



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería Electrónica y Automática

Técnicas de sensorización para caracterización y control de dispositivos electromecánicos

Autor

Juan Anzola Trevijano

Director

Edgar Jorge Ramírez Laboreo

Ponente

Carlos Sagüés Blázquez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2015





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Juan Anzola Trevijano

con nº de DNI 16630360A en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática, (Título del Trabajo)

Técnicas de sensorización para caracterización y control de dispositivos  
electromecánicos

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada  
debidamente.

Zaragoza, 01/09/2015

Fdo: Juan Anzola Trevijano



---

# Técnicas de sensorización para caracterización y control de dispositivos electromecánicos

## RESUMEN

---

El presente trabajo fin de grado se enmarca dentro de la colaboración de la Universidad de Zaragoza con BSH Electrodomésticos España. El principal objetivo del mismo es el sensado de diferentes variables en relés electromecánicos. El trabajo se incluye dentro de una línea de investigación más amplia que engloba tareas de modelado, caracterización, simulación y control de estos dispositivos.

En primer lugar, se han estudiado distintos métodos y se han valorado varios equipos que permitan medir la posición del mecanismo presente en un relé electromecánico. Dicha posición es crítica a la hora de caracterizar correctamente el dispositivo y también como realimentación de cualquier sistema control que pueda llegar a proponerse.

La segunda variable a medir es el ruido generado en las conmutaciones de apertura y cierre del relé. En ambos procesos, los impactos que se producen entre distintos elementos móviles del mecanismo originan ruidos que pueden llegar a ser molestos. Resulta interesante por tanto estudiar el origen de los mismos y la relación que puedan tener con los diferentes parámetros del relé. Para ello se han evaluado distintos micrófonos y se ha seleccionado uno según criterios de coste y calidad de la señal.

Además, se ha diseñado e implementado un banco de pruebas que permite la realización de ensayos sobre relés electromecánicos. Se ha tratado de aportar una gran versatilidad al diseño y se ha conseguido un montaje que permite la activación del relé de modo manual o automático, con distintas configuraciones del circuito de activación y que puede ser utilizado con cualquier modelo de relé del mercado.



## AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a todas aquellas personas que han hecho posible la realización de este Trabajo Fin de Grado. En especial, a mi director, Edgar Ramírez, y a mi ponente, Carlos Sagiés, por el tiempo, dedicación y ayuda que en todo momento me han brindado.

Agradecer también el apoyo de la familia y amigos, presentes siempre en los buenos y en los malos momentos.

A todos ellos,

Gracias.



# ÍNDICE

<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
1.1. Motivación .....	11
1.2. Descripción y funcionamiento del relé electromecánico .....	12
1.3. Estado del arte .....	14
1.4. Objetivos y alcance .....	14
1.5. Estructura de la memoria .....	15
<b>2. Medición de la posición del mecanismo</b>	<b>17</b>
2.1. Objetivo de la medición .....	17
2.2. Análisis del problema .....	17
2.3. Estudio de alternativas .....	19
2.4. Evaluación sensores láser .....	20
2.4.1. Evaluación sensor LK-G5000 .....	21
2.4.2. Evaluación sensor LK-G3000 .....	22
2.4.3. Comparación de los equipos .....	23
2.5. Estudio de la evolución de la posición .....	24
2.5.1. Ensayos en relé RZ .....	24
2.5.2. Ensayos en relé PBH .....	25
2.5.3. Ensayos en relé T9 .....	27
2.5.4. Discusión de resultados .....	29
2.6. Evaluación cámara lineal .....	30
<b>3. Medición del ruido</b>	<b>33</b>
3.1. Introducción .....	33
3.2. Búsqueda de micrófonos .....	33
3.3. Evaluación experimental y selección del dispositivo .....	34
3.4. Estudio del ruido .....	35
3.4.1. Estudio frecuencial del ruido .....	35
3.4.2. Estudio del origen del ruido .....	38
3.4.2.1. Origen del ruido en relé RZ .....	38
3.4.2.2. Origen del ruido en relé PBH .....	39
3.4.2.3. Origen del ruido en relé T9 .....	41
3.4.2.4. Discusión de resultados .....	42
<b>4. Diseño banco de pruebas</b>	<b>43</b>
4.1. Diseño PCB .....	43
<b>5. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>45</b>
5.1. Conclusiones .....	45
5.2. Líneas futuras .....	47
<b>Bibliografía</b>	<b>49</b>



# Capítulo 1

## **Introducción**

---

El relé se consolida hoy en día como uno de los dispositivos más importantes en el mundo de la electrónica a la hora de actuar como elemento intermedio entre los circuitos de potencia y de control. Dentro de la amplia gama de relés que existen, este trabajo se centra en los relés electromecánicos, caracterizados por conectar circuitos eléctricos mediante el movimiento físico de un material conductor, esto es, sin el uso de materiales semiconductores. Para llevar a cabo esta tarea, se sirven de un electroimán que al ser alimentado mueve un mecanismo presente en el dispositivo.

A lo largo de la introducción se presentan los motivos que han impulsado la elaboración de este trabajo, el estado del arte del tema, y los objetivos y alcance de todo el proyecto. Por último, se presenta la estructura de la memoria, donde queda reflejada la distribución de los contenidos.

### 1.1. Motivación

Desde hace más de 30 años existe una estrecha colaboración entre la empresa BSH Electrodomésticos España, S.A. y la Universidad de Zaragoza, en el área de I+D+I de las cocinas de calentamiento por inducción. Esta relación queda reflejada en multitud de trabajos fin de grado, tesis doctorales, publicaciones o patentes.

Durante los últimos años, las cocinas de inducción han experimentado un continuo desarrollo, incorporando cada vez mejores prestaciones y evolucionando el concepto tradicional de las cocinas de fuegos fijos. Un ejemplo de ello es la placa de inducción SP100. Dicha placa no posee posiciones fijas de cocinado, sino que reconoce la posición y la forma de los recipientes y, en función de ello, controla el encendido y apagado de un gran número de pequeños inductores. En este caso, como en otros muchos, se emplean relés electromecánicos para, entre otras funciones, controlar el encendido de los mencionados inductores.

El relé electromecánico sigue utilizándose hoy en día por las ventajas que presenta respecto a otros dispositivos semiconductores equivalentes. En primer lugar, presenta un fuerte aislamiento galvánico entre el circuito de control y el circuito de potencia. Tiene muy pocas pérdidas energéticas dado que posee una alta resistencia cuando el contacto está abierto (evitando así fugas de corriente indeseadas) y una resistencia despreciable cuando el contacto está cerrado. Además, es un dispositivo bipolar y bidireccional (soporta tensión y conduce corriente en ambos sentidos). Por último, es más barato que un dispositivo semiconductor que pueda realizar la misma tarea y su activación solo requiere un transistor en lugar de un driver.

Sin embargo, a pesar de las muchas ventajas, estos dispositivos presentan también ciertos inconvenientes relacionados con su modo de funcionamiento. En primer lugar, el mecanismo con piezas móviles está sometido a un desgaste mecánico que reduce su vida útil. Además, los impactos y vibraciones que aparecen en el dispositivo generan ruido que puede resultar molesto para el usuario del electrodoméstico. Por último cabe destacar también que el proceso de fabricación de las distintas piezas presenta unas grandes tolerancias, lo que provoca que distintos relés del mismo modelo se comporten de forma diferente.

Distintos trabajos [1], [2] y [3] han tratado de minimizar o eliminar estos inconvenientes manteniendo a su vez las buenas características de los relés. Para ello se han desarrollado modelos del sistema [4] y se han diseñado distintas estrategias de control y optimización. En todas estas tareas, la medición y registro de ciertas variables de interés del dispositivo resulta crítica.

Hasta la fecha se habían registrado de un modo correcto variables como la tensión y la corriente por la bobina y el estado, abierto o cerrado, de los contactos. Sin embargo, existen otras variables de interés que o bien no habían sido nunca medidas o bien habían sido registradas mediante equipos que no se adaptaban correctamente a las necesidades del problema. Este trabajo se centra en este segundo grupo de variables, en concreto en la posición del mecanismo y en el ruido generado en las conmutaciones, ambas de vital importancia en la caracterización del dispositivo y en la propuesta de estrategias de control. Con el propósito de aumentar la información que se tiene sobre dichas variables, el principal objetivo del trabajo consiste en evaluar distintas alternativas de sensado y analizar las medidas experimentales obtenidas.

## 1.2. Descripción y funcionamiento del relé electromecánico

Un relé electromecánico es un dispositivo que actúa como interruptor controlado a distancia. Su activación, en lugar de ser manual, se realiza por medio de una tensión de control. Los principales componentes de un relé se muestran de forma esquemática en la Figura 1.1.

El funcionamiento de un relé se describe de forma simplificada a continuación. Cuando una corriente circula a través de la bobina, se genera un campo magnético que provoca el movimiento de una armadura móvil que, a su vez, provoca el desplazamiento del contacto móvil desde el contacto normalmente cerrado (contacto NC) al contacto normalmente abierto (contacto NA). De esta manera, se conmuta la conexión del contacto móvil con dos circuitos eléctricos independientes, cada uno de ellos conectado a uno de los dos contactos (NC y NA).

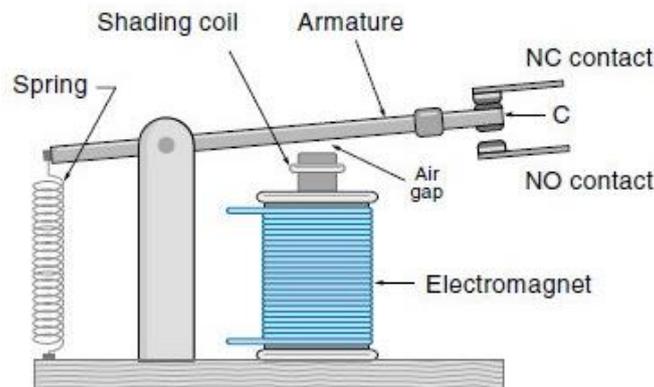


Figura 1.1: Esquema del relé electromecánico.

Imagen tomada de *Electrical Engineering Blog*, <http://eblogbd.com/basic-of-relay>.

El relé puede contemplarse como la unión de un sistema mecánico y un sistema electromagnético que, aun siendo dependientes, pueden analizarse de forma separada. El sistema mecánico consta de un muelle resorte que, unido a una armadura móvil de hierro dulce, mantiene al relé en la posición de reposo, esto es, con el contacto móvil junto al contacto normalmente cerrado (NC). Por su parte, el sistema eléctrico consta de una bobina que genera un campo magnético cuando circula corriente a través de ella, provocando el movimiento de la armadura móvil.

Además de los componentes electromecánicos que constituyen el sistema propiamente dicho, los relés cuentan también con otra serie de elementos como pueden ser los pines de conexión o la estructura externa (carcasa, base).

La secuencia del funcionamiento de un relé electromecánico es la siguiente:

- Inicialmente el relé se encuentra en su posición de reposo, de manera que el contacto fijo se mantiene junto al contacto NA. Mientras no circule corriente por la bobina, el par resorte mantendrá el relé en esta posición.
- Al aplicar tensión a la bobina, la corriente que circula por ella originará un campo magnético que provocará una fuerza magnética sobre la armadura móvil. Cuando la fuerza magnética supere el par resorte, se producirá el movimiento de la armadura, que a su vez se transmitirá al contacto móvil del relé.
- Cuando la armadura móvil alcanza el extremo opuesto, el contacto móvil ya ha alcanzado al contacto NA, produciéndose de esta forma el cierre del circuito. Mientras siga circulando corriente por la bobina, la fuerza magnética mantendrá la armadura en el extremo opuesto, evitando que el relé vuelva a la posición de reposo.
- Una vez deja de circular corriente por la bobina, el campo magnético desaparece, y con él la fuerza magnética que retiene la armadura móvil. El par resorte provocará en este momento la vuelta a la situación inicial de reposo.

### 1.3. Estado del arte

Debido a su amplio campo de aplicación, existen un gran número de artículos y trabajos relacionados con los relés electromecánicos. Sin embargo, a pesar de que una parte de ellos abordan el estudio de los subsistemas eléctrico y mecánico así como de la mejora de sus prestaciones, muy pocos se centran en el sensado de las variables que en el presente trabajo se van a medir.

Existen artículos en los que se lleva a cabo la medida del contacto móvil del relé con el objetivo de validar el modelo desarrollado[5]. En otros artículos, los autores tratan de reducir los rebotes en los contactos del relé por medio de la estimación de la posición [6]. Por último, se pueden encontrar también autores que tratan de alcanzar este mismo objetivo sin medir ni estimar dicha posición [7], obteniendo resultados poco satisfactorios.

### 1.4. Objetivos y alcance

El objetivo fundamental del presente proyecto es la medición de determinadas variables del relé con el fin de mejorar el modelo del mismo y de poder realizar estrategias de control sobre el sistema. A lo largo de todo el proyecto se trabajará mayoritariamente sobre el relé electromecánico RZ de TE Connectivity [8], aunque también se harán referencias a otros dos modelos de relés, el PBH [9] y el T9 [10], todos ellos del mismo fabricante. Sin embargo, es importante destacar que una de las principales ideas del proyecto es la extrapolación de todo lo estudiado en lo referente a este relé a cualquier otro modelo, e incluso a otros dispositivos electromecánicos como las electroválvulas [11].

Todo ello se enmarca dentro del objetivo global de mejorar las prestaciones del relé electromecánico a través de estrategias de control. Para poder lograr controlar el sistema es necesario obtener más información de ciertas variables, como pueden ser la posición del contacto móvil o la corriente que circula por la bobina. Se plantean así los siguientes pasos a seguir en el presente trabajo:

- Búsqueda y evaluación de dispositivos que permitan medir la posición de los componentes móviles del relé. Se analizarán diferentes equipos y estrategias de medición, considerando sus prestaciones y su grado de adaptación a las necesidades del problema. En este sentido se evaluarán especialmente la precisión dimensional y la frecuencia de muestreo y se explicará cuál es el dispositivo con las mejores características.
- Análisis de las medidas experimentales de posición registradas con los dispositivos anteriores. Explicación de la dinámica observada.
- Búsqueda y evaluación de micrófonos para la medición del ruido en el relé. Se evaluarán distintas alternativas atendiendo a la sensibilidad y rangos de salida y se seleccionará una de ellas en función de estos criterios.

- Estudio del origen del ruido. Análisis temporal y frecuencial del sonido registrado con el micrófono seleccionado.
- Elaboración de un banco de pruebas que permita la realización de ensayos sobre cualquier modelo de relé electromecánico. En el diseño se valorará especialmente la versatilidad del montaje implementado.

## 1.5. Estructura de la memoria

La memoria de este trabajo fin de grado se estructura de la siguiente manera:

- En el capítulo 2 se aborda el tema la medición de la posición. Se estudiarán las alternativas posibles teniendo en cuenta los dispositivos existentes en el mercado, seleccionando aquellas que mejor se adapten a las necesidades del sistema, y se analizarán los resultados obtenidos en los ensayos sobre los diferentes modelos de relé.
- En el capítulo 3 se estudiará el ruido producido en el relé. De nuevo, se llevará a cabo un proceso de selección del dispositivo de medida, para posteriormente analizar el ruido en diferentes modelos de relés. Se elaborarán análisis frecuenciales de las señales medidas, así como un estudio del origen del ruido en los diferentes dispositivos.
- En el capítulo 4 se presenta la elaboración de un pequeño banco de pruebas. El objetivo es obtener una plataforma que permita, de una manera rápida y versátil, realizar ensayos con cualquier modelo de relé.
- Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo y las líneas futuras que surgen del mismo.



## Capítulo 2

### **Medición de la posición del mecanismo**

---

En el presente capítulo se aborda el tema de la medición de la posición del mecanismo del relé electromecánico. En primer lugar, se estudia detenidamente el problema y los requerimientos de la medición. Posteriormente, se evalúan distintos sensores mediante ensayos experimentales y se analizan los resultados obtenidos.

#### 2.1. Objetivo de la medición

Como ya se ha mencionado anteriormente, la obtención de la posición del mecanismo del relé es fundamental para poder realizar tareas de control sobre el sistema real. La realimentación en el esquema de control requiere de ciertas variables del sistema, siendo la más difícil de obtener la citada posición. Además, resulta interesante registrar el comportamiento de las partes móviles del relé de cara a una mejor caracterización del modelo del mismo.

#### 2.2. Análisis del problema

Con el fin de llevar a cabo una buena medición, es imprescindible conocer las propiedades de las conmutaciones de apertura y cierre del relé. De esta manera, se deben considerar dos características fundamentales en los equipos:

- Precisión de la medición. El mayor desplazamiento que sufre cualquier elemento móvil de un relé no supera en general los dos milímetros. Además, a lo largo del movimiento se producen rebotes cuyos desplazamientos son todavía menores, en el entorno de la décima de milímetro. Para garantizar un buen control del sistema, se ha considerado como necesaria una precisión que llegue a la centésima de milímetro. De esta forma se podrá disponer de un nivel de discretización espacial adecuado.
- Frecuencia de muestreo. Las conmutaciones de apertura y cierre se realizan en espacios temporales del orden de milisegundos, siendo la operación de apertura ligeramente más lenta que el cierre. Por este motivo, se ha decidido que la frecuencia de muestreo del equipo deberá ser como mínimo de una decena de kHz. De esta forma se podrá garantizar un número suficiente de mediciones a lo largo del movimiento.

Las necesidades presentadas anteriormente evidencian la dificultad para obtener esta variable del sistema, puesto que se requiere una gran precisión en la medición y una elevada frecuencia de muestreo. A todo lo anterior hay que sumar la dificultad para acceder en algunos casos al punto de medida.

En el caso particular del relé RZ, Figura 2.1, existen diferentes componentes y elementos móviles. El más interesante de cara a la elaboración de estrategias de control es el contacto móvil del relé. Sin embargo, en la figura puede comprobarse que resulta muy complicado acceder directamente a él. En cualquier caso, existen otros elementos mecánicos del relé que presentan un acceso mucho más sencillo y cuyo movimiento está relacionado con el del contacto móvil.

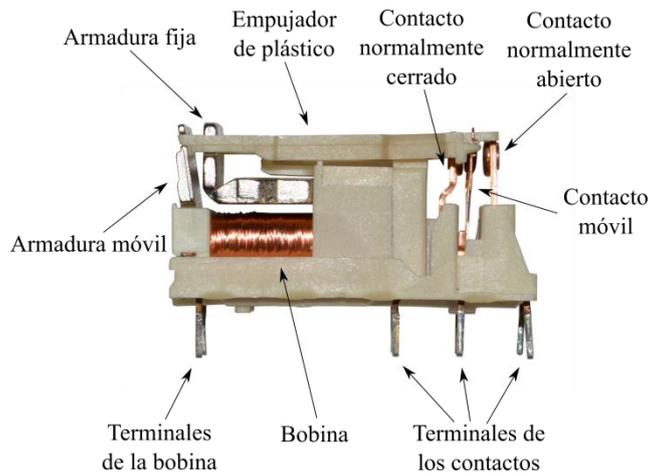


Figura 2.1: Estructura física del relé y sus diferentes componentes.

Uno de estos componentes es la armadura móvil, cuyo movimiento se transmite al contacto móvil por medio de una pieza de plástico. Debido a su fácil acceso, podría optarse por medir la posición de esta pieza. No obstante, en caso de querer extraer información sobre la posición del contacto móvil, debe tenerse en cuenta que la unión mecánica mencionada posee una serie de características que dificultan establecer una relación directa entre el movimiento de ambos componentes:

- Holguras. La pieza de plástico presenta holguras en su unión con el contacto móvil del relé. Estas holguras, aun siendo muy pequeñas, tienen una influencia significativa en el movimiento ya que son comparables con la distancia existente entre los contactos fijos del relé.
- Movimiento de la armadura móvil. El movimiento de la armadura móvil no es lineal, sino angular. De esta forma, habrá que tener en cuenta estas características en el caso de emplear un sensor que capture distancias lineales.

Otra opción que también se ha valorado ha sido la realización de algún tipo de sistema mecánico que, acoplado al relé, permitiese la medición de la posición del contacto móvil. Sin embargo, la alteración de la masa y de la estructura del dispositivo modificaría el comportamiento del sistema, por lo que esta opción ha quedado inicialmente descartada.

### 2.3. Estudio de alternativas

Actualmente existe un gran número de dispositivos orientados al sensado o medición de distancias. Se ha llevado a cabo una búsqueda inicial de sensores con la finalidad de descartar aquellos que no se adaptan al problema y evaluar únicamente aquellos que pudieran llegar a ser de utilidad.

Los primeros sensores considerados, debido a su amplia utilización en la industria, han sido los sensores capacitivos e inductivos. Sin embargo, estos presentan bajas frecuencias de muestreo y la medida que proporcionan se realiza sobre superficies demasiado amplias para ajustarse al pequeño tamaño de los componentes del relé. Por estos motivos, se han descartado sin llegar a evaluarlos experimentalmente.

También se han considerado los sensores de ultrasonidos. Estos se basan en la emisión y recepción de ondas sónicas. Sin embargo, la frecuencia de muestreo de este tipo de sensores queda limitada a, como máximo, decenas de kHz, y su precisión a milímetros. A esto hay que sumar la dificultad de ajuste del punto de sensado, puesto que los sensores de ultrasonidos presentan emisores y receptores de gran tamaño. De esta manera, estos sensores también han sido descartados.

Los sensores láser, por su parte, se sirven de la misma idea que los sensores de ultrasonidos, pero en vez de una onda de sonido emplean un haz de luz, por lo que las velocidades y precisiones de estos sensores son mayores. Además, el ajuste del punto de sensado es mucho más sencillo ya que es visible y está muy focalizado. Dentro de la tecnología óptica, existen otros sensores de bajo coste basados en fotodiodos. Sin embargo, sus prestaciones quedan muy alejadas de las que requiere la aplicación.

Por último, se ha planteado también el uso de una cámara de alta velocidad. Estas cámaras fueron evaluadas en un trabajo previo [2], donde se comprobó que la tasa de captura de imágenes no era suficiente. Sin embargo, además de las cámaras 2D de alta velocidad, que pueden alcanzar decenas de miles de fps, existe también la posibilidad de emplear una cámara lineal, que en lugar de una imagen bidimensional ofrecen un único vector con frecuencias de muestreo mucho mayores, de hasta centenares de miles de fps.

En conclusión, se dispone finalmente de dos alternativas: el sensor láser y la cámara lineal. Una vez estudiadas las tecnologías, es necesaria la búsqueda de dispositivos comerciales para encontrar aquél que permita su aplicación en el sistema real. De esta manera, descartando todas aquellas opciones que no se adaptan a los requerimientos necesarios, se detallan a continuación las dos opciones seleccionadas:

- Sensor láser de ámbito industrial. Estos dispositivos llegan a trabajar a frecuencias muy elevadas, de hasta 392 kHz, y alcanzan precisiones de hasta décimas de micra. Debido a estas prestaciones, es posible la medición de la posición a lo largo de todo el periodo de conmutación, tanto en apertura como en

cierre, con gran precisión. El gran inconveniente de este tipo de sensores es su elevado precio.

- Cámara lineal de alta velocidad. Las cámaras lineales ofrecen información de un vector vectores de píxeles y permiten realizar muestreos de hasta centenas de kHz. En este caso, podría resultar interesante captar una imagen de la planta del relé, de manera que en el vector de píxeles quedase reflejada la posición de los contactos y de la armadura móvil.

## 2.4. Evaluación sensores láser

Una vez presentadas las dos alternativas que a priori pueden resultar viables, se ha procedido a la evaluación de los equipos. En lo que respecta a los sensores láser, se han seleccionado dos equipos diferentes para su prueba en el sistema real, ambos pertenecientes al fabricante Keyence. Por un lado, un equipo de la serie LK-G3000, con el cual se han podido realizar ensayos sobre los tres modelos de relé estudiados en esta investigación (RZ, PBH y T9) y por otro lado un equipo de la serie LK-G5000, en cuyo caso, por motivos de disponibilidad del proveedor, tan solo ha podido ser probado en el relé RZ. Estos sensores ofrecen una salida analógica que proporciona una tensión proporcional a la posición medida. Los detalles de las características de cada equipo se especifican más adelante.

Dado que con ambos equipos se han podido realizar ensayos sobre el relé RZ, se ha optado por emplear las medidas sobre este dispositivo para valorar dichos sensores. Debido a la dificultad existente al medir directamente la posición del contacto móvil del relé (sección 2.2), se ha procedido en su lugar a la medición de la posición de la armadura móvil. En la Figura 2.3 queda reflejado de nuevo el problema en cuestión.

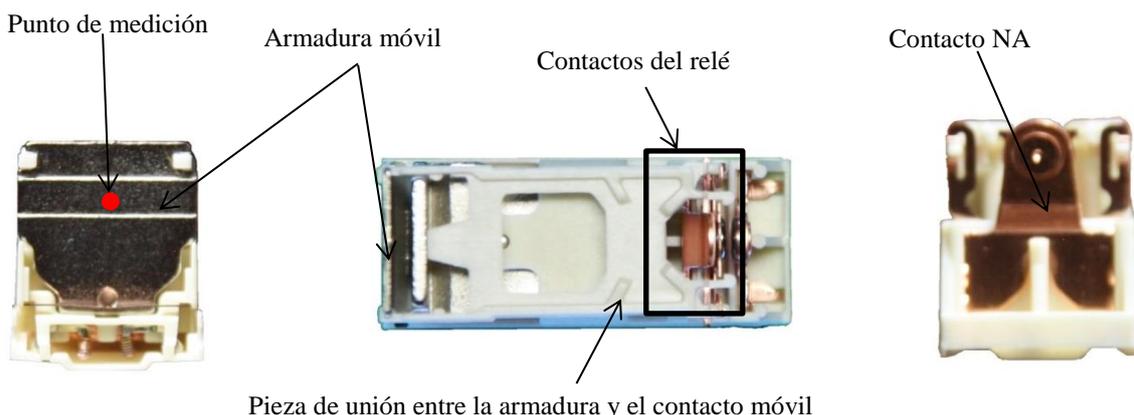


Figura 2.3: Planta y vista frontal de la armadura y de los contactos del relé RZ.

Tal como se puede observar, resulta imposible apuntar con un sensor al contacto móvil de manera directa. El contacto NA tapa completamente el resto de componentes del relé si este se enfoca desde una vista frontal. De esta manera, la única opción viable de tomar algún tipo de medida con un sensor de estas características es centrándose en la armadura móvil del relé, perfectamente accesible.

### 2.4.1. Evaluación sensor LK-G5000

El equipo de la serie LK-G5000 empleado está constituido por la controladora LK-G5001PV [12] y el cabezal LK-H082 [13]. Dicho sistema ofrece, bajo catálogo, una frecuencia máxima de muestreo de hasta 392 kHz y una precisión de hasta 0.1  $\mu\text{m}$ . En la Figura 2.2 se puede observar el equipo de medida.



Figura 2.2: Cabezal LK-H082 (izquierda) y controladora LK-G5001PV (derecha).

En las figuras 2.4 y 2.5 se presentan dos de los ensayos realizados. Estos se diferencian en la tensión de alimentación del relé. El equipo ha trabajado a 300 kHz, pudiéndose observar que es capaz de registrar perfectamente la evolución de la posición de la armadura móvil del relé. Se aprecian incluso ciertos detalles de pequeña magnitud al final de la trayectoria. Para mejorar la comprensión de las gráficas, la medida de la posición se muestra junto al estado de los contactos.

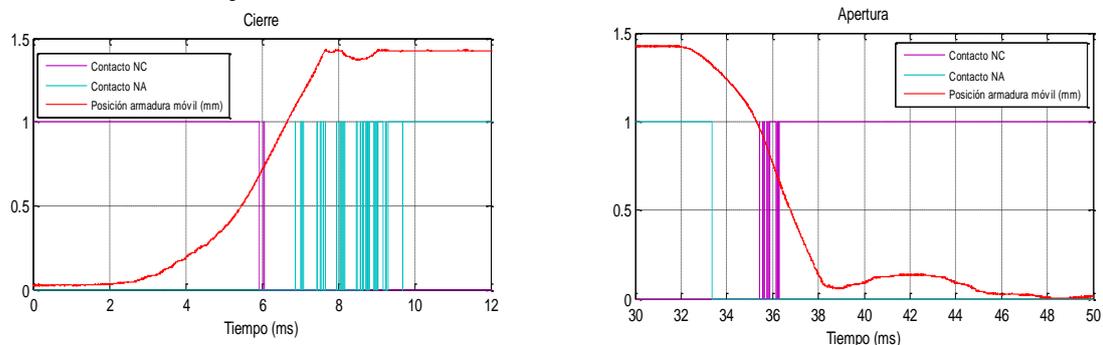


Figura 2.4: Evolución temporal de la posición de la armadura móvil y los contactos del relé RZ en operación de cierre y apertura con alimentación de 20V.

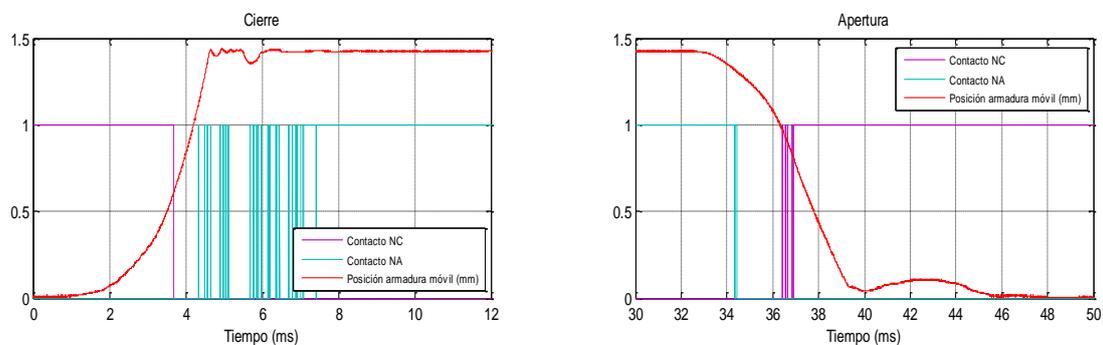


Figura 2.5: Evolución temporal de la posición de la armadura móvil y los contactos del relé RZ en operación de cierre y apertura con alimentación de 40V.

### 2.4.2. Evaluación sensor LK-G3000

Por su parte, el equipo de la serie LK-G3000 empleado consta de la controladora LK-G3001PV [14] y el cabezal LK-G82 [15]. Para este equipo, se dispone de una frecuencia máxima de muestreo de hasta 50 kHz, inferior a la del LK-G5000, y una precisión de 0.2  $\mu\text{m}$  (ambos parámetros bajo catálogo). En la Figura 2.8 se muestra el equipo de medida.

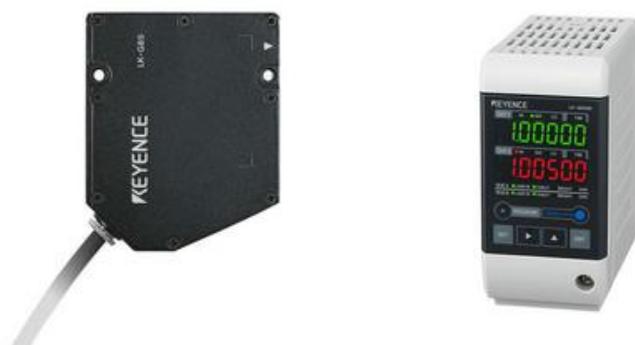


Figura 2.8: Cabezal LK-G82 (izquierda) y controladora LK-G3001PV (derecha).

Análogamente a los ensayos realizados con el sensor LK-G5000, se ha procedido a realizar una serie de medidas con el equipo LK-G3000 sobre el relé RZ. Los resultados se pueden observar en la Figura 2.9 y la Figura 2.10. De la misma forma que ocurría con el equipo anterior, este sensor, que ha trabajado a 50 kHz, recoge perfectamente la trayectoria, mostrando detalles del movimiento de pequeña magnitud.

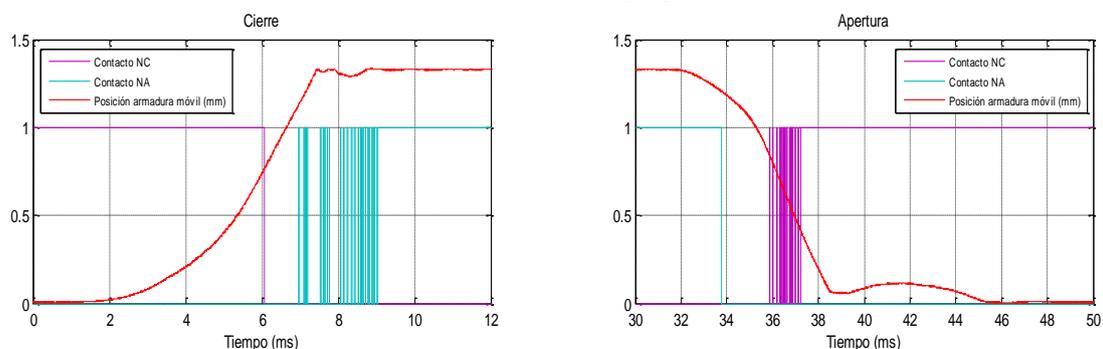


Figura 2.9: Evolución temporal de la posición de la armadura móvil y los contactos del relé RZ en operación de cierre y apertura con alimentación de 20V.

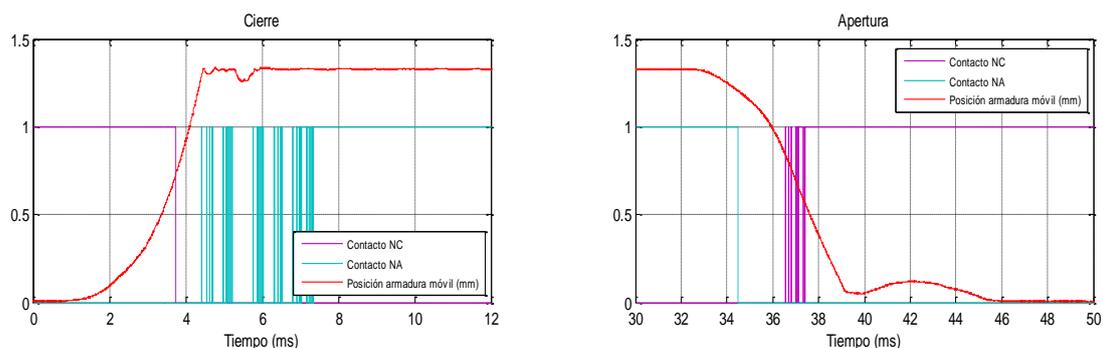


Figura 2.10: Evolución temporal de la posición de la armadura móvil y los contactos del relé RZ en operación de cierre y apertura con alimentación de 40V.

### 2.4.3. Comparación de los equipos

A simple vista, ambos equipos ofrecen una forma de onda similar. Sin embargo, para comparar verdaderamente sus prestaciones, se presentan las mediciones realizadas por los dos sensores sobre la armadura móvil con alimentación de 20V en una ventana temporal de 0.2 ms.

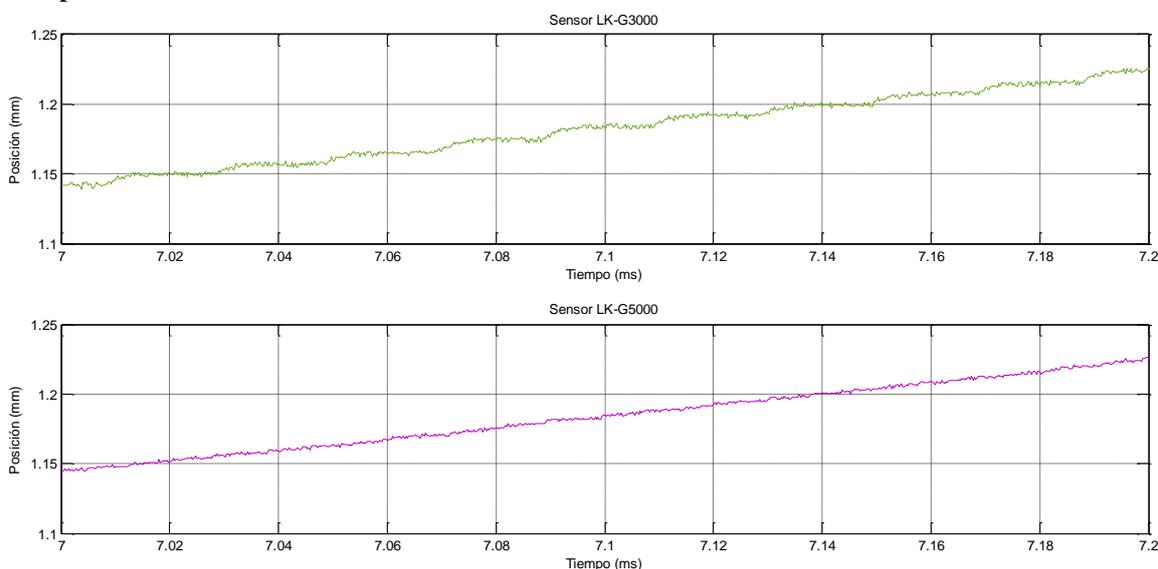


Figura 2.11: Comparación de las señales de salida de los equipos LK-G3000 y LK-G500 en relé RZ con alimentación de 20V.

Ampliando ambas señales, se puede observar un claro escalonado en la medición obtenida con el equipo de la serie G3000. En efecto, una frecuencia de muestreo de 50 kHz se corresponde con un periodo de 0.02 ms, es decir, que se obtienen diez medidas en el intervalo temporal presente en la Figura 2.11, las cuales son perfectamente observables en las gráficas. En el caso del equipo de la serie G5000, también se aprecia un cierto escalonado, pero es muy inferior al caso anterior. El equipo trabaja a 300 kHz, lo que suponen seis veces más muestras que el sensor de la serie G3000, y por lo tanto una resolución de la señal de salida muy superior. Esta comparación se ha realizado con el fin de poner de manifiesto los enormes requerimientos de frecuencia de muestreo en el equipo de medida, puesto que 0.1 ms representa un intervalo temporal más que apreciable en el sistema a controlar (recuérdese que el movimiento del contacto móvil del relé apenas tarda 1 ms en llevarse a cabo).

En definitiva, las conclusiones del análisis son las siguientes. Puesto que ambos equipos proporcionan una salida analógica que no requiere procesado, estos podrían emplearse en un sistema de control en tiempo real. Los dos sensores ofrecen una precisión dimensional adecuada y, en lo que respecta a la frecuencia de muestreo, las prestaciones son suficientes, incluso con el equipo de la serie LK-G3000. Nótese que se obtienen 50 medidas por milisegundo, cumpliéndose el requisito de frecuencia de muestreo fijado en la sección 2.2.

## 2.5. Estudio de la evolución de la posición

Una vez evaluadas las prestaciones que ofrecen los equipos de medida anteriores, se precede ahora a analizar el movimiento de los diferentes relés a partir de las señales obtenidas. Es importante destacar que en cada modelo de relé la medición se realiza sobre piezas móviles diferentes, por lo que se explicará detenidamente cada caso. Con la finalidad de obtener la mayor información posible, en los ensayos también se han registrado otras variables como la posición de los contactos.

### 2.5.1. Ensayos en relé RZ

En el caso del relé RZ, se pueden retomar las gráficas obtenidas anteriormente con el sensor de la serie LK-G5000 para analizar el comportamiento de la armadura móvil, tal y como se presenta en la Figura 2.6.

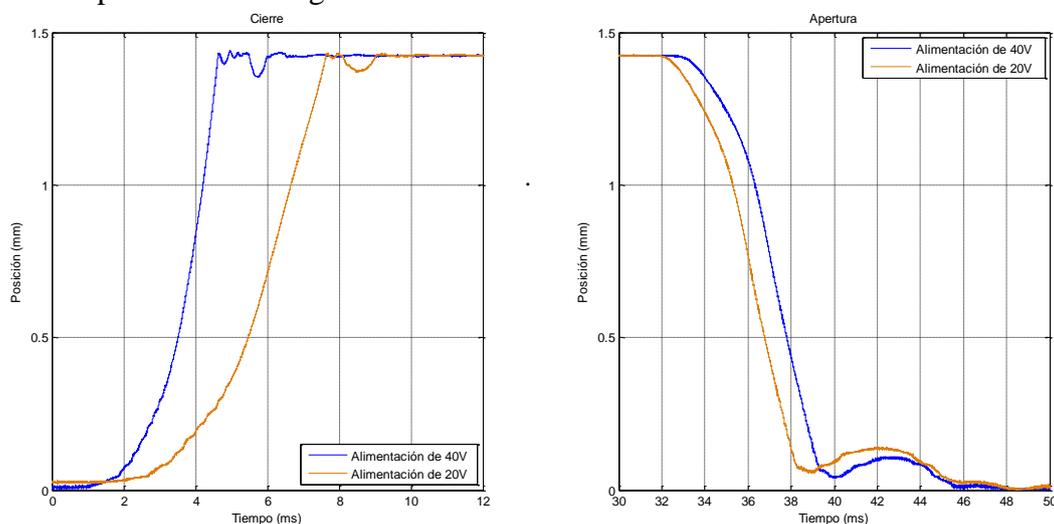


Figura 2.6: Comparación de la evolución de la posición de la armadura móvil del relé RZ en operación de cierre y apertura para alimentaciones de 20 y 40V.

A partir de esta información se pueden sacar ciertas conclusiones. En primer lugar, se observa que la armadura móvil incrementa su velocidad hasta alcanzar el final de su trayectoria, donde impacta bruscamente. A partir de ese momento comienzan a producirse varios rebotes. En segundo lugar, se puede comprobar que la velocidad de la armadura móvil del relé presenta una relación directa con la tensión de alimentación. Cuanto mayor es esta tensión, mayor es la corriente que circula por la bobina y, por consiguiente, mayor el par magnético que atrae a la armadura móvil. Como consecuencia de ello, la aceleración que sufre la armadura es mayor y la conmutación de cierre es más rápida. En el caso de la operación de apertura, se puede observar un retraso en el movimiento de la armadura móvil conforme aumenta la tensión de alimentación. Esta dinámica se debe a que, cuanto mayor es la tensión de alimentación, mayor es el par magnético que retiene a la armadura junto al contacto NA, y, por tanto, más tiene que descargarse la bobina hasta llegar al punto en el que el par resorte supera al par magnético.

Hay que recordar que el movimiento de la armadura móvil no es el mismo que el del contacto móvil. De hecho, en la Figura 2.7, se puede observar que no existe una relación directa entre los rebotes presentes en los contactos del relé y las oscilaciones de la posición medida. Ello es debido a que, como ya se explicó anteriormente, el movimiento del contacto móvil del relé está relacionado, por medio de una pieza de plástico, al de la armadura móvil. Dicho acoplo relaciona el movimiento angular de la armadura móvil con el movimiento del contacto móvil, existiendo además holguras entre las piezas de unión, por lo que sus trayectorias difieren considerablemente.

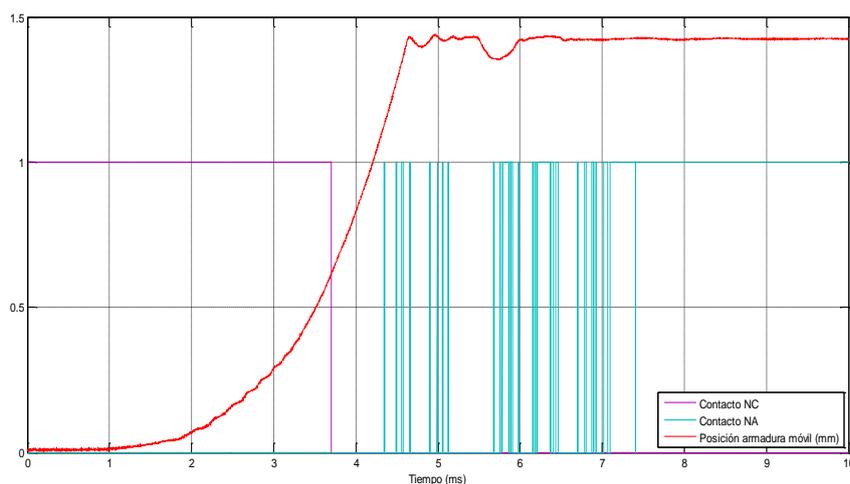


Figura 2.7: Movimiento de la armadura móvil del relé RZ frente a los rebotes en los contactos fijos, con alimentación de 40V. Nótese que los rebotes en la posición y los rebotes en los contactos no coinciden temporalmente.

### 2.5.2. Ensayos en relé PBH

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados sobre el relé PBH. En este caso, el acceso al contacto móvil es mucho más sencillo, por lo que se ha podido medir directamente en él. En la Figura 2.12 se ilustra el punto de medición y en las Figuras 2.13 y 2.14 se muestra la evolución del contacto móvil, junto con otras variables del sistema.

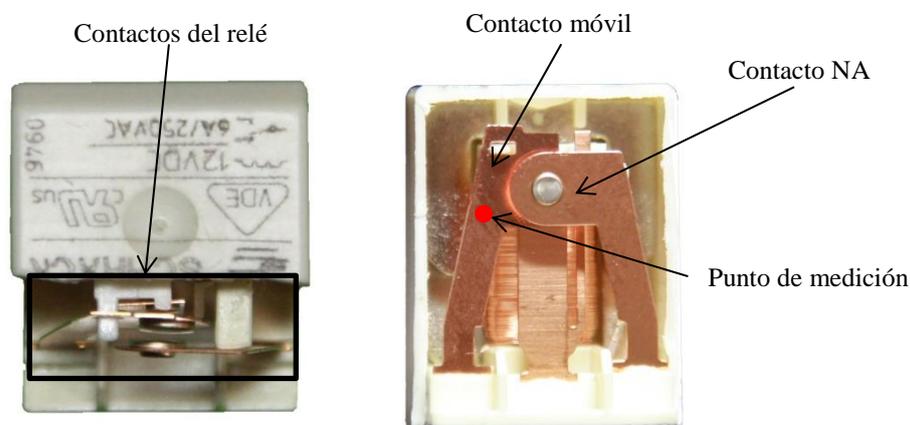


Figura 2.12: Planta y vista frontal de los contactos del relé PBH.

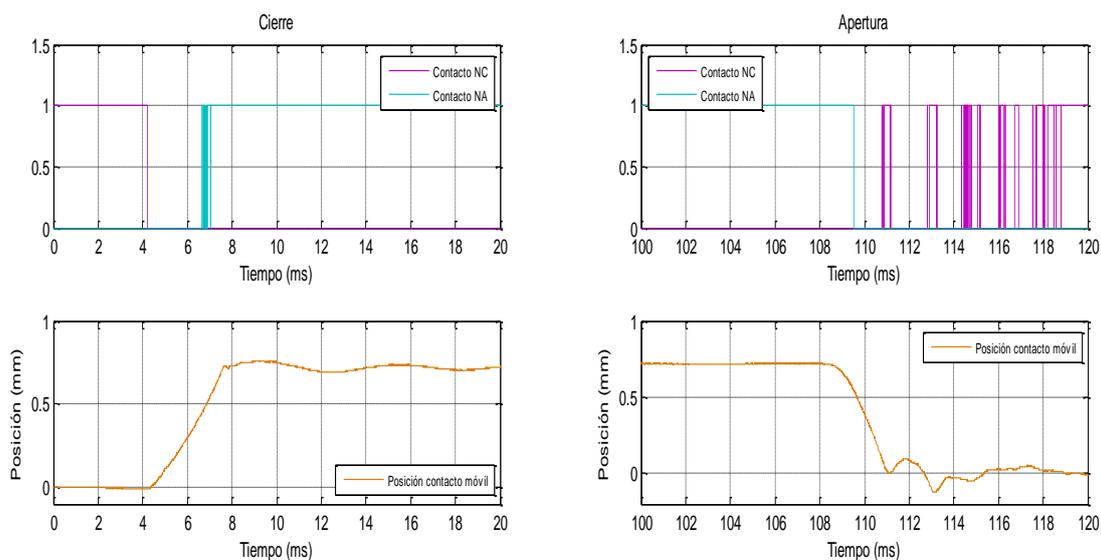


Figura 2.13: Evolución temporal de la posición del contacto móvil del relé PBH en operación de cierre y apertura con alimentación de 10V.

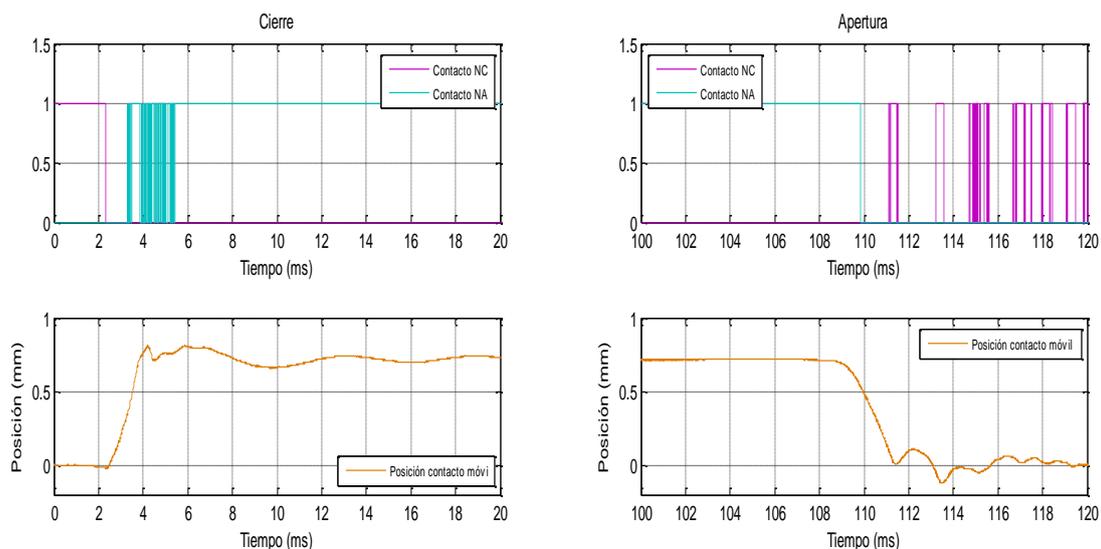


Figura 2.14: Evolución temporal de la posición del contacto móvil del relé PBH en operación de cierre y apertura con alimentación de 20V.

Tras observar las gráficas del relé PBH, se extraen algunas conclusiones. La dinámica del contacto móvil es en cierto modo parecida a la observada en la armadura móvil del relé RZ. La trayectoria evoluciona hasta alcanzar una posición límite y, a partir de este momento, se observan tanto rebotes en los instantes iniciales como oscilaciones que se prolongan más en el tiempo. A diferencia de lo observado en el RZ en este caso sí que existe una clara relación entre las oscilaciones de la posición del contacto móvil y los rebotes observados en los contactos, especialmente en la operación de apertura. Se puede apreciar que en el momento en el que el contacto móvil rebota y se aleja de su posición de reposo, cesan los rebotes en el contacto NC. Al mismo tiempo cuando dicho contacto regresa se produce la conducción eléctrica entre los contactos.

En relación con las oscilaciones comentadas anteriormente, obsérvese que se producen tanto en la operación de cierre como en la de apertura. La explicación a estas oscilaciones se debe al diseño constructivo de este relé. En el caso del relé RZ todas las piezas, a excepción del contacto móvil que es flexible, son rígidas. Sin embargo, en este relé todos los contactos están constituidos por una chapa de metal que se puede someter a deformación. Retomando las gráficas anteriores, se puede comprobar que las oscilaciones tienen lugar una vez se han estabilizado las posiciones de los contactos en los instantes iniciales de la vibración, por lo que se puede asegurar que tanto el contacto móvil como el contacto NA se mueven simultáneamente. En la Figura 2.15 se puede apreciar más claramente este fenómeno.

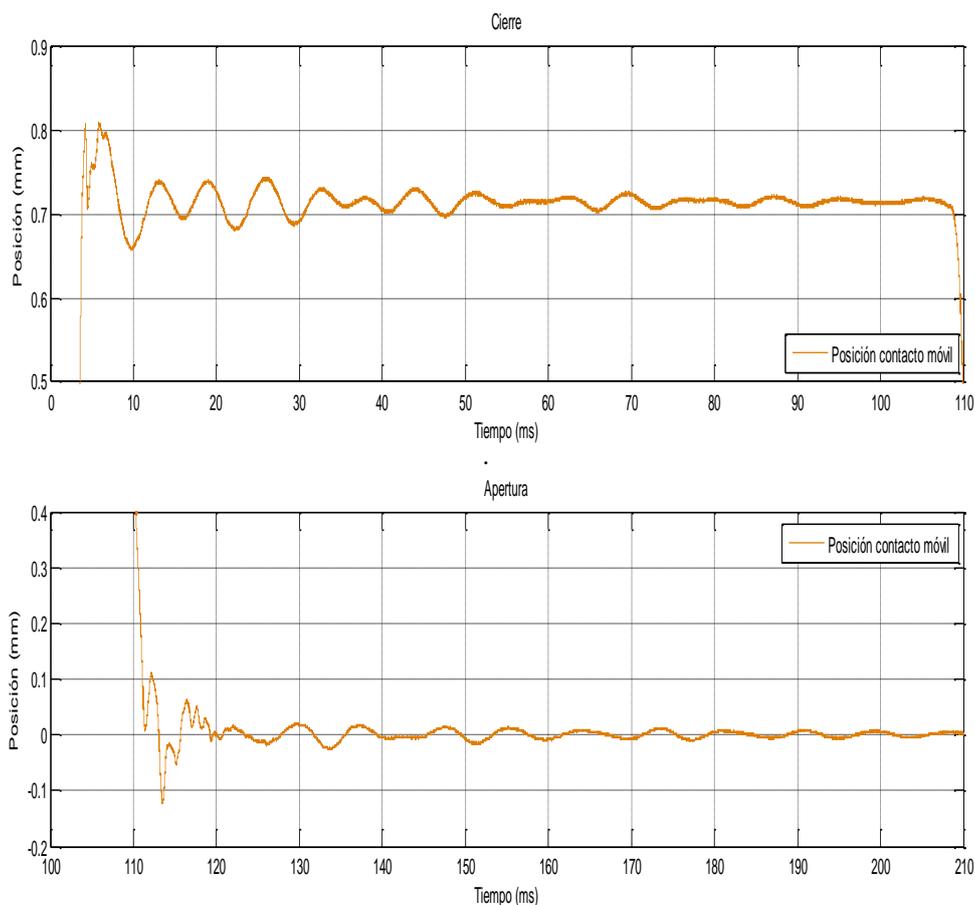


Figura 2.15: Oscilaciones producidas en el contacto móvil del relé PBH en operación de cierre y apertura con alimentación de 20V. Obsérvese la diferencia entre los rebotes (primeros 10 milisegundos tras el impacto) y las oscilaciones (resto del tiempo).

### 2.5.3. Ensayos en relé T9

El último relé sobre el que se han realizado ensayos ha sido el relé T9, dispositivo de interés que fue modelado y estudiado en trabajos previos [2]. En este caso, el punto de medición queda ilustrado en la Figura 2.16, donde de nuevo, y de forma similar al caso del relé PBH, se puede medir directamente sobre el contacto móvil del relé.

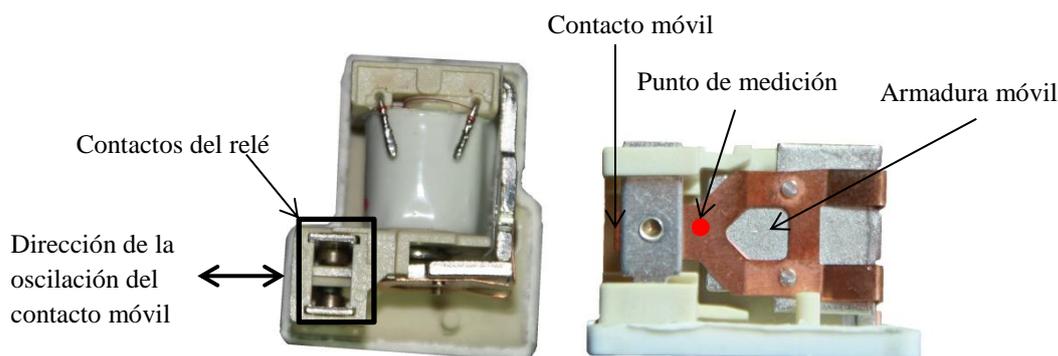


Figura 2.16: Planta y vista frontal de la armadura y de los contactos del relé T9.

En las figuras 2.17 y 2.18 se ilustran los ensayos realizados sobre este relé.

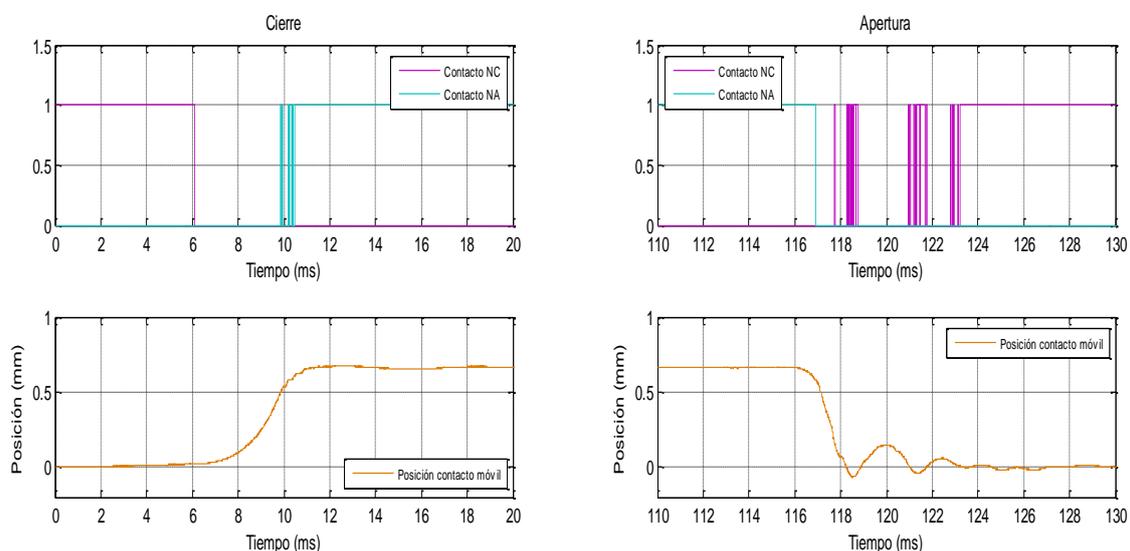


Figura 2.17: Evolución temporal de la posición del contacto móvil del relé T9 en operación de cierre y apertura con alimentación de 20V.

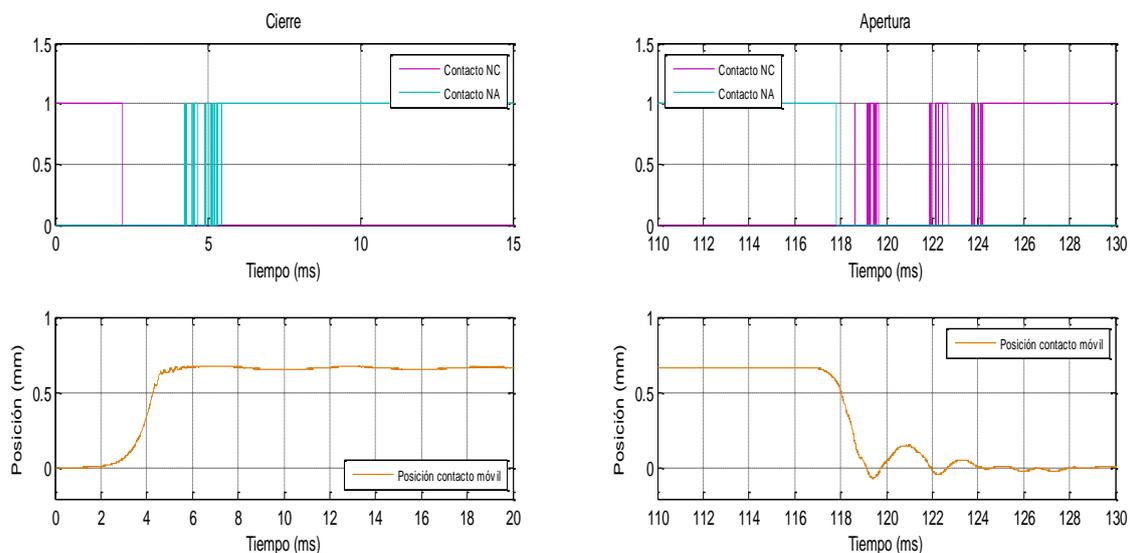


Figura 2.18: Evolución temporal de la posición del contacto móvil del relé T9 en operación de cierre y apertura con alimentación de 40V.

En el caso del relé T9 se observa un comportamiento a priori similar al del relé PBH. En efecto, se puede observar una clara relación entre los rebotes del contacto móvil y los rebotes en los contactos, especialmente en la operación de apertura. Además, se aprecia de nuevo una cierta oscilación en la posición del contacto móvil del relé, especialmente en la operación de cierre, cuyo origen sin embargo no tiene nada que ver con el caso del relé PBH. En este caso, los contactos del relé son completamente rígidos, y la oscilación que registra el sensor se debe a movimientos perpendiculares de la armadura móvil (movimiento indicado en la Figura 2.16). Esta oscilación se puede ver más detalladamente en la Figura 2.19.

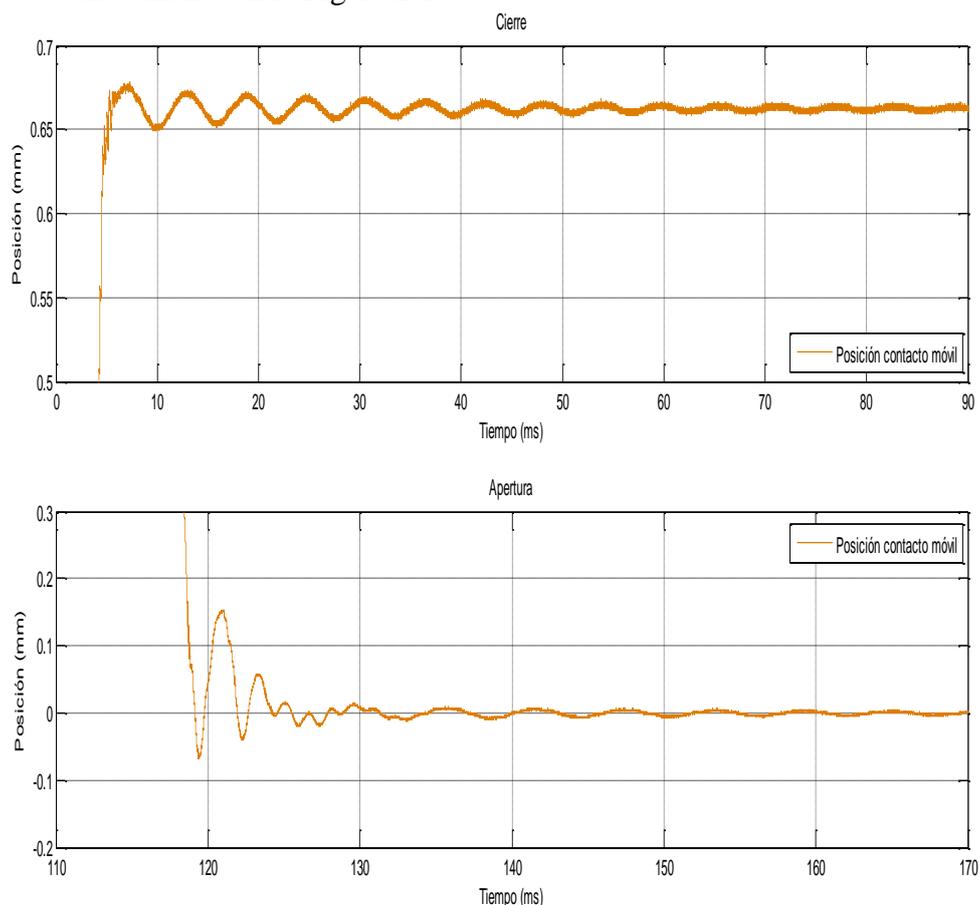


Figura 2.19: Oscilaciones producidas en el contacto móvil del relé T9 en operación de cierre y apertura con alimentación de 40V.

#### 2.5.4. Discusión de resultados

Tras analizar el comportamiento de los elementos móviles en los distintos modelos de relés, se puede sacar una conclusión clara. A pesar de que poseen dinámicas parecidas, el movimiento de sus contactos difiere en todos ellos, presentando particularidades que dependen de su construcción física. En el caso de los relés PBH y T9 el movimiento del contacto móvil presenta ciertas similitudes, pero las oscilaciones y rebotes observados tienen una naturaleza muy diferente. En el caso del relé RZ no se ha podido medir la posición del contacto móvil, pero ha quedado claro que la relación entre los rebotes de la armadura móvil y los de los contactos es prácticamente inexistente.

## 2.6. Evaluación cámara lineal

La alternativa al uso de sensores láser la constituyen las llamadas cámaras lineales. Estos dispositivos se caracterizan por capturar no imágenes bidimensionales, sino únicamente un vector de píxeles. Puesto que el volumen de información que capturan es muy inferior a una cámara convencional, permiten frecuencias de muestreo muy superiores a éstas, llegando a los centenares de kHz. En este caso, se ha optado por probar las prestaciones de la cámara lineal Spider3 2K GigE de Dalsa [1], que ofrece una resolución de 1 x 2048 píxeles y frecuencias de muestreo de hasta 52 kHz.

La cámara ha sido evaluada únicamente sobre el relé RZ. En la Figura 2.20 se puede observar la proyección del vector de píxeles de la cámara lineal sobre dicho relé. De esta manera, se ha podido obtener simultáneamente la posición de la armadura móvil y de los contactos, e incluso de la pieza de plástico que hace de nexo entre ambos componentes. Se ha realizado un vídeo donde se han registrado operaciones de cierre y apertura del relé. Algunos fotogramas de dicho vídeo se pueden observar en la Figura 2.21.

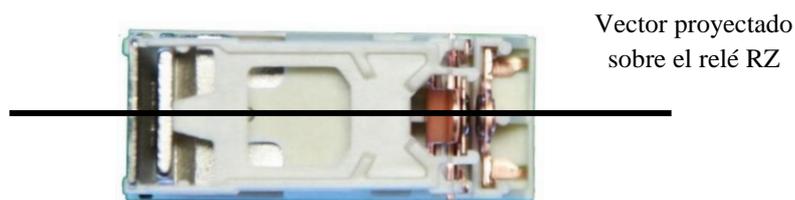


Figura 2.20: Esquema de la captura de imágenes con la cámara lineal sobre el relé RZ.



Figura 2.21: Fotogramas de la captura de vídeo realizado por la cámara lineal Spider3 2K GigE.

Nótese cómo en el fragmento de vídeo se puede observar la posición tanto de la armadura como del contacto móvil. La precisión de la medida depende de la resolución de la cámara, es decir, del número de píxeles que posea el vector. Dado que el relé mide

aproximadamente 2cm y la cámara posee 2048 píxeles, se obtienen precisiones en el entorno de los 10 micrómetros, cumpliendo así de forma estricta el objetivo de precisión que se había fijado (sección 2.2). En cualquier caso, si se deseara obtener con mayor precisión la posición de algún elemento concreto, podría ajustarse el enfoque de la cámara, centrando el ancho del vector en una ventana menor y aumentando así la precisión. Además, otra de las posibilidades que ofrece esta cámara consiste en aumentar la frecuencia de muestreo a costa de reducir la resolución de las capturas.

Como conclusión de los resultados obtenidos con este dispositivo, puede destacarse la utilidad que tendría a la hora de mejorar el modelo del relé, ya que permite estudiar la relación existente entre los movimientos de la armadura y el contacto móvil. Sin embargo, para obtener información de interés a partir de este dispositivo se requiere un procesado de imagen que no era necesario con los sensores láser. Además, este proceso puede resultar demasiado lento como para emplearlo en estrategias de control a tiempo real. En cualquier caso, resulta una alternativa interesante a los dispositivos de medida convencionales.



## Capítulo 3

### **Medición del ruido**

---

En este capítulo se lleva a cabo la medición y el análisis del ruido producido en el relé en las operaciones de apertura y cierre. En primer lugar, se analizan dos micrófonos con el fin de seleccionar aquel que mejor se adapte las necesidades del problema. Posteriormente se realizan dos análisis diferentes sobre el ruido medido: un análisis frecuencial de las señales obtenidas y un análisis del origen del ruido del relé producido en los diferentes modelos.

#### 3.1. Introducción

El ruido emitido por el relé en las conmutaciones de apertura y cierre supone una de las razones por las que se inició esta línea de investigación. Caracterizar este ruido, analizando las zonas donde se origina, su intensidad, y su comportamiento en el rango audible, constituye una tarea fundamental para abordar el problema de reducirlo o eliminarlo. Además, obtener una medida de esta variable es crítico a la hora de elaborar algoritmos de optimización o control que traten de reducir el ruido producido. No obstante, la generación de ruido en el dispositivo es un fenómeno de difícil modelado. De hecho, se conoce que el relé que se analiza en este trabajo (relé RZ) posee diferentes elementos móviles que chocan unos con otros y que dan lugar a la generación de ruido de distinto origen.

#### 3.2. Búsqueda de micrófonos

En el mercado se pueden encontrar multitud de micrófonos que podrían servir para esta aplicación, siendo los parámetros fundamentales de selección, la sensibilidad, la direccionalidad y la respuesta en frecuencia. Además de todos estos parámetros, también es necesario tener en cuenta el precio del dispositivo. Posiblemente, el parámetro más importante en esta aplicación sea la respuesta en frecuencia, debiendo asegurar que se ajuste lo máximo posible al rango 20 Hz – 20 kHz, dado que este es el rango audible.

Se ha optado por comparar dos dispositivos claramente diferenciados. En primer lugar, un micrófono de gama alta, el G.R.A.S 46 AE, disponible en los laboratorios de BSH, con una sensibilidad de 50mV/Pa y que presenta un precio en el entorno de los 1000 €. En segundo lugar, un micrófono electret convencional con una sensibilidad de 6mV/Pa que cuenta con una etapa amplificadora de ganancia 100. En el caso de este micrófono, el precio no alcanza los 10 €.

### 3.3. Evaluación experimental y selección del dispositivo

Para seleccionar el micrófono a emplear, se ha procedido a realizar una serie de ensayos sobre el relé RZ con el fin de comparar las señales obtenidas. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 3.1 y 3.2.

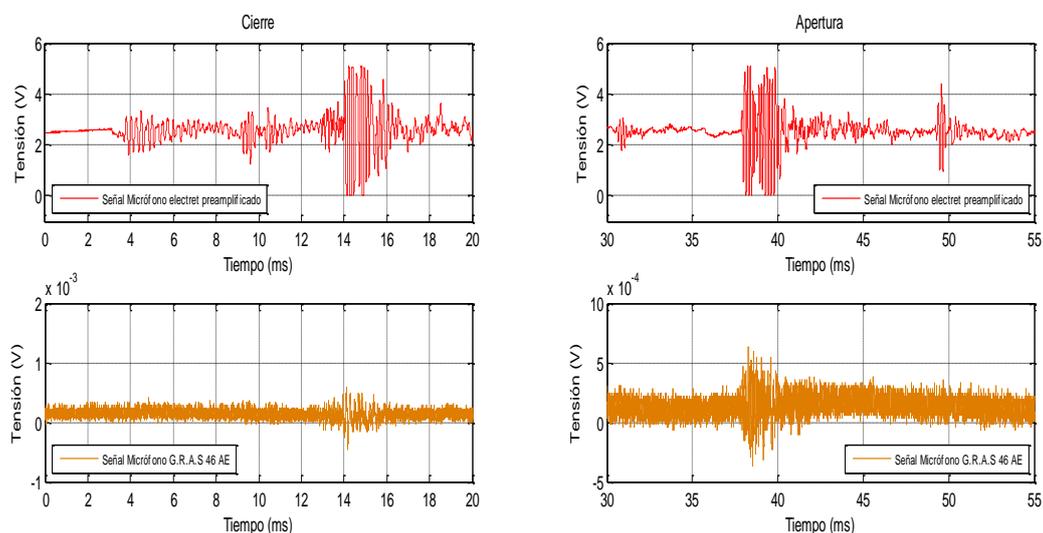


Figura 3.1: Ruido medido por el micrófono electret preamplificado (arriba) y el micrófono G.R.A.S 46 AE (abajo), en operación de cierre (izquierda) y apertura (derecha) con alimentación de 20V.

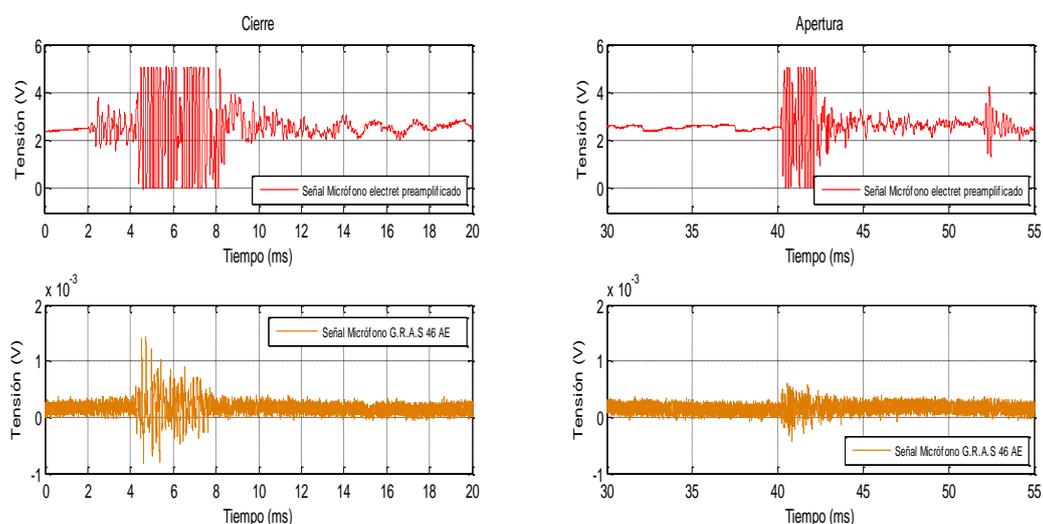


Figura 3.2: Ruido medido por el micrófono electret preamplificado (arriba) y el micrófono G.R.A.S 46 AE (abajo), en operación de cierre (izquierda) y apertura (derecha) con alimentación de 40V.

Como puede observarse en la imagen, se distinguen dos características de la señal medida que difieren claramente de un micrófono a otro. En primer lugar, la amplitud de la señal de salida (expresada en voltios). En el caso del micrófono electret, la etapa amplificadora que incorpora ofrece un valor de salida considerablemente más grande que en el caso del micrófono G.R.A.S. En relación con este aspecto, debe mencionarse que también existen etapas amplificadoras para este último micrófono, aunque supondrían un coste superior. Esta diferencia entre ambas señales resulta importante a la hora de trabajar con cualquier equipo de medida, que deberá ser más sensible cuanto menor amplitud tenga la señal del micrófono.

También hay que señalar la saturación que sufre el micrófono electret en el ensayo a 40V. La etapa de amplificación ofrece salidas entre 0 y 5V estando centrada en 2.5 V. Por este motivo resulta interesante ajustar la distancia a la que se sitúa el micrófono sobre el relé para obtener el mayor rango de medida posible sin llegar a saturar.

La siguiente diferencia se observa en el intervalo en el que no hay ruido de conmutación. La alta sensibilidad del micrófono G.R.A.S 46 AE permite capturar señales con gran precisión, pero al mismo tiempo capta con facilidad ruido de fondo no generado por el relé. En esta aplicación no se requiere tanto captar la señal con gran precisión, como poder registrar con claridad diferentes niveles de sonido evitando en la medida de lo posible captar ruidos ajenos a la conmutación.

Esta última característica, unida a la enorme diferencia de precio existente entre ambos micrófonos, evidencia decantarse por el micrófono electret preamplificado, el cual proporciona señales en un rango adecuado y con un bajo nivel de ruido de fondo.

### 3.4. Estudio del ruido

Tras seleccionar el micrófono electret para la aplicación, se procede ahora a analizar la señal registrada. Se realiza en primer lugar un estudio frecuencial con el fin de estudiar las componentes del ruido producido por el relé. En segundo lugar, un estudio en el dominio temporal para tratar de determinar el origen de dicho ruido.

#### 3.4.1. Estudio frecuencial del ruido

En primer lugar, es interesante conocer el espectro de la señal medida para ver cuáles son las componentes frecuenciales predominantes. Además, también interesa estudiar cómo aumenta la intensidad sonora conforme aumenta la tensión de alimentación. Este aumento es perceptible al oído humano pero nunca se había analizado de forma cuantitativa. Se han realizado dos ensayos a diferentes tensiones sobre el relé RZ captando el ruido de conmutación y se ha aplicado la transformada rápida de Fourier a las señales captadas. En las figura 3.3 y 3.4 se observan los resultados.

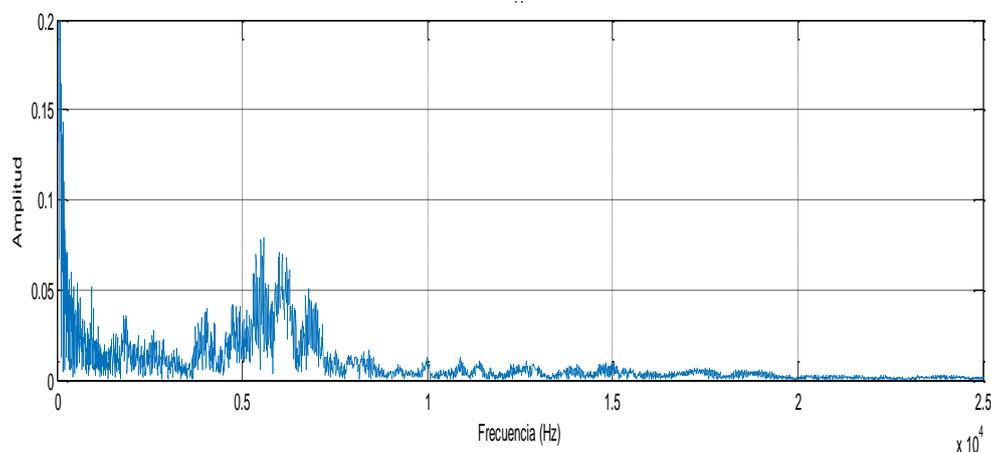


Figura 3.3: Espectro frecuencial del ruido medido por el micrófono Electret en ensayos realizados a 20V.

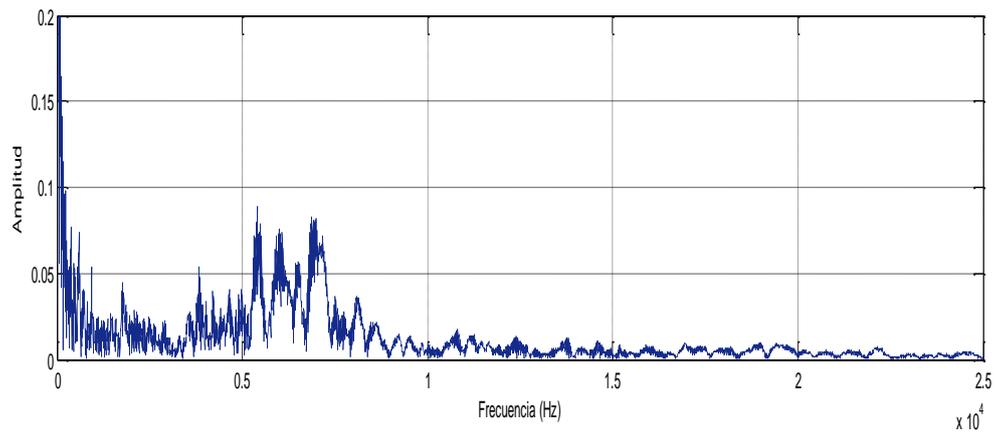


Figura 3.4: Espectro frecuencial del ruido medido por el micrófono Electret en ensayos realizados a 40V.

Se puede apreciar un pico muy marcado a bajas frecuencias que se corresponde con la componente de continua, la cual está presente en la señal de salida del micrófono. Se puede comprobar que la mayor parte de los armónicos se encuentran en la franja de los 3 a los 8 kHz. Además, es significativo el aumento de algunos armónicos conforme aumenta la tensión de alimentación, como puede ser el caso del pico a 7 kHz y la alteración de la banda de frecuencias a partir de los 10 kHz.

Resulta además interesante conocer con exactitud qué sucede a muy bajas y muy altas frecuencias, con el fin de detectar la presencia de algún tipo de componente ajena al ruido de conmutación. Esto puede observarse en la Figura 3.5.

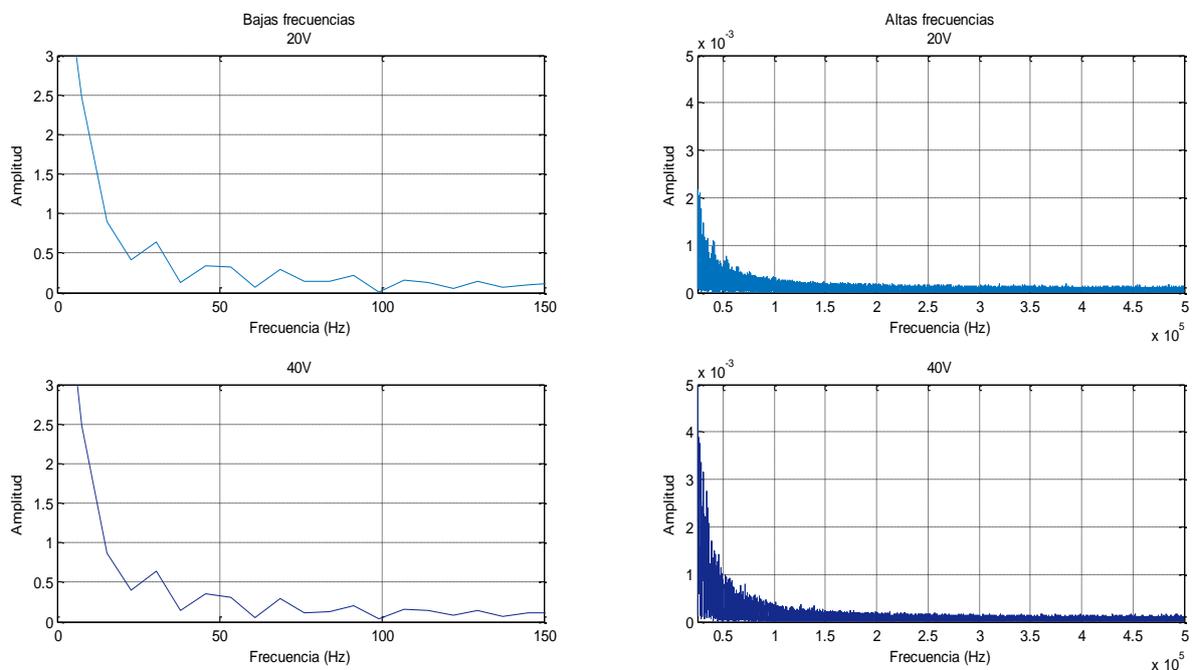


Figura 3.5: Espectro frecuencial a muy bajas (izquierda) y muy altas (derecha) frecuencias del ruido medido por el micrófono electret en ensayos a 20V (arriba) y 40V (abajo).

Se puede observar que apenas se capta ruido electromagnético a altas frecuencias. Se pueden apreciar unas componentes de muy pequeña amplitud hasta los 100 kHz

(correspondientes con la prolongación de los armónicos de la Figura 3.2) que acaban reduciéndose hasta desaparecer en la banda plana a altas frecuencias. De la misma manera, aunque cabría esperar los armónicos de la red eléctrica a muy bajas frecuencias, se ha comprobado que el micrófono no se ve afectado por estas señales.

En cualquier caso, a pesar de no haber registrado componentes frecuenciales destacables fuera del rango audible, puede resultar interesante diseñar un filtro para eliminarlas en el caso de que aparezcan. De esta forma, se ha diseñado un filtro Butterworth paso banda que proporcione a su salida las componentes frecuenciales de la señal en el rango 1 kHz – 20 kHz. Aunque este no es el rango audible completo, se ha tomado este intervalo de frecuencias dado que la mayor parte de las componentes de interés se encuentran en él. En las figuras 3.6 y 3.7 se puede observar la señal tanto en el dominio temporal, como en el dominio frecuencial (transformada de Fourier).

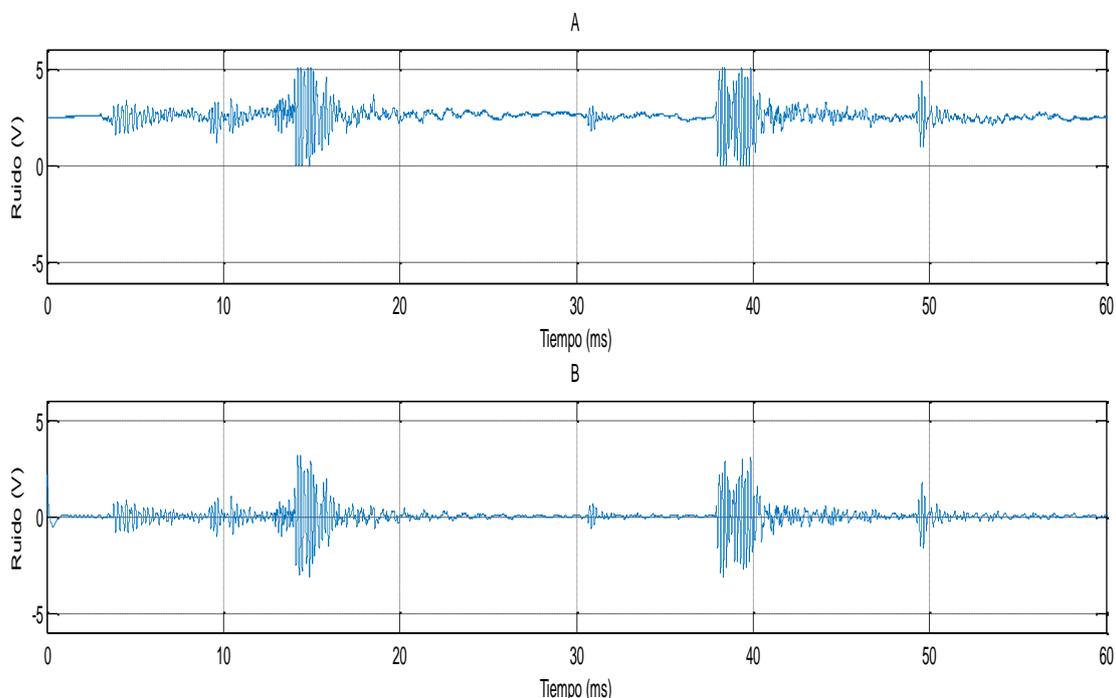


Figura 3.6: Señal de ruido original (A) y señal de ruido filtrada (B), medida por el micrófono electret en ensayo a 20V. Nótese que se ha eliminado la componente de continua y alguna otra componente de baja frecuencia que aparecía en la señal original.

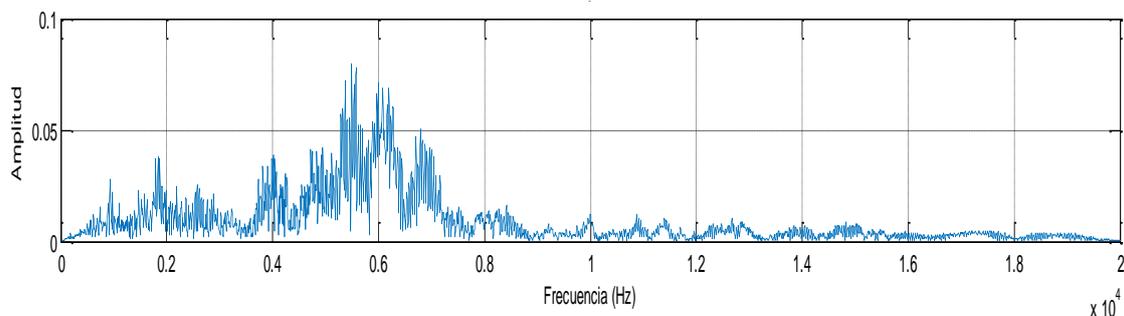


Figura 3.7: Espectro frecuencial de la señal filtrada, medida por el micrófono electret en ensayo a 20V. Nótese la ausencia de componentes a altas y bajas frecuencias.

### 3.4.2. Estudio del origen del ruido

El segundo punto importante en lo que respecta al análisis del ruido producido en las conmutaciones del relé es conocer en qué partes físicas del dispositivo se produce dicho ruido. En un principio, puede resultar evidente pensar que la mayor parte del mismo se deba al elevado número de rebotes que tienen lugar en los contactos del relé, pero hay que tener en cuenta que existen varios elementos móviles que entran en contacto y pueden contribuir a la generación de este ruido. A continuación se evalúa el ruido medido en tres modelos diferentes de relés para analizar en cada uno de ellos dónde se origina. Para llevar a cabo el estudio mencionado, en los ensayos realizados a lo largo de esta sección se incluyen diferentes variables del sistema aparte del ruido de conmutación que pueden aportar información de interés, como son la posición del mecanismo y el estado de los contactos.

#### 3.4.2.1. Origen del ruido en relé RZ

En la Figura 3.8 se ilustra el ruido medido en el relé RZ junto con los contactos fijos y la posición de la armadura móvil. En efecto, tanto en la operación de cierre como en la de apertura se puede apreciar una aparente relación directa entre rebotes y ruido, incluso se puede llegar a apreciar en el caso del cierre un pico de ruido por cada rebote. Hay que destacar también el pequeño retraso existente entre rebotes y ruido, debido simplemente a la velocidad de propagación del sonido. La disposición del micrófono, es decir, su cercanía al relé físicamente, determina que este retraso sea mayor o menor. En este caso, el retardo de la señal de sonido medida es perfectamente apreciable debido a la alta velocidad de conmutación del relé (pensar que, si se coloca el micrófono a un centímetro del relé, al sonido recorrer esta distancia le cuesta 0.3 ms, un tiempo más que apreciable en este sistema).

Sin embargo, a pesar de esta relación ruido-rebotes, se puede observar claramente la presencia de ruido en instantes temporales en los que no hay ningún rebote en el relé. En la operación de cierre, prácticamente la totalidad del ruido se origina efectivamente en los rebotes de los contactos del relé, pero en la operación de apertura, aparecen, además del ruido fruto de estos rebotes, unas oscilaciones en la señal del micrófono que de hecho tienen una amplitud muy superior. Se puede apreciar además que este ruido se produce justo en un gran rebote de la armadura móvil del relé. Es decir, que la idea de que la totalidad del ruido se produce en los rebotes de los contactos no es del todo correcta, ya que se puede asegurar también que existen otros ruidos de distinta naturaleza, fruto de los choques y rebotes que sufre la armadura móvil.

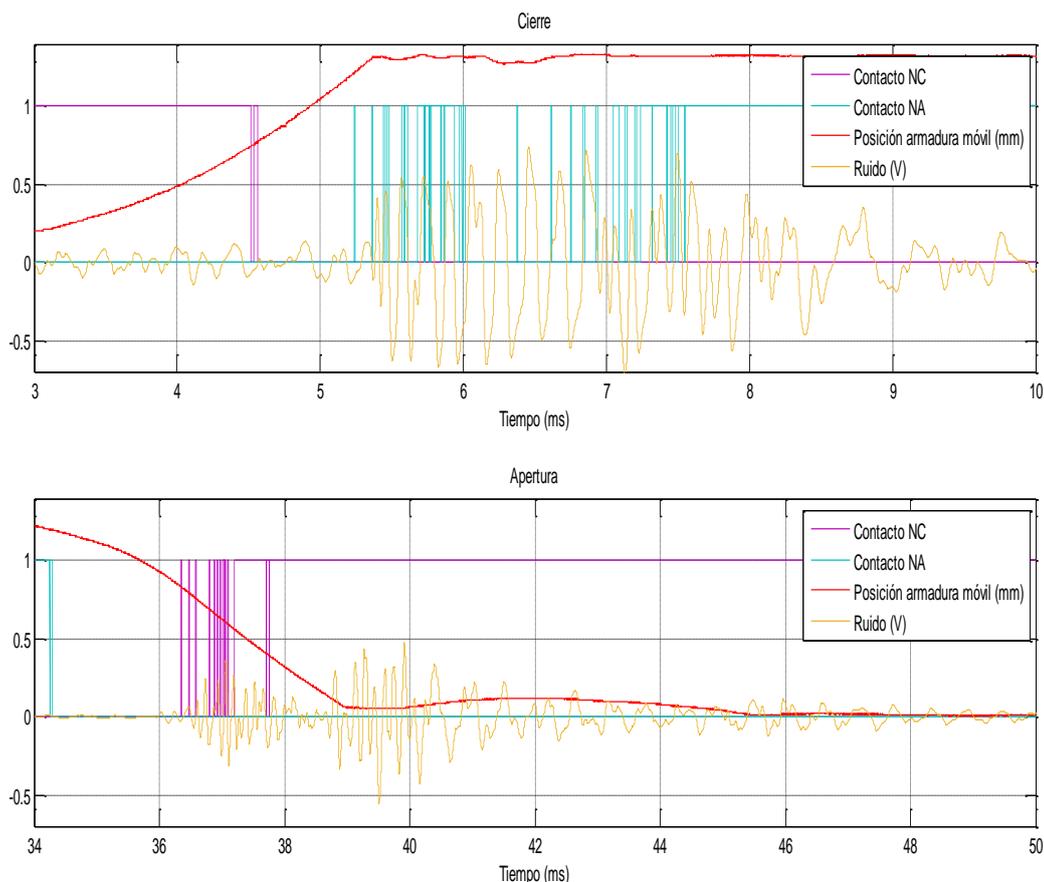


Figura 3.8: Relación entre ruido y rebotes en cierre y apertura en ensayo realizado a 30V en relé RZ.

### 3.4.2.2. Origen del ruido en relé PBH

Los resultados de los ensayos realizados sobre el relé PBH se muestran en la Figura 3.9. En este caso, la relación ruido-rebotes se aleja bastante de lo observado en el relé RZ. En la operación de cierre, la relación entre el ruido y los rebotes de los contactos es completamente inexistente. Si se atiende a la posición del contacto móvil, se observa que el ruido comienza una vez dicho contacto llega a su posición límite, cosa que sucede mucho después de que se produzca el contacto. Este límite del movimiento lo establece la armadura fija del relé, por lo que es en el choque de esta con la armadura móvil donde se produce este ruido. Recuérdese que en este relé el movimiento continúa una vez cerrados los contactos (sección 2.5.2).

En la operación de apertura, la relación entre rebotes y ruido es mucho más difícil de estudiar. El comportamiento observado en la Figura 3.8 no permite llegar a conclusiones claras. No obstante, analizando el diseño constructivo del dispositivo se ha observado que parte de dicho ruido podría producirse en los choques de la armadura móvil con las piezas que delimitan su movimiento.

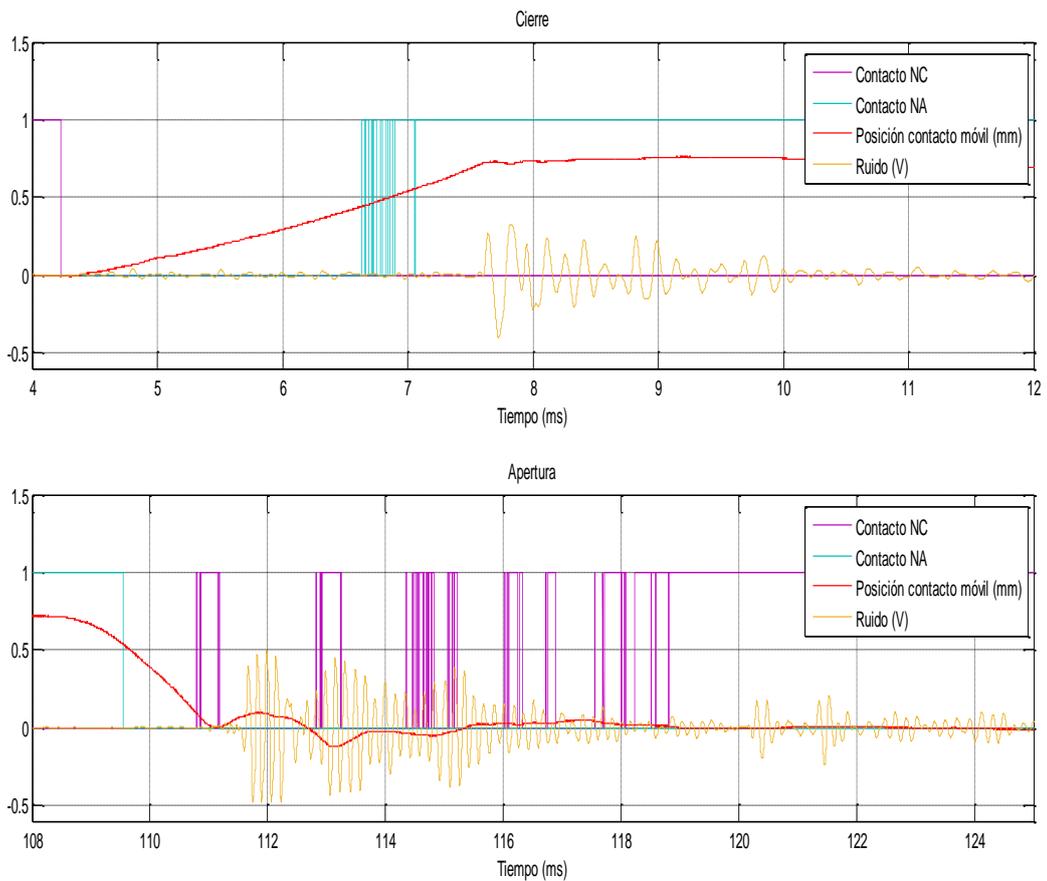


Figura 3.9: Relación entre ruido y rebotes en cierre y apertura en ensayo realizado a 10V en relé PBH.

En la Figura 3.10 se muestra el relé PBH abierto. Se puede observar que el movimiento del contacto móvil está limitado por el movimiento de la armadura móvil, cuyos límites los establecen a su vez la armadura fija en el cierre y el propio plástico de la carcasa en la apertura. Es en el contacto de la armadura con estos topes (especialmente en el cierre) donde se produce parte del ruido escuchado durante la conmutación.

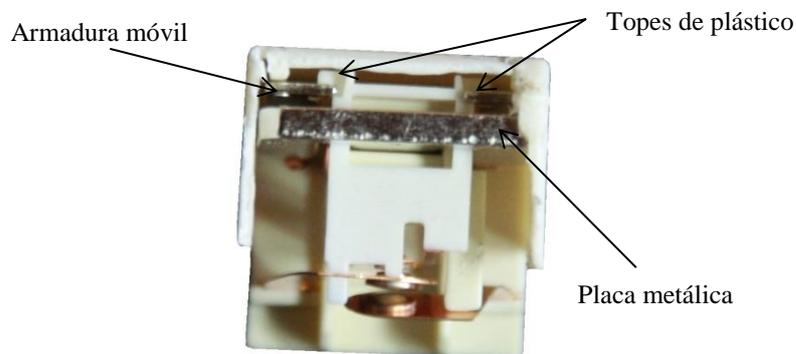


Figura 3.10: Componentes físicos que producen ruido en el relé PBH.

### 3.4.2.3. Origen del ruido en relé T9

El comportamiento observado en el relé T9 en la Figura 3.11 es diferente al observado en los relés anteriores. En la operación de cierre, el ruido comienza de nuevo una vez el contacto móvil se acerca a su posición límite y se propaga durante un largo tiempo una vez se han estabilizado los contactos, mostrando una independencia total con respecto a los rebotes. Por ello, se puede asegurar que, del mismo modo que ocurría en el relé PBH, el ruido en el cierre se produce a partir del choque de la armadura móvil con el elemento físico que delimita su movimiento.

En la operación de apertura, se aprecia una clara relación entre el ruido y las oscilaciones del contacto móvil del relé, que se asocian además con los rebotes en los contactos. Si se observa el relé T9 (Figura 3.12) se puede comprobar que el movimiento del contacto móvil está asociado a la armadura móvil, cuyos límites están marcados por la armadura fija (en el cierre) y, en este caso el propio contacto NC en la apertura. Es decir, es precisamente en estos topes donde se origina la mayor parte del ruido de conmutación.

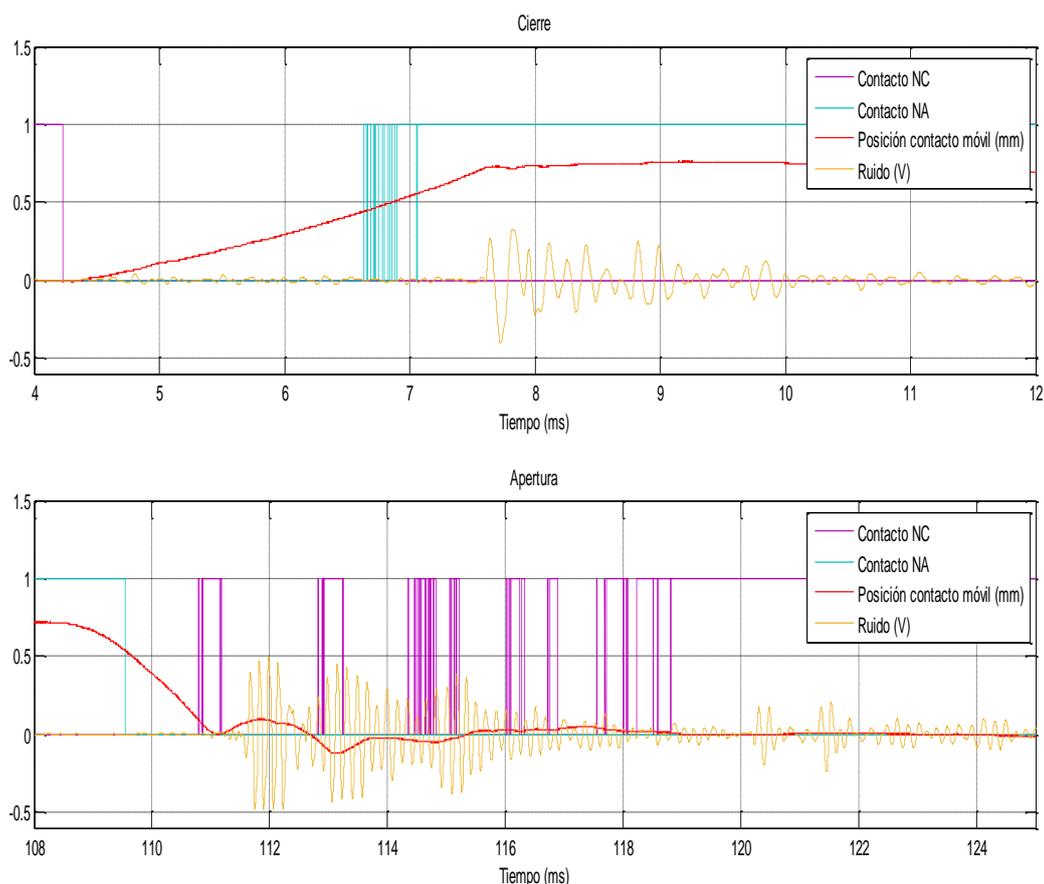


Figura 3.11: Relación entre ruido y rebotes en cierre y apertura en ensayo realizado a 20V en relé T9.

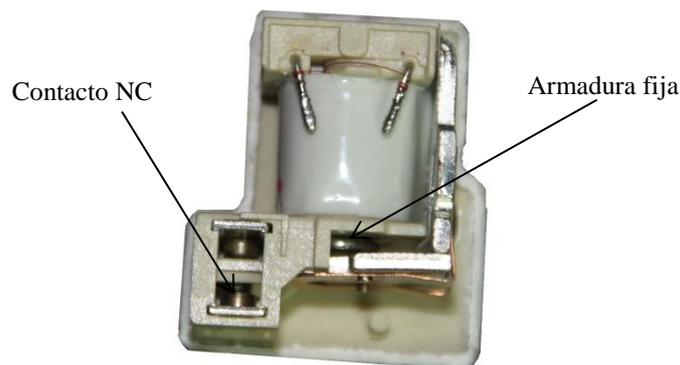


Figura 3.12: Componentes físicos que producen ruido en el relé T9.

#### 3.4.2.4. Discusión de resultados

Tras realizar el estudio del origen del ruido en los distintos modelos de relés, se pueden sacar varias conclusiones. De manera similar a lo observado en el estudio de la posición (sección 2.5), en cada modelo de relé se encuentran particularidades. En el caso del relé RZ se aprecia cierta relación entre el ruido y los rebotes en los contactos, existiendo además generación de ruido en otras partes del mecanismo. Por su parte, en el relé PBH es muy difícil establecer un origen claro del ruido debido al diseño constructivo del mismo. Por último, en lo que respecta al relé T9, armadura y contacto móvil son solidarios, por lo que todo el ruido se genera en este conjunto, y la relación rebotes-ruido es más evidente que en los casos anteriores aunque no completamente unívoca.

## Capítulo 4

### Diseño banco de pruebas

El último capítulo del presente trabajo se centra en la elaboración de un banco de pruebas para relés electromecánicos. El objetivo es diseñar un *Test Bench* que permita la realización de ensayos sobre cualquier modelo de relé electromecánico, independientemente de la huella y conexiones del encapsulado del dispositivo. Además, se incluye también el conexionado necesario para las alimentaciones de los circuitos de potencia y control, así como pines de medida de diferentes variables del sistema.

#### 4.1. Diseño PCB

Con el fin de lograr la máxima versatilidad posible en el banco de pruebas, pudiendo, como ya se ha mencionado, realizar ensayos sobre cualquier modelo de relé, se ha decidido incluir el circuito de activación, común para todos los relés, en una PCB. En esta placa se incluyen, junto con los componentes de dicho circuito, los pines de alimentación del relé y del circuito de activación, así como los de la señal de activación del circuito. Por último, se facilitan una serie de pines para la lectura de señales con el osciloscopio.

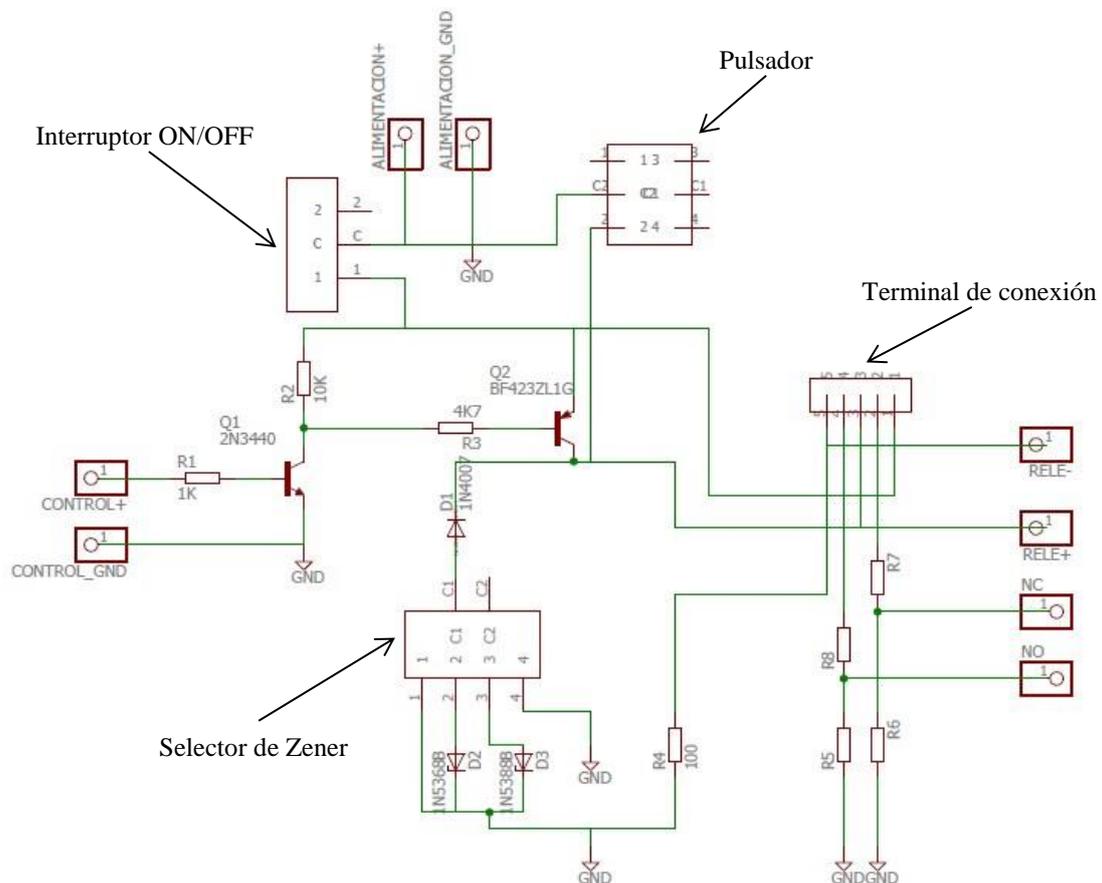


Figura 4.1: Esquemático del circuito de activación.

El esquema del circuito de activación, presentado en la Figura 4.1, es el mismo que el empleado en trabajos previos para este tipo de dispositivos, siendo el funcionamiento el siguiente: el terminal de control (CONTROL+) satura el transistor NPN (2N3440), inyectando la corriente de base a través de la resistencia R1. Este satura a su vez el transistor PNP (BF423ZL1G), lo que provoca la conexión del terminal del relé (RELE+) con la alimentación del circuito.

Se puede observar además una serie de componentes adicionales en el circuito, que se corresponden con: terminales de conexión (alimentaciones, pines del relé y terminales de lectura), un interruptor ON/OFF, un pulsador para conmutar manualmente el relé y un *switch* circular para seleccionar diferentes modelos de diodos zener. Cada una de las posiciones del *switch* se corresponde con un circuito diferente de protección de la bobina [17]. En la Figura 4.2 se puede observar la placa de circuito impreso, con los diferentes componentes, pistas e impresiones en las caras *top* (rojo) y *bottom* (azul).

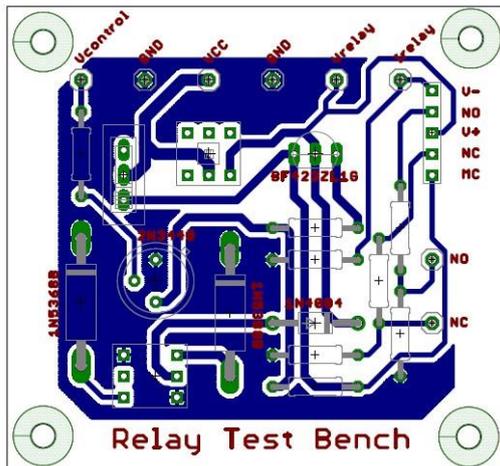


Figura 4.2: PCB del circuito de activación para relés electromecánicos.

El banco de pruebas cuenta, además de con la PCB, con otra serie de elementos que son necesarios para poder elaborar los ensayos de forma adecuados sobre los relés. Por su parte, el relé se situará en una pequeña *proto-board* al lado de la PCB, de manera que mediante las correspondientes conexiones externas se conectarán los terminales del relé (alimentación y contactos) a dicha PCB. Asimismo, se ha incorporado el micrófono mediante un montaje que permite ajustar su orientación sobre los relés.

## Capítulo 5

### Conclusiones y líneas futuras

---

#### 5.1. Conclusiones

El presente trabajo, englobado dentro de una línea de investigación que tiene como objetivo final mejorar las prestaciones de relés electromecánicos, ha constituido un proyecto en el que concurren, de un modo u otro, varias ramas de la ingeniería como la electrónica, la metrología o el diseño CAD. Además, se han tratado otros aspectos habituales en el trabajo de un ingeniero, como la búsqueda de proveedores o el establecimiento de relaciones comerciales. Ejemplo de ello han sido las numerosas reuniones con profesionales de distintas empresas en las que ha sido necesario exponer de manera clara el problema que se quería resolver.

El primer objetivo del trabajo consistía en buscar y evaluar dispositivos que permitieran medir la posición del mecanismo del relé. Se ha realizado una búsqueda exhaustiva de sensores, se han descartado todos aquellos que no se adaptaban al problema y se han evaluado experimentalmente dos alternativas que cumplieran con los requisitos establecidos: un sensor láser de ámbito industrial y una cámara lineal.

Con respecto a los sensores láser, cabe destacar que su inclusión en un sistema de control es del todo viable gracias a la salida analógica que proporcionan en tiempo real. Sin embargo, presentan el inconveniente de que el acceso al punto de medida es complicado y, dependiendo del modelo de relé, no siempre es posible medir la posición deseada. Por su parte, la alternativa de la cámara lineal permite la medición simultánea de varios componentes del mecanismo del relé, solucionando así el mayor inconveniente del sensor láser. Además, esta característica puede ser de gran utilidad de cara a una mejor caracterización del modelo de cualquier relé. No obstante, las imágenes captadas por este dispositivo requieren una fase de procesamiento para extraer la información de interés, lo que provoca que su utilización en sistemas de control sea con toda seguridad más complicada que en el caso del sensor láser. En cualquier caso, la facilidad con la que se puede obtener cualquier medida en cualquier dispositivo electromecánico le otorga una enorme versatilidad.

En definitiva, se ha comprobado que ambos sensores presentan ventajas e inconvenientes. Además, el precio de los equipos es muy similar, situándose en torno a los 2000 €. La adquisición final de uno o ambos dependerá de la orientación futura de esta línea de investigación. En este aspecto, sí puede concluirse que el sensor láser se adapta mejor a tareas de control y la cámara a tareas de modelado e identificación.

El segundo de los objetivos planteados era analizar el movimiento del mecanismo de los relés en base a las medidas obtenidas con los sensores anteriores. En este punto se

han podido obtener también conclusiones interesantes. Se ha observado que cada modelo de relé presenta particularidades en su comportamiento. Hay que destacar que, debido al distinto diseño de cada relé, la medición se ha realizado en cada uno en un componente diferente del mecanismo. En el caso del relé RZ no se ha podido medir directamente la posición del contacto móvil y se ha optado por medir la trayectoria de la armadura móvil. Se ha observado que dicha trayectoria no tiene relación con los rebotes en los contactos. Por su parte, en el caso de los relés T9 y PBH sí que se ha podido medir directamente la posición del contacto móvil, y los resultados difieren de nuevo de un dispositivo a otro. En el relé PBH, la flexibilidad de sus contactos provoca oscilaciones conjuntas de los contactos fijo y móvil. En el caso del relé T9, se observan oscilaciones similares, pero su naturaleza es muy diferente. En este caso, las oscilaciones tienen lugar en dirección perpendicular al movimiento de la armadura.

Tras los estudios relacionados con la posición del mecanismo del relé, el tercer objetivo abarcaba la búsqueda y selección de un micrófono para la medida del ruido del relé. Se han analizado dos micrófonos distintos con características muy diferentes y se ha seleccionado el micrófono electret preamplificado como la alternativa óptima para esta aplicación. Este micrófono es omnidireccional y su salida se sitúa en un rango apropiado para ser medida por un osciloscopio. Además, presenta una sensibilidad suficientemente alta como para captar el ruido del relé y suficientemente baja como para no captar ruidos lejanos. Por último, destacar que tiene un coste muy bajo que no alcanza los diez euros.

El cuarto de los objetivos estaba orientado al análisis del ruido, tanto sus componentes frecuenciales como su origen. El análisis frecuencial del mismo ha demostrado que prácticamente la totalidad del ruido emitido por el relé se encuentra en el rango audible. En cualquier caso, se ha propuesto utilizar un filtro paso banda para eliminar componentes que pudieran aparecer fuera de este rango. Además, se ha detectado que al subir la tensión de alimentación el relé produce más ruido y lo hace en componentes frecuenciales distintas.

En lo que respecta al estudio del origen del ruido, se han podido observar de nuevo diferencias entre los distintos modelos de relés. En el relé RZ se ha comprobado que gran parte del ruido se produce en los rebotes de los contactos. Sin embargo, también se han captado ruidos cuyo origen reside en el choque de la armadura móvil. En el caso del relé PBH se ha podido comprobar que, en la operación de cierre, el ruido se origina en la armadura móvil del relé. En cambio, ha resultado muy difícil establecer un origen claro del ruido en la operación de apertura. Por último, en lo que respecta al relé T9, se ha podido apreciar la generación de ruido tanto en los contactos como en el choque de la armadura móvil con la armadura fija. Dado que armadura y contacto móvil son solidarios, en este relé ruido y rebotes están mucho más relacionados que en el resto. La conclusión que se puede obtener de este análisis es que no existe un patrón común a todos los relés y que, por lo tanto, en el caso de usar nuevos modelos deberán realizarse estudios adicionales.

El último de los objetivos era diseñar un banco de pruebas que permitiera la realización de ensayos en cualquier modelo de relé electromecánico. De esta manera, se ha diseñado un *Test Bench* en el que se ha incluido una PCB con el circuito de activación (común a todos los relés) y una *protoboard* en la cual se puede colocar cualquier relé independientemente de la huella que posea. Además, se ha incorporado el micrófono electret seleccionado en el trabajo. De esta forma, se ha obtenido un banco de pruebas versátil que permite realizar ensayos sobre cualquier relé y cambiar entre distintos modelos de una forma muy rápida.

## 5.2 Líneas futuras

Partiendo del presente trabajo, se plantean una serie de líneas de investigación futuras:

- Modelado del ruido. Puesto que ya se ha seleccionado un micrófono para la medición del ruido, se propone utilizar las medidas experimentales registradas con el mismo para incorporar un modelo de generación de ruido a los modelos dinámicos de relé ya desarrollados en trabajos previos [1], [2].
- En el caso de que se seleccionara el sensor láser, se plantea como línea futura el diseño e implementación de estrategias de control de la posición en tiempo real, utilizando para ello las medidas proporcionadas por dicho sensor.
- Finalmente, en el caso de que se optara por adquirir la cámara lineal, se plantea como línea futura la calibración y el montaje del sistema. Estas cámaras, debido a la alta tasa imágenes que capturan, requieren de equipos de iluminación especiales, por lo que la configuración del sistema no es sencilla. Así mismo, será necesario el desarrollo de técnicas de procesado de las imágenes capturadas.



## Bibliografía

---

- [1] Edgar Ramírez Laboreo. “Modelado y control de dispositivos electromecánicos”. Trabajo Fin de Máster, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2015.
- [2] Davinia Vera Soriano. “Plataforma de calibración de señales para la activación dinámica de relés”. Trabajo Fin de Máster, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2013.
- [3] Álvaro Cortes Blanco. “Control inteligente de relé electromecánico para mejora de prestaciones”. Proyecto Fin de Carrera, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2013.
- [4] Edgar Ramirez-Laboreo, Carlos Sagués, Sergio Llorente. “A new model of electromechanical relays for predicting the motion and electromagnetic dynamics”, in *2015 Ind. Applicat. Soc. Annu. Meet. IEEE*, pendiente de publicación.
- [5] Xiong Jun, He Jun-jia, Zang Chun-yan. “A Dynamic Model of Electromagnetic Relay Including Contact Bounce”. Wuhan, 2008.
- [6] Antonio Garcia Espinosa, Jordi-Roger Riba Ruiz, Xavier Alabern Morera. “A Sensorless Method for Controlling the Closure of a Contactor”. Universidad politécnica de Cataluña, 2007.
- [7] Paulo Mário dos Santos Dias de Moraes, Arnaldo José Perin. “An Electronic Control Unit for Reducing Contact Bounce in Electromagnetic Contactors”. 2008.
- [8] TE Connectivity Ltd. Company. *Power PCB Relay RZ Datasheet*. <http://www.te.com/usa-en/home.html>, 2014.
- [9] TE Connectivity Ltd. Company. *Miniature Power PCB Relay PBH Datasheet*. <http://www.te.com/usa-en/home.html>, 2014.
- [10] TE Connectivity Ltd. Company. *Power Relay T9A Datasheet*. <http://www.te.com/usa-en/home.html>, 2015.
- [11] Saúl Noguerras. “Modelado, análisis y control de electroválvula de seguridad de encimera de gas”. Trabajo Fin de Grado, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2015.
- [12] Keyence Corporation. *LK-G5001PV Datasheet*. <http://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/lk-g5000/models/lk-g5001pv/index.jsp>, 2015.
- [13] Keyence Corporation. *LK-H082 Datasheet*. <http://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/lk-g5000/models/lk-h082/index.jsp>, 2015.
- [14] Keyence Corporation. *LK-G3001PV Datasheet*. <http://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/lk-g3000/models/lk-g3001pv/index.jsp>, 2015.
- [15] Keyence Corporation. *LK-G82 Datasheet*. <http://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/lk-g3000/models/lk-g82/index.jsp>, 2015.

- [16] Teledyne DALSA. *Spyder3 GigE Vision SG-14 Datasheet*.  
<http://www.teledynedalsa.com/imaging/products/cameras/line-scan/spyder3/SG-14-02K80/>, 2012.
- [17] *The application of relay coil suppression with DC relays*, Tyco Electronics, Nov. 98, application note 13C3311.

