

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA ATÓMICA, MOLECULAR Y
NUCLEAR



**Construcción de un sistema de
electroimanes para producir haces de
electrones monoenergéticos de hasta
varios MeV**

Juan Manuel Cornejo García
Trabajo Fin de Máster
Septiembre de 2011

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA ATÓMICA, MOLECULAR Y
NUCLEAR

**Construcción de un sistema de
electroimanes para producir haces de
electrones monoenergéticos de hasta
varios MeV**

Juan Manuel Cornejo García
Trabajo Fin de Máster
Septiembre de 2011

Daniel Rodríguez Rubiales, Investigador Ramón y Cajal y **Antonio Miguel Lallena Rojo**, Catedrático de Universidad

CERTIFICAN: Que la presente memoria ”**Construcción de un sistema de electroimanes para producir haces de electrones monoenergéticos de hasta varios MeV**” ha sido realizada bajo su dirección en la Universidad de Granada por **Juan Manuel Cornejo García** y constituye su Trabajo Fin de Máster del programa de Máster Interuniversitario en Física Nuclear.

Y para que así conste, presenta ante el Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear la referida memoria en Granada a 23 de Septiembre de 2011.

Índice general

1. Introducción	1
2. Producción de haces monoenergéticos de electrones y aplicaciones	3
2.1. La desintegración natural β y el transporte de electrones	3
2.2. Instalaciones y dispositivos portátiles de producción de haces de electrones monoenergéticos	7
2.3. Aplicaciones	8
3. Diseño y construcción del dispositivo	11
3.1. El campo magnético	11
3.2. La potencia disipada y la refrigeración	13
3.3. El dispositivo experimental de prueba y el sistema de control . .	15
3.4. Especificaciones técnicas	20
3.5. El dispositivo final	20
4. Producción de la fuente β en el CNA	25
4.1. La sección eficaz de producción de ${}^8\text{Li}$	25
4.2. El acelerador tandem Van de Graaff de 3 MV	26
4.3. La línea de Física Nuclear Básica	26
4.4. El sistema de detección y adquisición de datos	28
4.5. Resultados preliminares	30
5. Conclusiones	35
A. Dibujos técnicos	37
B. Interfaz del sistema de adquisición FASTER	42

Índice de figuras

2.1. Simulación Monte Carlo del espectro β^- del ${}^6\text{He}$	4
2.2. Energía cinética de los electrones en función del campo magnético	6
2.3. Resolución en energía en función del diámetro del colimador	6
2.4. Esquema de la instalación en el CENBG de Burdeos	8
2.5. Sistema de detección utilizado en la instalación LPCTrap en GANIL	9
3.1. Esquema de los electroimanes	12
3.2. Campo magnético generado a lo largo del eje	13
3.3. Dibujo técnico de los electroimanes y el circuito magnético	14
3.4. Potencia disipada por efecto Joule en función de la intensidad de corriente	15
3.5. Esquema del dispositivo y elementos asociados para las pruebas realizadas	16
3.6. Diagrama de bloques de LabVIEW2010 para el control de la intensidad de corriente y la medida del voltaje	17
3.7. Medidas de voltaje y temperatura exterior de la bobina en función del tiempo	18
3.8. Valores de temperatura exterior de la bobina en función de la intensidad de corriente para diferentes prototipos de bobina	19
3.9. Temperatura y campo magnético en función de la intensidad de corriente	21
3.10. Dibujo técnico del sistema de vacío	22
3.11. Circuitos electrónicos para la detección de corriente inducidas	23
4.1. Esquema del acelerador tándem van de Graaff de 3 MV del CNA	26
4.2. Dibujo técnico en 3D de la parte final de la línea de Física Nuclear Básica del CNA	27
4.3. Dibujo técnico del dispositivo experimental	29
4.4. Esquema del sistema de detección y adquisición utilizados en el experimento del CNA	30
4.5. Señal detectada en función del tiempo	30
4.6. Espectro β del ${}^8\text{Li}$ en ausencia y en presencia de campo magnético	31
4.7. Comparación de dos espectros de ${}^8\text{Li}$ en presencia de un campo magnético de 0,66 T	32
A.1. Modificación de la estructura que cubre el plástico centelleador	38

A.2. Brida CF63 modificada	38
A.3. Posicionamiento del blanco	39
A.4. Colimador para el haz de partículas β	39
A.5. Estructura para fijación del fotomultiplicador I	40
A.6. Estructura para fijación del fotomultiplicador II	40
A.7. Estructura para orientación horizontal del detector	41
A.8. Estructura para orientación vertical del detector	41
B.1. Interfaz de FASTER I	42
B.2. Interfaz de FASTER II	43

Capítulo 1

Introducción

En este trabajo de investigación se presenta el primer prototipo de un sistema de electroimanes diseñado y construido para suministrar haces de electrones monoenergéticos en un amplio rango de energías hasta 15 MeV. Estos haces se generarán acoplando una fuente de electrones no monoenergéticos a un campo magnético producido por dos electroimanes de forma que la energía del haz pueda ajustarse en función de la intensidad aplicada a los mismos. Con el fin de maximizar el campo magnético, se ha trabajado intensamente en el mecanismo de refrigeración de las bobinas y en la disposición geométrica de las mismas. Esto último también con el objetivo de conseguir un dispositivo ligero y compacto que pueda transportarse y utilizarse en diferentes instalaciones, mejorando otros dispositivos realizados con anterioridad [1, 2, 3]. El diseño también incluye los dispositivos electrónicos para el suministro de la corriente, el enfriamiento de los electroimanes, la medida de los distintos parámetros y el sistema de control.

El trabajo realizado ha estado motivado por la utilidad del dispositivo en: 1) la determinación precisa de la función respuesta de detectores de radiación β , y 2) la medida del perfil energético de los haces de electrones generados en los aceleradores de uso clínico. La determinación de la función respuesta de detectores es especialmente importante para poder utilizar la información registrada en éstos en experimentos de precisión, como por ejemplo los llevados a cabo para medir el coeficiente de correlación angular β - ν en la desintegración del ${}^6\text{He}$ en el laboratorio francés GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) en Caen [4]. En lo que respecta a los aceleradores de uso clínico, la medida del perfil energético del haz sería interesante y complementaria a las medidas indirectas que se realizan en los hospitales, basadas en la determinación del alcance del haz [5].

El diseño mecánico de los distintos componentes se ha realizado utilizando AUTOCAD2011. La construcción y puesta en marcha del dispositivo se ha llevado a cabo en el laboratorio de investigación del Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Granada. Para el funcionamiento de los elementos del dispositivo, el control automático de los mismos y el registro de las medidas se ha utilizado el paquete informático LABVIEW2010. La fuente de

electrones es la radiación β de la desintegración del ^8Li ($T_{1/2} = 808$ ms, $Q = 16$ MeV). Este radionúclido se ha producido en el Centro Nacional de Aceleradores (CNA) en Sevilla en la línea de física nuclear básica del acelerador tándem Van de Graaff de 3 MV a partir de la reacción $d(^7\text{Li}, ^8\text{Li})p$ [6]. Una primera prueba llevada a cabo en el CNA ha puesto de manifiesto la necesidad de incluir elementos para el apantallamiento de la radiación no deseada, lo que se ha comenzado a estudiar con GEANT4.

La presentación de este trabajo se ha organizado en tres capítulos, además de la introducción (Cap. I) y las conclusiones (Cap. V). En el capítulo 2 se presentan aspectos generales de la creación y transporte de electrones cubriendo un amplio rango de energías, un resumen que engloba algunas instalaciones y dispositivos de producción de haces monoenergéticos y se describen los aspectos más relevantes de utilizar este dispositivo en las dos aplicaciones mencionadas. En el capítulo 3 se presenta de forma detallada el diseño, la construcción y la puesta en marcha del dispositivo. Las pruebas realizadas permiten definir las especificaciones técnicas en términos de campo magnético, corriente y temperatura de las bobinas. También se indican los elementos necesarios para la calibración del campo magnético que permitan completar el dispositivo. En el capítulo 4 se presentan los resultados de producción del ^8Li en el CNA en el experimento llevado a cabo en mayo de 2011, concluyendo con una prueba cualitativa del funcionamiento del dispositivo.

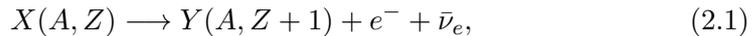
Capítulo 2

Producción de haces monoenergéticos de electrones y aplicaciones

El dispositivo objeto de este trabajo utiliza una fuente de emisión β para la producción de electrones, y los selecciona en función de su energía aplicando un campo magnético. Este campo varía con la intensidad de corriente suministrada a los electroimanes que lo producen. En este capítulo, se hace un resumen del mecanismo de desintegración β y se presentan los conceptos básicos en los que se basa el transporte de electrones relativistas en campos electromagnéticos. También se listan y se describen brevemente las instalaciones y dispositivos contruidos para crear haces de electrones monoenergéticos. Por último se estudia el uso del dispositivo en las dos aplicaciones propuestas.

2.1. La desintegración natural β y el transporte de electrones

El mecanismo natural más característico de producción de electrones de alta energía (> 500 keV) es la desintegración β . En ésta, los electrones se emiten en un rango de energías cinéticas que va desde cero hasta un valor máximo conocido como valor Q . Este rango de energías es consecuencia de la naturaleza de este proceso en el que un núcleo $X(A, Z)$ (padre) se transforma en un núcleo $Y(A, Z + 1)$ (hijo) emitiendo un electrón e^- y un antineutrino electrónico $\bar{\nu}_e$:



los cuales se reparten la energía de forma que:

$$Q = T_e + T_\nu, \quad (2.2)$$

con T_e y T_ν las energías cinéticas del electrón y del antineutrino respectivamente. Acumulando un número elevado de desintegraciones se obtiene un espectro como

el mostrado en la Fig. 1.1 correspondiente al desintegración del ${}^6\text{He}$, que sigue la distribución:

$$N(T_e, t_R) dT_e dt_R = F(\pm Z, E_e) C(E_e) (p_\nu E_e + \frac{a}{2} (p_R^2 - p_e^2 - p_\nu^2)) \frac{p_R^2}{t_R} dT_e dt_R, \quad (2.3)$$

donde t_R es el tiempo de vuelo del ión del núcleo hijo, que puede medirse con un detector de micro-canales, $F(\pm Z, E_e)$ es la función de Fermi, $C(E_e)$ es el factor de Coulomb debido a la carga del núcleo y a es el coeficiente de correlación angular β - ν . En el caso de la desintegración del ${}^6\text{He}$, $a = -1/3$ por tratarse de una transición Gamow-Teller pura. p_R , p_e y p_ν son los momentos del ión del núcleo hijo, del electrón y del antineutrino, respectivamente.

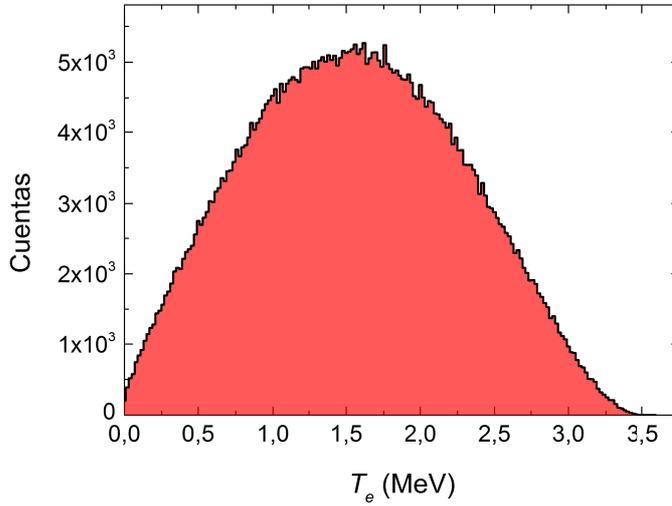


Figura 2.1: Simulación Monte Carlo del espectro β^- del ${}^6\text{He}$ siguiendo la Eq. (2.3). Para la simulación $Q = 3,5078$ MeV, $m({}^6\text{Li})c^2 = 5603,05$ MeV. El número total de eventos lanzados fue de 500000.

En la naturaleza el valor Q puede oscilar entre 2,5 keV, correspondiente a la desintegración del ${}^{187}\text{Re}$ ($T_{1/2} = 4,1 \times 10^{10}$ años) [7], y valores por encima de 10 MeV, como por ejemplo ocurre con el ${}^8\text{Li}$ ($T_{1/2} = 838,4$ ms, $Q = 16$ MeV) objeto de estudio en este trabajo [8].

Además de la desintegración β , el proceso conocido como conversión interna puede utilizarse como fuente de electrones. En este proceso, la energía de un núcleo excitado se transmite a un electrón orbital del átomo que se emite con energía cinética

$$E_{e^-} = E_I - E_F - E_B, \quad (2.4)$$

donde E_I y E_F son las energías inicial y final del núcleo excitado, y E_B es la energía de enlace del electrón. Este proceso compite con la desintegración γ , y es más probable cuanto mayor es el número atómico del núcleo en cuestión. En núcleos cercanos al valle de estabilidad, que existen en la naturaleza o bien son

fáciles de sintetizar, los electrones se emiten con una energía bien definida pero inferior al megaelectronvoltio. Un ejemplo es el núcleo ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,2$ años, $E_{e^-} = 629$ keV) [9] que se suele utilizar en laboratorios de docencia. Por ello es necesario desarrollar el dispositivo que aquí se presenta en el que la fuente β está seguida de un campo magnético tal que permite hacer la selección en energía desviando las trayectorias y haciendo incidir el haz en un colimador o conjunto de colimadores. En ausencia de campo eléctrico, la fuerza de Lorentz puede escribirse como:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (2.5)$$

donde q es la carga electrónica de la partícula, \mathbf{v} la velocidad y \mathbf{B} el campo magnético. Si la partícula se mueve perpendicularmente al campo magnético, ésta describirá una trayectoria circular tal que:

$$BR = \frac{p}{q}, \quad (2.6)$$

donde R es el radio de curvatura y el producto BR la llamada rigidez magnética. En el rango de energías de interés (1-15 MeV), el cociente de la velocidad con respecto a la velocidad de la luz en el vacío (v/c) varía entre 0,8596 y 0,9988, por lo que el problema debe tratarse en el límite relativista, donde E y p están relacionados según:

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2, \quad (2.7)$$

siendo m_0 la masa en reposo del electrón. Usando la relación

$$E = T_e + m_0c^2, \quad (2.8)$$

y la Ec. (2.7) se obtiene

$$T_e = -m_0c^2 + \sqrt{(m_0c^2)^2 + (BRqc)^2}. \quad (2.9)$$

En la Fig. 2.2 se muestra la energía cinética del haz de electrones cuyas trayectorias se desvían 90° en un campo magnético para tres radios de curvatura.

Resolución en energía

La resolución en energía vendrá determinada principalmente por el diámetro de los colimadores y la resolución del sistema de detección. Para un colimador de diámetro D , el radio de curvatura está en el intervalo $R \pm \Delta R$, con $\Delta R = D/2$. La relación entre la resolución en energía ΔE y el diámetro del colimador puede obtenerse a partir de la Ec. (2.9),

$$\frac{dT_e}{dR} = -\frac{(Bqc)^2 R}{\sqrt{(m_0c^2)^2 + (BRqc)^2}}. \quad (2.10)$$

Los resultados se muestran en la Fig. 2.3 para distintos valores de la energía del haz y un radio de curvatura $R = 3,5$ cm.

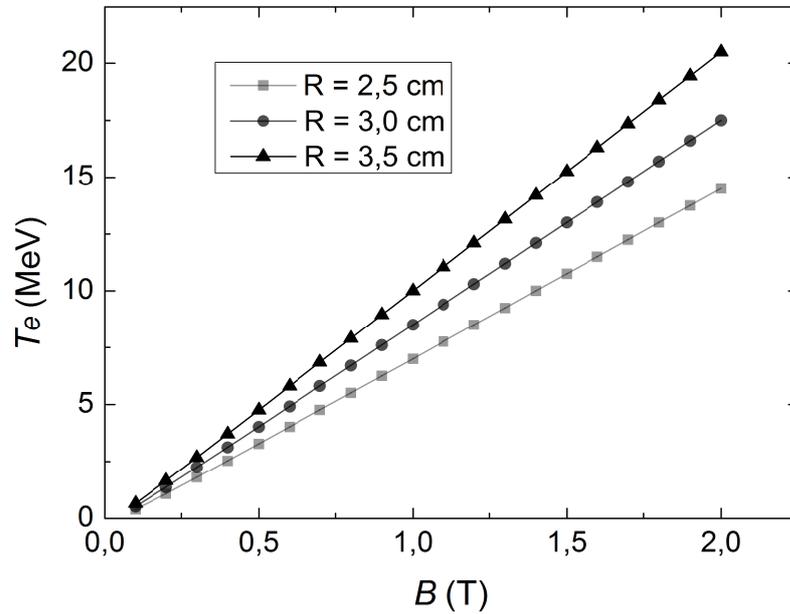


Figura 2.2: Energía cinética de los electrones en función del campo magnético para distintos radios de curvatura de 2,5, 3,0 y 3,5 cm.

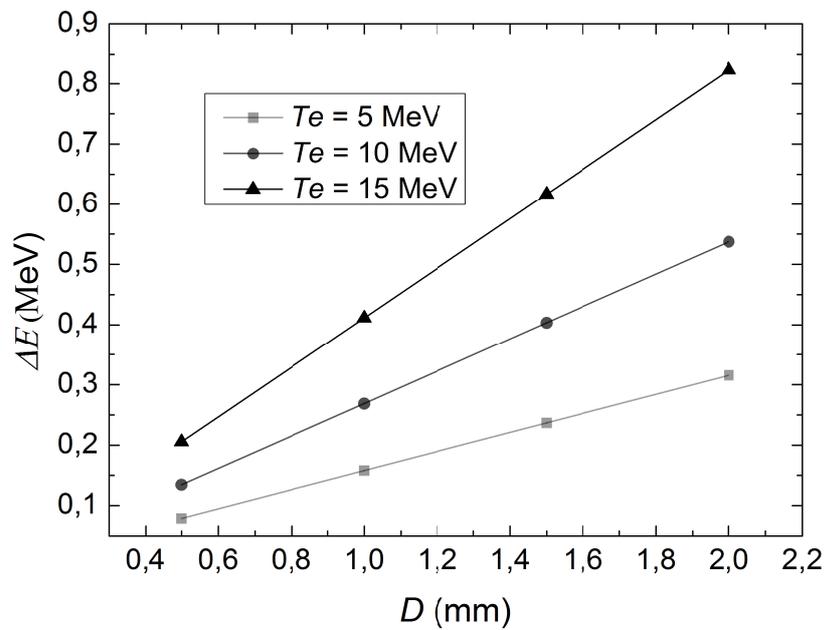


Figura 2.3: Resolución en energía ΔE en función del diámetro del colimador D situado a la salida del haz de electrones para una energía del haz de 5, 10 y 15 MeV.

2.2. Instalaciones y dispositivos portátiles de producción de haces de electrones monoenergéticos

Hasta la fecha se han construido algunos dispositivos [1, 2, 3] para ser utilizados con el mismo fin que el mencionado en este trabajo, que se enumeran a continuación:

- En la Ref. [1] los autores presentaron un dispositivo de dos electroimanes enfrentados con dimensiones $11\text{ cm}\times 11\text{ cm}\times 17\text{ cm}$ para aplicaciones a detectores de radiación. Cada electroimán consiste en un enrollamiento de 1000 espiras de cobre (diámetro del hilo $\Phi = 1\text{ mm}$) que tiene una resistencia total de $13\ \Omega$ a temperatura ambiente. La intensidad máxima que los autores han suministrado a las bobinas es de 3 A y la correspondiente potencia disipada es de 60 W . Como fuente de electrones se utilizó el radionúclido ^{106}Ru ($A = 0,5\ \mu\text{Ci}$) que se desintegra via β^- en ^{106}Rh ($T_{1/2} = 1\text{ año}$, $Q = 0,039\text{ MeV}$) y éste a su vez en ^{106}Pd ($T_{1/2} = 30\text{ s}$, $Q = 3,54\text{ MeV}$). Este dispositivo presenta la ventaja de ser muy compacto pero en la Ref. [1] sólo se mencionan campos de hasta $0,2\text{ T}$. Producir campos más altos requeriría intensidades de corriente mayores. Este no es posible técnicamente sin un circuito de refrigeración.
- En la Ref. [2] los autores presentan un dispositivo que catalogan como "portátil y compacto" con dimensiones de $31\text{ cm}\times 17\text{ cm}\times 28\text{ cm}$, y un peso total de 50 kg para aplicaciones en física médica. El dispositivo está formado por una bobina primaria y dos secundarias que permiten generar un campo magnético de hasta $0,6\text{ T}$. Debido a las dimensiones del dispositivo ($R = 9\text{ cm}$), es posible crear haces de electrones monoenergéticos de hasta 16 MeV después de hacer pasar el haz por un conjunto de colimadores de tantalio que tienen una apertura de 2 mm y un espesor de $6,6\text{ mm}$. El dispositivo se encuentra inmerso en helio y está debidamente apantallado para evitar la radiación no deseada. La detección de los electrones se lleva a cabo utilizando un detector de centelleo y una película fotográfica. El dispositivo tiene incorporada una sonda Hall para la medida del campo magnético.
- En la Ref. [3] se muestra una pequeña instalación de laboratorio en el Centre d'Etudes Nucleaires de Bordeaux Gradignan (CENBG) en Burdeos (Francia), que utiliza una fuente de ^{90}Sr con una actividad de 370 MBq ($A = 10\text{ mCi}$), acoplada a un conjunto formado por una serie de colimadores de plomo y a un dipolo magnético. Regulando el campo magnético de este último se consigue haces monoenergéticos de electrones en el rango de energías $400\text{ keV}-2\text{ MeV}$. Para el apantallamiento de la radiación no deseada se utiliza una lámina de policarbonato. El dispositivo está soportado por una estructura vertical con dimensiones aproximadas de $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 150\text{ cm}$. Dicho dispositivo se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.4.

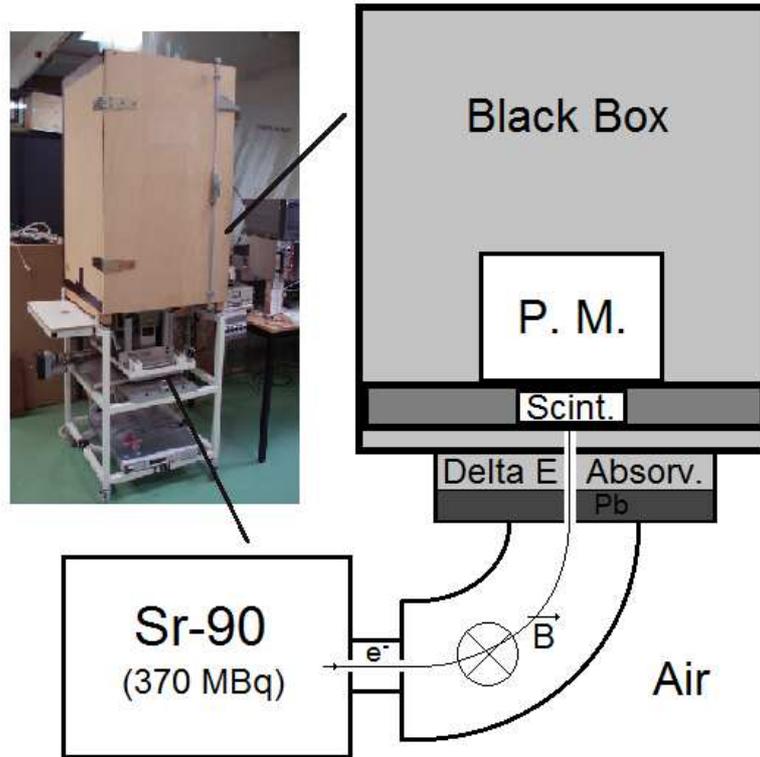


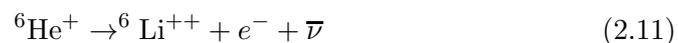
Figura 2.4: Esquema de la instalación de producción de haces monoenergéticos de electrones en el rango de energías de 400 keV-2 MeV en el CENBG de Burdeos.

2.3. Aplicaciones

La motivación para construir este tipo de dispositivo, radica en su uso para mejorar la medida de la función respuesta de detectores de radiación β , y el uso potencial del mismo para medir el perfil en energía de un acelerador de uso clínico. Ambas aplicaciones se describen brevemente a continuación.

Determinación de la función respuesta de detectores de radiación β

Este tipo de medida es importante en aquellos experimentos donde es necesario una determinación precisa de la energía de los electrones obtenida a partir de la señal formada en un detector y procesada en una cadena electrónica. Aquí se presenta un caso específico de un experimento que se lleva a cabo en el laboratorio francés LPC de Caen [4] para medir el coeficiente de correlación angular β - ν en la desintegración del ${}^6\text{He}$ ($T_{1/2} = 806$ ms, $Q = 3,5$ MeV) [10]:



Para reducir los errores sistemáticos en la medida, la detección de los electrones se realiza en coincidencia con la detección del ión de retroceso (núcleo hijo). Los iones son almacenados en un trampa de Paul transparente alrededor de la que se

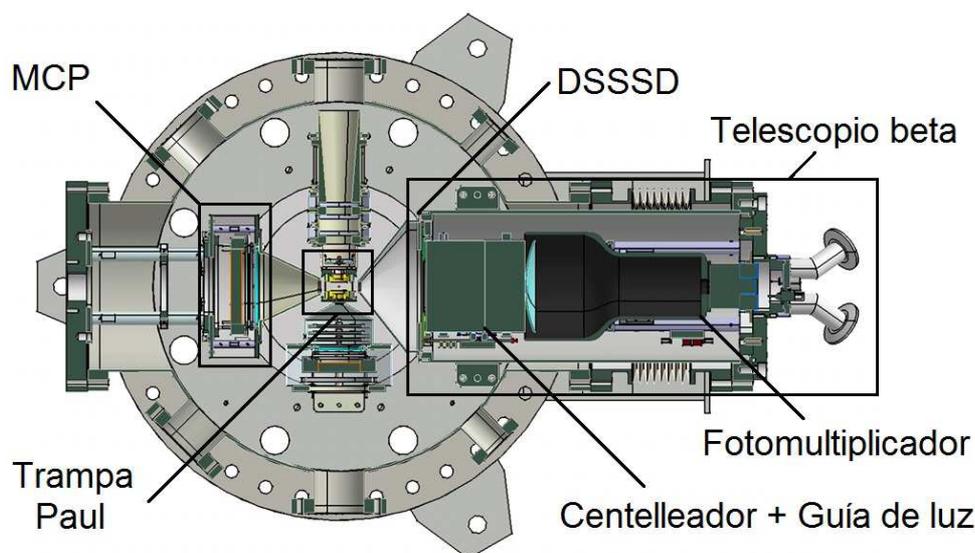


Figura 2.5: Sistema de detección utilizado en la instalación LPCTrap en GANIL.

dispone el sistema de detección tal como se muestra en la Fig. 2.5. El sistema de detección está formado por un detector de microcanales MCP (*Micro-Channel Plate*) con un ánodo de líneas de retardo, que permite registrar el tiempo de vuelo del ión y la posición de impacto en el detector, y un telescopio β , formado por un detector de silicio segmentado DSSSD (*Doubled Sided Silicon Strip Detector*) y un centelleador plástico seguido de una guía de luz y un tubo fotomultiplicador, que permite obtener la energía depositada por los electrones así como la posición de impacto de éstos.

Una medida muy precisa del coeficiente de correlación angular requiere un estudio exhaustivo de los efectos sistemáticos tal como se ha descrito en detalle en la Ref. [4]. Estos efectos se enumeran a continuación:

1. La función respuesta del telescopio β en todo el rango de energías del espectro de desintegración del ${}^6\text{He}$ que incluye la determinación de la resolución del detector y el efecto de retrodispersión debido a electrones que no depositan toda su energía.
2. El tamaño de la nube de iones almacenados en la trampa Paul transparente.
3. El efecto que el campo de radiofrecuencia necesario para confinar los iones tiene en el tiempo vuelo del ión de retroceso.
4. El efecto *shake-off* en el ión del núcleo hijo que produce con una cierta probabilidad iones de ${}^6\text{Li}^{3+}$.

La calibración del plástico centelleador se realiza utilizando los bordes Compton obtenidos con fuentes de ${}^{22}\text{Na}$, ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{154}\text{Mn}$, y ${}^{40}\text{K}$ y ${}^{208}\text{Tl}$. Con estos

radionúclidos es posible cubrir el rango de energías entre 340 keV y 2,38 MeV. La energía se determina con una incertidumbre relativa de $\sim 5\%$. La calibración hasta la energía de 3,5 MeV, se lleva a cabo utilizando una función que depende de la carga Q recogida en el fotomultiplicador y de 4 parámetros libres. Una medida directa con el dispositivo que aquí se presenta reduciría la incertidumbre generada en la obtención de dicha función.

Caracterización de haces de electrones de uso clínico

Un acelerador lineal de electrones de uso clínico produce haces de fotones o de electrones de alta energía. Si se desea utilizar directamente el haz de electrones, éste se hace incidir sobre elementos dispersores de bajo número atómico de forma que resulte en un haz extenso. Si se desea producir un haz de fotones, se hace incidir el haz sobre un blanco de alto número atómico, obteniendo una distribución espectral resultante de la radiación de frenado. La energía de salida del haz depende de cada modelo con una energía máxima para fotones cercana a 20 MeV, y para electrones alrededor de 23 MeV [11].

En el protocolo TRS-398 [5], la calidad del haz de electrones se obtiene a partir de lo que se conoce como profundidad de hemiabsorción R_{50} . Esta última se define como la profundidad a la que la dosis absorbida en un maniquí de agua se reduce a la mitad de su valor máximo. La energía del haz se determina de forma indirecta a partir de la carga generada como consecuencia de la interacción de los electrones con el maniquí de agua. La profundidad R_{50} se obtiene cuando el valor de la carga medida en la cámara de ionización es la mitad de la carga máxima. Para obtener este valor hay que realizar algunas correcciones utilizando fórmulas empíricas para distintas calidades del haz suministrado por el acelerador.

Además de permitir una medida directa del perfil de energías del haz, el dispositivo que aquí se presenta podría utilizarse en dosimetría. Muchos laboratorios primarios realizan la calibración mediante la dosis absorbida en agua para la calidad de la radiación γ del ^{60}Co . Algunos laboratorios han ampliado las calibraciones a haces de fotones y electrones de alta energía (> 10 MeV), o están en proceso de desarrollo de técnicas que lo permitan. El dispositivo presentado en este trabajo podría permitir una comparación directa entre la lectura de un dosímetro realizada en un laboratorio primario y en un acelerador clínico. Obtener las características del haz de electrones puede ser muy beneficioso en radioterapia intra-operatoria.

Capítulo 3

Diseño y construcción del dispositivo

En este capítulo dedicado al diseño, construcción y la puesta en marcha del dispositivo de creación de haces monoenergéticos de electrones se describen los aspectos más relevantes del mismo: el campo magnético generado por los electroimanes y la potencia disipada por éstos, el sistema de refrigeración de las bobinas y el sistema de control de los aparatos electrónicos que componen el dispositivo. Las medidas de los distintos parámetros, principalmente el campo magnético y la temperatura, permitirán definir las especificaciones técnicas del dispositivo. Finalmente también se presenta el diseño conceptual de una trampa Penning que permitirá la calibración del campo magnético y con ella la determinación de la energía de los electrones.

3.1. El campo magnético

El campo magnético \mathbf{B} con el que se desviarán los electrones está generado por dos electroimanes dispuestos en el mismo eje (z) y separados una distancia s , de forma que:

$$B_z = B_z^1 + B_z^2, \quad (3.1)$$

donde, para electroimanes con forma cilíndrica:

$$B_z^1 = \frac{\mu_r \mu_0 I N}{2L} \left[\frac{z + L}{\sqrt{(z + L)^2 + r^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right], \quad (3.2)$$

y

$$B_z^2 = \frac{\mu_r \mu_0 I N}{2L} \left[\frac{z - s}{\sqrt{(z - s)^2 + r^2}} - \frac{z - (L + s)}{\sqrt{(z - (L + s))^2 + r^2}} \right]. \quad (3.3)$$

En las Ecs. (3.2) y (3.3), μ_r es la permeabilidad relativa en el interior de las bobinas, $\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6}$ H/m es la permeabilidad magnética del vacío, I la intensidad que circula por las bobinas que forman los electroimanes, L la longitud de las mismas (en dirección del eje z), N el número de espiras, y r el radio de éstas. Estos parámetros se muestran en la Fig. 3.1. La Fig. 3.2 muestra el campo

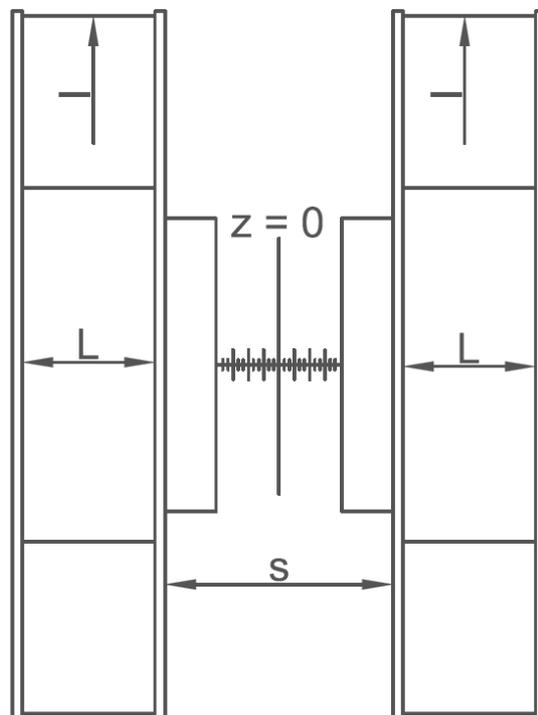


Figura 3.1: Esquema del dispositivo indicando los diferentes parámetros necesarios para el cálculo del campo magnético siguiendo las Ecs. (3.2) y (3.3).

magnético en función de la separación de las bobinas cuando sólo hay aire en su interior. En la realidad y para poder conseguir campos intensos, μ_r debe ser varios órdenes de magnitud mayor. Por ello se coloca un núcleo de un material de alta permeabilidad magnética en el interior de las bobinas. Es necesario también crear una estructura con un material de alta permeabilidad para cerrar el circuito magnético tal como se muestra en la Fig. 3.3. En este trabajo, el material de los núcleos y del circuito en forma de herradura de la Fig. 3.3 es hierro dulce clase 2 AK STEEL MERCHANDASING[®]. Los núcleos están sujetos a la estructura en forma de herradura por medio de tornillos de acero inoxidable con métrica M8. Se han elegido de forma cúbica por las razones expuestas en la Ref. [1], punto de partida de este proyecto.

Los electroimanes están formados por arrollamientos de hilo de cobre aislado alrededor de una estructura también de cobre. Las bobinas tienen un total de 420 espiras cada una. La estructura de cobre tiene un circuito interior con el fin de hacer circular un líquido refrigerante. Los bloques de hierro están sujetos a la estructura de cobre por medio de dos tornillos de acero inoxidable de métrica M3. La forma modular en la que se ha construido el dispositivo ha permitido en la fase de prueba intercambiar distintos bloques variando la separación entre los electroimanes. La utilización de cobre para la estructura de soporte del arrollamiento se debe a su alta conductividad térmica ($400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), lo que permite una buena refrigeración, y a que es un material diamagnético ($\mu_r = 0,999991$),

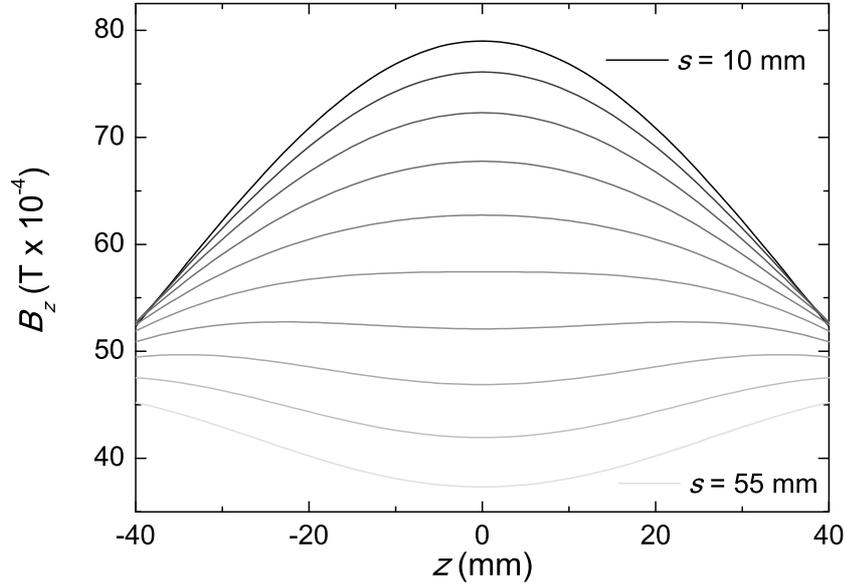


Figura 3.2: Campo magnético generado a lo largo del eje z para diferentes distancias de separación entre las bobinas. Para los cálculos, $I = 1$ A, $L = 3$ cm, $r = 6$ cm, $N = 420$, y $\mu_r = 1$ (aire). Si se coloca hierro dulce, $\mu_r \sim 5000$. $z = 0$ es el punto medio en la separación entre las bobinas.

lo que permitirá concentrar el campo magnético en los núcleos.

3.2. La potencia disipada y la refrigeración

La potencia generada por efecto Joule al hacer pasar una intensidad de corriente I por una resistencia R viene dada por

$$P = I^2 R, \quad (3.4)$$

que se traduce en un aumento de temperatura T y en un incremento de R según la expresión

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]. \quad (3.5)$$

En esta ecuación, α se conoce como coeficiente de temperatura y tiene un valor para el cobre de $0,00382 \text{ K}^{-1}$. R_0 es la resistencia para una temperatura $T_0 = 293 \text{ K}$ y R se obtiene a partir de la resistividad del cobre ($\rho = 0,0172 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ para $T = 293 \text{ K}$). Por ejemplo, considerando que el hilo tiene un diámetro de 1 mm, y una longitud tal que permitiese 420 espiras con radios de aproximadamente 6 cm, R resultaría aproximadamente en $3,5 \text{ } \Omega$.

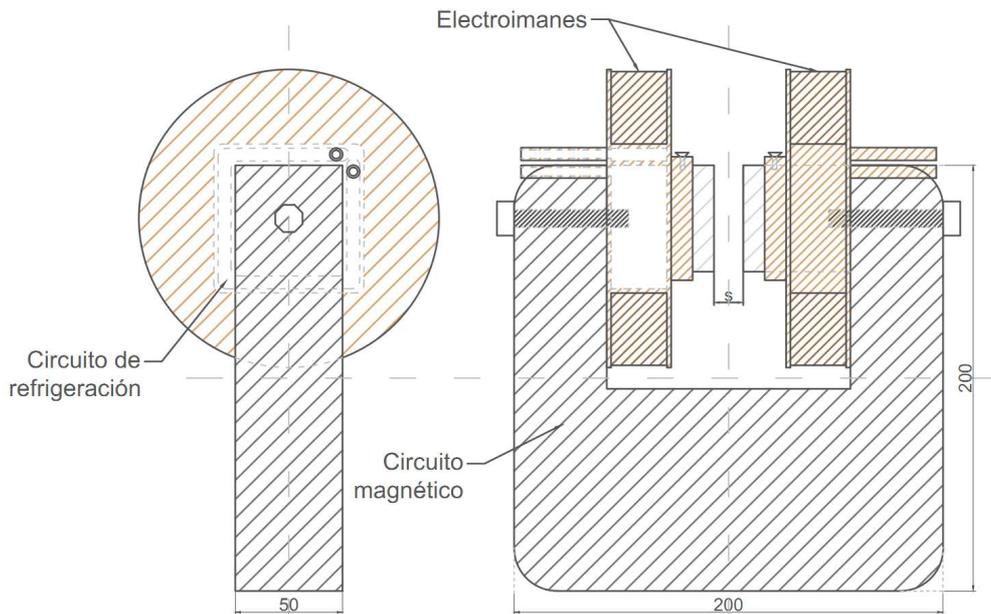


Figura 3.3: Dibujo técnico realizado con AUTOCAD2011 de los electroimanes formados por la bobina montada en la estructura de cobre (marrón) y el bloque de sección cuadrada de hierro dulce (gris claro), y la estructura de hierro dulce en forma de herradura (gris oscuro). Las dimensiones están en milímetros. El conjunto está sobre una estructura de ITEM®.

La potencia disipada se muestra en la Fig. 3.4 en función de la intensidad de corriente para distintas temperaturas del hilo de cobre, o lo que es equivalente según la Ec. (3.5), para distintos valores de R . Se grafica también la potencia disipada en función de la intensidad de corriente utilizando los valores de R medidos experimentalmente.

El circuito de refrigeración indicado en la Fig. 3.3 permite mantener el equilibrio térmico entre las bobinas y el líquido refrigerante JULABO THERMAL G. Cada espira de la bobina está en contacto térmico con el circuito de cobre a través de láminas de cobre. El líquido refrigerante está compuesto en un 50 % de etanodiol (CAS:107-21-1) que puede trabajar en un rango de temperaturas desde -30°C hasta 80°C y se enfría utilizando un refrigerador JULABO modelo FL300 que opera en un rango de temperaturas de -20°C a 40°C . Éste permite disipar una potencia de hasta 300 W a 20°C , y de hasta 150 W a -10°C . Suministra un caudal máximo de 15 l/min equivalente a $250\text{ cm}^3/\text{s}$, más que suficiente si se compara con el volumen del circuito de cobre de $\sim 40\text{ cm}^3$. Esto permitirá utilizar el mismo refrigerador para las dos bobinas. El control de la temperatura de salida del líquido refrigerante se hace con una precisión de $0,1^{\circ}\text{C}$. La circulación del líquido hasta las bobinas y la recirculación del mismo hasta el refrigerador se realiza por tubos de poliuretano transparente de 6 mm de diámetro interior. La conductividad térmica de este material es $\sim 0,02\text{ W/m}\cdot\text{K}$, por lo que resulta ser un buen aislante térmico.

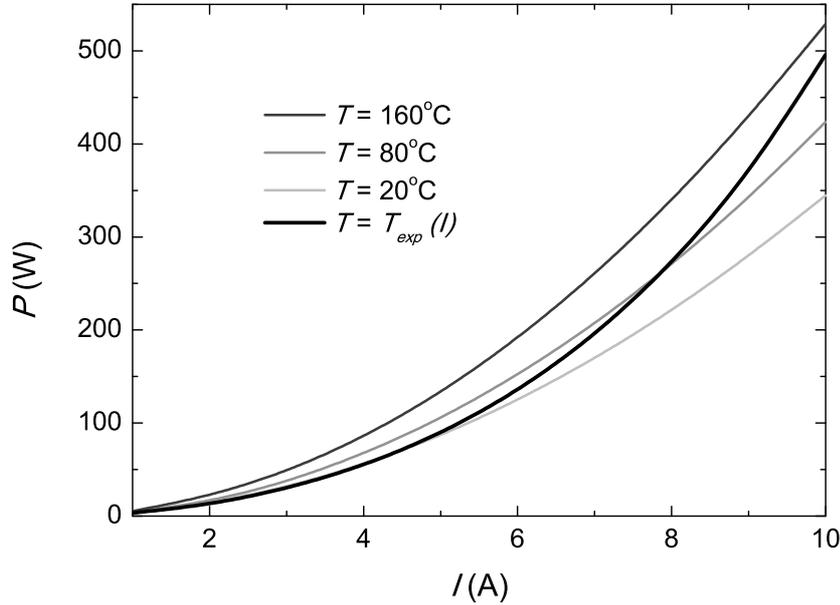


Figura 3.4: Potencia generada por efecto Joule en función de la intensidad de corriente para diferentes temperaturas del hilo de cobre. La función $T_{exp}(I)$ se obtiene a partir de las medidas de voltaje e intensidad en combinación con la Ec. (3.7) (ver Sec. 3.3).

La potencia de refrigeración puede expresarse como:

$$P_R = C \rho_L c_e^L \Delta T, \quad (3.6)$$

donde C es el caudal constante que atraviesa el circuito, ρ_L y c_e^L son la densidad y el calor específico del líquido refrigerante, respectivamente y ΔT el incremento de temperatura que experimenta el líquido al atravesar el circuito en contacto térmico con la bobina. Existe un valor ΔT , por encima del cual el refrigerador no puede enfriar el líquido a la temperatura deseada, y la temperatura de salida aumenta. En la Fig. 3.4. la intersección de la función T_{exp} con las curvas a distintas temperaturas permite distinguir tres rangos de funcionamiento: 1) $I < 4$ A, donde la temperatura de equilibrio es aproximadamente la temperatura de salida del refrigerador, 2) $4 \text{ A} < I < 8 \text{ A}$, donde se alcanza una temperatura de equilibrio mayor a la temperatura salida, y 3) $I > 8 \text{ A}$, donde no hay equilibrio y la temperatura aumenta de forma indefinida.

3.3. El dispositivo experimental de prueba y el sistema de control

Las pruebas del dispositivo se han llevado a cabo utilizando el arreglo experimental mostrado en la Fig. 3.5. Para suministrar la intensidad de corriente

se ha utilizado una fuente AGILENT modelo N5700A que puede generar hasta una potencia de 1650 W y suministrar una corriente de hasta 10,5 A. La fuente está controlada por ordenador utilizando el protocolo GPIB (*General-Purpose Instrumentation Bus*) a través de una interfase GPIB-USB-HS de NATIONAL INSTRUMENTS y el paquete informático LABVIEW2010. El diagrama de bloques de la aplicación de LABVIEW2010 se muestra en la Fig. 3.6 resaltando el controlador del instrumento y la modificación añadida en este trabajo para la toma de datos. El campo magnético se mide con una sonda Hall portátil HIRST MAGNETIC INSTRUMENT modelo GM08-0571 que permite llegar a 3 T con una precisión de 10 Gauss. Para medir la temperatura exterior se utilizó un termopar y el dispositivo NI-9211 de National Instruments conectado al ordenador a través de un puerto Ethernet. La adquisición se realizó con el software LABVIEW2010 Signal Express DAQ. El panel superior de la Fig. 3.7 muestra la variación el voltaje en la bobina refrigerada en función del tiempo para diferentes valores de intensidad de corriente. La temperatura del hilo es

$$T(t) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{V(t)}{IR_0} - 1 \right) + T_0, \quad (3.7)$$

que se obtiene a partir de la ley de Ohm y la Ec. (3.5). La temperatura exterior medida con el termopar se muestra en el panel inferior de la Fig. 3.6 para una intensidad $I = 9$ A.

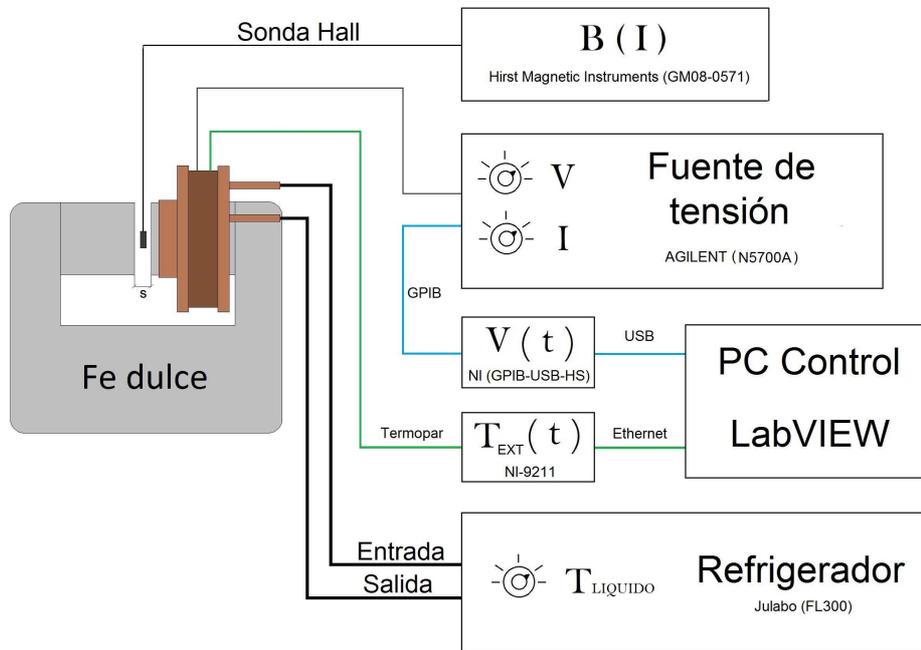


Figura 3.5: Esquema del dispositivo para las pruebas realizadas. La fuente de alimentación y el termopar están fijos en un rack estándar de 19 pulgadas.

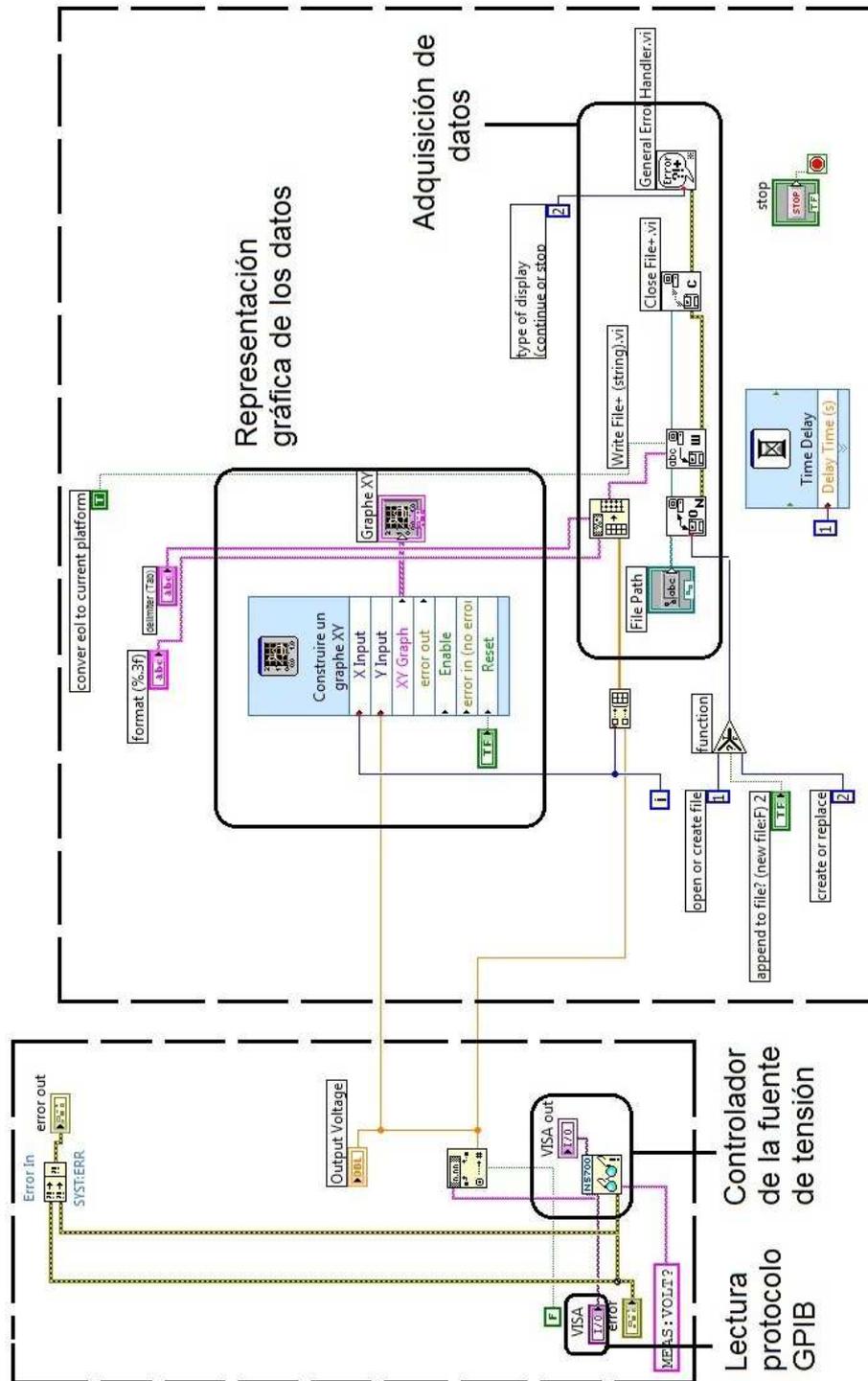


Figura 3.6: Diagrama de bloques de LabVIEW2010 para el control de la intensidad y la medida del voltaje en función del tiempo. Se marcan las funciones de los símbolos más representativos.

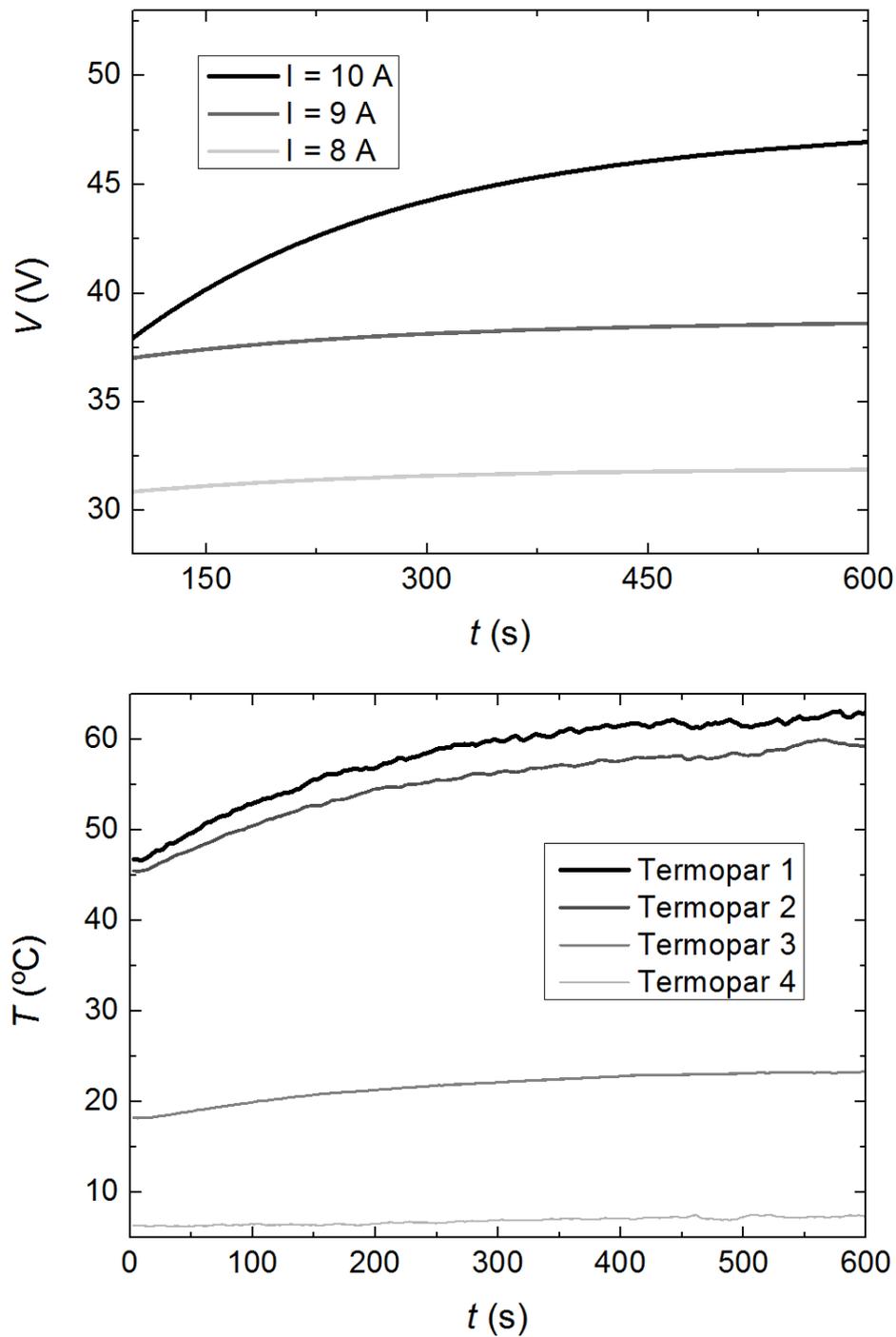


Figura 3.7: Panel superior: Medidas de voltaje en función del tiempo para intensidades de 8, 9 y 10 A. Panel inferior: Medidas de temperatura en distintas zonas de la bobina para una intensidad de 9 A utilizando 4 termopares. Los termopares 1 y 2 fueron colocados en distintas regiones del exterior de la bobina. El termopar 3 se colocó en el circuito de refrigeración, y el cuarto en el tubo de poliuretano de salida del líquido refrigerante de la bobina.

Prototipos de bobinas

Es importante mencionar que en el transcurso de este trabajo se han realizado tres prototipos de bobinas. En cada caso se efectuaron medidas de la temperatura exterior en función de la intensidad de corriente. Dichos prototipos se describen a continuación:

- **Prototipo 1** Se construyó una estructura de cobre de diámetro 120 mm y se realizó la bobina con hilo GOODFELLOW referencia CU005280 de 0,5 mm de diámetro. El número de espiras era alrededor de 600 y la refrigeración estaba basada en el contacto del aislante del hilo con la estructura de cobre, generándose un gradiente de temperatura hacia la zona de la bobina más alejada del circuito.
- **Prototipo 2** En un segundo prototipo, se realizó un bobinado por capas, esto es colocando entre capa y capa de hilo de cobre una lámina del mismo material que estuviera en contacto con la estructura de refrigeración de la bobina. Las medidas realizadas muestran una mejor refrigeración, pero el diámetro del hilo hace que la temperatura de éste sea elevada para valores bajos de corriente como se puede observar en la Fig. 3.8.

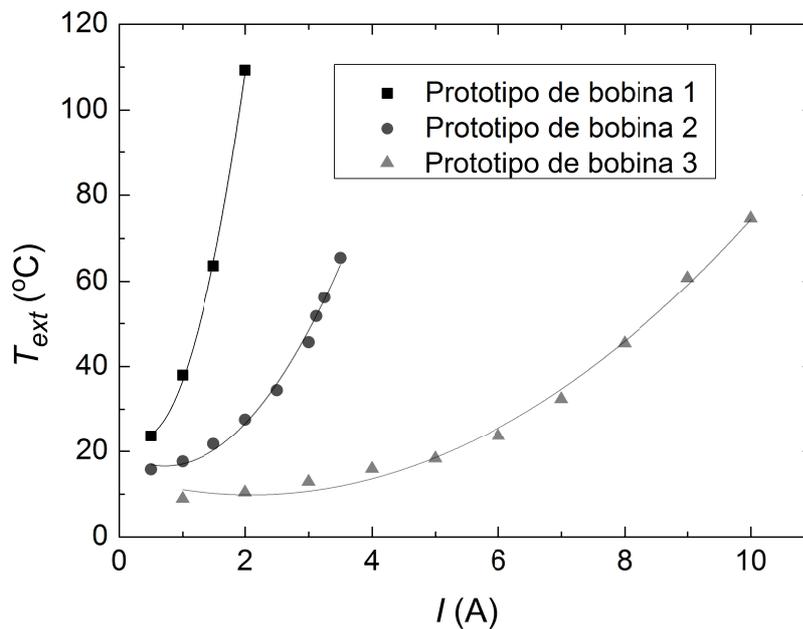


Figura 3.8: Valores de temperatura exterior de la bobina en función de la intensidad para diferentes prototipos de bobina. Las líneas corresponden a ajustes con polinomios de segundo grado.

- **Prototipo 3** El tercer prototipo de bobina tiene un diámetro total de 140 mm. El hilo de cobre ACEBSA HCG2 tiene un diámetro de 1 mm, y

un recubrimiento aislante de poliéster-inida modificado THEIC capaz de soportar una temperatura de $\sim 200^\circ\text{C}$. El número de espiras es alrededor de 420. La mejor refrigeración hace posible llegar a intensidades mayores y obtener un campo magnético máximo mayor.

3.4. Especificaciones técnicas

La primera versión del dispositivo, tiene unas dimensiones aproximadas de $20\text{ cm} \times 14\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ y sólo se ha probado con una bobina. El campo magnético se ha medido considerando separaciones entre los bloques de 6 y 10 mm.

Las medidas de resistencia R , voltaje V , temperatura del hilo de cobre T y temperatura exterior de la bobina T_{ext} para diferentes intensidades se muestran en la Tabla 3.1. El tiempo de medida se tomó de 15 minutos, tiempo necesario para alcanzar el equilibrio térmico para todos los valores de intensidad de corriente con excepción de 9 y 10 A. en estos casos se observa que el voltaje aumenta con un ritmo aproximado de 17 mV/min ($I = 9\text{ A}$) y 289 mV/min ($I = 10\text{ A}$). En la Tabla 3.1 también se muestran los campos magnéticos para una separación de 6 y 10 mm, y el tiempo máximo de utilización del dispositivo, definido en este trabajo como el tiempo necesario para que la temperatura del hilo de cobre llegue a 200°C . Por encima de este valor el aislante del hilo de cobre puede fundirse. La Fig. 3.9 muestra los datos de temperatura y campo magnético para distintas intensidades. El campo magnético máximo que puede generar el dispositivo con una sola bobina y utilizando el arreglo experimental de la Fig. 3.5 es 0,8 T. Dado que el sistema para este caso no alcanza el equilibrio, este valor de campo puede mantenerse durante aproximadamente 30 minutos. Si el sistema estuviese formado por dos bobinas, el campo magnético podría alcanzar hasta 1,6 T. No obstante, si se quiere mantener el sistema en equilibrio indefinidamente, el campo magnético máximo alcanzable es de 0,66 T (1 bobina).

3.5. El dispositivo final

Para completar el dispositivo que aquí se ha presentado son necesarios, además de la segunda bobina, la cámara de vacío, el circuito electrónico para la calibración del campo magnético y una estructura que permita el apantallamiento de la radiación no deseada. A continuación se presentan algunos aspectos relativos al diseño de estos componentes.

El sistema de vacío

La construcción de la segunda bobina se ha realizado de forma idéntica al prototipo de bobina 3 (ver Sec. 3.3). Una vez montada ambas bobinas con sus bloques, se cerrará la cámara de vacío de la forma mostrada en la Fig. 3.10. Las bridas deben soldarse a las bobinas pero manteniendo el circuito de refrigeración en el exterior. Las bridas deben ser de acero inoxidable (UGITECH

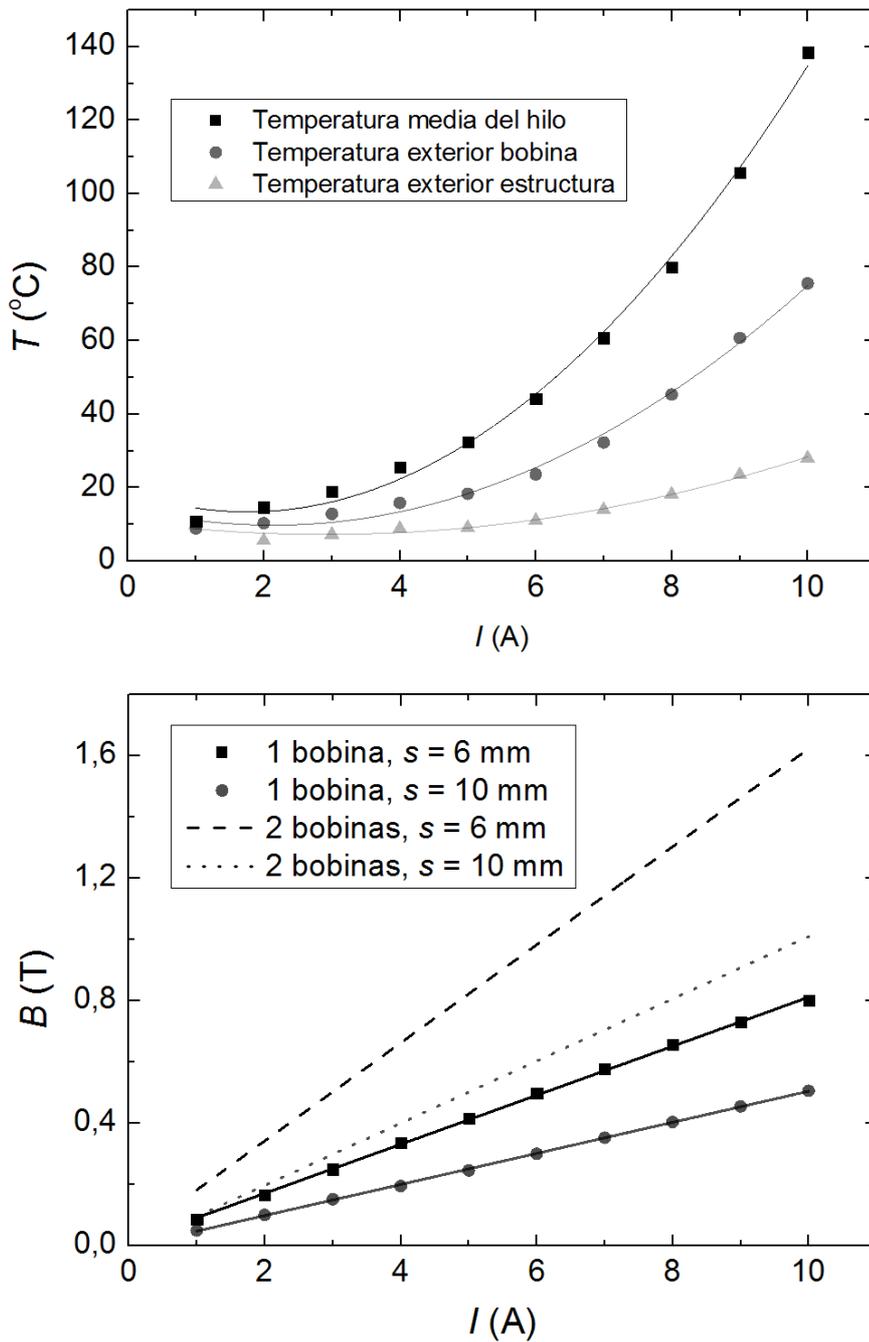


Figura 3.9: Panel superior: Temperatura media del hilo de cobre (medida indirectamente), temperatura exterior de la bobina y temperatura exterior de la estructura de cobre en función de la intensidad. Las líneas corresponden a ajustes de los datos realizados con polinomios de segundo grado. Panel inferior: Campo magnético para diferentes intensidades y dos distancias de separación de los bloques del circuito magnético. Medido para una bobina y extrapolado para dos bobinas (líneas discontinuas).

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas del dispositivo. El valor de tiempo máximo de operación continuada (Tpo. máx.) es aproximado. B_1 es el campo magnético cuando la separación es 6 mm. B_2 es el campo magnético cuando la separación es 10 mm.

I (A)	V (V)	R (Ω)	T ($^{\circ}C$)	T_{ext} ($^{\circ}C$)	B_1 (T)	B_2 (T)	Tpo. máx.
1	3,16	3,16	10,96	8,92	0,087	0,050	-
2	6,40	3,20	14,68	10,37	0,166	0,101	-
3	9,77	3,26	18,96	12,90	0,250	0,152	-
4	13,35	3,34	25,64	15,90	0,335	0,195	-
5	17,08	3,42	32,47	18,35	0,415	0,246	-
6	21,37	3,56	44,19	23,64	0,498	0,301	-
7	26,32	3,76	60,71	32,33	0,578	0,353	-
8	31,96	4,00	80,03	45,37	0,656	0,404	-
9	38,76	4,31	105,80	60,77	0,730	0,455	650 min
10	47,04	4,70	138,42	75,60	0,800	0,506	30 min

305-2) que presenta baja permmeabilidad magnética. Entre las dos bridas se colocará una cámara de vacío ISO-KF con siete puertos CF16 de entrada/salida para permitir la entrada y salida del haz de electrones y las conexiones eléctricas necesarias para el sistema de calibración. Para conseguir el vacío puede utilizarse bombas de una potencia media dado el volumen reducido y la necesidad de tan sólo alcanzar presiones en el orden de 10^{-6} mbar.

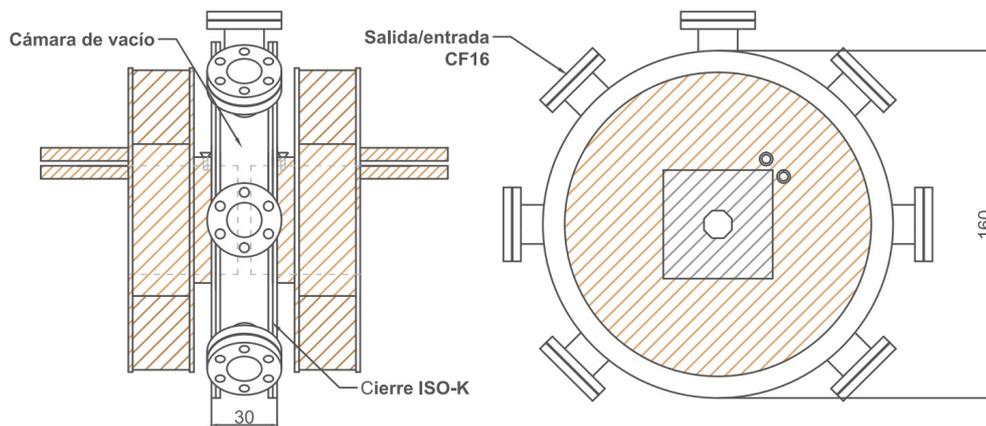


Figura 3.10: Dibujo técnico realizado con AUTOCAD201 del sistema de vacío montado sobre la estructura de cobre (marrón) de las bobinas y el bloque de hierro dulce (gris claro). Las dimensiones están en milímetros.

El sistema de calibración

Para realizar la calibración en energía se usará una trampa Penning [12] e iones

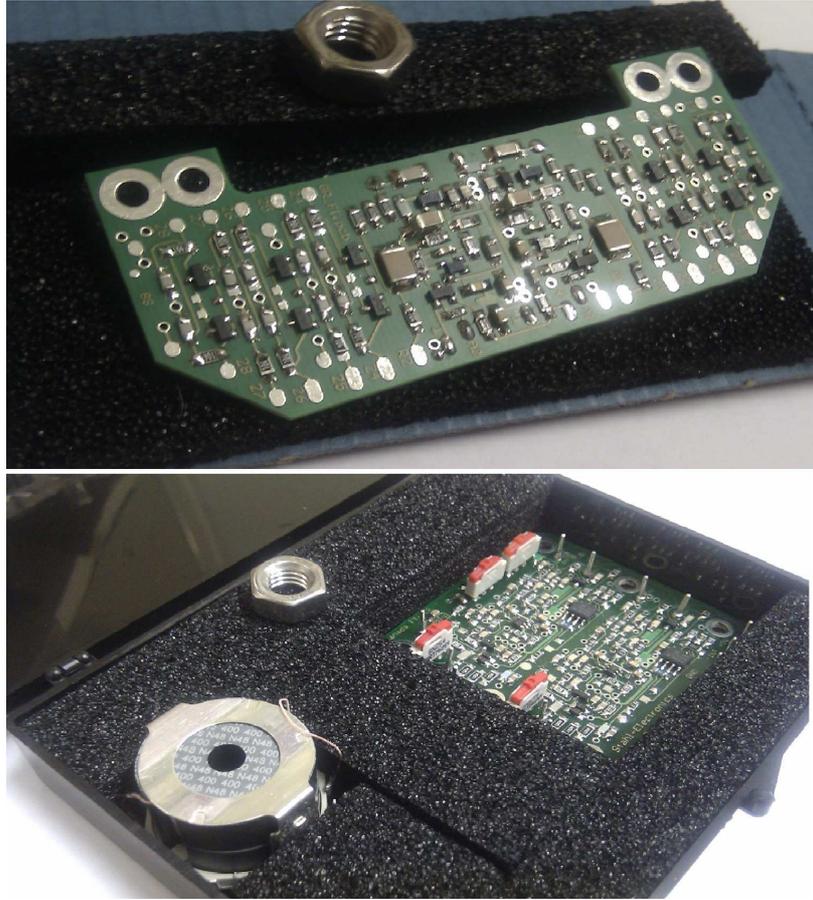


Figura 3.11: Foto superior: Amplificador y filtro que se acopla a la trampa en vacío. Foto inferior: Bobina para la detección de resonancias en banda estrecha. En este caso la bobina tiene una inductancia de forma que $\nu_c = 1/\sqrt{LC}$ con C la capacidad de los electrodos con respecto a tierra. En la foto también se muestra el amplificador externo. Circuitos construidos por la compañía Stahl Electronics[®].

de $^{40}\text{Ca}^+$. Esto permitirá medir el campo magnético con una precisión mayor y con ello la energía de los electrones. Para almacenar partículas cargadas en una trampa Penning es necesario un campo magnético \mathbf{B} y un campo eléctrico. El primero permite el confinamiento radial mientras que el segundo es necesario para el confinamiento axial. El campo magnético se determina a partir de la medida de la frecuencia ciclotrón siguiendo la expresión:

$$\nu_c = \frac{q_{ion}}{2\pi m_{ion}} B, \quad (3.8)$$

donde q_{ion} y m_{ion} son la carga y la masa del ión respectivamente. ν_c se determina utilizando la técnica FT-ICR, acrónimo de *Fourier-Transform Ion-Cyclotron Resonance* [13]. Esta técnica consiste en hacer la transformada de Fourier a la señal que inducen los iones atrapados en los electrodos de la trampa. En la Fig. 3.11 se muestran los circuitos electrónicos que se utilizarán para la detección de las corrientes inducidas en la Universidad de Granada. La prueba de este dispositivo y

su implementación son objetos del trabajo de tesis de J. M. Cornejo. Utilizando las Ecs. (2.8), (2.9) y (3.8) se obtiene la energía del haz de electrones:

$$E^2 = \left(\frac{mqRc}{q} \right)^2 (2\pi\nu_c)^2 + (m_o c^2)^2. \quad (3.9)$$

Los parámetros se han definido con anterioridad en el Cap. II.

Apantallamiento de la radiación

Diseñar y construir una estructura de apantallamiento de la radiación no deseada es fundamental como se observará a partir de los resultados obtenidos y mostrados en el Cap. IV. Es necesario utilizar plomo para absorber los fotones de radiación de frenado producidos por los electrones de la desintegración beta, en combinación con un elemento de bajo número atómico para absorber los electrones.

Capítulo 4

Producción de la fuente β en el CNA

Para utilizar el dispositivo descrito en el capítulo anterior es necesario una fuente β de alta intensidad y alto valor Q , esto último con el fin de poder acceder a energías altas. En este capítulo se describe la producción de dicha fuente en el Centro Nacional de Aceleradores (CNA) de Sevilla y las primeras pruebas realizadas con el dispositivo.

4.1. La sección eficaz de producción de ${}^8\text{Li}$

El núcleo elegido para la prueba del dispositivo es el ${}^8\text{Li}$ que se desintegra vía β^- de la forma



El ${}^8\text{Be}$ a su vez se desintegra de la forma



con un tiempo de vida media extremadamente corto (inferior a 1 ps). Por el contrario, el ${}^8\text{Li}$ tiene una vida media de $T_{1/2} = 838,4$ ms [8] y un valor Q de 16 MeV. Este radionúclido se produce a partir de la reacción $d({}^7\text{Li}, {}^8\text{Li})p$ que ha sido estudiada con anterioridad para energías de los deuterones de hasta 3 MeV [6]. La sección eficaz de producción es de aproximadamente 150 mb en el rango de energía de los deuterones de 0,8 a 2,2 MeV. En el trabajo presentado en la referencia [6], también se grafican los valores para energías inferiores a 0,4 MeV, región donde la sección eficaz no es constante. Para las pruebas presentadas en este trabajo, se fijaron dos valores para la energía de los deuterones, 2 y 4 MeV. Es importante hacer notar, que en estos casos y aunque se espera una sección eficaz constante de acuerdo a los resultados experimentales expuestos en la referencia [6], el aumento de energía de los deuterones favorece el transporte del haz en toda la línea y por tanto hace aumentar la producción del ${}^8\text{Li}$.

4.2. El acelerador tándem Van de Graaff de 3 MV

En un acelerador tándem, los iones se producen con estado de carga negativos fundamentalmente usando fuentes de *sputtering* que hacen incidir un haz de iones positivos de cesio, ya que éste tiene una afinidad electrónica muy baja. En el CNA de Sevilla existen dos fuentes de producción de iones: la fuente ALPHATROSS, que genera iones a partir de gases utilizando técnicas de radiofrecuencia, y la fuente SNICS II, que es una fuente de *sputtering* convencional. Los iones negativos que se producen en forma de haz continuo se aceleran hasta energías del orden de los keV y se inyectan en la línea del acelerador tras pasar por un conjunto de deflectores electrostáticos y un imán inyector. El proceso de aceleración se lleva a cabo en tres etapas que se muestran en la Fig. 4.1:

1. Los iones negativos son acelerados por campos electrostáticos.
2. Los iones pierden su carga negativa por colisión con moléculas de un gas a baja presión (*gas stripper*) y adquieren carga positiva.
3. Los iones positivos se aceleran de nuevo por medio del potencial electrostático positivo.

La energía de los iones en función del voltaje en el terminal viene dada por:

$$E_{max} = V_T(n + 1), \quad (4.3)$$

donde V_T es el voltaje del terminal, y n la carga electrónica que en el caso de deuterones es 1.

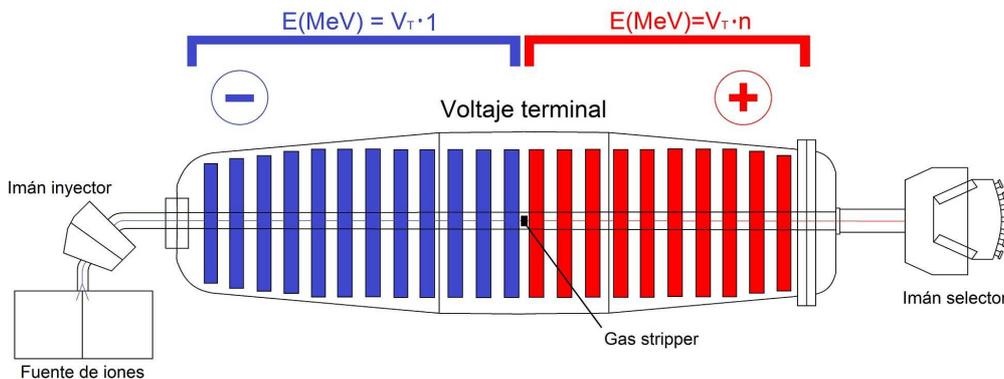


Figura 4.1: Esquema del acelerador tándem Van de Graaff de 3 MeV del CNA. En la figura se indican las tres etapas en el proceso de aceleración.

4.3. La línea de Física Nuclear Básica

Después del acelerador, un imán (ver Fig. 4.1) desvía el haz hacia las distintas líneas experimentales. El transporte hacia la línea de Física Nuclear Básica se realiza a través de otro imán llamado imán selector (*switching magnet*). La línea

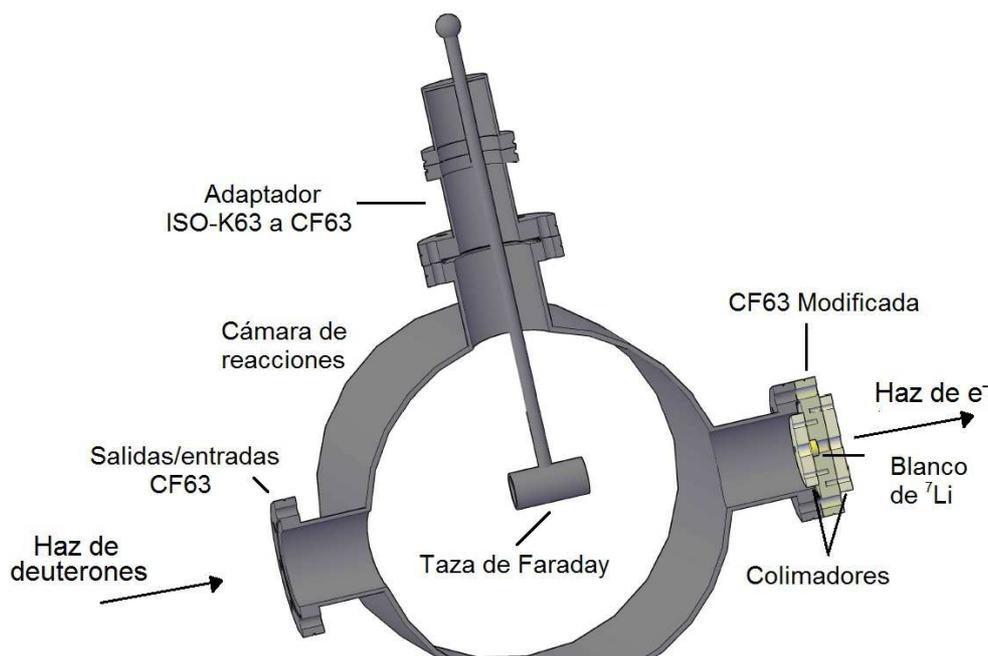


Figura 4.2: Colocación del blanco de ${}^7\text{Li}$ al final de la línea de Física Nuclear Básica.

de Física Nuclear Básica tiene una longitud aproximada de 4 m, el centro del tubo de vacío está a una altura de 1,25 m sobre el suelo y la presión en el interior después de sellar la línea y de poner en funcionamiento las bombas de vacío es de 10^{-6} mbar. En la línea se sitúan diferentes elementos entre el imán selector y la llamada cámara de reacción donde se produce el ${}^8\text{Li}$: una válvula de guillotina que permite aislar la línea del resto del tándem, un dispositivo BPM (*Beam Profile Monitor*) para medir el perfil del haz, dos deflectores (*steerers*) para desviar el haz en las direcciones X e Y , y un segundo BPM para una monitorización del haz antes de producir la reacción en el blanco.

La cámara de reacciones se muestra en la Fig. 4.2. En la parte central hay 4 puertos CF63 y en los extremos dos aperturas CF250. En la parte superior de la cámara se montó una taza de Faraday móvil para medir la intensidad del haz de deuterones antes de incidir en el blanco de Li, con una abundancia isotópica natural. El blanco tiene geometría cilíndrica con un diámetro de 12,5 mm y un espesor de 5 mm. Tal como se observa en la Fig. 4.2, el blanco está montado en una brida CF63 de aluminio, entre dos colimadores de acero de 10 mm de espesor con el fin de frenar el haz de deuterones. El diámetro de cada colimador es de 10 mm.

La reacción conlleva a la desintegración (4.1). Los electrones dejan el blanco isotrópicamente y sólo perderán una pequeña cantidad de energía al pasar por la brida de aluminio. Ésta se mecanizó para que el espesor fuese de $500\ \mu\text{m}$ en una superficie igual a las dimensiones del blanco. Este espesor tan pequeño

permite mantener una diferencia de presión de nueve órdenes de magnitud entre el interior de la cámara y el exterior.

4.4. El sistema de detección y adquisición de datos

El sistema de detección está compuesto por un plástico centelleador BC400 de SAINT GOBAIN, acoplado a una guía de luz también de SAINT GOBAIN y un fotomultiplicador HAMAMATSU modelo XP2020. Los centelleadores plásticos presentan una alta eficiencia para electrones y tienen la ventaja de poder usarse a presión atmosférica. El sistema de detección integrado en el conjunto del dispositivo se presenta en la Fig. 4.3. El sistema de detección se montó en una estructura de aluminio construida específicamente para este experimento con el fin de evitar la entrada de luz no deseada en los detectores. Los planos técnicos se presentan en el Apéndice A.

La señal del fotomultiplicador se conecta directamente a una entrada en el sistema de adquisición. Éste permite la amplificación de la señal y el filtrado de la misma con una interfaz muy sencilla (ver Apéndice B). Se trata de un módulo digitalizador ultrarrápido llamado FASTER [12] diseñado y construido en el laboratorio francés LPC (*Laboratoire de Physique Corpusculaire*) en Caen [8]. La tarjeta de adquisición consiste en una placa madre unida a otra llamada hija. La primera está conectada a través de Ethernet con una capacidad de transmisión de 1Gbit por segundo al ordenador portátil que trabaja en el sistema operativo Linux. La comunicación entre ambas placas se realiza a través de un bus local. El pulso digital originado a partir de la señal se integra para obtener la carga con un QDC (*Charge-to-Digital Converter*) cuya programación se ha realizado con una tarjeta FPGA (*Field-Programmable Gate Array*). En el experimento llevado a cabo en el CNA la señal de entrada se muestreó con una velocidad de 500 MHz y se codificó con 12 bits la señal de pulso. El umbral, programado desde la interfaz con el usuario, era de unas decenas de mV. La ventana de tiempo utilizada para la recogida de la señal de pulso es de 60 ns, y el tiempo muerto del sistema de 8 nanosegundos. Para la integración de carga se elige una ventana de 10-20 ns que engloba el pulso.

Para la medida con el dispositivo construido en este trabajo utilizando los electrones provenientes de la desintegración del ^8Li , se implementó un ciclo de activación-medida; esto es, *beam ON* durante 3 s y *beam OFF* durante 7 s. Dado que la vida media del ^8Li es inferior a 1 s, el tiempo de ausencia del haz evita radiación no deseada en el detector y puede identificarse el ^8Li a partir de una medida del tiempo de vida media, tal como se hizo en la Ref. [8] donde se redefinió la medida más precisa de la vida media del ^8Li . Para poder pulsar el haz del acelerador se utilizó un interruptor rápido *push-pull* de BEHLKETM conectado a uno de los deflectores a la salida de la fuente de iones del acelerador. El deflector se pulsó entre valores de 0 (3 s) y 1,5 kV (7 s). La Fig. 4.5 muestra el número de cuentas en función del tiempo cuando el voltaje del terminal era de 2 MV. Puede observarse claramente la estructura temporal de haz.

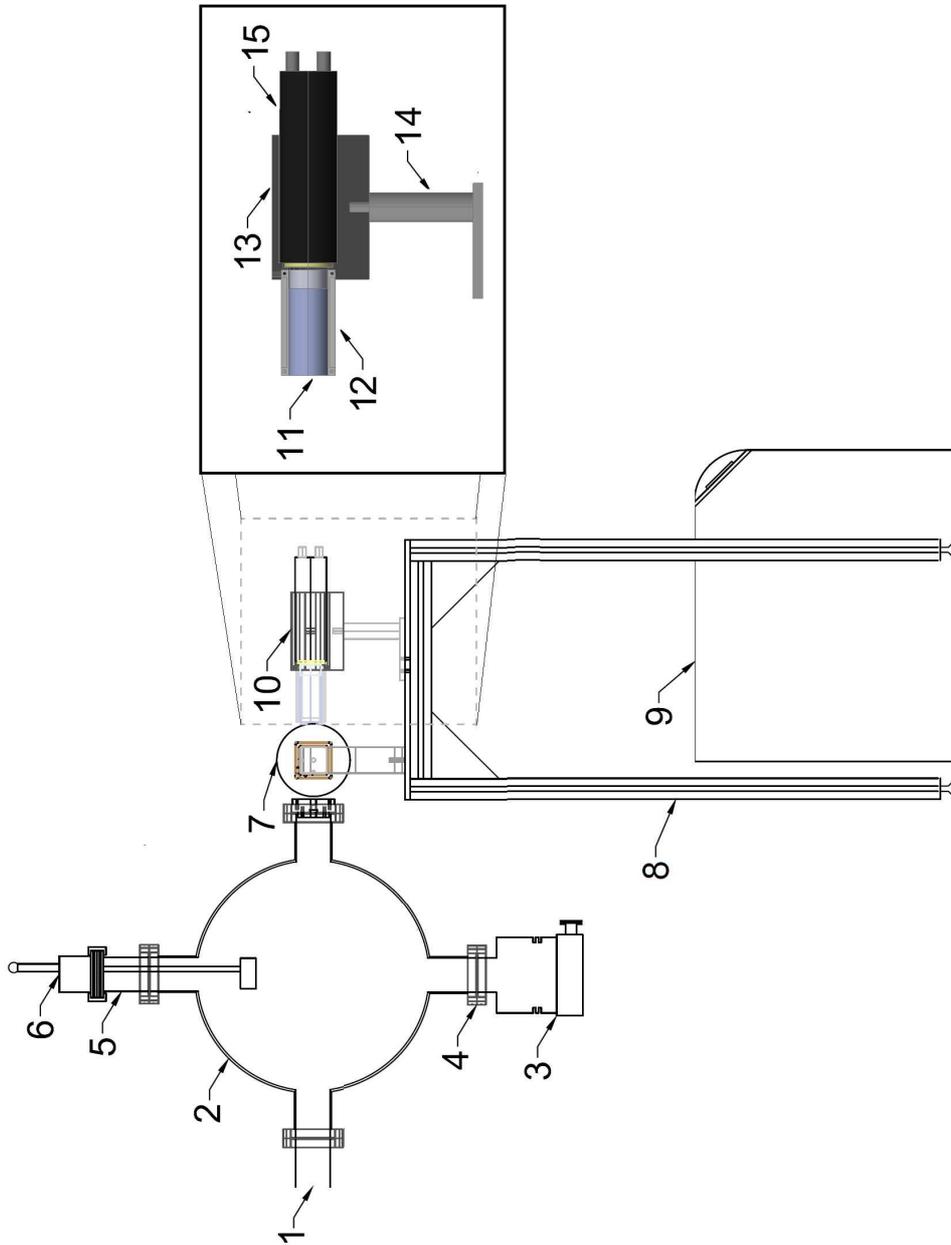


Figura 4.3: Dibujo técnico en AUTOCAD2011 del dispositivo experimental en el CNA: 1) Final de la línea de Física Nuclear Básica; 2) Cámara de reacciones; 3) Bomba de vacío; 4) Puerto CF63 de la cámara de reacciones; 5) Adaptador K/CF 63; 6) Taza de Faraday; 7) Bobina del dispositivo; 8) Estructura de soporte; 9) Refrigerador; 10) Sistema de detección; 11) Plástico centelleador y guía de luz; 12) Cubierta del centelleador y la guía de luz; 13) Cubierta del fotomultiplicador; 14) Soporte del fotomultiplicador; 15) Fotomultiplicador.

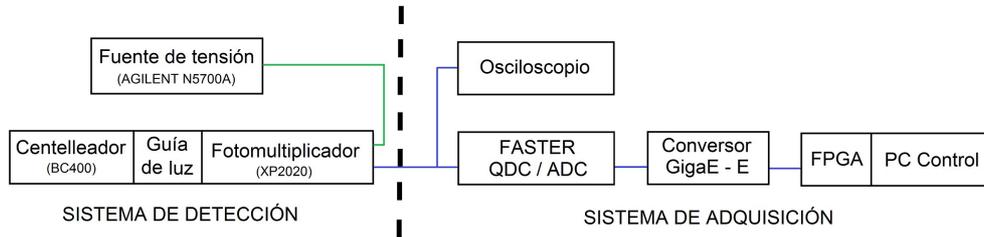


Figura 4.4: Esquema del sistema de detección y adquisición utilizado en el experimento del CNA.

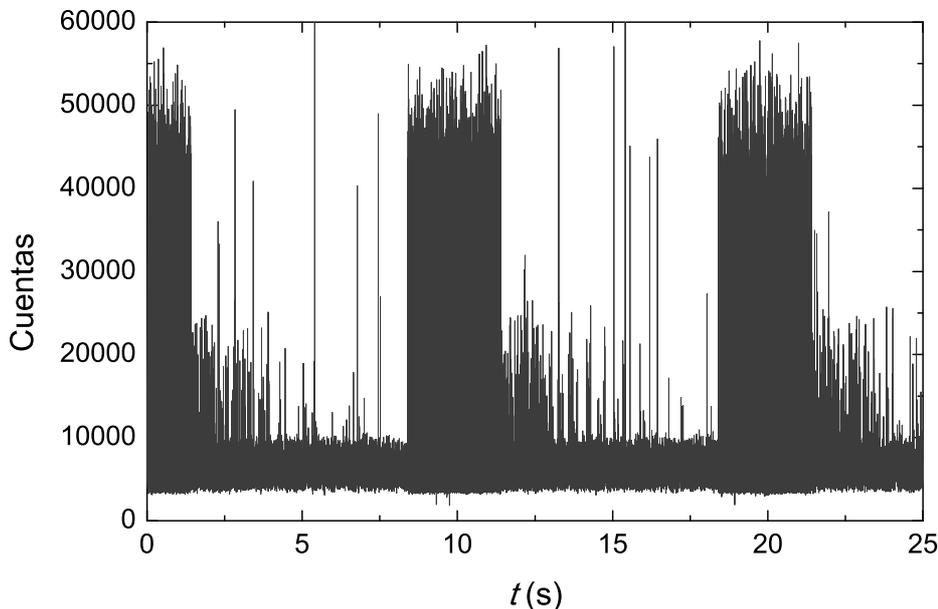


Figura 4.5: Señal detectada en función del tiempo. El haz del acelerador está pulsado: 3 s *ON* y 7 s *OFF*.

La intensidad que circulaba por la bobina del dispositivo se modificó desde la sala de control utilizando la aplicación mostrada en el Cap. III.

4.5. Resultados preliminares

El experimento al que aquí se hace referencia tuvo lugar en Mayo de 2011 y duró 4 días. Durante los tres primeros días se llevaron a cabo, con el sistema mostrado en la Fig. 4.3, medidas de la vida media del ^8Li con el fin de mejorar la precisión obtenida en el experimento previo [8]. El último día de experimento se centró en las medidas del espectro de ^8Li utilizando el campo magnético generado con el dispositivo descrito en el capítulo anterior. El dispositivo mostrado en la Fig. 4.3 hubo de modificarse para las medidas que se describirán a continuación debido a la detección, con la configuración expuesta, de una gran

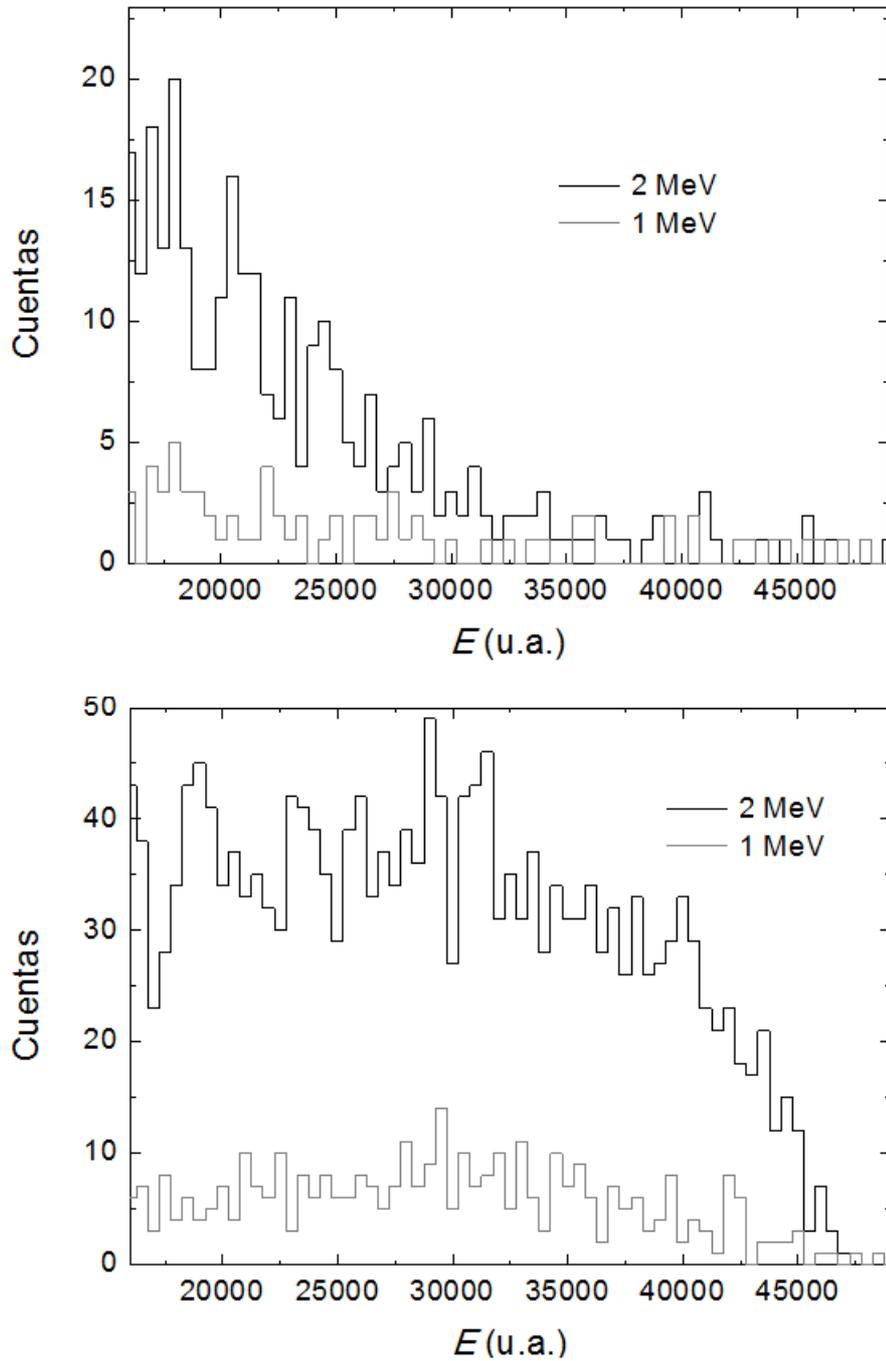


Figura 4.6: Panel superior: Espectro β del ^8Li en ausencia de campo magnético para dos valores de voltaje en el terminal del tándem. Panel inferior: Espectro β del ^8Li en presencia de una campo magnético de 0,66 T para dos valores de voltaje en el terminal del tándem.

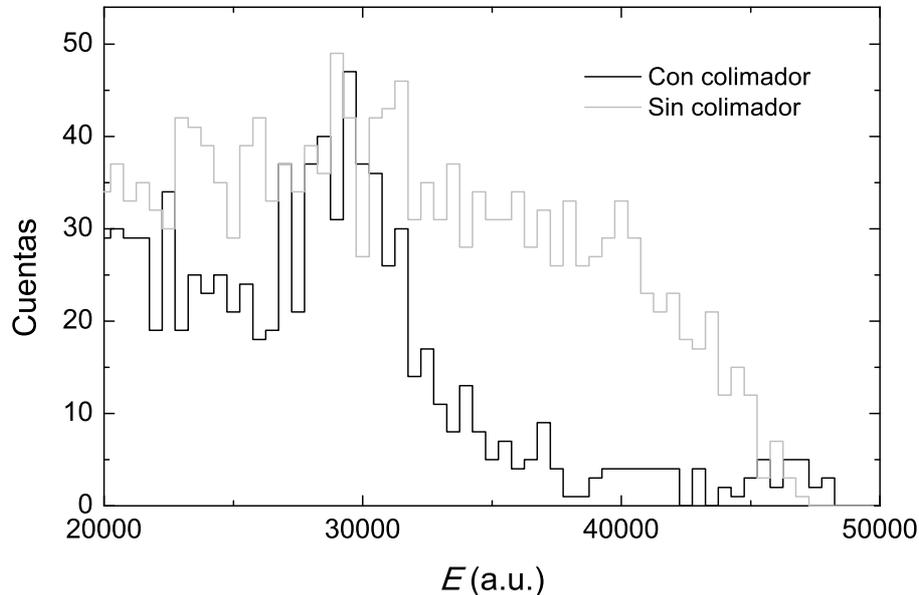


Figura 4.7: Comparación de dos espectros de ^8Li en presencia de un campo magnético de 0,66 T para dos situaciones: a) sin colimador y b) con un colimador a la salida del dispositivo. El voltaje del terminal se fijó en 2 MV.

cantidad de radiación no deseada.

En este primer experimento no existían elementos en el dispositivo de electroimanes para evitar la radiación no deseada. Por ello el sistema de detección mostrado en la Fig. 4.3 detrás de la cámara de reacción, se desplazó aproximadamente 30 cm con respecto a la brida donde se colocó el blanco, se orientó 90 grados con respecto a esta configuración inicial y se desplazó otros 30 cm en la dirección perpendicular a la de la línea. En estas condiciones se colocaron bloques de plomo y un volumen de agua para el apantallamiento de la radiación no deseada y una vez reducida la señal de este tipo en el detector, se realizaron medidas sistemáticas del espectro de carga en el detector para dos valores en el terminal del tándem de 1 y 2 MV. En cada caso se midió el espectro de carga para valores de intensidad de corriente entre 0 y 10 A, para producir los campos magnéticos indicados en la Tabla. 3.1. En el panel superior de la Fig. 4.6 se muestra el espectro de carga cuando no se aplicó ningún campo magnético para los dos valores del terminal en el tándem. En el panel inferior de la figura se muestra el espectro de carga cuando se aplicó una intensidad de 8 A a la bobina. En este caso puede observarse que el número de cuentas aumenta indicando que un mayor número de electrones llega a la superficie del detector como consecuencia de aplicar el campo magnético. Aunque no hay ninguna resolución en energía, sí pudo observarse una correlación entre el número de cuentas, la forma del espectro y el valor del campo magnético. También se invirtió la polaridad de

corriente y con ello el sentido del campo magnético. En estas condiciones la señal en el detector era muy débil, similar a la señal obtenida cuando la corriente es 0 A.

Un aspecto importante que puede observarse en las figuras es el número de cuentas registradas. Se observa que la intensidad del haz aumenta considerablemente al aplicar un voltaje al terminal de 2 MV con respecto al caso de 1 MV. El tiempo de medida para cada intensidad de corriente en las bobinas fue incluso mayor con $V_T = 1$ MV (5 minutos) comparado con $V_T = 2$ MV (3 minutos). Para los espectros mostrados en la Fig. 4.6, la relación entre el número de cuentas es de un factor 4 en ausencia de campo magnético y de 5-6 en presencia del campo.

Finalmente, se realizó una medida colocando un colimador de 2 mm de diámetro en el dispositivo. El haz que entra en la región de campo magnético sin estar colimado, encuentra un colimador a su salida a 90 grados. El resultado (número de cuentas) puede verse en la Fig. 4.7, donde se observa el pico en el espectro. La baja resolución se debe a que sólo se colocó un colimador a la salida del haz y con un diámetro de 2 mm. Mejores resoluciones por tanto pueden esperarse con respecto a la mostrada en este figura y forma parte del trabajo que debe realizarse que también incluye el apantallamiento de la radiación no deseada.

Esto presenta un problema desde el punto de vista de la producción, ya que son necesarios tiempos largos para la medida si el tándem funciona a 2 MV a pesar de utilizar un blanco de un espesor considerable, lo que sugiere la posibilidad de hacer dichas pruebas con un acelerador de uso clínico debido a la alta intensidad. Utilizar una fuente de muy alta actividad como la de la instalación del CENBG descrita en el Cap. II, tiene la desventaja del bajo valor Q .

Capítulo 5

Conclusiones

El trabajo que se ha presentado muestra el primer prototipo de un sistema de electroimanes construido para su uso como fuente de electrones monoenergéticos de hasta varios MeV de energía. Este prototipo es la parte fundamental que permitirá construir el dispositivo final. Esto se está llevando a cabo en el laboratorio de investigación del departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Granada. El campo magnético generado por el dispositivo tendrá un valor máximo de 1,6 T si se utilizan dos bobinas, lo que permitirá obtener haces de electrones de energías de hasta 16,3 MeV si el radio de curvatura es 3,5 cm. La resolución para esta energía sería $\sim 0,4$ MeV (2,5 %) si el diámetro del colimador de salida es 1 mm. Esta resolución es mejor que la que provee un detector de centelleo, típicamente de 10 %.

En este trabajo se ha resuelto un problema esencial que es evitar el calentamiento de las bobinas. La intensidad aplicada a éstas para generar el campo magnético produce calor por efecto Joule, aumentando la temperatura del hilo de cobre. El sistema de refrigeración construido y el mejor contacto térmico entre las distintas partes de la bobina permite trabajar hasta con 8 A de corriente sin limitación en el tiempo de aplicación. Trabajar a 10 A, es posible pero sólo hasta 30 minutos de forma continua. El uso de un refrigerador de mayor potencia existente en el mercado sí permitiría trabajar un tiempo ilimitado a la máxima corriente.

Como fuente β para hacer las primeras pruebas se ha tomado ^8Li por su alto valor Q y su vida media ligeramente inferior a un segundo. Los resultados preliminares obtenidos en el experimento realizado en el CNA en Sevilla, muestran el funcionamiento del dispositivo cuando se aplica un campo magnético. En este experimento también se ha podido observar el efecto de colocar un colimador, si bien la resolución en energía es muy pobre. Esto es fundamentalmente debido a que el haz no estaba colimado a la entrada del dispositivo. Colocando un segundo colimador permitiría mejorar la resolución, aunque reduciría el número de cuentas. Este último aspecto puede mejorarse si el tándem se hace funcionar a 3 MV.

Del experimento también se concluye la necesidad de diseñar un sistema de apantallamiento para la atenuación de la radiación no deseada. En este experimento se utilizaron bloques de plomo y un volumen de agua. Este problema se abordará con simulaciones utilizando GEANT4.

Otros paquetes informáticos como MAGNUM y SIMION v8.0, se utilizan actualmente para la optimización final del circuito magnético en 3D y para modelar una trampa Penning, respectivamente. Ésta permitirá la medida del campo magnético a partir de la frecuencia ciclotrónica de un conjunto de iones almacenados. En estos momentos se están llevando a cabo también los trabajos relacionados con el sistema de vacío. En este punto ya existe tal como se ha presentado un diseño conceptual.

Apéndice A

Dibujos técnicos

En este apéndice se muestran los dibujos técnicos de los elementos diseñados para el soporte y fijación del sistema de detección a la estructura de ITEM[®] colocada al final de la línea de Física Nuclear Básica para el experimento realizado en el CNA en Sevilla en Mayo del 2011. Es importante mencionar que en este trabajo no se exponen los planos de los electroimanes y elementos asociados debido a que forman parte de una solicitud de patente.

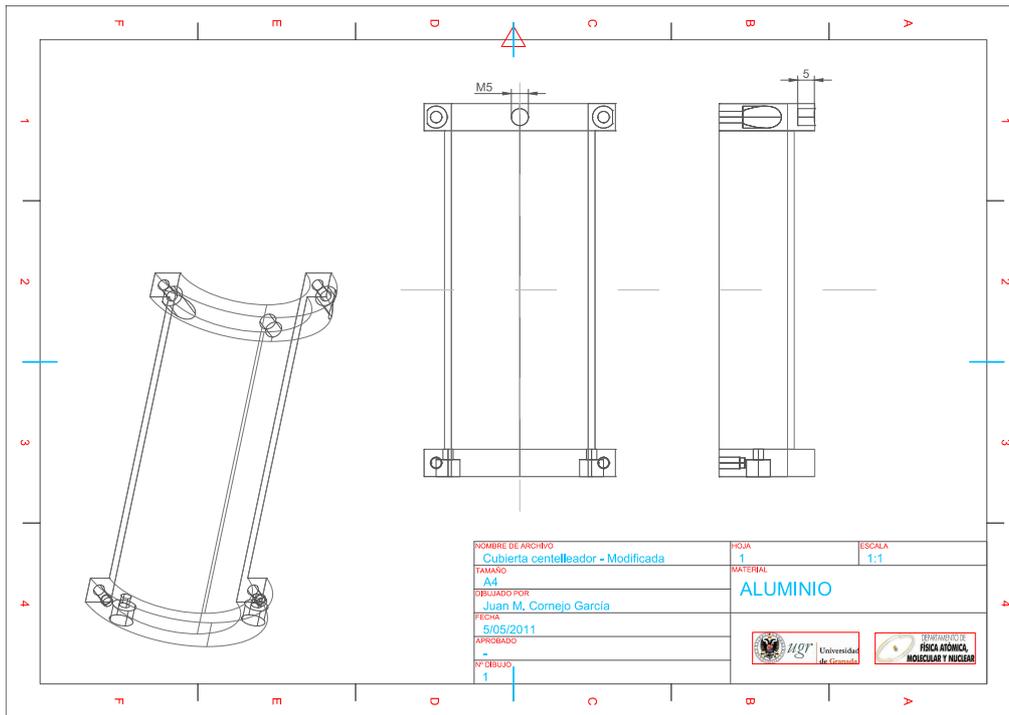


Figura A.1: Modificación de la estructura que cubre el plástico centelleador.

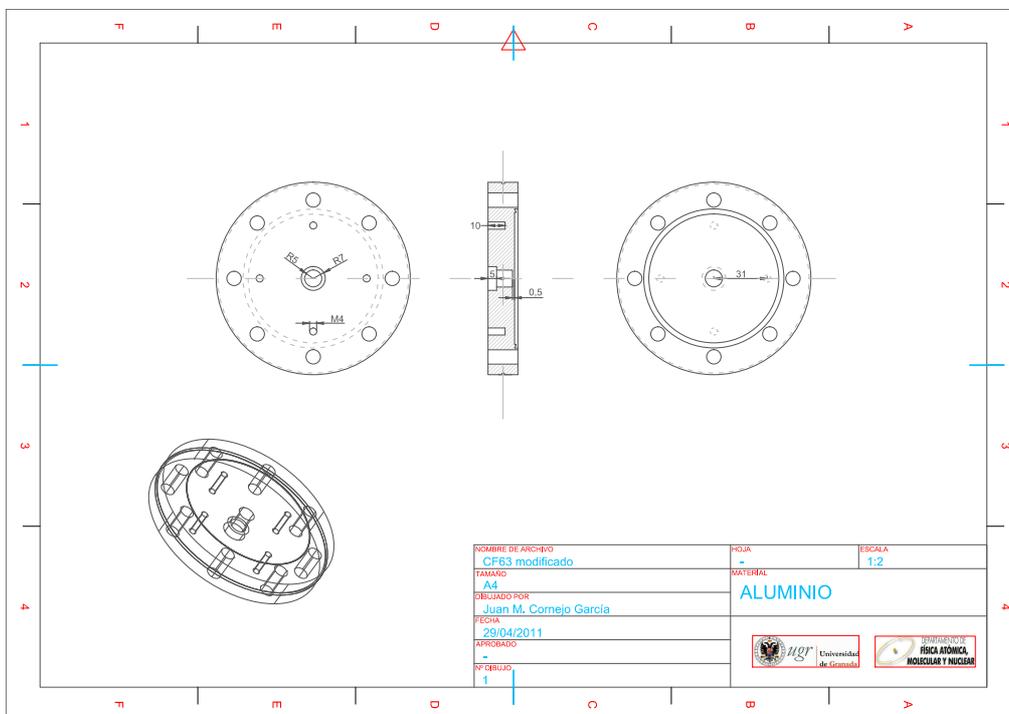


Figura A.2: Brida CF63 modificada para posicionar y fijar el blanco de ${}^7\text{Li}$ en la línea de Física Nuclear Básica.

Apéndice A. Dibujos técnicos

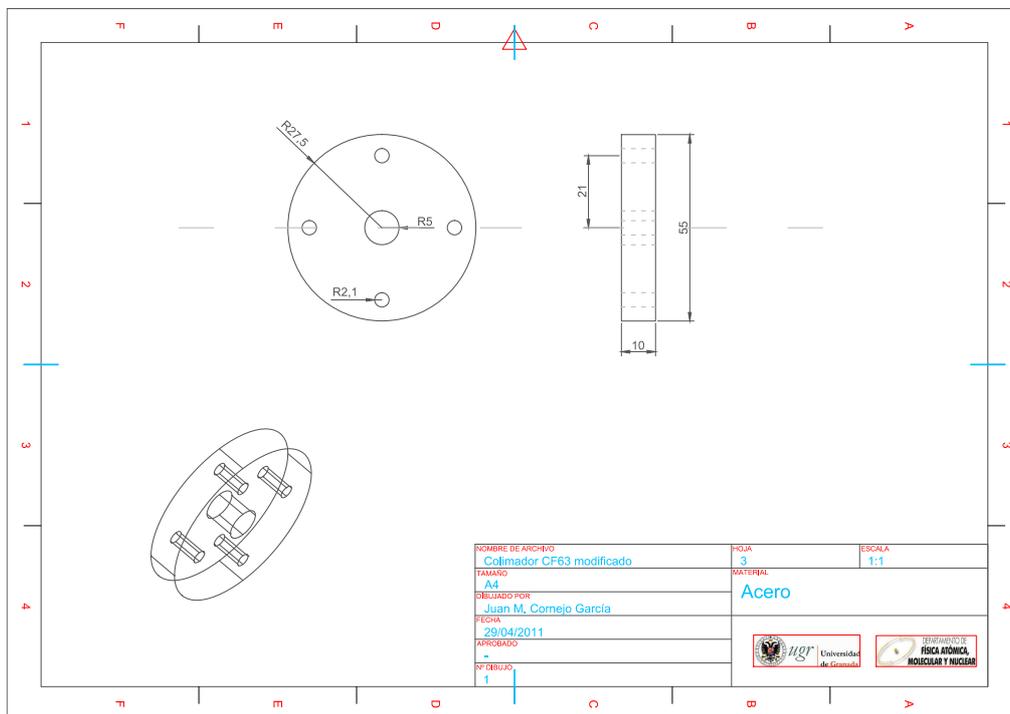


Figura A.3: Posicionamiento del blanco en la brida CF63 modificada.

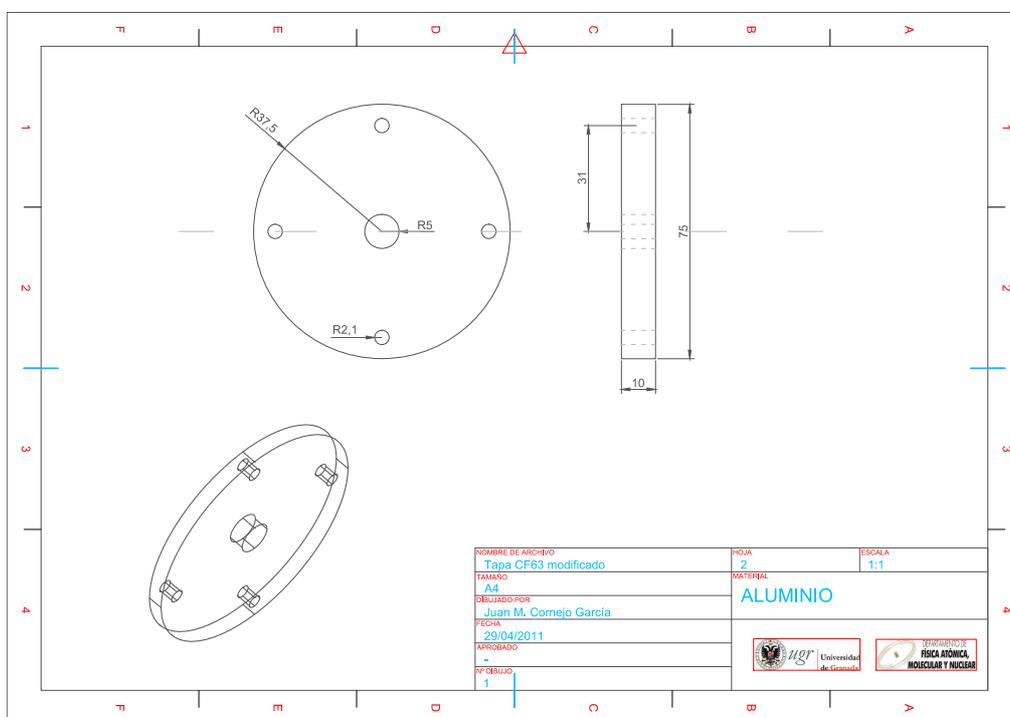


Figura A.4: Colimador para el haz de partículas β que salen del blanco después de producirse la reacción.

Apéndice A. Dibujos técnicos

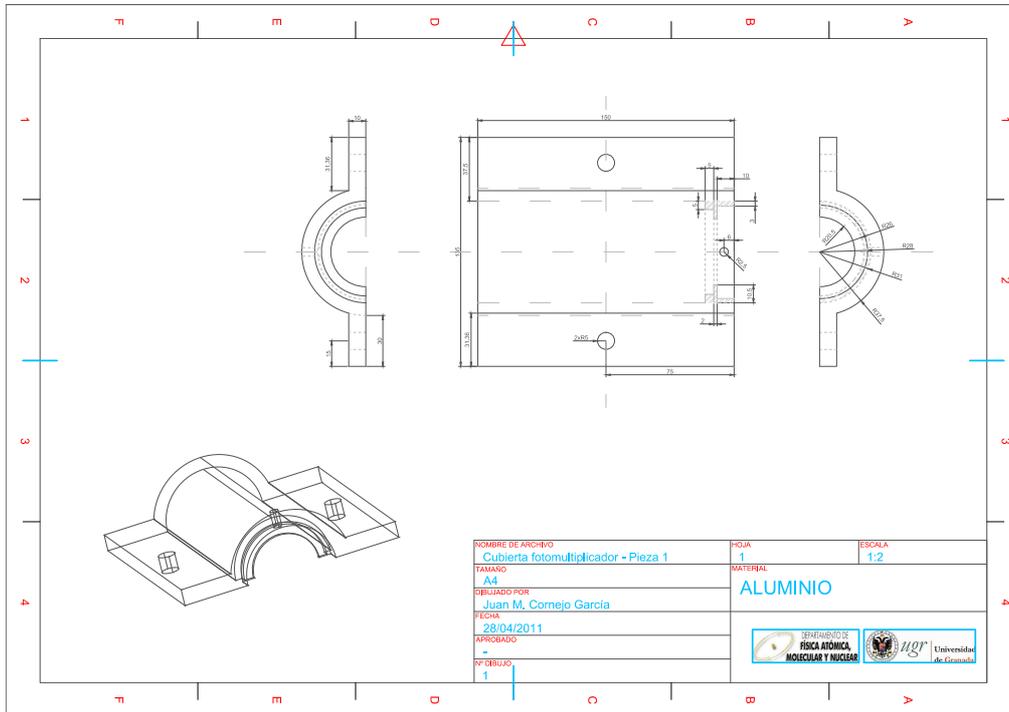


Figura A.5: Parte superior de la estructura para el soporte del fotomultiplicador.

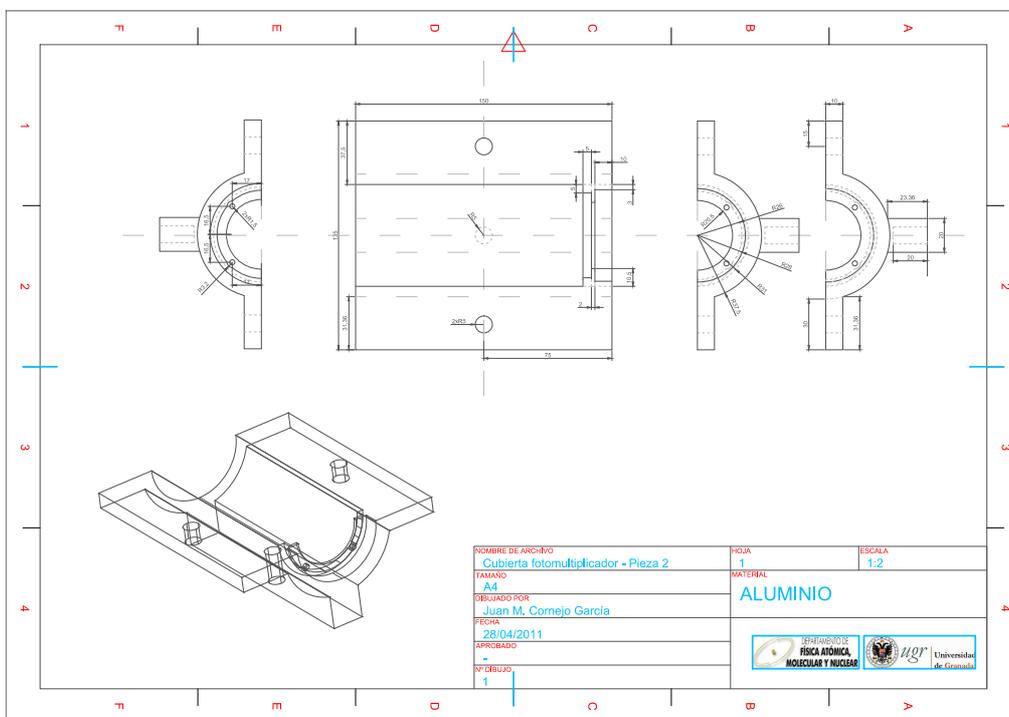


Figura A.6: Parte inferior de la estructura para el soporte del fotomultiplicador.

Apéndice A. Dibujos técnicos

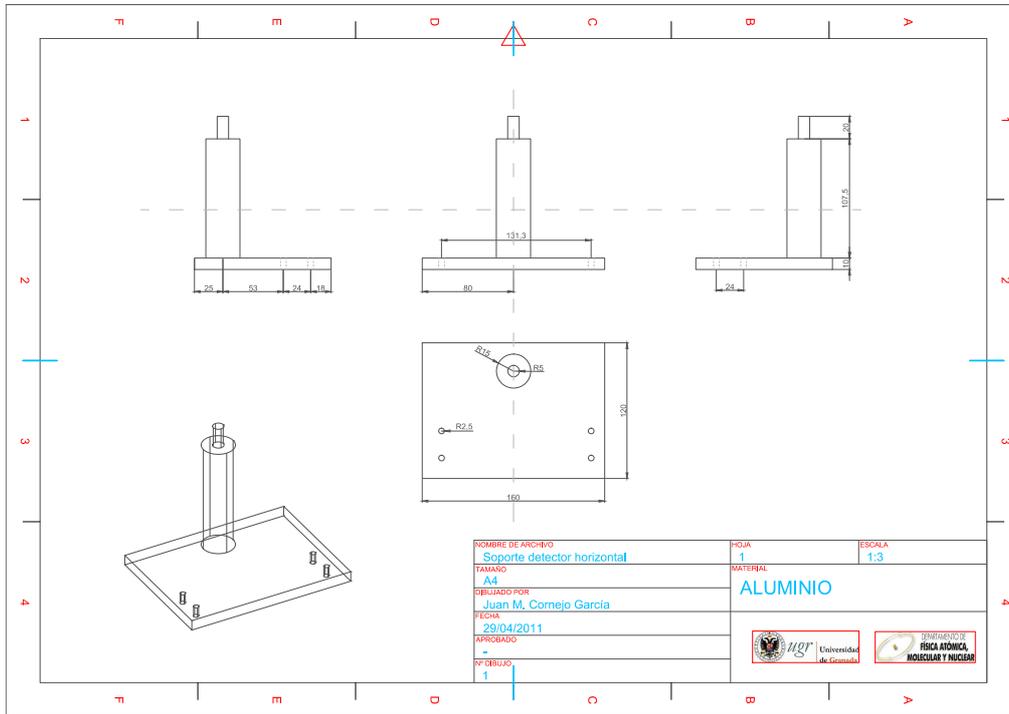


Figura A.7: Estructura para orientación horizontal del detector.

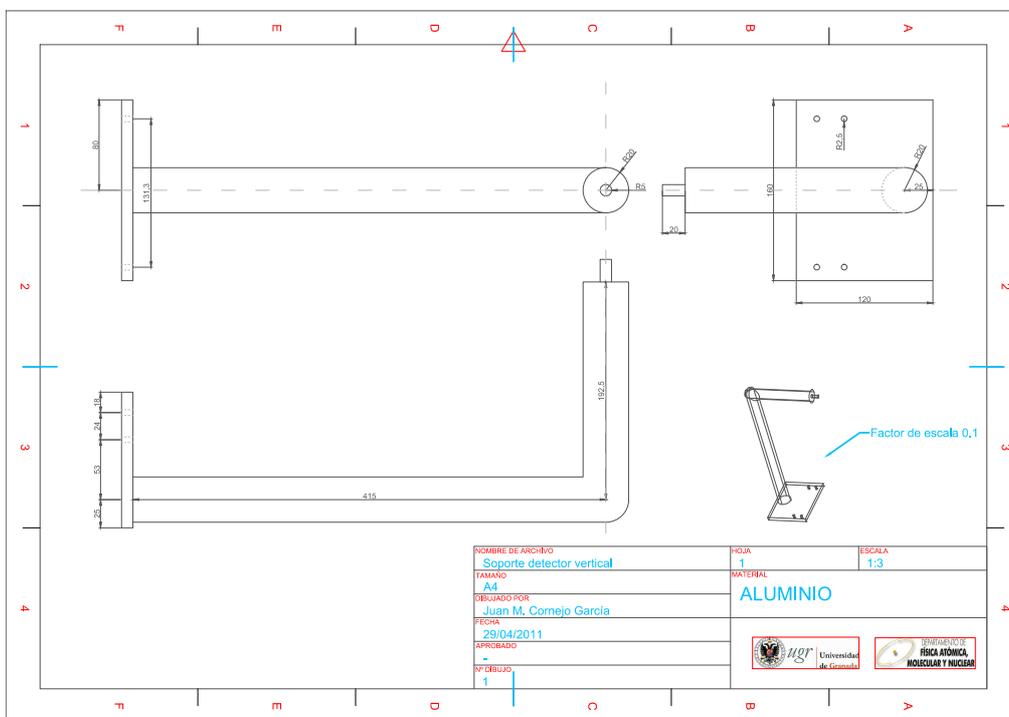


Figura A.8: Estructura para orientación vertical del detector.

Apéndice B

Interfaz del sistema de adquisición FASTER

El sistema de adquisición FASTER ofrece una interfaz al usuario muy fácil de usar. La aplicación permite salvar datos de entrada en dos canales (Fig B.1). En cada canal se puede salvar la señal de pulso correspondiente a la energía depositada por una partícula individual en el detector, y a partir de ésta la carga total. También se recoge el tiempo respecto a un *trigger* externo. Existen diferentes opciones que permiten definir los distintos parámetros que se muestran en la Fig. B.2.

DATA ACQUISITION

Storage file prefix test_run

Comment

CHANNEL 1 QDC States Sampling

CHANNEL 2 QDC States Sampling

START

No Storage DAQ Visu cnt = 216730 data

[Switch to Setup](#)

Figura B.1: Ventana de opciones del programa de adquisición para el almacenamiento de datos.

CHANNEL 1 SETUP

INPUT Electrical Offset (mV) Inverter

BLC Output BLR Thres(mV) Gate (ns) Fc 157 KHz

SHAPER Amplifier X1 Filter OFF

TRIGGER Type THRES Input Filter Single mode
Threshold (mV) Validation 2 ns

QDC Type Qx2 Input Filter Labels : Q State
Q1 (samp) Q2

SAMPLING Input Trigger No Trig Average Label :
2 ns/pt 650 pts T. point 16 ns

VISU OUTPUT QDC States Sampling 5 Hz

more

Figura B.2: Ventana con opciones de adquisición y visualización. Es posible definir con FASTER hasta cuatro ventanas de integración para la señal de carga.

Bibliografía

- [1] R. Ray and J.L. Rosen 1988 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **273** 13
- [2] J.O. Deasy *et al* 1994 *Med. Phys.* **21** 1703
- [3] <http://www.cenbg.in2p3.fr/spip.php>
- [4] X. Flécharde *et al* 2011 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **38** 055101
- [5] P.R. Almond, P. Andreo, O. Mattson, A.E. Nahum and M. Roos 1997 *IAEA Technical Report Series 381* (Vienna: International Atomic Energy Agency)
- [6] S. Bashkin 1954 *Phys. Rev.* **95** 4
- [7] M. Galeazzi *et al* 2000 *Phys. Rev. C* **63** 014302
- [8] X. Flécharde *et al* 2010 *Phys. Rev. C* **82** 027309
- [9] H.M. Agnew 1950 *Phys. Rev.* **77** 655
- [10] C.S. Wu *et al* 1952 *Phys. Rev.* **87** 1140
- [11] A. López 2005 *Influencia de la contaminación de Electrones en la Dosimetría de Haces de Fotones de Uso Clínico*, Tesis Doctoral, Universidad de Granada
- [12] K. Blaum 2006 *Phys. Rep.* **425** 1
- [13] M.B. Comisarow and A.G. Marshall 1973 *Chem. Phys. Lett.* **25** 282
- [14] <http://intra.sav.us.es:8080/cna/>
A. Ferrer 2006 *"Física Nuclear y de Partículas"* Publicacions de la Universitat de València
X. Ortega *et al* 1994 *"Radiaciones ionizantes: Utilización y Riesgos"* Edicions UPC

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría destacar que la realización de este trabajo de investigación no hubiera sido posible sin la dirección y ayuda de mi director Daniel Rodríguez Rubiales, cuyo esfuerzo e intenso trabajo ha hecho posible la consecución del mismo. También quiero agradecer a Antonio Miguel Lallena Rojo por su colaboración en todos los pasos realizados y sus oportunas correcciones.

Además agradecer a Begoña Fernandez, Zaid Abu-Haidor y Julio Almansa, así como a Xavier Fléchar, Etienne Liénard y Gilles Ban del grupo LPC-Caen por su ayuda y participación en el experimento en Sevilla.

Por último, gracias a toda mi familia. A mis hermanas, por ser siempre el pilar sobre el que me apoyo. A mi novia Sandra, por su paciencia y comprensión en los momentos de nervios, y esperarme después de largas jornadas con una amplia sonrisa y siempre con palabras de ánimo. Y en especial a mis padres, Juan y Luisa, por su confianza y apoyo a lo largo del camino.