

# Resumen

Las exigentes tolerancias de alineación en los componentes de los futuros colisionadores lineales de partículas requieren el desarrollo de nuevas técnicas de alineación más precisas que las existentes. Este es el caso del Colisionador Lineal Compacto (Compact Linear Collider, CLIC), cuyos objetivos altamente restrictivos de alineamiento alcanzan los  $10\ \mu\text{m}$ . Para poder lograr el máximo rendimiento del acelerador, es necesario que el posicionamiento de las estructuras que aceleran las partículas y de los campos que las guían cumplan las tolerancias de alineación para dirigir el haz a lo largo de la trayectoria diseñada. Dicho procedimiento consiste en relacionar la posición de los ejes de referencia de cada componente con respecto a objetos externos, o fiduciales, lo cual resulta muy tedioso y económicamente costoso. Los errores sistemáticos y aleatorios se van acumulando en cada paso del proceso y, en consecuencia, la precisión final de alineamiento es todo un desafío.

En este contexto, nace el proyecto PACMAN (Particle Accelerator Components Metrology and Alignment to the Nanometre scale), subvencionado por la Unión Europea en el programa FP7 de financiación para la investigación e innovación. El objetivo principal de PACMAN es investigar, desarrollar e implementar una solución integrada alternativa que incorpore todos los pasos de alineación en una misma ubicación, con el objetivo de mejorar la precisión de alineación de los componentes de los aceleradores, en concreto: las estructuras aceleradoras, los cuadrupolos y los monitores de posición de haz. La viabilidad de las soluciones desarrolladas y la precisión de alineamiento alcanzada deben demostrarse en un banco de pruebas utilizando componentes de CLIC. La estrategia de PACMAN para alcanzar el objetivo técnico se divide en tres pasos. El primero consiste en la fiducialización de los componentes y sus soportes. El segundo paso es el ensamblaje de los componentes en dos tipos de soporte, uno compuesto por un monitor de posición de haz y un cuadrupolo, y otro con cuatro estructuras aceleradoras, tomando como referencia su centro electromagnético. Finalmente, ambos soportes se transportan al túnel para su alineación final utilizando técnicas de hilos tensados.

En esta tesis doctoral, se describe el desarrollo de una nueva técnica no destructiva para localizar los ejes electromagnéticos de estructuras aceleradoras y su validación experimental. Para ello, se ha utilizado una estructura aceleradora de CLIC conocida como TD24. En el primer capítulo, se realiza una introducción a las técnicas de alineamiento en los aceleradores de partículas y a las novedosas propuestas de futuros colisionadores lineales. Finalmente, se describe en detalle el proyecto PACMAN.

---

En el segundo capítulo, se presentan las características técnicas de la TD24 y se realiza una revisión del estado del arte de los métodos de medidas del centro electromagnético de estructuras aceleradoras. Debido a la complejidad mecánica de la TD24, su difícil acceso y su diámetro medio de iris de 5.5 mm, se desarrolla una nueva técnica denominada en esta tesis como *el método perturbativo* y se realiza una propuesta experimental de validación. El estudio de viabilidad de este método, cumpliendo con los requisitos impuestos de precisión en la medida de 10  $\mu\text{m}$ , ha sido realizado con una campaña extensa de simulaciones de campos electromagnéticos en tres dimensiones utilizando la herramienta de software conocida como HFSS. Los resultados de simulación han permitido el desarrollo de un algoritmo muy completo de medidas y han proporcionado las especificaciones técnicas para el diseño conceptual de un banco de pruebas para la medida de los ejes electromagnéticos de la TD24.

En el capítulo tres, se describe el diseño, la fabricación y la calibración del banco experimental. Este proceso ha tenido en consideración una configuración sencilla de sus elementos para mover la estructura aceleradora en dos grados de libertad alrededor del hilo y localizar los ejes electromagnéticos en un plano ortogonal, además de facilitar la inserción del hilo a lo largo de la estructura sin dañar su superficie interna. Para poder obtener la precisión deseada en la medida de los ejes con el mínimo error, en el montaje del banco se emplea el instrumento de medida de coordenadas (Coordinate Measuring Machine, CMM) más novedoso en el CERN, con solo 0.3  $\mu\text{m}$  de incertidumbre. Asimismo, se ha desarrollado e integrado en LabVIEW una plataforma de usuario para la realización automática del algoritmo de medición de los ejes. Además, se proponen futuras líneas de investigación y desarrollo del método perturbativo, cuya viabilidad han sido previamente examinadas.

En el capítulo 4, se resumen los numerosos test experimentales realizados con el banco, cuyos resultados se analizan y comparan con los obtenidos mediante simulación. En una primera etapa, se realiza la prueba de principio de los supuestos del método y la primera medición del centro electromagnético con el banco, aún en fase inicial de desarrollo. A continuación, se procede con las calibraciones de los instrumentos de medida y se reemplazan elementos diseñados y elaborados para mejorar la precisión. La finalización del banco de pruebas y sus correspondientes calibraciones, la incorporación de nuevos tratamientos de las medidas en el algoritmo final y la caracterización de fuentes de error en la medida, favorecieron la localización del centro electromagnético en la TD24 con una precisión menor a 1  $\mu\text{m}$  con un error estimado menor que  $\pm 8.5 \mu\text{m}$ , cumpliendo con los objetivos de precisión establecidos.

Finalmente, en el capítulo 5, se realiza un resumen del trabajo de investigación desarrollado a lo largo de esta tesis. Asimismo, se enumeran y analizan los logros innovadores efectuados en el proyecto PACMAN y su impacto.