



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

ZIENTZIA
ETA TEKNOLOGIA
FAKULTATEA
FACULTAD
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA



Gradu amaierako lana / Trabajo fin de grado
Ingeniaritza Electronikoa gradua/ Grado en Ingeniería Electrónica

Sistema de alineación in situ de un LEBT

Egilea/ Autor/a:
Alejandro Serrano Mauricio
Zuzendariak/Directores/as:
Jorge Feuchtwanger Morales
Inari Badillo Fernández

Leioa, 2023eko ekainaren 23a / Leioa, 23 de junio de 2023

Resumen

Se presenta un sistema de alineación en tiempo real de los solenoides que forman parte del transporte de baja energía (LEBT por sus siglas en inglés) de un acelerador lineal de partículas. El sistema de alineación se ha realizado a partir de elementos disponibles comercialmente, principalmente sensores Hall y un microcontrolador Arduino para la adquisición de medidas, cuya selección e implementación es discutida. Se describe detalladamente la metodología del diseño y desarrollo del sistema experimental, tratando aspectos como el diseño mecánico del mismo o la comunicación entre sus dispositivos. Igualmente, el sistema se somete a una calibración para su posterior implementación. Este sistema de alineación se utilizará para garantizar la operación óptima del LEBT, consiguiendo que el haz de partículas tenga las propiedades deseadas a la entrada de la etapa RFQ.

Índice de contenidos

1. Introducción y objetivos	1
2. Descripción general del sistema	3
2.1. Proyecto Linac-7	3
2.2. LEBT: Low Energy Beam Transport	3
2.3. Alineación del LEBT	5
2.4. Simulación magnética del LEBT	8
3. Selección de sensores	13
3.1. Criterios de selección	13
3.2. Comparación de los sensores	14
4. Diseño y desarrollo del sistema experimental	16
4.1. Sistemas de comunicación y adquisición de datos	16
4.1.1. Comunicación sensor-Arduino: I ² C	16
4.1.2. Comunicación Ardino-PC: Protocolo MQTT	21
4.2. Diseño mecánico de la estructura soporte de los sensores	22
4.3. Calibración del sistema	24
5. Algoritmos para la alineación in situ	28
5.1. Algoritmo basado en los datos de la simulación	28
5.1.1. Base teórica del método	28
5.1.2. Implementación del método	30
5.2. Algoritmo general basado en Newton-Raphson	30
5.2.1. Base teórica del método	30
5.2.2. Implementación del método	31
6. Conclusiones	33

1. Introducción y objetivos

Desde sus primeros desarrollos en el siglo XX, los aceleradores lineales de partículas han revolucionado nuestra comprensión de la física de partículas y han permitido realizar investigaciones fundamentales sobre la estructura del universo. Estas poderosas máquinas han experimentado una evolución significativa a lo largo de los años, impulsada por avances tecnológicos y la búsqueda de alcanzar mayores energías y precisión en los experimentos.

En un linac (acrónimo de *linear accelerator*), las partículas cargadas adquieren energía moviéndose en una trayectoria lineal; su rasgo característico es que las partículas pasan una sola vez por cada una de las etapas de aceleración. En la actualidad, este tipo de aceleradores cuentan con cavidades de radio frecuencia, excitadas por un campo eléctrico variable en el tiempo, que se utilizan para acelerar las partículas que pasan a través de ellas [1].

En general, el diseño de las etapas de un linac variará considerablemente en función de la energía final que se pretenda obtener y el tipo de partículas aceleradas. El rango de tamaño varía desde el tubo de rayos catódicos (que es considerado un tipo de linac) hasta el linac de 3.2 kilómetros de largo del SLAC [2] (*Stanford Linear Accelerator*) que logró hallazgos históricos en la física nuclear acelerando electrones y positrones a energías relativistas. Igualmente, la aplicación de este tipo de aceleradores no se reduce solo a la investigación de física de partículas, sino que también se extiende a aplicaciones en campos como la medicina, para radioterapia, o en la investigación de materiales para el estudio de las propiedades físicas y químicas de materiales [3].

En este trabajo, nos centraremos en particular en una de las etapas presentes en todo acelerador lineal: El transporte de haz de baja energía o LEBT (de sus siglas en inglés *Low Energy Beam Transport*). Esta es una estructura, que se encarga de transportar el haz desde la fuente de iones hasta la siguiente estructura de aceleración, normalmente el cuadrupolo de radiofrecuencia o RFQ (de sus siglas en inglés, *Radio Frequency Quadrupole*). El RFQ es una etapa de aceleración muy sensible, cuyo diseño se realiza para parámetros de entrada del haz muy específicos, en un rango de variabilidad pequeño. El objetivo del LEBT es adaptar el haz de partículas emitido por la fuente de iones para conseguir estas características tan específicas a la entrada del RFQ.

Para garantizar que a la salida del LEBT el haz tiene las propiedades buscadas, esta etapa requiere de un sistema de alineación generalmente complejo. En este trabajo se propone un posible sistema de alineación, a partir de elementos disponibles comercialmente, del LEBT del acelerador Linac-7, un proyecto de la Universidad del País Vasco en colaboración con el sector industrial del País Vasco.

Para el diseño de este sistema de alineación, previamente será necesario conocer las principales características del LEBT. Disponer de una caracterización magnética del LEBT nos permitirá establecer la base teórica del método de alineación, los requisitos de diseño, así como los criterios de selección para los elementos y tecnología del sistema. Este constituye el **primer objetivo** del trabajo, para el que se hará uso de herramientas de simulación computacional del LEBT.

A partir de los resultados de estas simulaciones, el **segundo objetivo** será diseñar y desarrollar un sistema experimental para la alineación del LEBT, ajustándose a las características y requisitos del Linac-7. Para conseguir este objetivo, se propone un sistema

formado por un conjunto de sensores Hall triaxiales dispuestos a lo largo del LEBT cuyas señales son adquiridas por un microcontrolador, y procesadas mediante un algoritmo diseñado. Este sistema, nos dará información sobre cómo hay que desplazar los elementos del LEBT para conseguir la configuración deseada.

Cabe destacar que a pesar de que el sistema de alineación se haya desarrollado para un equipo en particular, se pretende dar especial importancia a la metodología usada durante el desarrollo puesto que todo lo planteado podría ser de gran utilidad para su aplicación a otros proyectos.

2. Descripción general del sistema

2.1. Proyecto Linac-7

Linac-7 es un acelerador lineal de protones de nueva generación completamente diseñado y construido en el Laboratorio de Haces de Partículas (IZPILab- Beam Laboratory) de la Universidad del País Vasco UPV/EHU. El principal objetivo de este proyecto es el diseño y fabricación de un acelerador compacto de baja intensidad para fines médicos [4]. Dada su aplicación, se prioriza conseguir un sistema de dimensiones y coste reducido, que requiera de poco mantenimiento y se pueda transportar fácilmente de un lugar a otro [5].

El nombre del proyecto describe las principales características del mismo: Linac (*Linear Accelerator*) y el 7 hace referencia a la energía final que adquieren las partículas en la última etapa, 7 MeV. El sistema se puede dividir en 6 etapas principales: 1) La fuente de iones: ECR (*Electron Cyclotron Resonance*), 2) LEBT (*Low Energy Beam Transport*), 3) Primera etapa de amplificación: RFQ (*Radio Frequency Quadrupole*), 4) MEBT (*Medium Energy Beam Transport*), 5) Última etapa de amplificación: DTL (*Drift Tube Linac*) y 6) *Beam Stop*.

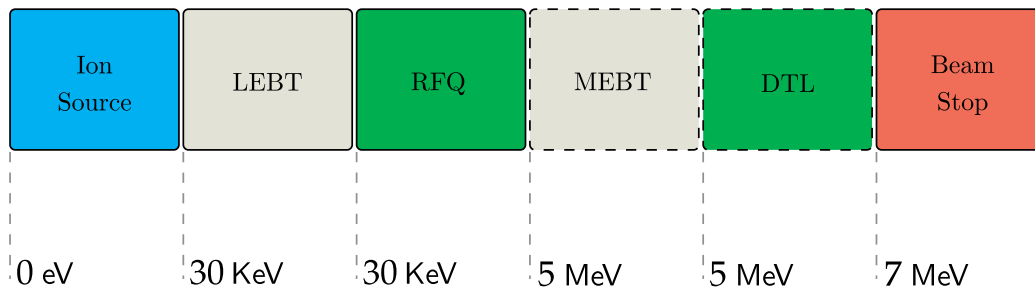


Figura 2.1.1: Etapas principales del Linac-7. Las fases MEBT y DTL, marcadas con línea discontinua están aún sin diseñar. Obsérvese que en las etapas en gris la energía del haz permanece inalterada (etapas de acondicionamiento), mientras que en las verdes el la energía del haz aumenta (etapas de aceleración).

2.2. LEBT: Low Energy Beam Transport

El LEBT de cualquier acelerador de partículas es la etapa que recibe el haz de partículas de la fuente de iones y lo transporta a la primera etapa de aceleración.

La fuente de iones del Linac-7 es del tipo ECR (Electron Cyclotron Resonance). Consiste en una cavidad cilíndrica en la que se inyectan señales microondas de la misma frecuencia a la que resuena la cavidad (3 GHz). Alrededor de la cámara hay una serie de imanes permanentes que generan un campo axial a lo largo de la cámara de magnitud igual a la necesaria para que los electrones libres resuenen a 3 GHz, maximizando así la transferencia de energía de microondas introducida a los electrones libres [6]. Al inyectar gas Hidrógeno en la cámara a un flujo controlado, los electrones energizados colisionan con las moléculas de H_2 , descomponiéndolas e ionizándolas, generando así nuevos electrones libres y protones H^+ , y por lo tanto transformando el gas en plasma. Los protones generados en la cavidad se aceleran y extraen mediante una lente Einzel compuesta de 3 electrodos paralelos, los 2 de los extremos conectados a tierra y el del centro a 15 kV, dando un primer enfoque al haz de protones extraído .

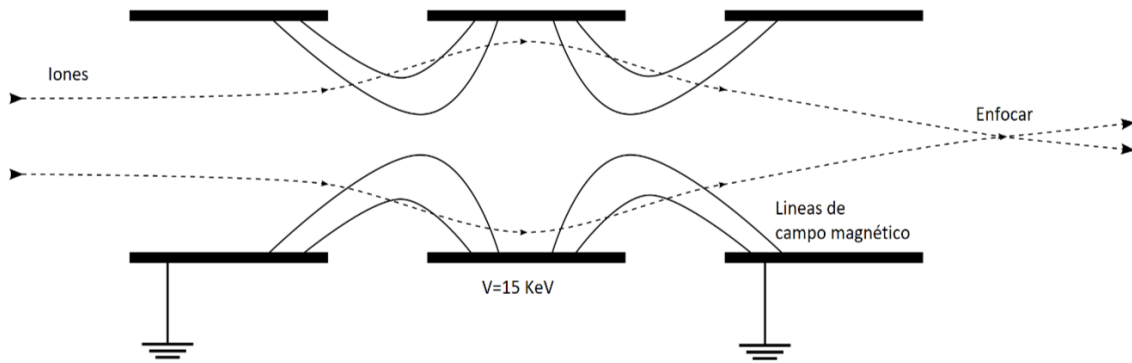


Figura 2.2.2: Esquema del conjunto de electrodos de la lente Einzel del Linac-7

A continuación el haz pasa al LEBT, que es el sistema encargado de proporcionarle las características de enfoque necesarias para la aceleración RFQ, tratando de no perder partículas, ni provocar un aumento de la emitancia¹ en el proceso. En general, antes de cualquier etapa de aceleración se necesita de etapas previas como esta para el acondicionamiento y adaptación del haz (MEBT, HEBT (*Medium/High Energy Beam Transport*)).

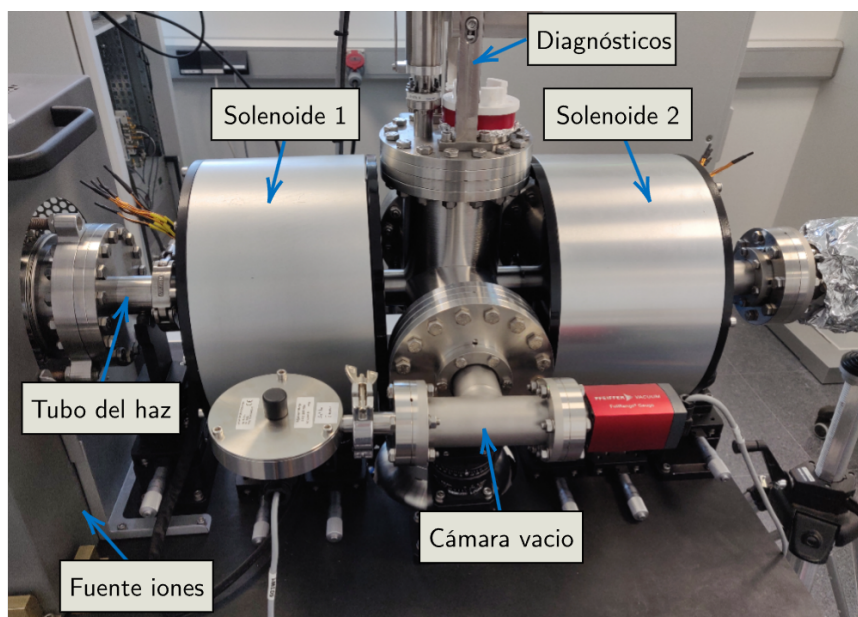


Figura 2.2.3: LEBT del Linac-7. Entre los dos solenoides se encuentran los dispositivos de diagnóstico y la cámara de vacío. El tubo fijo por el que discurre el haz atraviesa el interior de los solenoides. Los solenoides se encuentran en el interior de la carcasa de acero.

Teniendo en cuenta las características del proyecto Linac-7, el diseño LEBT elegido se basa en una configuración de dos solenoides alrededor del tubo de vacío por el que discurre el haz (figura 2.2.3). Esta es la opción más común en instalaciones internacionales [7]. Es una alternativa relativamente compacta, económica, que permite incluir diagnósticos del haz y además es adecuada para un gran rango de haces [8]. Los solenoides se usan como lentes magnéticas para transformar el haz divergente saliente de la fuente de iones en uno

¹La emitancia nos proporciona una descripción cuantitativa de la calidad del haz. Cuanto menor sea la emitancia del haz mayor será su calidad.

paralelo, y finalmente en un haz convergente entrante al RFQ. El LEBT también proporciona el vacío a todo el sistema, y entre sus dos solenoides hay situados dos instrumentos para el diagnóstico del haz: la celda de Faraday, que sirve para medir la corriente del haz de protones y el *Pepper-pot*, cuya función es determinar la forma y emitancia del haz [9].

2.3. Alineación del LEBT

El campo magnético de un solenoide es muy característico. Su valor en el interior del cilindro es muy constante, y decae rápidamente a medida que nos acercamos a los extremos. En el interior, su valor disminuye a medida que nos alejamos del conductor, alcanzando su mínimo en el centro del solenoide. En la figura 2.3.4, se muestra el mapa bidimensional del campo en uno de los planos que contiene al eje de revolución del solenoide, y el campo en una sección perpendicular a dicho eje. La línea formada por los puntos en los que el campo es mínimo en todas las secciones del solenoide conforman el denominado **eje magnético**.

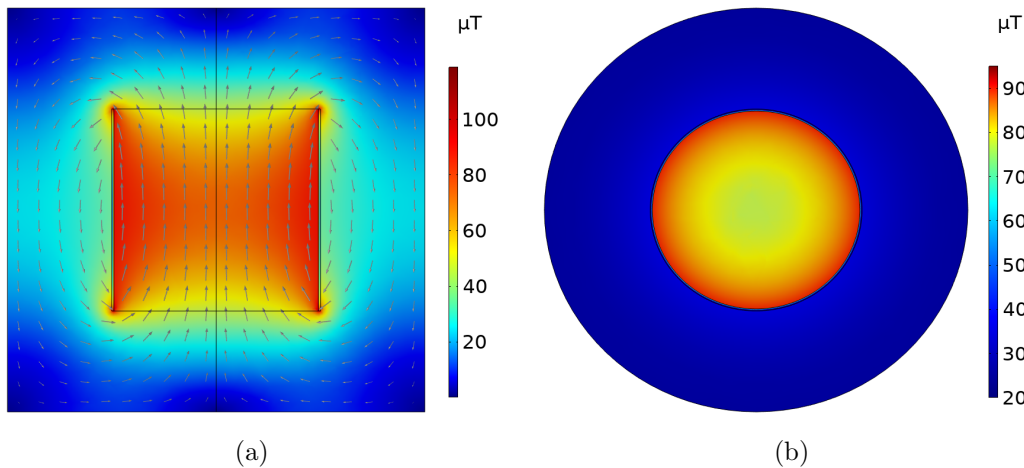


Figura 2.3.4: a) Campo magnético en uno de los planos que contiene el eje de revolución del solenoide. b) Campo magnético en una sección perpendicular al eje. Resultados obtenidos mediante COMSOL, para un solenoide con 100 vueltas, por el que circula una corriente de 1 A.

En un solenoide ideal, el eje magnético² coincide con el eje geométrico de revolución del solenoide, al que también se le llama eje mecánico del solenoide. Sin embargo, en los solenoides reales el eje magnético y mecánico rara vez coincide. Alinear el eje magnético de los dos solenoides del LEBT con el eje del tubo del haz que hay en su interior es crucial para el correcto funcionamiento de esta etapa. De lo contrario, la dinámica del haz se vería perturbada y el enfoque sería defectuoso.

En la figura 2.3.5 se muestra de manera esquemática un ejemplo de configuración en el que la proyección del eje magnético de un solenoide en el plano xz (*o.m*), no coincide con el eje mecánico (*o*) del tubo del haz. En este ejemplo en particular ambos ejes son paralelos, aunque en un caso general no es necesario que esto sea así. Para una mejor visualización, se muestra un corte transversal en el plano xz del solenoide y del tubo del haz en su interior. Para conseguir alinear los ejes en el plano xz partiendo de esta configuración, los

²En este trabajo consideraremos que el eje magnético se aproxima bien por un segmento recto.

extremos del solenoide se deben de desplazar haciendo coincidir \mathbf{A} con \mathbf{A}' y \mathbf{B} con \mathbf{B}' . Finalmente, para garantizar que ambos ejes están completamente alineados habría que realizar un proceso análogo en el plano xy .

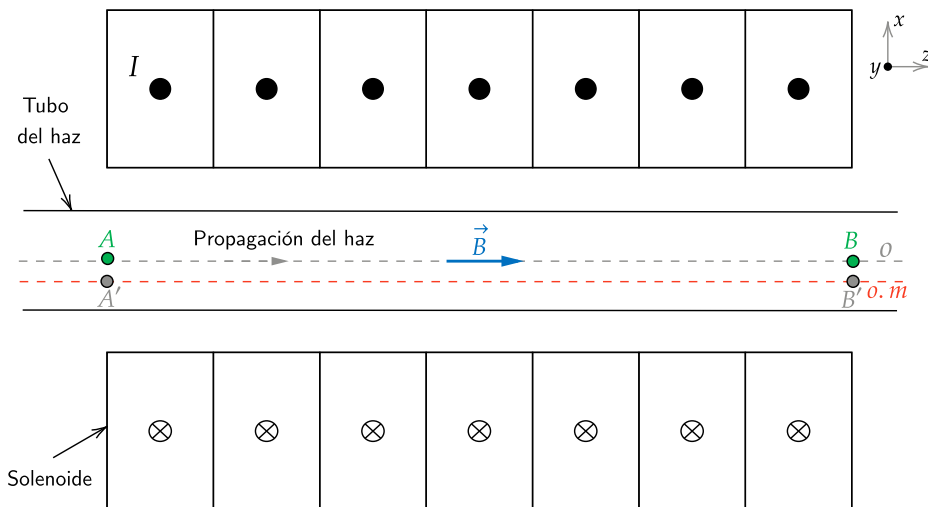


Figura 2.3.5: Solenoide en el que el eje magnético no está alineado con el eje mecánico del tubo del haz. El sistema de referencia tridimensional mostrado será el que se usará a lo largo de todo el trabajo.

La alineación de los dos solenoides del LEBT se realiza de manera independiente. La idea principal del sistema propuesto para la alineación de cada uno, consiste en disponer 4 sensores de campo magnético en cada uno de sus extremos a lo largo de dos direcciones ortogonales. En cada dirección se sitúan 2 sensores en extremos opuestos del tubo. En la figura 2.3.6, se muestra la configuración de los 8 sensores alrededor del tubo del haz (s_0, s_1, \dots, s_7) para uno de los solenoides del LEBT. Las medidas de estos sensores, junto a los algoritmos que se explicarán detalladamente en la sección 5, nos dirán cómo debemos de desplazar el solenoide para llegar a hacer coincidir el eje magnético con el eje mecánico del tubo del haz. Intuitivamente, teniendo en cuenta el perfil del campo magnético en el interior de un solenoide de la figura 2.3.4, si por ejemplo el sensor s_0 mide un campo magnético menor al del sensor s_1 , para hacer coincidir el eje magnético y mecánico del tubo, deberemos desplazar el extremo en cuestión en la dirección del eje x una cantidad $\Delta x > 0$. El valor de este desplazamiento dependerá de las magnitudes medidas por ambos sensores, y los métodos para determinarlo serán discutidos en la sección 5.

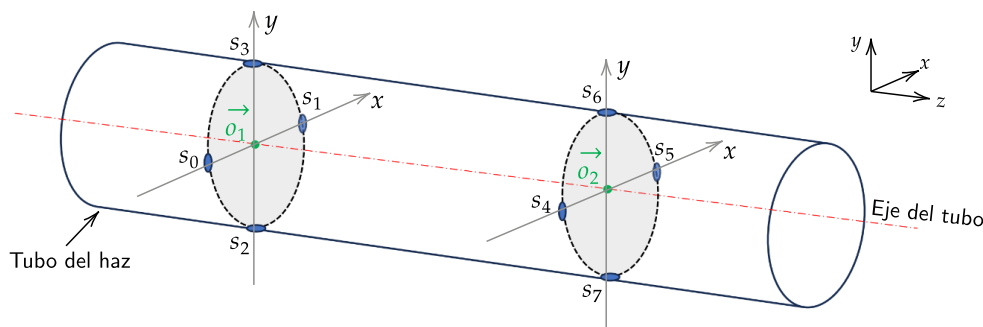


Figura 2.3.6: Configuración de los sensores para la alineación de uno de los solenoides del LEBT.

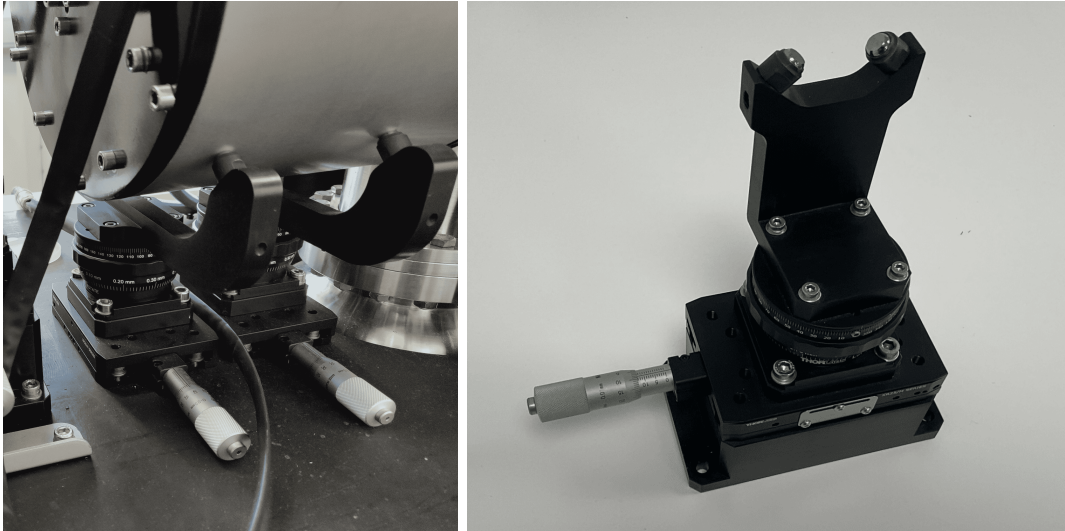
Como estamos considerando que el eje magnético es aproximadamente un segmento recto, para garantizar que el eje magnético y mecánico del tubo están alineados basta con asegurarnos de que el eje magnético pasa por 2 de los puntos del eje del tubo (\vec{o}_1 y \vec{o}_2 de la figura 2.3.6). Esta comprobación es equivalente a que la magnitud del campo magnético medida por dos sensores en una misma dirección en extremos opuestos del tubo sea igual, es decir:

$$B_{s_0} = B_{s_1} \qquad B_{s_2} = B_{s_3} \qquad (2.3.1)$$

$$B_{s_4} = B_{s_5} \qquad B_{s_6} = B_{s_7} \qquad (2.3.2)$$

siendo B_{s_i} la magnitud del campo magnético medida por el sensor s_i . Mediante las ecuaciones 2.3.1 garantizamos que el solenoide está bien orientado en el plano xz , mientras que con las ecuaciones 2.3.2 garantizamos la correcta orientación en el plano xy .

Cada una de las bobinas del LEBT cuenta con un sistema compuesto por 2 micrómetros situados en ambos extremos del solenoide, capaces de mover los dos extremos del solenoide en un plano perpendicular a la propagación del haz (plano xy). Este sistema nos permite realizar desplazamientos tridimensionales del solenoide, y con él podremos modificar la posición relativa entre el solenoide y el tubo de haz en su interior, para conseguir alinear el eje magnético con el eje mecánico del tubo.



(a)

(b)

Figura 2.3.7: a) Solenoide con 2 micrómetros en su base para mover sus extremos. b) Micrómetro con 2 grados de libertad, para el movimiento de los extremos del solenoide en un plano.

2.4. Simulación magnética del LEBT

En la figura 2.4.8 se muestra el plano CAD del diseño del LEBT. Para llegar hasta este diseño final, se ha seguido un proceso iterativo tratando de resolver problemas como la refrigeración del sistema, y persiguiendo el objetivo de mantener el sistema compacto [5].

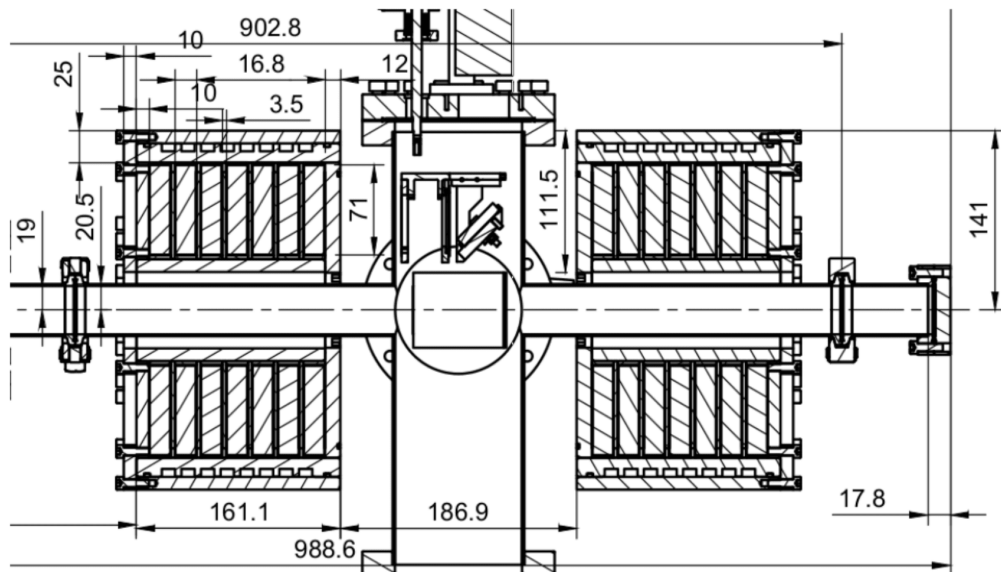


Figura 2.4.8: Plano CAD de la sección transversal del LEBT. Los dos solenoides se sitúan a los lados del cámara de vacío y diagnósticos. Cada solenoide está dividido en 7 sub-bobinas. Todas las unidades están en mm.

En la figura 2.4.9 se muestran las partes principales de los solenoides del LEBT. (1) Cableado de cobre ($\varnothing 1.25$ mm) por el que circula la corriente de excitación. (2) Pieza de aluminio para soportar el bobinado. (3) Camisa de acero ST-52 de alta permeabilidad para confinar el campo magnético generado por los solenoides. (4) Separadores de aluminio para las sub-bobinas. Cabe destacar, que como la excitación de los solenoides es corriente DC, el campo magnético del sistema es estático. Por lo tanto, todos los componentes del LEBT que no sean las sub-bobinas de cobre o la camisa de acero, a efectos prácticos se comportan como el aire por tener una misma permeabilidad.

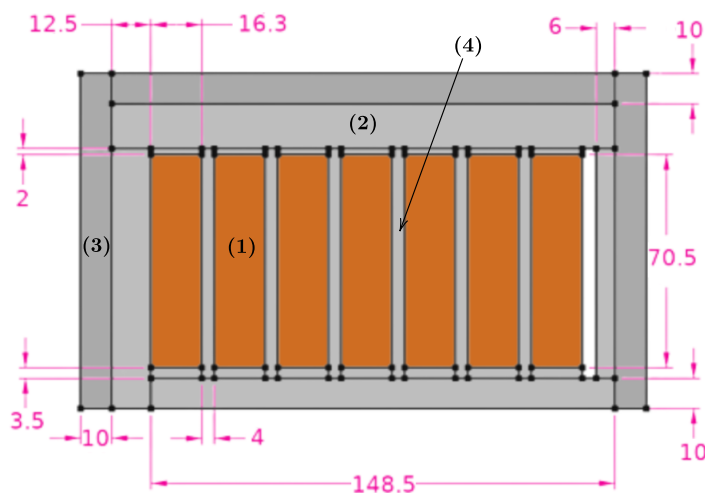


Figura 2.4.9: Modelo simplificado de los solenoides del LEBT usado para las simulaciones.

Mantener todos los elementos del LEBT en un rango de temperaturas adecuado es vital para el correcto funcionamiento del sistema. Por ello, es necesario incluir un sistema de refrigeración de los solenoides. Esto se consigue mediante la división en 7 sub-bobinas conectadas en serie separadas por aluminio, por el que se conduce el calor hasta el exterior. Además, se incluye un sistema de refrigeración con agua a lo largo del encapsulado de acero.

El programa utilizado para las simulaciones magnéticas de este trabajo ha sido *COMSOL Multiphysics*, un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos. Con estas simulaciones, se pretende: tener una caracterización cuantitativa de los campos en el interior de los solenoides, que será usada para los algoritmos de alineación del LEBT; y obtener una estimación de la magnitud del campo magnético para la selección de los sensores, para el sistema de alineación.

Es importante destacar en este momento que a pesar de que la corriente nominal para la operación del Linac-7 sea aproximadamente de 8 A, no es necesario realizar la alineación del LEBT en esta configuración, puesto que esta es independiente del punto de operación. Para realizar la alineación haremos que por los solenoides circulen corrientes menores (1 A - 3 A), de manera que la magnitud de los campos magnéticos sean menores y podamos acceder a un mercado de sensores mayor.

Dada la simetría de los solenoides alrededor de su eje de revolución, para realizar las simulaciones se aprovecha la funcionalidad **2D axisymmetry** de *COMSOL*. Esta es una forma de reducir la geometría 3D a 2D. Realizar el modelo en dos dimensiones tiene la ventaja de ser computacionalmente más eficiente que la construcción del modelo tridimensional completo.

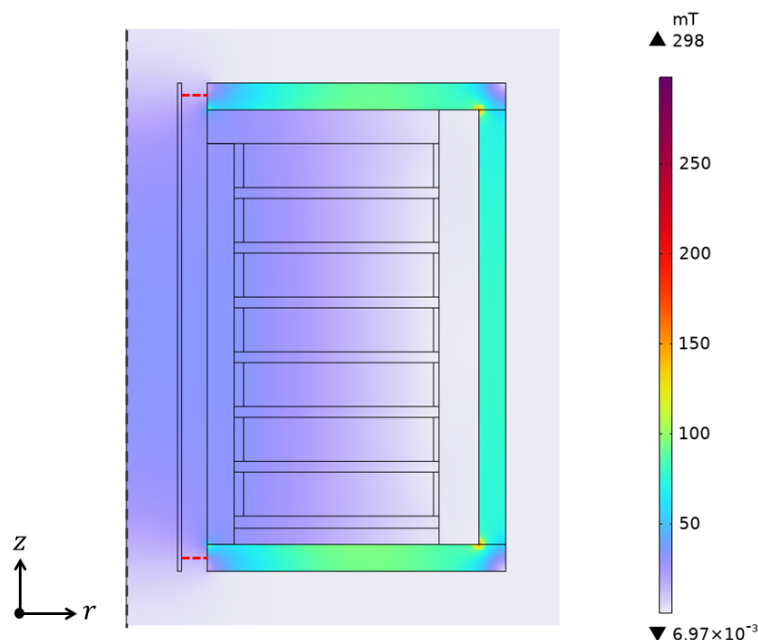


Figura 2.4.10: Mapa del campo magnético en una sección del solenoide para una corriente de 1 A. La línea discontinua en negro es el eje de revolución del solenoide. Las líneas discontinuas en rojo, representan el lugar geométrico en el que podrían estar los 4 sensores alrededor del tubo de acuerdo a la disposición vista en la figura 2.3.6

se concluye que los sensores de campo magnético del sistema a diseñar deben de poder medir hasta 45 mT, suponiendo que el alineamiento del LEBT se hace con una corriente inferior a 3 A.

I (A)	B_{min} (mT)	B_{max} (mT)
1	13.2	15
1.5	19.8	22.5
2	26.4	30
2.5	33	37.5
3	39.6	45

Tabla 1: Rango de magnitud del campo magnético al que se somete cada sensor del sistema de alineación para diferentes corrientes de excitación de los solenoides.

Además de permitirnos obtener los resultados buscados, las simulaciones nos han dado acceso a más información sobre el sistema. Por una parte, el hecho de introducir los separadores de aluminio no modifica la forma cualitativa del campo en el interior del solenoide, tal y como se ve en la figura 2.4.12, se sigue teniendo la misma forma de “campana”. Y por otra parte, el campo en el interior de los solenoides del LEBT es linealmente proporcional a la corriente que circula por ellos, $B \propto I$, tal y como sucede en un solenoide convencional.

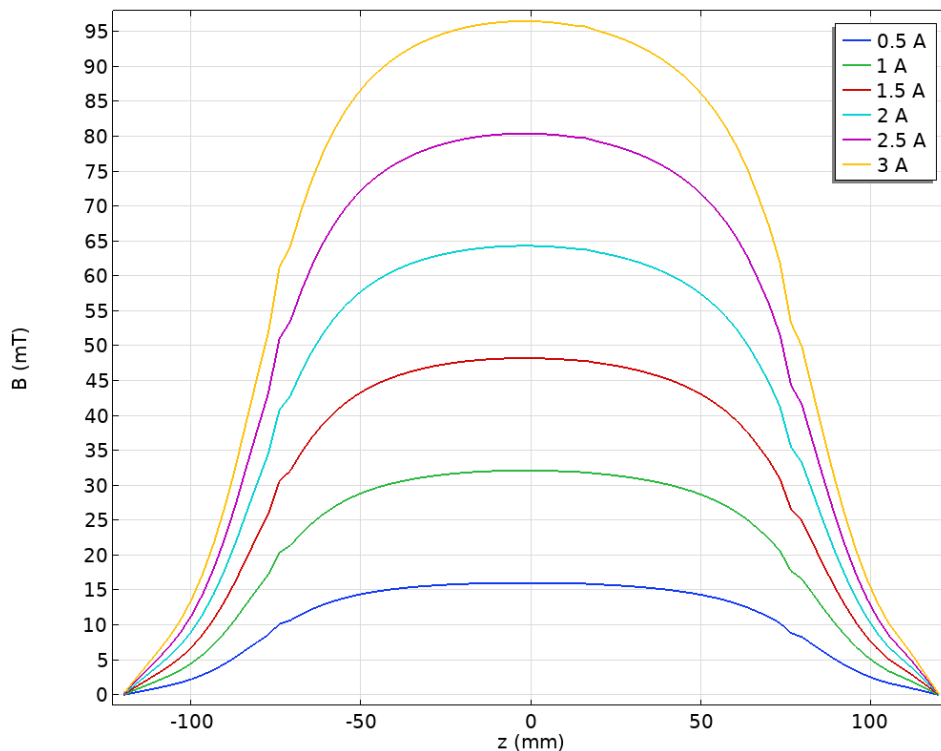


Figura 2.4.12: Variación del campo magnético del solenoide a lo largo de su eje mecánico para diferentes corrientes.

Para realizar todas las simulaciones mencionadas, ha sido necesario definir un dominio finito de aire alrededor de la estructura. *COMSOL* se encarga de resolver las ecuaciones físicas que gobiernan el sistema en cada uno de los puntos de este dominio. Este dominio

está sometido a una condición de contorno por defecto, que consiste en exigir que se cumpla $\vec{n} \times \vec{A} = 0$ a lo largo de toda la frontera del dominio de aire [10]. La interpretación física de esta condición es que el dominio de aire está rodeado a su misma vez de un conductor eléctrico perfecto ficticio, en el que el campo magnético no puede penetrar. En definitiva, esta es una aproximación que sirve para limitar el dominio de resolución de las ecuaciones. No obstante, hay que tener en cuenta que cuanto más pequeño sea el dominio de aire alrededor de estructura, esta aproximación afectará cada vez más a los resultados. Por lo tanto, es necesario que el tamaño del dominio del aire sea lo suficientemente grande como para obtener buenos resultados. Para encontrar el tamaño del dominio de aire óptimo se han utilizado 2 herramientas: la funcionalidad *artificial infinite domain*, que nos permite representar de manera eficiente dominios muy grandes de aire. Y *parametric sweep* (barrido paramétrico) a partir del cuál se van realizando sucesivos estudios cambiando el tamaño del dominio de aire, hasta llegar a un punto en el que los resultados de la simulación no cambian, es decir se llega a una situación de convergencia.

3. Selección de sensores

Una de las principales tareas del diseño es la selección de los sensores de campo magnético para el sistema de alineación. Los sensores de campo magnético estático se basan en el efecto Hall. Este tipo de sensores son muy comunes en la industria para numerosas aplicaciones (p.ej. joysticks, decodificadores de posición lineal, brújulas). Asociado con este gran rango de aplicabilidad, viene un amplio catálogo entre el que elegir. Por ello, se decide realizar un estudio del mercado de sensores Hall en base a ciertos criterios de selección.

3.1. Criterios de selección

El primer paso para definir una lista de criterios es disponer de la caracterización magnética de los solenoides obtenida mediante simulación en la sección previa. A partir de los resultados de esta simulación, se ha conseguido una estimación de la magnitud del campo magnético a medir por los sensores (tabla 1), delimitando de esta manera el rango de medida que deben de tener los sensores a seleccionar.

1. **Sensor triaxial.** El objetivo es medir magnitudes de campo magnético, por lo tanto se propone que el sensor sea capaz de medir el campo en cada una de las componentes (B_x, B_y, B_z) . Tras la adquisición de las componentes se calcula el módulo del campo, $|\vec{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$. De esta manera además, los sensores se podrán reutilizar para futuros estudios de alineación del sistema basándose en los datos de una única componente por ejemplo.
2. **Tamaño.** Este es uno de los factores más limitantes para la selección. El espacio del que disponemos para situar el sistema de alineación es reducido. Por lo tanto, se prioriza que las dimensiones del sensor sean lo menor posible. Por este motivo, el sensor se adquiere en forma de chip, sin que esté instalado en una placa. De este modo, tendremos mayor libertad para soldar e instalar el circuito de la mejor manera posible.



Figura 3.1.13: Restricción de tamaño del sensor. El espacio entre el tubo del haz y la carcasa de acero (negro) es de 10 mm.

3. **Compatibilidad con Arduino.** Tal y como se verá en la sección 4, para establecer la comunicación entre el sensor y el ordenador, en el que se procesaran los

datos adquiridos, utilizaremos un microcontrolador Arduino. La mayoría de sensores del mercado utilizan los protocolos de comunicación SPI e I²C, que también son soportados por Arduino.

4. **Rango.** El sensor debe de ser capaz de medir los campos magnéticos producidos por el solenoide sin llegar a saturarse. Para la selección, usamos como referencia los rangos de medida obtenidos mediante simulación (tabla 1). Idealmente, la magnitud del campo que vayamos a medir está en el centro del intervalo de medida del sensor. Esto en principio no supone un gran problema porque la corriente que circula por los solenoides se puede cambiar para cumplir con este requisito.

3.2. Comparación de los sensores

Teniendo en cuenta los criterios de selección establecidos se han preseleccionado 4 sensores: **TMAG5273** [11] (Texas Instruments), **ALS31313** [12] (Allegro microsystems) y 2 modelos de la familia de sensores **MLX90395** [13] (Melexis): *Medium-Field version* y *High-Field version*.

	TMAG5273	ALS31313	MLX90395
Rango*	±40 mT (conf. 1) ±80 mT (conf. 2)	±50 mT	±50 mT (M) ±120 mT (H)
Sensibilidad*	1.22 μ T/LSB ₁₂ (conf. 1) 2.44 μ T/LSB ₁₂ (conf. 2)	25 μ T/LSB ₁₂	2.5 μ T/LSB ₁₆ (M) 7.14 μ T/LSB ₁₆ (H)
Resolución ADC	12 bit	12 bit	16 bit
Ruido	X, Y 0.125 mT Z 0.068 mT	X, Y 0.1 mT Z 0.037 mT	X, Y, Z 0.275 mT (M) X, Y, Z 1.08 mT (H)
Comunicación	I ² C	I ² C	I ² C, SPI
Dimensiones	DBV 6 pin package 3 mm × 3.05 mm × 1.45 mm	TSSOP 8 pin package 3 mm × 6.40 mm × 1.1 mm	TSSOP 16 pin package 4.9 mm × 6.40 mm × 1.1 mm

Tabla 2: Especificaciones de los 4 sensores Hall triaxiales preseleccionados. *Valor de la magnitud para las tres componentes X, Y, Z. (M) - *Medium-Field version*, (H) - *High-Field version*.

Los 4 sensores cumplen con los criterios de selección. El sensor TMAG5273 cuenta con 2 rangos de medida seleccionables mediante la configuración software. Esto es punto a favor, puesto que nos permite tener el rango de medida centrado para diferentes corrientes de excitación del solenoide. Es decir, si por ejemplo se realiza la alineación con una corriente de 3 A, el campo máximo a medir esperado es de 45 mT (tabla 1) y por lo tanto nos interesa seleccionar el rango de medida ±80 mT. Por otra parte, el sensor MLX90395 - *High-Field version* podría ser usado para la alineación del sistema a corrientes mayores las inicialmente consideradas (1 A - 3 A).

Inicialmente se selecciona el sensor TMAG5273 por ser la alternativa más versátil, y la que nos permite medir menores diferencias del campo magnético ($1.22 \mu T$ o $2.44 \mu T$ dependiendo de la configuración), es decir es el sensor de menor resolución. Sin embargo, en el momento en el que se realizó la selección, no estaba disponible para su compra. La segunda alternativa fue elegir uno de dos los modelos de la familia MLX90395, por tener una menor resolución que el sensor ALS31313, y porque su conversor analógico-digital (ADC) es de 16 bits, comparado con el ADC de 12 bits del ALS31313, de modo que se gana precisión.

Entre estos dos, ambos son igualmente válidos teniendo en cuenta que la corriente del solenoide se puede ajustar para que el campo magnético esté dentro del rango del sensor. Finalmente, considerando que la alineación se hará con corrientes bajas y priorizando la precisión frente al rango se elige el sensor MLX90395 - *Medium-Field version*.

Este sensor está disponible en varios encapsulados. Sin embargo, la única versión disponible al momento de realizar la selección era la de encapsulado TSSOP-16. Esta es igual que la versión básica de 8 pines (SOIC-8), pero en su encapsulado contiene 2 de estos sensores totalmente independientes para aplicaciones que por ejemplo requieran de medidas redundantes por seguridad. Para cada uno de los sensores, su alimentación, tierra y cada una de sus señales de entrada/salida están en 8 del total de los 16 pines del chip. Para nuestra aplicación, solo necesitamos usar uno de los dos sensores presentes en el chip, por lo que solo utilizaremos los 8 pines correspondientes a uno de los sensores.

Para poder implementar el chip en un circuito se ha usado un adaptador TSSOP-16, mostrado en la figura 3.2.14 al que se ha soldado los 16 pines del mismo mediante pasta de soldar.

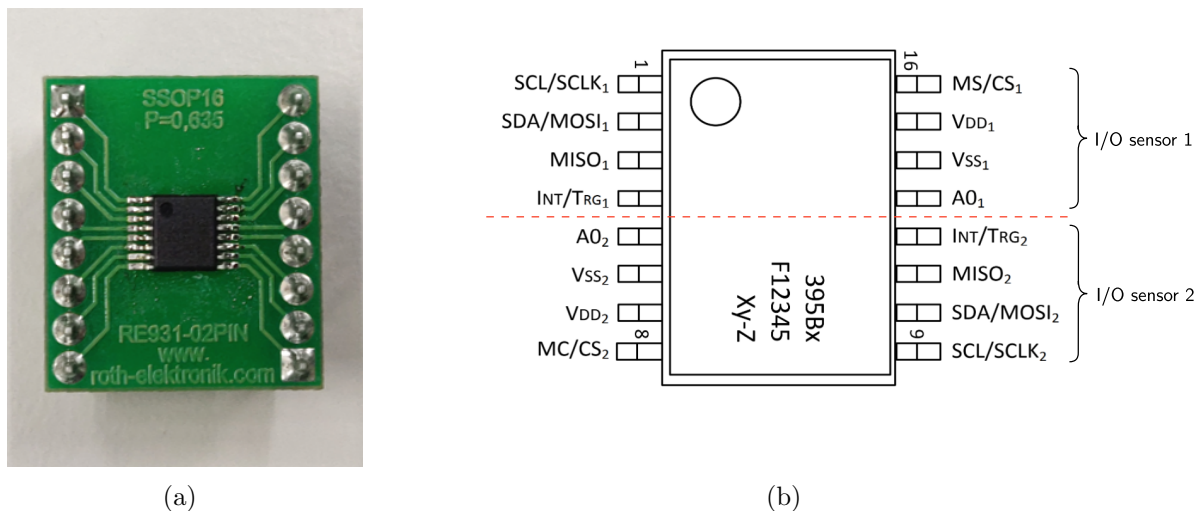


Figura 3.2.14: a) Sensor MLX90395 seleccionado soldado con pasta de soldar a un adaptador TSSOP-16 con pines. b) *Pinout* del MLX90395 con encapsulado TSSOP-16. Hay 8 pines de entrada/salida para cada sensor. Los de la mitad superior para son el sensor 1 y los de la mitad inferior para el sensor 2.

4. Diseño y desarrollo del sistema experimental

En esta sección se va a explicar el diseño y desarrollo del sistema de alineación del LEBT. Se describirá el sistema diseñado para establecer la comunicación entre los distintos dispositivos, el diseño mecánico de la estructura para el acople del sistema al LEBT y finalmente el método utilizado para la puesta a punto del sistema.

Todos los códigos escritos para la configuración y operación del sistema diseñado se encuentran en un repositorio GitHub³.

4.1. Sistemas de comunicación y adquisición de datos

El principal objetivo del sistema de comunicación a diseñar es adquirir las medidas de los sensores Hall MLX90395 para su posterior procesamiento. La adquisición de las medidas al ordenador personal en el que posteriormente se procesan, se hace por medio de un Arduino MKR 1010 WiFi [14]. El sistema se divide en dos partes principales, por una parte la comunicación entre los sensores y el Arduino, basada en el protocolo de comunicación serie I²C, y por otra la comunicación entre el Arduino y el ordenador, para la que se utilizarán las herramientas IoT (*Internet of things*) del Arduino MKR 1010 WiFi.

4.1.1. Comunicación sensor-Arduino: I²C

I²C (del inglés *Inter-Integrated Circuit*) es un protocolo de comunicación de datos serial síncrono desarrollado por Philips en la década de 1980. Se utiliza para la comunicación entre dispositivos electrónicos en un sistema, permitiendo la transferencia de información entre ellos [15].

El protocolo I²C se caracteriza por utilizar solo dos líneas de comunicación, conocidas como SDA (*Serial Data Line*) y SCL (*Serial Clock Line*). La línea SDA se utiliza para transmitir los datos, mientras que la línea SCL proporciona la señal de reloj para sincronizar la comunicación entre los dispositivos y siempre es controlada por el maestro.

Este protocolo permite la conexión de múltiples dispositivos en el mismo bus, y cada dispositivo tiene una dirección única que se utiliza para identificarlo durante la comunicación. Esto permite una comunicación eficiente y flexible entre diferentes componentes de un sistema, como microcontroladores, sensores, pantallas, memorias, entre otros.

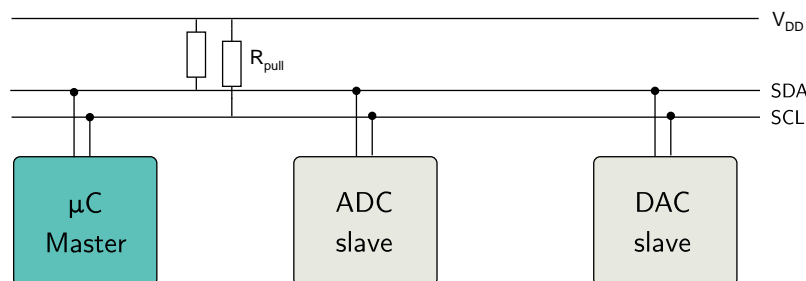


Figura 4.1.15: Ejemplo de aplicación del protocolo de comunicación I²C. El bus es compartido por el maestro (*master*), que es un microcontrolador, y dos esclavos (*slave*), que son convertidores analógicos-digital.

³<https://github.com/alejandrosma/TFG-IE>

La transmisión de datos en el protocolo I²C sigue un proceso específico. A continuación se presentan los principales pasos en la comunicación entre el maestro y uno de sus esclavos [15].

1. **Inicio de la comunicación:** El maestro (el dispositivo que controla la comunicación) inicia la comunicación enviando una señal de inicio al bus. Esta señal consiste en una transición de alto a bajo en la línea SDA mientras la línea SCL está en alto.
2. **Dirección del dispositivo y bit de escritura/lectura:** Tras el inicio, el maestro envía la dirección del dispositivo con el que desea comunicarse. Esta dirección es de 7 bits y se envía a través de la línea SDA. El octavo bit es utilizado para indicar si la operación será de escritura o lectura. Un bit “0” indica una operación de escritura, mientras que un bit de “1” indica una operación de lectura.
3. **Reconocimiento de dirección:** Después de enviar la dirección del dispositivo, el maestro libera la línea SDA y espera una respuesta del dispositivo. Si al bus hay conectado un dispositivo con dicha dirección I²C y está listo para comunicarse, responderá manteniendo la línea SDA en bajo durante un período de tiempo específico. Esto se conoce como el bit de reconocimiento (ACK).
4. **Transmisión de datos:** Una vez que el maestro recibe el bit de reconocimiento, puede comenzar a transmitir datos al dispositivo (en caso de una operación de escritura) o recibir datos del dispositivo (en caso de una operación de lectura). Los datos se envían en paquetes de 8 bits y se transmiten a través de la línea SDA mientras la línea SCL está en bajo.
5. **Reconocimiento de datos:** Después de cada byte de datos transmitido o recibido, el receptor (ya sea el maestro o el dispositivo) envía un bit de reconocimiento (ACK). Si se recibe un bit de reconocimiento (la línea SDA se mantiene en bajo durante el tiempo de reconocimiento), el transmisor sabe que el byte se recibió correctamente y puede continuar con la siguiente transmisión.
6. **Fin de la comunicación:** Una vez que se han transmitido todos los datos necesarios, el maestro envía una señal de parada al bus. Esta señal consiste en una transición de bajo a alto en la línea SDA mientras la línea SCL está en alto.

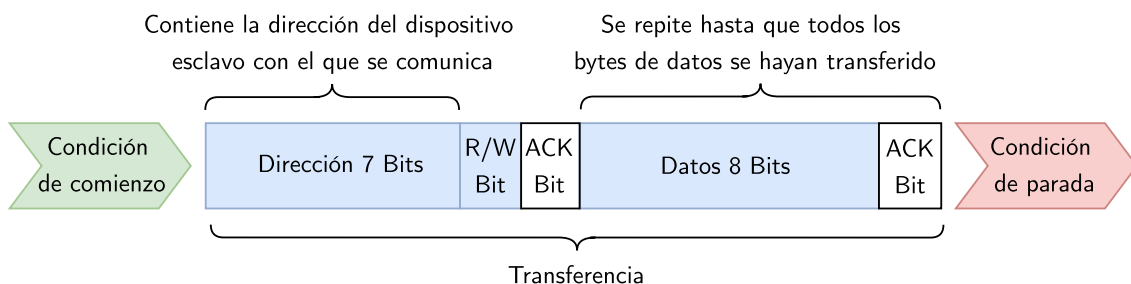


Figura 4.1.16: Información que circula por la línea SDA en una transferencia I²C.

Un detalle importante de la implementación del protocolo I²C es que todos los dispositivos conectados al bus deben de tener direcciones I²C distintas. Si dos dispositivos comparten la misma dirección y el maestro intenta comunicarse con uno de ellos, ambos dispositivos pueden responder al mismo tiempo. Esto crea una colisión en el bus y genera un problema

en la comunicación. Uno podría pensar que al disponer de direcciones de 7 bits, es decir de un total de 128 direcciones distintas, el conflicto de las direcciones es poco probable. Sin embargo, en la práctica no se dispone de todas las 128 direcciones posibles para conectar dispositivos I²C. Algunas de las direcciones están reservadas para usos específicos, y además algunos fabricantes de los dispositivos asignan direcciones específicas a sus productos fijando ciertos bits de la dirección. En el caso de los sensores MLX90395 usados en este trabajo, el fabricante Melexis fija los 6 bits más significativos de la dirección de 7 bits, dejando por lo tanto **solo 2 posibles direcciones** I²C para sus dispositivos (0x0C, 0x0D). El cambio entre las dos posibles direcciones se realiza por hardware, conectando el pin A0 del chip a tierra o alimentación (véase el *pinout* en la figura 3.2.14).

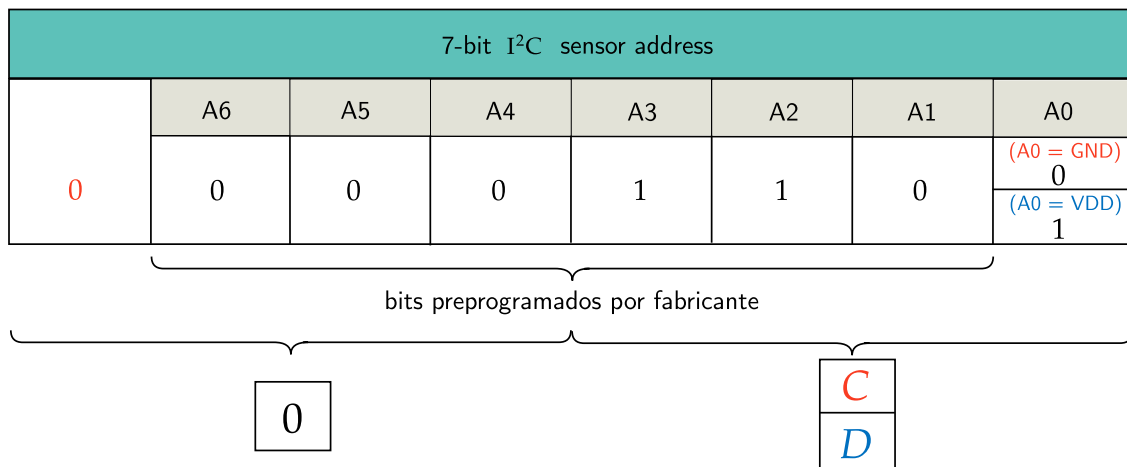
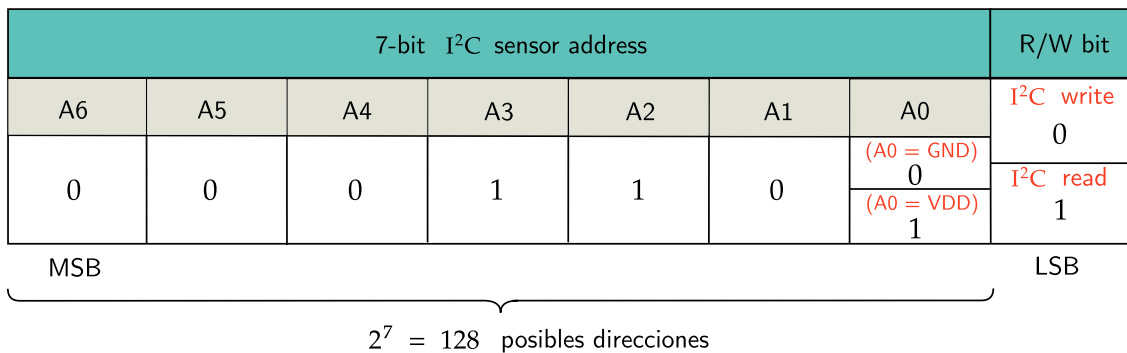


Figura 4.1.17: En la figura superior se muestran los 8 bit que se envían por la línea SDA al iniciar la comunicación con uno de los sensores MLX90395. En la figura inferior se muestran las 2 posibles direcciones I²C del sensor en binario y hexadecimal: 0x0C si A0 se conecta a tierra y 0x0D si A0 se conecta a la alimentación.

Esto supone un problema porque el sistema de alineación para uno de los solenoides del LEBT propuesto, requiere adquirir la señal de 8 sensores, 4 en cada uno de sus extremos. Es decir, se necesita conectar 8 sensores al bus de I²C. Sin embargo, no disponemos de 8 direcciones I²C distintas para diferenciar cada uno de los 8 sensores. Para resolver este problema se proponen dos posibles soluciones:

- **Disponer de varios buses I²C:** Si tuviéramos cuatro buses I²C distintos, conectado dos sensores a cada bus solucionaríamos el problema inmediatamente. Sin embargo,

el microcontrolador Arduino usado en este trabajo solo tiene de un bus I²C. Para ello, existen librerías de Arduino capaces de soslayar este problema, que permiten usar dos pines cualesquiera del Arduino para operar como las líneas SDA y SCL necesarias para la comunicación con dispositivos I²C.

- **Multiplexar las direcciones:** Esta solución implica usar un componente hardware adicional llamado multiplexor I²C. Este dispositivo actúa como un selector que permite redirigir la comunicación a uno de los dispositivos conectados a él. El multiplexor I²C tiene un puerto de entrada a partir del cual se conecta al maestro y múltiples puertos de salida a los que se conectan los distintos dispositivos. Este componente se encarga de gestionar la comunicación entre el maestro y los diferentes dispositivos conectados a través de él. El maestro envía una señal de control especial al multiplexor para seleccionar el dispositivo con el que desea comunicarse en ese momento. Tras ello, la comunicación entre el maestro y el dispositivo seleccionado continúa como si estuvieran directamente conectados sin la intervención del multiplexor. Por lo tanto, mediante esta solución el maestro se puede comunicar con los distintos dispositivos sin importar cuales sean sus direcciones I²C, pudiendo llegar a ser iguales entre si.

La alternativa seleccionada para el presente trabajo es esta última, más concretamente se hace uso del multiplexor I²C TCA9548A (Texas Instruments). Este es un multiplexor de 8 puertos, a partir del cual podemos conectar hasta 8 dispositivos con la misma dirección I²C a un mismo microcontrolador. En la figura 4.1.18 se muestra el *pinout* del chip. VIN y GND son la alimentación y tierra del chip. SDA y SCL son las líneas de datos y reloj respectivamente, necesarias para establecer la comunicación I²C entre el multiplexor y el microcontrolador. RST es el pin para reiniciar el chip. A0 A1 A2, son los pines de selección de dirección de del multiplexor I²C. SDx y SCx (SD0/SC0, ..., SD7/SC7) son los pines a los que se conectan las líneas de datos y reloj de lo dispositivos I²C con los que se quiere establecer comunicación.

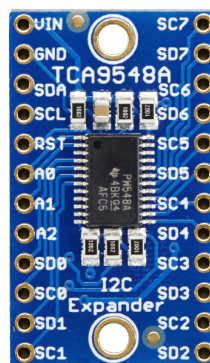


Figura 4.1.18: *Pinout* del multiplexor 1-8 TCA9548A.

En definitiva, desde el punto de vista práctico, para establecer la comunicación entre los sensores Hall y el Arduino se siguen dos pasos: En primer lugar, se establece comunicación I²C entre el Arduino y el multiplexor (la dirección por defecto del multiplexor es 0x70 pero se puede cambiar desde 0x70 a 0x77 a partir de los pines A0 A1 A2 del chip). Y desde código Arduino, se activa el puerto del multiplexor al que se encuentra conectado el sensor con el que se quiere establecer comunicación.

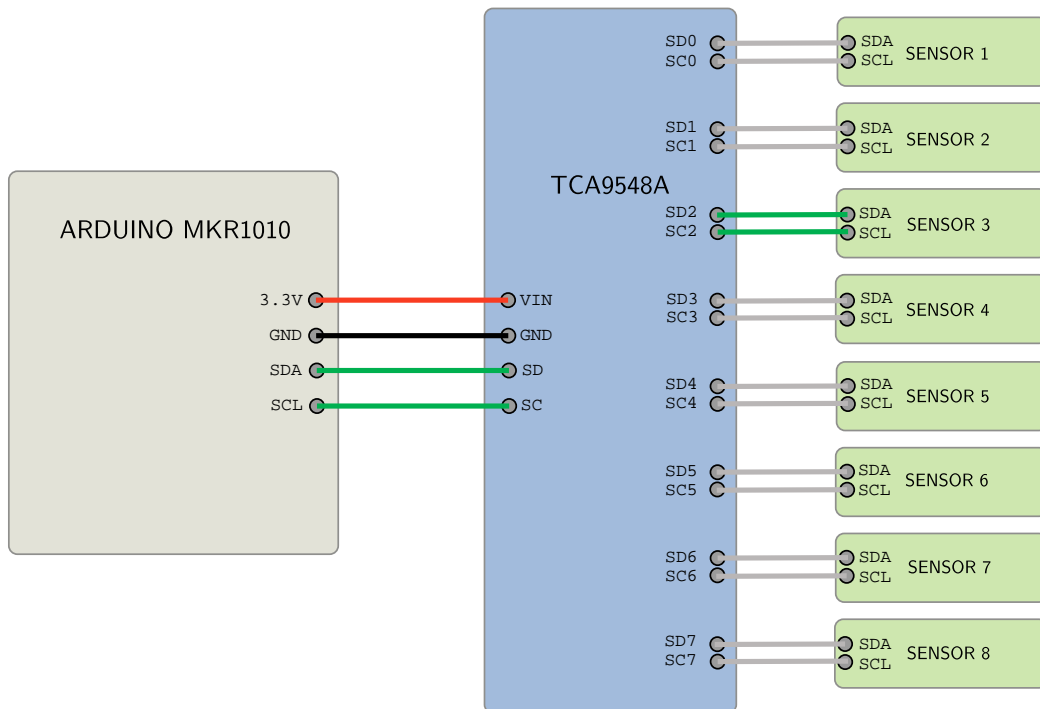


Figura 4.1.19: Ejemplo de operación del sistema de comunicación sensor-Arduino por medio del multiplexor TCA9548A. Se está estableciendo comunicación con el sensor 3 (las líneas SD2 y SC2 están activas).

En la figura 4.1.20 se muestra el montaje experimental implementado en una *protoboard* para verificar el funcionamiento del multiplexor con 4 sensores.

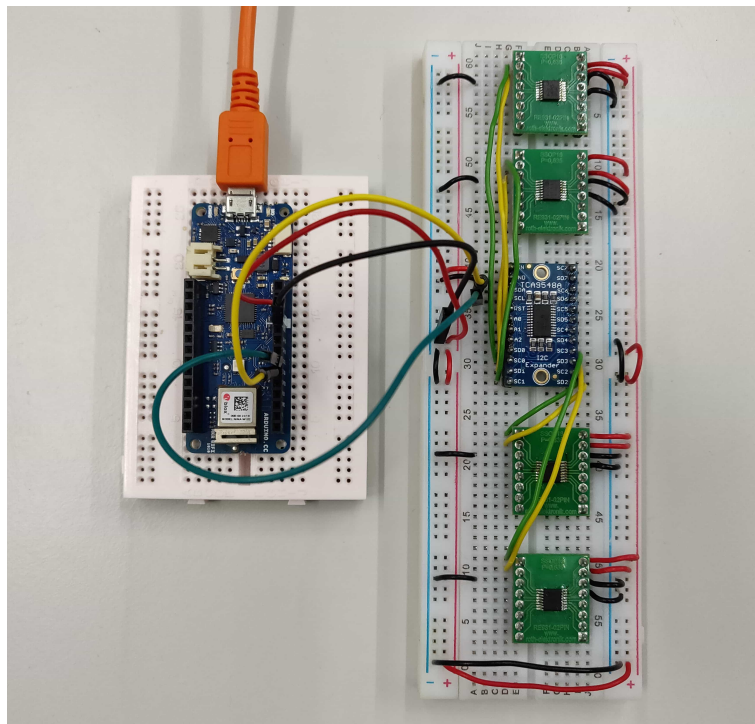


Figura 4.1.20: Verificación experimental del multiplexado de direcciones.

4.1.2. Comunicación Arduino-PC: Protocolo MQTT

La comunicación entre el Arduino y el ordenador en el que se procesan o visualizan los datos adquiridos, se puede hacer a partir de la conexión USB directa entre los dispositivos (figura 4.1.21). Sin embargo, el Arduino MKR 1010 usado en este trabajo, está específicamente diseñado para proyectos IoT; cuenta con conectividad WiFi y Bluetooth, implementadas a través del módulo NINA-W10. Por ello, se trata de aprovechar al máximo estas funcionalidades diseñando un canal de comunicación entre el Arduino y ordenador auxiliar al canal serie físico habitual. En la práctica, tendremos ambos canales de comunicación operativos, y trataremos uno de ellos como redundante.

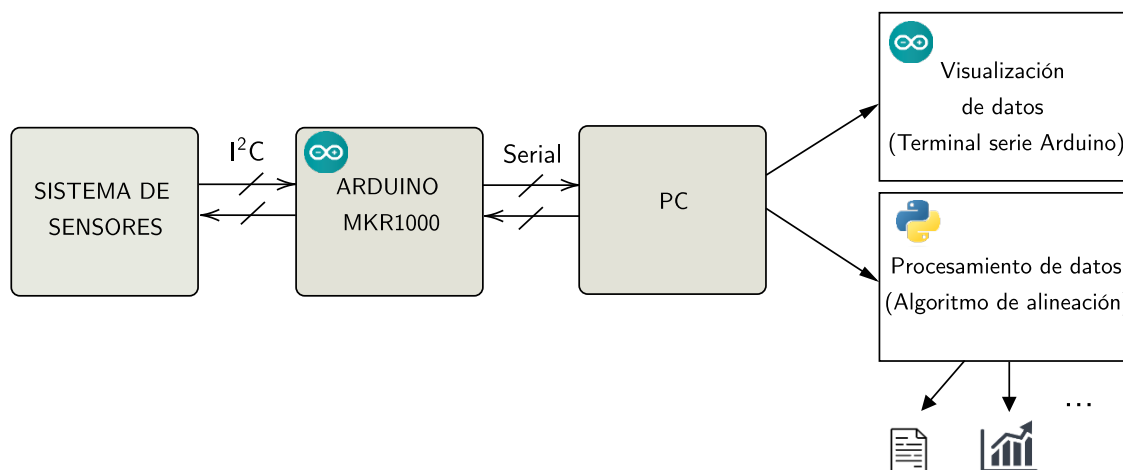


Figura 4.1.21: Sistema de comunicación Arduino-PC serie.

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) es un protocolo de red que permite el transporte de mensajes entre dispositivos. Se utiliza comúnmente en aplicaciones IoT para enviar y recibir datos de manera eficiente y segura [16].

En MQTT, hay dos partes principales: el editor (también conocido como cliente) y el destinatario (también conocido como suscriptor). El editor es responsable de enviar mensajes, mientras que el destinatario es el que recibe esos mensajes. La idea fundamental de MQTT es que el editor no envía datos directamente al destinatario, sino que los envía al servidor MQTT, también llamado broker, que luego se encarga de enrutar el mensaje al destinatario correspondiente. El proceso de envío de datos desde el editor al destinatario a través de MQTT se puede describir de la siguiente manera:

1. **Conexión inicial:** El editor y el destinatario establecen una conexión con el servidor MQTT. El servidor MQTT actúa como intermediario entre ellos y facilita la comunicación.
2. **Suscripción:** El destinatario envía un mensaje de suscripción al servidor MQTT indicando a qué tema o temas está interesado en recibir mensajes. Los temas son cadenas de texto que actúan como canales virtuales a los que los editores pueden enviar mensajes. Un destinatario puede suscribirse a uno o varios temas.
3. **Publicación:** El editor crea un mensaje y lo envía al servidor MQTT junto con el tema asociado al mensaje. El servidor MQTT recibe el mensaje del editor.
4. **Enrutamiento:** El servidor MQTT toma el mensaje recibido del editor y lo reenvía a todos los destinatarios que estén suscritos al tema asociado al mensaje. Esto se

logra a través de un mecanismo de enrutamiento basado en los temas suscritos por los destinatarios.

5. **Entrega del mensaje:** El destinatario que está suscrito al tema asociado al mensaje recibe el mensaje enviado por el editor.

En nuestra aplicación el Arduino actuará como editor y el ordenador como destinatario, y los datos a publicar en el servidor MQTT serán las medidas de los sensores Hall.

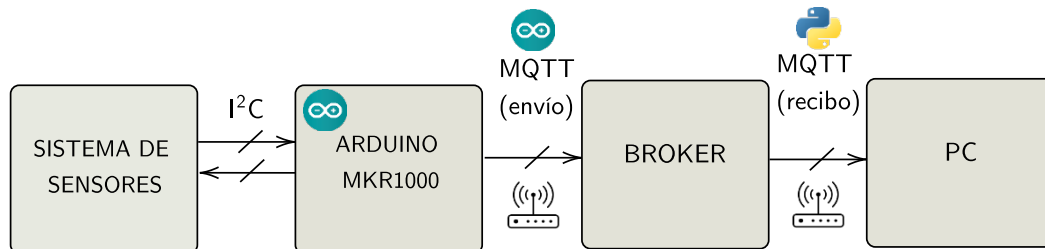


Figura 4.1.22: Sistema de comunicación Arduino-PC usado el protocolo MQTT.

Desde el punto de vista práctico, para la publicación de los datos por parte del Arduino se hace uso de la librería `ArduinoMQTTClient` [17], que nos permite asignarle al Arduino el papel de editor y publicar los datos que adquiere en el broker. El broker utilizado en este trabajo es Mosquitto, un broker de código abierto desarrollado por Eclipse. Para recoger los publicados en el servidor, se ha escrito un programa Python haciendo uso del módulo `paho-mqtt` [18].

4.2. Diseño mecánico de la estructura soporte de los sensores

El sistema de alineación propuesto se basa en colocar 4 sensores alrededor del tubo por el que discurre el haz en los dos extremos de cada uno de los solenoides del LEBT. Por lo tanto, se necesita diseñar una estructura capaz de acoplarse alrededor del tubo en la que se puedan situar los 4 sensores. Los requisitos que se imponen para su diseño es que ocupe el menor tamaño posible, puesto que espacio entre el tubo y la camisa de acero de los solenoides es limitado, y que se pueda acoplar y desacoplar del tubo fácilmente. La estructura se diseña en Fusion360 [19] y posteriormente se imprime en 3D.

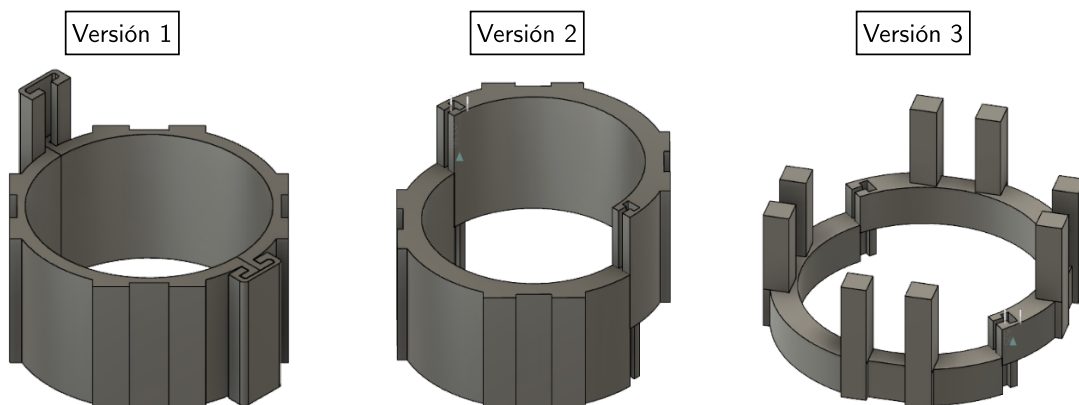


Figura 4.2.23: Historial de versiones de la estructura de soporte. Para cada versión se muestra el mecanismo de acople de sus dos mitades.

Para poder acoplar la estructura alrededor del tubo, es necesario que esta esté dividida en dos partes que se puedan encajar de cierta manera. En la figura 4.2.23 se muestra el resumen de la evolución de las versiones diseñadas. Las nuevas versiones solucionan problemas que se han encontrado en las versiones previas. En todas las versiones la forma de la estructuras diseñada es un anillo que rodea el tubo, y lo que cambia entre ellas es el mecanismo de acople de sus dos mitades. Igualmente, todas ellas cuentan con unos soportes rectos en los que se situarán los sensores soldados a las placas, mostrados en la figura 3.2.14.

En la primera versión que se propuso, las dos mitades se unían por medio de dos pestañas con forma de T con los salientes del anillo, como una corredera. El problema que se encontró es que para poder unir las dos partes firmemente se necesitaba aumentar las dimensiones de los salientes como de la pestaña, incumpliendo por lo tanto el requisito de compactibilidad. La siguiente versión solucionaba este problema utilizando un enganche de tipo “puzzle” para las dos piezas. Sin embargo, este modelo también se descartó porque debido a la rugosidad del material utilizado para la impresión 3D las dos piezas no deslizaban bien en forma de corredera, haciendo que su acople al tubo fuera complicado. Finalmente la tercera y última versión, utiliza el mismo tipo de unión que la anterior, pero esta vez la superficie de contacto de ambas piezas es menor, haciendo que deslicen mucho mejor y su acople al tubo sea más sencillo. Los 4 salientes tiene las dimensiones exacta de las placas a las que se han soldado los sensores, para reducir al máximo el tamaño de la pieza.



Figura 4.2.24: Estructura diseñada acoplada en una muestra del tubo del haz.

4.3. Calibración del sistema

Lo que buscamos para que el sistema de 4 sensores que se pone en los dos extremos de cada uno de los solenoides esté listo para la alineación, es que la verificación de las ecuaciones 2.3.1 y 2.3.2 vistas en la sección 2.3, que nos dicen si la magnitud del campo magnético medida por los sensores situados en la misma dirección y lados opuestos del tubo es la misma, nos sirvan como condición de alineación del sistema; y esto solo es posible si los dos sensores que hay enfrentados en cada una de las direcciones miden igual. Es decir, desde el punto de vista práctico no es relevante que los sensores estén midiendo de manera exacta la magnitud del campo magnético, sino que midan con la misma exactitud. Sin embargo, en principio esto no es algo que tengamos garantizado. Como el chip se fabrica en grandes lotes, todas las características del sensor se dan como un estudio estadístico. Esto significa que la hoja de datos no nos proporciona las características exactas de nuestra unidad, sino un rango de valores posibles con una probabilidad asociada. Por ejemplo, la sensibilidad es $2.5 \mu\text{T}/\text{LSB}_{16}$ con una incertidumbre de $\pm 8\%$.

La calibración del sistema se traduce en comprobar la condición mencionada en cada una de las direcciones en las que hay sensores. Para ello, se ha realizado un experimento que pretende darnos una idea semicuantitativa de si el sistema está calibrado.

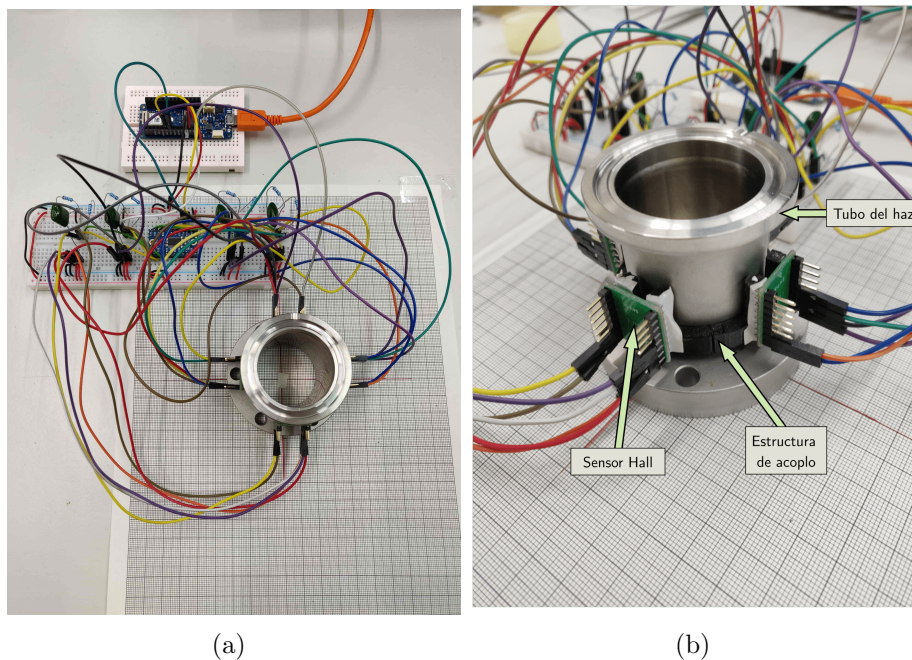


Figura 4.3.25: Sistema experimental para la calibración. En la figura a) se observa como las placas a las que se han soldado los sensores se han unido con cinta de doble cara al soporte diseñado.

A continuación se describe el procedimiento paso a paso que se ha realizado para la calibración en cada una de las direcciones.

1. La estructura para el acople de los sensores al tubo de haz se inserta en la muestra del tubo del haz del Linac-7. Se colocan los 4 sensores Hall en el soporte y el sistema de comunicación se configura siguiendo las indicaciones de la sección 4.1.
2. Se coloca un papel milimetrado debajo de la muestra del tubo del haz.

3. Se introduce en el tubo un imán de neodimio cilíndrico en una posición fija. El campo que general es simétrico respecto a su eje de revolución.
4. Mientras se están adquiriendo y visualizando las medidas de los sensores en la dirección en cuestión, desplazamos el tubo a lo largo de la dirección hasta encontrar el punto en el que la diferencia del campo medido por los dos sensores es nula. Con esto, podemos llegar a saber si alguno de los sensores tiene un *offset* respecto a las medidas del otro. Si el punto en el que se cumple la condición coincide con el centro del tubo (distancia media entre los dos sensores), entonces no hay ningún *offset*. Si por el contrario esto no es así, se anota la diferencia de los dos sensores medida cuando el imán está en el centro (δ). En tal caso, por lo tanto la condición de alineación en esa dirección ya no será $B_{s_i} - B_{s_{i+1}} = 0$ (siendo B_{s_i} y $B_{s_{i+1}}$ las medidas de los sensores en una misma dirección en extremos opuestos del tubo), sino que $B_{s_i} - B_{s_{i+1}} = \delta$. Este no ha sido el caso para ninguna de las direcciones de manera que nuestro criterio de alineación permanece inalterado.
5. Una vez encontrado dicho punto de referencia, se realizan medidas de la diferencia medida por dos sensores al desplazar el tubo en incrementos sucesivos $\pm d = 2$ mm (primero en un sentido y luego en otro). Con ello, podremos ver cómo de parecido miden los dos sensores.

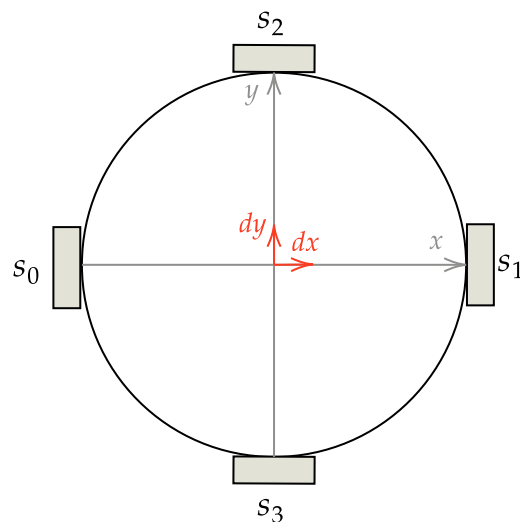


Figura 4.3.26: Sistema de referencia para el desplazamiento del imán. Las dos direcciones de desplazamiento coinciden con los ejes x e y .

En las figuras 4.3.27 se muestran los resultados experimentales de los desplazamientos sucesivos realizados en el paso 4. Desde el punto vista cualitativo, dada la simetría de las curvas respecto al origen, se observa que los dos sensores en una misma dirección y lados opuestos del sistema se comportan de manera similar. Podemos obtener una estimación cuantitativa de la desviación típica media de la diferencia de mover el imán en una u otra dirección. Por ejemplo para el eje x , teniendo en cuenta que se realizan 5 desplazamientos en cada uno de los sentidos ($i = 1, \dots, 5$):

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \overline{\Delta B_x} - \Delta B_{x,i}}{20}} = 6.84 \mu\text{T} \quad (4.3.3)$$

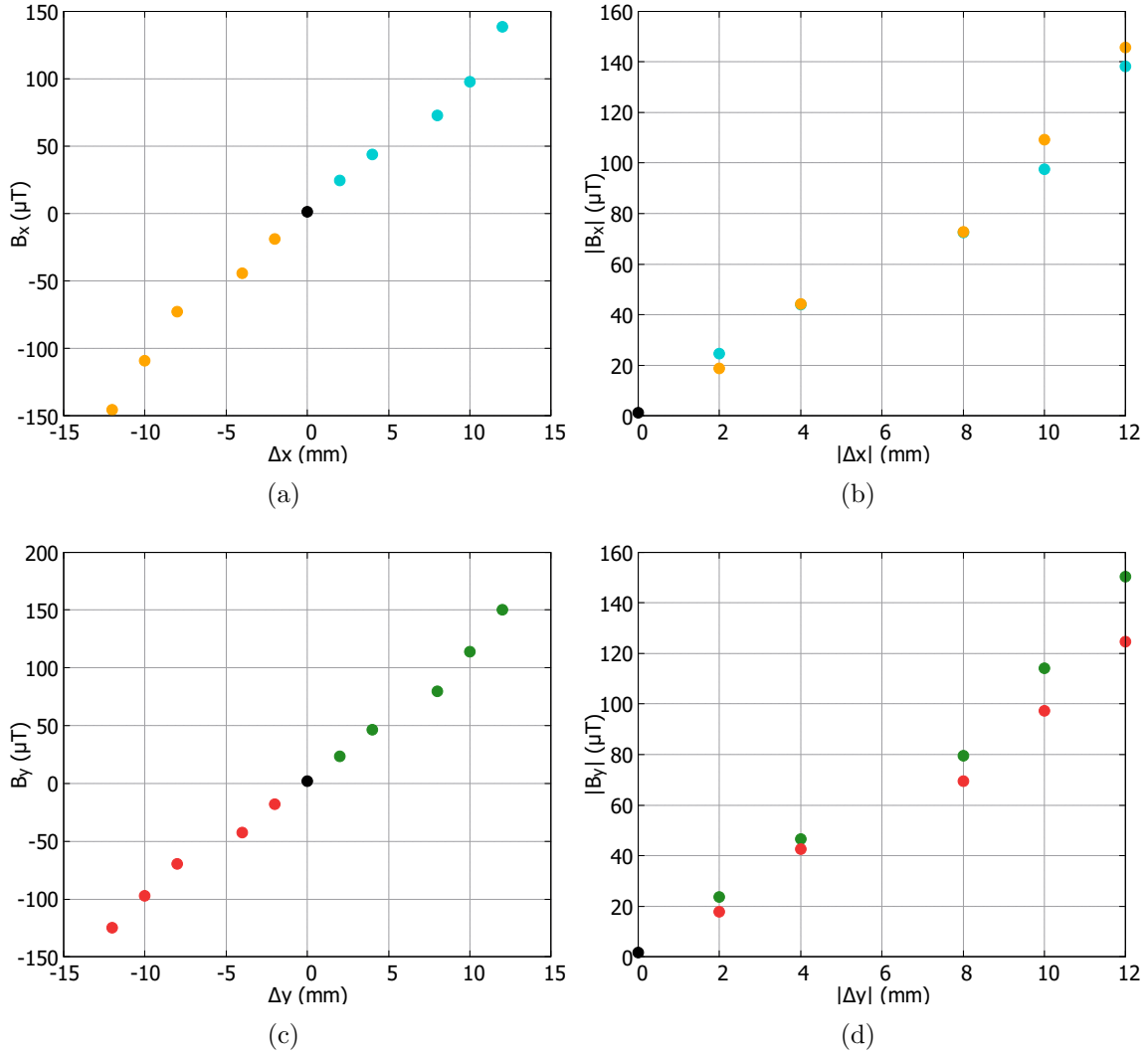


Figura 4.3.27: Variación de la diferencia medida por los dos sensores en una dirección determinada a), b) eje x; c), d) eje y. Las figuras b) y d) son equivalentes a a) y c) respectivamente, pero en ellas se representan las cantidades en valor absoluto, para una mejor comparación de de las medidas al desplazar el sistema en los dos sentidos de cada dirección.

siendo $\Delta B_{x,i}$ la variación de la diferencia medida por los dos sensores en la dirección x al mover el tubo en uno u otro sentido, es decir:

$$\Delta B_{x,i} = B_{x,i} |_{der} - B_{x,i} |_{izq} \quad (4.3.4)$$

donde $B_{x,i}$ es la diferencia medida por los dos sensores de la dirección x ($B_{s_0} - B_{s_1}$) al desplazar el tubo una cantidad $d \cdot i$ hacia la izquierda o derecha. Y, $\overline{\Delta B_x}$ es la media de los sucesivos $\Delta B_{x,i}$ ($i = 1, \dots, 5$):

$$\overline{\Delta B_x} = \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta B_{x,i}}{5} \quad (4.3.5)$$

Repetiendo los mismos cálculos para la dirección y , se obtiene $\sigma_y = 8.85 \mu\text{T}$.

Las cantidades σ_x y σ_y obtenidas son por lo tanto una estimación de la discrepancia en las medidas de los dos sensores al estar sometidos a un mismo campo magnético. Teniendo en cuenta que los campos esperados a medir en el LEBT son del orden ~ 10 mT (tabla 1), se concluye que tener una discrepancia del orden de $10 \mu\text{T}$ (es decir, de 0.1 %) entre las medidas de los sensores de una misma dirección es aceptable para la correcta alineación del sistema.

5. Algoritmos para la alineación in situ

A partir de la magnitud medida por los sensores dispuestos alrededor del tubo del haz, se debe de diseñar un algoritmo capaz de decirnos qué desplazamientos debemos de dar a los solenoides, para conseguir alinear sus ejes magnéticos con el eje mecánico del tubo. Los desplazamientos físicos de los solenoides se realizan mediante un sistema de dos micrómetros por solenoide, capaz de mover los dos extremos de un solenoide en el plano xy . Se proponen dos alternativas, una de ellas aprovecha los caracterización magnética del sistema mediante simulaciones obtenida en la sección 2.3, y la otra es general, no necesita del conocimiento de campo magnético simulado.

Tal y como se vio en la sección 2.3, la alineación de un solenoide se consigue con la alineación de sus dos planos extremos con el eje mecánico del tubo del haz. Por lo tanto, el mismo proceso de alineación se debe de aplicar a los dos extremos del solenoide. En esta sección, se explicará la base teórica de cada uno de los métodos para la alineación de uno de los extremos del solenoide, y se describirán brevemente algunos detalles de la implementación realizada mediante código Arduino y Python. Todos los códigos están disponibles en el repositorio GitHub creado para este trabajo.

5.1. Algoritmo basado en los datos de la simulación

5.1.1. Base teórica del método

Para la explicación de este método se usa un ejemplo particular, y se describen los pasos de una iteración partiendo de un determinado estado inicial del sistema.

1. Con los valores B_{s_0} y B_{s_1} medidos por los sensores, si conociéramos la forma funcional exacta de $B(x)$ (campo magnético en la dirección en la que están situados los sensores s_0 y s_1), sabríamos cuánto desplazar el solenoide en la dirección x para que $B_{s_0} \neq B_{s_1}$ y por lo tanto alinear el eje magnético y mecánico del tubo.

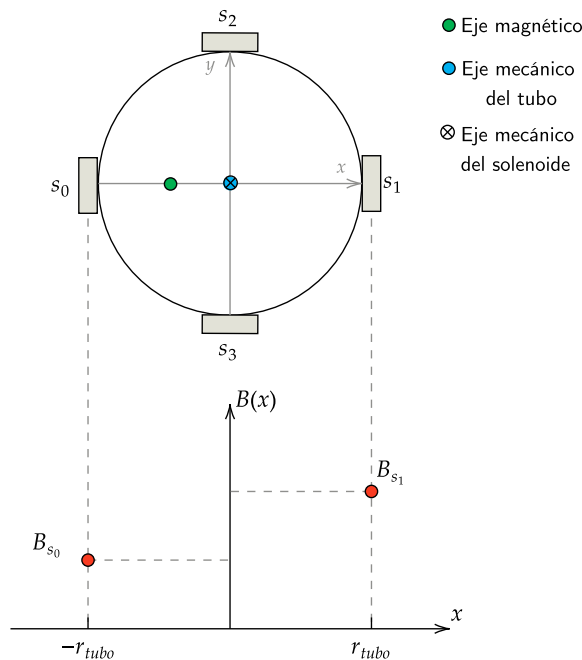


Figura 5.1.28: Estado inicial del sistema: $B_{s_0} < B_{s_1}$, por lo tanto para alinear el eje magnético y mecánico del tubo hay que desplazar el solenoide una cantidad $\Delta x > 0$.

- Sin embargo, nosotros no conocemos la forma funcional $B(x)$ exacta. En su ausencia, usamos las aproximaciones polinómicas obtenidas en la sección 2.4 a partir de las simulaciones magnéticas.

Si el ajuste polinómico lineal fuera exactamente igual que la función $B(x)$, para que la magnitud del campo magnético medida por los sensores s_0 y s_1 sea la misma, bastaría con desplazar el solenoide una cantidad Δx tal que el campo medido por ambos sensores sea igual a $(B_{s_0} + B_{s_1})/2$ (figura 5.1.29). El desplazamiento vendrá dado por:

$$\Delta x = f^{-1}\left(\frac{B_{s_0} + B_{s_1}}{2}\right) - f^{-1}(B_{s_0}) \quad (5.1.6)$$

siendo $f(x)$ la aproximación lineal del campo magnético obtenida en la sección 2.4.

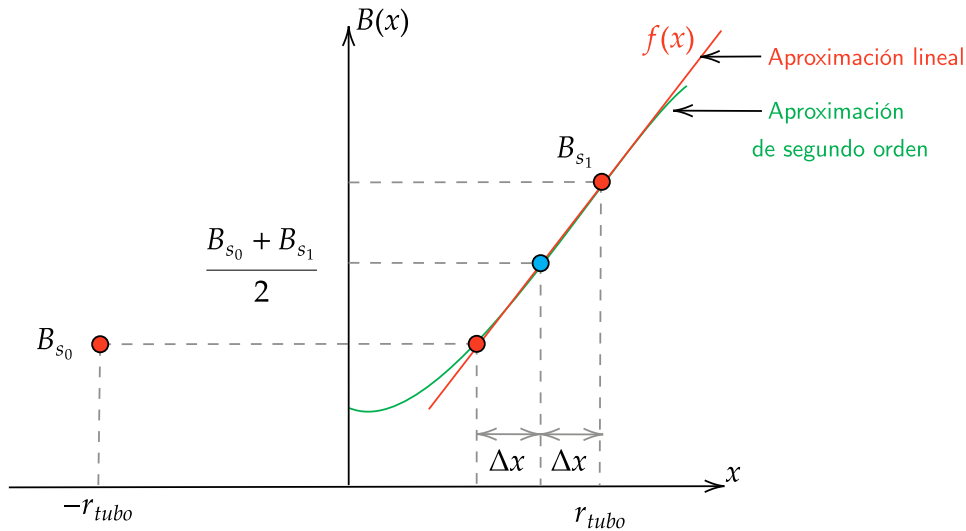


Figura 5.1.29: Obtención del desplazamiento Δx a partir de las aproximaciones polinómicas de la forma funcional del campo magnético.

- En el caso de que las curvas experimentales se ajustasen perfectamente a las de la simulación, bastaría con una iteración como la explicada para conseguir alinear el extremo del solenoide en cuestión. Sin embargo, lo esperado es que esto no sea así. Por lo tanto, si tras el desplazamiento Δx dado no se cumple aún que la magnitud del campo medido por s_0 y s_1 sea la misma, el procedimiento explicado se repite iterativamente con los nuevos valores de B_{s_0} y B_{s_1} medidos, hasta llegar a tener $B_{s_0} = B_{s_1}$. Para la verificación de esta igualdad se deberá de tener en cuenta la resolución de los sensores. Dicho de otra manera, habrá un punto en el que la diferencia entre las magnitudes medidas por ambos sensores no se pueda reducir más y por lo tanto daremos el sistema por alineado.

Para una mejor visualización del método, en el ejemplo elegido solo se ha requerido de desplazamientos en el eje x para la alineación. En el caso de que también sea necesario realizar desplazamientos en el eje y (es decir, $B_{s_2} \neq B_{s_3}$), el procedimiento para la alineación en este eje sería análogo al visto en el eje x . Se usarían las mismas aproximaciones polinómicas dada la simetría de revolución del solenoide.

5.1.2. Implementación del método

La implementación de este método para la alineación de un solenoide, se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Se recibe en tiempo real la medida de los 8 sensores de acuerdo al mecanismo de comunicación visto en la sección 4.1.
2. Un programa escrito en Python se encarga de calcular los desplazamientos Δx , Δy que se deben de aplicar al solenoide, a partir de la fórmula 5.1.6 aplicada a los datos adquiridos, y los muestra por pantalla.
3. El proceso de alineación terminará cuando los desplazamientos que debamos de aplicar sean menores a una tolerancia establecida, fijada por los errores de los sensores. Mientras esto no se así se vuelve al paso 1.

Un detalle importante a destacar es que para eliminar la mayoría del ruido aleatorio de las medidas de los sensores, los datos que se envían por MQTT son el promedio de un número determinado (p.ej. 100) de medidas individuales tomadas en intervalos de 0.1 ms.

5.2. Algoritmo general basado en Newton-Raphson

5.2.1. Base teórica del método

En el caso de que nos dispongamos de las simulaciones de campo magnético de los solenoides del LEBT, este método nos sirve para alinear en las direcciones de manera general. En este caso, para la explicación nos centraremos en la alineación de una de las direcciones sin pérdida de generalidad, puesto que la alineación en cada una de las direcciones, son análogas e independientes entre si.

El problema de alinear en la dirección de uno de los ejes (p. ej. el x), se traduce en encontrar la raíz de la función diferencia entre la magnitud medida por los 2 sensores s_0 y s_1 , considerada como una función del desplazamiento del micrómetro que controla la posición en el eje x : $B_x(x) = B_{s_0} - B_{s_1}$. Inspirándose en la filosofía del conocido método de Newton-Raphson [20], el algoritmo que se propone para encontrar la raíz de esta de la función es:

1. Partimos de un punto x_0 aleatorio; la diferencia medida es $B_x(x_0)$.
2. Movemos el solenoide una cantidad Δx determinada y vemos cuál es la variación de la diferencia medida por los dos sensores, es decir:

$$\Delta B_x = B_x(x_0 + \Delta x) - B_x(x_0) \quad (5.2.7)$$

3. A partir de Δx y ΔB_x tenemos la ecuación de una recta.

$$B_x(x) = B_x(x_0) + \frac{\Delta B_x}{\Delta x}(x - x_0) \quad (5.2.8)$$

La raíz de esta ecuación, x_1 , es una mejor aproximación de la raíz buscada que el valor x_0 inicial. De modo que, mediante el micrómetro, desplazamos el solenoide una cantidad $d = x_1 - x_0$, acercándonos más de esta manera a la configuración de alineación que buscamos.

$$x_1 = x_0 - \frac{B_x(x_0)}{\Delta B_x / \Delta x} \implies d = x_1 - x_0 = -\frac{B_x(x_0)}{\Delta B_x / \Delta x} \quad (5.2.9)$$

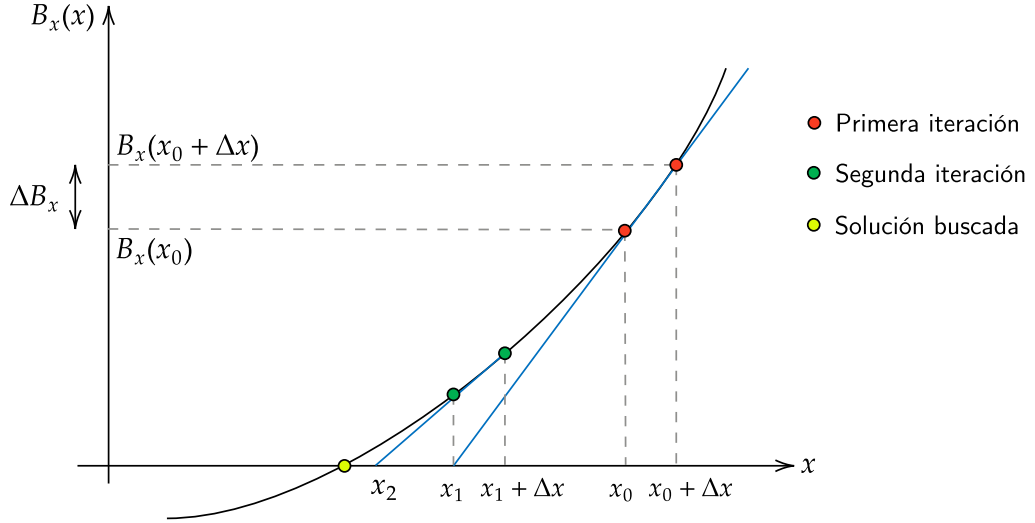


Figura 5.2.30: Visualización del método de Newton-Raphson para la búsqueda de la raíz de la función $B_x(x)$.

4. Repitiendo este proceso iterativamente conseguimos obtener estimaciones de la raíz de la función $B_x(x)$ cada vez mejores, hasta conseguir la convergencia.

La generalización para la alineación de los ejes x e y se puede expresar de manera matricial. Por una parte las aproximaciones lineales del paso 3, resultan ser:

$$\begin{bmatrix} B_x(x) \\ B_y(y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta B_x / \Delta x & 0 \\ 0 & \Delta B_y / \Delta y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x(x_0) - \frac{B_x}{\Delta x} x_0 \\ B_y(y_0) - \frac{B_y}{\Delta y} y_0 \end{bmatrix} \quad (5.2.10)$$

De aquí, obtenemos las nuevas estimaciones de las raíces, y con ello los desplazamientos d_x, d_y que debemos de aplicar al solenoide.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{B_x(x_0)}{\Delta B_x / \Delta x} \\ \frac{B_y(y_0)}{\Delta B_y / \Delta y} \end{bmatrix} \implies \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{B_x(x_0)}{\Delta B_x / \Delta x} \\ \frac{B_y(y_0)}{\Delta B_y / \Delta y} \end{bmatrix} \quad (5.2.11)$$

5.2.2. Implementación del método

A continuación, se resumen los pasos principales para la alineación de uno de los extremos de un solenoide según este método.

1. El Arduino está en todo momento adquiriendo las señales de los sensores, hasta que en un determinado momento el usuario introduce por el terminal serie de Arduino el desplazamiento $(\Delta x, \Delta y)$ que quiere realizar. A partir de ese momento se desencadenan los pasos que se describen a continuación.

2. Se guarda el último dato de la diferencia entre la magnitud medida por los 2 sensores en cada una de las direcciones. Es decir, $B_x(x_0) = B_{s_0}(x_0) - B_{s_1}(x_0)$ y $B_y(y_0) = B_{s_2}(y_0) - B_{s_3}(y_0)$.
3. Se espera hasta que el usuario presione ENTER, indicando que ya ha realizado el desplazamiento $(\Delta x, \Delta y)$ con los micrómetros.
4. Las nuevas diferencias adquiridas, es decir $B_x(x_0 + \Delta x) = B_{s_0}(x_0 + \Delta x) - B_{s_1}(x_0 + \Delta x)$ y $B_y(y_0 + \Delta y) = B_{s_2}(y_0 + \Delta y) - B_{s_3}(y_0 + \Delta y)$, se utilizan para calcular ΔB_x y ΔB_y a partir de la ecuación 5.2.7.
5. Calculamos los desplazamientos (d_x, d_y) que debemos de aplicar al extremo del solenoide partir de la fórmula 5.2.11.
6. El proceso de alineación terminará cuando los desplazamientos que debamos de aplicar sean menores a una tolerancia establecida, fijada por los errores de los sensores. Mientras esto no se así se vuelve al paso 1.

6. Conclusiones

En este trabajo, se ha presentado un sistema de alineación en tiempo real de los solenoides que forman parte del LEBT de un acelerador lineal de partículas. El sistema se ha realizado principalmente a partir de sensores Hall, y un microcontrolador Arduino para la adquisición de medidas.

En primer lugar, se ha obtenido una caracterización magnética de los solenoides, a partir de simulaciones llevadas a cabo mediante *COMSOL Multiphysics*. Estas simulaciones han mostrado que para corrientes de excitación inferiores a 3 A, la magnitud esperada del campo magnético a medir por los sensores Hall no es superior a 50 mT. Con ello, y teniendo en cuenta características particulares del Linac-7, se ha diseñado una lista de criterios de selección en base a la cual se ha seleccionado, e implementando un sensor Hall triaxial, que cumple con todos los requisitos exigidos por la aplicación.

Para la adquisición de las medidas de los sensores, se ha diseñado un mecanismo de comunicación robusto y versátil a partir de los ya establecidos protocolos de comunicación I²C y MQTT, cuyas bases teóricas han sido presentadas. En este proceso, se destaca la solución original que se ha propuesto para la resolución del conflicto de direcciones I²C, basada en un multiplexor de direcciones. Así como, el uso de las funcionalidades IoT del microcontrolador Arduino, que nos ha permitido establecer una transmisión inalámbrica con el dispositivo final de la adquisición, en el que se procesan los datos (ordenador).

Tras diseñar y construir un soporte 3D para los sensores alrededor del tubo del haz, el sistema desarrollado se ha sometido a un experimento para la comprobación de su funcionamiento. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema diseñado cumple su propósito para la alineación del LEBT: el error en la alineación viene caracterizado por una diferencia del orden de $10 \mu\text{T}$ entre las medidas sus sensores cuando están sometidas a un mismo campo magnético. Teniendo en cuenta que la magnitud de los campos magnéticos que se esperan medir son del orden de 10 mT, esto se traduce en un error relativo de tan solo 0.1 %.

El sistema se completa con el diseño de 2 algoritmos que a partir a las medidas de los sensores adquiridas, nos dicen qué desplazamientos debemos de aplicar a cada solenoide para alinear su eje magnético con el eje mecánico del tubo del haz. Uno de ellos aprovecha los resultados de la simulación magnética del sistema obtenida en este trabajo. El otro no necesita de información previa sobre el sistema, y por lo tanto su correcto funcionamiento no está limitado a la precisión de los resultados obtenidos por la simulación. Además de presentar el fundamento teórico detrás de cada uno de los métodos, ambos métodos se han implementado en código.

Finalmente, en cuanto a las futuras líneas de este trabajo se propone la comparación experimental de los dos métodos de alineación desarrollados, contrastando el número de iteraciones necesarias para la alineación con cada uno de ellos. Así como, la optimización del diseño propuesto, utilizando menos sensores Hall para la alineación de cada solenoide.

Bibliografía

- [1] T. P. Wangler, *RF Linear Accelerators*, 2.^a ed. (Germany: Wiley-VCH, 2008).
- [2] *SLAC National Accelerator Laboratory*, <https://www6.slac.stanford.edu/>, Accedido: 2023-6-15.
- [3] S. Sheehy, *Applications of Accelerators. Lectures of the CAS-CERN Accelerator School: Introduction to accelerator physics*, <https://indico.cern.ch/event/685255/timetable/>, Accedido: 2023-6-15, 2018.
- [4] J. Feuchtwanger et al., «New Generation Compact Linear Accelerator for Low-Current, Low-Energy Multiple Applications», *Applied Sciences* **12** (2022).
- [5] I. Arredondo et al., «Design and validation of the LEBT for the project Linac-7, a low-current low-energy compact linac», (2023).
- [6] V. Etxebarria et al., «Manufacturing of Radiopharmaceutical Isotopes through the Linac 7 Accelerator for Biomedical Applications», *DYNA* **97**, 301 (2022).
- [7] L. R. Prost, «Selected List of Low Energy Beam Transport Facilities for Light-Ion, High-Intensity Accelerators», (2016).
- [8] K. Hanke, S. Heising y R. Scrivens, «Comparison of the Beam Dynamic Solutions for Low Energy Beam Transport Systems for a Laser Ion Source at CERN», (2001).
- [9] D. Brandt, *CERN Accelerator School: Course on Beam Diagnostics* (CERN, Geneva, 2009).
- [10] *COMSOL Multiphysics v. 6.1. AC/DC module*, <https://www.comsol.com/acdc-module>, Accedido: 2023-6-15.
- [11] *Texas Instruments TMAG5273 Hall sensor data sheet*, <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmag5273.pdf>, Accedido: 2023-6-15.
- [12] *Allegro microsystems ALS31313 Hall sensor data sheet*, <https://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/als31313-datasheet.pdf>, Accedido: 2023-6-15.
- [13] *Melexis MLX90395 Hall sensor data sheet*, https://www.mouser.es/datasheet/2/734/Melexis_MLX90395_Datasheet_Melexis3-1863596.pdf, Accedido: 2023-6-15.
- [14] *Arduino MKR 1000 WiFi*, <https://docs.arduino.cc/hardware/mkr-1000-wifi>, Accedido: 2023-6-15.
- [15] F. Leens, «An introduction to I2C and SPI protocols», *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* **12**, 8 (2009).
- [16] G. Hillar, *MQTT Essentials - A Lightweight IoT Protocol* (Packt Publishing, 2017).
- [17] *ArduinoMqttClient*, <https://github.com/arduino-libraries/ArduinoMqttClient>, Accedido: 2023-6-15.
- [18] *Eclipse Paho MQTT Python client module*, <https://pypi.org/project/paho-mqtt/>, Accedido: 2023-6-15.
- [19] *Autodesk Fusion 360*, <https://www.autodesk.es/products/fusion-360>, Accedido: 2023-6-15.
- [20] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling y B. P. Flannery, *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*, 3.^a ed. (Cambridge University Press, USA, 2007).