrangement	Reference point position at approx. 95 mm below the upper edge of the chamber well (refers to the position with the maximum reading). (For further information see manual and data sheet of detector.)	
Leakage	Negligible during calibration	

Adapter/Applicator Correction

Adapter	Applicator	$k_{\text{Applicator}}(^{192}\text{Ir})$	$k_{\text{Applicator}}(^{60}\text{Co})$
T33002.1.009	-	1.000	1.000
T33004.1.011 / .012 / .013	LAA 1400-GYN Ø 3 mm	1.019	1.024
T33004.1.012	4.7Fr VariSource Plastic Tipped Catheter	1.019	1.024
T33004.1.012	Varian GM11002070 Ø 3 mm	1.029	1.027
T33004.1.013	11-00207 3 mm Ø steel applicator	1.029	1.027
-	Steel needle Ø 1.7 mm	0.986	0.976

Adapter/Applicator correction according: $N_{\text{App}} = N_{\text{Source}} \times k_{\text{Applicator}}$

Remarks

- The uncertainty stated corresponds to the double standard deviation ($k=2$). The uncertainty of the calibration was calculated according to ISO GUM from the partial uncertainties arising from the standards used, the calibration procedure, the environmental conditions and short time effects of the object of measurement. The overall uncertainty of a measurement is composed of the uncertainty of the calibration as well as uncertainty contributions that are caused by deviations from the reference conditions. A share for the long term instability of the object under calibration is not included.
- The comparison measurement is traceable to national standards of the German National Laboratory, PTB, Braunschweig. This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. This certificate is valid only with the detector showing the intact sticker with the calibration certificate number. The calibration factors of instruments having been opened for repair are not comparable to previous calibrations. Test certificates without signature are not valid.
- The reference calibration factor is the one for *Reference Air Kerma Rate*.
- The ¹⁹²Ir conversion coefficient used between the *Reference Air Kerma Rate* calibration factor and the *Apparent Activity* calibration factor is $9.091 \cdot 10^{12} \text{ Gy}^{-1} \text{ h m}^{-2} \text{ Bq}$. All ¹⁹²Ir decay calculations are based on a half life time of 73.83 days.
- The ⁶⁰Co conversion coefficient used between the *Reference Air Kerma Rate* calibration factor and the *Apparent Activity* calibration factor is $3.273 \cdot 10^{12} \text{ Gy}^{-1} \text{ h m}^{-2} \text{ Bq}$. All ⁶⁰Co decay calculations are based on a half life time of 1925.3 days.
- The chamber is vented to atmospheric communication. Air density correction is necessary.
- The calibration object fully complies with the specifications given in the data sheet and user manual.
- The $k_{p,0}$ refers to the ¹⁹²Ir apparent activity calibration factor (N_{AA}). The current check source value (k_n) is to be obtained by calculating the product of the ¹⁹²Ir calibration factor N_{AA} and the electrometer reading (detector current). Before comparing with the k_n value the $k_{p,0}$ value has to be corrected with respect to the time elapsed and the half life time of the check source isotope ($\rightarrow k_p$).

ANEXO III. Certificado de calibración cámara Farmer.

International Atomic Energy Agency

Calibration certificate No. NIC/2016/3

The following instruments from **Centro Nacional de Radioterapia**
Managua, Nicaragua
 have been calibrated at the IAEA Dosimetry Laboratory:

	Ionization chamber	Electrometer
Model/type:	PTW-30013	UNIDOS Webline
Serial number:	#8622	#513
Manufacturer:	PTW	PTW
Calibration period:	from 2015-Oct-07	to 2016-Jan-12

Calibration coefficients in terms of air kerma

The calibrations have been performed following the procedure given in Appendix 3A "Radiotherapy Ionization Chamber Calibration Procedures at the IAEA Dosimetry Laboratory". The IAEA reference standard chamber NE-2611 (#211) used to calibrate the instruments had been calibrated at the BIPM in October 2013 for ^{60}Co gamma radiation

Radiation quality	Chamber	Chamber + electrometer	\dot{K}_{air}
	N_K [mGy/nC]	N_K [mGy/scale unit]	[mGy/min]
^{60}Co γ -rays*	49.11 \pm 0.40	49.09 \pm 0.40	401

*In ^{60}Co γ -rays the chamber is fitted with the build up cap.

Uncertainties in the calibration coefficients correspond to a coverage factor, $k = 2$. The calibration coefficients are established at the reference conditions $T = 20.0$ °C, $P = 101.325$ kPa and R.H. = 50.0 %.

Settings during the calibration (see Appendix for details):

Electrometer settings at calibration:	Low 271 pA, -400 V
Scale unit:	nC
Polarizing Voltage:	-400 V
Polarizing Voltage for chamber calibration (alone):	+400 V (applied to the collector)



Ahmed Meghziene
 Head, Dosimetry and Medical
 Radiation Physics Section

Date of issue: 2016-03-01

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor $k = 2$, which for a normal distribution corresponds to a level of confidence of approximately 95 %. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with ISO guidelines (1995).

This certificate is consistent with the Agency's capabilities that are recorded in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement capabilities specified in Appendix C (for details, see <http://www.bipm.org>).

The Dosimetry Laboratory of the International Atomic Energy Agency is the central laboratory of the IAEA/WHO network of Secondary Standards Dosimetry Laboratories (SSDLs). It provides calibration services to the SSDL members. The Dosimetry Laboratory is operated following a peer-reviewed quality system based on ISO-17025.

To sustain its quality system and contribute to the coherence of the SI unit for ionizing radiation, the IAEA participates regularly in comparisons organized by regional metrology organizations.

This certificate contains 2 pages and an Appendix*. It may not be reproduced other than in full. A calibration certificate without a signature and the date of issue is not valid.

International Atomic Energy Agency
Dosimetry and Medical Radiation Physics Section
Division of Human Health
Wagramer Strasse 5, PO Box 100, A-1400
Vienna, Austria
dosimetry@iaea.org

* The appendix can be downloaded from the Internet: <http://www-naweb.iaea.org/nahu/dmrp/ssdl.asp>

ANEXO IV. Resultados de medición de Tasa de referencia de Kerma en aire mediante cámara de ionización tipo Pozo en control semestral.

Valores utilizados en las condiciones de medición.

I (nA)	19,87
T (°C)	21,6
P(kPa)	99,42
Ktp	1,024
Krec	1,000
Nsk (mGy m² h⁻¹ nA⁻¹)	0,9124
Kr ref. actual (28/09/2018) [mGym²/h]:	20,05

Mediciones tomadas con HV 100% (400 Volt)

t (s)	M (nC)	I (nA)
60	1191	19,85
60	1192	19,87
60	1192	19,87
60	1192	19,87
60	1193	19,88
60	1193	19,88
	Promedio=	19,87

Mediciones tomadas con HV 50% (200 Volt)

t (s)	M (nC)	I (nA)
60	1190	19,83
60	1191	19,85
60	1192	19,87
60	1192	19,87
60	1192	19,87
60	1192	19,87
	Promedio=	19,86

Tasa de referencia de Kerma en aire.

Kr medido (28/09/2018) [mGym²/h]	Disc. [%]
19,67	-1,87

ANEXO V. Métodos para la evaluación de incertidumbres.

La contribución de los diferentes componentes de incertidumbre identificados en una medición, se puede emplear usando una de dos maneras, las cuales consisten en determinar o asociar una distribución de probabilidad (distribución uniforme triangular o normal, caracterizada por su media y varianza) a los valores de dichos componentes. A continuación se describen estas formas de evaluación.

Evaluación Tipo A

Es aquella que evalúa las incertidumbres por métodos estadísticos de una magnitud que varía de manera aleatoria a partir de una serie de **n** observaciones experimentales. En este caso la mejor estimación de la incertidumbre estándar de dicha magnitud, se obtiene por medio de la desviación experimental de la medida de **n** observaciones.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ecuación 10}$$

La dispersión de los **n** valores medidos, x_i , alrededor de la media \bar{x} puede caracterizarse por la desviación típica. [11]

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

y la magnitud $S^2(x_i)$ se llama varianza de la muestra.

Frecuentemente interesa la desviación típica del valor medio, que se escribe como $S(\bar{x})$, para la que se aplica la relación general. [11]

$$s(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{n}} s(x_i) \quad \text{Ecuación 12}$$

La incertidumbre típica de tipo A, denotada aquí como U_A , se identificará con la desviación típica del valor medio; es decir. [11]

$$u_A = s(\bar{x})$$

No se puede esperar que una determinación empírica de una incertidumbre arroje su valor verdadero; por definición es solamente una estimación. Esto es así para ambos tipos de incertidumbres, A y B.

Evaluación Tipo B

La evaluación Tipo B de la incertidumbre típica es la evaluación de la incertidumbre asociada a un estimado X_i de una magnitud de entrada X_i por otros medios distintos al análisis estadístico de una serie de observaciones. La incertidumbre típica U_{X_i} se evalúa aplicando un juicio científico basado en toda la información disponible sobre la posible variabilidad de X_i . Los valores que caigan dentro de esta categoría pueden derivarse de:

- Datos obtenidos de mediciones anteriores.
- Experiencia o conocimientos generales sobre el comportamiento y las
- Propiedades de los materiales e instrumentos relevantes.
- Especificaciones de los fabricantes.
- Datos obtenidos de calibraciones y de otros certificados.
- Incertidumbres asignadas a los datos de referencia obtenidos de manuales.

El uso apropiado de la información disponible para una evaluación Tipo B de la incertidumbre típica de medición exige un juicio basado en la experiencia y en conocimientos generales. Es una destreza que puede adquirirse con la práctica.

Algunas veces se supone, fundamentalmente con el objetivo de simplificar, que las incertidumbres de tipo B pueden describirse mediante una densidad de probabilidad rectangular, esto es, que tienen la misma probabilidad en cualquier lugar dentro de los límites máximos $-M$ y $+M$. Puede demostrarse que con esta suposición la incertidumbre típica de tipo B, U_B , viene dada por:

$$u_B = \frac{M}{\sqrt{3}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Alternativamente, si se supone que la distribución es triangular (con los mismos límites), nos lleva a la relación

$$u_B = \frac{M}{\sqrt{6}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Otra suposición es que las incertidumbres de tipo B tengan una distribución aproximadamente Gaussiana (normal). Bajo esta suposición, las incertidumbres típicas de tipo B se pueden obtener estimando primero ciertos límites $\pm L$ y luego dividiendo ese límite por un número adecuado. Si, por ejemplo, el experimentador está bastante seguro del límite L , puede considerarse que corresponde aproximadamente al límite de confianza del 95%, mientras que si está casi seguro se puede considerar que corresponde aproximadamente a un límite de confianza del 99%. De esta manera, la incertidumbre típica de tipo B, U_B , se puede obtener de la ecuación

$$u_B = \frac{L}{k} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde $k = 2$ si el experimentador está bastante seguro y $k = 3$ si está casi seguro de sus límites estimados $\pm L$. Estas relaciones corresponden a las propiedades de una distribución Gaussiana y normalmente no vale la pena aplicar otros divisores que 2 ó 3, dada la naturaleza aproximada de la estimación.

Incertidumbre típica combinada (U_c)

Es la incertidumbre estándar del resultado de una medición evaluada a través de la ley de propagación de incertidumbre. Esta ley combina apropiadamente todas las incertidumbres aportadas por las magnitudes que influyen sobre el resultado de las mediciones.

Ya que las incertidumbres de tipo A y B son ambas desviaciones típicas estimadas, se combinan usando las reglas estadísticas para la combinación de varianzas (cuadrados de las desviaciones típicas). Si U_A y U_B son las incertidumbres típicas de tipos A y B respectivamente, para el cálculo de incertidumbres combinada según la regla de propagación de incertidumbres se relaciona de acuerdo a como se va a obtener el resultado si es por suma o resta se efectúa mediante la siguiente ecuación:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad \text{Ecuación 16}$$

ANEXO VI. Procedimiento de Emergencia.

