

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
Departamento de Física



Automatización de un sistema de medición de productos de fisión de elementos combustibles tipo MTR de bajo enriquecimiento (LEU) usados en el reactor de investigación RECH-1 del Centro de Estudios Nucleares La Reina, con el objetivo de generar un perfil axial de actividad mediante espectrometría gamma, utilizando como monitor el isótopo de Cs-137

Jorge Arturo Sandoval Caro

Profesores Guías:

Ernesto Gramsch Labra

Carlos Henríquez Acosta

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Físico.

Santiago – Chile

2018

©Jorge Arturo Sandoval Caro, 2018.

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial Chile 3.0

HOJA DE CALIFICACIÓN

RESUMEN

En este trabajo de titulación se diseñaron e implementaron mejoras en un montaje experimental destinado al muestreo de productos de fisión formados en los elementos combustibles irradiados del RECH-1, que sirven para estimar el nivel de gasto o quemado de U-235, mediante espectrometría gamma. El objeto de las mejoras es automatizar el proceso de adquisición de datos, para optimizar las horas-hombre del personal del reactor y disminuir su exposición a radiaciones ionizantes.

Desde el punto de vista mecánico, las mejoras incluyeron la modificación, diseño y construcción de nuevos componentes del montaje experimental. Se incorporaron mecanismos tornillo-tuerca accionados por motorreductores, para desplazar un detector de Germanio hiperpuro dentro de un plano XY, y poder obtener espectros gamma de elementos combustibles en un barrido discreto.

En cuanto a la electrónica, se construyó un dispositivo denominado UCM para coordinar los desplazamientos del detector y la obtención de espectros en un barrido configurado por un operador. Además, se dotó a este dispositivo de fines de carreras, para asegurar que el detector se mueva dentro de ciertos límites, resguardando así la integridad del montaje y otorgando referencias para que el sistema se ubique en el plano de muestreo.

Finalmente, el soporte informático del sistema automatizado se sustentó en dos programas: El primero de ellos es ejecutado en el computador del montaje y tiene la función de servir de interfaz con el usuario, permitiendo que los operadores ingresen los parámetros necesarios para el muestreo de un elemento combustible. Además, ejecuta instrucciones para obtener los espectros gamma durante el barrido. El segundo, es un script de soporte de la UCM, para que desarrolle las funciones por las que fue diseñada.

Tras finalizar la intervención del montaje experimental original, se utilizó un elemento combustible ya gastado con un tiempo de enfriamiento de al menos 7 años, para las pruebas de operación. Debido a este tiempo de enfriamiento, se utilizó como monitor o referencia al Cs-137, que posee un período de semidesintegración de 30 años. Las pruebas demostraron la repetitividad de los muestreos lo que permite realizar un seguimiento de los elementos combustibles irradiados durante su vida útil, con exactitud de posicionamiento con error menor a 1 [mm] en ambos ejes.

Palabras clave: RECH-1, elemento combustible, productos de fisión, nivel de quemado.

Dedicatoria

Dedicado a mi familia.

En especial a mi madre que me ha apoyado incondicionalmente a cumplir con este desafío, y a mi padre, que me ve dar este paso desde el cielo...

Agradecimientos

Agradezco primero a Dios, porque ni en los momentos más difíciles lejos de casa, me sentí solo. A mi familia, por el apoyo incondicional que me brindaron. A mi polola, que ha sabido tener la paciencia para apoyarme en este camino que escogí. A mis amigos, pocos pero los mejores.

Agradezco a don Carlos, un físico cuyo ímpetu por la investigación y calidad humana es un ejemplo a seguir. A don Domingo y don Jorge, que siempre estuvieron llanos a escuchar, discutir ideas y a dar consejos. A Renzo, Luis y Patricio que siempre me tendieron una mano cuando lo necesite.

Agradezco al equipo de talleres de Lo Aguirre. A don Alfonso, don Orlando, quien espero que esté recuperado. A “Aceituno” y a Carlos. Todos ellos grandes personas que me apoyaron e hicieron sentir uno más el tiempo que trabajé a su lado.

Agradezco al equipo de talleres de La Reina. En especial a don Pedro, quien siempre estuvo dispuesto a ayudar y a enseñar.

Agradezco al taller de electrónica. A don “José-Pepe” y a Bryan, quienes tuvieron la disposición de escuchar y enseñar.

A don Mariano y don Javier, informáticos que siempre tuvieron un tiempo para resolver problemas, dar soluciones y a prestar “ese cable” que faltaba.

A mis profesores, porque todos ellos desde distintos ángulos y con distintas personalidades, contribuyeron en mi formación. En especial, al profe Ferrer, quien inculcó en mí el gusto y cariño por la electrónica.

Tabla de contenido

Introducción	1
0.1 Generalidades.....	1
0.2 Reactores nucleares en Chile	2
0.3 Caracterización de Elementos Combustibles utilizados en el RECH-1.....	4
0.4 Determinación experimental del quemado de un elemento combustible	9
0.4.1 Monitor de quemado de combustible.....	11
0.5 Montaje experimental en el tiempo y problemas de operación	12
0.6 Descripción del montaje experimental sin modificaciones	14
0.6.1 Conjunto de espectrometría gamma	15
0.6.2 Blindaje y colimación.....	17
0.6.3 Sistema de mapeo	20
0.6.4 Estructura de soporte	21
0.7 Método de muestreo	23
Capítulo 1: Diseño y ejecución de las modificaciones del montaje	24
1.1 Planteamiento de una solución	24
1.2 Objetivo general	25
1.3 Objetivos específicos	25
1.4 Análisis dinámico del sistema de mapeo.....	26
1.4.1 Eje longitudinal.....	26
1.4.2 Eje transversal	27
1.5 Modificación de guías y ejes de carro de mapeo.....	28
1.6 Selección del elemento final de control del sistema de mapeo.....	31
1.6.1 Motores disponibles desde el diseño mecánico	32
1.6.2 Selección de husillos.....	33
1.6.2.1 Eje longitudinal.....	34
1.6.2.2 Eje transversal	35

1.6.2.3	Adquisición de husillos.....	35
1.7	Rendimiento de los elementos de control final	36
1.8	Selección de reductores.....	38
1.9	Posicionamiento de elementos de control final en montaje experimental	40
1.9.1	Eje longitudinal.....	40
1.9.2	Eje transversal	41
1.10	Electrónica de control del sistema de mapeo	42
1.10.1	Diseño de UCM.....	44
1.10.2	Resguardo de la electrónica del montaje experimental	48
1.11	Selección del lenguaje de programación.....	49
1.12	Programa muestreo y descripción de su operación.....	50
1.13	Desarrollo de script de la UCM.....	55
1.14	Desarrollo de subrutina de medición del programa de muestreo.....	56
1.15	Costo total de la automatización	58
	Capítulo 2: Calibración del montaje experimental	59
2.1	Puesta a punto del sistema de mapeo	59
2.1.1	Comparación del avance nominal del carro de muestreo respecto al avance medido en eje X.....	62
2.1.2	Comparación del avance nominal del carro de muestreo respecto al avance medido en eje Y.....	63
2.1.3	Estimación de error de posicionamiento del sistema de mapeo	64
2.2	Calibración del conjunto de espectrometría gamma.....	65
2.2.1	Calibración en energía	65
2.2.2	Calibración en eficiencia	67
	Resultados y análisis.....	70
	Conclusiones.....	73
	Referencias bibliográficas.....	75
	Anexos	77

A.1	Principio ALARA.....	77
A.2	Masa total a desplazar por sistema de mapeo	78
A.3	Cotización de rodamientos y unidades lineales	79
A.4	Cotización de ejes de precisión y trefilado.....	79
A.5	Cotización de husillos de bola y ACME	79
A.6	Cálculos rendimiento husillos de perfil ACME	80
A.7	Reductores.....	82
A.8	Rotulado de la UCM.....	83
A.9	Circuito de protección	84
A.10	Procedimientos de alineación del montaje experimental	85
A.10.1	Nivelación del montaje experimental.....	85
A.10.2	Verificación de perpendicularidad del tubo seco respecto al carro de mapeo.....	86
A.10.3	Verificación de perpendicularidad del tubo seco respecto a elemento por barrer.....	88
A.10.4	Verificación de paralelismo entre los rieles y elemento por barrer.....	88
A.11	Determinación experimental de pasos por eje necesarios para cubrir el plano de muestreo delimitado por LS	90
A.12	Parámetros de configuración de la electrónica del detector y consideraciones de operación adicionales	91
A.12.1	Amplificador	91
A.12.2	Multiport II	92
A.12.3	Consideraciones de operación adicionales	92
A.13	Secuencia “Quemado en piscina”	93
A.14	Fuentes patrones utilizadas en calibración en energía del conjunto de espectrometría gamma.....	96
A.15	Fuentes patrones utilizadas en calibración en eficiencia del conjunto de espectrometría gamma.....	98

Índice de tablas

Tabla 1: Características principales de motores utilizados. S/I: sin información.	32
Tabla 2: Parámetros de comunicación serial de la UCM con otros dispositivos.	45
Tabla 3: Comparación de tensiones para niveles lógicos TTL y RS-232C.	46
Tabla 4: Descripción uso de puertos de la UCM.	47
Tabla 5: Resumen de costos del proyecto.	58
Tabla 6: Comparación de avance nominal de 50 [mm] respecto al avance medido. ...	62
Tabla 7: Comparación de avance nominal de 5,45 [mm] respecto al avance medido. ...	63
Tabla 8: Estimación de error del sistema de mapeo.....	64
Tabla 9: Masa estimada que debe desplazar el sistema de mapeo automatizado.	78
Tabla 10: Comparación de precios de rodamientos y unidades lineales.	79
Tabla 11: Comparación de precios de ejes de precisión y trefilado.....	79
Tabla 12: Comparación de precios de husillos a bolas y ACME.....	79
Tabla 13: Determinación del número de pasos representativos por tramo con su error típico.	90
Tabla 14: Valores de funciones de amplificador utilizado.	91
Tabla 15: Energía y abundancia de peak de Cs-137, librería estándar de G2K.	96
Tabla 16: Energía y abundancia de peaks de Co-60, librería estándar de G2K.	97
Tabla 17: Energía y abundancia de peaks de Ba-133, librería estándar de G2K.	97
Tabla 18: Energía y abundancia de peaks de Eu-152, librería estándar de G2K.	98

Índice de ilustraciones

Figura 1: Reactor de investigación RECH-1, CEN La Reina.....	2
Figura 2: Reactor de investigación RECH-2, CEN Lo Aguirre.....	3
Figura 3: Placa combustible y su disposición en un elemento combustible.	4
Figura 4: Dibujo 3D del cuerpo de los EE.CC con solo una placa de soporte.....	5
Figura 5: Dibujo 3D del cuerpo de los EE.CC seccionado longitudinalmente.....	6
Figura 6: Dimensiones del meat en una placa de elemento combustible.....	6
Figura 7: Dibujo 3D dimensionado de caja filtro de un elemento combustible.....	7
Figura 8: Boquilla de un elemento combustible del RECH-1.....	8
Figura 9: Elemento combustible falso LRF-06	8
Figura 10: Corte longitudinal de un elemento combustible.....	9
Figura 11: Diagrama conceptual de la fisión nuclear del U-235.	11
Figura 12: Ubicación esquemática de la Celda de Alta Actividad (CAA)	12
Figura 13: Montaje experimental original en piscina secundaria del RECH-1.	13
Figura 14: Esquema básico del montaje experimental.....	14
Figura 15: Diagrama básico del conjunto de espectrometría gamma.....	15
Figura 16: Detector a utilizado en la medición de EE.CC. quemados.	15
Figura 17: Adquisición de datos desde osciloscopio en Amp y Preamp.....	16
Figura 18: NIM BIN con módulos de conjunto de espectrometría utilizados.....	17
Figura 19: Blindaje del detector	18
Figura 20: Vaso de cobre recubierto parcialmente de cadmio.	18
Figura 21: Colimador superior en carro de mapeo.....	19
Figura 22: Colimador inferior en tubo seco	19
Figura 23: Colimadores, vista interior	20
Figura 24: Sistema de mapeo en su diseño original.	21
Figura 25: Estructura de soporte trasladándose a posición de pruebas.....	22
Figura 26: Elemento LRF-06 montado pruebas de alineación.	22
Figura 27: Reticulado del meat.....	23
Figura 28: Perfil ruedas del carro de mapeo.....	27
Figura 29: Base del carro de mapeo según diseño original	28
Figura 30: Rodamiento lineal y unidad lineal	29
Figura 31: Rediseño de guías del carro para desplazamiento en eje Y.	29
Figura 32: Variación de altura de los ejes respecto a placa base	30

Figura 33: Distancia de agua “d”	30
Figura 34: Anillo para corrección de distancia de agua d.....	31
Figura 35: Curva típica torque-velocidad de un motor paso unipolar.	32
Figura 36: Comparación del rendimiento de un husillo a bolas y uno ACME.	33
Figura 37: Perfil ACME estándar	36
Figura 38: Reductor sinfín corona.....	38
Figura 39: Motorreductores del sistema de mapeo.....	39
Figura 40: Montaje parcial de elemento final de control de eje longitudinal	40
Figura 41: Tuerca fija en descanso de ejes y mecanismo tornillo-tuerca del eje X.....	41
Figura 42: Montaje parcial de elemento final de control del eje transversal	41
Figura 43: Elemento final de control del eje Y.....	42
Figura 44: Panel frontal del controlador de motores asociado a M1 y M2.	42
Figura 45: Refuerzo de la ventilación del controlador de motores.....	43
Figura 46: Finales de carrera (LS) que delimitan plano de muestreo	44
Figura 47: <i>Esquema general de conexión de LS</i>	44
Figura 48: <i>Conexión de indicadores de la UCM</i>	45
Figura 49: Circuito con max232	46
Figura 50: <i>PCB del circuito</i>	46
Figura 51: Vistas de UCM en funcionamiento.....	47
Figura 52: Diagrama principal de conexión a la red del montaje experimental.....	48
Figura 53: <i>Esquema de interacción entre dispositivos y con el usuario</i>	50
Figura 54: Diagrama de flujo del script global para la automatización del muestreo. ..	51
Figura 55: Interfaz de usuario del script global de muestreo.	52
Figura 56: Árbol de directorios generado por el script global.	52
Figura 57: Tipos de muestreo definidos para la operación del montaje.	53
Figura 58: Ejemplo de reporte emitido	54
Figura 59: Ícono del programa de muestreo.	54
Figura 60: Instrucciones en archivo batch para adquirir y almacenar un espectro	56
Figura 61: Código fuente C++ análogo al del archivo batch.....	57
Figura 62: Área de interés para el muestreo.....	59
Figura 63: Delimitación experimental del plano de muestreo para los elementos finales de control utilizados.....	60
Figura 64: Puntos definidos en el sistema de mapeo.....	61
Figura 65: Colocación de patrones para calibración en energía	65
Figura 66: Espectro de fuentes patrones de Cs-137, Co-60 y Ba-133	66

Figura 67: Curva de calibración en energía	66
Figura 68: Fuente de Eu-152 en posición para la calibración en eficiencia.....	68
Figura 69: Espectro obtenido tras medir patrón de Eu-152.....	68
Figura 70: Curva de calibración empírica de eficiencia.....	69
Figura 71: Perfiles axiales de Cs-137 del elemento LR04-L	71
Figura 72: Perfiles transversales de Cs-137 del elemento LR04-L	71
Figura 73: Representación de fuerza normal N al girar husillo para desplazar una carga F.....	80
Figura 74: Plano inclinado generado al desenrollar el hilo de un husillo ACME.	80
Figura 75: Plantilla rotulado frontal UCM.	83
Figura 76: Plantilla rotulado lateral UCM.	83
Figura 77: Esquemático de circuito de protección del detector de HPGe.....	84
Figura 78: Verificación de la nivelación del montaje en posición de mantenimiento....	85
Figura 79: Plomada y pieza de anclaje	86
Figura 80: Pernos de soporte y regulación del tubo seco	86
Figura 81: Tapa acrílica usada como apoyo en la alineación del tubo	87
Figura 82: Puntos en los que se mide distancia d.....	88
Figura 83: Verificación del paralelismo entre los rieles y el elemento a barrer en la mesa de muestreo del montaje experimental.....	89
Figura 84: Configuración algoritmo de localización de peaks de energía de la secuencia Quemado en piscina.	93
Figura 85: Configuración algoritmo de determinación de área de la secuencia Quemado en piscina.....	94
Figura 86: Secuencia “Quemado en piscina”	95
Figura 87: Parámetros de configuración para la identificación tentativa de isótopos presentes en los espectros obtenidos.	95
Figura 88: Kit de patrones en forma de disco del que se usaron para la calibración en energía las fuentes de Cs-137, Co-60 y Ba-133.....	96
Figura 89: Vista interior del patrón de Eu-152.....	98

Introducción

0.1 Generalidades

El Departamento de Reactores de Investigación de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) presentó la necesidad de poner en funcionamiento nuevamente un montaje experimental destinado a la determinación empírica del nivel de quemado (gasto) del combustible nuclear utilizado en su reactor de investigación RECH-1. El equipo no fue utilizado durante un extenso período de tiempo, por requerir la presencia continua de personal durante su operación, y en un ambiente controlado desde el punto de vista radiológico.

Este trabajo de titulación se orientó entonces a la resolución de este problema mediante el diseño y ejecución de modificaciones del montaje conducentes a su automatización, de modo de facilitar su operación.

La primera parte de este trabajo busca contextualizar al lector en el problema, comenzando por entregarle una visión general de los reactores del país, caracterizando su combustible nuclear, señalando los pasos que los profesionales de la CCHEN han seguido para la determinación del quemado respecto a las técnicas utilizadas a nivel global y los problemas encontrados para su aplicación. Se describe también el montaje experimental no modificado y el método de muestreo requerido.

La segunda parte, presenta y describe las soluciones técnicas para los problemas planteados desde las tres áreas intervenidas: mecánica, electrónica y programación.

Finalmente se presentan los resultados obtenidos respecto a la ejecución de las mejoras ya operativas y una medición realizada con el nuevo sistema en funcionamiento.

0.2 Reactores nucleares en Chile

La CCHEN cuenta con dos reactores nucleares de investigación tipo piscina. A diferencia de los reactores de potencia, los reactores de investigación disipan el calor generado en las reacciones nucleares, aprovechando los neutrones que aparecen como subproducto de la fisión nuclear, principalmente para la producción de radioisótopos utilizados en los campos de la medicina, minería e investigación mediante técnicas de activación neutrónica.

El RECH-1 es el primer reactor nuclear de investigación del país, y está localizado en el Centro de Estudios Nucleares La Reina (en adelante CEN La Reina). Alcanzó por primera vez su criticidad en octubre de 1974, y se ha mantenido operando desde 1975 a la potencia de 5 [MW] térmicos en forma continua con un régimen de operación de un día por semana durante 48 semanas al año, y ocasionalmente por períodos de 2 a 6 horas los días miércoles a solicitud de algún usuario. Esto hasta el último trimestre del 2017, donde con objeto de aumentar la producción de radioisótopos como el Tc-99m, cambió su régimen a dos operaciones por semana por tiempo indefinido.



Figura 1: Reactor de investigación RECH-1, CEN La Reina.

El RECH-2, ubicado en el centro de Estudios Nucleares Lo Aguirre (en adelante CEN Lo Aguirre), se encuentra en la actualidad en estado “apagado” de forma permanente aun cuando sus sistemas, como el de refrigeración primaria, se mantienen operativos para ser utilizado cuando el desarrollo del país lo requiera.



Figura 2: *Reactor de investigación RECH-2, CEN Lo Aguirre.*

0.3 Caracterización de Elementos Combustibles utilizados en el RECH-1

Los elementos combustibles (EE.CC.) contienen el material físil y fértil que hacen posible una fisión nuclear autosostenida en el núcleo de todo reactor, sea de potencia o de investigación. El combustible nuclear utilizado por el RECH-1 es uranio metálico enriquecido con U-235 al 19,75%, considerado un enriquecimiento bajo, por lo que tales EE.CC. se denominan LEU (Low Enriched Uranium). Por su diseño, se denominan además como tipo MTR, lo que implica que se componen de un conjunto de placas combustibles paralelas que encierran uranio, a saber, dieciséis (16) placas combustibles en total, dos externas y catorce internas. Cada placa combustible es un “sándwich” compuesto por un marco y dos revestimientos de Al 6061, conteniendo una mezcla homogénea y compacta de polvo de Siliciuro de Uranio (U_3Si_2) y polvo de aluminio con una pureza mayor al 99,5%. La diferencia principal entre placas internas y externas, además de su longitud, es la cantidad de U-235 que contienen, ya que mientras las placas internas poseen $14,32 \pm 2\%$ [g] de U-235, las externas poseen $7,16 \pm 2\%$ [g].

Las placas combustibles se alinean paralelamente entre un par de placas de soporte que las alberga. Tal conjunto constituye el cuerpo de un elemento combustible, con $214,80 \pm 2\%$ [g] de U-235 considerando la contribución de todas las placas.

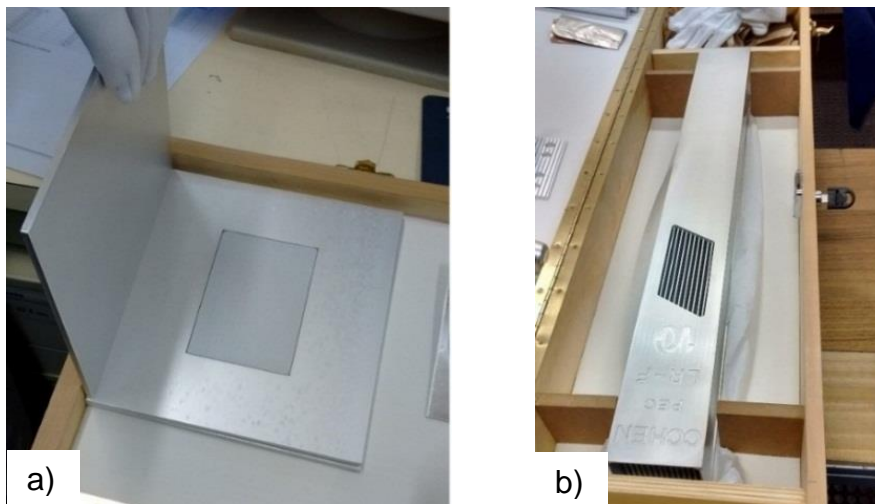


Figura 3: a) “Sándwich” de mezcla homogénea y compacta de siliciuro de uranio y polvo de Al entre un marco y revestimientos de Al 6061, que constituyen una placa combustible previa a la laminación. b) Cuerpo de un elemento combustible. Se observa la disposición de las placas combustibles a través de la perforación de una placa de soporte, también de Al 6061.

Una placa combustible externa tiene una longitud nominal de 650,9 [mm], tal como una placa de soporte, lo que permite “cerrar” el cuerpo del elemento combustible. Una placa de interna presenta un largo nominal menor e igual a 625,5 [mm]. El ancho y espesor en tanto, son idénticos para ambas placas combustibles, a saber, 69,8 y 1,56 [mm] respectivamente.

Una vez ensamblado, el cuerpo de un elemento combustible tiene las medidas nominales de longitud x ancho x altura igual a 650,9 x 74,7 x 74,6 [mm]. La separación nominal entre placas (gap) ha de ser 2,92 [mm] como mínimo.

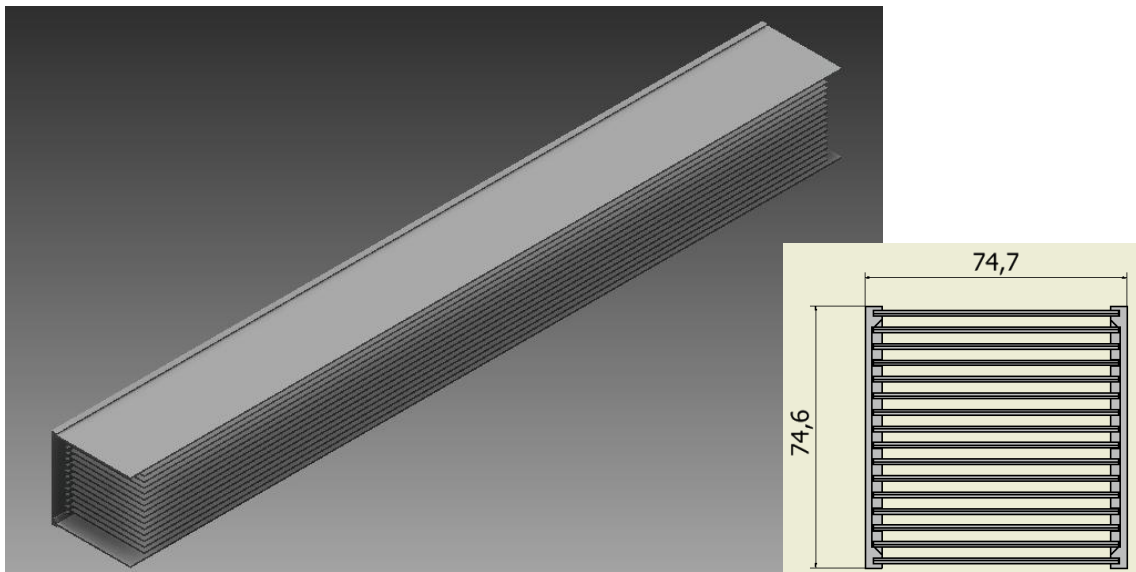


Figura 4: Dibujo 3D dimensionado del cuerpo de los EE.CC con solo una placa de soporte. Se observa como las placas externas son de mayor longitud que las internas de tal forma que ayudan a “cerrar” la estructura en sus extremos.

La zona o región de una placa combustible que contiene la mezcla de uranio se denomina meat. Pese a los diferentes largos de las placas externas e internas, el meat en ambos casos tiene las mismas dimensiones nominales, por lo que es posible considerar la superposición del meat de todas las placas del elemento, si el meat está centrado en cada una de las placas combustibles y estas a su vez, en las placas de soporte. Dado que las placas combustibles se dimensionan en primera etapa por laminación en caliente, es imposible evitar irregularidades en los bordes del meat, luego su longitud y posición es verificado por análisis radiográfico y cálculo de índices de centrado.

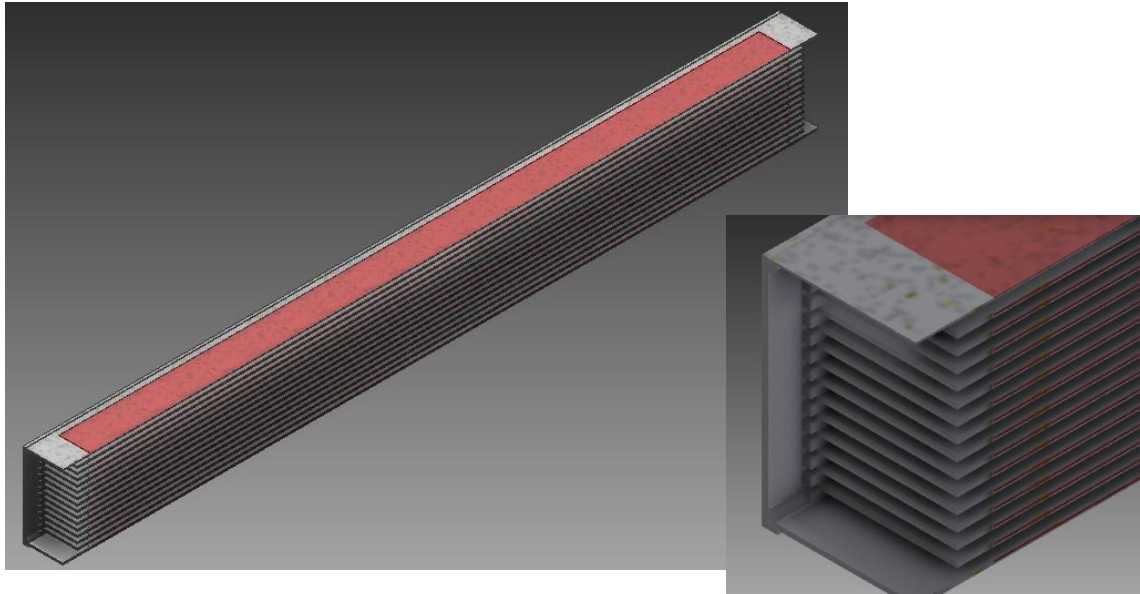


Figura 5: Dibujo 3D del cuerpo de los EE.CC seccionado longitudinalmente. Se observa como el meat (en rojo) de todas las placas combustibles coinciden.

Por el mismo motivo, sus medidas nominales admiten en sus extremos zonas donde el espesor del meat es mayor al nominal (zona homogénea), denominadas zonas de hueso de perro (Dogbone).

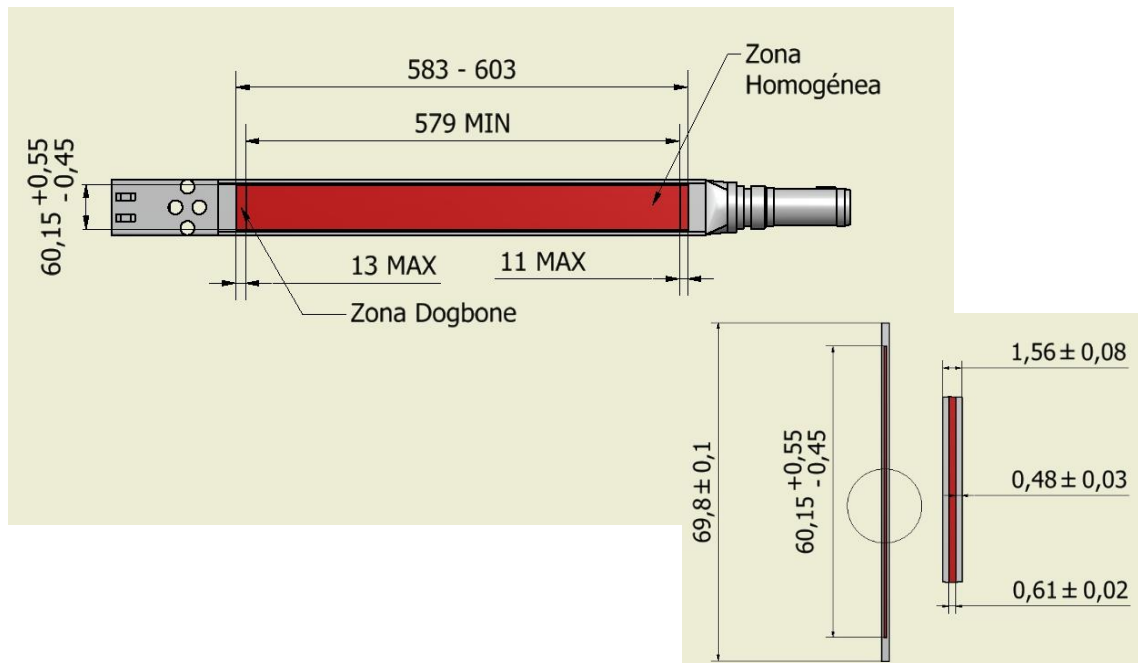


Figura 6: Dimensiones del meat en una placa de elemento combustible.

La homogeneidad del meat, relevante pues aumenta la vida útil del combustible al prevenir deformaciones por acumulación de productos de fisión y flujo irregular de

neutrones (Salinas , Raff, Coronado, & Olivares, 2003), es verificada por medio de la medición de la densidad superficial de uranio. Sus valores nominales son para las placas externas e internas $102,81 \text{ [mgU/cm}^2\text{]}$ y $205,63 \text{ [mgU/cm}^2\text{]}$ respectivamente.

Estructuralmente, además del cuerpo existen otras dos componentes que conforman un elemento combustible: la caja filtro y la boquilla.

La caja filtro cumple una doble función: en primer lugar tiene una rejilla que evita que objetos extraños se ubiquen entre las placas para prevenir alteraciones en la circulación de agua, cuestión que afecta directamente la refrigeración de los EE.CC. cuando el reactor está operando. La segunda función es albergar un par de travesaños separados nominalmente entre sí $19,0 \text{ [mm]}$, que permiten mover un elemento dentro de la piscina primaria y secundaria del RECH-1, según los requerimientos de operación. Su longitud nominal es de $142,9 \pm 0,4 \text{ [mm]}$.

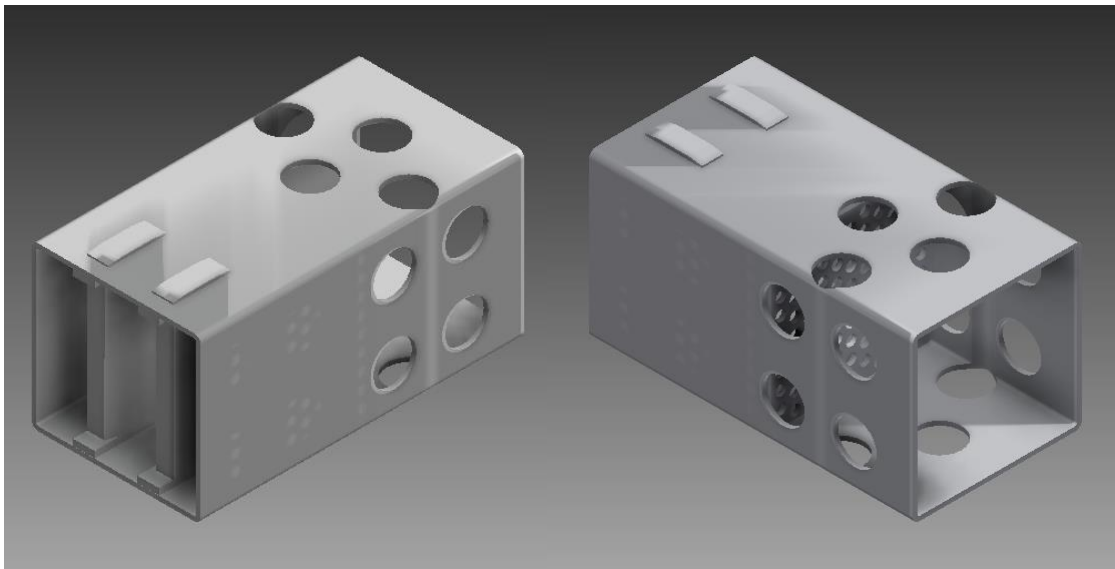


Figura 7: Dibujo 3D dimensionado de caja filtro de un elemento combustible. Se observa en la figura de la izquierda un par de travesaños para mover un elemento dentro de la piscina, y a la derecha una rejilla con perforaciones de $\varnothing 4,76 \pm 0,02 \text{ [mm]}$ para evitar elementos extraños entre placas.

La boquilla, último componente de un elemento combustible, queda determinada por el diseño de la grilla del núcleo del reactor, para lograr un calce adecuado. Cualquier elemento a colocar en el núcleo del RECH-1, ya sea combustible, reflector, canastos de irradiación, entre otros, debe tener consigo la misma boquilla. Esta es cilíndrica con una chaveta en un extremo para evitar el giro (y choque) de los elementos en el núcleo,

y es acoplada en el otro extremo con una pieza de transición que permite unirla con el cuerpo del elemento combustible. Su longitud nominal es de $192,1 \pm 0,5$ [mm].



Figura 8: *Boquilla de un elemento combustible del RECH-1.*



Figura 9: *Elemento combustible falso LRF-06 utilizado en pruebas del montaje en el RECH-1.*

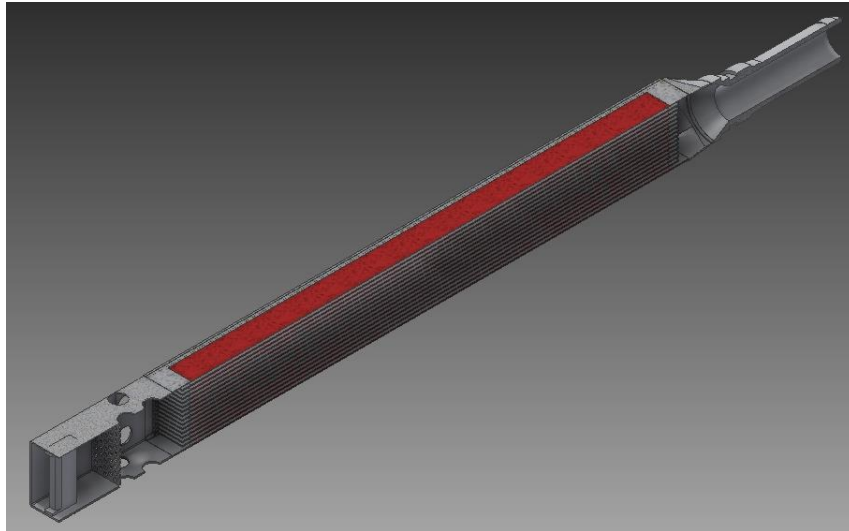


Figura 10: Corte longitudinal de un elemento combustible del RECH-1. En rojo se aprecia el meat de las placas combustibles del elemento.

0.4 Determinación experimental del quemado de un elemento combustible

La determinación del quemado de combustible nuclear, equivalente al gasto de material fisible del núcleo para un reactor en operación, ya sea de potencia o de investigación, es relevante por factores económicos y de seguridad operacional. Dentro de las motivaciones de su desarrollo se encuentran (International Atomic Energy Agency, 1992):

- Elevado coste unitario de los elementos combustibles (US\$ 50.000¹ en el caso de los utilizados por el RECH-1).
- Mayor énfasis en seguridad.
- Demanda de obtención de mayores flujos neutrónicos.

Su medición se puede realizar al menos con 4 métodos distintos, a saber:

- Cálculos basados en física de reactores.
- Medición de efectos de reactividad en el núcleo.
- Espectrometría gamma.
- Análisis químico.

¹ Costo referencial.

En el RECH-1, al tratarse de un reactor de investigación, se llevan a cabo periódicos cambios en la configuración de su núcleo (2 a 3 veces al año), ya sea para restituir elementos combustibles gastados (nivel de quemado del entorno al 50%) o para modificar la reactividad del núcleo. Esto presenta una dificultad para la determinación teórica del quemado de combustible y hace necesario, para desarrollar este método con mejores resultados, llevar un registro exhaustivo de la bitácora de operación de los elementos en estudio, obteniendo datos como sus posiciones en el núcleo en las diferentes configuraciones en las que participó, así como los tiempos de irradiación y enfriamiento. La incerteza de los cálculos de nivel de quemado de los elementos combustibles realizados del RECH-1, se estima entre el 10% y 20% del valor experimental. Es por esta razón que validar experimentalmente estos cálculos resulta conveniente pues permite aumentar su confiabilidad, optimizando la toma de decisiones operativas por parte de los profesionales del RECH-1.

En función de lo anterior, el método experimental seleccionado por los profesionales del RECH-1 fue el de espectrometría gamma, el cual destaca principalmente por permitir realizar ensayos no destructivos de los elementos, haciendo posible la realización de un seguimiento de ellos en el tiempo. Permite además determinar empíricamente la actividad de ciertos productos de fisión de interés, denominados monitores de quemado, con la que es posible obtener su concentración en el elemento combustible y, conociendo previamente el inventario de productos de fisión de los elementos del reactor, el nivel de quemado de este.

El análisis químico, a diferencia de los demás métodos nombrados, implica realizar un ensayo destructivo del elemento combustible, con el que es posible precisar los elementos químicos presentes en el meat de sus placas constituyentes, sin embargo, conlleva la imposibilidad de realizar este método como seguimiento de un elemento pues resulta en el fin de su vida útil. Su ejecución debe considerar un elevado impacto económico, por el combustible destruido, por el nivel de instalaciones exigidas para su desarrollo, dado el inherente riesgo de contaminación radiológica e irradiación, y por requerir un capital humano altamente específico y calificado. Por todo ello, este método no es muy popular y es dejado de lado en la mayoría de los casos.

0.4.1 Monitor de quemado de combustible

Los monitores de quemado son productos de fisión presentes en el elemento combustible que sirven para la determinación experimental del quemado del combustible nuclear. Su elección como monitor se fundamenta en las características del propio producto de fisión, como su período de semidesintegración, su sección eficaz de captura neutrónica y su capacidad de migración dentro del meat; y también por las características del elemento combustible a medir como el material fisible, el nivel de quemado y tiempo de enfriamiento.

Para el RECH-1, lo deseable es que el monitor seleccionado posea (Pereda, y otros, s.f.):

- ✓ tasa de generación proporcional al tiempo de irradiación;
- ✓ un período de semidesintegración mayor al período de irradiación, de enfriamiento y muestreo;
- ✓ una sección eficaz de captura térmica despreciable;
- ✓ baja migración en el combustible.

Dentro de los productos de fisión que cumplen lo anterior y dado que el tiempo de enfriamiento del elemento que se utilizó en este trabajo de titulación para realizar muestreos de prueba bordea los 7 años, el monitor utilizado fue Cs-137. De acuerdo con los datos manejados en el reactor, un 6,22% del U-235 fisionado térmicamente producirá Cs-137 (Medel, 2016).

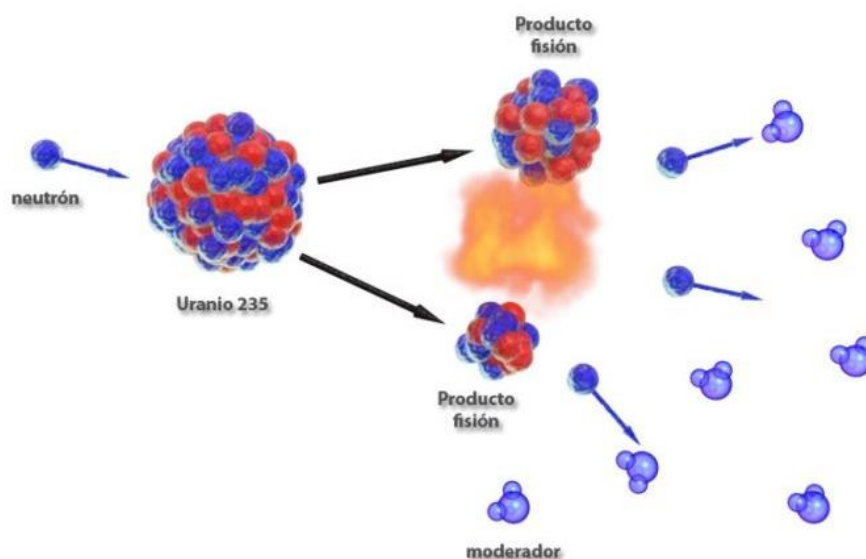


Figura 11: Diagrama conceptual de la fisión nuclear del U-235.

0.5 Montaje experimental en el tiempo y problemas de operación

En 1992 se inició formalmente el proyecto 261 de la entonces unidad del RECH-1 denominado “Determinación de Quemado en Elementos Combustibles tipo MTR” con el objeto de contar en el RECH-1 con un montaje experimental adecuado para el estudio no destructivo del grado de quemado de los elementos combustibles utilizados por el reactor a través de espectrometría gamma. Para tal efecto, ese mismo año se habilitó un porcentaje importante de una Celda de Alta Actividad (CAA) con blindaje para fuentes de hasta 1×10^4 [Ci] de Co-60. Esta celda se ubica en el sub-suelo del Laboratorio de Producción de Radioisótopos fuera del edificio de contención del reactor.

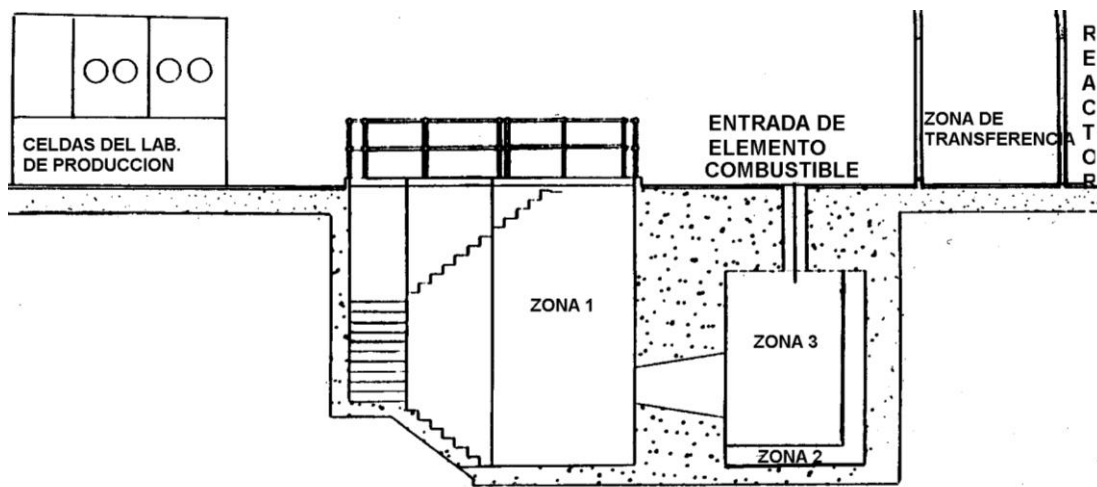


Figura 12: Ubicación esquemática de la Celda de Alta Actividad (CAA) asociada al RECH-1.

En 1994, se adquirió la electrónica necesaria para el sistema de espectrometría gamma y se continuó con la implementación de la CAA para la ejecución del proyecto, poniéndose en operación en 1999.

A mediados del año 2000, se trasladó a la CAA un elemento combustible experimental de bajo enriquecimiento, diseñado con una sola placa combustible para estudiar su comportamiento a través del tiempo mientras se iba quemando en el reactor.

Medir un elemento combustible en la CAA implicaba su transferencia desde la piscina del reactor en un contenedor blindado para tal efecto. Para realizar este traslado bajo un riesgo radiológico moderado, se debía alcanzar un tiempo de enfriamiento mínimo del elemento de alrededor de 100 [días] (Pereda, y otros, s.f.), haciendo prohibitivo el estudio de elementos con un tiempo de enfriamiento menor. Además, tal transporte requería un mínimo de cuatro personas (incluido un Oficial de Protección Radiológica -

en adelante OPR), un entrenamiento constante de los operadores, y en cuanto a la integridad del elemento, el traslado aumentaba el riesgo de daño superficial de las placas combustibles.

Por estos motivos, en el 2000 se presentó un proyecto para diseñar y construir un montaje experimental en la piscina secundaria del RECH-1 como reemplazo del montaje dispuesto en la CAA, pues al mantener el elemento combustible en el agua, se reduce la limitación de tiempo de enfriamiento pre-medición hasta unos pocos días, reduciendo también el tiempo de traslado (optimización de horas hombre del personal) y el riesgo daños superficiales de las placas combustibles en el proceso.

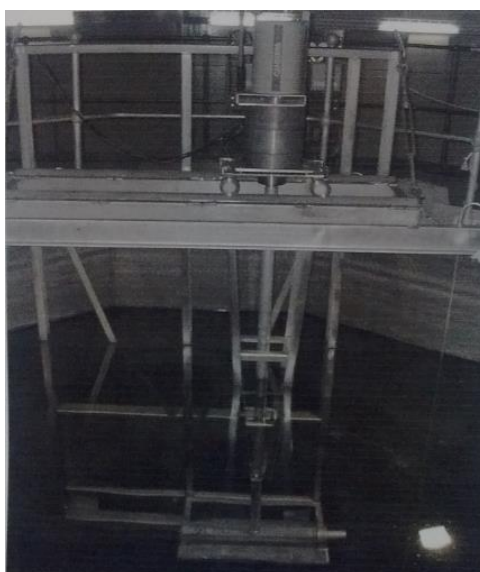


Figura 13: *Montaje experimental original en piscina secundaria del RECH-1.*

Este nuevo montaje se puso en operación el año 2002 y fue utilizado hasta el año 2006. Su cancelación como proyecto se debió principalmente a que la licencia de operación del montaje expresa la obligación de que su manejo debe ser realizado por dos operadores en presencia de un OPR, cuestión que hizo inviable en el tiempo el realizar muestreos de larga duración (mayores o iguales a una jornada laboral), pues el personal del RECH-1 y más aún el número de OPR de la instalación era (y es) reducido.

0.6 Descripción del montaje experimental sin modificaciones

El montaje experimental consiste esencialmente en un detector blindado del fondo del reactor y montado sobre un carro con capacidad de movimiento en un plano x-y, lo que permite realizar un mapeo de un elemento combustible del RECH-1. Tales elementos son acostados en una mesa de muestreo diseñada de modo que los ejes de los EE.CC coincidan con los ejes de barrido del carro. Todo lo anterior es soportado por una estructura que se apoya y sumerge en un borde de la piscina secundaria del RECH-1 de modo de mantener el detector por sobre la superficie del agua y al elemento combustible bajo ella para utilizar el agua de la piscina como blindaje. Un esquema simplificado del montaje es el siguiente:

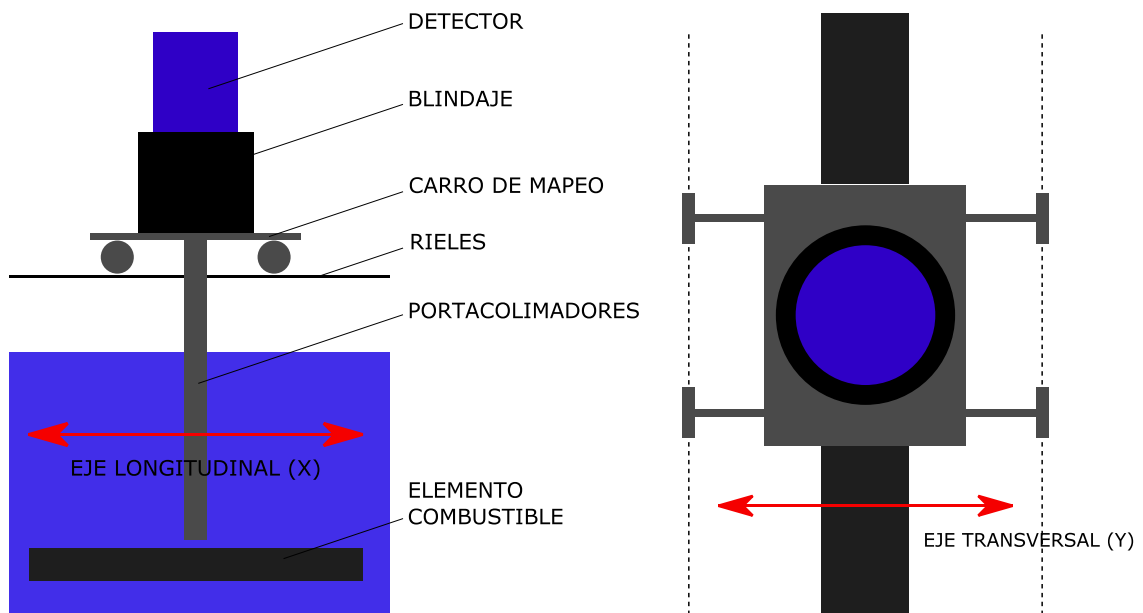


Figura 14: Esquema básico del montaje experimental.

De acuerdo a esto, el montaje experimental original se puede descomponer en cuatro partes:

- ✓ Conjunto de espectrometría gamma;
- ✓ Blindaje y colimación;
- ✓ Sistema de mapeo;
- ✓ Estructura de soporte.

0.6.1 Conjunto de espectrometría gamma

El conjunto de espectrometría gamma utilizado en el montaje experimental está compuesto por un detector de Germanio hiperpuro (HPGE) y su electrónica asociada. Esquemáticamente,

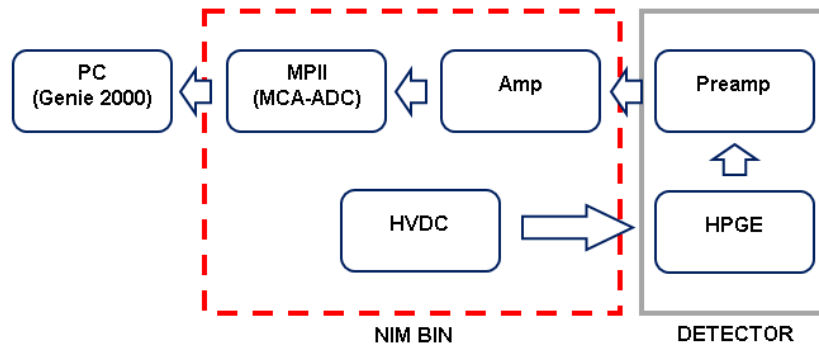


Figura 15: Diagrama básico del conjunto de espectrometría gamma.

El detector es un equipo portátil marca Canberra, modelo GC3519, con una eficiencia relativa del 35% y resolución de 1.9 [keV] para el peak de 1.33 [MeV] de Co-60. Dada la necesidad de enfriar el cristal de HPGE, el equipo integra un contenedor criogénico, modelo C7935-7 “Big MAC”, con una capacidad y tiempo de retención nominal de 7 litros de nitrógeno líquido y 5 días respectivamente.



Figura 16: Detector a utilizar en la medición de actividad de elementos combustibles quemados.

El detector acumula la carga eléctrica mediante la polarización del cristal de Ge con una fuente de alta tensión (HVDC). La fuente utilizada es Canberra, modelo 3106D. Dicha fuente es capaz de generar hasta 6000 [v] y 300 [μA], con polarización positiva/negativa según requerimiento. El detector se polariza con + 3000 [v].

El preamplificador (Preamp) utilizado, marca Canberra, modelo 2002CSL, está integrado en el detector en las cercanías del cristal de HPGE con el fin de minimizar

ruido eléctrico. Tiene una capacidad de conteo mayor a 200000 [cuentas/s] (peak de 1.33 [MeV] de Co-60). Por cada gamma absorbido por el detector, el Preamp convierte los portadores de carga resultantes en un pulso con una amplitud proporcional al total de carga acumulada por dicho evento. El tiempo de subida del pulso es < 20 [ns], cayendo luego de forma exponencial en un tiempo de bajada de 50 [μs] nominales.

Un amplificador (Amp) Canberra, modelo 2025, recibe el pulso proveniente desde el Preamp, amplificándolo linealmente y cambiando su forma a una señal semi-gaussiana.

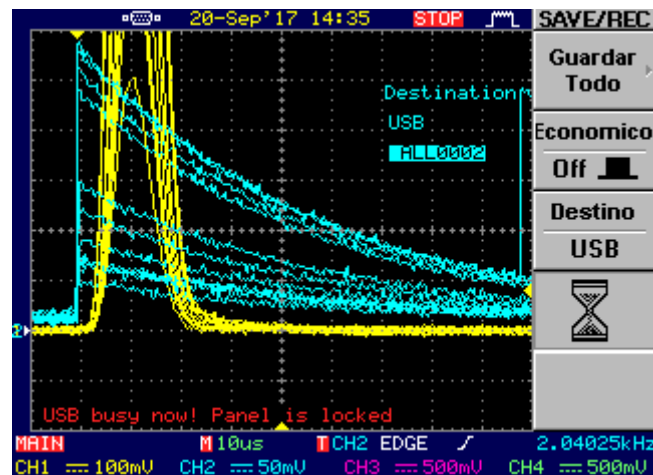


Figura 17: Captura de pantalla de osciloscopio conectado a salida de Preamp (CH2 - celeste) y Amp (CH1 – amarillo) utilizados en el conjunto de medición. Se observa la generación de pulsos producto de fotones gammas de diversas energías interactuando con el detector.

La señal proveniente del Amp es convertida a una señal digital entre 0 y 10 [v], y posteriormente almacenada por un analizador multicanal, que permite clasificar los pulsos digitales obtenidos durante el muestreo según su voltaje, ubicándolos en canales, que funcionan como una casilla postal, para construir un histograma que constituye finalmente un espectro gamma. El procesamiento de la interacción gamma con el detector hasta transformarla en un pulso digital proporcional a su energía constituye un análisis de pulsos por altura o PHA (Pulse Height Analysis). El convertidor análogo-digital necesario (ADC) y el analizador multicanal están integrados en un módulo Canberra denominado Multiport II (MPII), que posee 16384 canales. Tanto el AMP como el MPII permiten configurar parámetros de muestreo según la aplicación.

La adquisición y análisis de un espectro gamma con la electrónica descrita, se lleva a cabo con un módulo del software Genie 2000 v3.4 (en adelante G2K) llamado “Gamma Acquisition & Analysis”. G2K requiere una “llave” para funcionar. Actualmente dicha llave

es un dispositivo externo USB similar a un pendrive, aun cuando puede funcionar con llaves de versiones anteriores en puertos DB-25.

El Preamp, Amp y MPIO son módulos de instrumentación nuclear (NIM) y van contenidos en un rack denominado NIM BIN, que además de proveer una estructura de montaje, alimenta dichos módulos con tensiones de ± 6 , ± 12 y ± 24 [V]. El NIM BIN utilizado es Canberra, modelo 2100 y cuenta con capacidad para albergar hasta 12 NIM.



Figura 18: NIM BIN con módulos de conjunto de espectrometría utilizados. De derecha a izquierda: Fuente HVDC 3106D, Amp 2025 y MPIO.

0.6.2 Blindaje y colimación

El blindaje del detector se compone esencialmente de una torre anular de plomo y dos colimadores de plomo cuyo fin es dejar pasar un haz de rayos gamma acotado a través de un agujero de diámetro fijo (opciones nominales: 2.8, 4.0, 5.8 y 8.0 [mm]). Ambos colimadores son montados en los extremos de un tubo seco, dispuesto de tal forma que su eje axial coincide con el del detector. Este tubo, además de cumplir el rol de porta colimadores, permite abrir una ventana entre el detector y los EE.CC. en la piscina secundaria del reactor, de modo de minimizar en la medición por un lado el efecto de blindaje del agua de la piscina y, por otro lado la radiación de fondo producto de radioisótopos que se pueden encontrar disueltos en ella.

La torre anular se compone de cinco bloques apilados concéntricamente sobre una placa de acero de soporte. El detector se monta en la torre con la ayuda de un par de piezas de aluminio que impiden su rotación y traslación.

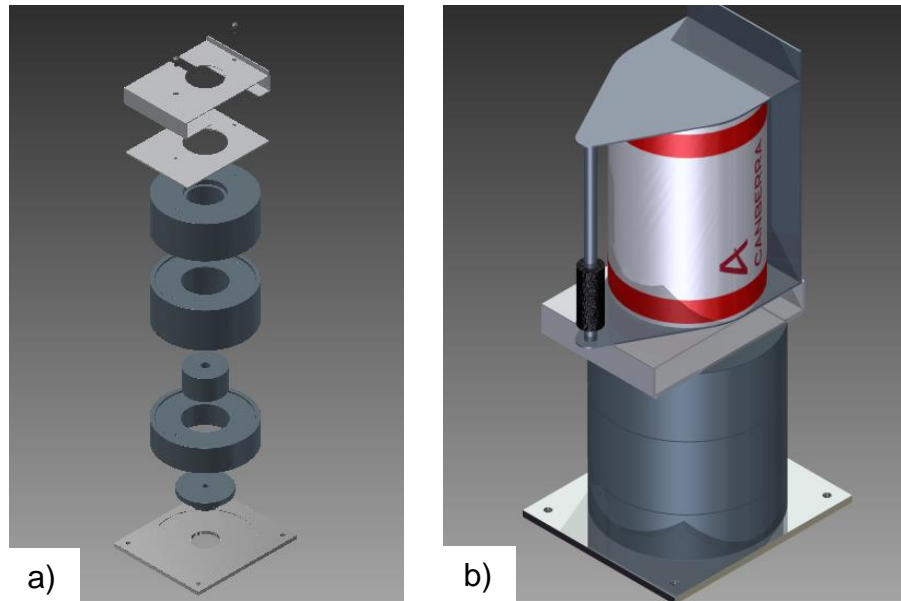


Figura 19: a) Despiece de torre anular y piezas de acople del detector respecto a base en que va montada. b) Detector en posición dentro de su blindaje.

Un blindaje adicional que va dentro de la torre anular corresponde a un “vaso” cobre recubierto parcialmente con cadmio para frenar neutrones térmicos y Rx de baja energía producidos por los rayos gamma incidentes en el plomo.

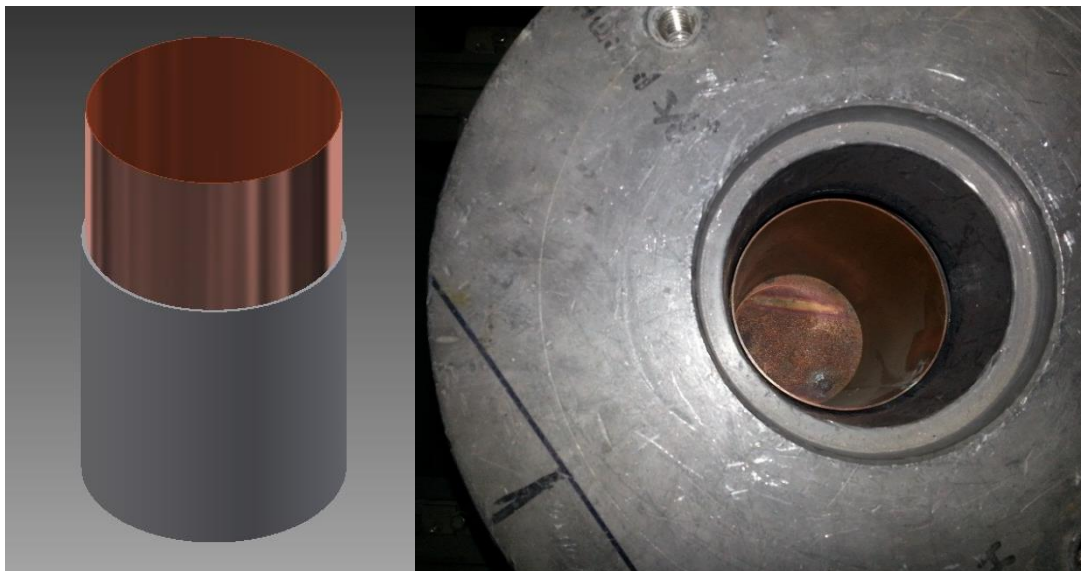


Figura 20: Vaso de cobre recubierto parcialmente de cadmio.

El tubo seco (porta-colimadores) tiene un largo de 3,16 [m] y un diámetro exterior de 63,5 [mm]. Va acoplado a la base del carro del detector a través de una pieza que además de soportarlo, contiene en su interior el colimador superior del montaje.

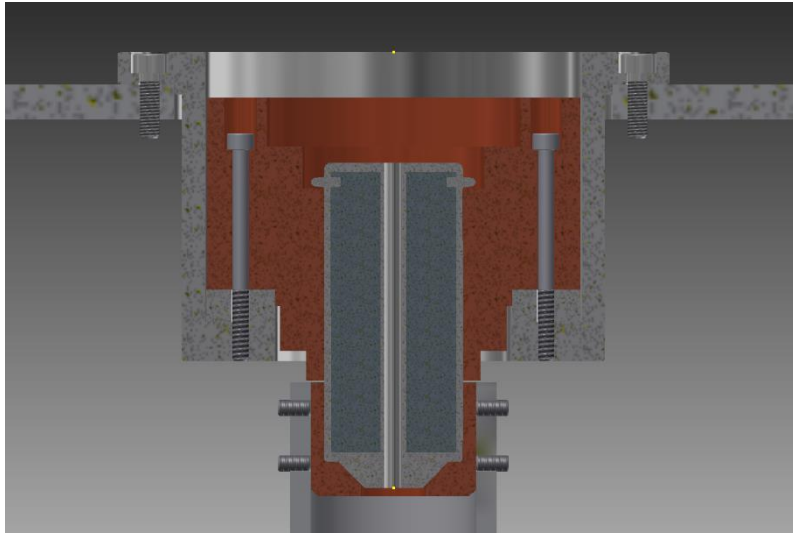


Figura 21: *En café se observa pieza de acople de tubo seco en carro del detector. Contrasta dentro de ella el colimador superior del montaje.*

En la parte inferior del tubo, se tiene un hilo M60 con el que se sella con la ayuda de una tapa de acero inoxidable y un o'ring. Esta tapa soporta además el colimador inferior del montaje. La alineación del tubo seco (y por consiguiente de los colimadores) respecto al detector se refuerza con una estructura acoplada al carro que le da rigidez al tubo.

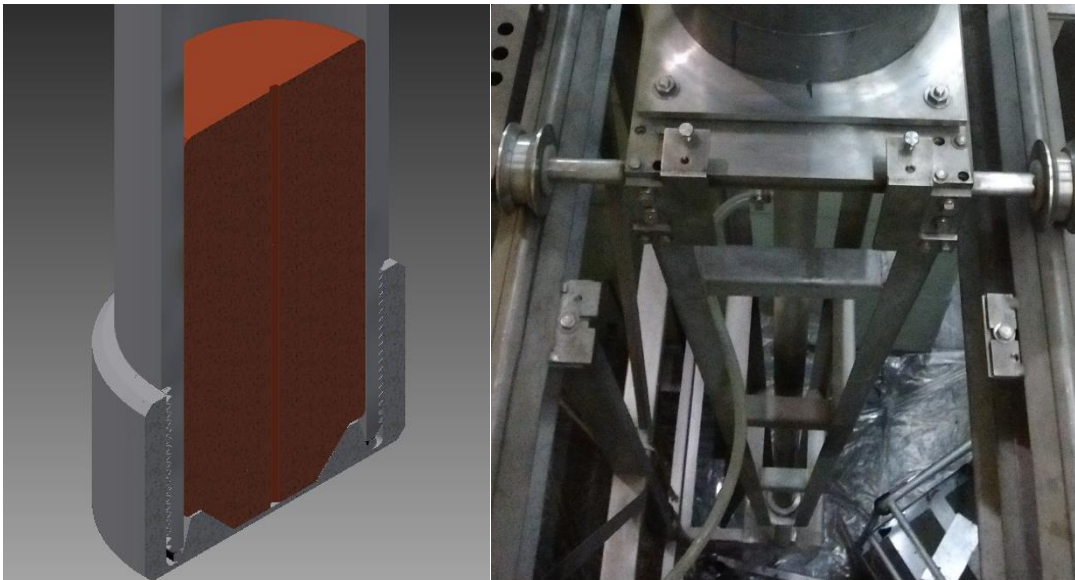


Figura 22: *a) En café, se tiene el colimador inferior del montaje que descansa en la tapa del tubo seco. b) Estructura acoplada al carro que da rigidez al tubo.*

Ambos colimadores son cilindros de plomo de longitud 10 [cm] encamisados con acero inoxidable.

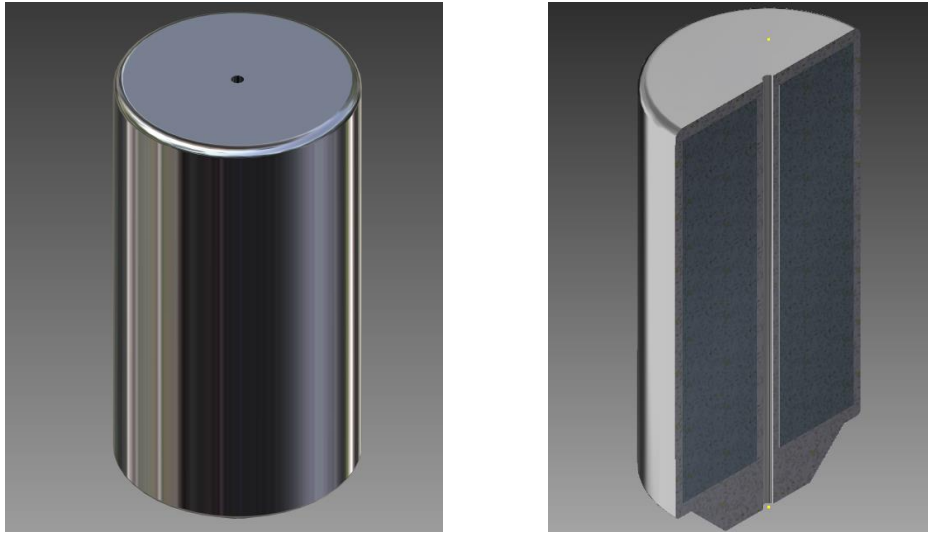


Figura 23: *Colimador inferior.*

0.6.3 Sistema de mapeo

El carro que permite el mapeo de los EE.CC del reactor, se compone de una placa de acero inoxidable que soporta tanto el detector como el conjunto de blindaje y colimación ya descritos. A través de cuatro bloques de bronce fosfórico dispuestos en sus extremos, dicha placa base se apoya en un par ejes en cuyos extremos se encuentran las ruedas que permiten el movimiento del carro sobre un par de rieles en “V” de perfil doblado, alineados con la posición que toman los elementos al ser medidos, de modo de conseguir que el carro se desplace longitudinalmente a través de ellos (eje X). Los bloques de bronce permiten además el desplazamiento de la placa base sobre los ejes del carro, lo que permite realizar un barrido transversal de los EE.CC (eje Y).

Para realizar el barrido longitudinal el carro se debe impulsar directamente, mientras que, el barrido transversal se realiza mediante un mecanismo tornillo-tuerca. El tornillo utilizado tiene hilo Whitworth de 5/8” y 11 pasos por pulgada, accionado manualmente. La posición relativa del carro en ambos ejes debe ser verificada mediante reglas dispuestas en el montaje.



Figura 24: Sistema de mapeo en su diseño original.

0.6.4 Estructura de soporte

La estructura de soporte del montaje experimental está construida íntegramente de acero inoxidable. Por sobre el agua aloja el par de rieles de 1,95 [m] de largo del sistema de mapeo, mientras que en su extremo inferior, la estructura posee una mesa de dimensiones nominales 30 x 90 [cm] donde se ubican los EE.CC para el muestreo de modo tal que sus placas combustibles quedan enfrentadas perpendicularmente al conjunto de colimación (y al detector). Así dispuesto, la distancia de agua entre el extremo inferior del tubo y la primera placa combustible externa del elemento a medir es de 5 [mm] y distancia nominal entre la primera placa y la superficie de la piscina es de 2,5 [m].



Figura 25: Estructura de soporte trasladándose a posición de pruebas.



Figura 26: Elemento LRF-06 montado en mesa de muestreo para pruebas de alineación.

0.7 Método de muestreo

El algoritmo de cálculo que permite determinar experimentalmente el nivel de quemado de un elemento combustible tipo MTR mediante espectrometría gamma, toma el área rectangular del meat (visto en 2D) y lo divide en n regiones idénticas. El propósito de aquello es poder suponer que la actividad por unidad de volumen de cada región es constante e igual al valor medido en el centro de ellas.

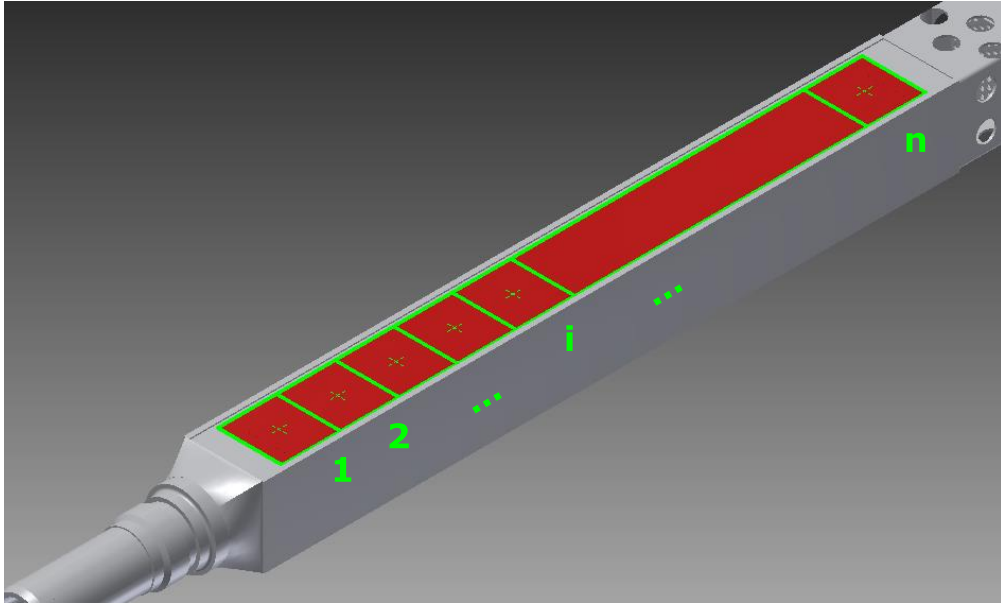


Figura 27: Reticulado del meat. En el centro de las n regiones se adquieren espectros gamma.

En los primeros muestreos realizados en el RECH-1, en el reticulado del meat se consideraron once rectángulos de dimensiones 5.30×6.02 [cm].

Capítulo 1

Diseño y ejecución de las modificaciones del montaje

1.1 Planteamiento de una solución

La necesidad latente de continuar con la implementación de la técnica de espectrometría gamma en el RECH-1 para el seguimiento del quemado de los EE.CC. irradiados a través del tiempo, de modo de corroborar experimentalmente los valores de quemado obtenidos mediante cálculo neutrónicos, y con fines de investigación propiamente tal, motivó la búsqueda de mejoras de diseño factibles para el montaje experimental de la piscina secundaria del RECH-1, haciendo este método experimental viable en el tiempo.

Como la principal dificultad de operación del montaje se relacionaba con la imposibilidad de mantener a más de un operador realizando el muestreo de un elemento durante un tiempo prolongado, resulta conveniente la automatización del montaje experimental para la adquisición de datos. El sistema de control debe manejar y coordinar tanto el sistema mapeo como el funcionamiento del detector, de modo de limitar la función de los operadores en esta fase a ingresar los datos necesarios para el control del proceso.

Desde el punto de vista del mapeo del elemento, la automatización además de ayudar a optimizar el trabajo del personal, permite eliminar errores de paralaje en el posicionamiento del detector, lo que supone una mejor precisión y exactitud en el barrido del detector a través de los elementos combustibles.

Debido a que el diseño y construcción de esta solución no estaba contemplada en el presupuesto anual del reactor, una directriz fundamental del desarrollo de este trabajo fue minimizar al máximo los costos pero sin bajar el estándar de seguridad requerido para cualquier estructura que ingrese a las instalaciones del reactor.

Visto desde el punto de vista de la protección radiológica operacional, la automatización del muestreo a través del mapeo del elemento combustible, resulta beneficioso pues se consigue el objetivo experimental minimizando además la exposición del personal a radiaciones ionizantes en el interior del RECH-1 (principio ALARA, ver anexo A.1), mediante la reducción del tiempo de estancia en esta zona controlada que, en su funcionamiento original, podía oscilar entre una a tres jornadas laborales por elemento.

1.2 Objetivo general

Diseñar y construir un sistema automatizado de medición de espectrometría gamma, para generar un perfil axial experimental de la actividad de un elemento combustible tipo MTR de bajo enriquecimiento, utilizado en el reactor de investigación RECH-1.

1.3 Objetivos específicos

- ✓ Diseñar e implementar mejoras mecánicas para el sistema de mapeo del detector en el montaje experimental existente.
- ✓ Diseñar e implementar un sistema de control automático para el sistema de mapeo del detector en el montaje experimental existente.
- ✓ Calibrar el detector de Germanio Hiper-Puro (HPGE) en energía y eficiencia con los parámetros de su electrónica asociada definidos.
- ✓ Programar un algoritmo para la ejecución de muestreos del detector de HPGE con software Genie 2000 y su posterior almacenamiento.
- ✓ Desarrollar un software que integre el control automático del mapeo y muestreo del detector para obtener un perfil axial de actividad de un elemento combustible LEU del RECH-1.

1.4 Análisis dinámico del sistema de mapeo

Este análisis busca obtener de forma simplificada parámetros de decisión para la selección y posterior diseño de los elementos finales de control a utilizar en la automatización del mapeo del montaje experimental.

1.4.1 Eje longitudinal

Como en el eje longitudinal (X) el carro se desplaza por medio de ruedas a través de rieles, al calcular la fuerza necesaria para que el carro se mueva, se consideró la rodadura de ellas sin deslizamiento. Ya que realmente los cuerpos no son indeformables, existe una resistencia a la rodadura ligada a tal deformación.

La fuerza mínima requerida para mantener un cilindro rodando con velocidad lineal constante es:

$$F = \frac{\mu_r}{R} N = C_{rr} N \quad (1)$$

Donde μ_r es llamado coeficiente de resistencia a la rodadura, R corresponde al radio de del cilindro, N es la normal ejercida por la superficie sobre el cilindro y C_{rr} es el coeficiente de rodadura.

El valor de μ_r , depende en primera aproximación solo de los materiales involucrados. Como las ruedas y los rieles son de acero, se consideró igual a 0,5 [mm] (Óscar). Aun cuando las ruedas del carro de mapeo no son cilíndricas pues adoptan la forma del riel, se supusieron así. El radio R considerado corresponde a la distancia media entre la superficie de contacto rueda-riel y el centro de esta, a saber 40,5 [mm]. Bajo la misma suposición, la normal N debe ser igual al peso total a desplazar por el sistema de mapeo. De acuerdo con la masa estimada a desplazar (316 [kg] – ver anexo A.2), el peso se aproximó a 3200 [N] para efectos de cálculo.

Luego, la fuerza necesaria estimada para mover el sistema de mapeo a lo largo del eje longitudinal es de 40 [N].

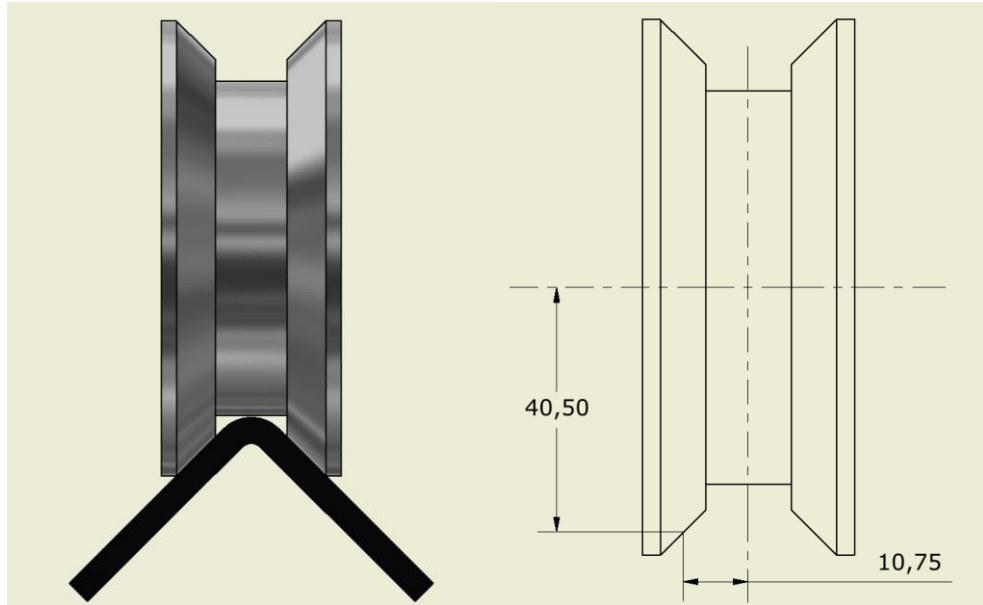


Figura 28: Perfil ruedas del carro de mapeo.

1.4.2 Eje transversal

En el eje transversal (Y), el carro se desplaza sobre sus ejes mediante el deslizamiento de guías de bronce fosfórico.

La mínima fuerza necesaria para que un objeto deslice sobre una superficie determinada está dada por:

$$F = \mu_s N \quad (2)$$

Donde μ_s corresponde al coeficiente de roce estático de los materiales involucrados y N a la fuerza normal ejercida sobre el objeto.

El coeficiente μ_s para los materiales acero y bronce fosfórico es igual a 0,35 (Engineering ToolBox, 2001) y la normal, tal como en el caso anterior, es igual al peso a desplazar. Como el carro se mueve sobre sus ejes, el peso de estos y de las ruedas no deben estar presentes en un cálculo riguroso, sin embargo, como su peso es marginal en comparación con el total a desplazar, se utilizó igualmente los 3200 [N].

De acuerdo a lo anterior, la fuerza estimada que se debe ejercer para que el carro se deslizará sobre sus ejes es de 1120 [N].

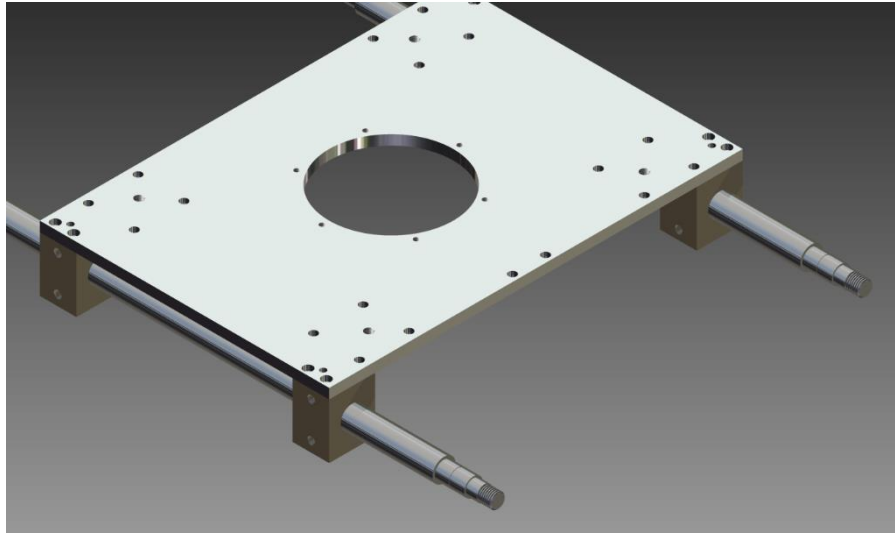


Figura 29: base del carro de mapeo con guías de bronce fosfórico según diseño original.

La comparación de las fuerzas necesarias para el desplazamiento del carro en ambos ejes, así como la inspección visual de esta parte del montaje, permitieron decidir el mantener sistema de rueda-rieles para el desplazamiento longitudinal del carro y definir como una necesidad el reducir el coeficiente de roce entre las guías y ejes del carro, facilitando así su desplazamiento transversal. Con ello, se logra además hacer comparables ambas fuerzas simplificando la selección de actuadores del sistema de mapeo.

1.5 Modificación de guías y ejes de carro de mapeo

La forma de reducir el coeficiente de roce de guías del carro con sus ejes no podía incluir ninguna clase de lubricación pues esto implica un riesgo de contaminación de las piscinas del reactor. Una propuesta “más limpia” de hacerlo fue cambiar las guías de bronce por rodamientos lineales, los que tienen un μ_s que varía según su aplicación y marca hasta aproximadamente 0,005. Recalculando mediante (2) con dicho valor, se tiene que la fuerza estimada que se debe ejercer para que el carro se deslice sobre sus ejes es ahora de 16 [N], reduciéndola 70 veces respecto a su valor original.

La oferta de mercado respecto a rodamientos lineales ofrece dos alternativas: comprar el rodamiento solo o comprar una unidad lineal, pieza que está lista para acoplarse a un montaje y que contiene un rodamiento lineal.

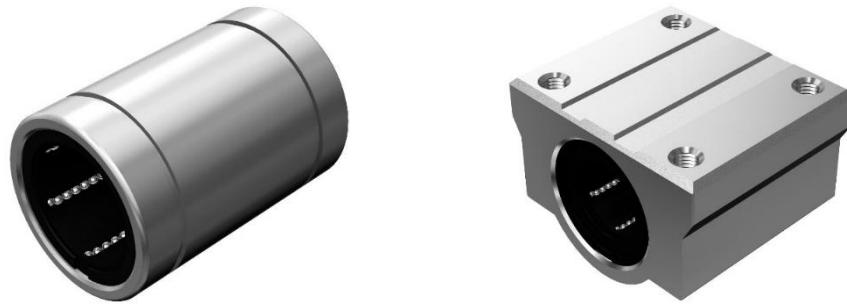


Figura 30: Rodamiento lineal y unidad lineal. Recuperadas de www.thkstore.com.

Debido a la facilidad de reemplazo y precios comparables (ver anexo A.3), se seleccionó la instalación de las unidades lineales en reemplazo de las guías de bronce fosfórico para el deslizamiento del carro. Como las guías reemplazadas además eran puntos de fijación para la estructura de soporte del tubo seco, se modificaron de tal forma que siguieran cumpliendo esta función para su reutilización.

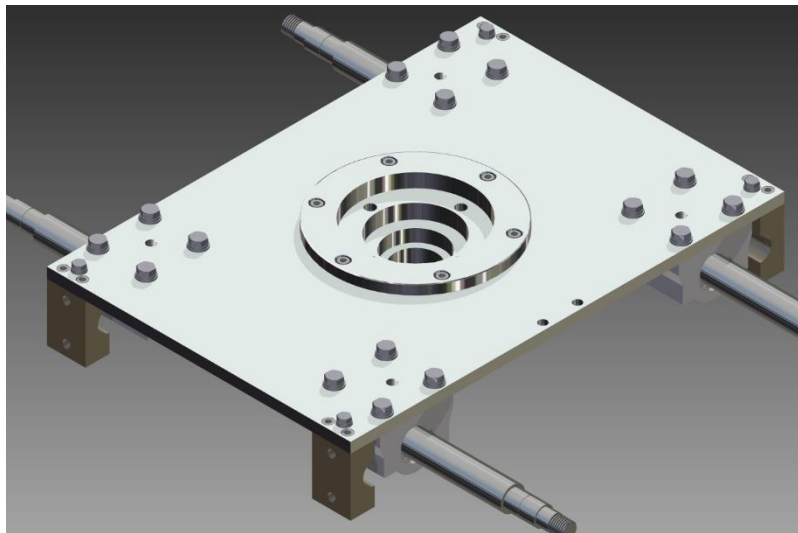


Figura 31: Rediseño de guías del carro para desplazamiento en eje Y.

Los ejes originales del carro tenían un diámetro mayor de 24 [mm]. Esta medida no es estándar para los rodamientos lineales, siendo el valor más cercano 25 [mm]. Luego, se rediseñaron los ejes según esta nueva medida, aprovechando la ocasión para hacerlos simétricos en sus extremos y cambiar los rodamientos de las ruedas a unos de dimensión estándar y con un diámetro interior mayor al original para conseguir un eje más robusto. Para su fabricación se adquirieron dos barras cilíndricas de acero trefiladas de 1000 [mm] de largo con una tolerancia dimensional (diámetro) h11. Existen en el mercado ejes de precisión del mismo diámetro con tolerancia h6, sin embargo, el costo crece sustancialmente, según lo cotizado, más de 40 veces (ver anexo A.4).

La distancia entre el centro de los ejes del carro y su placa base varió con la sustitución de las guías de bronce, afectando directamente la distancia de agua (d) entre el tubo seco y la primera placa combustible externa de los elementos a medir, más aun, empíricamente se notó que la tapa del tubo seco chocaba con el elemento a medir.

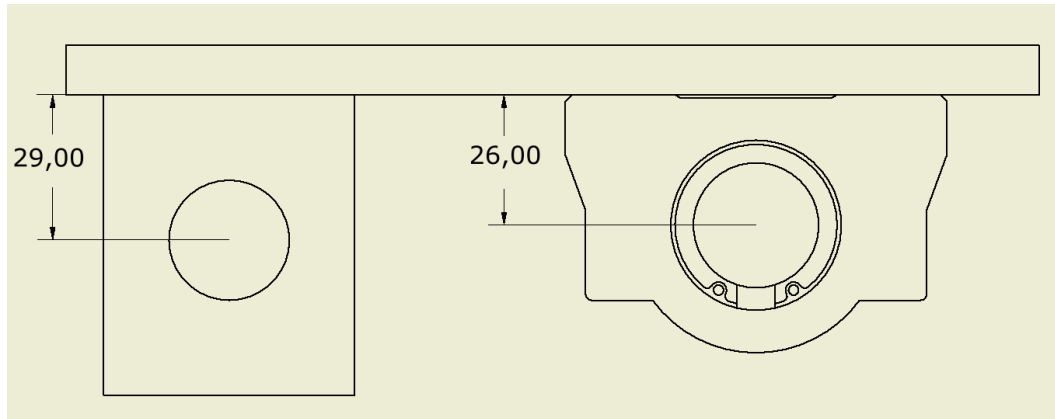


Figura 32: Variación de altura de los ejes respecto a placa base del carro luego de modificación.

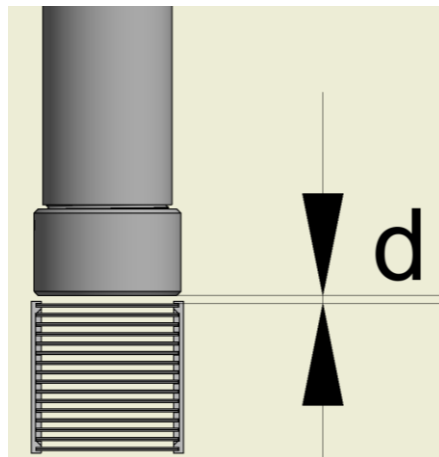


Figura 33: Distancia de agua (d) entre la tapa del tubo seco y la primera placa combustible.

La acción más simple era levantar el tubo seco, de modo que se incorporó en el montaje un anillo con espesor de 10 [mm] con la función de elevar el anclaje del tubo en el carro. La distancia de agua d fue medida en diferentes puntos del elemento combustible, con lo que su nuevo valor es 4 [mm].

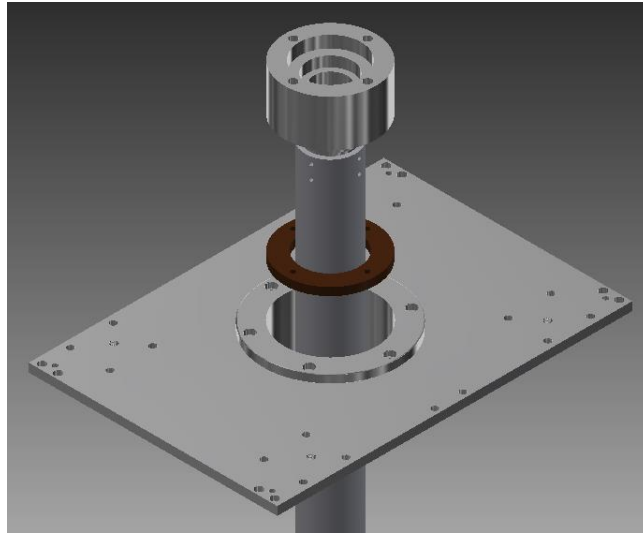


Figura 34: *En café, anillo que corrige distancia de agua d.*

1.6 Selección del elemento final de control del sistema de mapeo

Los elementos finales de control, se refieren a los actuadores y mecanismos que ejecutan una acción sobre un proceso dado de acuerdo con lo establecido por el controlador automático.

En términos generales, se encuentran en el mercado tres tipos de actuadores:

- ✓ Eléctricos;
- ✓ Neumáticos;
- ✓ Hidráulicos.

De ellos, los actuadores eléctricos son los que presentan precisión, mayor facilidad de instalación y menor mantención. Por ello, y debido a que el RECH-1 contaba con motores de paso y un controlador en desuso, se determinó reutilizarlos aprovechando su precisión de giro y demás características señaladas.

Son dos los mecanismos posibles para el movimiento del carro en ambos ejes compatibles con la utilización de dichos motores:

- ✓ Husillo-tuerca;
- ✓ Piñón-cremallera.

Teniendo en cuenta que en el segundo mecanismo el actuador se acopla directamente al piñón, las dimensiones de los motores disponibles y el diseño original del sistema de

mapeo, se decidió diseñar e implementar mecanismos husillo-tuerca para desplazar el carro en ambos ejes.

1.6.1 Motores disponibles desde el diseño mecánico

Los motores de paso utilizados para el trabajo son:

	Marca	Modelo	Pasos/Rev	Holding Torque [Nm]	ØEJE [mm]
M1	American Precision Industries	34D-9109A	200	1,05	9,5
M2	Sanyo Denki Co., Ltd.	S/I	180	0,8	9,5

Tabla 1: Características principales de motores utilizados. S/I: sin información.

La relación del torque con la velocidad de ambos motores no está disponible puesto que no es una característica intrínseca de un motor, sino que depende también del controlador con el que son manejados. Sin embargo, una curva típica de torque en función de la velocidad es:

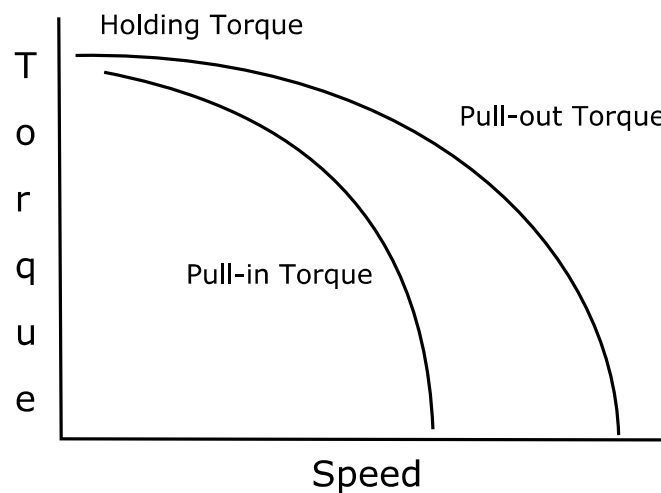


Figura 35: Curva típica torque-velocidad de un motor paso unipolar.

La curva “Pull-in” se asocia con la partida/detención del motor y la curva “Pull-out” con el motor en movimiento sin perder el sincronismo con el pulso de entrada (sin perder pasos). Entonces, en la medida que la velocidad de giro del motor sea baja, el torque que se puede ejercer aumenta aproximándose al valor de holding torque. La velocidad definida para ambos motores fue de 100 [pasos/s], lo que implica una velocidad angular de 30 [rpm] y 33,3 [rpm] respectivamente. Estos valores son lo suficientemente bajos considerando una curva torque-velocidad típica de cualquier motor de paso del

mercado, como para suponer que la aproximación señalada es válida. Con el fin de sobreestimar los cálculos, se consideró que los motores para las velocidades señaladas son capaces de ejercer el 60% del holding torque, es decir, 0,63 [Nm] y 0,48 [Nm] respectivamente. De acuerdo con esto, se decidió utilizar el motor M1 en el eje X y M2 en el eje Y.

Tanto la baja velocidad seleccionada como la suposición de que el torque máximo de los motores es menor al holding torque, contribuyen a asegurar que los motores no pierdan pasos, cuestión fundamental para minimizar la pérdida de exactitud en el posicionamiento del carro de mapeo.

1.6.2 Selección de husillos

Las opciones vistas fueron los husillos de bola y uno convencional de perfil ACME. Para máquinas y montajes en los que se requiere precisión y repetitividad en recorridos cortos (<4 [m]), los husillos a bola son la elección puesto que poseen un error de paso del orden de 0,02 [mm] por cada 300 [mm] de avance y un rendimiento que supera el 90%, lo que está por sobre los husillos convencionales. Se definieron entonces las características mínimas (longitud y diámetro) de los husillos en ambos ejes, para ver la oferta del mercado.

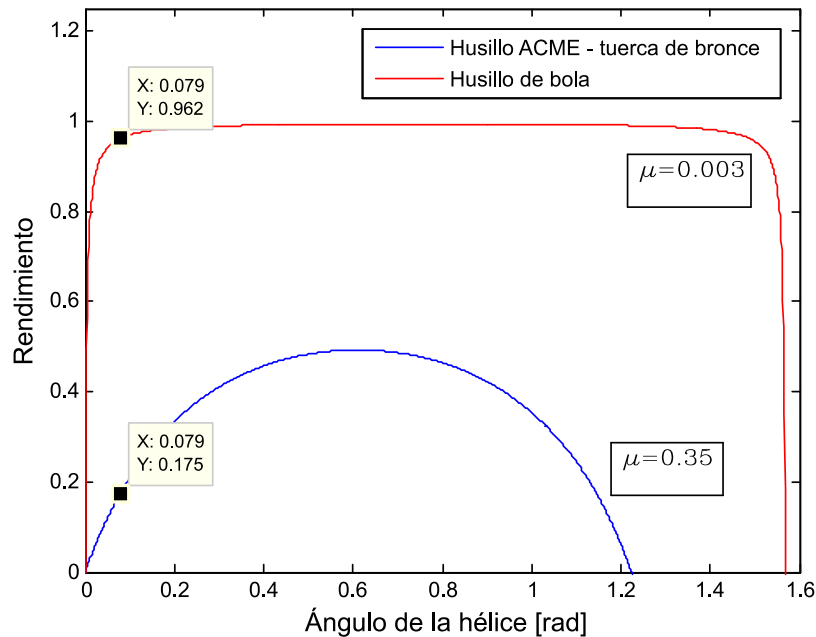


Figura 36: Comparación del rendimiento de un husillo a bolas y uno ACME.

1.6.2.1 Eje longitudinal

La longitud del husillo en este eje está determinada por el recorrido del carro, que debe ser suficiente para barrer longitudinalmente la mesa de muestreo donde se ubican los EE.CC., más una holgura para permitir ubicarlos en ella. Se determinó empíricamente que el husillo debe medir a lo menos 1 [m] de largo. Tal medida, hizo relevante evitar la deflexión del tornillo por su propio peso, lo que llevó a acotar su diámetro.

Se consideró el tornillo como un cilindro de diámetro igual al diámetro interior de este. Además, como el husillo se monta en sus extremos en rodamientos, en primera aproximación se consideró que sus extremos eran fijos al momento de analizar su deflexión.

La flecha máxima y_{max} que presenta una barra fija en sus extremos se puede calcular como (Budynas & Nisbett, 2008):

$$y_{max} = \frac{FL^3}{192EI} \quad (3)$$

Donde F corresponde al peso del husillo, L a su largo, E su módulo de Young e I su momento de inercia.

Reescribiendo el peso del husillo en función de su volumen y del peso específico (w) del acero, material típico de los tornillos, y reemplazando el momento I de un cilindro respecto a su eje axial, se tiene el diámetro (D):

$$D = \frac{wL^4}{12Ey_{max}} \quad (4)$$

La flecha se restringió al 0,05% de la longitud del husillo, esto es 0,5 [mm]. Considerando w igual a 76930 [N/m³] y E igual a 207,0 [GPa], se acota el diámetro interno mínimo del tornillo a 8 [mm], lo que equivale a ver husillos de diámetro nominal (exterior) mayores o iguales a 1/2".

1.6.2.2 Eje transversal

Como se describió en la sección 0.6.3, el diseño original contempló un mecanismo husillo-tuerca accionado de forma manual mediante una manivela. Tras desarmar dicha parte del montaje se comprobó un desgaste producto del uso, debido a que tanto el husillo como la tuerca utilizados eran de acero y que el tornillo en sí no era de potencia sino de fijación tipo Whitworth. Por lo demás, el husillo cumplió su función adecuadamente, por lo que decidió cambiarlo por uno de potencia con largo y diámetro nominal cercanos al original, de 160 [mm] y 5/8" respectivamente.

1.6.2.3 Adquisición de husillos

Tras revisar la oferta de husillos de bola en Santiago, resultó que su disponibilidad inmediata es limitada, siendo principalmente un producto sujeto a importación. Las opciones presentes al momento de la cotización eran tornillos con diámetros nominales entre 20 y 32 [mm], con un costo asociado mínimo para ambos ejes de CLP\$ 455700, lo que era prohibitivo para el presupuesto disponible. En cuanto a los husillos convencionales de precisión, el escenario resultó no ser muy distinto. Luego, se tomó la decisión de buscar opciones más económicas en husillos de máquinas dadas de baja, puesto que, aunque se sacrifica el rendimiento de los tornillos (respecto a los de bolas) y precisión por su desgaste, estos pueden ser compensados acoplando reductores a los actuadores para aumentar su torque y con una adecuada calibración del sistema de mapeo respectivamente.

De esta forma, se adquirieron dos husillos de perfil ACME estándar de longitud 1,2 [m], diámetro nominal estándar de 3/4" y un paso de 6 hilos por pulgada. Solo uno de ellos venía con tuerca, pero no resultó relevante pues de todas maneras, y como se expondrá más adelante, se bosquejaba en este punto la necesidad de maquinar una tuerca más larga de lo usual para el eje transversal. El costo de ellos fue de CLP\$55000, equivalente al 12% del menor precio de los husillos de bolas cotizados (ver anexo A.5).

1.7 Rendimiento de los elementos de control final

Aquí se desarrollan los cálculos relacionados con el torque requerido por el carro de mapeo para desplazarse en ambos ejes con velocidad constante y su comparación con el torque disponible de los actuadores M1 y M2.

El perfil ACME de los husillos adquiridos es:

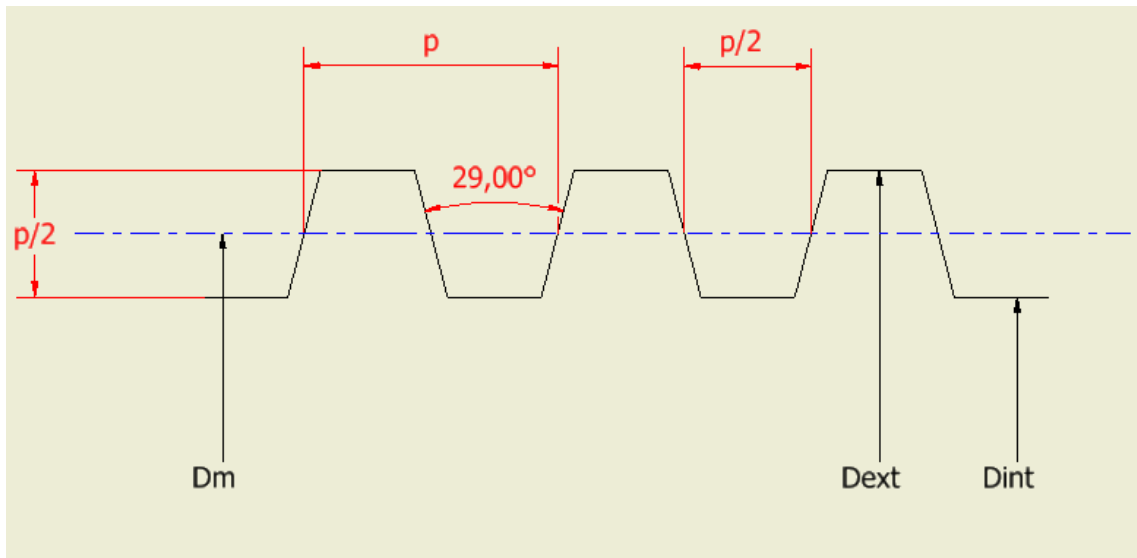


Figura 37: Perfil ACME estándar.

Donde Dint corresponde al diámetro del núcleo del husillo, Dext a su diámetro nominal, Dm a su diámetro medio y, p a su paso.

Si se “desenrolla” del husillo el equivalente a una vuelta del perfil, se tiene un plano inclinado. De su análisis (ver anexo A.6), se puede determinar que el torque necesario para mover una carga F con velocidad constante en el caso ideal ($\mu_s = 0$) es:

$$\tau_0 = \frac{Fp}{2\pi} \cos \theta \quad (5)$$

Donde p es igual a 4,23 [mm], y θ es 14,5°, que corresponde al ángulo entre la vertical y un canto del perfil.

Reemplazando F con la fuerza mínima necesaria para desplazar el carro en los ejes longitudinal y transversal del montaje experimental, iguales a 40 [N] y 16 [N] respectivamente, se tiene que los torques ideales mínimos son 0,03 [Nm] y 0,01 [Nm].

Considerando el rendimiento de este perfil, dado por:

$$\eta = \frac{\tau_0}{\tau} = \frac{\cos \theta - \mu_s \tan \alpha}{\cos \theta + \mu_s \cot \alpha} \quad (6)$$

Donde el α corresponde al ángulo de la hélice (igual al ángulo del plano inclinado), de valor $4,55^\circ$.

Pese a que las tuercas de ambos ejes son de materiales distintos, una de plástico (incluida con un husillo) y otra de bronce fosfórico (mecanizada), el coeficiente de roce μ_s considerado en ambos casos fue el del segundo material (0,35), pues por un lado se desconoce el tipo de plástico utilizado en la tuerca y por otro, varios polímeros mecanizables usuales poseen un coeficiente de fricción que bordea dicho valor. Así, se tiene que el rendimiento de los husillos es 0.18 (ver figura 34).

De acuerdo a lo anterior, se tiene que el torque (τ) necesario para desplazar el carro en los ejes X e Y son respectivamente 0,2 [Nm] y 0,06 [Nm]. Ambos valores son significativamente menores a los torques que son capaces de generar M1 y M2, sin embargo, los cálculos reflejan condiciones ideales tanto de alineación como de los componentes usados (husillos sin defectos), lo que no es cierto. Debido al uso de motores de paso, que no poseen intrínsecamente una retroalimentación de la posición, se decidió incorporar en ambos ejes reductores para aumentar el torque máximo que pueden ejercer, de modo de asegurar que en condiciones normales de operación, los actuadores nunca perdieran pasos por factores como una desalineación leve.

1.8 Selección de reductores

Respecto al torque de entrada (τ_e), el torque de salida (τ_s) de un reductor real (ver anexo A.7) es:

$$\tau_s = \eta_R n \tau_e \quad (7)$$

Donde n es la relación de reducción y η_R es el rendimiento del reductor.

El reductor de menor costo es el que tiene un mecanismo sinfín-corona para transmitir el movimiento. Por esa razón, este tipo de reductores fue utilizado.



Figura 38: Reductor sinfín corona. Recuperada de la página www.erhsa.com.

Su rendimiento, puede dividirse en estático (η_{RS}) y dinámico (η_{RD}). El rendimiento dinámico es un valor constante que se alcanza tras unas horas de rodaje del reductor, mientras que, el rendimiento estático es un valor que se tiene durante su arranque. En general, se cumple:

$$\eta_{RS} < \eta_{RD} \quad (8)$$

Como el funcionamiento del montaje implica el accionamiento de los reductores repetidamente por lapsos de tiempo cortos (< 30 minutos), el rendimiento utilizado es η_{RS} y considerado igual a 0,5 para ambos.

El único criterio de adquisición restante fue la relación de reducción. Dado que los motores en condiciones ideales presentaban torque suficiente para desplazar el carro de mapeo, se buscaron reductores con un n bajo respecto a la oferta del mercado, $n = 5$ o $n = 10$. De acuerdo a su disponibilidad y costo, se compró y asignó un reductor con $n = 20$ para M1 y $n = 25$ para M2 por CLP\$60.000.

Con estos reductores, los actuadores M1 y M2 tienen la capacidad de ejercer un torque máximo de 6,3 y 6,0 [Nm] respectivamente. Este aumento de torque viene de la mano con una disminución de la velocidad angular de los actuadores, lo que se traduce en un mayor tiempo de muestreo de los EE.CC., sin embargo, es algo irrelevante pues dicho tiempo no excede la ventana entre operaciones del reactor, de aproximadamente dos días, y que es el tiempo disponible para efectuar las mediciones.

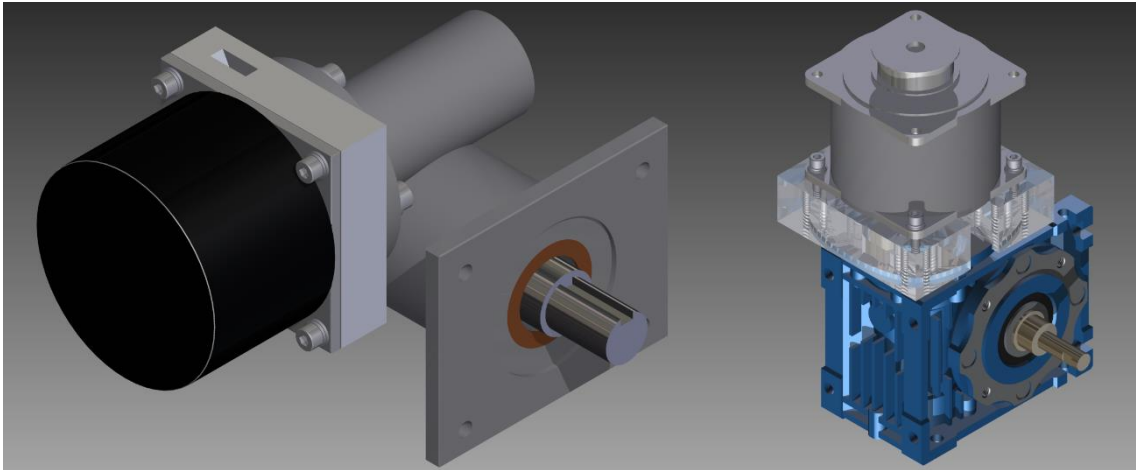


Figura 39: De izquierda a derecha, M1 y M2 acoplados a sus respectivos reductores.

1.9 Posicionamiento de elementos de control final en montaje experimental

Con los actuadores y mecanismos de control final definidos, se diseñaron las piezas restantes del carro y los soportes para la implementación de dichos elementos.

1.9.1 Eje longitudinal

Tanto el motor como el husillo se anclaron a la estructura de soporte del montaje experimental, como se muestra a continuación:

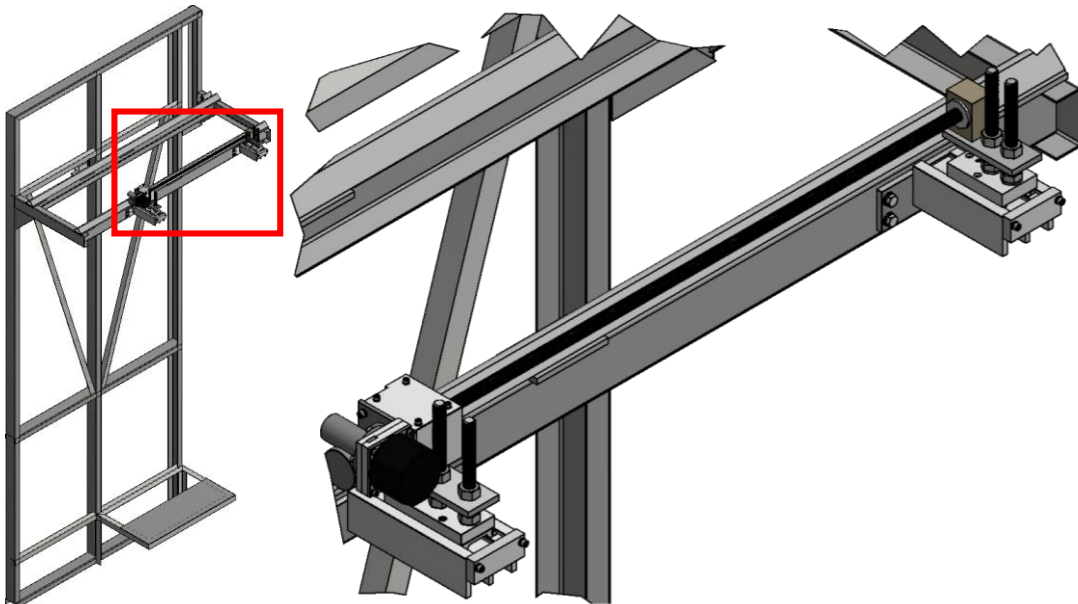


Figura 40: Montaje parcial de elemento final de control de eje longitudinal en estructura de soporte.

El husillo al ser un elemento giratorio, se montó en rodamientos rígidos de bola 6202 estándar, para facilitar su movimiento.

Los anclajes fueron diseñados para permitir la alineación del husillo con respecto al carro de mapeo que lleva consigo una tuerca fija. Los materiales utilizados, exceptuando los elementos de fijación, fueron reciclados de montajes en desuso.

Por otro lado, la tuerca fija se montó en uno de los descansos de ejes de carro. Tales descansos cumplen la función de darle rigidez al carro soportando ambos ejes en sus extremos y otorgan una estructura de apoyo para acoplar los actuadores y/o mecanismos de control final, al mantenerse estático respecto a la placa base del carro.

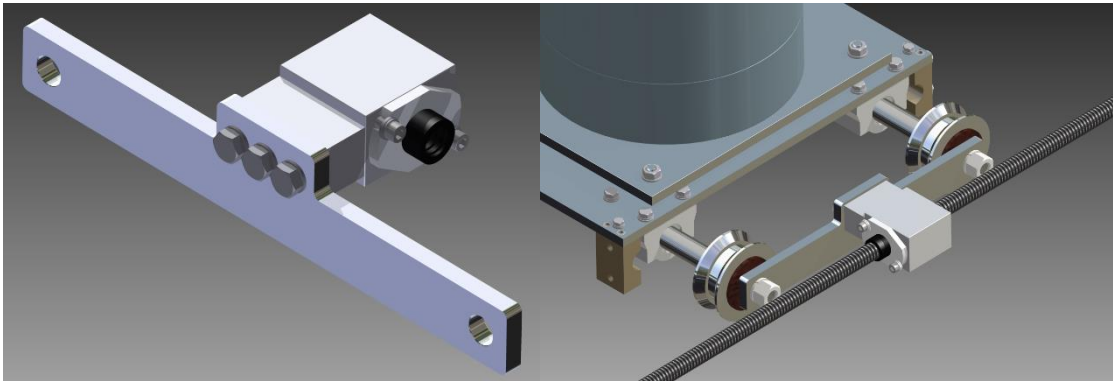


Figura 41: Tuerca fija en descanso de ejes y mecanismo tornillo-tuerca del eje X.

1.9.2 Eje transversal

En este eje, M2 con su reductor y su respectivo husillo se fijaron en el segundo descanso de ejes del carro. Como el mapeo en el eje transversal implica el desplazamiento del carro sobre sus ejes, el husillo se dejó con un extremo libre, mientras que el otro se montó en un rodamiento rígido de bolas estándar 6002.

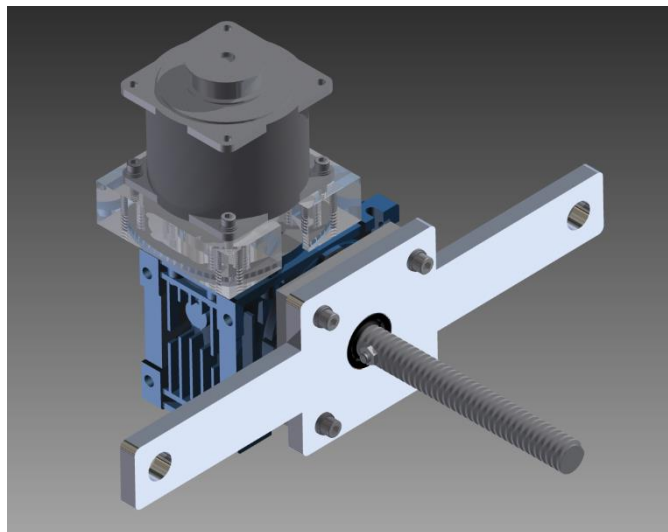


Figura 42: Montaje parcial de elemento final de control del eje transversal en descanso de ejes.

Para minimizar la deflexión del tornillo debido a su propio peso, se mecanizó una tuerca de longitud 85 [mm] en bronce fosfórico. Esta medida asegura que para todo el recorrido del carro el husillo permanece dentro de ella, manteniéndose la alineación entre sí. Dicha tuerca, se ancló a la placa base del carro de mapeo.

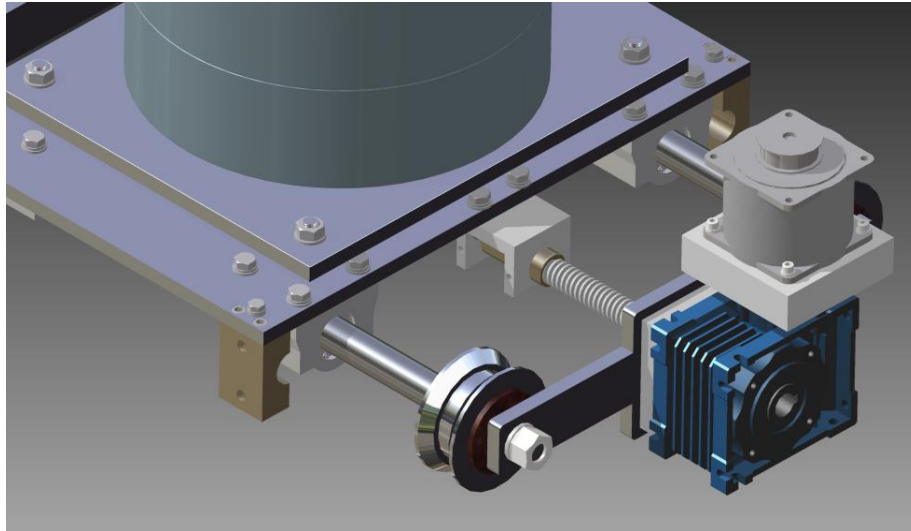


Figura 43: Elemento final de control del eje Y.

1.10 Electrónica de control del sistema de mapeo

Los motores de paso utilizados tienen asociado un controlador marca Velmex, modelo 86 MM-2. Posee un listado de comandos predeterminados para manejar los motores, siempre uno a la vez, que pueden ser revisados en su manual². El controlador puede interactuar con otros dispositivos vía comunicación serial asíncrona bajo el protocolo RS-232C, mediante un canal de comunicación full dúplex.



Figura 44: Panel frontal del controlador de motores asociado a M1 y M2.

² <http://www.velmex.com/Downloads/Archives/86MM/862usrman.pdf>

Debido a su diseño, el manual recomienda mantener el controlador al menos a 6" de cualquier objeto para asegurar una ventilación adecuada y porque en funcionamiento, su panel trasero alcanza una alta temperatura. Ante esto, y entendiendo que la automatización del montaje implica la no supervisión continua del equipo, se decidió reforzar la ventilación del controlador para disminuir el aumento de temperatura señalado. Para ello se utilizaron dos fuentes de poder de computadores desechadas, de las que se aprovecharon sus ventiladores y chasis, siendo únicamente necesaria la adquisición de un transformador de 12 [v]/1 [A] para su alimentación por CLP\$5000.

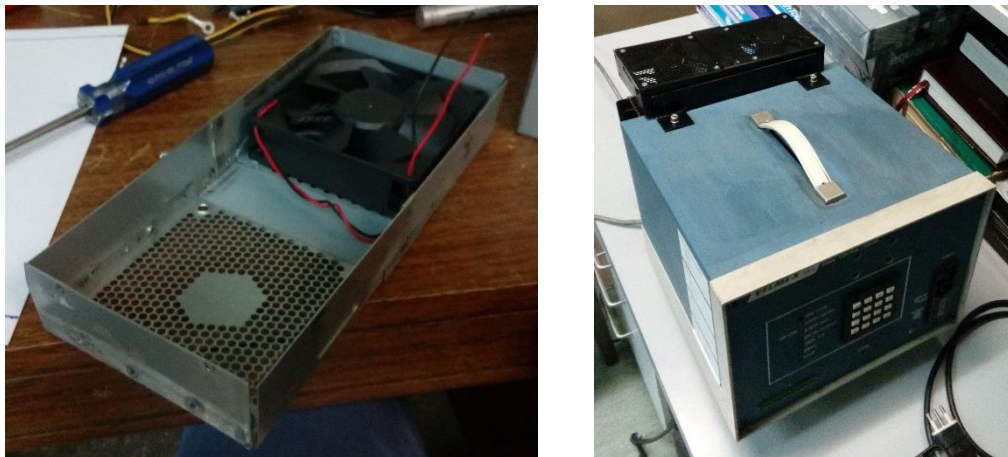


Figura 45: Refuerzo de la ventilación del controlador para aumentar su seguridad de operación.

Desde el punto de vista de los motores, el controlador carece de una realimentación de la posición, constituyendo en sí mismo un sistema de control de lazo abierto. De acuerdo con el método de muestreo que se utiliza en el montaje experimental (sección 0.7) y a las restricciones presupuestarias, se descartó convertirlo a un sistema lazo cerrado.

El manejo del montaje experimental requiere la delimitación de una zona o plano de muestreo, que es por donde se debe mover el detector. Esto realizó mediante la incorporación de fines de carrera o limit switch (LS) en ambos ejes, los que permiten definir un sistema de referencia para el posicionamiento del carro. Su posición en el montaje se definió experimentalmente, siendo ubicados como sigue:

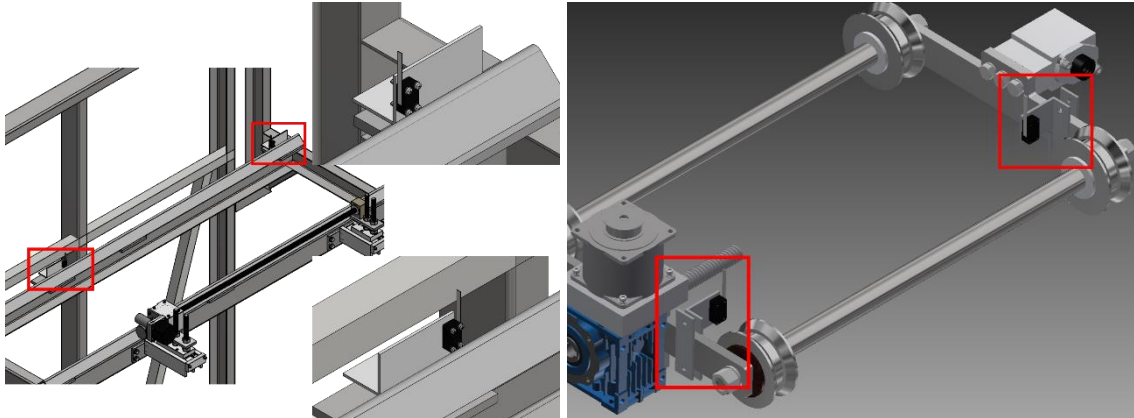


Figura 46: De izq. a der., fines de carrera (LS) en ejes X e Y que delimitan plano de muestreo.

De este modo se definió la necesidad de diseñar un dispositivo “sensible” al accionamiento de los LS, capaz de interactuar con el controlador de motores, el PC y con el propio operador en caso de ser requerida una detención inmediata del muestreo. Tal dispositivo fue llamado Unidad de Control de Movimiento (UCM).

1.10.1 Diseño de UCM

El elemento central de la UCM es un microcontrolador. Para efectos de conseguir un prototipo funcional en corto tiempo, se utilizó una placa de desarrollo Mega 2560 de Arduino. Los criterios de selección utilizados para escoger dicha placa fueron dos: poseer al menos 5 pines configurables para ejecutar interrupciones por hardware, cuatro de ellos para los fines de carrera o LS y uno para disponer de una parada de emergencia del muestreo; y dos puertos físicos para establecer comunicación serial asíncrona con el controlador de motores y el computador.

La conexión de los LS y el microcontrolador están dados por el esquema:

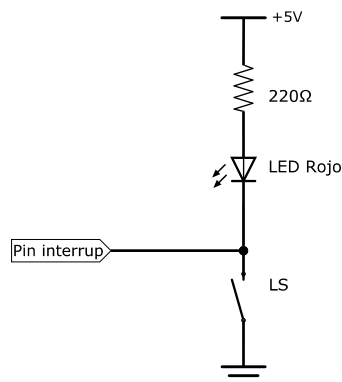


Figura 47: Esquema general de conexión de LS que delimitan plano de muestreo.

De este modo, mientras el carro de muestreo esté dentro de los límites del plano de muestreo, los LS se encuentran normalmente abiertos y los pines de interrupción del microcontrolador leen un nivel o estado lógico “1”. Cuando el carro acciona un fin de carrera, dicho nivel lógico cambia a “0”, se lanza una rutina que detiene su desplazamiento y por construcción, se enciende un led rojo como indicador del evento. El efecto rebote producido en el contacto mecánico del LS (switch bouncing) fue eliminado vía software en la programación de la placa.

El esquemático de la figura también es válido para el accionamiento de la parada de emergencia del muestreo, reemplazando el LS por un pulsador en el panel de la UCM.

Con el objeto de apoyar visualmente al operador del montaje, se agregaron indicadores al dispositivo para reconocer que el carro se encuentra tanto dentro del plano de muestreo como en algunas posiciones de interés (por ej. en el centro del elemento combustible). Tales indicadores fueron conectados directamente a la placa como sigue:

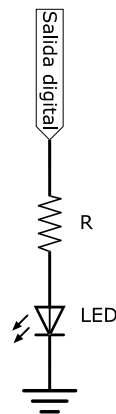


Figura 48: Conexión de indicadores de la UCM en la placa del microcontrolador.

La comunicación serial establecida por la UCM con el PC y el controlador de motores utiliza los siguientes parámetros:

Parámetro	UCM-PC	UCM-C. Motores
Velocidad de transmisión [baudios]	9600	1200
Bits de datos	8	7
Paridad	Ninguna	Par
Bits de parada	1	2

Tabla 2: Parámetros de comunicación serial de la UCM con otros dispositivos.

La placa de la UCM utiliza niveles lógicos TTL para establecer comunicación con su entorno, por lo que la conexión con el PC es directa vía USB. Dado que el controlador de motores se comunica bajo el protocolo RS-232C, que define niveles lógicos distintos de los TTL, se requirió incorporar una interface entre ambos en el diseño de la UCM.

Niveles lógicos	TTL	RS-232C
0	0 [V]	3 – 15 [V]
1	5 [V]	-3 – -15 [V]

Tabla 3: Comparación de tensiones para niveles lógicos TTL y RS-232C.

Para dicha interface se utilizó un CI max232. El esquemático y PCB del circuito son:

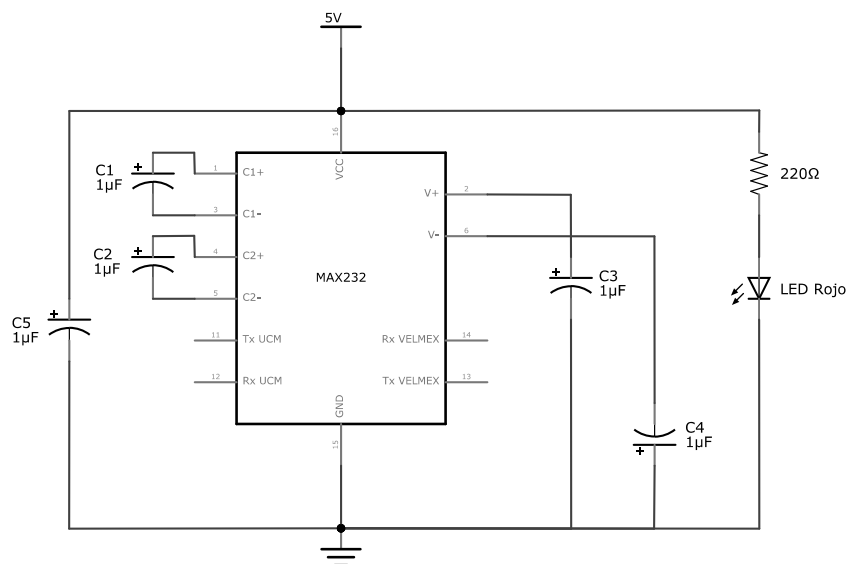


Figura 49: Circuito con max232 para compatibilizar niveles lógicos.

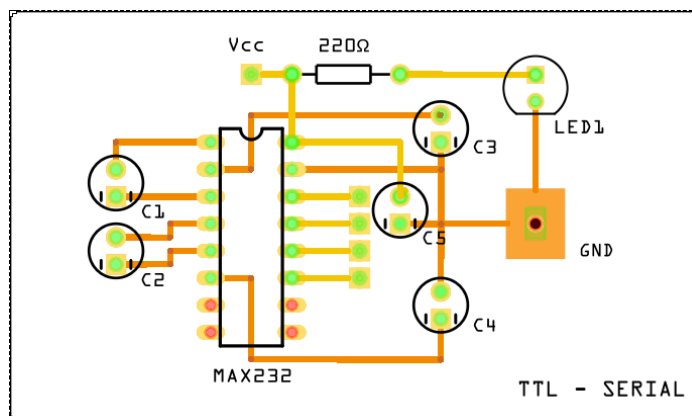


Figura 50: PCB del circuito. Las pistas naranjas son de la capa inferior, mientras que las amarillas son de la superior.

La UCM se encapsuló en una caja de dimensiones 200x110x65 [mm]. En uno de los paneles laterales se ubicaron 2 conectores USB hembra tipo y 2 conectores hembra DB-9. Sus funciones:

Puerto	Función
DB-9	Comunicación UCM-C. Motores
DB-9	Entrada conectores de LS
USB-A	Comunicación UCM-PC
USB-A	Alimentación

Tabla 4: Descripción uso de puertos de la UCM.

Tras el montaje del dispositivo, junto con el diseño del rotulado de indicadores y puertos (ver anexo A.8), la vista final de la UCM es:



Figura 51: Vistas de UCM en funcionamiento.

1.10.2 Resguardo de la electrónica del montaje experimental

Principalmente durante la época de invierno, la red eléctrica presentó cortes intermitentes. En la mayoría de estos eventos, su duración no se extendió más allá de un par de minutos. Debido a ello, se decidió tomar resguardo para proteger los equipos, el muestreo y las horas hombre invertidas en el proceso.

Se seleccionó una UPS básica para superar eventos de corta duración con electrónica del montaje funcionando (< 10 minutos). La restricción fue su coste, ya que en general el almacenamiento de carga es proporcional al precio del equipo. La UPS adquirida es marca APC, modelo BX950UI con un costo de CLP\$89.300.

Debido a que el detector no debe ser polarizado bruscamente para evitar daños en el cristal de Germanio, es necesario evitar que tras un corte prolongado se energice automáticamente su electrónica asociada. Por ello, se montó entre la UPS y la red un circuito de protección que mantiene el circuito desenergizado hasta que un operador cambie manualmente dicho estado (ver anexo A.9).

El diagrama de conexión eléctrica del montaje experimental es:

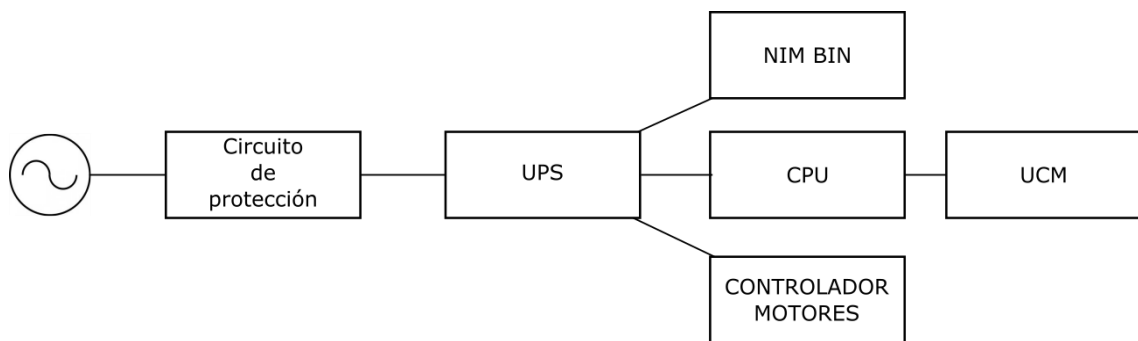


Figura 52: Diagrama principal de conexión a la red del montaje experimental automatizado.

1.11 Selección del lenguaje de programación

La clasificación de los lenguajes de programación de bajo y alto nivel, se utilizó como primer criterio de selección del lenguaje a utilizar en este trabajo.

Se entiende por lenguajes de bajo a nivel a aquellos que tienen comunicación directa o casi directa con la máquina, de modo que sus instrucciones tienen control directo sobre el hardware. Tal característica hace que el código sea condicionado para computadores con un determinado procesador, siendo imposible abstraerse de él, lo que lo hace poco portable. A nivel de usuario, resulta difícil la escritura y comprensión de los programas. Un ejemplo de este grupo es el lenguaje de máquina, que utiliza código binario.

Los lenguajes de alto nivel, son aquellos cuyo código es más cercano al lenguaje del ser humano, lo que facilita la programación a nivel de usuario. Debido a esta lejanía con el lenguaje de máquina, es necesario usar un programa Compilador para que pueda ser ejecutado por un computador. Otra característica de estos lenguajes es que son independientes del hardware, lo que los hace portables. Ejemplos de este tipo de lenguajes son Fortran, Pascal, Java, Basic, C, C++, Python, entre otros.

Aunque no existe un consenso transversal, existen quienes definen el lenguaje de medio nivel, cuyo atributo principal es poseer características de bajo y alto nivel. C y C++ son lenguajes que encajan en esta definición, factor relevante en la decisión de utilizar C++.

Su desarrollo a través del tiempo, apoyó igualmente el uso de este lenguaje. Desde su creación en 1979 por Bjarne Stroustrup, y su posterior estandarización internacional en 1998 bajo el nombre ISO/IEC 14882 (conocida informalmente como C++98), C++ ha incluido mejoras y solucionado errores en su estándar en otras cinco ocasiones, siendo la más reciente en el 2017. Tal desarrollo, hace de C++ un lenguaje robusto, conocido ampliamente a nivel mundial y con abundante material de consulta en la red.

Por los argumentos expuestos, C++ fue el lenguaje principal utilizado en este trabajo de titulación. El código fuente construido fue hecho en Codeblocks v16.10, un entorno de desarrollo integrado o IDE libre, que puede ser descargado directamente desde la página web <http://www.codeblocks.org/>.

1.12 Programa muestreo y descripción de su operación

De modo general, la interacción del usuario con la electrónica del montaje experimental, es:

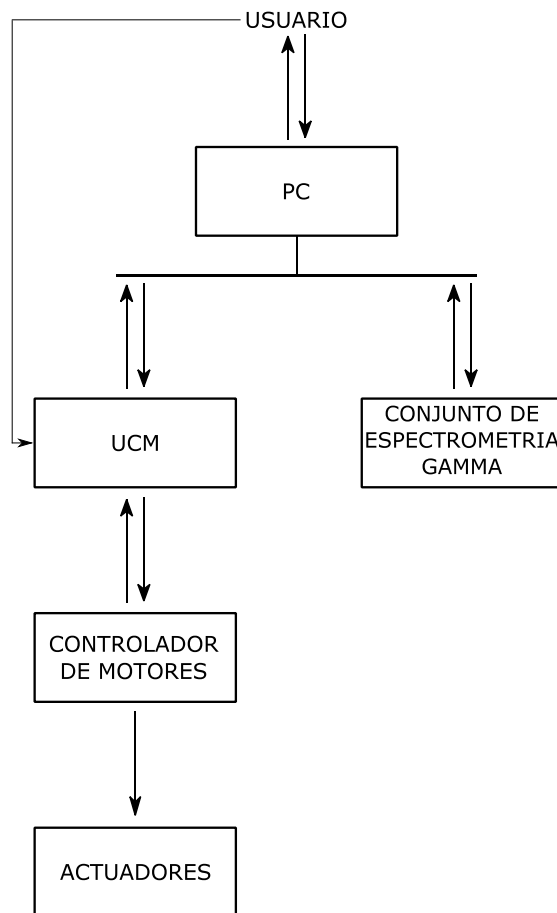


Figura 53: Esquema de interacción entre dispositivos y con el usuario con el montaje operando.

El primer paso del muestreo lo da el usuario (u operador) alimentando al PC con información referente al muestreo a realizar, Con estos datos, el PC inicia el muestreo coordinando el movimiento del carro de muestreo con la adquisición de datos del detector. Exceptuando a los actuadores, cada componente del sistema realimenta de forma jerárquica hasta llegar al usuario, la acción ejecutada. Adicionalmente vía hardware, el operador puede acceder directamente a la UCM para detener el muestreo. Para cubrir tales requerimientos, el programa de muestreo o script global, posee la siguiente estructura:

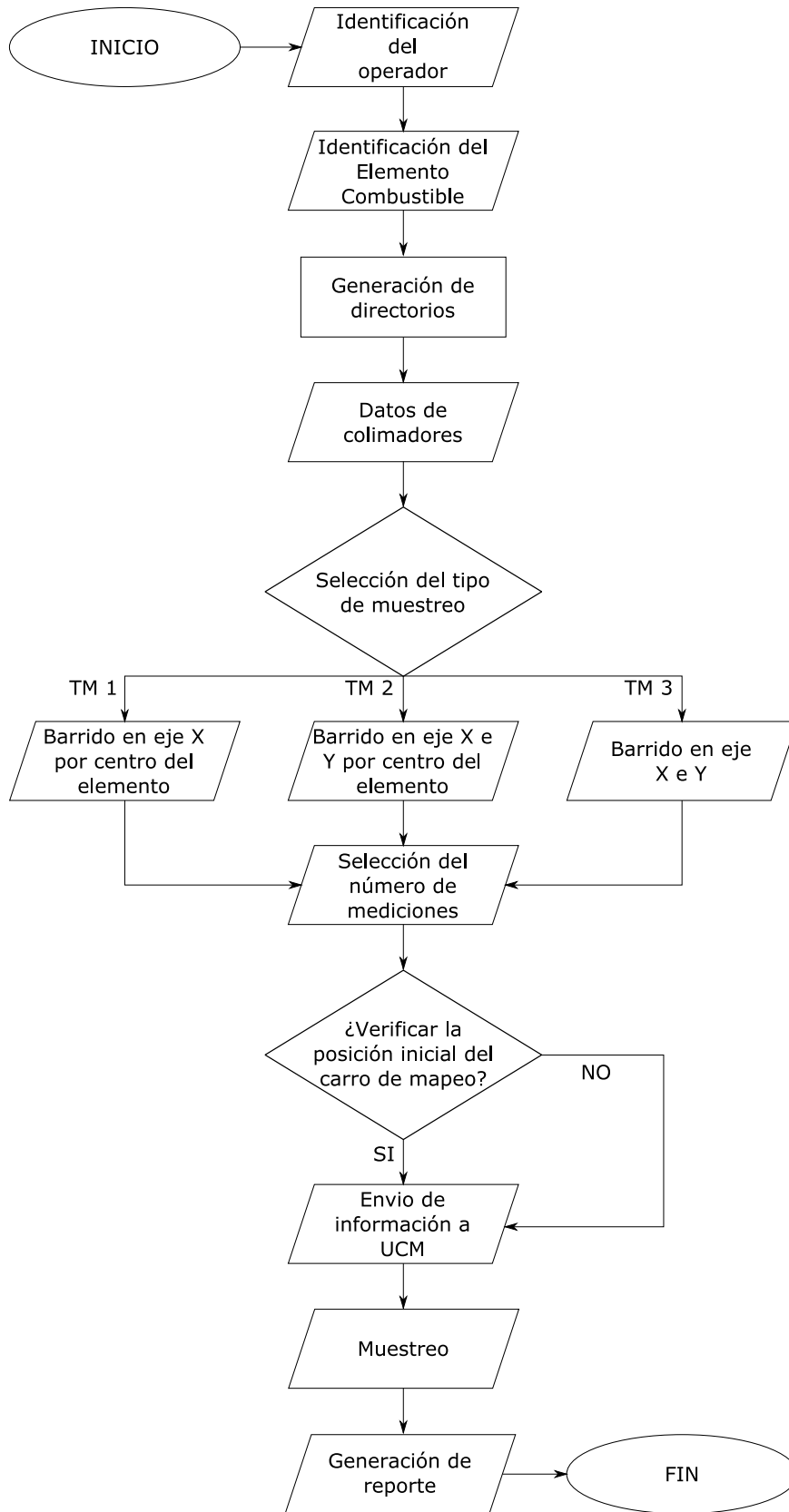


Figura 54: Diagrama de flujo del script global para la automatización del muestreo.

La ejecución del programa lanza un terminal personalizado que permite la interacción con el usuario y determina el inicio del proceso de muestreo.

```

Proyecto Determinación experimental del nivel de quemado de EE.CC. LEU - RECH-1

Comisión Chilena de Energía Nuclear
Centro de Estudios Nucleares de La Reina
Departamento de Reactores de Investigación

SANTIAGO, junio 07 del 2018

Inicio del programa: 15:08:09 horas

Identifique el operador de la medición:
1) Carlos Henríquez Acosta
2) Francisco Cabrera Orellana
3) Jorge Sandoval Caro
4) otro
1

¡Bienvenido Carlos Henríquez Acosta!

Identifique el elemento combustible <EC> a medir: <por ej. LR01 o LR02-L>
lr-02l

Verificando ruta de archivos del muestreo - elemento LR-02L
C:\PQP2018.....OK
C:\PQP2018\MEDICIONES_EECC.....OK

Creando carpeta C:\PQP2018\MEDICIONES_EECC\LR-02L.....
Carpeta C:\PQP2018\MEDICIONES_EECC\LR-02L.....OK

Creando carpeta C:\PQP2018\MEDICIONES_EECC\LR-02L\07-06-2018.....
Carpeta C:\PQP2018\MEDICIONES_EECC\LR-02L\07-06-2018.....OK
  
```

Figura 55: Interfaz de usuario del script global de muestreo.

La generación de directorios del muestreo ejecutada internamente por el programa, inicia con la creación (o verificación) de un directorio raíz del montaje experimental en la partición C:\ del PC. Posteriormente, se crea un árbol de directorios diseñado para facilitar la organización de los archivos generados en el proceso, como son los espectros gamma (*.CNF) y reportes (*.TXT). Esquemáticamente, dicho árbol es el siguiente:

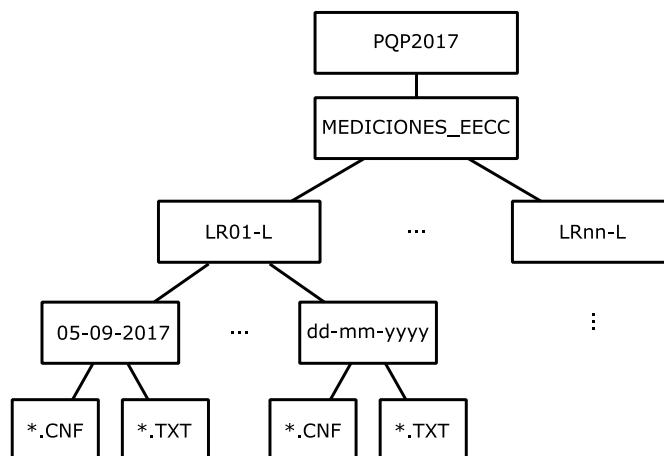


Figura 56: Árbol de directorios generado por el script global.

De acuerdo con el método de muestreo utilizado en esta técnica experimental (sección 0.7), se definieron e incorporaron al programa tres alternativas posibles para el barrido de un elemento combustible, que se denominaron “tipos de muestreo, **TM**”.

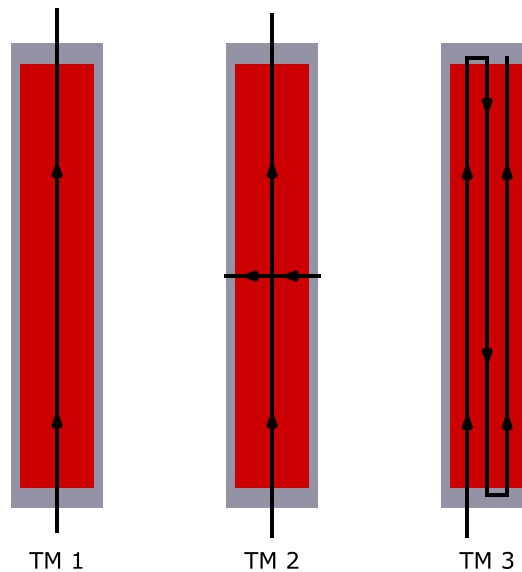


Figura 57: Tipos de muestreo o barrido definidos para la operación del montaje experimental.

Dependiendo del tipo de muestreo seleccionado, se debe seleccionar el número de mediciones en el eje **X** e **Y** según corresponda.

En este sentido, antes de suspender el uso del montaje, el muestreo de un elemento combustible contempló como máximo 25 medidas longitudinales y 5 transversales por el centro del meat. De acuerdo con ello, y considerando que la automatización permite operar el montaje por un tiempo mayor a una jornada laboral, se aumentó el número de mediciones por eje, pudiendo realizar ahora entre 3 y 61 en el eje longitudinal y entre 3 y 11 en el eje transversal.

Finalmente, se tiene la opción de comprobar la posición inicial o de descanso del carro de mapeo, de forma previa al muestreo. Esto debido a que el montaje experimental debe ser periódicamente sacado de la piscina secundaria para realizar una recalibración en eficiencia del detector, lo que puede provocar un desajuste. La orden proveniente de tal elección, se identifica con una “**C**”.

Con estos datos, el programa construye un string “orden” para ser enviado a la UCM. Su forma es la siguiente:

CNTM1X11Y00

Tras recibir y verificar el string orden, la UCM saca el carro de mapeo de su posición de descanso, iniciando la etapa de muestreo. Aquí, se produce una interacción coordinada entre la UCM y una subrutina de medición del programa de muestreo. En esta etapa desde el punto de vista del operador, el terminal del programa de muestreo se comporta como un display que despliega información referente a los muestreos ya realizados.

En la etapa final de la ejecución del programa, se genera un reporte general del muestreo con los siguientes campos de información: fecha de inicio del muestreo, nombre del operador responsable de la medición, elemento combustible en estudio,

colimación utilizada, tipo de barrido o mapeo del elemento, número de medidas por eje y horas de inicio-término del procedimiento. Antes de emitir el reporte, el operador tiene la posibilidad de incorporar en él observaciones libremente como registro.

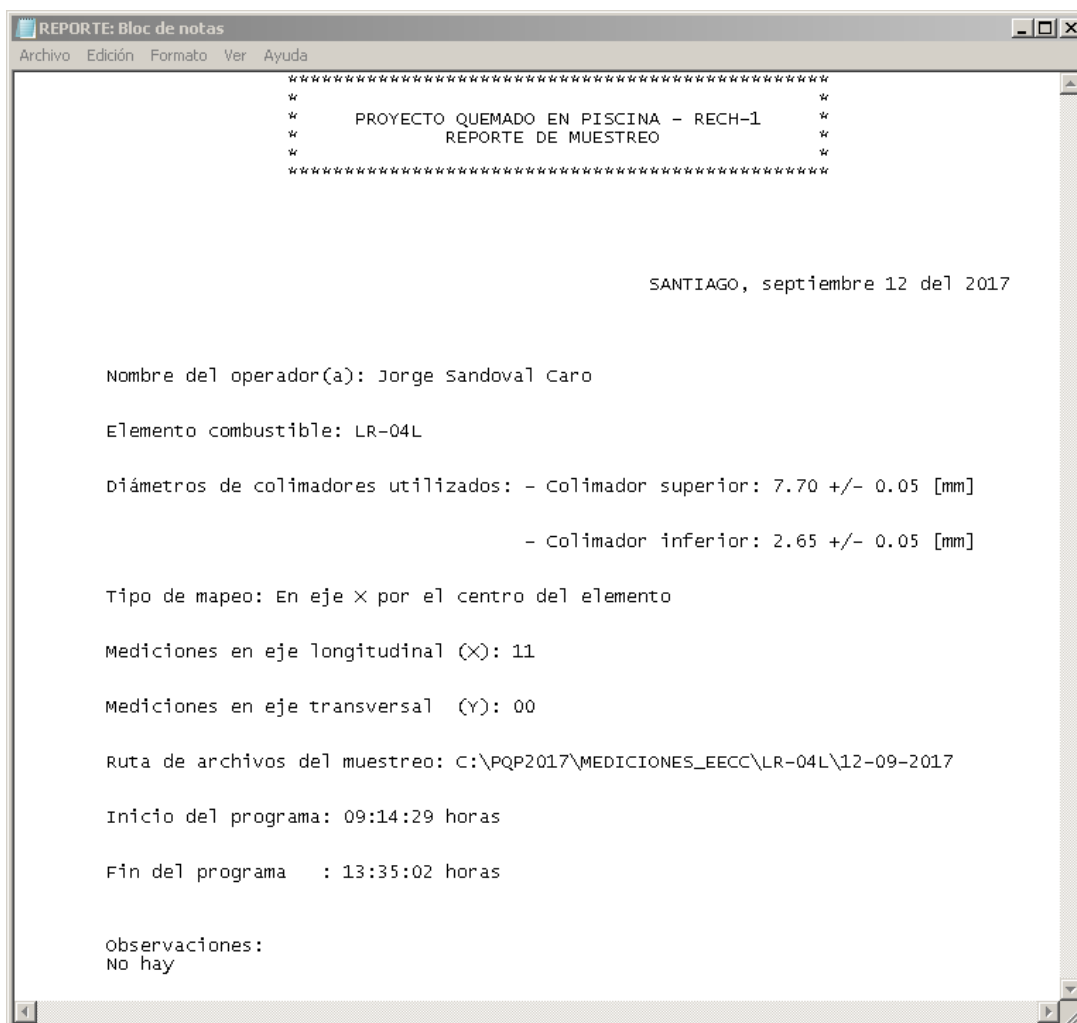


Figura 58: Ejemplo de reporte emitido por el programa global finalizado el muestreo.

Para identificar al ejecutable del programa de muestreo, se le asignó el ícono:



Figura 59: Ícono del programa de muestreo.

1.13 Desarrollo de script de la UCM

El script de la UCM fue escrito directamente en la IDE de Arduino. Sus funciones son:

- ✓ Ejecutar las instrucciones recibidas desde el programa de muestreo, referentes a la comprobación de la posición de descanso del carro de mapeo y a sus desplazamientos coordinados con el conjunto de espectrometría gamma en la fase de muestreo para los tres tipos de barrido definidos.
- ✓ Detectar y responder ante cambios estado en entradas del microcontrolador producidas por cambios en los LS que definen el plano de muestreo del montaje y/o por la pulsación de la parada de emergencia de la UCM.
- ✓ Controlar los indicadores led de la UCM.

Pese a que el control de movimiento del carro define en sí mismo la funcionalidad del sistema de mapeo, no es la característica principal que ofrece el script de la UCM, ya que las iteraciones construidas para tal efecto podían ser implementadas directamente en una subrutina del programa de muestreo recién analizado.

Su ventaja radica en la detección de la activación de los LS y la parada de emergencia mediante interrupciones. La respuesta del sistema debido al cambio de estado detectado, es en general una detención inmediata del carro de mapeo. Las interrupciones asociadas a los LS permiten la continuación del proceso según diseño, mientras que la interrupción asociada a la parada de emergencia finaliza la operación del montaje.

Cada interrupción tiene asociada una función, denominada genéricamente como ISR (Interrupt Service Routine), sin parámetros de entrada ni de salida. Además de las instrucciones de respuesta de la interrupción, esta función contiene el código necesario para eliminar el rebote o switch bouncing generado en los LS al ser activados, lo que es propio de todo interruptor mecánico.

El script controla también el encendido/apagado de casi todos los leds indicadores de la UCM. La excepción son los leds rojos asociados a los LS que se mantienen apagados mientras estos no sean accionados por el carro de mapeo.

Tras cada movimiento del carro de mapeo, se envía al PC un indicador interno que permite desplegar la información en pantalla y da la señal para que la subrutina de adquisición de datos inicie. Cuando esta finaliza, hace lo propio para seguir con la operación.

1.14 Desarrollo de subrutina de medición del programa de muestreo

El módulo de adquisición y análisis de espectros gamma de G2K puede ser ejecutado a través de un archivo batch (*.bat). Estos archivos contienen órdenes que son ejecutadas secuencialmente en Windows por consola CMD. Pueden ser creados en cualquier editor de texto ASCII, como el Block de notas.

La automatización del conjunto de espectrometría gamma consistió en la adquisición de los espectros gamma con un tiempo vivo fijo, y su posterior almacenamiento como archivo .CNF en un directorio preestablecido. El análisis espectral no fue considerado pues a diferencia del muestreo, este puede ser realizado por un operador en cualquier computador disponible con G2K, no necesariamente en el interior del RECH-1.

Los comandos necesarios para escribir la subrutina de medición automatizada fueron extraídos del manual de referencia “Batch Tools Support” de G2K v1.4, disponible en el CD de instalación de G2K v3.4.

Pruebas de adquisición y almacenamiento de un espectro gamma fueron realizadas en principio a través de un archivo batch, para luego pasar este código a C++ definitivamente. El código útil más básico fue:

```
@echo off      %Elimina la impresión de instrucciones en la consola %
putview det:MP2_MCA1 /xy=1,1 /cxcy=-75,-75
startmca det:MP2_MCA1 /LIVEPRESET=60
wait det:MP2_MCA1 /ACQ
movedata det:MP2_MCA1 C:\PQP2017\MEDICIONES_EECC\1.cnf
stopmca det:MP2_MCA1
endview
pause         %Evita que la consola se cierre inmediatamente luego de ejecutar el batch%
```

Figura 60: Instrucciones en archivo batch para adquirir y almacenar un espectro gamma bajo el nombre “1.CNF”. El tiempo vivo del muestreo y su ruta de almacenamiento fueron respectivamente 60 [s] y C:\PQP2017\MEDICIONES_EECC\.

El argumento “det: MP2_MCA1” hace referencia al detector y su electrónica asociada como fuente de datos en cada una de las instrucciones ejecutadas. A continuación, se revisa la función de cada una de ellas:

- ✓ putview: abre una ventana del módulo de adquisición y análisis de G2K. Su posición y tamaño respecto a la pantalla están dados por los calificativos /xy y /cxcy respectivamente.

- ✓ startmca: inicia la adquisición del espectro. /LIVEPRESET indica el tiempo vivo en segundos que durará el muestreo.
- ✓ wait: espera a que se cumpla cierta condición para ejecutar la siguiente orden. /ACQ, indica que se debe esperar hasta que la adquisición finalice.
- ✓ movedata: almacena el espectro gamma en un archivo *.CNF en un directorio específico.
- ✓ stopmca: detiene el muestreo.
- ✓ endview: cierra la ventana de adquisición abierta.

Un script de C++ análogo al anterior es:

```

int main()
{
    int i = 1; // variable asociada al nombre del archivo CNF
    string result;
    string dirección;
    direccion = "movedata det:MP2_MCA1 C:\\PQP2017\\MEDICIONES_EECC\\";
    stringstream convert;
    convert <<direccion<<i<<".cnf"<<endl;
    result = convert.str(); //orden movedata + directorio + nombre CNF
    system("putview det:MP2_MCA1 /xy=1,1 /cxcy=-75,-75");
    system("startmca det:MP2_MCA1 /LIVEPRESET=60");
    system("wait det:MP2_MCA1 /ACQ");
    system(result.c_str());
    system("stopmca det:MP2_MCA1");
    system("endview");
    return 0;
}

```

Figura 61: Código fuente C++ análogo al del archivo batch.

La diferencia principal de ambos códigos es que el nombre del espectro en el segundo caso viene dado por una variable, lo que dio la flexibilidad de cambiar su nombre a voluntad en la subrutina del programa de muestreo del montaje experimental.

El nombre de los archivos .CNF generados en el barrido del elemento combustible, contiene el número de medida correspondiente y las coordenadas (X, Y) respecto a los fines de carrera cercanos a la posición de descanso del carro de mapeo. Un ejemplo puede ser:

M1-X264646-Y50372

Considerando que la actividad calculada de Cs-137 de un elemento combustible quemado en un 50%, con tiempo de enfriamiento 6,5 [a], es > 250 [Ci] (Medel, 2016), se decidió fijar el tiempo vivo para la obtención de espectros en 2 [min] preliminarmente.

1.15 Costo total de la automatización

A continuación se presenta una tabla resumen de costos del trabajo de automatización ejecutado:

ITEM	TOTAL c/IVA [CLP\$]
Modificaciones mecánicas	
Rodamientos	15.400
Unidades lineales	110.432
Ejes	12.064
Elementos de control final	115.000
Elementos de fijación inoxidable	13.520
Modificaciones electrónicas	
Refuerzo ventilación del controlador	5.000
Microncontrolador de UCM	12.390
Componentes de UCM	4.810
Caja y rotulación de UCM	15.603
UPS	89.300
Cables y conectores	4.200
TOTAL	397.719

Tabla 5: Resumen de costos del proyecto.

Capítulo 2

Calibración del montaje experimental

La calibración del montaje experimental se dividió en dos partes, la primera correspondió a la puesta a punto del sistema de mapeo y la segunda, a la calibración del conjunto de espectrometría gamma, ambas son vistas a continuación.

2.1 Puesta a punto del sistema de mapeo

Considerando las dimensiones del meat definidas previamente (sección 0.3), se sabe que nominalmente su longitud puede estar entre los 583 – 603 [mm], con un ancho de 60,15 [mm]. Pese a la tolerancia de 20 [mm] en su longitud, explicada por la aplicación de un proceso de laminado en caliente durante la fabricación de las placas, se especifica un valor promedio para este largo de 586 [mm] (Planta de Elementos Combustibles, CCHEN, 1998). De acuerdo con ello, se definió como área de interés para el muestreo automatizado, el área del meat de dimensión 590x60 [mm], centrada en la placa combustible.

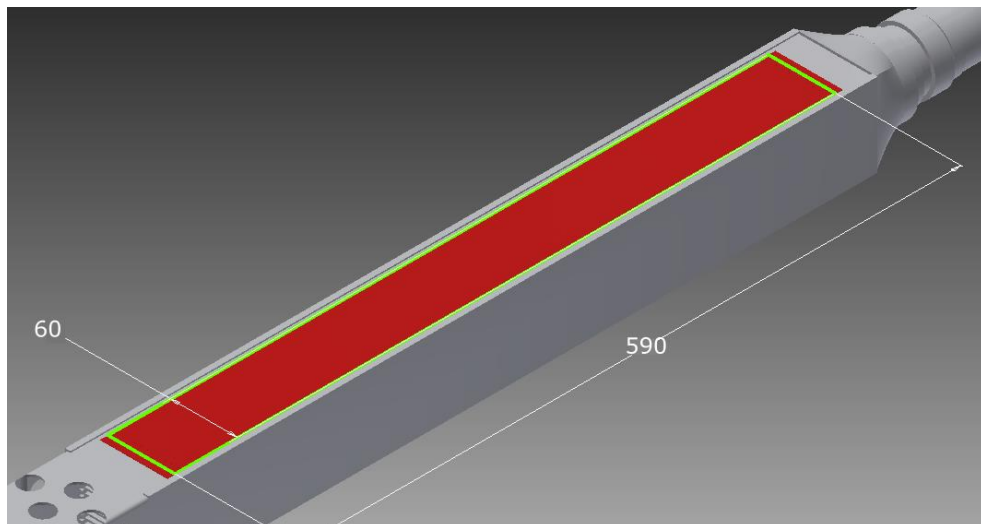


Figura 62: Área de interés para el muestreo.

Tras esta definición, se prosiguió con el trabajo en el montaje experimental verificando la alineación del tubo porta-colimadores respecto al carro de mapeo y al elemento combustible, según procedimientos establecidos (ver anexo A.10). De este modo, se

aseguró la perpendicularidad del tubo porta-colimadores respecto al carro de mapeo, con una desviación máxima de 0,04 grados; e indirectamente respecto a las placas del elemento, al medir una separación promedio entre ambos de 4,0 [mm] con una desviación estándar muestral de 0,1 [mm]. Además, se aseguró un paralelismo entre los rieles y el elemento combustible por mapear con una desviación menor a 0,25°.

Con el montaje alineado, se determinaron los pasos necesarios para cubrir la distancia entre los fines de carrera en ambos ejes, que definen el plano o zona de muestreo del sistema. Para esto, se ubicó el carro de mapeo sobre el punto medio del cuerpo del elemento combustible, denotado como $(X_{1/2}, Y_{1/2})$, de modo de desplazarse desde este punto a cada switch (LS). Debido a que estos interruptores son mecánicos, el número de pasos para su activación tienen asociada una fluctuación aleatoria, por lo que se realizaron desplazamientos repetitivos hacia cada uno de ellos para obtener un valor representativo con su respectivo error típico (ver anexo A.11).

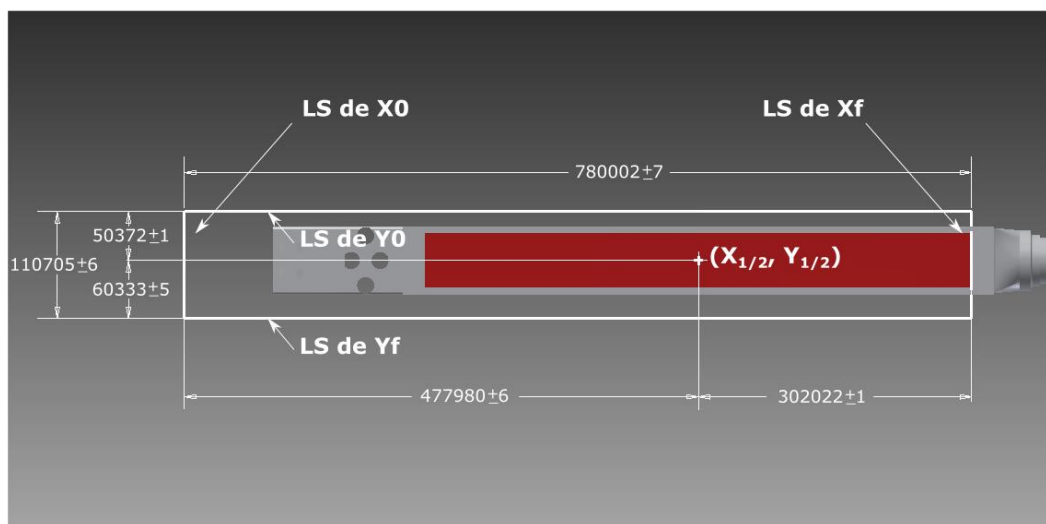


Figura 63: Delimitación experimental del plano de muestreo para los elementos finales de control utilizados.

Luego se definió una posición para que el carro permaneciera detenido cuando no se encuentre realizando un barrido, denominada posición de descanso. Esta ubicación se dispuso lo más alejada posible de la mesa donde se posan los EE.CC. para facilitar su colocación en el montaje, pero sin accionar los LS respectivos (LS de X0 y LS de Y0). Experimentalmente, se encontró que es suficiente separarse 2000 pasos de los LS.

Se definió además, por motivos prácticos un punto de origen (X_0, Y_0) en el cuerpo del elemento combustible, que sirvió para ubicarse dentro de él al realizar pruebas de desplazamiento del carro y también para facilitar la programación.

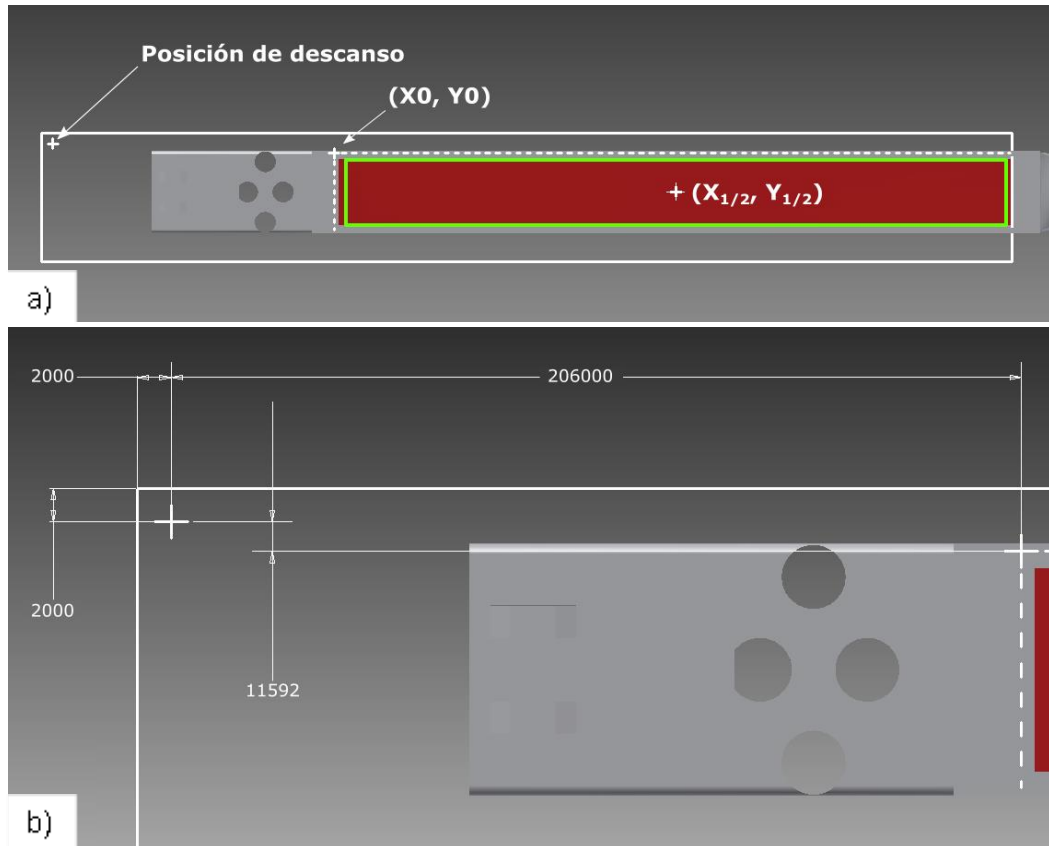


Figura 64: a) Puntos definidos para la automatización del sistema de mapeo. b) Pasos entre puntos definidos (fuera de escala).

La distancia entre Y_0 y la recta que marca el inicio del área de interés para el muestreo (en verde), es de $10 \pm 0,1$ [mm].

Hasta este punto, las posiciones de interés del carro de mapeo fueron definidas empíricamente sin utilizar la relación existente entre el avance nominal del husillo y los pasos por revolución de los motorreductores en X e Y. Esto porque el husillo, al no ser nuevo, tiene un desgaste desconocido y que no necesariamente es igual en toda su extensión. Sin embargo, bajo el mismo argumento, en este punto se hizo necesario comprobar si en el área de interés para el muestreo, tal desgaste hacía necesaria una corrección de desplazamiento del carro o no. Este análisis, es mostrado a continuación.

2.1.1 Comparación del avance nominal del carro de muestreo respecto al avance medido en eje X

Desde el origen, longitudinalmente el carro de mapeo debe recorrer 600 [mm] para cubrir el área de interés para el muestreo previamente definida. Como el número de mediciones en el barrido es discreto, de entre 3-61 puntos, los desplazamientos del carro pueden variar entre los 5-200 [mm].

El motorreductor da 4000 pasos por revolución, con un avance nominal del carro igual al del husillo de aproximadamente 4,23 [mm] (6 revoluciones por pulgada).

De acuerdo a lo anterior, se desplazó el carro distancias de 50 [mm], equivalentes a 47244 pasos. La distancia recorrida fue medida con una regla de acero inoxidable con error instrumental de $\pm 0,5$ [mm].

Movimiento	Desplazamiento medido [mm]	Delta de desplazamiento relativo [mm]	Error relativo (%)	Delta de desplazamiento acumulado [mm]	Error acumulativo (%)
1	50,5	0,5	1,0%	0,5	1,0%
2	49,5	-0,5	1,0%	0	0,0%
3	50,5	0,5	1,0%	0,5	1,0%
4	50,5	0,5	1,0%	1	2,0%
5	49,5	-0,5	1,0%	0,5	1,0%
6	49,5	-0,5	1,0%	0	0,0%
7	50,5	0,5	1,0%	0,5	1,0%
8	50,5	0,5	1,0%	1	2,0%
9	50,0	0,0	0,0%	1	2,0%
10	49,5	-0,5	1,0%	0,5	1,0%
11	49,5	-0,5	1,0%	0	0,0%
12	50,5	0,5	1,0%	0,5	1,0%
	600,5				

Tabla 6: Comparación de avance nominal de 50 [mm] respecto al avance medido.

Como ambos errores de posicionamiento fueron menores al 2%, se decidió utilizar el avance nominal por revolución para calcular los desplazamientos del carro en pasos.

2.1.2 Comparación del avance nominal del carro de muestreo respecto al avance medido en eje Y

En este eje, el número de mediciones puede estar entre 3-11 puntos, lo que implica un desplazamiento del carro entre los 5,45-20 [mm].

Por otro lado, el motorreductor da 4500 pasos por revolución, aunque con el mismo avance nominal que en el eje X ($\approx 4,23$ [mm]).

Como el número máximo de medidas son 11, se decidió realizar desplazamientos iguales los que el carro haría midiendo dichas 11 veces. La distancia entre puntos es de 5,45 [mm], equivalente a 5793 pasos. El barrido en Y normalmente se realiza tras el barrido en X, por lo que no inicia con el carro en el origen, sino que lo hace inmediatamente en el punto a medir más alejado de Y0.

Para medir la distancia recorrida por carro, se utilizó un pie de metro digital marca Ubermann, con error instrumental dado por el fabricante de $\pm 0,02$ [mm] para medidas menores a 100 [mm].

Movimiento	Desplazamiento medido [mm]	Delta de desplazamiento relativo [mm]	Error relativo (%)	Delta de desplazamiento acumulado [mm]	Error acumulativo (%)
1	5,57	0,12	2,2%	0,12	2,2%
2	5,41	-0,04	0,7%	0,08	1,5%
3	5,43	-0,02	0,4%	0,06	1,1%
4	5,45	0	0,0%	0,06	1,1%
5	5,44	-0,01	0,2%	0,05	0,9%
6	5,48	0,03	0,6%	0,08	1,5%
7	5,51	0,06	1,1%	0,14	2,6%
8	5,34	-0,11	2,0%	0,03	0,6%
9	5,39	-0,06	1,1%	-0,03	-0,6%
10	5,58	0,13	2,4%	0,1	1,8%
	54,6				

Tabla 7: Comparación de avance nominal de 5,45 [mm] respecto al avance medido.

El error de posicionamiento acumulado máximo fue 2,6%, lo que para este caso supone un error menor de 0,2 [mm]. Por ello, se valida el uso del avance nominal por revolución para calcular los desplazamientos del carro en este eje.

2.1.3 Estimación de error de posicionamiento del sistema de mapeo

Con el análisis previo, fue posible estimar el error de posicionamiento del sistema de mapeo para el área de interés del muestreo, considerando los siguientes elementos:

Factor de error	Descripción	Contribución en X [mm]	Contribución en Y [mm]
Accionamiento de LS	Relacionado con la naturaleza mecánica de los fines de carrera utilizados. Su valor se determinó con ayuda de la desviación estándar muestral de los desplazamientos repetitivos hacia LS de X0 y LS de Y0 (A.11) junto con la relación de avance y pasos por revolución	0,04	0,004
Desgaste del husillo	Propio de un husillo de segunda mano. Su valor corresponde al promedio del error acumulado del desplazamiento medido de las secciones previas respecto desplazamiento nominal	0,4	0,07
Error instrumental	Error de los elementos utilizados para comparar el desplazamiento nominal y los medidos	0,5	0,02

Tabla 8: Estimación de error del sistema de mapeo.

Así, considerando las fuentes de error independientes entre sí, el error estimado del sistema de mapeo por eje puede calcularse como la raíz de la suma de sus cuadrados, resultando en $\pm 0,6$ [mm] y $\pm 0,07$ [mm] en los ejes X e Y respectivamente.

2.2 Calibración del conjunto de espectrometría gamma

Fijados los parámetros de la electrónica (ver anexo A.12), y luego de verificar que la secuencia “Quemado en piscina” aparezca en el menú de calibración (ver anexo A.13), se procedió a la calibración del conjunto de espectrometría gamma. El procedimiento se divide en dos: calibración en energía y calibración en eficiencia.

2.2.1 Calibración en energía

Para esta calibración se usaron tres fuentes patrones: Cs-137, Co-60 y Ba-133 (ver anexo A.14). Como el Ba-133 tiene todos sus peaks de energía (seis) bajo los 400 [keV], se consideraron los dos de mayor abundancia y que no tienen un peak cercano en un radio menor que la resolución del detector, a saber 302,8 y 356,0 [keV]. Adicionando el peak de Cs-137 y los dos de Co-60, finalmente se tomaron en cuenta cinco peaks para determinar la curva de calibración.



Figura 65: Lugar del montaje donde fueron colocados los patrones para esta calibración.

Se realizó un muestreo durante el tiempo suficiente para que los peaks de tengan un conteo (área) mayor a 20000 cuentas (American National Standards Institute, 1991), ya que de ese modo el error asociado al área del peak es menor al 1%. Con el montaje experimental en la piscina secundaria del RECH-1, el muestreo se realizó durante un tiempo vivo de 58688 [s]. El espectro obtenido fue el siguiente:

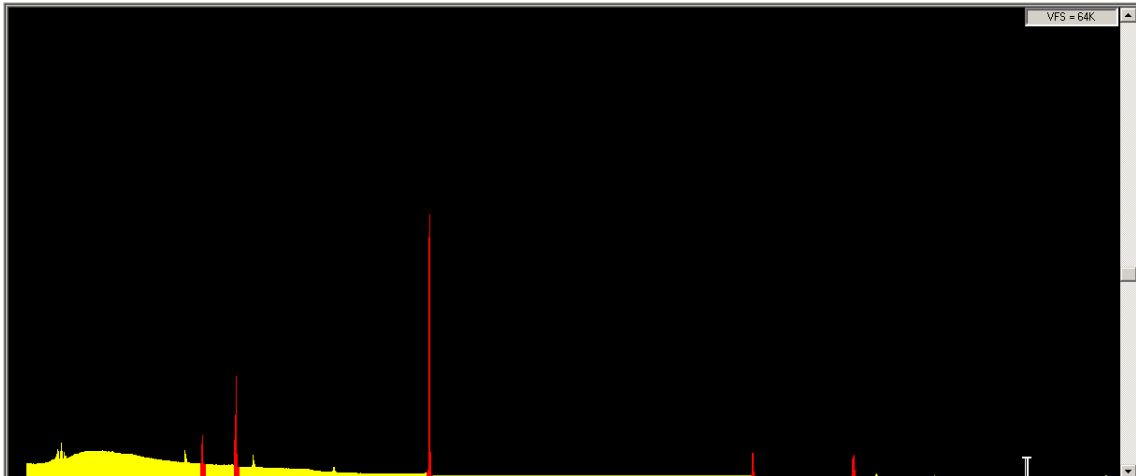


Figura 66: Espectro de fuentes patrones de Cs-137, Co-60 y Ba-133. En rojo se observan los peaks de energía considerados para la calibración en energía.

Siguiendo el procedimiento de “calibración completa en energía por certificado”, señalado en el manual de operación de G2K (Canberra Industries, 2013), se consiguió la siguiente función de energía v/s canal:

$$\text{Energía [keV]} = -0,4769 + 0,1069\text{canal} \quad (9)$$

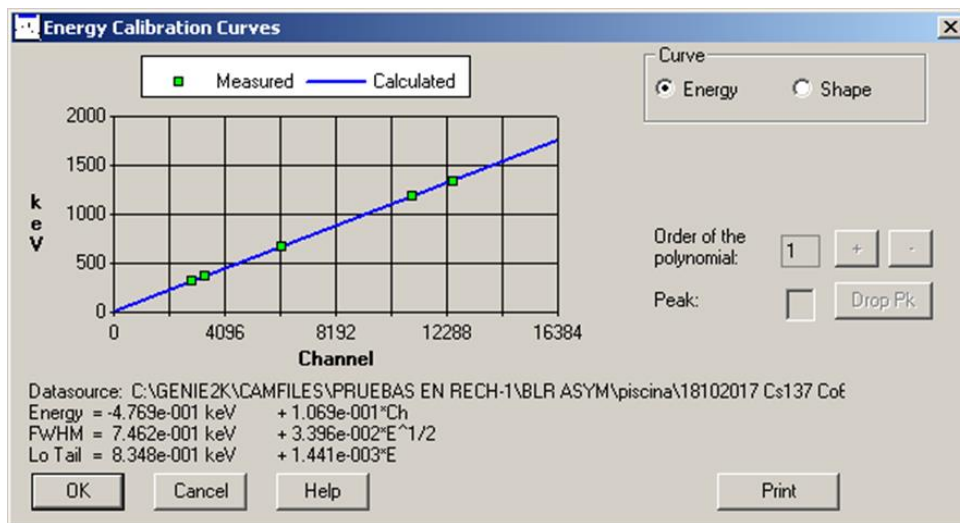


Figura 67: Curva de calibración en energía (azul) obtenida con cinco (verde) peaks de las fuentes patrones de Cs-137, Co-60 y Ba-133.

2.2.2 Calibración en eficiencia

Aquí resulta importante la que la geometría de calibración sea lo más igual posible a la geometría de la medición a realizar, pues con ello se puede obviar este factor en la determinación experimental de la actividad. Tal conservación de geometría se relaciona con la posición relativa del objeto a medir (patrón o EE.CC.) al detector, y con mantener el diámetro de los colimadores superior e inferior del tubo seco tanto en la calibración como en las mediciones posteriores.

Se usó una única fuente de Eu-152, con una actividad de $1,17 \pm 15\%$ [mCi] a la fecha de la realización de esta calibración (ver anexo A.15). Con la información de la fuente, G2K realiza un cálculo de eficiencia con la ecuación:

$$\varepsilon(E) = \frac{S}{T_l Y A K_w U_f} \quad (10)$$

Donde:

S es el área neta del peak de calibración,

A es la actividad de la fuente de calibración dada en la fecha de referencia,

Y es la abundancia del peak,

T_l es el tiempo vivo de la medición,

U_f es el factor de conversión de la actividad de la fuente de mCi a Bq,

K_w es el factor de corrección de la actividad A asociada al decaimiento entre la fecha de referencia y el tiempo de inicio del muestreo. Esto es:

$$K_w = e^{-\frac{t_w \ln(2)}{T_{1/2}}} \quad (11)$$

Donde t_w corresponde al tiempo de decaimiento desde la fecha de referencia de la fuente hasta el inicio del muestreo para la calibración en eficiencia, a saber, 8182 ± 1 [d].

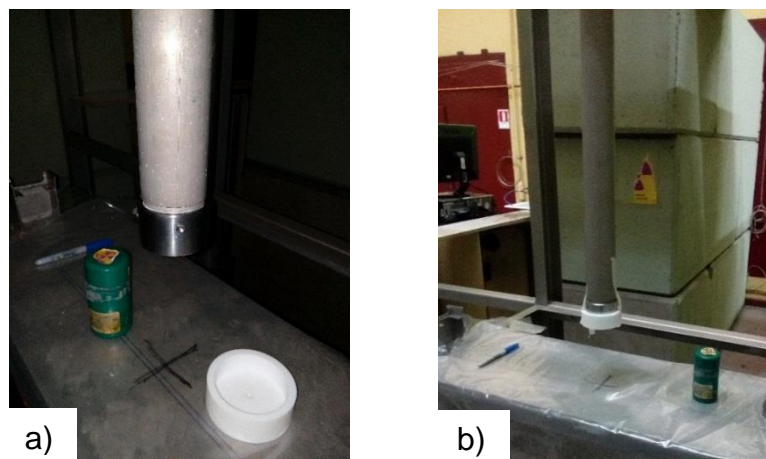


Figura 68: a) En esquina inferior derecha se ve *pieza de teflón que sostiene y centra la fuente de Eu-152*. b) *Fuente en posición para la calibración en eficiencia*.

Se realizó el muestreo en la posición de mantenimiento del montaje experimental durante un tiempo vivo de 273401 [s], tiempo suficiente para que los peaks del Eu-152 utilizados en esta calibración (9), alcanzaran un área mayor a 20000 cuentas para minimizar errores estadísticos. El espectro obtenido fue el siguiente:

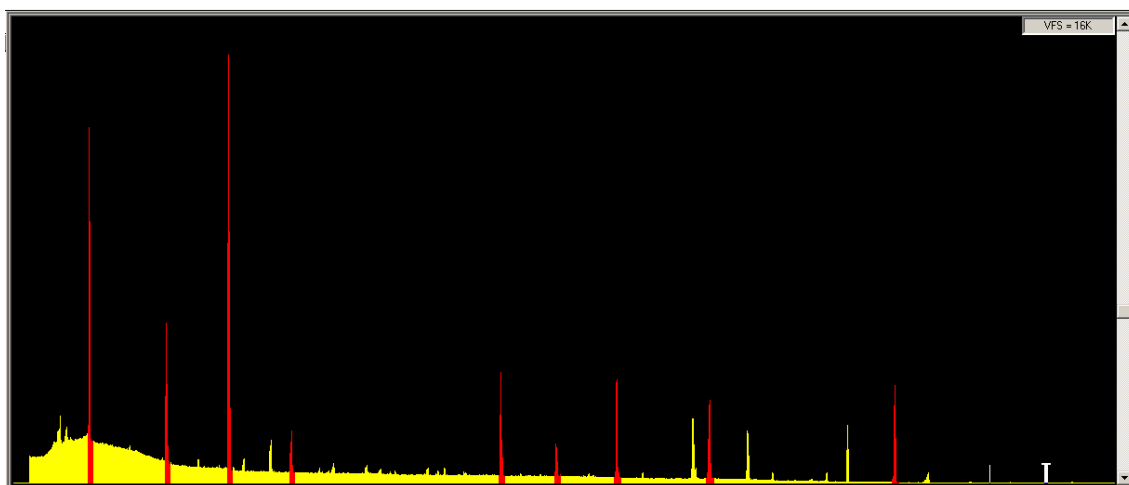


Figura 69: *Espectro obtenido tras medir patrón de Eu-152. En rojo se observan los peaks de energía considerados para esta calibración.*

Siguiendo el procedimiento de “calibración completa en eficiencia por certificado” del manual de operación de G2K (Canberra Industries, 2013), se consiguió la siguiente curva empírica de eficiencia:

$$\ln(\varepsilon) = -16,967 + 0,4786X + 0,06963X^2 + 0,1144X^3 - 0,1636X^4 \quad (12)$$

Donde:

$$X = \ln\left(\frac{764,867}{E}\right) \quad (13)$$

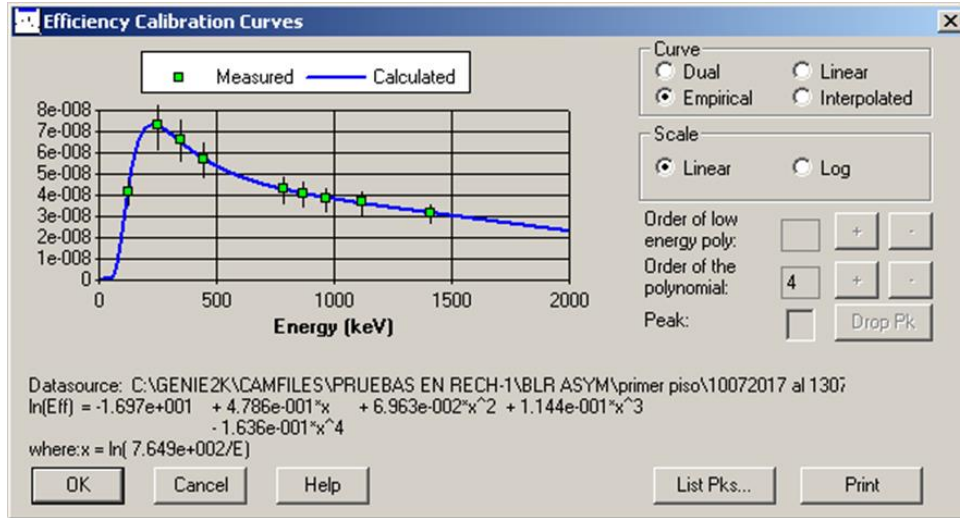


Figura 70: En azul, la curva de calibración empírica de eficiencia obtenida. En verde, la eficiencia calculada por G2K para los peaks de energía utilizados de la fuente patrón.

Capítulo 3

Resultados y análisis

Tras superar las pruebas preliminares de funcionamiento y su calibración, se operó el montaje experimental automatizado haciendo un barrido del elemento LR04-L, también conocido como líder n°4 por ser uno de los cuatro primeros EECC fabricados en el país.

El tipo de muestreo seleccionado fue TM2 (ver figura 56), con 61 mediciones en el eje X y 11 en el eje Y. La duración del procedimiento fue de poco más de 7 horas, teniendo cargado previamente el detector con nitrógeno líquido y su electrónica estabilizada.

Durante el muestreo, se revisó principalmente el funcionamiento del sistema de mapeo y su coordinación con el conjunto de espectrometría gamma. Así se comprobó lo siguiente:

- ✓ Se generó correctamente el directorio en el que posteriormente se almacenaron los espectros gamma y el reporte de operación.
- ✓ La comunicación entre el PC, la UCM y el controlador de motores se mantuvo sin sobresaltos durante el procedimiento.
- ✓ No se observaron pérdidas de pasos de los motorreductores, lo que asegura una alineación adecuada de los mecanismos tornillo-tuerca.
- ✓ Fluctuaciones en la red eléctrica producto del accionamiento de bombas del reactor no afectaron el funcionamiento del montaje experimental.
- ✓ La adquisición de los espectros gamma iniciaron y concluyeron con el carro debidamente detenido en los puntos de muestreo.
- ✓ Finalizada la operación, se comprobó con el tacto la temperatura de los disipadores del controlador de motores. Se encontraron fríos, lo que da cuenta de que los ventiladores incorporados cumplen su función.

Como la repetitividad del sistema es fundamental desde el punto de vista experimental, se realizó un nuevo barrido al líder 4 con idéntico número de puntos de muestreo en ambos ejes, la semana siguiente. Los resultados obtenidos son presentados a continuación:

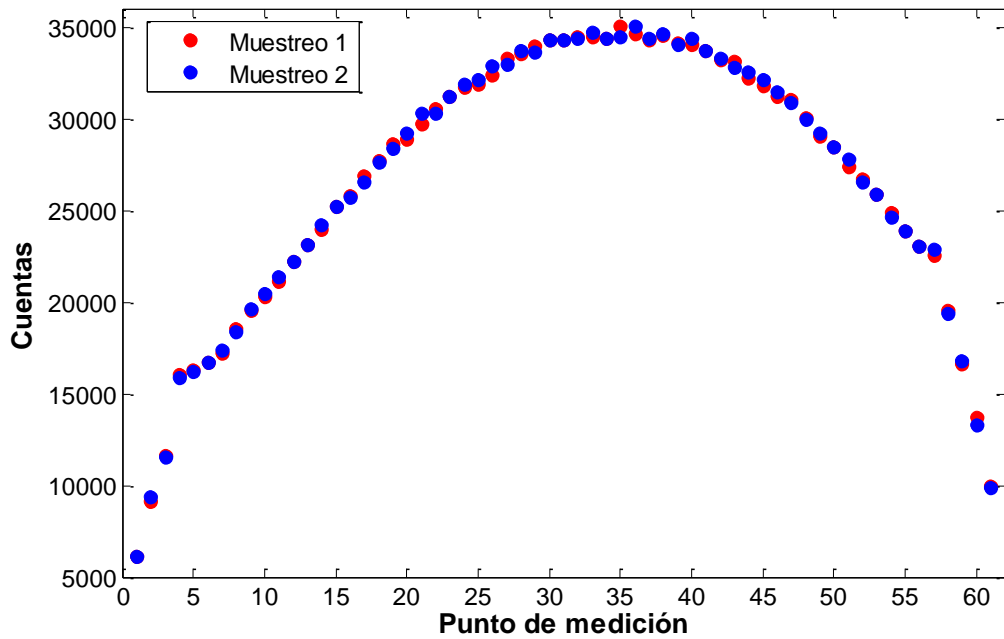


Figura 71: Perfiles axiales de Cs-137 del elemento LR04-L de dos operaciones del montaje.

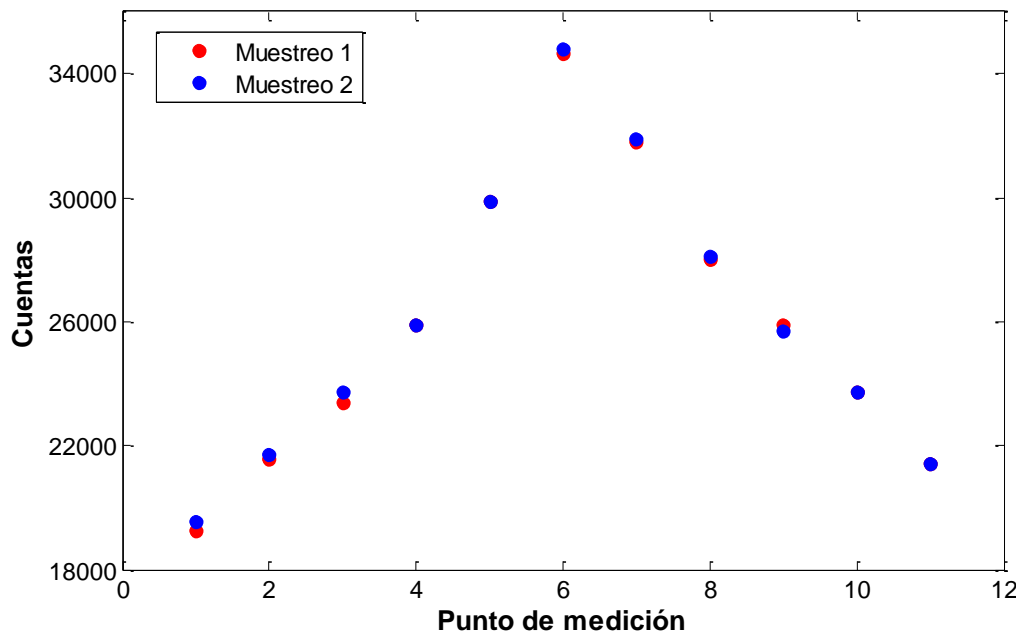


Figura 72: Perfiles transversales de Cs-137 del elemento LR04-L de dos operaciones del montaje.

La superposición de las curvas en ambos muestreos permite afirmar que el sistema de mapeo ubica al carro en las posiciones programadas con la precisión suficiente para obtener resultados reproducibles en operaciones distintas, mientras el tiempo entre ellas sea despreciable respecto al período de semidesintegración del monitor de quemado

(≈ 30 años para Cs-137); y para evaluar en el tiempo las variaciones de quemado de combustible del meat en función de la posición e historial de irradiación de un elemento dado.

La forma del perfil axial del elemento es la esperada (NRG, 2006), siendo asimétrica respecto al máximo debido a la influencia de las barras de control en el núcleo del reactor. Como el ancho del meat es pequeño respecto a su longitud y en general a las dimensiones del núcleo, se espera que el perfil transversal ideal presente un conteo cuasi constante en el meat. El perfil obtenido no cumple lo anterior, planteando la necesidad de investigar en un trabajo futuro tal comportamiento.

En ambos perfiles, el área del peak de Cs-137 de cada punto del barrido tiene por lo general un valor mayor a 10000 cuentas, lo que asegura un error aleatorio del orden del 1%, y respalda preliminarmente el tiempo vivo de 120 [s] elegido para la adquisición de datos del conjunto de espectrometría gamma, sin embargo, si se considera que el elemento muestreado tiene un porcentaje de quemado entorno al 50%, con un tiempo de enfriamiento menor a un tercio de su período de semidesintegración, resulta necesario muestrear el elementos con menor porcentaje de quemado y diferentes tiempos de enfriamiento para fijar un tiempo vivo que permita obtener un muestreo confiable y a la vez compatible con los tiempos disponibles para la operación del montaje (entre operaciones del reactor).

Conclusiones

Las modificaciones mecánicas enfocadas en la capacidad del mapeo del detector en 2D, permiten desplazamientos del carro de mapeo con un error de posicionamiento estimado de $\pm 0,6$ [mm] y $\pm 0,07$ [mm] en las direcciones longitudinal y transversal respectivamente de un elemento combustible del RECH-1. Considerando el reticulado o enmallado rectangular en que se divide imaginariamente el meat para la determinación experimental del quemado de combustible, el error en X representa entre un 0,3% - 6,1% de la longitud de la arista en dicha dirección, mientras que en Y, el error representa entre un 0,35% - 1,3% de la arista correspondiente a este eje. Luego, es posible asegurar que el posicionamiento del carro permite muestrear siempre en la zona central de las retículas.

Es plausible mejorar la exactitud del posicionamiento de modo de obtener una incertidumbre del orden de los micrómetros de varias maneras, como por ejemplo: reemplazando los husillos ACME por husillos a bolas, incorporando encoders lineales en los motorreductores para medir la posición del carro o reemplazando los motores de paso por servomotores. La evaluación de costos de tales alternativas está fuera del alcance del trabajo, sin embargo, con las cotizaciones solicitadas durante la ejecución del proyecto se puede estimar que tales costos fácilmente han de bordear entre \$500.000 y \$1.000.000 de pesos, lo que resulta en duplicar o triplicar el gasto ya realizado en la automatización global del montaje experimental aquí descrito.

La medición de Cs-137 en un elemento combustible de prueba mostró una superposición de los perfiles de conteo, por lo que el equipo otorga repetitividad en el barrido de los elementos combustibles, lo que permitirá realizar seguimientos en el tiempo de su comportamiento tras las diferentes irradiaciones a las que son sometidos en el núcleo del reactor.

Desde el punto de vista de la electrónica, la unidad de control de movimiento diseñada permitió tener una interfaz entre el controlador de motores y el PC del operador, incorporando correctamente fines de carrera por motivos de seguridad y como referencia para el posicionamiento del carro.

La UPS y el circuito de protección implementados protegen tanto al sistema de mapeo como al conjunto de espectrometría gamma de fluctuaciones de voltaje y/o cortes de energía, lo que es crítico para la vida útil del detector de HPGE. La capacidad de

mantener la operación en caso de cortes de energía, lo que se da con cierta frecuencia principalmente en invierno, permite ahorrar horas de trabajo al no tener que partir de cero. La UPS adquirida para tal efecto ayuda en eventos de corta duración (< 10 minutos). Es deseable reemplazarla más adelante por una de mayor capacidad, sin embargo, se debe considerar que unidades con mayores prestaciones aumentan su costo pudiendo superar \$1.000.000.

El programa de muestreo construido en C++ para la coordinación del sistema funcionó adecuadamente, permitiendo almacenar datos, dar instrucciones tanto al sistema de mapeo como al conjunto de espectrometría gamma y generando un reporte de la operación. La interfaz de usuario, al ser una ventana de consola de Windows, puede ser deseable actualizarla a algo más estético y actual, sin embargo, la versión elaborada es compatible con un sistema operativo de hoy en día y completamente funcional por lo que en términos prácticos no se justifica.

El script de control de la UCM operó de buena forma en las pruebas realizadas para el tipo de muestreo típico del montaje experimental (TM2), recibiendo la información desde el PC del operador, generando los desplazamientos del carro de muestreo y coordinando su accionamiento con el del detector de HPGE. Por un factor de tiempo, quedo como trabajo futuro las pruebas de los barridos configurados 1 y 3, en lo referente a verificar su correcto funcionamiento.

En términos globales, las modificaciones realizadas al montaje experimental en su forma original permitieron automatizarlo, eliminando el problema de operación referente al personal limitado del reactor, y aportando a la reducción del tiempo de permanencia de los operadores en una zona radiológica controlada como es el interior del reactor.

El uso de partes y materiales en desuso, redujo considerablemente las compras de necesarias para la ejecución del proyecto. Además, la utilización de partes como rodamientos de bolas, lineales y tornillos de fijación, fueron seleccionados en base a las necesidades del montaje pero también con el criterio de utilizar medidas estándar con el fin de asegurar que el eventual reemplazo de ellos sea fácil desde el punto de vista de los proveedores, logrando reducir indirectamente costos (por la amplia oferta) y asegurando la disponibilidad de los materiales en Santiago.

Referencias bibliográficas

- American National Standards Institute. (1991). *Calibration and Usage of Germanium Detectors for Measurement of Gamma-Ray Emission, ANSI Standard N42.14-1991*.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill.
- Canberra Industries. (2013). Gamma Acquisition and Analysis - Efficiency. In Canberra, *Genie 2000 Operations Manual v3.4* (pp. 87-103).
- Canberra Industries. (2013). Gamma Acquisition and Analysis - Energy Full. In Canberra, *Genie 2000 Operations Manual v3.4* (pp. 70-77).
- Canberra Industries. (2013). Gamma Acquisition and Analysis - Setup. In Canberra, *Genie 2000 Operations Manual v3.4* (pp. 67-68).
- Canberra Industries. (2013). Genie Algorithms - Peak Area Calculations. In Canberra, *Genie 2000 Customization Tools Manual v3.4* (p. 303).
- Canberra Industries. (2013). Genie Algorithms - Peak Locate Calculations. In Canberra, *Genie 2000 Customization Tools Manual v3.4* (p. 277).
- Canberra Industries. (2013). Using the Certificate File Editor. In Canberra, *Genie 2000 Operations Manual v3.4* (pp. 282-290).
- Eckert & Ziegler. (n.d.). *www.ezag.com*. Retrieved 12 18, 2017, from http://www.ezag.com/home/about_us/history/
- Engineering ToolBox. (2001). Retrieved 07 22, 2016, from https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
- International Atomic Energy Agency. (1992). *Determination of Research Reactor Fuel Burnup*.
- Knoll, G. F. (2000). *Radiation Detection and Measurement* (3rd ed.).
- Medel, J. (2016). *Inventario de actínidos y productos de fisión para un elemento combustible LEU gastado del RECH-1*. Santiago.
- NRG. (2006). *Post irradiation examination on the element LCC01*. Petten.

- Óscar, P. (n.d.). *Notas sobre Física General: Resistencia a la rodadura*. Retrieved 7 20, 2016, from <http://www2.fisica.unlp.edu.ar/materias/fisicageneralcn/Resistenciarodadura.pdf>
- Pereda, C., Henríquez, C., Navarro, G., Torres, H., Klein, J., Calderón, D., . . . Kestelman, A. (s.f.). *Desarrollo de métodos experimentales para la medición del quemado de elementos combustibles*. Santiago.
- Planta de Elementos Combustibles, CCHEN. (1998). *Procedimiento PEC - MP - 05*. Santiago.
- Salinas, R., Raff, U., Coronado, H., & Olivares, L. (2003, Diciembre). Control de calidad de placas combustibles mediante procesamiento digital de imágenes. *Nucleotécnica*(37), 20-26.

Anexos

A.1 Principio ALARA

ALARA es una sigla de la expresión “**A**s **L**ow **A**s **R**easonably **A**chievable” o “tan bajo como sea razonablemente posible”. Esta referida a la exposición a radiación ionizante, de modo que el nivel de protección debe maximizar el margen de beneficio en relación al daño.

ALARA se relaciona con el principio de la optimización de la protección radiológica, que junto con la justificación y la Limitación de dosis, conforman los tres principios fundamentales que establece la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) con el objeto de evitar la aparición de efectos determinísticos y limitar al máximo la probabilidad de aparición de efectos no deterministas o estocásticos producto de la radiación ionizante.

La exposición a una fuente de radiación ionizante se puede minimizar en términos generales manejando tres factores: tiempo, distancia y blindaje.

A.2 Masa total a desplazar por sistema de mapeo

La masa total a desplazar por el sistema de mapeo luego de la automatización corresponde a la suma de masas del carro de mapeo modificado, conjunto de blindaje y colimación y al detector cargado con nitrógeno líquido.

Componente	Masa [kg]	Método utilizado
Torre anular blindaje	189,40	Medido
Detector con nitrógeno	15,95	Medido
Acople detector	1,7	Calculado*
Colimadores	3,4	Calculado*
Tubo seco	10,2	Calculado*
Soporte tubo seco	36,9	Calculado*
Acople tubo seco	8,2	Calculado*
Base blindaje	8,7	Calculado*
Base Carro	10,9	Calculado*
Descanso ejes	2,9	Calculado*
Ejes	4,4	Calculado*
Ruedas	3,1	Calculado*
Otros	20	Estimado**
Masa total estimada	316	

Tabla 9: Masa estimada que debe desplazar el sistema de mapeo automatizado.

* Calculado con ayuda de Inventor 2014, versión de estudiante.

** Masa de piezas menores y nuevos componentes.

A.3 Cotización de rodamientos y unidades lineales

Tipo	Marca	Modelo	Cantidad	Total c/IVA [CLP\$]
Rodamiento	SKF	LBBR25	4	104.076
Rodamiento	SKF	LBBR25 -2LS/HV6	4	109.728
Rodamiento	SNR	BBR25	4	127.854
Rodamiento	KB25	SCHAEFFLER	4	163.268
Rodamiento	IKO	LM250459NUU	4	112.003
Rodamiento	IKO	LM250459NUU	4	237.795
Unidad	SNR	LSET25UU	4	321.062
Unidad	AyB	SC25UU	4	110.432

Tabla 10: Comparación de precios de rodamientos y unidades lineales. Selección en verde.

A.4 Cotización de ejes de precisión y trefilado

Tipo eje	Marca	Diámetro nominal [mm]	Longitud [mm]	Cantidad	Total c/IVA [CLP\$]
Precisión	SKF	25	700	2	385.405
Precisión	SKF	25	1400	1	380.527
Trefilado	?	25	1000	2	83.419
Trefilado	?	25	1000	2	12.064

Tabla 11: Comparación de precios de ejes de precisión y trefilado. Selección en verde.

A.5 Cotización de husillos de bola y ACME

Tipo husillo	Marca	Diámetro nominal	Longitud [mm]	Paso	Cantidad	Total c/IVA [CLP\$]
Bola	SNR	20 [mm]	1000	10 [mm]	2	861.560
Bola	Korta	25 [mm]	1600	5 [mm]	1	894.107
Bola	?	25 [mm]	1000	10 [mm]	2	455.700
Bola	SNR	32 [mm]	1500	10 [mm]	1	689.206
ACME	?	3/4"	1200	6 h/in	2	55.000

Tabla 12: Comparación de precios de husillos a bolas y ACME. Selección en verde.

A.6 Cálculos rendimiento husillos de perfil ACME

Considérese un tornillo ACME,

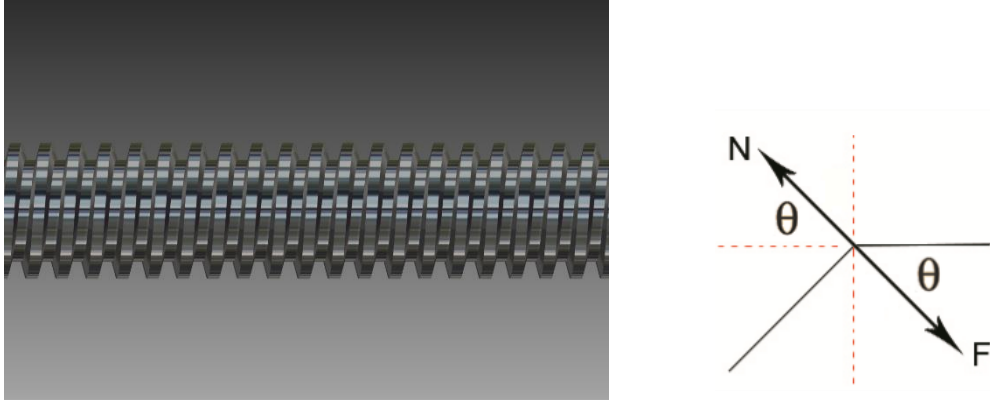


Figura 73: Representación de fuerza normal N al girar husillo para desplazar una carga F .

Al hacerlo girar para desplazar una carga F , se genera una normal N rotado un ángulo θ respecto a la horizontal como se muestra en la figura. Proyectando dichas fuerzas en la horizontal,

$$F' = F \cos \theta \quad (14)$$

$$N' = N \cos \theta \quad (15)$$

Considerando un plano inclinado generado al desenrollar una vuelta del hilo del husillo,

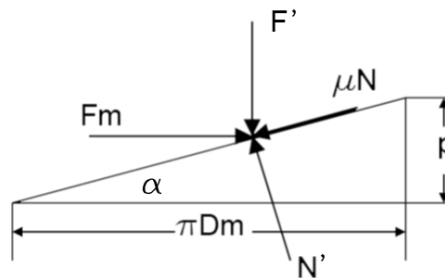


Figura 74: Plano inclinado generado al desenrollar el hilo de un husillo ACME.

Donde F_m es la fuerza ejercida por el motor, μN es la fuerza de roce, D_m es el diámetro medio del husillo y p su paso.

Aplicando la condición de equilibrio,

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (16)$$

Se tiene,

$$\sum F_y = N' - F' \cos \alpha - F_m \sin \alpha = 0 \quad (17)$$

$$\sum F_x = F_m \cos \alpha - \mu_s N - F' \sin \alpha = 0 \quad (18)$$

Reemplazando en (16) las expresiones de N y F' , es posible obtener la fuerza F_m como una función de la carga F , la geometría del husillo y el coeficiente de fricción estático entre el husillo y la tuerca como:

$$F_m = F \tan \alpha \cos \theta \frac{\cos \theta + \mu_s \cot \alpha}{\cos \theta - \mu_s \tan \alpha} \quad (19)$$

Como el torque ejercido sobre el husillo es el que genera la fuerza F_m , se tiene:

$$\tau = \frac{D_m}{2} F_m \quad (20)$$

Reemplazando (17) en (18), y reescribiendo $\tan \alpha$ en función del paso p y diámetro medio D_m :

$$\tau = \frac{Fp}{2\pi} \cos \theta \frac{\cos \theta + \mu_s \cot \alpha}{\cos \theta - \mu_s \tan \alpha} \quad (21)$$

Comparando el torque ejercido sobre el husillo expresado en (19), con el torque ejercido en el caso ideal (τ_0) en que $\mu_s = 0$, se obtiene una ecuación general para determinar el rendimiento de un husillo de potencia con perfil ACME, luego,

$$\eta = \frac{\tau_0}{\tau} \quad (22)$$

$$\eta = \frac{\cos \theta - \mu_s \tan \alpha}{\cos \theta + \mu_s \cot \alpha} \quad (23)$$

A.7 Reductores

En la rotación de un sólido rígido, la potencia depende del torque aplicado y de su velocidad angular.

$$P = \tau\omega \quad (24)$$

Suponiendo inicialmente pérdidas de energía despreciables entre la entrada (e) y salida (s) de un reductor:

$$\tau_e\omega_e = \tau_s\omega_s \quad (25)$$

Luego,

$$\frac{\omega_e}{\omega_s} = \frac{\tau_s}{\tau_e} \quad (26)$$

Por otro lado, cuando se señala que un reductor posee una relación de reducción $1:n$ es análogo a decir que cuando su eje de salida da una vuelta, el de entrada da n vueltas. Como esto ocurre en un mismo tiempo t , es correcto afirmar que:

$$\omega_e = n \cdot \omega_s \quad (27)$$

Reemplazando (20) en (19) resulta:

$$\tau_s = n \cdot \tau_e \quad (28)$$

De las ecuaciones (20) y (21) se puede ver que en un reductor ideal con relación $1:n$, si bien la velocidad angular de salida es menor n veces que la de entrada, el torque de salida aumenta n veces respecto al torque de entrada.

Un reductor real no tiene un rendimiento (η_R) igual a 1. Se debe entonces reescribir la ecuación anterior considerando este hecho:

$$\tau_s = \eta_R n \tau_e \quad (29)$$

A.8 Rotulado de la UCM

A continuación se adjuntan plantillas de diseño del panel frontal y lateral de la Unidad de Control de Movimiento. Ambas fueron grabadas con láser en plástico bicolor.

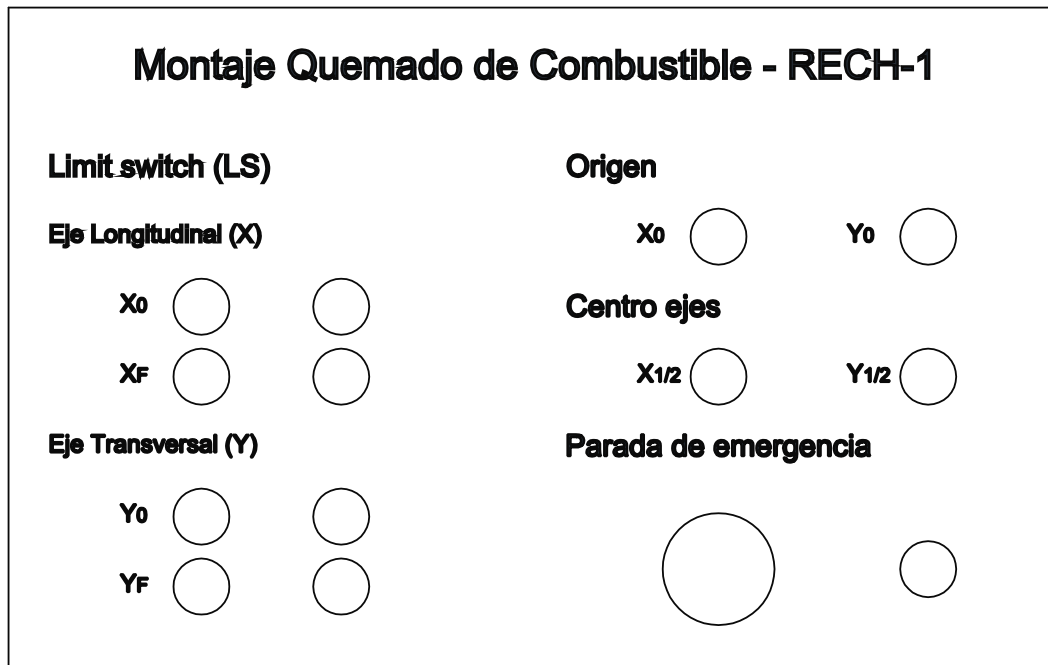


Figura 75: Plantilla rotulado frontal UCM.



Figura 76: Plantilla rotulado lateral UCM.

A.9 Circuito de protección

Este circuito se encarga, tras un corte y reposición del suministro eléctrico, de mantener el circuito desenergizado para evitar una polarización repentina del detector de HPGe y su consecuente daño. Esquemáticamente se tiene:

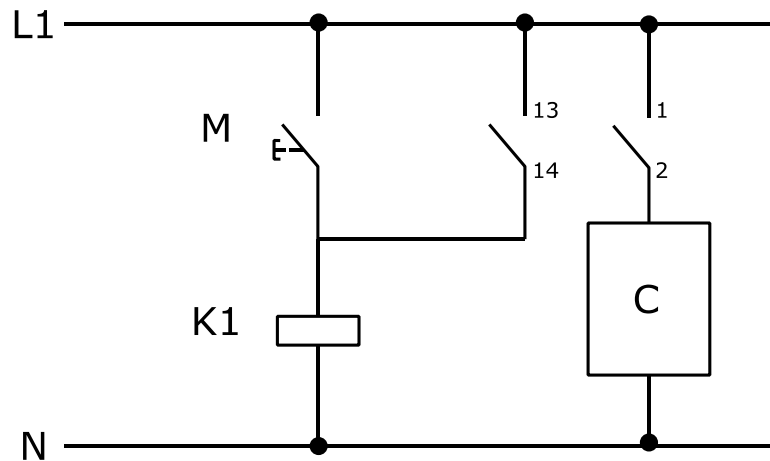


Figura 77: Esquemático de circuito de protección utilizado para el resguardo del detector de HPGe.

Donde M es un pulsador, K1 es un contactor, el contacto 13-14 es un contacto auxiliar que mantiene energizada la bobina del contactor y el 1-2 es contacto principal asociado con la carga C.

Inicialmente, si hay suministro eléctrico y la bobina del contactor está desenergizada el contacto 1-2 está abierto. Cuando se pulsa M, se energiza la bobina provocando el cierre de los contactos 13-14 y 1-2. Esto permite que al soltar M, el contactor siga energizado y la carga C alimentada. Si se corta el suministro, el contactor se desenergiza y los contactos 13-14 y 1-2 se abren. Al reponerse el servicio, se vuelve al inicio, siendo necesario pulsar M para alimentar a C.

A.10 Procedimientos de alineación del montaje experimental

Los procedimientos de alineación del montaje experimental buscan minimizar errores por factores geométricos, con objeto de mejorar la reproducibilidad de los métodos de muestreo. Se deben realizar antes de la calibración del conjunto de espectrometría gamma, en la posición definida originalmente como la posición de mantenimiento del montaje que está localizada en el sector sur del hall del reactor, donde la estructura se posa sobre dos columnas de 4 [m], preparadas para este efecto. La alineación del montaje se realiza en cuatro pasos:

- ✓ Nivelación del montaje experimental;
- ✓ Verificación de perpendicularidad del tubo seco respecto al carro de mapeo;
- ✓ Verificación de perpendicularidad del tubo seco respecto a elemento por barrer;
- ✓ Verificación de paralelismo entre los rieles y elemento por barrer.

A.10.1 Nivelación del montaje experimental

Este procedimiento busca asegurar que el montaje está nivelado en su posición de mantenimiento.

1. Se compara el nivel entre ambos rieles en los extremos y en el centro de estos. De ser necesario, se nivelan con ayuda de lanas en los apoyos de la estructura en los bloques de concreto.
2. Se verifica el nivel de cada riel por separado. De ser necesario, se nivela de la misma forma que en el punto anterior y se repite el paso 1.
3. Se verifica el nivel del carro de muestreo en su eje longitudinal y transversal.



Figura 78: Verificación de la nivelación del montaje en la posición de mantenimiento.

A.10.2 Verificación de perpendicularidad del tubo seco respecto al carro de mapeo

Este procedimiento se realiza con dos operadores utilizando una plomada. Uno de ellos verifica la perpendicularidad del tubo seco, mientras que el otro corrige de ser necesario.

1. Desde el carro de mapeo, se hace pasar la plomada a través del tubo seco con un hilo de pescar. Una vez que la plomada queda completamente visible, se pasa el hilo por el centro de una pieza acrílica cilíndrica (ver figura) y se anuda de modo que el hilo no se salga. Esta pieza calza en la ubicación del colimador superior, y su centro coincide con el centro del carro y del tubo seco.

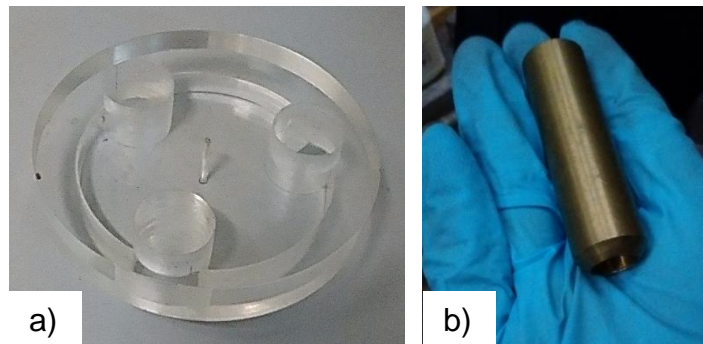


Figura 79: a) Pieza que permite fijar la plomada en el centro del carro de mapeo. b) Plomada.

2. Con la plomada suspendida libremente en el extremo inferior del tubo, se verifica visualmente que el hilo de pescar esté en su centro. Por simplicidad, este paso se realiza con el tubo fuera de la mesa de medición de los EE.CC.
3. De no cumplirse el punto anterior, se deben soltar ligeramente los pernos que fijan el soporte del tubo seco al carro (ver figura). Para corregir la alineación del tubo, se ajusta la orientación de su estructura de soporte mediante 4 pernos que están sobre la placa base del carro. Facilita la corrección que el operador que se encuentra mirando la plomada lleve manualmente al tubo a la posición deseada.



Figura 80: Encerrado en rojo, pernos que fijan el soporte del tubo seco al carro; en azul, perno que permite regular la posición de dicha estructura.

4. Con la plomada aproximadamente en el centro, se coloca en el extremo inferior del tubo seco una tapa acrílica con un agujero centrado de 4 [mm] de diámetro, por el que debe pasar el hilo con la plomada.



Figura 81: Tapa acrílica usada como apoyo en la alineación del tubo.

Su fin es mejorar la alineación del tubo porta colimadores, pues nuevamente se debe procurar que el hilo de la plomada no toque el borde del agujero, repitiendo el paso 3 de ser necesario.

5. Se lleva el carro al centro de la mesa de muestreo para verificar que la alineación hecha fuera de ella, se cumpla también dentro de ella. De ser necesario, corregir con el paso 3.
6. Alineada la estructura, se fija nuevamente el soporte del tubo seco.
7. Tras verificar que el paso anterior no haya afectado la alineación, se retira la plomada.

Debido a que entre la base del carro y el extremo del tubo seco se tienen 3247 [mm], asegurar que el hilo de la plomada no toque el borde del agujero de diámetro 4 [mm], permite restringir una desviación (\emptyset) menor a $0,04^\circ$.

$$\emptyset = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3247}\right) \approx 0,04^\circ$$

A.10.3 Verificación de perpendicularidad del tubo seco respecto a elemento por barrer

Esta perpendicularidad es verificada indirectamente al examinar el paralelismo existente entre la tapa del tubo seco y la placa externa del elemento combustible por barrer. Para ello, se mide la distancia entre ambas caras, denominada distancia de agua d en distintos puntos de la placa combustible.

Se divide imaginariamente el largo del elemento con cinco líneas equidistantes, y su ancho con tres. De esta forma se tienen 15 puntos en los que se mide la distancia d .

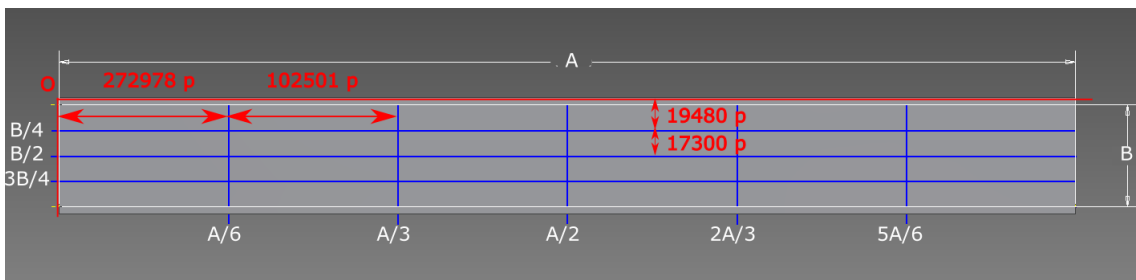


Figura 82: Puntos en los que se mide distancia d .

1. Se ubica el carro en el primer punto directamente con el controlador de motores.
2. Con ayuda de conjunto de calibres marca Keith, se mide distancia d .
3. Se mueve carro a los puntos siguientes y se repite paso 2.

A.10.4 Verificación de paralelismo entre los rieles y elemento por barrer

Para examinar el paralelismo entre rieles y el elemento por barrer, se construyó una tapa acrílica para el tubo seco con una perforación central, de modo de colocar en ella un láser y proyectar su centro en el elemento combustible.

El láser utilizado se extrajo de un puntero de bajo costo por lo que el haz no era limpio. Para mejorar su definición, se pegó un polarizador de luz de modo de eliminar gran parte de luz dispersada. El resultado de aquello fue un haz de forma cuasi circular de diámetro $2 [mm]$.

1. Se desplaza el carro longitudinalmente hasta aproximadamente el centro de la soldadura que une el cuerpo del elemento combustible con su caja filtro.

2. Se desplaza ahora transversalmente hasta ubicar el haz aproximadamente en el centro del borde sobresaliente de la placa combustible (ver figura).
3. Desde este punto se barre completamente el cuerpo del elemento observando que el haz no se salga en ningún momento del borde. De ser necesario corregir soltando el apoyo de la caja filtro en la mesa de muestreo.

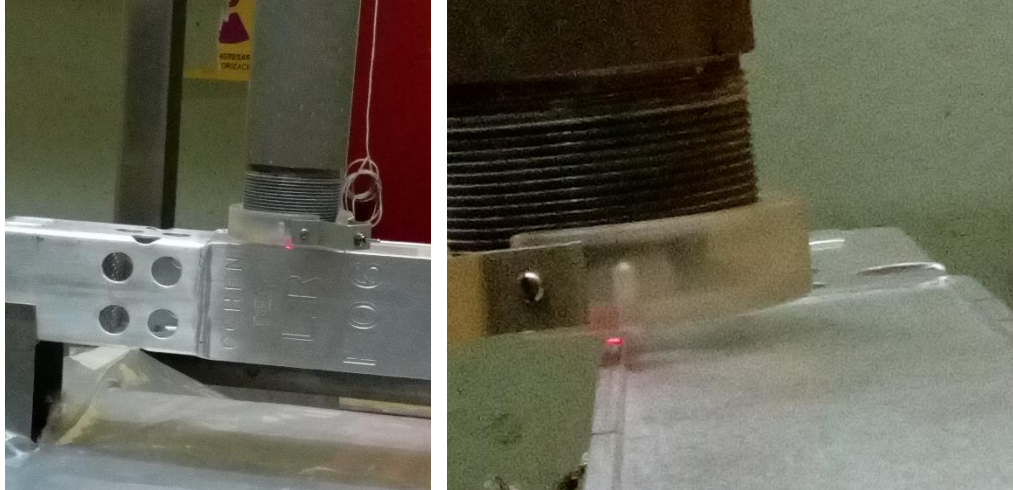


Figura 83: Verificación del paralelismo entre los rieles y el elemento a barrer en la mesa de muestreo del montaje experimental.

Dado que el borde visible por sobre la placa combustible tiene un ancho nominal de 4,8 [mm], que el haz se mantenga dentro de él, asegura que la desviación angular ($\varnothing 1$) entre los rieles y el elemento a medir es menor que $0,25^\circ$.

$$\varnothing 1 = \tan^{-1} \left(\frac{2,8}{651} \right) \approx 0,25^\circ$$

A.11 Determinación experimental de pasos por eje necesarios para cubrir el plano de muestreo delimitado por LS

Punto de partida: Centro del cuerpo del elemento combustible falso LRF-06.

N	Punto de llegada			
	LS de X0	LS de Xf	LS de Y0	LS de Yf
1	477.913	302.018	50.377	60.362
2	477.935	302.021	50.378	60.379
3	477.934	302.024	50.376	60.312
4	477.940	302.023	50.374	60.369
5	477.936	302.024	50.373	60.303
6	477.943	302.021	50.370	60.318
7	477.955	302.021	50.365	60.358
8	477.988	302.023	50.367	60.330
9	478.013	302.020	50.367	60.347
10	478.024	302.023	50.370	60.308
11	477.997	302.021	50.370	60.326
12	478.009	302.024	50.370	60.317
13	478.003	302.020	50.366	60.353
14	478.002	302.023	50.373	60.329
15	477.996	302.019	50.374	60.338
16	478.004	302.023	50.374	60.324
17	478.005	302.022	50.375	60.342
18	478.003	302.015	50.372	60.308
19	478.001	302.026	50.373	60.320
20	477.994	302.026	50.376	60.333
21	477.946	302.023	50.372	60.314
22	478.015	302.021	50.368	60.387
23	477.932	302.025	50.375	60.311
24	477.955	302.020	50.373	60.320
25	478.015	302.024	50.370	60.309
26	477.947	302.016	50.369	60.312
27	477.973	302.025	50.377	60.374
28	477.996	302.021	50.371	60.310
29	478.006	302.024	50.376	60.305
30	478.027	302.027	50.368	60.365
Media	477.980	302.022	50.372	60.333
Desviación estándar muestral	34	3	4	25
\sqrt{N}	5,48	5,48	5,48	5,48
Error estándar de la media	6	1	1	5

Tabla 13: Determinación del número de pasos representativos por tramo con su error típico.

Pasos totales en eje X: 780.002 ± 7

Pasos totales en eje Y: 110.705 ± 6

A.12 Parámetros de configuración de la electrónica del detector y consideraciones de operación adicionales

A.12.1 Amplificador

La configuración del Amp utilizado es resumida como sigue:

AMP 2025 Canberra	
Parámetro	Valor
INPUT	Norm (+)
SHAPING MODE	Semi-Gaussiana
SHAPING TIME	4 [μs]
COARSE GAIN	10
FINE GAIN	1,31
AFT	ON
RESTORER	Norm - Asym
PUR	ON

Tabla 14: Valores de funciones de amplificador utilizado.

La polaridad (+) de la entrada del Amp (INPUT) está determinada por la polaridad del pulso de salida del Preamp.

La ganancia (G) determina la altura de los pulsos de salida del Amp respecto la señal proveniente del Preamp. Como esta altura se relaciona a su vez con la energía de los fotones incidentes en el detector, la selección de G permite determinar la máxima energía medible con esa configuración. La ganancia del Amp, es 13,1 dada por:

$$G = \text{Fine Gain} \cdot \text{Coarse Gain} \quad (30)$$

Con el valor de G y Shaping time de la tabla, se consigue que el peak de Cs-137 (de energía ≈ 661 [keV]) esté aproximadamente centrado en el espectro. Se puede medir de ese modo energías de hasta unos 1,5 [MeV], permitiendo determinar la presencia de radioisótopos como el Co-60, que está presente comúnmente como producto de fisión.

El mando AFT (Automatic Fine Tuning), permite la optimización interna de ajustes como el circuito de compensación pole/zero (P/Z), lo que es útil pues logra independizar su

configuración del experimentador. Aun cuando la optimización de P/Z es realizada internamente, es el experimentador quién debe ejecutarla con el pulsador “AUTO SET”, cuestión necesaria cada vez que se enciende la electrónica para iniciar un muestreo o cuando se cambia la constante Shaping time.

El restaurador de línea base (BLR), mantiene la señal de salida del Amp en 0 [v] en ausencia de una pulsos de entrada. Su velocidad es dada por RESTORER que, al quedar en NORM, permite que sea optimizada automáticamente eliminando criterios del experimentador. ASYM en tanto, debe ser seleccionado frente a altas tasas de conteo como en este montaje, al mapear EE.CC.

A.12.2 Multiport II

Su configuración inicial se realizó según lo señalado en los capítulos 3 y 4 de su manual de usuario para ser reconocido por G2K. Tal configuración se realiza en el asistente de configuración MID (MCA Input Definition), donde además de definir el número de canales a utilizar, se selecciona un nombre de perfil que se asocia al detector, a saber “MP2_MCA1” (nombre por defecto), con el que es llamado por el módulo de adquisición y análisis de G2K.

Desde este módulo, se cambió el discriminador de nivel inferior (LLD) de canales de 0,1% (por defecto) a 1,5%. Esto implica que en el espectro se eliminan un número de canales equivalentes al 1,5% del total, asociados con menor voltaje (ruido), que llevados a energía (luego de la calibración del sistema), se resumen comenzar a detectar desde los 26 [keV] en adelante aproximadamente.

A.12.3 Consideraciones de operación adicionales

- ✓ De acuerdo al ciclo de operación del RECH-1 y con el objeto de evitar que el detector quede sin nitrógeno, se definieron dos recargas semanales del contenedor, a saber: lunes y jueves.
- ✓ En términos generales, la electrónica del conjunto de espectrometría gamma utilizada, incluyendo el NIM BIN, se estabiliza tras una hora de encendido con una temperatura ambiente constante. La excepción viene dada por el detector, que tras ser llenado requiere de 4 horas para su estabilización.
- ✓ Al poner/sacar un componente del NIM BIN, este debe estar apagado.

A.13 Secuencia “Quemado en piscina”

Una vez adquirido un espectro gamma, este puede ser analizado de forma pseudo-manual seleccionando áreas de interés del espectro (peaks) y aplicando los algoritmos disponibles en el programa paso a paso para determinar su área y actividad; o por una secuencia de análisis configurada previamente que permite obtener la información del espectro de una sola vez. Debido a que el objetivo de este trabajo buscó la automatización del montaje experimental en sus diferentes etapas, tras el muestreo gamma de EE.CC. del RECH-1, el análisis de espectros utilizará una secuencia pre definida para obtener información, de modo de eliminar el criterio del operador.

La secuencia de análisis se denominó “Quemado en piscina” y el criterio de selección de sus parámetros de configuración supuso el hecho experimental que el espectro obtenido al muestrear un elemento combustible es fundamentalmente desconocido, ya que la presencia de líneas espectrales asociadas a productos de fisión del meat depende fuertemente del tiempo de decaimiento del elemento combustible y su nivel de quemado. Se tuvo entonces la necesidad de seleccionar los algoritmos de análisis más generales disponibles, para no obviar información disponible en la medición. El análisis espectral consta de tres pasos fundamentales: la localización de peaks, la determinación de sus áreas (cuentas) y la identificación de posibles radioisótopos emisores gamma de las energías encontradas en el espectro.

La localización de peaks permite identificar los picos de energía presentes en el espectro, así como determinar su centroide y FWHM. De los cinco métodos que ofrece G2K para esta tarea, el método denominado “Unidentified 2nd Diff” es el que mejor se comporta cuando el espectro presenta energías desconocidas de antemano (Canberra Industries, 2013).

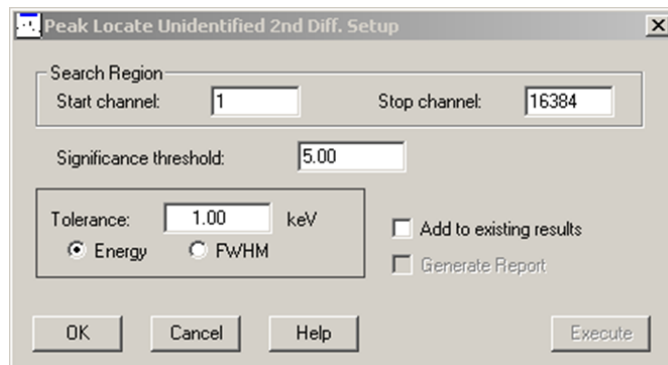


Figura 84: Configuración algoritmo de localización de peaks de energía de la secuencia Quemado en piscina.

La determinación de área de los peaks de un espectro permite definir una región de interés (en adelante ROI) en la que se encuentra un peak de energía y luego determinar el número de cuentas presentes en dicho peak contenido en el ROI. El algoritmo seleccionado fue “Sum/Non-linear LSQ Fit” ya que de los dos disponibles para la tarea, con él se obtienen mejores resultados cuando se utiliza un detector de Germanio y cuando el espectro es desconocido (Canberra Industries, 2013).

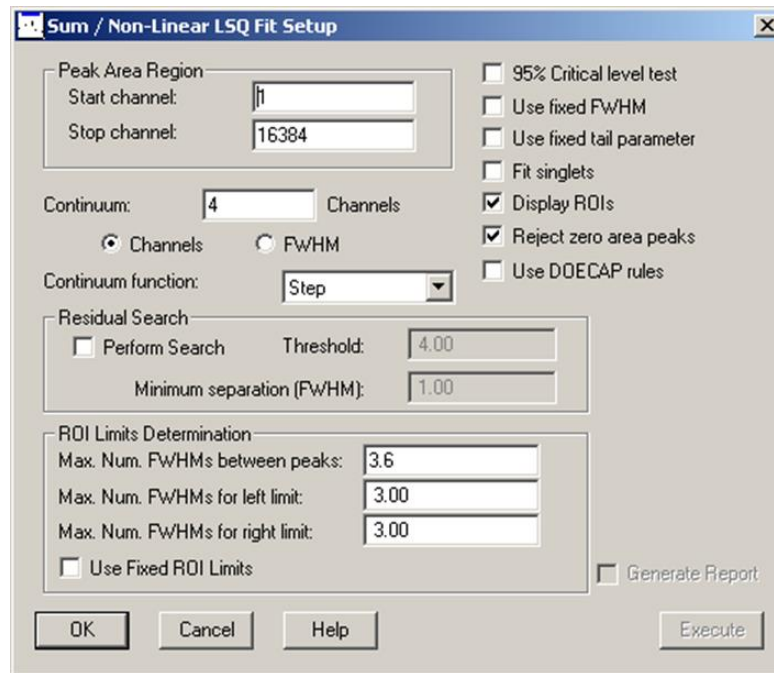


Figura 85: Configuración algoritmo de determinación de área de la secuencia Quemado en piscina.

Es importante señalar que como estos algoritmos se han de aplicar a todos los espectros medidos, los mismos deben ser aplicados también a los espectros destinados a calibrar el conjunto de espectrometría gamma, pues de lo contrario, los valores de actividad medidos pueden tener un alto error asociado. Para asegurar que esto no ocurra, antes de realizar el proceso de calibración, es necesario seleccionar la secuencia “Quemado en piscina” en una ventana de configuración general de calibración, denominada “Calibrate Setup” (Canberra Industries, 2013).

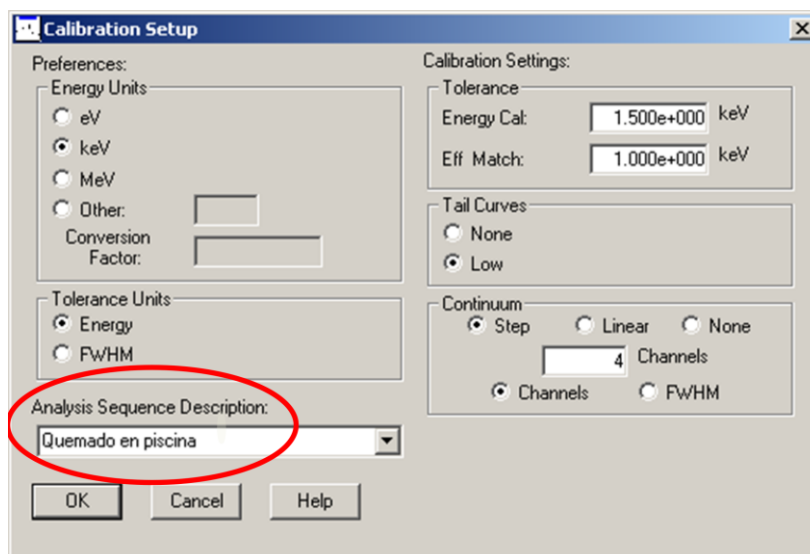


Figura 86: Secuencia “Quemado en piscina” se utiliza también en el proceso de calibración del conjunto de espectrometría gamma.

La última etapa de análisis, la identificación tentativa de los radioisótopos presentes en el espectro, utiliza como fuente de datos de peaks de energía la librería estándar que ofrece G2K que contiene 109 radioisótopos y 511 líneas de energía. Esta librería se almacena en un archivo con extensión .NLB y su nombre es “STDLIB”.

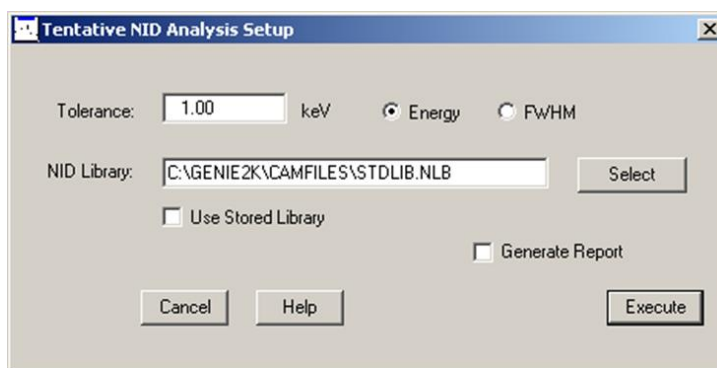


Figura 87: Parámetros de configuración para la identificación tentativa de isótopos presentes en los espectros obtenidos.

La secuencia emite reportes en pantalla de los tres algoritmos ejecutados y los resultados (peaks) obtenidos.

A.14 Fuentes patrones utilizadas en calibración en energía del conjunto de espectrometría gamma

Las fuentes patrones utilizadas fueron tres: Cs-137, Co-60 y Ba-133. Son fuentes selladas del tipo puntual, con un encapsulado en forma de disco.



Figura 88: Kit de patrones en forma de disco del que se usaron para la calibración en energía las fuentes de Cs-137, Co-60 y Ba-133.

Sus peaks de energía, actividad (A), período de semidesintegración ($T_{1/2}$) y otros datos relevantes son presentados a continuación:

Cs-137:

- ✓ $T_{1/2} = 30,17 \pm 0,03$ años.
- ✓ $A = 0,892 \pm 15\%$ [μCi].
- ✓ Fecha de referencia: septiembre 15 de 1995, 12:00 horas.

Energía [keV]	Abundancia (%)
661,650	85,12

Tabla 15: Energía y abundancia de peak de Cs-137, librería estándar de G2K.

Co-60:

- ✓ $T_{1/2} = 5,271 \pm 0,001$ años.
- ✓ $A = 1,055 \pm 15\%$ [μCi].
- ✓ Fecha de referencia: septiembre 15 de 1995, 12:00 horas.

Energía [keV]	Abundancia (%)
1173,216	100
1332,486	100

Tabla 16: *Energía y abundancia de peaks de Co-60, librería estándar de G2K.*

Ba-133:

- ✓ $T_{1/2} = 10,5 \pm 0,1$ años.
- ✓ $A = 0,998 \pm 15\%$ [μCi].
- ✓ Fecha de referencia: septiembre 15 de 1995, 12:00 horas.

Energía [keV]	Abundancia (%)
79,621	2,55
81,000	33,0
276,397	6,9
302,839*	17,8
356,005*	60
383,850	8,7

Tabla 17: *Energía y abundancia de peaks de Ba-133, librería estándar de G2K.*

* Peaks de Ba-133 utilizados en la calibración en energía.

A.15 Fuentes patrones utilizadas en calibración en eficiencia del conjunto de espectrometría gamma

La fuente patrón utilizada en esta calibración es una fuente puntual, sellada de Eu-152, de la hoy inexistente empresa Isotopes Products Laboratories (Eckert & Ziegler, s.f.), integrada en 1999 a la firma Eckert & Ziegler.

Su actividad era de $3,66 \pm 15\%$ [mCi] en febrero 15 de 1995, a las 12:00 horas y su $T_{1/2}$ es $13,6 \pm 0,2$ años. Los peaks gamma más relevantes son:

Energía [keV]	Abundancia (%)
121,780	28,4
244,693	7,49
344,272	26,5
411,111**	2,21
443,979	3,11
778,890	12,74
867,320	4,16
964,010	14,4
1085,780**	10,0
1112,020	13,3
1407,954	20,7

Tabla 18: Energía y abundancia de peaks de Eu-152, librería estándar de G2K. ** Peaks no usados en la calibración en eficiencia.

Posee un doble encapsulado cilíndrico estándar de acero inoxidable denominado encapsulado 3000, cuyas dimensiones principales pueden ser observadas en la imagen:

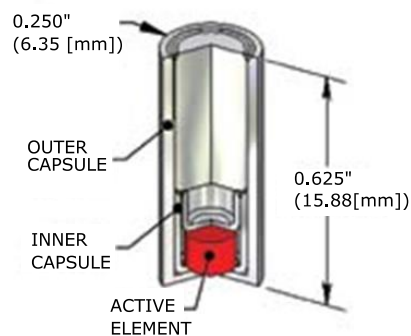


Figura 89: Vista interior del patrón de Eu-152 utilizado. Recuperada de la página www.ezag.com.

El elemento activo de la fuente (en rojo), tiene un diámetro de 0,125" (3,18 [mm]) y un largo de 0,090" (2,29 [mm]). La menor distancia entre una cara del elemento activo y una cara del encapsulado es 0,040" (1,02 [mm]). La fuente se dispuso de tal forma que esta cara de la fuente (cara lisa) se enfrente directamente al detector.

El amplio espectro de energías cubierto con esta única fuente y hecho ser la que presenta a la fecha la mayor actividad calibrada dentro del inventario de fuentes del RECH-1, justifica su elección.