



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROYECTO FINAL DE CARRERA

TÍTULO: Sistema automatizado para la calibración de acelerómetros según norma ISO 16063-21:2003.

AUTOR: Alex Ruiz Montalvo

TITULACIÓN: E.T.I. Especialidad en Electrónica Industrial

DIRECTOR: Antoni Mánuel Lázaro

DEPARTAMENTO: 710, Ingeniería Electrónica

FECHA: 28 junio de 2010

TÍTULO: Sistema automatizado para la calibración de acelerómetros según norma ISO 16063-21:2003.

APELLIDOS: Ruiz Montalvo

NOMBRE: Alex

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica Industrial

ESPECIALIDAD: Electrónica Industrial

PLAN: 95

DIRECTOR: Antoni Manuel Lázaro

DEPARTAMENTO: 710, Ingeniería Electrónica

CALIFICACIÓN DEL PFC

TRIBUNAL

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

FECHA DE LECTURA:

¿Este proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales?: Sí No

PROYECTO FIN DE CARRERA

RESUMEN (máximo 50 líneas)

La dura competitividad del sector de automoción hace que la acreditación de los laboratorios de ensayo sea cada vez más frecuente en este sector. El cliente se siente más tranquilo cuando tiene una garantía de que el trabajo que realiza la empresa ha sido acreditado por una entidad nacional como ENAC.

Debido a recientes acreditaciones en ensayos de seguridad pasiva y al crecimiento del número de acelerómetros en los laboratorios de instrumentación, se hace imprescindible modificar el procedimiento de calibración de acelerómetros que lleva a cabo el laboratorio de calibración interno de la empresa, de acuerdo a las normativas vigentes.

El nuevo procedimiento de calibración se realizará según la norma ISO 16063-21:2003 para la calibración secundaria de acelerómetros por vibración. Asimismo, al sistema de calibración de acelerómetros se le dotará de una aplicación basada en LabVIEW que se encargará de automatizar el proceso de calibración y generación de los informes. De esta forma, se mejora la calidad de las calibraciones y el tiempo invertido en ellas.

Para conseguir estos objetivos, como introducción, es necesario familiarizarse con los conceptos fundamentales de la metrología y, seguidamente, conocer los tipos, tecnologías y aplicaciones de los acelerómetros utilizados en la empresa.

Palabras clave (máximo 10):

Metrología	Incertidumbre	Sensibilidad	Automatizado
Calibración	Transductor	Vibración	LabVIEW
Patrón	Acelerómetro		

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	15
1.1. Presentación del problema	16
1.2. Objetivos	16
1.3. Antecedentes	17
1.4. Especificaciones básicas	18
1.5. Pasos a seguir en el desarrollo del proyecto.....	18
1.6. Estructura de la memoria	18
2. METROLOGÍA Y CALIBRACIÓN	21
2.1. ¿Qué es la metrología?	21
2.1.1. Vocabulario Internacional de Metrología	21
2.1.2. Definición de incertidumbre de medida	21
2.1.3. Otros conceptos metrológicos	22
2.2. Calibración	24
2.2.1. Importancia de la calibración periódica	25
2.2.2. Patrón y trazabilidad metrológica	25
2.3. El laboratorio de calibración	23
2.3.1. Justificación	26
2.3.2. Alcance y trazabilidad metrológica	26
2.3.3. Gestión de las calibraciones	26
2.4. Calidad en la calibración	27
2.4.1. Procedimientos	27
2.4.1.1. Importancia del procedimiento documentado	27
2.4.1.2. Pautas para la elaboración de una instrucción de calibración	28
2.4.2. La acreditación	29
2.4.3. Entidades nacionales de acreditación. ENAC	30
3. EL ACELERÓMETRO	32
3.1. La aceleración: definición y conceptos básicos	32
3.2. ¿Qué es un transductor?.....	32
3.3. El acelerómetro	33
3.3.1. Sensibilidad del acelerómetro	33
3.3.2. Ancho de banda	34
3.3.3. Otras características técnicas	35

3.3.4.	Principio de funcionamiento	38
3.4.	Tipos de acelerómetros	38
3.4.1.	Acelerómetros para medidas estáticas	39
3.4.2.	Acelerómetros para medidas dinámicas	40
3.4.3.	Acelerómetros para la medición en una o varias dimensiones	41
3.5.	Tecnologías	43
3.5.1.	Acelerómetros piezoresistivos	43
3.5.2.	Acelerómetros piezoeléctricos	47
3.5.3.	Acelerómetros piezoeléctricos con electrónica incorporada (IEPE)	48
3.5.4.	Acelerómetros capacitivos	49
3.5.5.	Resumen de características y aplicaciones según la tecnología	50
3.6.	Acondicionamiento de la señal del acelerómetro	51
3.6.1.	Acondicionamiento de señal para transductores piezoresistivos	51
3.6.2.	Acondicionamiento de señal para acelerómetros piezoeléctricos	55
3.6.3.	Acondicionamiento de señal para acelerómetros IEPE	56
3.6.4.	Acondicionamiento de señal para acelerómetros capacitivos	56
3.7.	Calibración de acelerómetros	57
3.7.1.	Calibración de acelerómetros de bajo rango para medidas estáticas	57
2.7.2	Calibración primaria de acelerómetros para medidas dinámicas	59
2.7.3	Calibración secundaria de acelerómetros para medidas dinámicas	60
4.	SOFTWARE Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN UTILIZADOS	64
4.1.	NI LabVIEW 8.0	64
4.1.1.	National Instruments	64
4.1.1.	Instrumentación virtual	65
4.2.	EAGLE Layout Editor 5.6.0.	66
4.2.1.	Editor de esquemáticos de Eagle Layout Editor	66
3.2.2	Editar Layout del PCB con Eagle Layout Editor	67
3.2.3	Realizar el layout con <i>Autorouter</i>	67
4.3.	Microchip MPLAB IDE v8.36	69
3.3.1.	Microchip	69
3.3.2.	Microcontroladores PIC	69
3.3.3.	Lenguaje de programación de los PIC's	70
3.3.4.	Introducción al software MPLAB IDE	70

4.4. Protocolo RS232	72
4.4.1. ¿Qué es un protocolo de comunicación?	72
4.4.2. Importancia de un protocolo en la transferencia de datos	72
4.4.3. Comunicación serie. Definición y características básicas	72
4.4.4. Especificaciones y funcionamiento del puerto serie RS232	73
4.4.5. Configuración del puerto RS232	75
4.5. Protocolo GPIB	76
4.5.1. Breve historia del bus GPIB	76
4.5.2. Comunicación paralelo	76
4.5.3. Conceptos básicos del bus GPIB	76
4.5.4. Líneas del bus GPIB	77
4.5.5. Especificaciones técnicas	78
4.6. VISA	80
4.6.1. ¿Qué es y para qué sirve?	80
4.6.2. Comunicación RS232 y GPIB con LabVIEW	80
5. HARDWARE E INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LA APLICACIÓN	83
5.1. Instrumentos de medida	83
5.1.1. Acelerómetro patrón y acondicionador de señal	83
5.1.2. Excitador de vibraciones electrodinámico	84
5.1.3. Amplificador de potencia	86
5.1.4. Generador de funciones	87
5.1.5. Multímetro digital	87
5.1.6. Amplificador de extensometría	88
5.1.7. Amplificador de carga	89
5.1.8. Fuente de corriente para transductores IEPE	90
5.1.9. Osciloscopio (opcional)	90
5.2 Hardware de apoyo	91
5.2.1. Placa controladora GPIB-USB	91
5.2.1. Módulo de conmutación	92
6. GUÍA PARA LA CALIBRACIÓN SECUNDARIA DE ACELERÓMETROS	94
6.1. Preparación	94
6.1.1. Condiciones ambientales	94
6.1.2. Configuración y preparación de los instrumentos	95
6.1.3. Preparación del acelerómetro bajo prueba	95

6.1. Método de calibración	97
6.2.1. Conexión de los equipos	97
6.2.2. Determinación de la sensibilidad	98
6.2.3. Calibración de la linealidad en amplitud	100
6.2.4. Respuesta en frecuencia	100
6.1. Expresión de los resultados	101
7. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN	103
7.1. Diseño y desarrollo del módulo de conmutación	103
7.1.1. Conmutador controlado: relé electromecánico	103
7.1.2. Interfaz de comunicación utilizada: RS232 a través de USB	107
7.1.3. Módulo de control	109
7.1.4. Programación del módulo de control con microcontrolador PIC	110
7.1.5. Listado de componentes y presentación de la placa	112
7.1.6. Problemas encontrados durante el proceso de diseño	113
7.2. Diseño y desarrollo del software para la automatización del proceso de calibración	114
7.2.1. Introducción	114
7.2.2. Pasos seguidos en la elaboración de la aplicación	114
7.2.2.1. <i>Presentación de la antigua aplicación</i>	<i>114</i>
7.2.2.2. <i>Aspectos a mejorar respecto a la antigua aplicación</i>	<i>120</i>
7.2.2.3. <i>Primera versión de la nueva aplicación</i>	<i>121</i>
7.2.2.4. <i>Segunda versión de la nueva aplicación</i>	<i>122</i>
7.2.2.5. <i>Última versión de la nueva aplicación</i>	<i>124</i>
7.2.3. Panel frontal del programa principal	124
7.2.4. Descripción del programa: Diagrama de flujo	131
8. RESULTADOS Y PRESTACIONES	137
8.1. Pruebas con distintos tipos de acelerómetros	137
8.1.1. Calibración de un acelerómetro piezoeléctrico	137
8.1.2. Calibración de un acelerómetro piezorresistivo	140
8.2. Comparativa con el antiguo sistema de calibración	143
8.3. Pruebas de reproducibilidad utilizando distintas técnicas de montaje	156
8.3.1. Comparativa mediante un acelerómetro piezorresistivo uniaxial	157
8.3.2. Comparativa mediante un acelerómetro IEPE triaxial	160

8.3.3.	Conclusiones del estudio	163
8.4.	Repetibilidad y deriva en el tiempo	164
8.5.	Pruebas con el módulo de conmutación	165
8.6.	Desfase en las lecturas del UUT y del acelerómetro patrón	166
8.6.1.	Desfase de lecturas en la obtención de la sensibilidad	167
8.6.2.	Desfase de lecturas en la verificación de la linealidad en amplitud	170
8.6.3.	Conclusiones del estudio	171
8.7	Incertidumbre de calibración	171
8.8	Tiempo invertido en las calibraciones	173
9.	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	176
9.1	Objetivos alcanzados	176
9.1.1	Otros comentarios	177
9.2	Futuras mejoras y ampliaciones	177
8.2.1	Corrección de los resultados de la respuesta en frecuencia según método de fijación	177
8.2.2	Estimación de la incertidumbre de medida en los resultados de la respuesta en frecuencia	178
8.2.3	Caja de alimentación para múltiples acelerómetros piezorresistivos	178
8.2.4	Actualización automática de sensores Pre-TEDS	179
8.2.5	Medición del ángulo de fase durante la calibración de respuesta en frecuencia	180
8.2.6	Calibración por el método de choque	180
10.	AMBIENTALIZACIÓN DEL PFC	187
11.	ANEXOS	188
A.1.	Instrucción de calibración de acelerómetros	189
A.2.	Manual de uso del calibrador de acelerómetros	210
A.3.	Diagrama de bloques de la aplicación	230
A.4.	Estimación de la incertidumbre de medida en las calibraciones	249
A.5.	Programación del PIC del módulo de conmutación	257
A.6.	Modelado del comportamiento del <i>shaker</i>	260
A.7.	Modelo mecánico del acelerómetro	263
A.8.	Guía básica de LabVIEW	267
A.9.	Esquema eléctrico y PCB de la tarjeta conmutadora	273
A.10.	Informes de calibración de los resultados del apartado 8.1	275
12.	BIBLIOGRAFÍA	286

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar deseo expresar mi agradecimiento a mi familia y amigos los cuales me han apoyado y motivado en todo momento.

También quiero agradecer los consejos de mi tutor del proyecto Antoni Mánuel, sin él no habría sido posible.

Finalmente, quiero agradecer la ayuda prestada y la paciencia de mis compañeros de trabajo Josep, Manu, Sergi y Marcelo. Sin su ayuda y motivación este proyecto no habría visto la luz.

CAPÍTULO 1. Introducción y objetivos del proyecto

1. Introducción y objetivos del proyecto

La instrumentación industrial surge por una necesidad de medir y/o controlar procesos físicos que se llevan a cabo en la industria.

En el ámbito de la automoción cada día cobra más importancia la instrumentación industrial. La aparición y/o mejora de nuevos sistemas para la seguridad del automóvil, el confort o la ayuda a la conducción, aporta cada vez mayores retos en materia de instrumentación. Para satisfacer toda esta demanda es necesario el uso de instrumentos cada vez más precisos y fiables, tanto para la implantación de los sistemas mencionados como para su verificación y homologación.

El acelerómetro surge por la necesidad de medir con cierta precisión las vibraciones producidas en estructuras mecánicas o las variaciones de velocidad que adquieren algunos objetos. En la investigación y homologación del automóvil, el acelerómetro asume un papel muy importante, siendo, por ejemplo, capaz de dar información como las fuerzas que intervienen en un choque dentro del habitáculo de un automóvil o las deceleraciones producidas en las distintas partes del cuerpo de un pasajero. También puede dar una valiosa información sobre las vibraciones producidas en distintas partes de la carrocería de un automóvil durante la conducción, o la deceleración que sufre la cabeza dentro de un casco de motocicleta al impactar a distintas velocidades.

1.1. Presentación del problema

El proyecto se desarrolla en el laboratorio de calibración de una empresa dedicada a la investigación del automóvil.

Para asegurar el buen funcionamiento y la precisión de los acelerómetros utilizados en los ensayos con automóviles, es de vital importancia realizarles una calibración periódica.

A causa de la inmensa cantidad de acelerómetros utilizados en la empresa, desde hace unos años se decidió llevar a cabo su calibración de manera interna en el propio laboratorio de calibración de la empresa.

Debido a los cambios en las normativas de calibración y de cálculos de incertidumbre, es necesario actualizar el sistema y el procedimiento de calibración de acelerómetros. Además, debido a la creciente demanda de calibraciones, resulta imprescindible automatizar casi por completo el proceso de calibración y realización del informe de calibración.

1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es crear un sistema automatizado para realizar la calibración de los acelerómetros utilizados para ensayos de automoción en una empresa dedicada a la investigación del automóvil. El procedimiento de calibración deberá ser conforme a la norma ISO 16063-21 para la calibración secundaria de acelerómetros por método de vibración [26].

Para lograr dicho objetivo, se parte de un banco de trabajo compuesto por un conjunto de instrumentos de medida y generación de señal que se comunicarán entre ellos para llevar a cabo la calibración de una forma semiautomática.

Para llevar a cabo la automatización se elaborará un programa basado en lenguaje G de programación mediante LabVIEW. Dicho programa servirá como interfaz entre el usuario y el sistema de calibración y será el encargado de guiar todo el proceso de calibración y de comunicarse con todos los instrumentos y aplicaciones que intervienen en la calibración y generación del informe. Se utilizarán los protocolos GPIB

y RS232 para la comunicación con los instrumentos y los comandos ActiveX para la comunicación con las bases de datos y hojas de cálculo.

Se elaborará una plantilla del informe de calibración mediante Microsoft Excel la cual recogerá todos los resultados de la calibración y realizará los cálculos necesarios para la estimación de la incertidumbre y otros parámetros estadísticos. Los campos de esta plantilla se rellenarán de manera automática una vez realizada la calibración, consiguiendo eliminar los errores tipográficos a la hora de pasar manualmente los resultados al informe de calibración.

También se deberán realizar estudios que demuestren la eficacia del sistema para la calibración de los acelerómetros de distintas tecnologías de acuerdo a la norma ISO 16063-21 empleando, además, los distintos métodos de montaje que se llevan utilizando desde que se implantó la calibración de acelerómetros en el laboratorio.

Como objetivo secundario y personal, me he propuesto el aprendizaje de la programación mediante LabVIEW, ya que es una herramienta muy utilizada en el entorno de mi trabajo y hasta ahora no había tenido oportunidad de utilizarla en ninguna ocasión. Esto supondrá una mejora en mi formación de cara a mi futuro profesional.

1.3. Antecedentes

En el laboratorio de calibración se lleva realizando calibración de acelerómetros desde el año 1993 con la aparición de la norma ISO 5347-3 (sustituída más tarde por la ISO 16063-21:2003). Desde entonces, no se ha realizado ninguna modificación al método de calibración.

Se ha observado que, mediante el procedimiento de calibración antiguo, algunos aspectos no estaban basados en la norma ISO 16063-21 para la calibración de transductores de vibración y choque. Además, los cálculos realizados para la estimación de la incertidumbre de medida no contemplaban todas las contribuciones que intervienen en la calibración.

En cuanto al desarrollo del proceso de calibración, se utilizaba un programa basado en el lenguaje de programación QBASIC. Dicha aplicación, y en general, el sistema de calibración, tenía las siguientes desventajas:

- Falta de flexibilidad: El desarrollo del proceso de calibración era totalmente lineal y no permitía realizar ajustes. Además, cuando ocurría un error de cualquier tipo, era necesario reiniciar por completo el proceso de calibración.
- Interfaz de texto: No se aprovechaba de las ventajas de las interfaces que ofrecen los nuevos lenguajes de programación gráficos.
- Falta de calidad en la calibración: Durante la calibración eran frecuentes los errores tipográficos y de cálculo debido a que todos los parámetros debían ser introducidos a mano en cada calibración.
- Escasa automatización: Algunas partes de la calibración debían ser realizadas manualmente, con la consiguiente pérdida de tiempo y de reproducibilidad.

Por otro lado, durante la calibración era imprescindible el uso de dos multímetros de referencia, uno para la lectura de la señal de salida del acelerómetro de referencia y otro para la del acelerómetro en calibración. No obstante, es posible realizar la calibración con un solo multímetro con ayuda de un multiplexor, optimizando así el uso de recursos de hardware.

1.4. Especificaciones básicas

El sistema de calibración debe ser capaz de realizar la calibración de cualquier acelerómetro para medidas dinámicas que se utilice en las instalaciones de la empresa, sin importar la tecnología ni otras características como el tamaño o la aplicación a la que vaya destinado.

Así pues, al sistema se le deberá dotar de una aplicación software encargada de controlar de manera automatizada todo el proceso de calibración de acelerómetros piezorresistivos, piezoeléctricos, piezoeléctricos con electrónica incorporada (IEPE) y capacitivos con electrónica incorporada.

El rango de calibración está limitado por el propio método de calibración, pero se deberá poder realizar una correcta calibración a partir de los 4g de amplitud y en un rango de frecuencia de unos 20 Hz a 2 kHz.

La calibración deberá proporcionar el coeficiente de transferencia del acelerómetro (comúnmente llamado sensibilidad), la linealidad en amplitud y el comportamiento en frecuencia. Todo ello deberá ser conforme a la norma internacional ISO 16063-21:2003 *Methods for the calibration of vibration and shock transducers – part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer*.

1.5. Pasos a seguir en el desarrollo del proyecto

El desarrollo del proyecto empieza por una investigación de las diversas tecnologías y especificaciones de toda la gama de acelerómetros utilizados para ensayos de automoción.

Seguidamente se realiza un estudio del sistema de calibración de acelerómetros antiguo y generación de informe de calibración.

Posteriormente, se estudia la norma internacional ISO 16063-21 para obtener las especificaciones mínimas con las que se debería dotar al sistema y se compara con las del sistema antiguo.

Una vez obtenidas las especificaciones básicas que debe cumplir la aplicación de calibración, se llevan a cabo reuniones con el resto de personal del laboratorio de calibración para determinar el resto de prestaciones que debería incluir la aplicación. Estas prestaciones añadidas servirán para facilitar el trabajo a los técnicos, mejorar la calidad de las calibraciones y disminuir el tiempo invertido en ellas.

Mientras tanto, se realiza un estudio de LabVIEW por cuenta propia, analizando manuales y algunos recursos online, hasta que se adquiere la experiencia necesaria para comenzar a desarrollar la aplicación.

Con todas las especificaciones en una lista y los conocimientos de programación con el entorno LabVIEW adquiridos, es momento de desarrollar la aplicación gráfica para la automatización de la calibración de acelerómetros y generación de informe de calibración.

1.6. Estructura de la memoria

En el segundo capítulo se realiza una introducción a la metrología y calibración para introducir algunos conceptos que se utilizan a lo largo del proyecto.

Seguidamente, en el tercer capítulo, se realiza un análisis de las características y funcionamiento de los acelerómetros objetos de la calibración. De esta forma se intenta que el lector se familiarice con el funcionamiento y las diversas tecnologías y aplicaciones de los acelerómetros y así se comprendan mejor las especificaciones que debe cumplir el sistema de calibración automatizado.

En el capítulo cuarto se realiza una breve descripción de las aplicaciones (software) y protocolos de comunicación utilizados en el desarrollo del proyecto.

En el quinto capítulo se presentan todos los instrumentos y otros equipos auxiliares que intervendrán en el proceso de calibración que se lleva a cabo mediante el sistema de calibración de acelerómetros.

El sexto capítulo es la guía o procedimiento que se debe seguir para llevar a cabo correctamente la calibración de acelerómetros conforme a la norma ISO 16063-21.

El séptimo capítulo describe los pasos seguidos en el diseño y desarrollo de la automatización del proceso de calibración de acelerómetros objeto de este trabajo.

En el capítulo octavo se analizan los resultados y las prestaciones del sistema de calibración desarrollado.

Finalmente, en el noveno capítulo, se exponen las conclusiones del proyecto y se describen las posibles mejoras del sistema que quedan pendientes de realizar en un futuro.

En los anexos se adjuntan documentos muy importantes del proyecto que, debido a su naturaleza, se ha decidido no incluirlos en la estructura principal de la memoria. A ellos se hace referencia a lo largo de toda la memoria, por lo que se considera importante su lectura.

CAPÍTULO 2. Metrología y calibración

2. Metrología y calibración

2.1 ¿Qué es la metrología?

La metrología es la ciencia de la medida. Ésta comprende todos los aspectos teóricos y prácticos que se refieren a las mediciones en cualquier ámbito científico o tecnológico en el que tengan lugar [2].

La metrología moderna se puede descomponer en tres vertientes según su campo de aplicación, la metrología legal, la metrología científica y la metrología industrial.

El campo de aplicación de la metrología en el que se desarrolla este proyecto es el correspondiente a la metrología industrial.

La metrología industrial se ocupa de lo relativo a los medios y métodos de medición y calibración de los patrones y equipos de medición, de acuerdo al estado del arte de la ciencia y el control de la calidad. Materias típicas son los procedimientos e intervalos de calibración, el control de los procesos de medición y la gestión de los equipos de medida.

Las características fundamentales de la metrología son el resultado de medición y la incertidumbre de medida.

El resultado de medición es el valor atribuido al mensurando por un instrumento de medida en las condiciones y el momento de la medición. Este valor puede ser una indicación directa o corregida del instrumento o incluso la media de un conjunto de observaciones.

2.1.1. Vocabulario Internacional de Metrología

El Vocabulario Internacional de Metrología – a partir de ahora VIM – es un vocabulario acordado de manera internacional que denomina y define todos los conceptos que se dan en metrología [29].

Este vocabulario fue creado por el Comité Conjunto para las Guías en Metrología (JCGM) y su última revisión (tercera) es de 2008. Dicho comité ha creado otras guías de gran importancia para la metrología como la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida [28].

2.1.2. Definición de incertidumbre de medida

Según el VIM, La Incertidumbre de medida es el parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos al mensurando, a partir de la información que se utiliza.

La incertidumbre del resultado de una medición refleja la falta de un conocimiento completo del valor del mensurando.

El mensurando es precisamente la magnitud que se desea medir, es decir, el valor “real” (no confundir con el concepto medición o medida). Por tanto, la incertidumbre de medida es la estimación de un intervalo de valores en el que, con una determinada probabilidad, se encuentra el verdadero valor de la magnitud medida. Como indica la definición, es un parámetro de dispersión, por lo que una incertidumbre de medida siempre se dará en forma de intervalo de valores $\pm U$, aunque hay multitud de formas aceptadas de expresarla.

La incertidumbre de medida se extrae de una serie de cálculos estadísticos a partir de estimaciones de las componentes que pueden afectar al resultado de la medida de una manera aleatoria. Así pues, en una medida pueden afectar componentes aleatorias como la repetibilidad, el error debido a la división de escala, la incertidumbre del equipo patrón con el que se calibró, la estabilidad, la deriva en el tiempo, las condiciones ambientales, el usuario y muchas otras dependiendo del caso. Todas estas componentes se les denomina **fuentes de incertidumbre** y deben hallarse, evaluarse y combinarse para hallar la incertidumbre de medida en la calibración. También se les llama comúnmente contribuciones a la incertidumbre.

Para profundizar en el concepto y en los cálculos estadísticos que intervienen en la estimación de la incertidumbre, en el **Anexo 4** se realiza una detallada explicación de los pasos a seguir. Asimismo, se recomienda la Guía de la Expresión de la Incertidumbre (GUM) que sirve como complemento a la experiencia a la hora de la estimación de las incertidumbres de medida.

2.1.3. Otros conceptos metroológicos

A continuación se definen algunos conceptos de metrología que se utilizan a lo largo del proyecto. Algunas de las definiciones están basadas en las proporcionadas por el VIM.

Mensurando:

Según el VIM es la magnitud que se desea medir, es decir, valor real de la magnitud objeto de medición. Este valor no tiene porqué coincidir con el valor medido, ya que en ocasiones se deben efectuar correcciones de la indicación del instrumento y siempre existe una dispersión de valores en el que se puede situar el verdadero valor.

Error de medida:

Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

Existen dos categorías de errores de medida según su naturaleza, el error sistemático y el error aleatorio de medida.

El **error sistemático** es el componente del error de medida que, en diversas repeticiones de medida, permanece constante o varía de forma predecible. Es por ejemplo el error debido a un desajuste del instrumento (también conocido como Sesgo). Para compensar el error sistemático es habitual el uso de una corrección. Con ella se corregirá el error durante el proceso de medida.

El **error aleatorio** es el componente del error de medida cuyo valor no podemos predecir pero sí podemos acotar su dispersión dentro de un intervalo. Dicha acotación se realiza mediante distribuciones de densidad de probabilidad.

El error puede unificarse en una categoría única a la que llamaremos **error combinado**. Dicho error combinado estará caracterizado por su tendencia central (media poblacional) y su dispersión.

Veracidad de medida:

Proximidad de la media de un número infinito de observaciones repetidas (media poblacional) y un valor de referencia. No se trata de una magnitud ya que no se puede cuantificar su valor. La veracidad de medida está inversamente relacionada con el error sistemático.

Sesgo de medida:

Valor estimado de un error sistemático. Es la diferencia entre el valor medido y el valor estimado del mensurando. Es la estimación cuantitativa de la veracidad de medida.

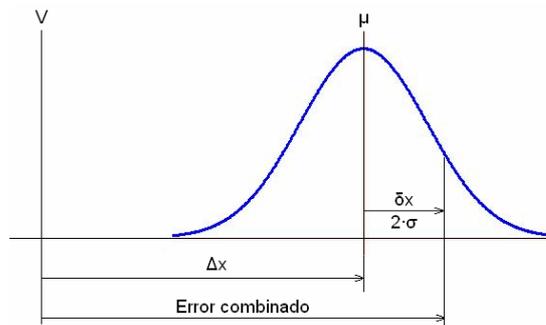


Figura 2.1. Representación gráfica del error combinado. En la gráfica, μ es la tendencia central de la medición, V es el valor verdadero atribuido al mensurando, Δx es el error sistemático de medición y δx es el error aleatorio de medición.

Corrección:

Compensación de un error sistemático.

Precisión:

Proximidad entre las indicaciones obtenidas en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones específicas. La precisión puede determinarse bajo condiciones de repetibilidad, de reproducibilidad o de ambas al mismo tiempo.

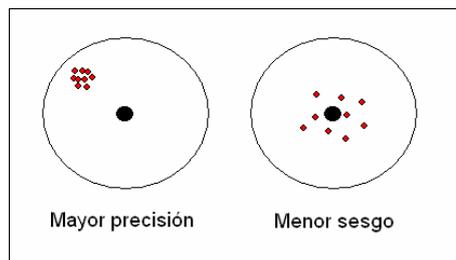


Figura 2.2. Diferencia entre sesgo y precisión.

Condición de repetibilidad de una medición:

Condición de medición en la cual se realiza un conjunto de mediciones mediante el mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, en un periodo corto de tiempo.

Condición de reproducibilidad de una medición:

Condición de medición realizada por distintos operadores, lugares, periodos de tiempo, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares. La reproducibilidad, por ejemplo, se puede determinar realizando distintas mediciones de un mismo objeto realizadas por distintos operadores o mediante distintos sistemas de medida, dependiendo del objeto de estudio.

Exactitud de medida:

Grado de concordancia entre el resultado de una medición y el valor verdadero del mensurando. No se puede cuantificar ya que es un concepto cualitativo, pero se dice que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de medida.

No confundir la exactitud con el sesgo o con la precisión ya que la exactitud incluye ambos conceptos.

Resolución o división de escala:

Mínima variación de la magnitud medida para percibir una variación en la indicación del sistema de medida.

Recta de calibración:

Regresión lineal que mejor se ajusta al comportamiento de la indicación de un sistema de medida respecto a la magnitud de entrada. Se extrae de la calibración del sistema de medida y de ella se deduce su sensibilidad. Generalmente se utiliza la regresión lineal mediante el método de los mínimos cuadrados.

Sensibilidad:

Cociente entre la variación de la indicación de un sistema de medida y la variación correspondiente de la magnitud medida. En un sensor, es la variación de la señal eléctrica a su salida con respecto a la variación de la magnitud de entrada.

Linealidad:

Capacidad de un instrumento de medición para proporcionar una indicación que tenga una relación lineal con una magnitud determinada

No linealidad:

Máxima desviación (sesgo) entre la recta de calibración y el comportamiento real del sistema de medida a lo largo de todo su campo de medida. La no-linealidad significativa es usualmente corregida mediante el uso de funciones de calibración no-lineal o eliminada seleccionando un intervalo de operación más restringido.

Histéresis:

Máxima desviación entre la recta de calibración y el comportamiento real del sistema de medida a lo largo de todo su campo de medida cuando se efectúan mediciones en sentido ascendente y descendente de medida.

2.2 Calibración

Según el VIM, la calibración es el conjunto de operaciones que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

Por tanto, el objetivo de una calibración es determinar la relación entre las indicaciones o materializaciones de un instrumento y los valores correspondientes indicados por un patrón. Una vez establecida la relación con sus correspondientes correcciones de medida, se expresa la incertidumbre de medida asociada a los resultados obtenidos, teniendo en cuenta todas las contribuciones que intervienen en la calibración como las condiciones ambientales, la incertidumbre de los equipos patrón, la deriva en el tiempo, etc.



Figura 2.3. Ejemplo de calibración de un reloj comparador. Se compara la lectura del instrumento con un banco de medida de una coordenada horizontal como patrón.

2.2.1. Importancia de la calibración periódica

La calibración es la única manera de garantizar que el instrumento de medida mida correctamente y que sus lecturas estén dentro de un intervalo de tolerancias.

Es importante establecer periodos de calibración para los instrumentos de medida. El intervalo de calibraciones dependerá de factores como el tipo de instrumento (tipo de medida, tecnología...), envejecimiento o el uso que se le da al instrumento (uso intensivo, en entornos hostiles...), de forma que la calibración sirva para controlar la deriva en el tiempo de las indicaciones del sistema de medida. Dicha deriva en el tiempo se deberá tener en cuenta en la estimación de la incertidumbre de medida asociada al uso del instrumento.

2.2.2. Patrón y trazabilidad metrológica

Para llevar a cabo la calibración es necesario el uso de un **patrón**. Una vez materializado el valor de una magnitud, la función del equipo patrón es la de obtener una medida de referencia de ese valor para poder compararla con la lectura del equipo en calibración. De esta manera se determina el comportamiento del instrumento bajo prueba hallando parámetros como la corrección de medida o la sensibilidad.

Según la definición estricta del VIM, la **trazabilidad metrológica** es la *propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida*.

Es decir, la trazabilidad de la medida de un instrumento nos da información sobre la referencia a la que está relacionado el resultado de su calibración mediante una jerarquía de calibraciones de los patrones hasta llegar al patrón primario.

Para obtener una trazabilidad relacionada a una entidad nacional de acreditación como por ejemplo la española ENAC (*Entidad Nacional de Acreditación*), la calibración de los patrones en un punto de la cadena de calibraciones deberá estar acreditada por dicha entidad. Como ejemplo, si se dispone de unas masas patrón con certificado de calibración acreditado por ENAC y se procede a calibrar con ellas una balanza electrónica, los resultados de dicha calibración adquieren una trazabilidad metrológica a ENAC siempre y cuando se haya realizado la calibración según los procedimientos documentados y aprobados del propio laboratorio y se hayan tenido en cuenta todas las fuentes de incertidumbre que puedan afectar al resultado.

2.3. El laboratorio de calibración

El laboratorio de calibración es el lugar donde se llevan a cabo la mayoría de calibraciones. Por tanto, el lugar debe asegurar unas condiciones ambientales controladas y debe disponer de los patrones, utillajes y otros instrumentos necesarios para llevar a cabo las calibraciones y ajustes pertinentes.

El laboratorio de calibración debe ser llevado por gente preparada y competente que se encargue de la gestión de todas las calibraciones, la actualización de los procedimientos, el mantenimiento de las hojas de cálculo de los informes de calibración y la revisión de todos los certificados de calibración antes de su expedición. Además también debe haber técnicos cualificados para llevar a cabo las calibraciones.

2.3.1. Justificación

La empresa decide poner a su disposición un servicio de calibración para toda la instrumentación utilizada en los ensayos que se realizan en ella.

En dicha empresa se realizan estudios, ensayos y homologaciones de casi todo tipo de vehículos. Todos los ensayos necesitan de una serie de instrumentos de medida, como pueden ser comparadores y micrómetros, multímetros, transductores electrónicos (de presión, temperatura, aceleración, fuerza...), sistemas de adquisición de datos, etc. Toda esta instrumentación debe estar debidamente calibrada, por lo que es necesario crear un departamento que se encargue de las gestiones que implica tener siempre los más de 4000 instrumentos de medida calibrados. De no ser así, los instrumentos de medida deberían enviarse a calibrar a laboratorios externos, con el consiguiente gran gasto económico y de tiempo que ello conlleva.

En cuanto a calibración de acelerómetros para medidas dinámicas, se realizan, de manera aproximada, unas 1300 calibraciones al año.

2.3.2. Alcance y trazabilidad metrológica

El laboratorio de calibración debe tener bien definido el alcance, el cual hace referencia al conjunto de magnitudes, rangos y exactitud de los equipos que es capaz de calibrar asegurando una trazabilidad a entidades nacionales de acreditación según la ISO 17025:2005 [27].

Todas las calibraciones que se realizan en este laboratorio poseen trazabilidad a entidades nacionales de acreditación (*ENAC*, *UKAS* y *DKD* entre otras).

2.3.3. Gestión de las calibraciones

Entre las gestiones que realiza el laboratorio de calibración se encuentran la asignación de los periodos de calibración de los equipos, la elaboración de los procedimientos de calibración, la calibración de la instrumentación y la confección y revisión de los certificados de calibración.

Debido al creciente aumento del número de equipos de medida se hace necesario el uso de herramientas informáticas para llevar a cabo un control y almacenamiento de los documentos elaborados durante las calibraciones. Para ello, se decide hacer uso de un programa informático basado en Visual Basic llamado *Visual Factory Calibre* (a partir de ahora *VFC*) de la empresa *Elecsoft*.



Figura 2.4. Logos de Elecsoft Visual Factory Calibre.

El programa VFC es una herramienta basada en Visual Basic que permite entrar toda la información necesaria para llevar a cabo la gestión de las calibraciones y almacena dicha información en una base de datos SQL.

El programa se estructura en un listado de fichas de inventario. Cada ficha de inventario incluye toda la información requerida de un equipo de medida, como la marca, modelo, n° de serie, fabricante, proveedor, etc. y otros aspectos como las características técnicas, manuales y observaciones.

Cada ficha también incorpora un registro en el que se almacenan todos los resultados de calibración en formato *Excel* o *PDF*. Cabe destacar que el mismo programa incorpora un gestor de plantillas de *Microsoft Excel* con el cual podemos elaborar y administrar nuestros formatos de calibración para cada tipo de equipo de medida, incluyendo los acelerómetros.

Todos los datos generados son guardados de manera segura en una base de datos en un servidor SQL de la empresa, y todos los clientes (usuarios de los instrumentos de medida) tienen acceso a ella mediante un visor elaborado de manera específica por la misma empresa Elecsoft.

2.4 Calidad en la calibración

2.4.1 Procedimientos

Las tareas que se llevan a cabo en un laboratorio de calibración siguen siempre una estricta metodología que debe documentarse en los procedimientos propios del laboratorio.

2.4.1.1 Importancia del procedimiento documentado

Para asegurar una cierta calidad en las tareas llevadas a cabo en un laboratorio, es preciso elaborar y seguir un conjunto de procedimientos. De esta manera, se pueden conseguir objetivos como optimizar, dar fluidez y eficacia a las calibraciones, evitar errores de medida o de cálculos, suprimir las operaciones y papelería innecesarias, disminuir el tiempo invertido en las calibraciones, prevenir malos hábitos, etc.

Para conseguirlo, es necesario seguir unas pautas que definen los puntos claves que deben documentarse en un procedimiento.

2.4.1.2 Pautas para la elaboración de una instrucción de calibración

Una instrucción de calibración debe reunir la suficiente información para que cualquier técnico cualificado del laboratorio pueda llevar a cabo la calibración de manera óptima y eficaz sin más ayuda que la del manual del equipo bajo prueba. Por ello, el procedimiento de calibración debe recoger, como mínimo, la siguiente información:

2.4.1.2.1 *Alcance*

Indica la clase de instrumentos que se pueden calibrar utilizando el procedimiento, según la magnitud, tecnología, precisión, resolución, campo de medida y otros posibles aspectos que puedan condicionar el método de calibración.

2.4.1.2.2 *Normativas y otros documentos de referencia*

En este apartado se nombran en forma de listado los documentos de referencia de la instrucción, como normativas en las que se basa, u otros procedimientos del laboratorio relacionados.

2.4.1.2.3 *Patrones utilizados*

Es imprescindible describir los patrones que se deben utilizar para la calibración de cada magnitud. Dichos patrones deberán tener trazabilidad reconocida a una entidad nacional acreditada y su calibración vigente.

2.4.1.2.4 *Software y otras herramientas e instrumentos*

En ocasiones, para la calibración de algunos equipos como por ejemplo los acelerómetros, es necesario el uso de software para tomar medidas o registrar datos. Este software suele venir incluido con el equipo o puede estar elaborado por el propio laboratorio de calibración.

Por otro lado, a la hora de registrar los datos de la calibración y realizar el informe es necesario el uso de formatos de hojas como las hojas de registro (para tomar datos durante la calibración) y los propios informes de calibración encargados de presentar los resultados de las calibraciones y de incluir las operaciones y cálculos necesarios.

2.4.1.2.5 *Condiciones ambientales*

Las condiciones ambientales deben ser estables y permanecer dentro de un margen establecido por el procedimiento. En el informe se deberá informar de la temperatura y humedad relativa presentes en la calibración cuando proceda, o del intervalo en el que se encuentran dichos valores.

2.4.1.2.6 *Preparación*

Toda calibración requiere una preparación de los equipos (tanto patrones como instrumentos en calibración). Habrá equipos que necesitarán estar conectados un tiempo determinado antes de empezar la calibración y habrá otros que necesiten una puesta a punto antes de poder efectuar medidas.

2.4.1.2.7 *Método de calibración*

Es el punto más importante del procedimiento y detalla, con toda la información necesaria, cómo se debe calibrar esa clase de instrumento de medida.

Así pues, el método de calibración nos dice el número de medidas que se debe efectuar dentro del rango del equipo en calibración y las reiteraciones en cada punto de calibración.

Cuando procede, nos dice cómo se deben tomar las medidas, en qué orden y mediante qué recursos (herramientas, cables y conectores específicos, software, etc.). También se debe indicar si se puede realizar un ajuste del equipo en calibración en caso de que lo requiera e indicar el método de ajuste.

En caso de usar un software específico, es aconsejable que el procedimiento explique la manera de utilizar dicho software para la calibración, sin necesidad de entrar en muchos detalles.

2.4.1.2.8 Cálculos

Una vez realizada la calibración se deben pasar los datos al informe. Dicho informe conviene que esté en formato electrónico y que contenga los cálculos necesarios, como la media de las reiteraciones, error de linealidad y la incertidumbre de calibración entre otros.

En este apartado del procedimiento se expresan todas las fórmulas que se necesitan para llevar a cabo dichos cálculos.

2.4.1.2.9 Expresión de los resultados

En este apartado de la instrucción se detallan los resultados que se deben presentar en el informe y la manera de expresarlos. En estos resultados se debe incluir siempre la incertidumbre de calibración o la incertidumbre de uso del equipo.

2.4.1.2.10 Criterios de aceptación y rechazo

De la calibración se obtienen una serie de resultados, como las correcciones y la incertidumbre de medida. Mediante dichos resultados podemos determinar si el equipo es apto o no es apto para llevar a cabo las medidas a las que va destinado.

Para determinar la aptitud de un instrumento debemos saber cuál es la tolerancia o error máximo permitido. Dicho parámetro puede ser establecido por el fabricante del equipo o por el propio cliente/usuario. Si la tolerancia es impuesta por el usuario, debe estar sujeta a alguna normativa o procedimiento, es decir, si el equipo se utiliza para un ensayo en concreto, la tolerancia para la incertidumbre de uso no podrá ser mayor a la dictada en la normativa de ese ensayo. Si el responsable decide utilizar la tolerancia impuesta por el fabricante, ésta suele coincidir con la exactitud (en inglés *Accuracy*) del equipo.

2.4.1.2.11 Anexos

Por último, en los anexos se incluyen otros documentos importantes para el desarrollo de la calibración, como esquemas, tablas, manuales, etc.

2.4.2 La acreditación

La acreditación es un proceso por el cual una entidad se compromete a llevar a cabo un servicio utilizando un modelo estándar determinado por una entidad nacional de acreditación. Dicha entidad productora del servicio se somete a evaluaciones periódicas para determinar su competencia y eficacia para realizar dicha actividad.

La acreditación cuesta un gran esfuerzo y dinero, pero es importante y, en ocasiones, indispensable para la subsistencia de muchas empresas debido a que se consigue mejorar la calidad del servicio y genera confianza y seguridad entre los clientes.

En nuestro laboratorio de calibración no se realizan calibraciones acreditadas. No obstante, sí que se realizan calibraciones de instrumentos que se utilizan para ensayos acreditados, por lo que para dichas calibraciones sí es necesario cumplir con la norma ISO 17025:2005 para laboratorios de calibración [27].

2.4.3 Entidades nacionales de acreditación. ENAC.

Las entidades nacionales de acreditación se encargan de realizar las evaluaciones pertinentes para determinar la competencia y eficacia de otra entidad para la realización de un servicio de evaluación de conformidad [10].

Dichas evaluaciones se llevan a cabo mediante auditorías en las que se verifica, mediante evidencias objetivas, que el servicio de evaluación de conformidad se realiza según un conjunto de normas establecidas y que el sistema de calidad existe, está completo, funciona correctamente y es efectivo.

ENAC es el acrónimo de Entidad Nacional de Acreditación y es un organismo encargado de establecer y mantener el sistema de acreditación en España.

En materia de laboratorios de ensayo y calibración, ENAC acredita la competencia de éstos basándose en la norma ISO/IEC 17025:2005.



Figura 2.5. ENAC.

CAPÍTULO 3. El acelerómetro

3. El acelerómetro

3.1. La aceleración: definición y conceptos básicos

La aceleración es una magnitud que indica la variación de velocidad por unidad de tiempo a la que está sometido un cuerpo en movimiento.

La aceleración, en medidas dinámicas, es capaz de dar información sobre la magnitud de un impacto (choque) o sobre la amplitud y frecuencia de una vibración.

En medidas estáticas, la aceleración puede dar información sobre fuerzas centrífugas, deceleraciones o incluso inclinaciones aprovechando la medida de aceleración de la gravedad.

La gravedad terrestre es la aceleración provocada por la atracción gravitatoria de la Tierra. Se considera una constante, aunque en realidad el valor de la gravedad local no es exactamente el mismo en cualquier posición de la Tierra. Ésta varía según la altitud y la latitud debido, esta última, a que la Tierra tiene una ligera forma de esferoide oblató [9].

Generalmente, para realizar cambios de unidades de fuerza, se suele aproximar el valor de la aceleración de la gravedad por $9,80665\text{m/s}^2$, lo cual significaría que un cuerpo en caída libre en el vacío pasa de 0 a $9,80665\text{m/s}$ en 1 segundo.

3.2. ¿Qué es un transductor?

Un **transductor** es un dispositivo capaz de transformar un tipo de energía a su entrada en otro tipo de energía a su salida.

De manera muy general existen dos tipos de transductores. Los sensores y los actuadores.

Los sensores transforman la energía de un proceso físico a su entrada en una magnitud eléctrica normalmente proporcional a su salida. Esto permite facilitar el estudio de un proceso físico mediante instrumentos de medida de magnitudes eléctricas.

Los actuadores transforman una magnitud eléctrica a su entrada (consigna) en una variación de energía de un proceso físico. Es decir, interactúan con el proceso físico a nuestra voluntad a partir de consignas eléctricas.

En instrumentación industrial se suele denominar transductor al dispositivo que transforma una variable física a su entrada en una magnitud eléctrica proporcional a su salida.

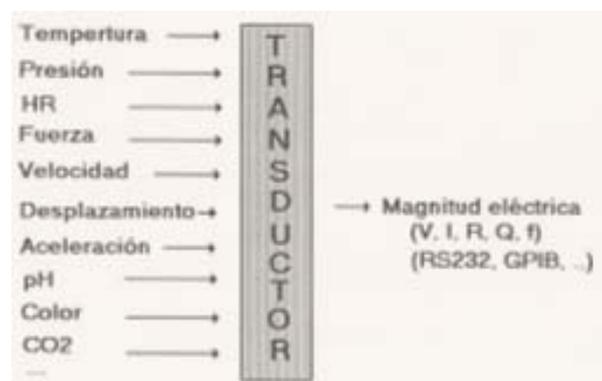


Figura 3.1. Definición de transductor en instrumentación industrial.

Ejemplos de sensores son:

- Termopar: Capta la energía térmica a su entrada y proporciona una diferencia de potencial eléctrica a su salida.
- Micrófono: Capta las ondas de presión sonoras que inciden en su superficie y las transforma a su salida en una variación proporcional de una magnitud eléctrica (resistencia, capacidad o carga eléctrica)
- Galga extensiométrica: Transforma un esfuerzo físico (tracción – compresión) en una variación de su resistencia eléctrica.

Ejemplos de actuadores son:

- Altavoz: Recibe una señal eléctrica y la transforma en ondas de presión sonora.
- Electroválvula: A partir de una consigna eléctrica acciona una válvula.
- Estufa eléctrica: Transforma la diferencia de potencial a su entrada en un aumento de temperatura.

3.3. El acelerómetro

El **acelerómetro** es un transductor electromecánico que capta la aceleración a la que está sometido físicamente y proporciona a su salida una variación de magnitud eléctrica proporcional. Esta magnitud eléctrica depende de la tecnología del elemento sensor y del acondicionamiento de señal que incorpore el dispositivo.

El acelerómetro es capaz de captar las aceleraciones producidas en un choque o una vibración dentro de un rango de frecuencias y amplitud limitado. En ocasiones, el acelerómetro también es capaz de captar la inclinación de un plano de superficie midiendo la aceleración de la gravedad en su eje de actuación, en cuyo caso al acelerómetro se le suele llamar inclinómetro o clinómetro.

3.3.1. Sensibilidad del acelerómetro

La sensibilidad o coeficiente de transferencia es un parámetro característico de todo transductor cuya salida sea proporcional a la entrada. Este parámetro caracteriza el comportamiento del transductor ante la magnitud de entrada, es decir, indica en qué medida varía la señal de salida ante una determinada variación de la magnitud de entrada.

En un acelerómetro indica cuál es la relación entre la señal eléctrica de salida y el valor de aceleración aplicado al sensor en su eje de actuación.

Idealmente, la sensibilidad es un parámetro constante a lo largo de todo el campo de medida de amplitud del acelerómetro. No obstante, en la práctica, la sensibilidad puede variar sutilmente a lo largo del campo de medida debido a las características técnicas del acelerómetro como la linealidad o la histéresis. Es pues importante la calibración de la sensibilidad a lo largo del campo de medida en amplitud para determinar cuál es su linealidad.

La sensibilidad del acelerómetro también puede variar según la frecuencia de la vibración o de la duración del impacto. Es por eso que el fabricante siempre debe reflejar la frecuencia a la que se ha extraído la sensibilidad en su certificado de calibración, y debe especificar el rango de frecuencias en el que se garantiza una determinada exactitud.

3.3.2. Ancho de banda

Como se ha mencionado anteriormente, la sensibilidad del acelerómetro no es totalmente constante con respecto a la frecuencia de la magnitud de entrada.

El fabricante debe mostrar en sus especificaciones cuál es el ancho de banda de trabajo del acelerómetro, es decir, debe garantizar un intervalo de frecuencias en el que la sensibilidad no se alejará de la nominal en un porcentaje determinado. Este porcentaje suele ser de un $\pm 5\%$, aunque algunos fabricantes consideran una desviación máxima de $\pm 3\text{dB}$ como límites para el ancho de banda.

Al comportamiento de la sensibilidad del acelerómetro con respecto a la frecuencia de la magnitud de entrada se le llama Respuesta en frecuencia.

La respuesta en frecuencia no es únicamente importante cuando se utiliza el acelerómetro para estudiar vibraciones. También es importante para las medidas de impactos ya que determina el comportamiento del acelerómetro ante transitorios de distinta duración.

La calibración de la respuesta en frecuencia se suele llevar a cabo mediante aceleraciones que siguen un ritmo senoidal. Una vibración es una señal periódica que se puede descomponer en un conjunto de vibraciones senoidales a múltiples frecuencias, también llamados términos de *Fourier*. Dichas ondas senoidales a distintas frecuencias (armónicos) pueden estudiarse individualmente, tal y como se realiza durante la calibración de la respuesta en frecuencia [44].

En la figura 3.2 se ilustra un ejemplo de la calibración de la respuesta en frecuencia de un acelerómetro. Se observa cómo la sensibilidad varía ligeramente según la frecuencia de aceleración a la que es sometido el transductor.

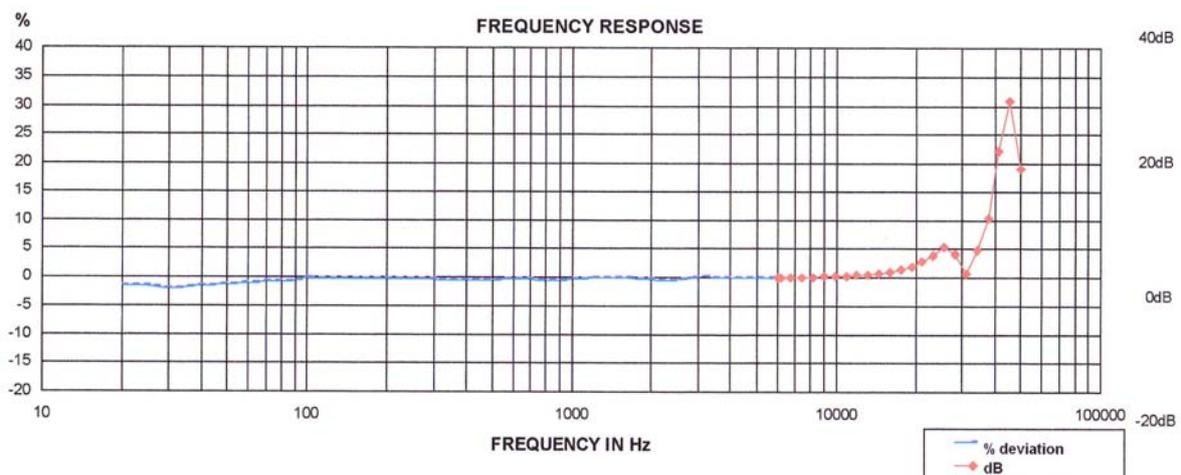


Figura 3.2. Ejemplo de resultados de respuesta en frecuencia de un acelerómetro.

En el ejemplo, ante una vibración, el acelerómetro será capaz de captar, con la precisión especificada, las ondas comprendidas entre las frecuencias de corte de su respuesta en frecuencia, atenuando las señales cercanas a la frecuencia de corte inferior y amplificando las señales cercanas a la frecuencia de corte superior.

3.3.3. Otras características técnicas

3.3.3.1. No linealidad

La no linealidad es la desviación máxima existente entre la respuesta ideal (recta de calibración) y la respuesta real del transductor. Este fenómeno es debido a que el comportamiento real del transductor no sigue una línea recta sino que es curvado en mayor o menor medida.

En la figura 3.3 se muestra un ejemplo gráfico de lo que sería la no linealidad de un transductor. Se observa como el comportamiento del acelerómetro varía según la amplitud, alejándose del comportamiento idealizado por la recta de calibración.

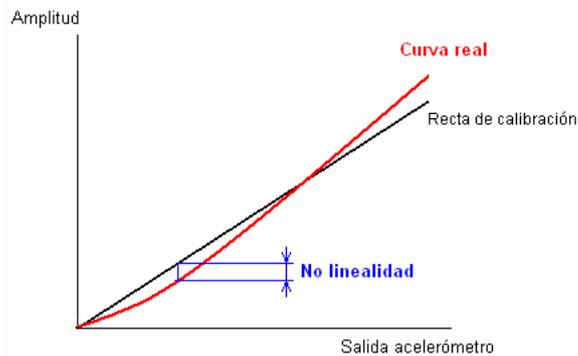


Figura 3.3. Diferencia entre el comportamiento real del acelerómetro y el comportamiento idealizado por la recta de calibración.

Los fabricantes de acelerómetros suelen expresar la no linealidad como la máxima desviación en porcentaje de la sensibilidad en todo el rango de amplitud respecto a la sensibilidad nominal.

3.3.3.2. Histéresis

La histéresis es una característica de todo transductor que indica la desviación máxima respecto a la recta de calibración cuando se recorre todo el rango del transductor en sentido ascendente y descendente. Es decir, indica que el transductor no se comporta del mismo modo cuando se realizan medidas ascendiendo que cuando se realizan descendiendo por el campo de medida.

Este comportamiento es debido a la tendencia a conservar la señal de salida cuando se aumenta o disminuye de manera sutil el estímulo que la ha provocado.

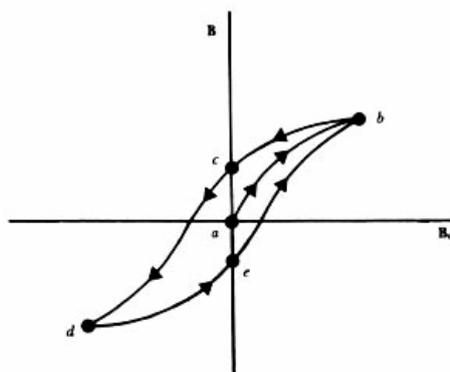


Figura 3.4. Ejemplo de un ciclo de histéresis.

3.3.3.3. *Sensibilidad transversal*

Los acelerómetros están diseñados para responder a aceleraciones en una dirección determinada. Sin embargo, ante aceleraciones en un eje transversal al de actuación, el acelerómetro suele tener una pequeña respuesta o sensibilidad transversal [42].

La sensibilidad transversal la suele expresar el fabricante en porcentaje sobre la sensibilidad nominal del acelerómetro, siendo lo más común de un $\pm 1\%$ en los mejores casos, a un $\pm 5\%$.

La sensibilidad transversal es, en gran parte, debida a la imprecisión a la hora de fijar el sensor paralelo a la base del acelerómetro durante su fabricación. En el momento en que el sensor se desvía ligeramente de esa horizontal, aparece una pequeña sensibilidad en el eje transversal del acelerómetro.

La sensibilidad transversal es un parámetro que se debe tener en cuenta a la hora de la elección del acelerómetro, ya que ésta influye en la estimación de la incertidumbre de medida. No obstante, no es de vital importancia calibrar la sensibilidad transversal de cada acelerómetro, ya que, teniendo en cuenta la estabilidad de las características de los actuales acelerómetros, es responsabilidad del fabricante - el cual dispone de laboratorios de calibración primarios - para recibir la certificación de clase en base a la calibración de una serie de especímenes. Esto significa que el fabricante es el que nos garantizará que la sensibilidad transversal del acelerómetro, además de otros parámetros como el cambio de fase y la frecuencia natural, siempre se mantendrán dentro de un intervalo determinado.

3.3.3.4. *Sensibilidad a la temperatura*

El comportamiento de un transductor puede verse influenciado por variaciones en la temperatura del mismo. El resultado de una variación de temperatura en un acelerómetro puede ser el desplazamiento de la señal de salida y la variación de sensibilidad. El desplazamiento de la señal de salida puede despreciarse si durante el uso del acelerómetro no se produce ninguna variación brusca de la temperatura. Sin embargo, la variación de sensibilidad ante una temperatura distinta de la utilizada en la calibración no puede corregirse, por lo que se deberá tener en cuenta cuando se utilice el acelerómetro.

La variación de sensibilidad de un acelerómetro respecto a la temperatura suele venir especificada por el fabricante en porcentaje respecto a dicha variación ($\%/^{\circ}\text{C}$), lo cual determina en qué grado varía la sensibilidad ante cualquier gradiente de temperatura. Generalmente, un acelerómetro de alto rango diseñado para realizar ensayos de automoción, suele tener un coeficiente termal de $\pm 0.1\%/^{\circ}\text{C}$.

También suele venir expresada en porcentaje sobre la sensibilidad original a una temperatura de referencia. Por ejemplo, un acelerómetro Endevco modelo 7264D de $\pm 2000\text{g}$ presenta una sensibilidad termal máxima de $\pm 1\%$ respecto a una temperatura de referencia de 24°C en un rango de temperaturas de 18 a 29°C .

3.3.3.5. *Resonancia*

Todo sistema mecánico posee una frecuencia natural que es la frecuencia a la que vibra al dejar de aplicar fuerzas de excitación al mismo. La frecuencia natural es una propiedad del sistema mecánico dinámico que depende de su distribución de masa y rigidez.

Cuando la excitación se aproxima a una frecuencia igual a la frecuencia natural, el sistema puede entrar en resonancia, en cuyo caso, la energía absorbida y, por tanto, la amplitud de la vibración, serán máximas.

La resonancia de un sistema mecánico suele ser muy contraproducente, ya que puede provocar errores de medición en el caso de los acelerómetros o incluso su destrucción. Por tanto, dichos sistemas se diseñan de manera que su frecuencia natural no coincida con ninguna frecuencia de uso habitual. En el caso de los acelerómetros, la frecuencia natural se sitúa aproximadamente entre los 20kHz y los 60kHz dependiendo

de la tecnología y fabricación. Éste puede ser, por tanto, un parámetro importante a considerar a la hora de elegir el acelerómetro según la aplicación.

El sobrepico observado en las figura 3.2 y 3.5 una vez sobrepasada la frecuencia de corte superior es debido a la frecuencia de resonancia del acelerómetro, en la cual la amplitud de la vibración transmitida al interior del acelerómetro se amplifica de manera exponencial. Dicho pico será más o menos abrupto dependiendo del amortiguamiento. Cuanto menor es el amortiguamiento, mayor será la absorción de energía en las frecuencias próximas a la natural, y por tanto, mayor será la amplitud de vibración en ese rango de frecuencias [35].

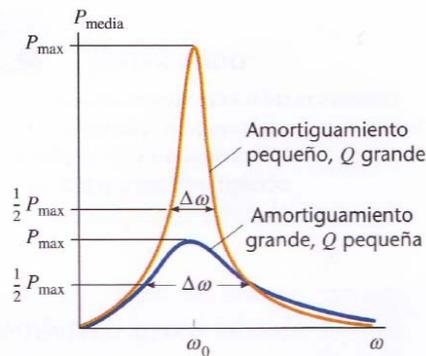


Figura 3.5. Curva de resonancia de un oscilador. Determina la energía absorbida por el sistema ante una excitación en un rango de frecuencias próximo a la frecuencia natural. Cuando el amortiguamiento es grande (azul) la anchura del pico de la curva de resonancia es mayor pero la amplitud menor que en el caso de un amortiguamiento pequeño.

3.3.3.6. Coeficiente de amortiguamiento (*Damping ratio*)

El coeficiente de amortiguamiento, o *Damping Ratio* en inglés, es un coeficiente que determina el grado de amortiguación que sufre un sistema mecánico ante una determinada excitación. Por tanto, el coeficiente de amortiguamiento nos dice cómo decae la señal de salida del sistema después de aplicar una perturbación.

El coeficiente de amortiguamiento puede extraerse de la siguiente expresión:

$$\xi = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{k \cdot m}} \quad (3.1)$$

donde:

- k : Constante de recuperación elástica en kg/s²
- m : Masa del sistema en kg
- c : Constante de amortiguación.

La constante de recuperación elástica k se extrae de la Ley de Hooke, la cual establece que el alargamiento elástico que sufre un material es directamente proporcional a la fuerza aplicada. Esto se cumple siempre que la fuerza ejercida esté dentro del rango elástico del material.

Conociendo el coeficiente de amortiguamiento del sistema se puede deducir si el sistema se comporta de manera amortiguada o subamortiguada ante una señal de excitación, así como el grado de amortiguación. Si el valor de $\xi > 1$ el sistema estará amortiguado, es decir, no habrá oscilación. En cambio, si $\xi < 1$ el sistema estará subamortiguado.

3.3.4. Principio de funcionamiento

A pesar de las diferencias encontradas entre las distintas tecnologías utilizadas en la fabricación de acelerómetros, todas ellas se basan en la segunda ley de Newton que describe la ecuación fundamental de la dinámica.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (3.2)$$

La estructura básica interna de un acelerómetro se ilustra en la figura 3.6. En ella se observa cómo se dispone una masa llamada “masa sísmica” o “masa inercial” fijada sobre un sensor de fuerza. Dicho sensor de fuerza se encuentra anclado a la carcasa por un extremo y a la masa sísmica por el otro [37].

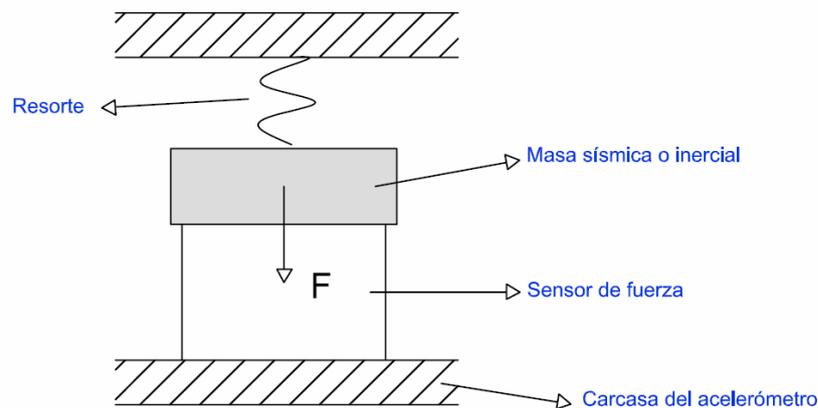


Figura 3.6. Esquema básico interno de un acelerómetro con masa sísmica.

De manera básica, el funcionamiento es el siguiente:

Al aplicar una aceleración en el eje de actuación del acelerómetro, la masa inercial ejerce una fuerza de tracción o compresión sobre el sensor de fuerza. Este sensor capta dicha fuerza que será directamente proporcional a la aceleración y al valor de la masa inercial. Conociendo el valor de dicha masa, es posible conocer el valor absoluto de aceleración aplicando la primera ley de Newton.

La fuerza ejercida por la masa sísmica respecto a la aceleración del acelerómetro se modela por una función de transferencia de segundo orden con bajo coeficiente de amortiguamiento. Esto explica el hecho de que el sistema siempre posea una frecuencia de resonancia con un pico abrupto de amplitud.

Para la explicación detallada del sistema mecánico y de su función transferencia, ver Anexo 7.

3.4. Tipos de acelerómetros

A la hora de escoger el acelerómetro adecuado para el ensayo es necesario tener en cuenta aspectos como el rango, sensibilidad, respuesta en frecuencia o el tipo de señal de salida. Todos estos parámetros dan información del tipo de aceleración que es capaz de medir el acelerómetro, ya sea una aceleración estática, una vibración de mayor o menor frecuencia o un impacto [23].

3.4.1. Acelerómetros para medidas estáticas

Son aquellos que ofrecen respuesta ante aceleraciones que no varían en el tiempo o ante aceleraciones de muy baja frecuencia o frecuencia nula. Un ejemplo de este tipo de aceleraciones es la aceleración de la gravedad.

En ensayos de automoción este tipo de aceleraciones suelen ser de valor de amplitud relativamente bajo, desde décimas de g hasta aceleraciones del orden de los 10...15g en las pruebas más severas.

Una de las condiciones que debe cumplir el acelerómetro para su aptitud en este tipo de ensayos es que debe tener respuesta en DC¹. En la figura 3.7 se puede observar un ejemplo de un acelerómetro de la marca *Crossbow* que cumple esta característica. A este tipo de acelerómetro se le suele llamar también **sensor inercial** o clinómetro.



Figura 3.7. Ejemplo de un acelerómetro de bajo rango para medidas estáticas

El acelerómetro de la anterior figura está basado en un sensor capacitivo e incorpora un amplificador interno y un buffer que le dota de una baja impedancia a su salida. De esta forma su salida puede ser directamente procesada por cualquier voltímetro, osciloscopio o registrador.

El rango del modelo *LP* de *Crossbow* puede ir desde los $\pm 4g$ a los $\pm 25g$ y tiene un ancho de banda que va desde DC a los 100Hz con una caída de -3dB. Esto lo hace apto para medidas de aceleración estática o quasi-estática como la producida en un vehículo al acelerar, frenar y tomar una curva. También es capaz de medir una inclinación, siendo ésta equivalente a 1g cuando el eje de actuación es paralelo al vector aceleración de la gravedad y siendo nula cuando el eje de actuación se sitúa perpendicular al vector aceleración de la gravedad, tal y como se muestra en la figura 3.8.

Los acelerómetros para medidas quasi-estáticas de rango superior a $\pm 4g$ se calibrarán con el sistema de calibración automatizado desarrollado en este proyecto.

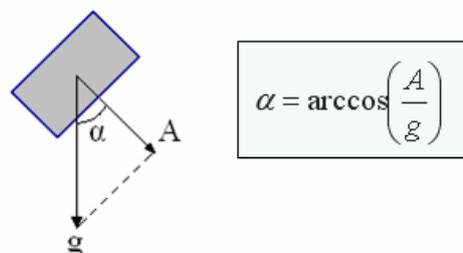


Figura 3.8. Medición de la inclinación mediante un acelerómetro de bajo rango y con respuesta en DC

¹ La respuesta en DC es la capacidad de mantener la sensibilidad nominal ante una señal de entrada constante.

3.4.2. Acelerómetros para medidas dinámicas

Los acelerómetros para medidas dinámicas están preparados para medir señales de aceleración que varían rápidamente en el tiempo.

Se pueden diferenciar dos tipos de medidas dinámicas, las persistentes (también llamadas vibraciones) y las transitorias.

Las aceleraciones dinámicas **persistentes** son el tipo de aceleraciones dinámicas que se prolongan en el tiempo. Las aceleraciones persistentes que se estudian en la investigación y homologación del automóvil son, a grandes rasgos, las vibraciones que proceden de la estructura del automóvil al moverse por una carretera o en un banco de pruebas. Este tipo de vibraciones se puede descomponer en términos de *Fourier* y su estudio se centra en un ancho de banda que puede ir desde los 20Hz a los 2000Hz [44].

Dependiendo del tipo de ensayo de vibraciones, las amplitudes máximas que se pueden llegar a obtener están en torno a los 40g.



Figura 3.9. Banco de ensayo para análisis de vibraciones en la carrocería de un automóvil.

Las aceleraciones dinámicas **transitorias** son las que suceden en un espacio de tiempo muy breve y suelen venir provocadas por impactos. La amplitud de este tipo de aceleración suele ser mayor que la provocada por una vibración, pudiendo llegar a sobrepasar los 1000g.

Un impacto puede tener una duración desde menos de 1ms en ensayos de choque en la carrocería, hasta del orden de 10 ó 20ms en otro tipo de ensayo de impactos menos severos.

En ensayos de peatones, se introduce un acelerómetro en un impactador que simula una cabeza humana y se lanza a una velocidad determinada (unos 11m/s) contra la estructura del automóvil. La señal recogida por el acelerómetro es un pico de aceleración de hasta unos 50g y de una duración de entre 4 y 15ms dependiendo de la densidad del material de la carrocería y del ángulo de impacto.

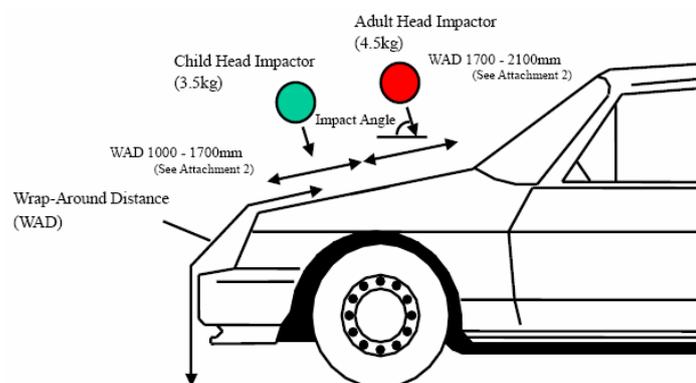


Figura 3.10. Ejemplo de un ensayo de peatones en el que se lanza una cabeza impactadora provista de acelerómetros, sobre el capó de un automóvil

En ensayos de seguridad pasiva² orientados a los ocupantes de un vehículo, se ensaya con unos muñecos llamados *dummies* que son los que experimentan las fuerzas y aceleraciones producidas en un impacto con un automóvil. Dichos *dummies* están provistos de una instrumentación capaz de captar y registrar todas las fuerzas, desplazamientos y aceleraciones que se producirían en el cuerpo humano durante un accidente con un automóvil. Así pues, algunas articulaciones y otras zonas del cuerpo se dotan de células de carga capaces de medir las fuerzas y momentos que se producen en las respectivas partes del cuerpo, de transductores de desplazamiento para registrar la intrusión de pecho, abdomen y otros desplazamientos y finalmente, de acelerómetros en multitud de zonas para monitorizar las aceleraciones que intervienen en el cuerpo humano en el momento del impacto.

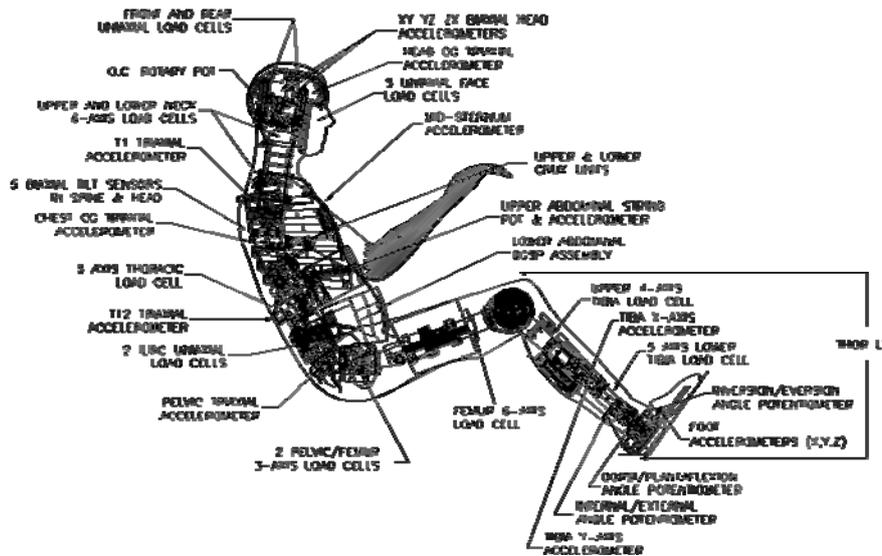


Figura 3.11. Instrumentación de un *dummy* adulto

En esos mismos ensayos de seguridad pasiva, también se disponen acelerómetros en la estructura del vehículo. Son estos acelerómetros los que reciben las mayores fuerzas de impacto pudiendo llegar a superar los 500g dependiendo de su posición y del tipo de impacto.

Para este tipo de aplicaciones generalmente no es vital que el acelerómetro posea respuesta en DC. Es más importante que su sensibilidad se mantenga en un amplio rango de frecuencias (entre unos 20 y 1000Hz) y en un pequeño rango de amplitud (hasta unos 25g).

3.4.3. Acelerómetros para la medición en una o varias dimensiones.

En ocasiones es preciso medir un vector aceleración cuya dirección no es completamente conocida o varía en el tiempo de manera arbitraria. En estos casos, el uso de un acelerómetro constituido por un único eje de medición no es la solución correcta. La forma correcta de medir la aceleración resultante es mediante acelerómetros biaxiales o triaxiales.

3.4.3.1. Acelerómetros uniaxiales o monoaxiales..

Un acelerómetro uniaxial posee un elemento sensor que es capaz de medir la aceleración paralela a su eje de actuación. Dicho eje es fijado por el fabricante y la sensibilidad que nos proporciona está directamente ligada a ese eje de actuación.

² Los ensayos de Seguridad Pasiva ponen a prueba los elementos diseñados para proteger a los ocupantes de un vehículo en caso de accidente.



Figura 3.12. Fotografía de un acelerómetro piezoresistivo monoaxial de alto rango

Si el eje del acelerómetro no se coloca en paralelo con el vector de aceleración a medir, no se obtendrá la sensibilidad adecuada y por tanto los resultados obtenidos no serán los deseados. Dicho eje coincide siempre con la perpendicular a la superficie de anclaje del acelerómetro.

Los acelerómetros uniaxiales son los más utilizados en el campo de la instrumentación debido a que, por lo general, los impactos que se llevan a cabo en los ensayos son totalmente controlados y la dirección del vector aceleración que se desea medir es conocida en el momento de producirse.

No obstante, hay ocasiones en que el acelerómetro no va anclado a una estructura cuyo movimiento que se desea estudiar es de una sola dirección y se necesita saber las aceleraciones resultantes que sufre en todo momento. En casos como en la cabeza de un dummy, suceden aceleraciones que varían en dirección de manera impredecible y la medición de las aceleraciones resultantes es de vital importancia. En este y otros casos es preciso el uso de acelerómetros capaces de medir aceleraciones en más de una dimensión.

3.4.3.2. *Acelerómetros biaxiales.*

Los acelerómetros biaxiales resultan útiles en aplicaciones que requieran medir aceleraciones que suceden en un plano.

Como su nombre indica, un acelerómetro biaxial posee dos sensores dispuestos de manera perpendicular, lo cual permite que sea capaz de medir la aceleración en dos ejes de coordenadas.



Figura 3.13. Fotografía de un acelerómetro piezoresistivo biaxial de bajo rango ($\pm 10g$)

3.4.3.3. *Acelerómetros triaxiales.*

Los acelerómetros triaxiales permiten medir la aceleración en tres dimensiones.

Poseen un total de tres elementos sensores, uno para cada eje (X, Y, Z). Cada sensor proporciona una señal eléctrica en función de la aceleración del eje en el que está orientado internamente. Para conocer el módulo, dirección y sentido de la aceleración resultante basta con realizar la suma vectorial de las

aceleraciones medidas por cada eje. Lo único que hay que tener en cuenta es la posición de referencia del acelerómetro para conocer la dirección real de la aceleración.

Se utilizan para medir aceleraciones que se producen en ejes distintos al de la superficie de anclaje del acelerómetro, o para captar aceleraciones (módulo y sentido) cuya dirección varía en el tiempo, como por ejemplo la cabeza de un dummy durante un ensayo de choque.



Figura 3.14. Fotografía de un acelerómetro piezorresistivo triaxial de alto rango ($\pm 2000g$)

Los acelerómetros triaxiales (así como los biaxiales) disponen de una superficie plana para cada eje que sirve como base preparada para su calibración [22].

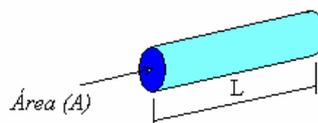
3.5. Tecnologías

Existen distintas tecnologías en la fabricación del elemento sensor del acelerómetro. Las propiedades y características del sensor vienen en gran parte condicionadas por la tecnología, por lo que para la correcta elección del acelerómetro hay que conocer las diferencias entre una tecnología y otra.

3.5.1. Acelerómetros piezorresistivos

Un sensor piezorresistivo es un transductor que transforma un estrés mecánico experimentado por el elemento sensor en una variación de su resistencia eléctrica [16] [49].

El efecto piezorresistivo se produce cuando un filamento metálico o semiconductor es traccionado o comprimido, variando su longitud y, por tanto, su resistencia eléctrica. Esto es debido a la propiedad de todo conductor, cuya resistencia eléctrica es siempre inversamente proporcional a su longitud y directamente proporcional a su sección.



$$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$$

$\rho \equiv$ Resistividad

Figura 3.15. Relación entre la resistencia eléctrica y las dimensiones y material del conductor eléctrico

En el caso del filamento o sustrato semiconductor, la variación de resistencia con la deformación es causada por una variación en la concentración de portadores.

La **galga extensiométrica** se basa en dicho efecto y constituye el elemento sensor de transductores piezorresistivos.

La extensimetría se basa en la ley de elasticidad de Hooke la cual explica la relación entre la tensión y la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos mecánicos. Esta ley establece que todo cuerpo homogéneo sometido a un esfuerzo mecánico, sufre un alargamiento unitario proporcional a la fuerza aplicada dentro del rango elástico del material.

El filamento conductor o semiconductor de la galga, también llamado hilo activo, es arrollado y encolado sobre un fino soporte aislante. Un ejemplo esquematizado se ilustra en la siguiente figura.

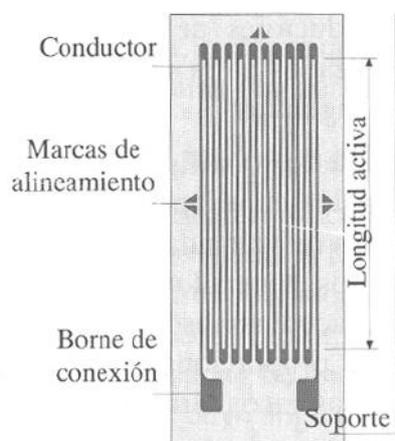


Figura 3.16. Ejemplo esquematizado de una galga extensiométrica convencional

El soporte de la galga, normalmente de *epoxy* o fibra de vidrio, se adhiere sobre la superficie en la cual se desea medir un esfuerzo. Partiendo de la hipótesis de que la galga sufrirá la misma deformación que el material al cual va adherida, al provocar un esfuerzo sobre la superficie en el eje de actuación de la galga, el hilo activo experimenta una ligera variación en su longitud y sección provocada por la deformación elástica del material sobre el que se está midiendo. Esta deformación, mientras esté dentro del límite elástico del material y éste sea homogéneo, será proporcional a la fuerza aplicada. Generalmente, la variación de longitud del material es del orden de pocos micrómetros y por ello el ojo humano no es capaz de percibirlo.

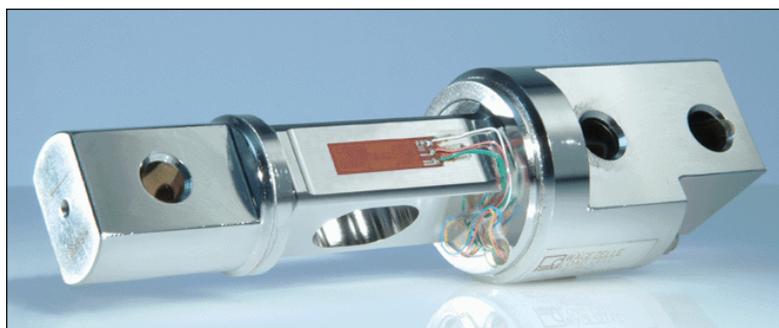


Figura 3.17. Ejemplo de montaje de una galga extensiométrica para medir el esfuerzo de tracción/compresión, sobre el eje longitudinal de una pieza.

El *strain* ε es la relación de elongación o alargamiento unitario que sufre la galga extensiométrica. Es decir, es la variación de longitud en μm con respecto a la longitud nominal del filamento en m.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right] \quad (3.3)$$

La sensibilidad de la galga extensiométrica viene determinada por un parámetro llamado Factor Galga (en inglés *Gauge Factor*). Este parámetro determina cuál es la relación de variación de la resistencia con respecto a la relación de elongación. Es decir, cuánto varía la resistencia con respecto a la nominal cuando se produce una determinada variación de longitud con respecto a la longitud en reposo.

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

Los valores nominales de resistencia de las galgas extensiométricas van desde los 30Ω hasta los 3000Ω , siendo las más utilizadas las de 120Ω y 350Ω .

Existen dos tipos de galgas extensiométricas según el tipo de material activo: las metálicas y las semiconductoras.

Galgas metálicas

Las galgas metálicas tienen como hilo activo un filamento de aleaciones como el constantán³ o el nicrom⁴ de unos $25\mu\text{m}$ de sección, aunque es también habitual encontrar que en lugar de un filamento metálico se arrolla una fina película metálica sobre el soporte, tal y como se ha mostrado en la figura 2.18.

Este tipo de galgas poseen un conjunto de características que las diferencian de las demás:

- Amplios rangos de medida debido a la robustez del material del hilo activo.
- Muy buena linealidad a lo largo de todo el campo de medida debido a que la variación de resistencia sigue una progresión muy lineal con respecto a la elongación.
- Posee una sensibilidad muy baja con respecto a otros tipos de galgas. GF entre 2 y 4 por lo general.

Galgas semiconductoras

Este tipo de galgas, como su nombre indica, posee un elemento activo de material semiconductor como el silicio o el germanio. Este elemento puede venir en forma de filamento o de sustrato.

Las características más importantes que las diferencian de las de tipo metálico se resumen a continuación:

- Rangos de medida menos amplios debido a que el semiconductor es más frágil que el filamento metálico.

³ El constantán es una aleación formada por un 55% de cobre y un 45% de níquel. Tiene baja sensibilidad a las variaciones de temperatura.

⁴ El nicrom es una aleación de níquel, cromo y hierro.

- Menor linealidad provocada por una dependencia no del todo lineal de la resistencia eléctrica frente a la elongación del material. Esto es característico de todo semiconductor.
- Posee una **sensibilidad mucho más elevada**. Este hecho es debido a que la resistividad del semiconductor varía en gran medida con la variación de su longitud, a diferencia del filamento metálico el cual mantiene su resistividad independientemente del esfuerzo. El GF puede estar entre los 100 y 150.
- Mayor resistividad que las metálicas, lo cual hace que se reduzca el tamaño de la galga para una misma resistencia nominal. Esto permite construir sensores miniaturizados.
- Tiene una alta sensibilidad a la temperatura (desventaja)

Aplicación a los acelerómetros

Los acelerómetros del tipo piezoresistivo son los de uso más extendido en el campo de la instrumentación. Esto es debido a que son los más económicos y sus características se adaptan a casi cualquier aplicación. Entre estas características cabe destacar las siguientes:

- Poseen respuesta en DC.
- Generalmente tienen una buena respuesta en frecuencia, lo cual les hace aptos para medir vibraciones e incluso impactos de corta duración (de incluso menos de 1ms).
- Se caracterizan por un tamaño y peso muy reducido, lo cual es una ventaja por ejemplo, en aplicaciones donde la masa del acelerómetro puede llegar a influir en el resultado de la prueba.
- Como contra, requieren de un acondicionador a su salida para adaptar impedancias y para amplificar la señal.

El elemento sensor está constituido por un conjunto de galgas extensiométricas que miden la fuerza ejercida por la masa sísmica cuando el acelerómetro es sometido a una aceleración.

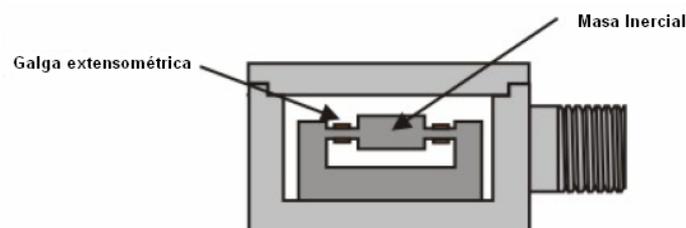


Figura 3.18. Constitución interna de un acelerómetro basado en galgas extensiométricas.

3.5.2. Acelerómetros piezoeléctricos

Los transductores piezoeléctricos son transductores activos que se basan en el fenómeno de la piezoelectricidad descubierto en 1881 por Pierre y Jacques Curie. Dicho fenómeno se da en algunos cristales (generalmente de manera natural) como el cuarzo o el rubidio y consiste en un desplazamiento de cargas eléctricas en el cristal que se produce al someterlo a un esfuerzo mecánico [15] [45].

Este fenómeno hace que aparezcan cargas eléctricas de sentido opuesto en ambas caras del cristal. La cantidad de carga eléctrica generada será proporcional al esfuerzo mecánico sometido.

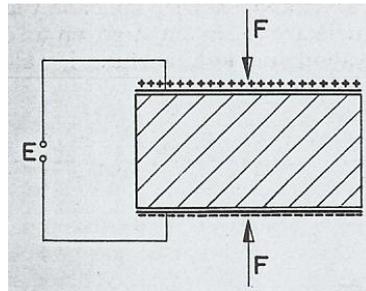


Figura 3.19. Representación gráfica del fenómeno piezoeléctrico

En el momento en que el esfuerzo cesa o se mantiene constante, también cesa el movimiento de cargas, por lo que la carga eléctrica se irá disipando hasta restablecerse el equilibrio inicial. De aquí se deduce que los transductores piezoeléctricos se utilizan para medidas dinámicas, es decir, medidas de magnitudes físicas que varían en el tiempo, como por ejemplo, una vibración o un impacto. No obstante, dependiendo del sistema acondicionador utilizado y de la naturaleza del cristal piezoeléctrico utilizado, es posible efectuar medidas *quasi*-estáticas.

Aplicación a los acelerómetros

Al igual que en el caso de los acelerómetros piezorresistivos, el elemento sensor (en este caso el cristal piezoeléctrico) se ancla firmemente a la masa sísmica para ser sometido a una fuerza proporcional a la aceleración.

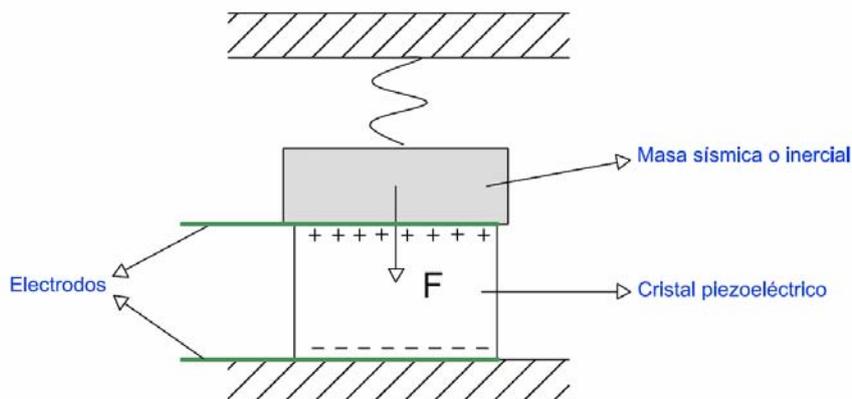


Figura 3.20. Esquema del modelo interno de un acelerómetro piezoeléctrico

El uso de acelerómetros piezoeléctricos es muy extendido en el campo de la instrumentación industrial a pesar de ser más caros que otro tipo de acelerómetros como los piezorresistivos. Esto es porque dicha

tecnología proporciona una serie de características al acelerómetro que lo hacen ser el idóneo para según qué aplicaciones como vibraciones de alta frecuencia, impactos de corta duración en los que se requiera mucha precisión, estabilidad y repetibilidad, o en aplicaciones en las que las condiciones ambientales (temperatura) son muy adversas:

- Poseen muy buena respuesta en frecuencia y el mayor ancho de banda.
- Permiten medir impactos muy breves, desde los 0,1ms.
- Permiten rangos de medida muy elevados.
- Gran estabilidad en temperatura, permitiendo su uso a temperaturas de hasta unos 150°C
- Muy poca deriva en el tiempo. Su comportamiento no se ve prácticamente afectado con el uso ni por el paso del tiempo.
- Buena linealidad y repetibilidad en todo el rango de amplitud.

También encontramos los siguientes inconvenientes:

- Necesitan de un caro acondicionador a su salida para adaptar impedancias y amplificar la señal.
- El cable de conexión del acelerómetro al amplificador debe ser único para cada acelerómetro y estar debidamente protegido contra ruidos eléctricos.
- El conjunto acelerómetro + acondicionador tiene un elevado precio.

La sensibilidad de un acelerómetro piezoeléctrico suele venir expresada en pC/g, es decir, en unidades de carga eléctrica por unidades de aceleración de la gravedad.

3.5.3. Acelerómetros piezoeléctricos con electrónica incorporada (IEPE)

Los acelerómetros piezoeléctricos con electrónica incorporada son acelerómetros cuya tecnología está también basada en el transductor piezoeléctrico pero con la diferencia de que el acelerómetro incorpora internamente la electrónica que hace las veces de amplificador de carga.

Este tipo de acelerómetros presenta grandes ventajas como las que se detallan a continuación:

- La salida del acelerómetro es de baja impedancia y puede ir directamente conectada a cualquier voltímetro, osciloscopio o sistema de adquisición de datos.
- El cable de conexión de la salida del acelerómetro ya no influye en la sensibilidad o en la respuesta en frecuencia del sistema.
- Suele ser mucho más económico que un sistema formado por un acelerómetro piezoeléctrico y un amplificador de carga por separado.
- Generalmente permiten medidas de aceleración quasi-estáticas (menores a 10Hz).

La señal de salida puede ser más estable y con bajo nivel de ruido gracias a que ya no se precisa de un cable que conecte el sensor con su amplificador.

Como mayor inconveniente se encuentra el estrecho margen de temperaturas en el que puede operar. Esto es debido a que el amplificador estará expuesto a las mismas condiciones que el acelerómetro a diferencia de los acelerómetros piezoeléctricos sin electrónica.

Las características del amplificador de carga que incorpora este tipo de acelerómetro depende del fabricante, pero generalmente todos se alimentan mediante una fuente de corriente continua de unos 4mA. El conector del acelerómetro únicamente está formado por dos terminales ya que se conecta en serie con la fuente de corriente para alimentar al amplificador. Es la misma fuente de corriente la encargada de extraer la tensión de salida del sistema (generalmente mediante un conector de tipo BNC).

Los acelerómetros piezoeléctricos con electrónica incorporada de la marca PCB Piezotronics son llamados acelerómetros *ICP*, mientras que los de la marca Endevco se les llama *Isotron*. Los del fabricante Brüel & Kjaer son los llamados *DeltaTron*.

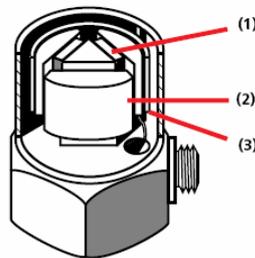


Figura 3.21. Vista interior de un acelerómetro piezoeléctrico DeltaTron de B&K. Se compone de tres cristales piezoeléctricos (1) en configuración triangular con tres masas sísmicas (2). El conjunto queda ajustado mediante un anillo pretensor (3)

3.5.4. Acelerómetros capacitivos

Un transductor capacitivo se basa en el efecto condensador para transformar una magnitud física en una variación de la capacidad de un condensador que es traducida en una variación de tensión eléctrica [45].

Un condensador consiste básicamente en dos placas conductoras separadas por un dieléctrico. La polarización de ambas placas crea un campo magnético entre ellas que hace que éstas almacenen una carga eléctrica que varía según sus áreas, la separación entre ellas y el dieléctrico utilizado.

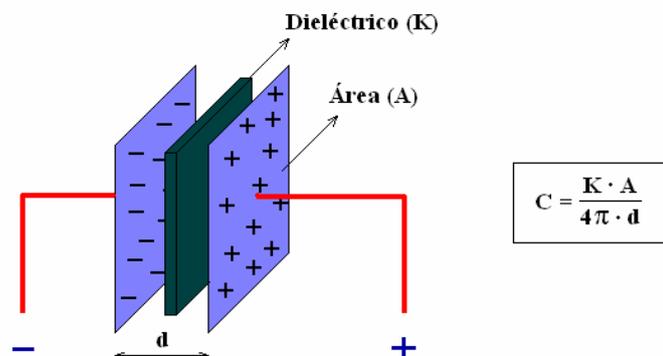


Figura 3.22. Diagrama de un condensador. La capacidad aumenta proporcionalmente con el área de confrontación de las placas y disminuye con la distancia entre ellas

Variando la distancia entre las placas o el área de influencia del campo magnético se consigue variar proporcionalmente la capacidad del condensador.

Aplicación a los acelerómetros

Un acelerómetro capacitivo está constituido por uno o más condensadores que varían su capacidad por efecto de la aceleración por la variación de la separación entre placas.

Un ejemplo real se muestra en el esquema interno de la figura 3.23 que corresponde a un acelerómetro capacitivo del fabricante PCB Piezotronics.

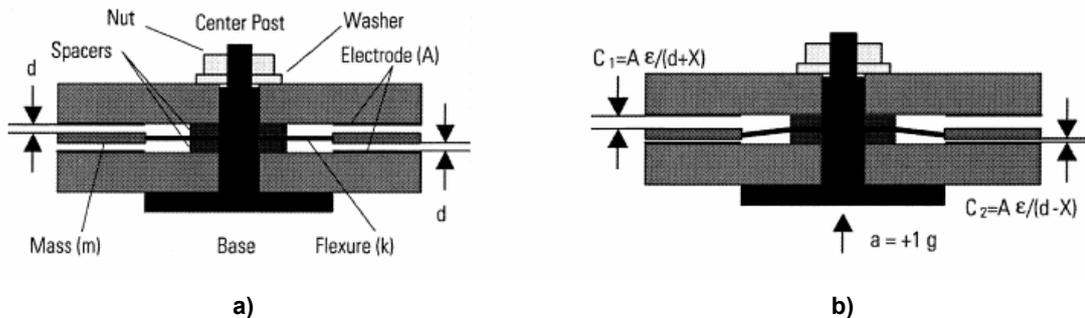


Figura 3.23. Diagrama interno de un ejemplo real de acelerómetro capacitivo.
a) Acelerómetro en reposo. b) Acelerómetro sometido a una aceleración en sentido ascendente

En el ejemplo, se disponen dos condensadores con una placa fija en la carcasa y la otra móvil anclada a una masa sísmica. Cuando el acelerómetro no sufre aceleración de ningún tipo, la masa sísmica permanece en su posición de reposo estando todas las placas a la misma distancia d . Cuando se produce una aceleración, la placa móvil de un condensador se separa de la otra placa mientras que en el otro condensador ocurre lo contrario. Esto hace que ante una aceleración la capacidad de un condensador aumente y la del otro disminuya proporcionalmente.

3.5.5. Resumen de características y aplicaciones según la tecnología

A continuación, en la tabla 3.1, se muestra un resumen de las diferencias en cuanto a características técnicas según la tecnología del acelerómetro. Al mismo tiempo se mencionan las aplicaciones típicas de cada tecnología.

<i>Tecnología</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>	<i>Aplicaciones</i>
Piezorresistivos	<ul style="list-style-type: none"> - Económicos - Buena respuesta en frecuencia - Poseen respuesta en DC - Tamaño reducido y ligeros - Multitud de rangos disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren acondicionador de extensometría - Baja sensibilidad - Alta sensibilidad a la temperatura (algunos llevan compensación) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensayos de impacto - Ensayos de vibraciones de baja y media frecuencia - Medidas de inclinación
Piezoeléctricos	<ul style="list-style-type: none"> - La mejor respuesta en frecuencia - Poca sensibilidad a temperatura - Margen de temperatura de trabajo muy amplio - Deriva en el tiempo muy baja - Permiten rangos de medida muy elevados - Gran linealidad y repetibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - No poseen respuesta en DC - Requieren acondicionador de carga - Elevado precio acelerómetro + acond. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensayos de impacto - Ensayos de vibraciones de media y alta frecuencia - Ensayos en condiciones ambientales adversas
IEPE	<ul style="list-style-type: none"> - No requieren acondicionador que influye en la medida - Poseen casi todas las ventajas de los piezoeléctricos sin electrónica incorp. - Más económico al incorporar acondicionador - El cable de conexión no influye en el resultado de la medición 	<ul style="list-style-type: none"> - No poseen respuesta en DC - Estrecho margen de temperatura de trabajo 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensayos de impacto - Ensayos de vibraciones de media y alta frecuencia
Capacitivos	<ul style="list-style-type: none"> - Muy buena precisión y linealidad - Permiten rangos muy bajos - Poseen respuesta en DC - Suelen llevar acondicionador integrado 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado precio - Muy estrecha respuesta en frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> - Clinómetros (medidas de inclinación) - Ensayos de frenada - Ensayos de dinámica en la conducción

Tabla 3.1. Resumen de características y aplicaciones típicas según la tecnología del acelerómetro.

3.6. Acondicionamiento de la señal del acelerómetro

3.6.1. Acondicionamiento de la señal de salida de transductores piezorresistivos.

Un transductor piezorresistivo es un transductor pasivo ya que necesita alimentación para que un instrumento de medida pueda procesar su señal de salida.

El elemento sensor de los acelerómetros piezorresistivos puede estar formado por más de una galga extensiométrica dispuestas en **punto de Wheatstone**.

Un punto de Wheatstone es un circuito electrónico que se utiliza para medir las variaciones de resistencia eléctrica de uno o más conductores.

En la figura 3.24 se ilustra el esquema eléctrico de cuatro resistencias dispuestas en punto de Wheatstone.

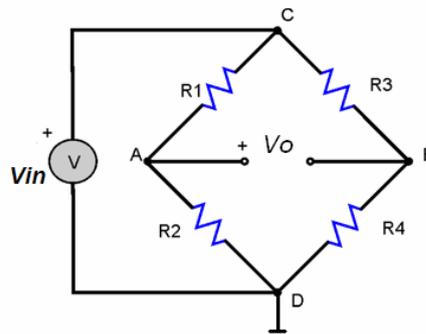


Figura 3.24. Circuito en puente de Wheatstone para la medida de resistencia

Cuando se cumple la igualdad 3.5, se dice que el puente está en equilibrio, anulándose entonces la tensión de salida.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (3.5)$$

La expresión utilizada para el cálculo de la tensión de salida en función de las resistencias es la siguiente:

$$V_o = V_{in} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (3.6)$$

Por tanto, la señal de salida será una tensión eléctrica proporcional a la aceleración, por lo que la sensibilidad del acelerómetro piezorresistivo suele venir expresada en mV/g. Se utilizan milivolts en lugar de Volts porque la señal de salida del acelerómetro es muy baja.

Según el número de galgas que posee el acelerómetro se obtienen tres diferentes configuraciones del puente de Wheatstone: la configuración en cuarto de puente, en medio puente y en puente completo [43].

3.6.1.1. Configuración en cuarto de puente

En esta configuración únicamente hay una galga extensiométrica activa en el acelerómetro. Esta galga se introduce en uno de los brazos del puente y dicho puente se completa con otras tres resistencias del mismo valor nominal que la galga extensiométrica.

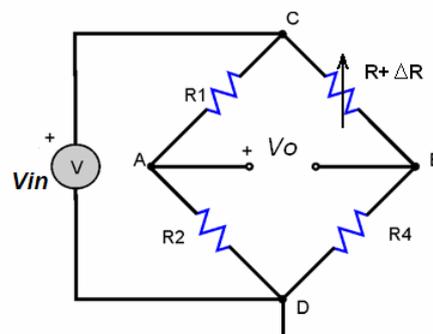


Figura 3.25. Ejemplo de una configuración en cuarto de puente.

La tensión de salida en función de la variación de resistencia se extrae de la siguiente expresión:

$$V_o = V_{in} \cdot \frac{\Delta R}{4} \cdot \frac{1}{R + \frac{\Delta R}{2}} \quad (3.7)$$

Es la configuración menos utilizada debido a que es la que ofrece menor sensibilidad y linealidad y además no compensa el efecto de la sensibilidad a la temperatura.

3.6.1.2. Configuración en medio puente

En esta configuración se sitúan dos galgas activas en el puente. Estas galgas van siempre en brazos contiguos del puente, ya que ambas están dispuestas en sentidos opuestos de medida.

Mediante esta configuración generalmente es necesario completar el puente externamente ya que el acelerómetro suele incorporar solamente las dos galgas y tres terminales de salida tal y como se ilustra en la figura 3.26.

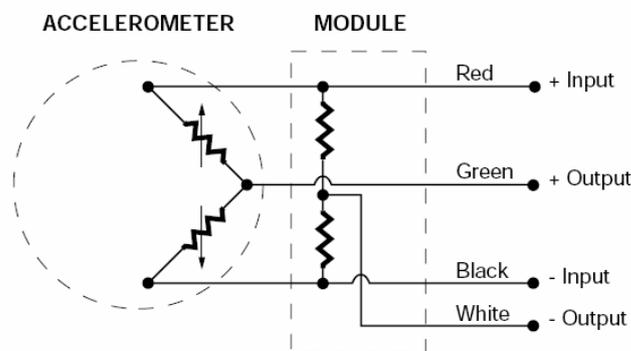


Figura 3.26. Esquema interno simplificado de un acelerómetro de medio puente.

Mediante esta configuración se consigue duplicar la sensibilidad con respecto a la configuración en cuarto de puente y se compensa, en parte, el efecto de la sensibilidad a la temperatura.

3.6.1.3. Configuración en puente completo

En esta configuración todos los brazos del puente son utilizados por galgas extensiométricas activas logrando duplicar la sensibilidad del transductor respecto a la configuración en medio puente.

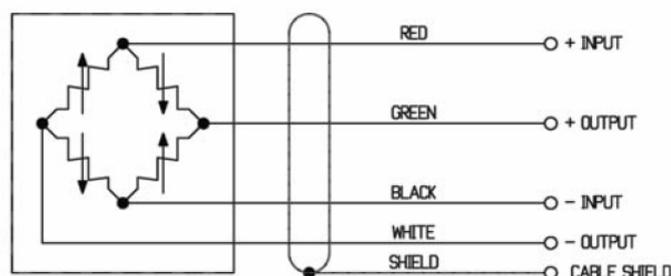


Figura 3.27. Ejemplo simplificado de un acelerómetro en configuración de puente completo

Mediante esta configuración también se logra linealizar por completo el comportamiento del acondicionador. Suponiendo que las cuatro galgas sufren el mismo valor absoluto de incremento de

resistencia en todo momento, la expresión que describe la tensión de salida en función de la variación de las resistencias del puente es la siguiente:

$$V_o = V_{in} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (3.8)$$

3.6.1.4. Compensación por temperatura

Una propiedad de las galgas extensiométricas y, en general, de todo conductor eléctrico, es que su resistividad varía con el gradiente de temperatura al que es sometido.

Si una de las galgas del puente es sometida a un gradiente de temperatura diferente al resto de galgas, ocurrirá un desequilibrio en el puente y, por tanto, la señal de salida del sistema se verá afectada.

Generalmente, todos los acelerómetros utilizados en estos tipos de aplicación, vienen ya compensados por temperatura. Dicha compensación se consigue gracias a un circuito eléctrico integrado en el mismo acelerómetro. Un ejemplo esquematizado de dicha compensación puede observarse en la figura 3.28.

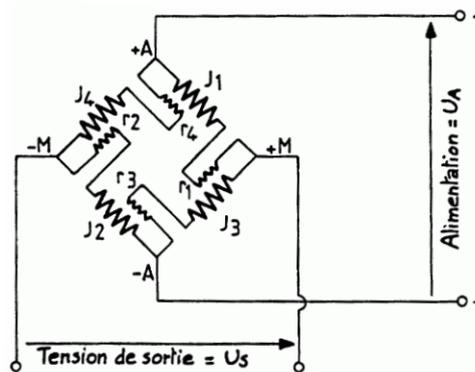


Figura 3.28. Puente de wheatstone compensado por temperatura. Las resistencias r1 a r4 se encargan de la compensación

En este ejemplo de compensación por gradiente de temperatura, las resistencias R1 a R4 se sitúan próximas a las galgas activas de sus respectivos brazos contiguos del puente. El valor y propiedades de dichas resistencias han de ser idénticas a las de las galgas extensiométricas. De esta manera, cada resistencia de compensación se somete a los mismos gradientes de temperatura que la galga situada en su respectivo brazo contiguo, y por tanto, su resistencia eléctrica variará de la misma manera que la de la galga respecto a la variación de temperatura.

Una idéntica variación de resistencia eléctrica en brazos contiguos del puente no supone ninguna variación de señal a la salida, por lo que las resistencias de compensación logran prácticamente anular los efectos del gradiente de temperatura en la salida.

Las resistencias de compensación en realidad son galgas extensiométricas situadas en zonas que no son sometidas a esfuerzo. De esta manera nos aseguramos que las propiedades de dichas resistencias son prácticamente idénticas a las de las galgas activas.

3.6.2. Acondicionamiento de la señal de salida de acelerómetros piezoeléctricos.

Un transductor piezoeléctrico es un transductor activo ya que no necesita de una fuente de alimentación eléctrica para proporcionar un potencial eléctrico a su salida.

No obstante, la impedancia de salida de los transductores piezoeléctricos es muy elevada, lo cual hace que sea imposible leer la señal de manera precisa con cualquier instrumento de medida.

Para poder tomar una lectura precisa de la salida de un transductor piezoeléctrico es necesario un circuito electrónico que se encargue de acondicionar la señal, amplificando y adaptando la impedancia de salida con la de entrada del instrumento de medida. Esto se consigue mediante un amplificador de carga.

El esquema básico de un amplificador de carga se puede observar en la figura 3.29 [15].

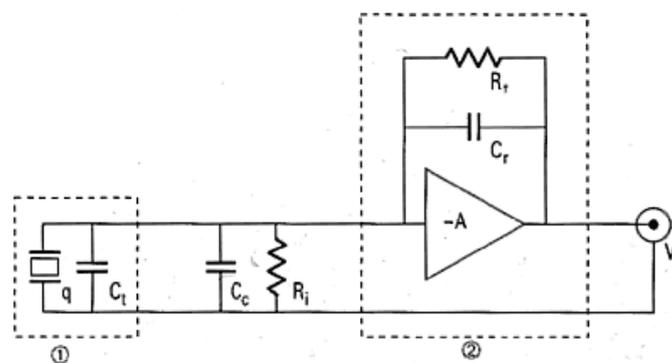


Figura 3.29. Esquema básico del modelo de un acelerómetro piezoeléctrico (1) con amplificador de carga (2)

En dicho esquema se modela el acelerómetro por un generador de carga eléctrica q con un condensador C_t en paralelo simulando su impedancia capacitiva. La resistencia R_i y el condensador C_c representan la impedancia del cable utilizado para conectar el acelerómetro al amplificador de carga.

El amplificador de carga está formado, básicamente, por un amplificador en modo inversor de alta impedancia de entrada. A su salida, la señal de carga eléctrica del acelerómetro es amplificada y su impedancia de salida es disminuida para poder ser leída por cualquier voltímetro u osciloscopio.

La expresión que determina la tensión de salida V_o en el esquema de la figura 3.29 es la siguiente:

$$V_o = \frac{-q}{C_r} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{A \cdot C_r} \cdot (C_t + C_r + C_c)} \quad (3.9)$$

Suponiendo un elevado factor de amplificación A , se puede despreciar el efecto de la impedancia del cableado y del propio sensor, quedando la tensión de salida únicamente en función de la carga del acelerómetro y la capacitancia de realimentación del amplificador:

$$V_o = \frac{-q}{C_r} \quad (3.10)$$

Una de las características de los transductores piezoeléctricos es que no mantienen la carga eléctrica ante medidas estáticas. Esto es debido a la propia naturaleza del cristal piezoeléctrico y a que el sensor se descarga a través del cableado y el amplificador de carga.

La constante de tiempo de descarga de un amplificador de carga viene determinada por la impedancia de entrada del acondicionador y se corresponde con un filtro pasa altos de primer orden:

$$T_D = R_t \cdot C_r \quad (3.11)$$

Esta constante de tiempo de descarga hace que los acelerómetros piezoeléctricos no sean aptos para medidas estáticas, aunque en ocasiones, dependiendo de la impedancia del amplificador de carga, es posible conseguir utilizar el acelerómetro para realizar medidas *quasi*-estáticas (variaciones menores a 10Hz).

El cableado utilizado para conectar el acelerómetro al amplificador de carga también contribuye a la descarga del acelerómetro y al ruido generado en la señal de salida, siendo pues muy importante que esté siempre en perfectas condiciones y firmemente conectado.

3.6.3. Acondicionamiento de la señal de salida de acelerómetros IEPE.

Los acelerómetros IEPE no necesitan ningún tipo de acondicionador de señal específico a su salida puesto que ya lo integran internamente. Lo único que se necesita es una fuente de corriente diseñada para alimentar este tipo de transductores.

La fuente de corriente suministra una intensidad de corriente eléctrica constante a la entrada del acelerómetro y al mismo tiempo ofrece una tensión eléctrica a su salida proporcional a la señal producida por el acelerómetro [15].

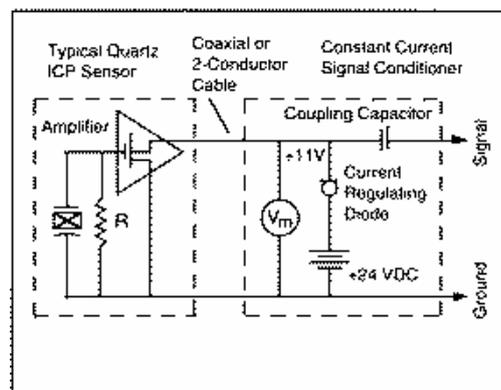


Figura 3.30. Esquema básico interno de una fuente de corriente para transductores ICP. La fuente suministra una corriente de 4mA y ofrece una salida de tensión proporcional a la aceleración a la que se somete el acelerómetro ICP.

3.6.4. Acondicionamiento de la señal de salida de acelerómetros capacitivos.

Es habitual el uso de puentes de Wheatstone para el acondicionamiento de señal de los transductores capacitivos. La principal diferencia respecto a los puentes utilizados para transductores piezorresistivos es que la alimentación del puente se lleva a cabo mediante una tensión alterna.

El modelo es equivalente al puente formado por resistencias ya que cuando se cumple la condición 3.5 (sustituyendo las resistencias por condensadores) se dice que el puente está equilibrado, siendo la tensión de salida nula.

En cuanto uno de los condensadores varía su capacidad, el puente se desequilibra proporcionando una tensión alterna cuya amplitud es proporcional a la variación de capacidad y su fase depende del condensador que haya variado y de si su capacidad ha aumentado o disminuido, al igual que pasa con el signo de la tensión de salida en los puentes resistivos.

Un ejemplo real esquematizado de acondicionador de transductores capacitivos se ilustra en la figura 3.31.

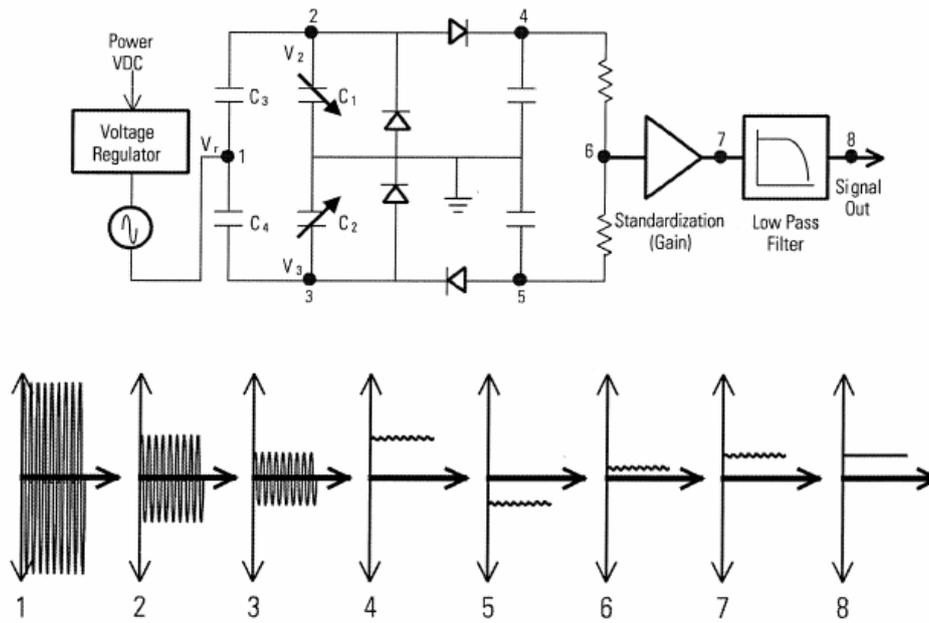


Figura 3.31. Esquema y diagrama de funcionamiento de un acondicionador de transductores capacitivos.

3.7. Calibración de acelerómetros

En la calibración de acelerómetros se extrae el coeficiente de transferencia que relaciona la señal de salida del transductor con la aceleración a la que es sometido. Dicho coeficiente de transferencia, también llamado sensibilidad, puede hallarse de diversos modos dependiendo del tipo de acelerómetro, de la aplicación a la que va destinado o del propio método de calibración.

En la mayoría de los casos es necesario obtener el comportamiento del acelerómetro respecto a la frecuencia de la señal de entrada, debido a que las aplicaciones a las que suele ir destinado el acelerómetro intervienen aceleraciones que varían rápidamente en el tiempo.

3.7.1. Calibración de acelerómetros de bajo rango para medidas estáticas y quasi-estáticas.

La calibración en amplitud de acelerómetros de bajo rango y baja respuesta en frecuencia puede llevarse a cabo en estático mediante una simple mesa posicionable como la que se muestra en la figura 3.32.



Figura 3.32. Foto de una plataforma posicionable para la calibración de acelerómetros de bajo rango y respuesta estática.

No obstante, mediante este patrón únicamente es posible materializar una aceleración de cero (posición horizontal) a $\pm 1g$ (posición completamente vertical formando un ángulo de 90° con la horizontal), por lo que si se desea calibrar acelerómetros de este tipo cuyo rango esté comprendido, por ejemplo, entre 1 y 10g y además se requiera comprobar la respuesta en frecuencia, es aconsejable considerar otro procedimiento de calibración. Una forma de conseguir esto último sería mediante un vibrador lineal de baja frecuencia y amplio recorrido como el mostrado en la figura 3.33 [48].



Figura 3.33. Foto del vibrador lineal de baja frecuencia y amplio recorrido *Spektra APS500* para la calibración de acelerómetros de baja frecuencia y bajo rango de amplitud

Mediante este tipo de calibrador, es posible conseguir amplitudes de hasta 6g y frecuencias que van desde los 0,2Hz hasta los 200Hz.

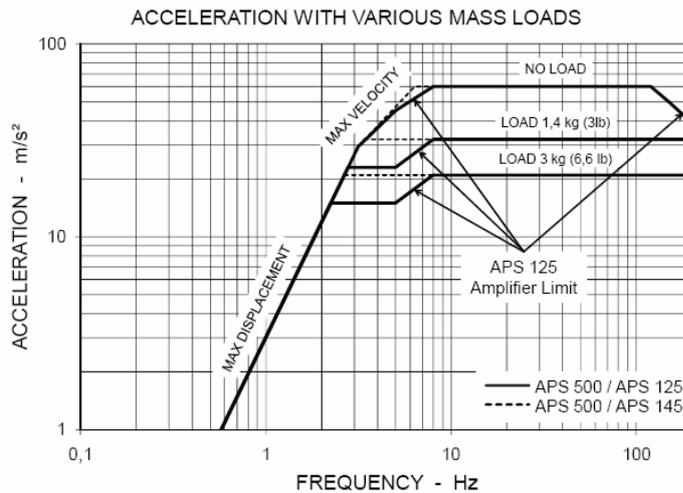


Figura 3.34. Gráfico de la relación entre la frecuencia y la aceleración máxima que es capaz de materializar el vibrador lineal *Spektra APS500*

3.7.2. Calibración primaria de acelerómetros para medidas dinámicas.

El método de calibración primario o absoluto es el utilizado por laboratorios de calibración que disponen de patrones primarios para la calibración de acelerómetros de referencia.

El procedimiento más utilizado en los laboratorios primarios para la calibración de un acelerómetro de referencia es el basado en interferometría debido a su fiabilidad y gran exactitud. Consiste en someter al acelerómetro en calibración (a partir de ahora UUT⁵) a una vibración senoidal mientras se registra el desplazamiento en el tiempo mediante un interferómetro láser situado perpendicular al eje de movimiento y así extraer la sensibilidad del acelerómetro y verificar su respuesta en amplitud y frecuencia.



Figura 3.35. Sistema de calibración primario de acelerómetros *SPEKTRA-CS18P* basado en interferómetro láser.

⁵ UUT, del inglés *Unit Under Test* es el transductor cuyo comportamiento se desea estudiar comparándolo con el de un transductor de referencia.

No obstante, debido a que no todos los laboratorios de calibración disponen de un sistema basado en interferómetro láser por su elevado precio y complejidad, este método de calibración se reserva para la calibración de acelerómetros patrón.

3.7.3 Calibración secundaria de acelerómetros para medidas dinámicas.

La calibración secundaria de acelerómetros está basada en la calibración por comparación *Back to back*.

La calibración *back to back* consiste en someter al UUT y a un acelerómetro de referencia a la misma señal de aceleración y comparar sus salidas para obtener la sensibilidad del acelerómetro.

3.7.3.1. Por vibración

El procedimiento de calibración secundario o por comparación más habitual de acelerómetros de medio y alto rango de uso industrial, utiliza un sistema formado por un acelerómetro de referencia montado sobre un vibrador controlado por un generador de frecuencia sinusoidal y un amplificador de potencia. Sobre el acelerómetro de referencia se fija el acelerómetro en calibración para comparar directamente las señales producidas por ambos sensores ante determinadas vibraciones. El objetivo de este tipo de calibración también es el de obtener la sensibilidad del acelerómetro y conocer su respuesta en amplitud y frecuencia.

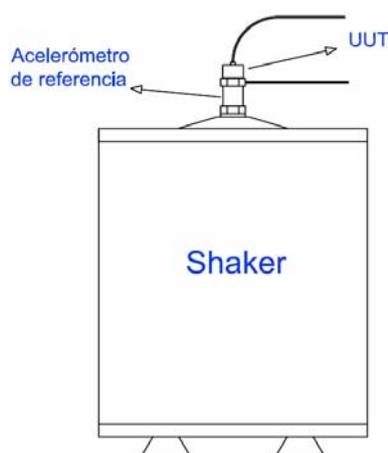


Figura 3.36. Esquema de montaje utilizado en la calibración de acelerómetros por vibración.

Mediante este tipo de calibración y dependiendo de los instrumentos utilizados, es posible alcanzar aceleraciones de hasta unos 50g de pico y frecuencias que pueden ir desde los 10Hz hasta 50kHz. Éste es el método utilizado por nuestro laboratorio de calibración para realizar las calibraciones de los acelerómetros para medidas dinámicas.

Una de las mayores ventajas que supone este tipo de calibración es la posibilidad de realizar un barrido de frecuencias para determinar si la sensibilidad se mantiene a lo largo de todo el ancho de banda del acelerómetro.

También es posible realizar una calibración de amplitud para extraer la sensibilidad del acelerómetro y determinar su linealidad en amplitud.

3.7.3.2. Por choque

Una manera de conseguir una señal de elevada amplitud y que se asemeje a la señal producida durante un ensayo de impacto es mediante un procedimiento de calibración por choque.

El método de calibración por choque consiste en provocar un pico de aceleración brusco y de corta duración a una estructura donde se anclan el acelerómetro de referencia y el UUT. La aceleración producida por dicho impacto se materializa de la misma manera en ambos sensores. Se realizan varios impactos a determinadas amplitudes y duraciones para extraer la sensibilidad y la respuesta lineal del acelerómetro.

Existen diversos sistemas de calibración por impacto. El más económico y, por tanto, el más utilizado, es el basado en un péndulo de dos brazos como el mostrado en la figura 3.37.

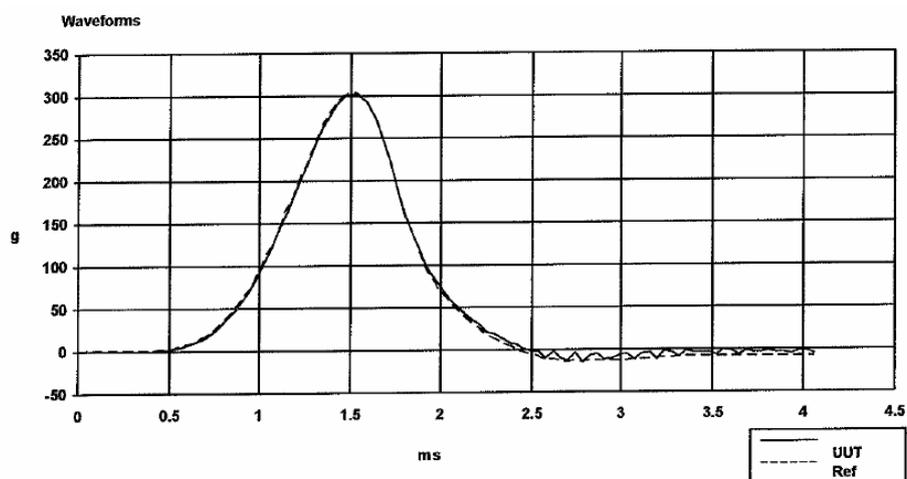


Figura 3.37. Arriba, sistema *Spektra CS18* basado en péndulo de doble brazo para la calibración de acelerómetros en amplitud. Abajo, ejemplo de las señales de salida adquiridas por el sistema de referencia y el UUT ante un impacto de 300g de una duración de 2ms.

Este último tipo de calibración puede servir como complemento a la calibración por vibración para observar el comportamiento del transductor a amplitudes más elevadas y es muy aconsejable su uso para la calibración de transductores utilizados para medidas de impacto como, por ejemplo, los utilizados en ensayos de homologación de cascos. No obstante, no se suele recurrir muy a menudo a este tipo de calibración debido a que el sistema para llevarla a cabo tiene un precio muy elevado con respecto al sistema de calibración por vibración.

Lo más habitual en este tipo de escenario es realizar una calibración por choque cada 3 o 4 años en un laboratorio externo para observar la linealidad en todo el rango de amplitud y seguidamente realizar calibraciones intermedias mediante el procedimiento por vibración para verificar su sensibilidad y respuesta en frecuencia.

CAPÍTULO 4. Software y protocolos de comunicación utilizados

4. Software y protocolos de comunicación utilizados

Para automatizar la calibración es necesario desarrollar un software a medida para poder llevar a cabo las tareas de comunicación entre instrumentos y usuario.

Existen diversos lenguajes de programación y herramientas que se pueden utilizar para programar el software que se desea desarrollar en este proyecto. Ejemplos de lenguajes de programación son el lenguaje C (medio nivel), BASIC (alto nivel), Pascal, Visual C, etc.

Se opta por el uso del software de programación Labview de National Instruments debido a que ofrece un entorno gráfico de alto nivel muy intuitivo y brinda muchas facilidades a la hora de comunicarse entre instrumentos gracias a la multitud de librerías y controladores de los que podemos disponer y gracias también a la instrumentación virtual.

4.1. NI LabVIEW 8.0

LabVIEW, del inglés *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*, es un software de programación gráfica desarrollado por la empresa *National Instruments* en la década de los 80, especialmente diseñado para aplicaciones de instrumentación y automatización industrial [47].

Con LabVIEW se pueden realizar programas para el control de la instrumentación y para el análisis de datos de una manera muy fácil e intuitiva. No necesita profundos conocimientos de programación al ser un tipo de programación gráfica: el código no se escribe, se “dibuja” en forma de diagramas de bloques.

El uso de esta herramienta para el desarrollo del proyecto está motivado por las ventajas que supone en aplicaciones de instrumentación frente a otro software de programación. Además, se marcó como objetivo personal el aprendizaje de la programación mediante esta herramienta debido al enorme abanico de posibilidades que ofrece en el entorno de mi trabajo.

Algunas de las ventajas que supone el uso de esta herramienta en la programación en instrumentación se enumeran a continuación:

- Es fácil e intuitivo su uso debido a que está basado en una interfaz gráfica a diferencia del resto de herramientas de programación.
- Está específicamente diseñado para el control de instrumentación, permitiendo realizar de manera muy rápida e intuitiva paneles de instrumentos virtuales.
- Dota de gran flexibilidad al sistema a la hora de realizar cambios y actualizaciones en la programación y en el hardware.
- Los fabricantes de instrumentos conocen las virtudes de esta herramienta y elaboran sus propios controladores para LabVIEW.

4.1.1. National Instruments.

National Instruments es una empresa líder en el sector de la instrumentación y automatización de sistemas. Fue fundada en 1976 por James Truchard, Bill Nowlin y Jeff Kodosky en Austin, Texas [51].

En el año 1986 NI sacó al mercado el software LabVIEW orientado a la programación de instrumentos virtuales y desde entonces se convirtió en su principal producto.

4.1.2. Instrumentación virtual.

Un instrumento virtual o “VI” es la simulación de un instrumento de medida. Al igual que un instrumento de medida físico se compone de un panel con controles e indicadores y una electrónica en su interior que define su comportamiento, un VI dispone de un panel frontal que visualizamos en la pantalla del PC y un diagrama de bloques que controla su comportamiento. Al mismo tiempo, el VI puede comunicarse e interactuar con el instrumento físico mediante protocolos de comunicación (serie, GPIB, USB, etc.).

El panel frontal será el interfaz gráfico entre usuario y máquina cuando el programa esté en ejecución, por lo que deberá incluir todos los controles e indicadores necesarios para interactuar. En cambio, el diagrama de bloques es donde se realiza la programación propiamente dicha.

Un ejemplo de ello se puede observar en la figura 4.1. En el panel frontal se disponen los controles e indicadores necesarios. Dichos controles e indicadores se pueden manipular en la ventana de diagrama de bloques mediante multitud de operaciones, estructuras y otras funciones predeterminadas. En el ejemplo se observan dos controles y tres indicadores. El control 1 regula la velocidad de llenado del tanque, mientras que el botón de STOP para el programa. El indicador “Tank” permite visualizar el nivel de llenado y el indicador 1 da una lectura de caudal. El piloto verde se enciende cuando se ha llegado al nivel máximo de llenado.

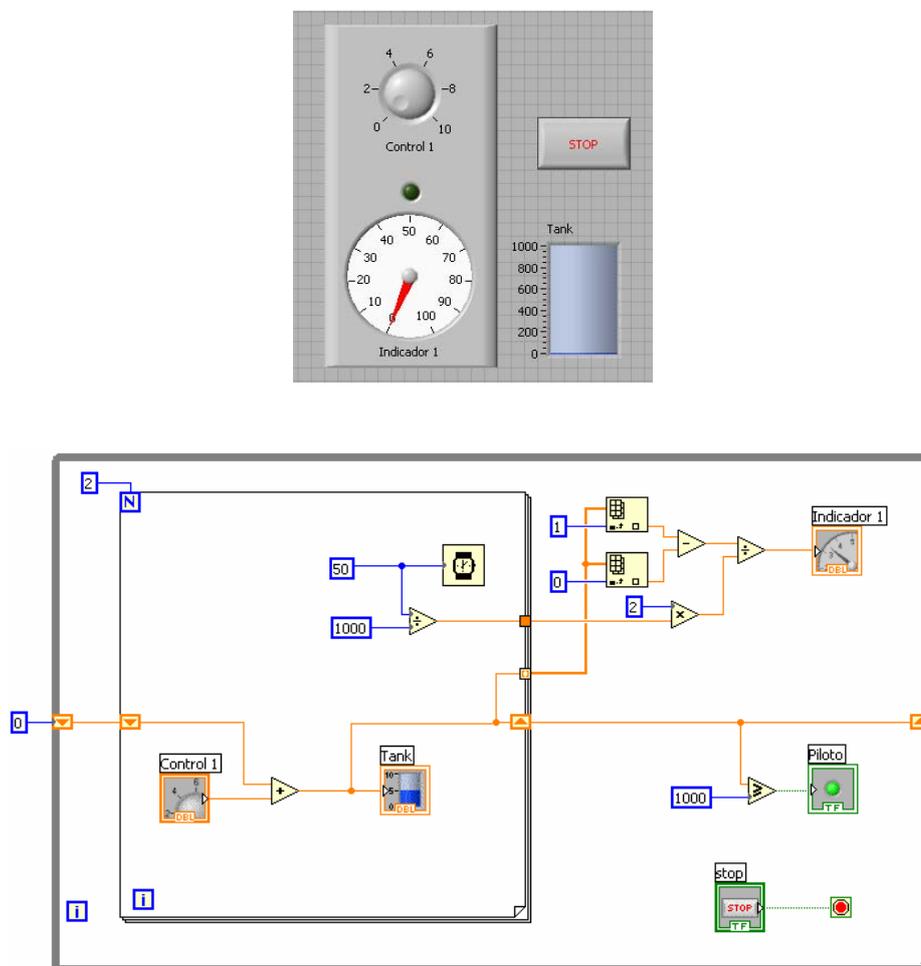


Figura 4.1. Ejemplo de un VI para el control de llenado de un tanque. En el panel frontal (arriba) se disponen los controles e indicadores. En el diagrama de bloques (abajo) se realiza la programación de los controles.

Los controles e indicadores del ejemplo pueden estar conectados a instrumentos externos mediante un bus de comunicación entre el PC y los instrumentos. Esto permite medir y/o manipular un proceso físico mediante sensores y actuadores. De esta manera, en el ejemplo, el control 1 podría actuar sobre una válvula de llenado y el indicador 1 podría estar conectado a la salida de un caudalímetro instalado en el tanque. Sabiendo el caudal, mediante el programa se podrían realizar las operaciones requeridas para averiguar el nivel de llenado del tanque en todo momento.

No es objeto de este proyecto el explicar en detalle el funcionamiento de la programación con LabVIEW. Si el lector desea profundizar en este tema existen multitud de libros y manuales para estos menesteres. En la bibliografía se presentan algunos recursos de ayuda para el aprendizaje de esta herramienta [1] [14] [31], y en el Anexo 8 se realiza una breve introducción a las funciones básicas de LabVIEW.

4.2. Eagle Layout Editor 5.6.0



EAGLE, del inglés *Easily Applicable Graphical Layout Editor*, es un software de la empresa alemana Cadsoft Computer GmbH, diseñado para realizar capturas de esquemáticos y diseñar el layout de la placa de circuito impreso (a partir de ahora, PCB).

Como características más destacadas, es una herramienta de muy fácil manejo pero al mismo tiempo muy completa. Tiene un interfaz muy intuitivo que permite realizar proyectos muy rápidamente y sin necesidad de un extenso aprendizaje del funcionamiento del programa, y una vez realizado un esquemático se puede realizar el PCB de manera automática mediante la herramienta *Autorouter*. Otra característica a destacar es que se trata de un programa muy popular y, por tanto, existen multitud de librerías de componentes electrónicos de casi todos los fabricantes.

4.2.1. Editor de esquemáticos de Eagle Layout Editor.

El software incluye un sencillo pero potente editor de esquemáticos en el que se realiza el esquema electrónico del circuito.

El programa, de manera predeterminada, incluye un completo conjunto de librerías de componentes electrónicos. Estas librerías contienen información sobre las conexiones y la forma y dimensiones de los encapsulados. De esta manera, al seleccionar un componente en el esquemático, se dibujará automáticamente el encapsulado correspondiente en el editor de layout.

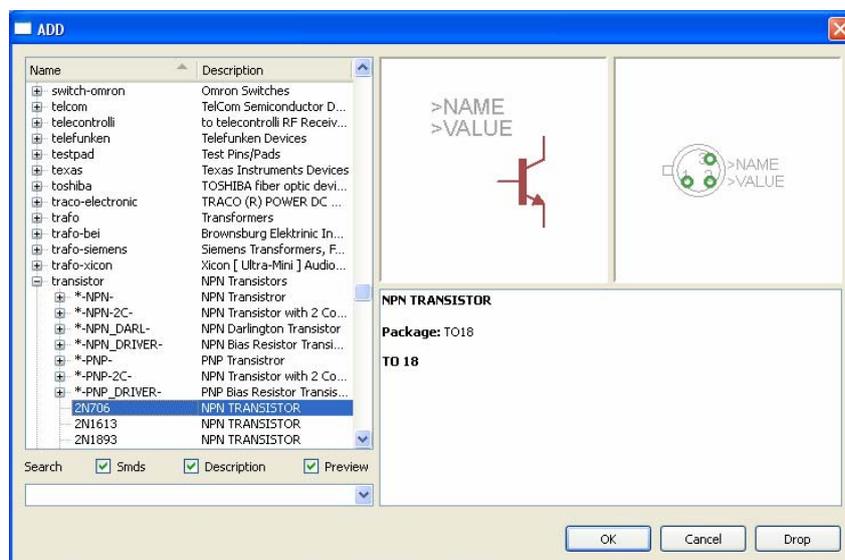


Figura 4.2. Selección del componente en el editor esquemático. En la imagen se visualiza un transistor NPN 2N706 con encapsulado TO18.

4.2.2. Editar Layout del PCB con Eagle Layout Editor

Una vez elaborado el esquemático, al pasar al editor de layout aparecen los componentes utilizados conectados entre sí mediante líneas de conexión. Estas líneas no son las pistas definitivas, únicamente son trazos que unen directamente en línea recta los componentes indicando sus conexiones.

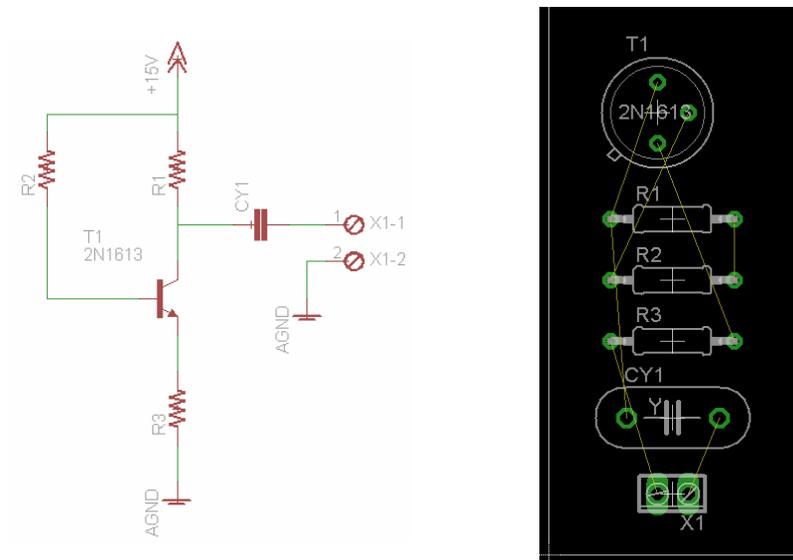


Figura 4.3. Una vez elaborado el esquemático (izquierda) se presentan los componentes en el editor de layout indicando sus conexiones (derecha).

Después de recolocar los componentes, mediante la opción “wire” se trazan las pistas una a una tomando como referencia las líneas de conexión.

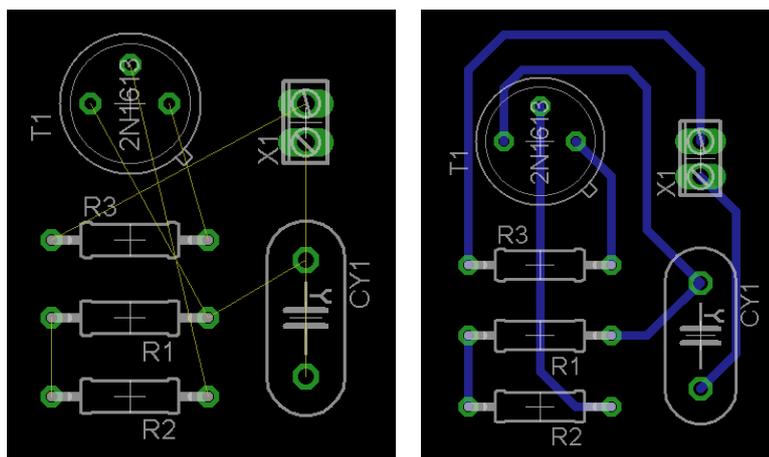


Figura 4.4. Diseño del layout del PCB realizado “manualmente”.

4.2.3. Realizar el layout con Autorouter.

En ocasiones, cuando el circuito es muy complicado, tiene muchos componentes y varias capas, el diseño del layout se complica sobremanera. En estos casos, o cuando se desea realizar el layout con brevedad, es posible utilizar una herramienta llamada *Autorouter* mediante la cual el mismo software se encarga de trazar las pistas.

Antes de proceder a utilizar dicha herramienta se deben configurar las reglas de diseño. Mediante estas reglas se definen parámetros como el ancho de las pistas o las distancias mínimas de separación entre pistas, pads y vías.

Una vez configuradas todas las reglas de diseño, es momento de entrar en la herramienta *Autorouter*, en la cual se podrán seleccionar las capas en las que se desea que se tracen las pistas y otras opciones como el número máximo permitido de vías o la proporción de pistas dibujadas en una capa respecto a las demás.

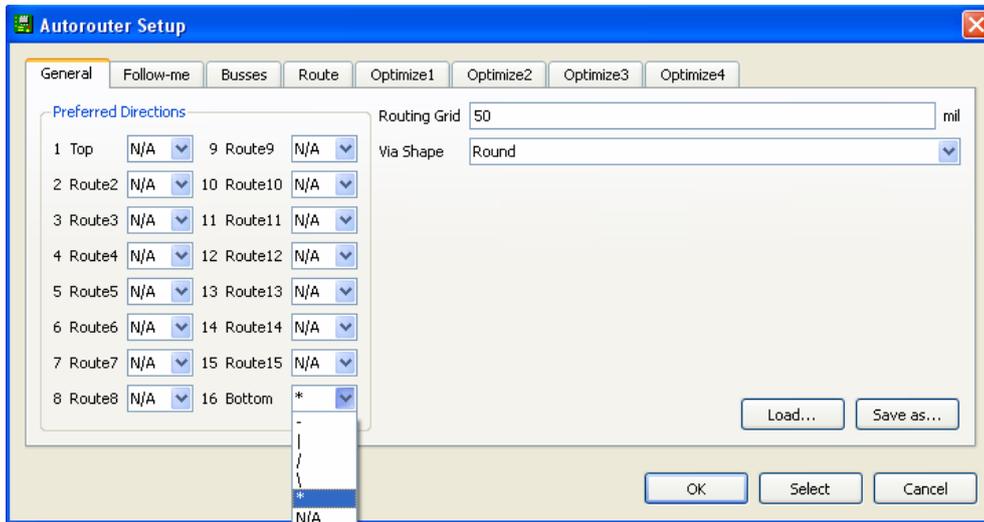


Figura 4.5. Configuración del *Autorouter*.

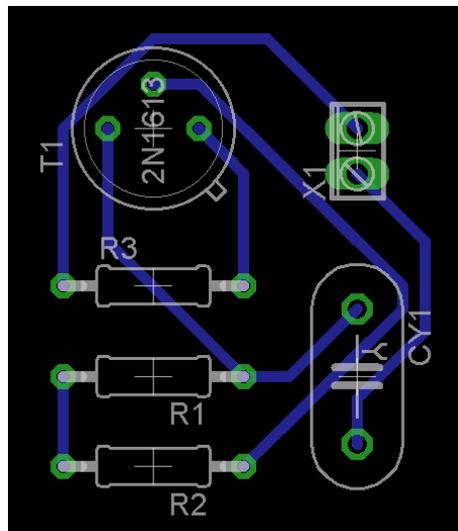


Figura 4.6. Resultado del diseño del layout utilizando *Autorouter*.

4.3. Microchip MPLAB IDE v8.36

El software MPLAB IDE de la empresa *Microchip Technology inc.* ofrece un conjunto de herramientas para el diseño y desarrollo de proyectos basados en los microcontroladores PIC.

4.3.1. Microchip.

Microchip es una empresa que se dedica a la fabricación de microcontroladores, memorias y componentes electrónicos semiconductores analógicos. Sus productos más destacados y que, a día de hoy, son los más aceptados para diseños aficionados y buena parte de los profesionales, son los microcontroladores PIC. No en vano, la empresa Microchip se ha anunciado como el mayor fabricante del mundo de microcontroladores de 8 bits.

Microchip Technology Se fundó en 1987 a raíz de una subdivisión de General Instruments. En la actualidad, la empresa está localizada en Chandler, Arizona.

4.3.2. Microcontroladores PIC.

PIC o PICmicro, es una familia de microcontroladores reprogramables fabricada por Microchip. Originalmente, PIC era un acrónimo de Programmable Interface Controller, aunque posteriormente dejó de emplearse como acrónimo y simplemente pasó a ser PICmicro.



Figura 4.7. Fotografía de un microcontrolador PIC16F84.

Una de las características que diferencian a un microcontrolador de un microprocesador es que el microcontrolador ya incorpora todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarea determinada. Así pues, incorpora internamente el microprocesador, la memoria de datos e instrucciones, las líneas de entrada/salida, osciladores y módulos controladores de periféricos, entre otros, por lo que requiere de un hardware externo mínimo o nulo para funcionar.

Antes de utilizarse debe elaborarse el programa y grabarlo en la memoria interna del microcontrolador PIC. Una vez programado y configurado, el microcontrolador únicamente servirá para realizar la tarea asignada en dicho código, pudiendo ejecutar el programa con la única ayuda de una fuente de alimentación y los periféricos necesarios.

El PIC utiliza un juego de instrucciones RISC⁶ que puede variar entre un número de 35 a 70 instrucciones dependiendo de la familia y modelo.

La arquitectura central de un PIC está basada en la Arquitectura *Harvard*, la cual, al contrario de la *Von Neumann*, se caracteriza por incorporar la memoria de programa y la de datos en unidades de almacenamiento separadas.

La constitución interna representada en diagrama de bloques de un PIC16F84 (uno de los más populares) se ilustra en la siguiente figura.

⁶ RISC, del inglés *Reduced Instruction Set Computer* es una arquitectura computacional con un set de instrucciones fijo y reducido.

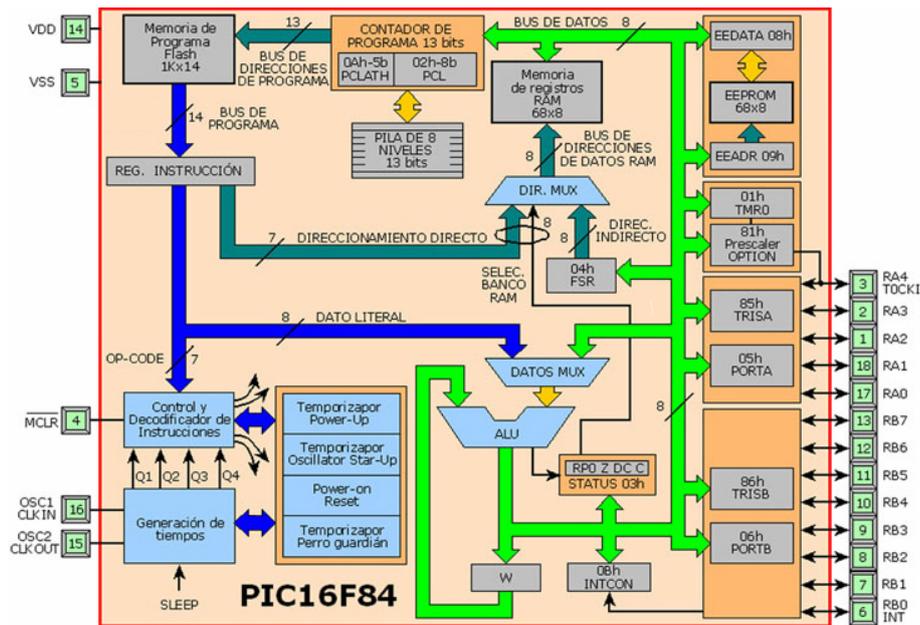


Figura 4.8. Diagrama de bloques interno de la arquitectura de un PIC16F84.

4.3.3. Lenguaje de programación de los PICs

Los microcontroladores PIC pueden programarse mediante código ensamblador utilizando el propio juego de instrucciones del microcontrolador. No obstante, presentan la ventaja de poder programarse también con multitud de lenguajes de más alto nivel, como lenguaje C, BASIC o Pascal, en cuyo caso, el software utilizado deberá tener la herramienta (compilador) que le permita convertir su propio juego de instrucciones en el código máquina para ese microcontrolador en concreto.

4.3.4. Introducción al software MPLAB IDE.

Microchip Technology ofrece de manera gratuita un conjunto de herramientas dedicadas al desarrollo de aplicaciones integradas en microcontroladores PIC. Este conjunto de herramientas está integrado en una aplicación llamada MPLAB IDE.

Mediante MPLAB es posible escribir el código en lenguaje ensamblador y realizar una posterior simulación para la detección de errores de sintaxis y para observar con detenimiento la ejecución del programa.

También es posible desarrollar el código en otros lenguajes de más alto nivel, como el lenguaje C, para lo cual será necesario el módulo compilador correspondiente que ofrece la misma empresa Microchip.

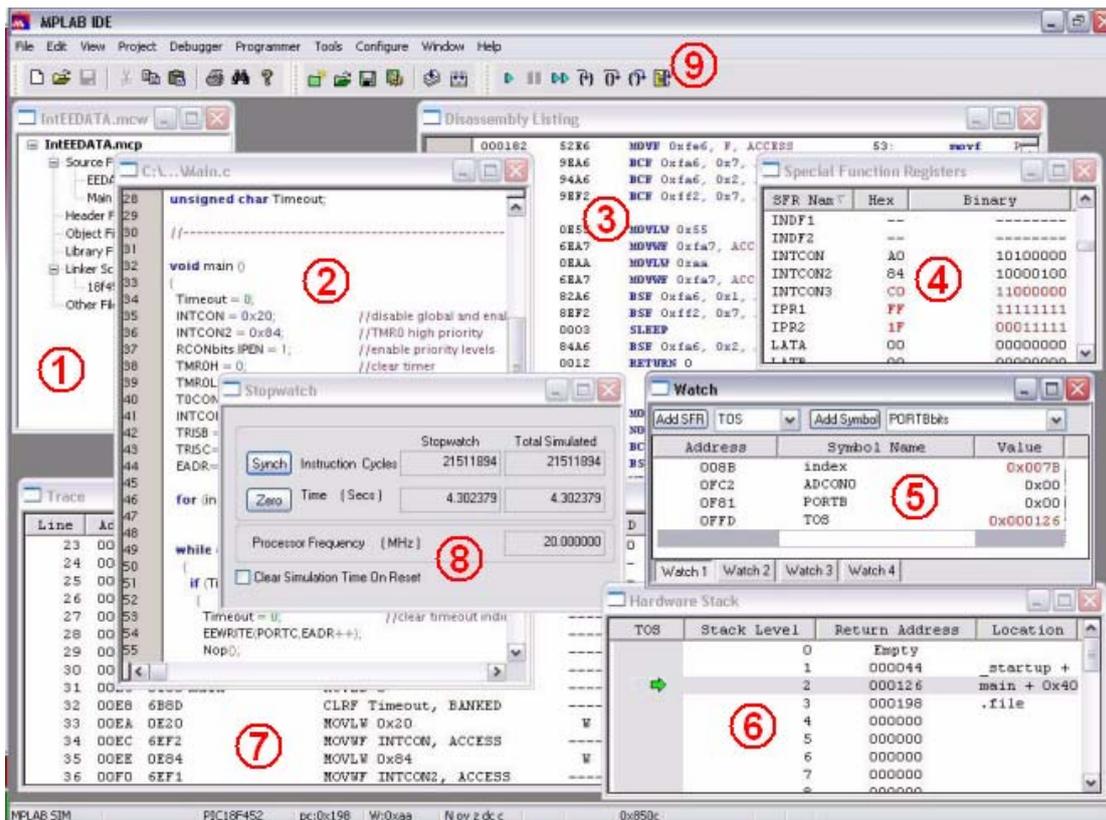


Figura 4.9. Interfaz de MPLAB IDE.

Observando la figura 4.9, se han numerado las principales ventanas del interfaz. A continuación se realiza una breve descripción de la función de cada una de ellas:

- 1- Componentes del proyecto. Aquí se visualiza el árbol de archivos del proyecto.
- 2- Interfaz de programación. En esta ventana se escribe el código del programa. En el ejemplo, se utiliza el lenguaje C de programación.
- 3- Código de ensamblador. Se muestra el código escrito en lenguaje ensamblador.
- 4- Registros de funciones especiales. Durante la simulación, se puede observar el estado de dichos registros a través de esta ventana.
- 5- En esta ventana se pueden mostrar los registros y puertos que el usuario necesite para el estudio de la ejecución del programa durante la simulación.
- 6- Mediante el *Hardware Stack* es posible visualizar el estado de la pila del microcontrolador. En ella se almacenan, por ejemplo, las direcciones de memoria de programa cuando se realizan saltos o llamadas a subrutinas.
- 7- En esta ventana se describe con detalle las operaciones llevadas a cabo durante la simulación.
- 8- El Stopwatch es una herramienta que permite observar el tiempo real de ejecución del programa durante la simulación, así como los ciclos de instrucción acumulados.
- 9- Esta barra de herramientas se utiliza para controlar la simulación del programa. Se puede ejecutar directamente o paso a paso, pausar, o incluso situar una marca donde el usuario quiera que se pause la ejecución de la simulación una vez puesta en marcha.

4.4. Protocolo RS232

4.4.1. ¿Qué es un protocolo de comunicación?

Un protocolo de comunicación es un estándar que define un conjunto de reglas para la conexión, comunicación y transferencia de datos entre dos o más puntos de una red de comunicación. Dichas reglas están diseñadas para garantizar un intercambio de datos fiable a través de un canal de comunicación imperfecto.

En la transferencia de datos pueden intervenir dos tipos de dispositivos terminales, el DTE y el DCE.

El DTE, del inglés *Data Terminal Equipment*, es un dispositivo electrónico o electromecánico que se encarga de convertir los datos del usuario para ser enviados a través del canal de comunicación, o bien se encarga de recibirlos y reconvertirlos. Un claro ejemplo de DTE puede ser el PC a través de uno de sus puertos de comunicaciones (como por ejemplo, el RS232).

El DCE, del inglés *Data Communication Equipment*, se sitúa entre el DTE y el circuito de transmisión y suele actuar como interfaz de comunicaciones entre dos DTE. Un ejemplo de DCE puede ser un módem.

4.4.2. Importancia de un protocolo en la transferencia de datos

Dada la creciente fabricación de instrumentos con entrada / salida de datos, y a la multitud de empresas que los fabrican, ha sido necesario elaborar un conjunto de normas en las comunicaciones para permitir la compatibilidad entre ellos. De ahí surgieron los diversos protocolos de comunicación.

Un protocolo de comunicación es indispensable para garantizar una correcta transferencia de datos entre diversos dispositivos conectados a un mismo canal de comunicaciones, ya que mediante éste se establecen reglas vitales como el modo de transferencia de datos, la sincronización entre terminales, el formato de los mensajes, o incluso la longitud máxima del cableado o el formato y patillaje de los conectores.

También establece normas de cara a la gestión de las comunicaciones por parte del DTE y DCE, como por ejemplo establecer prioridades de comunicación entre varios terminales o gestionar los errores de comunicación debido a perturbaciones.

4.4.3. Comunicación serie. Definición y características básicas.

La comunicación serie es el proceso de envío o recepción de datos bit a bit a través de una única línea.

Algunas de las ventajas de este tipo de comunicación son la integridad de la señal a lo largo del bus y la simplicidad del cableado y conexión, ya que únicamente se utilizan dos líneas de comunicación, una de recepción y otra de envío de datos. Además, las nuevas tecnologías utilizadas en la transmisión de datos serie logran velocidades que incluso, en algunos casos, llegan a superar a la comunicación paralelo, la cual se verá más adelante en el apartado 4.5.

Como desventaja frente a la comunicación paralelo, se encuentra la relativa complejidad a la hora de la gestión de la transferencia de datos debido a la necesidad de sincronización del envío y recepción de bits por los canales de comunicación.

En la comunicación entre dispositivos, ya sea serie o paralelo, existen dos métodos de sincronización de los datos transmitidos por el puerto: la transmisión síncrona y la transmisión asíncrona.

La transmisión asíncrona es la más utilizada en la comunicación serie. La sincronización se configura antes del envío de las tramas de datos mediante el *Baud Rate*, el cual indica el tiempo en el que se

presenta cada bit de la trama en el puerto para que el receptor pueda leerlo. Este tiempo deberá ser siempre el mismo durante la transmisión de la trama y deberá encontrarse dentro de un margen de tolerancia determinado para que no se produzcan errores de lectura.

La transmisión síncrona necesita de una línea de sincronización para determinar la disponibilidad de los datos en la línea de datos. En esta línea de sincronización se debe introducir un tren de pulsos que hará la función de reloj para la lectura de los bits de la línea de datos en cada flanco.

La transmisión síncrona en el puerto RS232 sólo se puede conseguir utilizando el conector DB25, ya que el DB9 (más común) no incorpora la línea de reloj.

4.4.4. Especificaciones y funcionamiento del puerto serie RS232.

El estándar RS232 define los aspectos tanto mecánicos como eléctricos y funcionales [38].

Especificaciones mecánicas:

En cuanto al aspecto mecánico, el puerto RS232 se puede conseguir mediante dos tipos de conectores: el DB-9 y el DB-25, con 9 y 25 líneas respectivamente.

El conector DB-9 es el más utilizado ya que la mayoría de terminales y otros dispositivos de comunicación utilizan la comunicación asíncrona y no necesitan el resto de líneas que provee el DB25.

Según la norma, el conector macho está reservado al puerto del DTE mientras que el conector hembra lo está para el puerto del DCE. No obstante no todos los fabricantes siguen este punto de la norma, por lo que en algunas ocasiones podemos encontrar dispositivos DCE con un conector macho o viceversa.

En la figura 4.10 se muestra la fotografía de un conector hembra DB-9 y un DB-25.



Figura 4.10. Conectores utilizados en los puertos RS232. A la izquierda, conector DB-9 hembra. A la derecha, conector DB-25 hembra.

Especificaciones eléctricas:

En la figura 4.11 se muestra el patillaje del conector DB-9 para el puerto RS232.



Figura 4.11. Patillaje de un conector RS232 de 9 pines.

Los pines esenciales para establecer comunicación entre dos dispositivos con puerto RS232 son el “TxD”, “RxD” y “GND”.

La norma establece que la transmisión se realiza en modo común, es decir, todas las señales están referidas a una masa común localizada en el pin “GND”, y la señal está basada en lógica negativa para la transmisión / recepción y en lógica positiva para las líneas de control.

Los valores de señal son de -3 a -12V (1 lógico) y de +3 a +12V (0 lógico). Estos valores tienen las siguientes ventajas:

- Se logra distinguir entre el 0 lógico (+15V) y la ausencia de señal en la línea (0V).
- Al ser valores tan altos, se incrementa el rango de voltaje en el que se distingue entre un nivel y otro y se incrementa la fiabilidad. Con ello, las pérdidas en el cableado no cobran tanta importancia como en otro tipo de protocolos.
- La lógica negativa presenta ventajas en el diseño de circuitos electrónicos. La principal ventaja es que un circuito basado en puertas lógicas negativas (NAND, NOR...) tiene un menor número de transistores que el basado en puertas lógicas positivas (AND, OR...).

Especificaciones funcionales:

Por último, en cuanto al aspecto funcional, se realiza una breve descripción del funcionamiento de la comunicación serie asíncrona:

Cuando uno de los dispositivos quiere comunicarse con otro, pone a nivel bajo la línea de transmisión de datos durante un determinado tiempo (bit de inicio). Una vez transcurrido el bit de inicio, se transmite la trama bit a bit con una cadencia programada según el *baud rate* configurado. Por ejemplo, si el baud rate es de 9600 baud significa que cada bit se mantendrá en la línea de transmisión cada 1/9600 segundos (unos 0,1ms).

La trama de datos transmitida puede ser de 7 u 8 bits dependiendo de la configuración del DTE y la UART⁷.

El dispositivo que recibe los datos del puerto serie debe estar configurado de idéntica forma que el emisor, ya que si, por ejemplo, se configura a una velocidad diferente, ocurrirán errores de lectura al saltarse algún bit de la trama o al leer el mismo dos veces consecutivas.

Una vez transmitidos los 7 u 8 bits de datos, se finaliza la trama mediante un último bit de parada. Este último bit puede tener una duración igual que el resto de bits o bien de 1,5 o incluso de 2 bits.

En ocasiones, antes del bit de parada, puede configurarse para que se transmita el bit de paridad. Dicho bit da información de la paridad impar del byte transmitido. Si el byte tiene un número impar de bits a nivel alto, el bit de paridad estará a nivel alto y viceversa. De esta forma se lleva a cabo una simple gestión de errores, ya que si el bit de paridad enviado no coincide con el calculado por el receptor, significa que la trama no se ha recibido correctamente.

A continuación se muestra un ejemplo correspondiente a una trama transmitida por un puerto RS232 en la cual se transfiere el carácter 1010011 en binario.

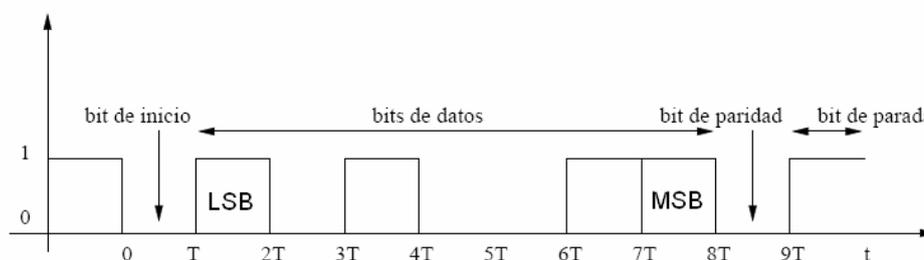


Figura 4.12. Ejemplo de una trama transmitida por el puerto RS232.

El puerto serie RS232 se suele utilizar como interfaz de comunicación entre un PC y un periférico o dispositivo de red (DTE <-> DCE) o incluso con otro PC (DTE <-> DTE).

Cuando la comunicación se realiza entre DTE y DCE la conexión que se realiza es simple, es decir, el pin 1 del conector macho (DTE) se conectará directamente con el pin 1 del conector hembra (DCE) y así sucesivamente. En cambio, cuando la comunicación es de DTE a DTE se realiza la conexión cruzada, en la cual las líneas "TxD" y "RxD" se entrecruzan.

Según el sentido de la transmisión de datos entre los dispositivos se obtienen tres tipos de gestión de las líneas de comunicación:

Simplex: La comunicación se realiza en un único sentido.

Half Duplex: La comunicación se puede realizar en ambos sentidos pero nunca de manera simultánea.

Full Duplex: La comunicación se puede realizar en ambos sentidos y de manera simultánea.

4.4.5. Configuración del puerto RS232

Antes de establecerse la comunicación vía RS232 es necesario configurar los puertos de los respectivos dispositivos:

- Baud rate: Parámetro que influye directamente en la velocidad de transmisión. Más concretamente, indica el tiempo que transcurre en la transmisión de bits consecutivos (bits de datos por segundo).
- Bits de datos: Indica el número de bits que compone el carácter enviado a través del puerto, es decir, el número de bits de datos. Puede ser de 7 o de 8 bits.
- Paridad: Da información sobre la paridad del carácter enviado o recibido. Sirve para realizar una simple gestión de errores. Cuando el bit de paridad enviado no coincide con el bit de paridad calculado por el receptor al recibir la trama, significa que la trama no se ha transmitido correctamente. La paridad puede ser par o impar, o bien puede estar siempre a nivel alto (paridad marca) o a nivel bajo (paridad espacio). Al ser un bit opcional, el puerto también se puede configurar sin bit de paridad.
- Bit de parada: Indica el final de la trama. El bit de parada es de nivel alto y se puede configurar con una duración de 1, 1.5 o de 2 bits.

4.5. Protocolo GPIB

4.5.1. Breve historia del bus GPIB.

El actual bus GPIB proviene de un estándar de comunicación de instrumentos de test y medida que la empresa *Hewlet Packard* (HP, ahora *Agilent Technologies*) desarrolló y publicó a finales de la década de los 60, al cual se le bautizó con el nombre HP-IB, del inglés *Hewlet Packard Instrument Bus*.

Poco más tarde, otras empresas adaptaron dicho bus HP-IB a sus instrumentos, llamándolo GPIB, del inglés *General Purpose Interface Bus* o Bus Interfaz de Propósito General.

Finalmente, a mediados de los años 70, el IEEE o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* lo estandarizó. A dicho estándar se le llama IEE-488.1 y definía los aspectos mecánicos, eléctricos y funcionamiento básico del protocolo. Más tarde, en el año 1987 se revisó el estándar IEE-488.2 en el cual se definía la sintaxis y otros formatos de los comandos utilizados por el protocolo.

4.5.2. Comunicación paralelo.

La comunicación en paralelo se distingue de la serie principalmente por la manera de transmitir los datos. En el caso de la comunicación en paralelo, un conjunto de bits se puede transmitir al mismo tiempo formando uno o más bytes.

Existen diversos protocolos de comunicación que utilizan este tipo de transmisión de datos, como el puerto paralelo de un PC, algunos buses internos del PC como el IDE o el SCSI, o el bus GPIB destinado a la comunicación entre los instrumentos de test y medida.

En este apartado se centrará la atención en el bus GPIB, cuyo estándar es el denominado IEEE-488.

4.5.3. Conceptos básicos del bus GPIB.

La función del bus GPIB es gestionar el flujo de información entre los instrumentos conectados a él. Para ello, primeramente cada instrumento deberá tener asignada una dirección del bus. Esta asignación se suele realizar a través del panel frontal del instrumento o por medio de interruptores o jumpers. De esta manera, el bus tiene localizado cada instrumento en todo momento.

En un bus GPIB debe haber una tarjeta controladora encargada de gobernar la transferencia de información en el bus a través de las líneas de control llamadas *Handshake*. Dicho control consiste en enviar comandos a los instrumentos para que éstos hablen o atiendan a pedidos de servicio de otros dispositivos.

Es posible encontrar más de un controlador en un único bus GPIB, pero sólo uno de ellos tendrá el control al mismo tiempo. No obstante, es posible pasar el control de uno a otro si en algún momento el controlador principal no puede atender los requisitos de control.

Al controlador activo se le llama CIC, de la siglas en inglés *Controller-In-Charge*, y es responsable del manejo total del bus.

El controlador también se encarga de impedir que más de un instrumento envíe información al mismo tiempo y configura cada uno para que atienda o no al mensaje volcado en el bus. Esto último lo realiza enviando a todos los instrumentos al mismo tiempo una orden que especifica cuál será el nuevo receptor y el emisor. Los instrumentos que no coincidan con la dirección señalada por el controlador no harán caso de la orden, mientras que los que coincidan con la dirección, se “despertarán” y realizarán lo que se les ha indicado (emitir / recibir el mensaje volcado en el bus de datos).

Cuando el proceso de transferencia de datos ha finalizado, el controlador espera y se asegura de que el mensaje ha sido recibido para continuar. De este modo, la velocidad del bus GPIB siempre se verá limitada por el dispositivo más lento.

Los dispositivos no controladores conectados a un bus GPIB pueden actuar de dos formas según si envían o reciben mensajes: *Talkers* y/o *listeners*. Los dispositivos que actúan de *talkers* son los que transmiten información al bus cuando el controlador se lo ordena, mientras que los *listeners* son los que la reciben.

Un dispositivo puede estar diseñado para actuar como talker, como listener o como ambos, pero nunca al mismo tiempo.

4.5.4. Líneas del bus GPIB.

El bus GPIB se compone de tres tipos de líneas de transferencia de señal.

Las líneas de datos (*Data lines*) son las encargadas de transferir los datos y órdenes entre los instrumentos.

Las líneas de *Handshake* se encargan de controlar la transferencia de los datos y de garantizar que las transmisiones se realizan con éxito.

Por último, las líneas de control general de la interfaz (*Interface Management Lines*) dirigen el flujo de la información y otros aspectos de la interfaz.

A continuación se ilustrará con más detalle la función de cada grupo de líneas del bus:

Data lines.

Se componen de un total de 8 líneas que van de DIO1 a DIO8. Éstas pueden transportar datos o comandos. La línea ATN de las líneas de *Handshake* se ocupa de distinguir entre dato o comando.

Generalmente, todos los comandos y casi todos los datos suelen tener un formato de 7 bits, por lo que el octavo bit se suele utilizar como bit de paridad como ayuda a la gestión de errores de transmisión, o simplemente no se utiliza.

Handshake lines.

Las líneas de Handshake son las encargadas de controlar el envío de mensajes entre los dispositivos. Además, se aseguran de que los bytes de los datos o comandos transferidos por las líneas de datos se transfieren y reciben correctamente.

Las líneas de handshake son las siguientes:

DAV (Data Valid): Indica cuándo las señales en las líneas de datos son estables y, por tanto, están listas para ser aceptadas con seguridad por otros dispositivos. Los controladores y los *talkers* son los que se encargan de dirigir esta línea.

NRFD (Not Ready For Data): Indica cuándo el dispositivo está listo para recibir un byte. Los propios *listeners* son los encargados de dirigir esta línea, ya que son ellos los que deben informar de si están preparados o no para recibir datos o comandos.

NDAC (No Data Accepted): Indica cuándo el dispositivo ha aceptado o no el byte transferido. Esta línea es dirigida por todos los dispositivos cuando reciben información.

Interfaze Management Lines.

Mediante estas líneas se hace un control más general del interfaz.

ATN (Attention): Mediante esta línea, el controlador indica qué tipo de mensaje se va a transmitir por el bus de datos, un dato o un comando. Se pone a nivel alto cuando se transmiten comandos y a nivel bajo cuando lo que se va a transmitir es un dato.

EOI (End Or Identify): El talker pone a nivel alto esta línea cuando se llega al fin del mensaje transferido por éste. Esto lo hace al momento de transmitir el último byte del mensaje.

IFC (Interfaze Clear): Se realiza un reset de los parámetros y direcciones del bus.

REN (Remote Enable): Se pone en marcha el modo remoto de un dispositivo, deshabilitando al mismo tiempo su panel de control.

SRQ (Service Request): Mediante esta línea los dispositivos solicitan turno al controlador.

4.5.5. Especificaciones técnicas.

El protocolo GPIB utiliza un total de 16 líneas de señal distribuidas en un conector *Amphenol*⁸ de 24 vías como en el de la figura 4.13. Las 8 vías restantes se utilizan como líneas de masa y tierra.



Figura 4.13. Cable y conector Amphenol de 24 vías para GPIB.

Los contactos están distribuidos según se ilustra en la figura 4.14.



Figura 4.14. Pinout del conector GPIB.

El protocolo GPIB permite cualquier configuración en la conexión entre los instrumentos, tanto de manera lineal como en estrella o combinación de ambas, con un límite de 15 dispositivos como máximo contando el controlador.

Cada instrumento está codificado en el bus por una dirección que puede ir de la 0 a la 31, siendo normalmente la dirección 0 la correspondiente al controlador.

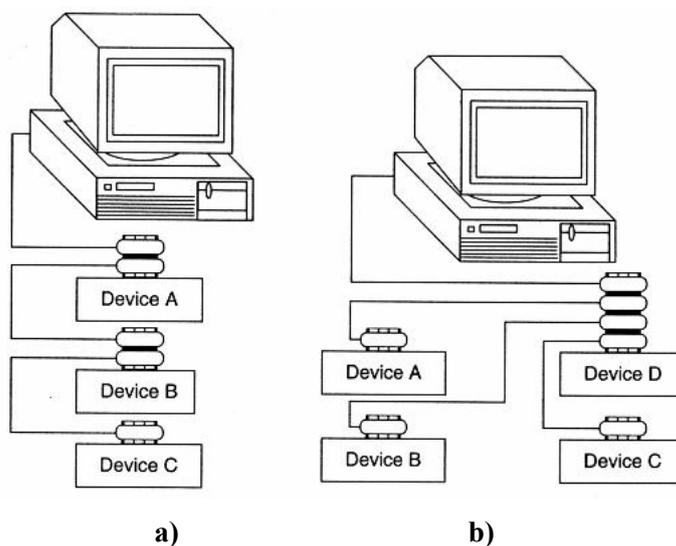


Figura 4.15. Configuraciones en la conexión de dispositivos al bus GPIB. a) conexión lineal o en cascada, b) conexión en estrella.

La velocidad de transferencia a la que puede llegar el bus GPIB es de hasta 1MB/s. No obstante, dicha velocidad vendrá normalmente limitada por la longitud del cableado - la cual no puede superar los 20 metros - y por la velocidad del dispositivo más lento que haya conectado al bus.

La transferencia de los mensajes / comandos se realiza en bytes en serie organizados en bits en paralelo. Es decir, se envían los 8 bits de datos en paralelo a través de las líneas DIO1...DIO8 para formar uno de los bytes que se debe transmitir en serie para componer un mensaje.

4.6. VISA

4.6.1. ¿Qué es y para qué sirve?

El protocolo VISA, del inglés *Virtual Instrument Software Architecture*, es un interfaz estándar de programación diseñado especialmente para la comunicación con instrumentos de medida desde un PC [38].

4.6.2. Comunicación RS232 y GPIB con LabVIEW.

Mediante la librería VISA se puede llevar a cabo la comunicación a través del puerto serie RS232 del PC. Si en dicho PC se halla instalada una tarjeta controladora de GPIB, mediante esta librería también es posible la comunicación utilizando este protocolo.

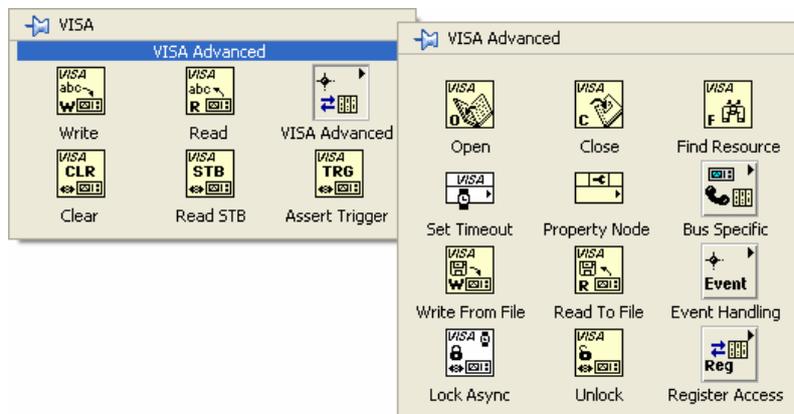


Figura 4.16. Algunas de las funciones VISA en LabVIEW para el control de la instrumentación.

Los terminales y las funciones más importantes se detallan a continuación:

VISA Resource Name.

Terminal utilizado para determinar el dispositivo al cual se quiere dirigir para establecer comunicación. En dicho terminal se determina tanto el bus de comunicación como la dirección donde se encuentra el dispositivo.

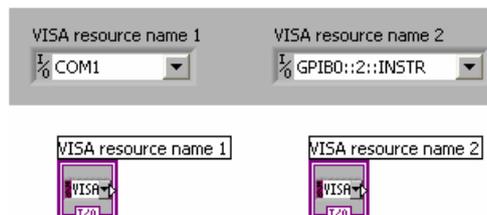


Figura 4.17. Controles y terminales VISA Resource Name.

VISA Write.

Se utiliza para enviar un byte a uno de los dispositivos definidos por la dirección indicada en “VISA Resource Name”.

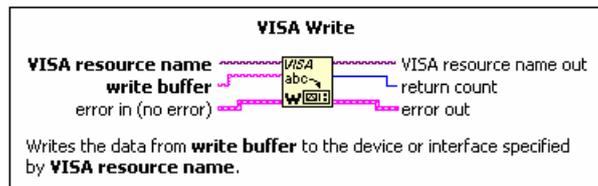


Figura 4.18. Función VISA Write.

VISA Read.

Indica al dispositivo indicado en “VISA resource name” que debe recibir un byte.

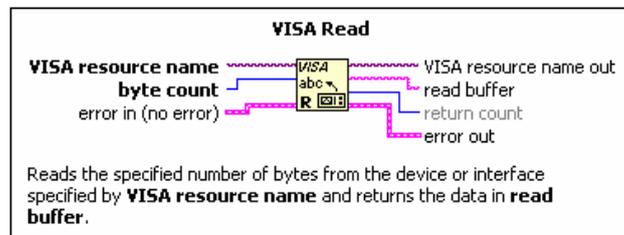


Figura 4.19. Función VISA Read.

VISA Configure Serial Port.

Mediante esta función se configuran todos los parámetros posibles del puerto serie indicado por el terminal VISA resource name, como el baud rate, el nº de bits de datos, nº de bits de parada o la paridad.

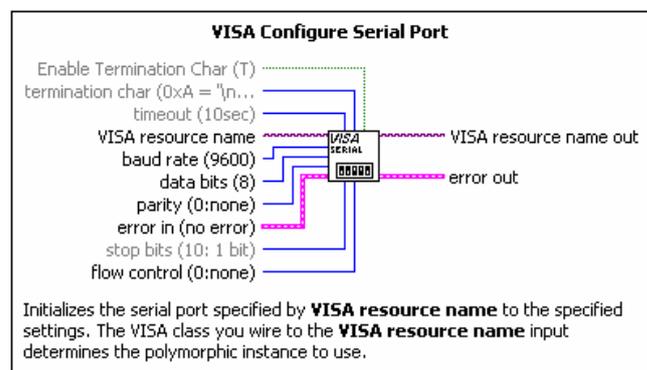


Figura 4.20. Función VISA para configurar el puerto serie.

CAPÍTULO 5. Hardware e instrumentos utilizados en la aplicación

5. Hardware e instrumentos utilizados en la aplicación

En este capítulo se presentan todos los instrumentos que intervienen en el proceso de calibración de acelerómetros en este proyecto. También se muestran otros equipos utilizados para el diseño y desarrollo del proyecto como una placa programadora de microcontroladores y un módulo de conmutación controlado (ambos equipos de fabricación propia).

En la siguiente figura se muestra el banco de trabajo con todos los equipos necesarios para llevar a cabo las calibraciones de acelerómetros.



Figura 5.1. Banco de calibración de acelerómetros.

5.1. Instrumentos de medida

A continuación se presentan todos los instrumentos de medida que formarán el sistema de calibración de acelerómetros.

5.1.1. Acelerómetro patrón y acondicionador de señal

El acelerómetro patrón es el encargado de medir las aceleraciones de referencia que se producen durante la calibración. A él irá anclado el acelerómetro en calibración, por lo que bastará con comparar las lecturas ofrecidas por ambos acelerómetros para determinar la sensibilidad del UUT, tomando como referencia las aceleraciones captadas por el acelerómetro patrón.

El patrón escogido es un acelerómetro piezoeléctrico de la marca *Brüel & Kjær* modelo 8305 junto con su acondicionador de señal de carga asociado *Brüel & Kjær* modelo 2626, formando ambos el set de calibración patrón modelo 4305.



Figura 5.2. Fotografía del set de calibración patrón, formado por el acelerómetro patrón B&K 8305 (izquierda) y su acondicionador de señal (derecha).

El acelerómetro es específico para este tipo de aplicación. Según el fabricante es un acelerómetro de referencia para medidas *Back to Back* (por comparación) en la calibración secundaria de acelerómetros por vibración y choque. El transductor incorpora su propio cable de señal de 1,2m y unos 120pF.

El transductor es piezoeléctrico debido a sus grandes ventajas en cuanto a precisión, repetibilidad, buena respuesta en frecuencia, deriva en el tiempo prácticamente nula, pequeña sensibilidad a la temperatura, entre otras. Además, está específicamente diseñado para medidas *back to back*, por lo que algunos parámetros como la sensibilidad a la deformación de la base o a aceleraciones transversales son mínimos.

El acondicionador de señal es un amplificador de carga de la marca B&K modelo 2626. Mediante este acondicionador se configura la sensibilidad del acelerómetro en pC/unidad y se elige la sensibilidad de salida mediante un selector. En nuestro caso, la sensibilidad de entrada se configura a 1,26pC/unidad (sensibilidad del acelerómetro) y la de salida a 10mV/unidad. De esta forma se obtiene una salida próxima a los 10mV/g (en nuestro caso, 9,827mV/g exactamente).

5.1.2. Excitador de vibraciones electrodinámico

El excitador de vibraciones (a partir de ahora, *shaker*) es el equipo encargado de transmitir las vibraciones al conjunto acelerómetro de referencia y UUT. Éste vibra a una frecuencia y amplitud determinadas por el generador de funciones y el amplificador de potencia al que va conectado. El generador de funciones genera la consigna de frecuencia y amplitud y el amplificador se encarga de amplificar la corriente necesaria para poner en funcionamiento al shaker.

El *shaker* utilizado en este proyecto es de la marca *Brüel & Kjær* modelo 4809, correspondiente al de la imagen de la figura 5.3.



Figura 5.3. Fotografía del vibrador electrodinámico B&K 4809.

Este vibrador está preparado para trabajar en un rango de frecuencias que va de los 10Hz a los 20kHz y en un rango de amplitud de 1 a 50g de pico.

El rango de amplitud depende en gran medida del peso de los elementos que coloquemos en el shaker (conjunto acelerómetro patrón – utillaje de sujeción – UUT) y de la frecuencia a la que se trabaje. Para conocer la relación entre la amplitud máxima de aceleración, la masa y la frecuencia de trabajo, el fabricante elabora una gráfica que se ilustra en la figura 5.4.

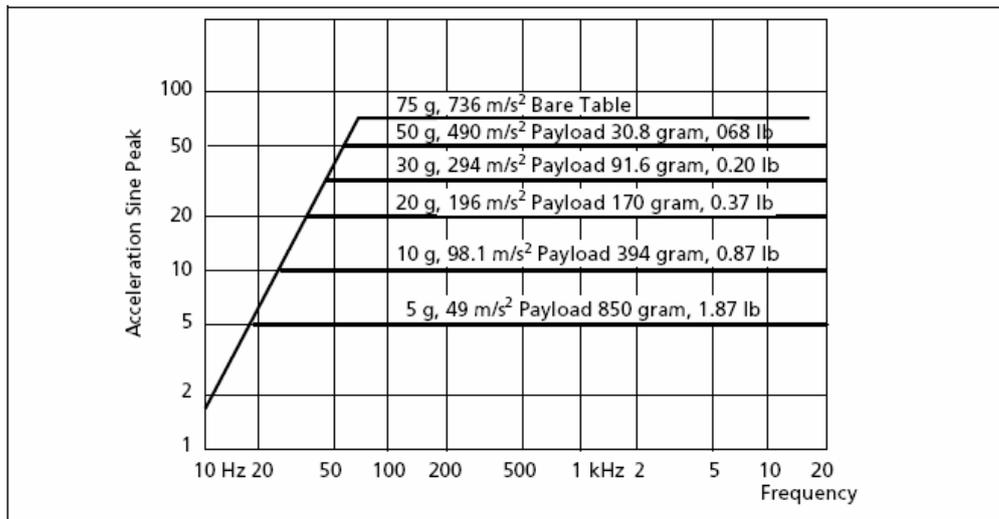


Figura 5.4. Gráficas de rendimiento del excitador de vibraciones.

Teniendo en cuenta que la masa del acelerómetro patrón es de 40 gramos, la aceleración máxima a la que se podrá llegar mediante este shaker será de entre 25 y 45g dependiendo de la frecuencia y de la masa del UUT y la base de anclaje en caso de utilizar una.

El shaker puede influir de manera sustancial en el valor final de la incertidumbre de calibración debido a la flexión de su eje de actuación y a su sensibilidad transversal. Según la norma ISO 16063-21, la sensibilidad transversal máxima del shaker utilizado en la calibración secundaria de acelerómetros no debe sobrepasar el 10% para frecuencias inferiores a 1kHz y el 30% para frecuencias superiores.

El modelo de shaker utilizado ofrece una baja distorsión de la señal y una sensibilidad transversal inferior al 10% en un rango de 20 a 2000Hz según especificaciones del fabricante, cumpliendo sobradamente las especificaciones mínimas ya mencionadas de la norma.

Como medida de seguridad, el shaker incorpora unos topes mecánicos que evitan excesivos desplazamientos del elemento móvil cuando se aplica una ganancia demasiado elevada.

Como última medida de protección también incorpora unos fusibles mecánicos que protegen la integridad del mecanismo móvil ante cargas excesivas.

Este instrumento ya formaba parte del sistema antiguo. Se escogió éste en concreto debido a que cubre los rangos de amplitud y frecuencia para la calibración de todos los acelerómetros de la empresa, teniendo en cuenta las limitaciones de amplitud de cualquier shaker del mercado. Además ofrece buenas características de distorsión armónica y sensibilidad transversal y todo a un precio bastante ajustado. A esto hay que sumarle que se disponía ya del amplificador al que va asociado este tipo de vibrador, cedido por otro departamento de la empresa.

5.1.3. Amplificador de potencia

La señal generada por el generador de funciones es de una potencia demasiado baja como para hacer trabajar al shaker, ya que éste necesita una corriente de hasta uno 5A para funcionar a pleno rendimiento. Por tanto, se hace necesario el uso de un amplificador de potencia como el B&K modelo 2706.



Figura 5.5. Fotografía del amplificador de potencia para la excitación eléctrica del vibrador electrodinámico.

El amplificador de potencia 2706 de 75VA es capaz de proporcionar un máximo de 5A RMS, ideal para acompañar al shaker B&K 4709 ya que es justamente la corriente máxima que éste necesita. Una vez superada la demanda de los 5A RMS de corriente limitada, se produce un efecto de *Clipping* para no superar ese límite y así no dañar el sistema.

El amplificador dispone de un regulador de ganancia con el que es posible detener el vibrador o hacerlo vibrar a amplitudes determinadas en un margen de ganancia de hasta 40dB, ante una señal de entrada senoidal.

En la figura 5.6 se muestra el diagrama de bloques del funcionamiento interno del amplificador. Se observa que a la entrada, de alta impedancia, se sitúa un preamplificador regulado por el control manual de ganancia. La señal preamplificada se conduce a través de un *driver*⁹ que incorpora un detector de corte de la señal cuando se supera la corriente máxima configurada en el selector. Finalmente, la señal es amplificada a la salida siempre y cuando no se supere una determinada temperatura en los transistores de potencia internos del amplificador, en cuyo caso, el amplificador deja de funcionar para proteger su integridad.

⁹ Driver, en electrónica, es aquel dispositivo que se encarga de adaptar la señal de control para alimentar la etapa de potencia.

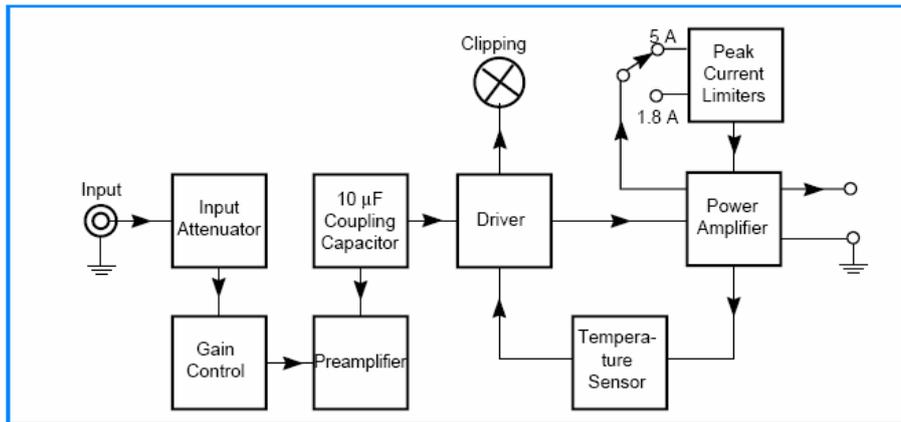


Figura 5.6. Diagrama de bloques del funcionamiento del amplificador de potencia B&K 2706.

5.1.4. Generador de funciones

El generador de funciones es el encargado de generar la señal senoidal de control necesaria para realizar la calibración. Dicha señal se envía directamente al amplificador de potencia y de éste al shaker el cual se encargará de transformar dicha señal de control en movimiento.

El aspecto más importante a considerar en la elección del generador es la calidad de la señal. Aspectos que determinan la calidad de la señal son el THD¹⁰ y la estabilidad en amplitud y frecuencia.

Para la calibración de acelerómetros se utilizará el generador de frecuencia marca Agilent (HP) modelo 33120A. Entre sus características más destacadas se encuentra el bajo THD (del orden de $\pm 0.04\%$) y una gran estabilidad de la señal en amplitud y frecuencia.

Incorpora un módulo de comunicaciones GPIB (entonces llamado HP-IB) que permite llevar a cabo todas las funciones del instrumento remotamente desde un PC.

Se ha escogido éste porque es uno de los que se disponía en el laboratorio de calibración y sus especificaciones sobrepasan los requerimientos mínimos especificados por la norma para llevar a cabo calibración de acelerómetros.



Figura 5.7. Fotografía del generador de funciones Agilent 33120A.

5.1.5. Multímetro digital

El multímetro digital de precisión se encargará de medir la tensión alterna RMS de la salida del set patrón y el set en calibración.

¹⁰ THD, del inglés *Total Harmonic Distortion*, o distorsión armónica total, define la cantidad total de armónicos introducidos en la señal original. Estos armónicos a frecuencias múltiplo de la fundamental, distorsionan la señal original.

El modelo escogido es un Agilent 34401A. En la siguiente figura se muestra la fotografía de su panel frontal.



Figura 5.8. Fotografía del multímetro digital Agilent 34401A.

El multímetro tiene una resolución de $6 \frac{1}{2}$ dígitos e incorpora un puerto de comunicación GPIB que permite realizar todas las configuraciones del instrumento y tomar lecturas remotamente desde un PC.

Se ha escogido este multímetro porque es uno de los que ya dispone el laboratorio de calibración en la actualidad y ya se utilizaba para esta aplicación antiguamente. Reúne todas las características esenciales para llevar a cabo su función, como su exactitud de medida o la posibilidad de controlarlo remotamente desde un PC.

5.1.6. Amplificador de extensometría

Para acondicionar la salida de los acelerómetros piezorresistivos es necesario el uso de un acondicionador de extensometría. Este acondicionador se encarga de alimentar el puente y ofrecer a su salida la señal del acelerómetro amplificada y de alta impedancia para que pueda ser procesada por cualquier instrumento de medida.

El acondicionador utilizado es un sistema HBM MGCPlus con su correspondiente tarjeta amplificadora de extensometría modelo ML10B y su módulo de conexión monocanal AP01.



Figura 5.9. Fotografía del sistema amplificador de medición HBM MGCPlus con las tarjetas ML10B y AP01

La tarjeta amplificadora ML10B junto con su módulo de conexión AP01, además de lo mencionado, también permiten conectar transductores piezorresistivos de medio puente o incluso cuarto de puente.

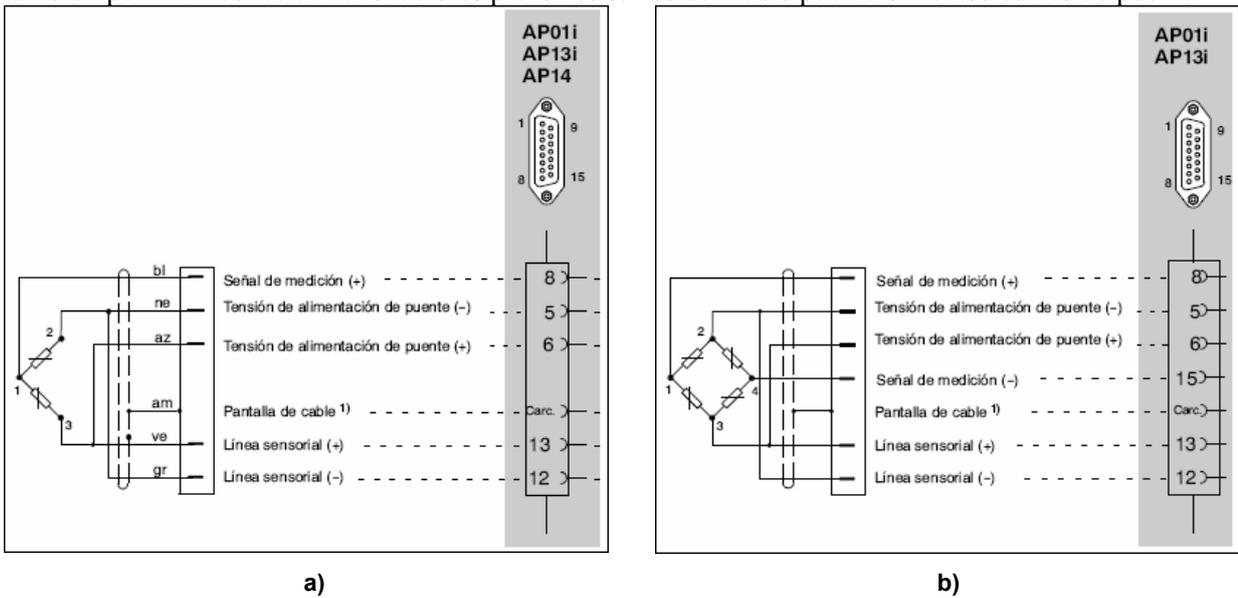


Figura 5.10. Conexiones de la placa AP01 para transductores piezorresistivos, a) para transductores de medio puente, b) para transductores piezorresistivos de puente completo.

Este sistema de amplificación para acelerómetros piezorresistivos se escogió porque se conoce su funcionamiento y sus altas prestaciones debido a que se dispone de algunos en la empresa.

5.1.7. Amplificador de carga

Para acondicionar la señal de salida de los acelerómetros piezoeléctricos se utiliza un amplificador de carga marca B&K modelo 2635.



Figura 5.11. Detalle del panel frontal del amplificador de carga para transductores piezoeléctricos B&K modelo 2635

La principal diferencia respecto al modelo 2626 utilizado para el acelerómetro patrón es la capacidad de ofrecer la salida integrada para obtener la velocidad o incluso el desplazamiento a partir de la señal de salida de un acelerómetro. Esta característica no es en absoluto necesaria para llevar a cabo la calibración, pero se ha escogido este acondicionador porque ha sido cedido por otro departamento de la empresa.

5.1.8. Fuente de corriente para transductores IEPE

Para alimentar y extraer la señal de los acelerómetros IEPE (ICP® en el caso de los PCB, DeltaTron™ de Brüel & Kjaer o Isotron® de Endevco) se utiliza una fuente de corriente para transductores piezoeléctricos con electrónica incorporada. En concreto, se utiliza el acondicionador de señal de la marca *PCB Piezotronics* modelo 482A22.

La función de la fuente de corriente para IEPE es alimentar el transductor con una corriente constante (normalmente 4mA) y obtener una señal de salida correspondiente a la tensión modulada en la línea de alimentación.

Esta fuente incorpora cuatro canales de entrada/salida para cuatro transductores IEPE con alimentación regulable de 0 a 20mA. La salida del acelerómetro se conecta a una de las entradas de la fuente de corriente, mientras que la salida correspondiente se lleva directamente al multímetro.



Figura 5.12. Fotografía del acondicionador de señal para transductores IEPE.

A pesar de que el acondicionador incorpora una función que permite amplificar la señal de salida x10 o incluso x100, durante la calibración de acelerómetros IEPE no se utiliza dicha función de amplificación, por lo que lo único que hay que calibrar de esta fuente es el valor de la corriente de alimentación.

5.1.9. Osciloscopio (opcional)

Para observar la señal de salida de la cadena de medida en calibración se utiliza un osciloscopio *Tektronix* modelo 465B. Entre sus especificaciones más destacadas se encuentran sus dos canales de entrada con un ancho de banda de 100MHz y una impedancia de 1MΩ y unos 20pF.

Se utiliza este osciloscopio porque ya se disponía de él en el laboratorio de calibración.

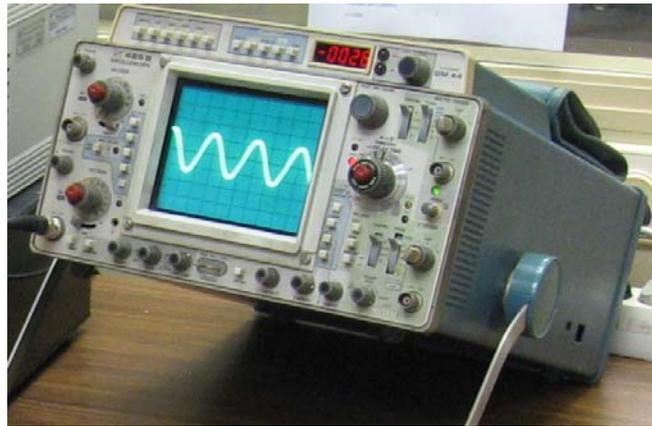


Figura 5.13. Fotografía del osciloscopio utilizado para observar la señal de salida del UUT.

5.2. Hardware de apoyo

Debido a que los multímetros de precisión son muy utilizados en el laboratorio para la calibración de todos los transductores con salida analógica y de otros equipos como fuentes de alimentación, es recomendable optimizar el uso de éstos durante la calibración de acelerómetros. De esta manera, se considera que no es necesario el uso de dos multímetros para medir las señales procedentes de la cadena de medida patrón y de la cadena de medida en calibración.

Para conseguir prescindir de uno de los multímetros, es necesario introducir un instrumento que permita conmutar la señal de medida de un dispositivo a otro mediante una señal de control.

También es necesario el uso de una tarjeta controladora de bus GPIB para el PC cuya función es controlar las comunicaciones de los instrumentos conectados al bus.

5.2.1. Placa controladora GPIB-USB

Para controlar la comunicación de los instrumentos mediante el PC, es necesario que el mismo disponga de una placa controladora de bus GPIB.

Para esta aplicación se ha optado por el uso de una placa controladora de GPIB a través del bus USB. En concreto, es la controladora NI GPIB-USB-HS de National Instruments, compatible con el protocolo IEEE 488.2 y capaz de controlar hasta un máximo de 14 instrumentos vía GPIB.



Figura 5.14. Tarjeta controladora GPIB-USB.

5.2.2. Módulo de conmutación

El módulo de conmutación que se decide fabricar en este proyecto se utiliza para conmutar las señales que provienen de la cadena de medida patrón y de la cadena de medida en calibración hacia el multímetro. De esta forma no es necesario el uso de dos multímetros para efectuar las mediciones.

El diseño y desarrollo del módulo de conmutación se analiza en el apartado 7.1. Las especificaciones más importantes que debe cumplir se exponen a continuación:

- La conmutación será entre dos circuitos independientes (sin masa común).
- Debe poder comunicarse con el PC a través de uno de sus puertos; a poder ser, por el puerto USB.
- Se debe poder conmutar manualmente mediante un conmutador o remotamente desde el PC.
- Debe incorporar dos pilotos (LED's) que indiquen el estado en el que se encuentra el conmutador



Figura 5.15. Módulo de conmutación (fabricación propia).

CAPÍTULO 6. Guía para la calibración secundaria de acelerómetros

6. Guía para la calibración secundaria de acelerómetros

Se pretende llevar a cabo un procedimiento para la calibración secundaria de los acelerómetros utilizados en ensayos de automoción de la empresa en cuestión. Estos ensayos van desde la medición de vibraciones en la estructura del vehículo (confort) hasta la medición de impactos producidos en un vehículo o en un dummy durante una prueba de choque (seguridad pasiva).

La calibración se realizará de acuerdo con la directiva ISO 16063: “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer”.

6.1. Preparación

6.1.1. Condiciones ambientales

La calibración se realizará en una sala con condiciones ambientales estables. La temperatura ambiente deberá ser de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ y la humedad inferior al 70%.

El laboratorio de calibración dispone de climatización. No obstante, ésta es centralizada para todo el edificio y no se dispone del control. Por tanto, en ocasiones es recomendable el uso de un segundo sistema de climatización consistente en un *split* con aire acondicionado y bomba de calor. Mediante ambos sistemas se pueden asegurar unas condiciones ambientales estables y dentro del margen.



Figura 6.1. Split de aire acondicionado para techo Mitsubishi serie PCZ.

Para la lectura de la temperatura y humedad relativa se dispone de un total de tres termohigrómetros localizados en lugares estratégicos en todo el laboratorio. Cada termohigrómetro dispone de un indicador de humedad relativa interno y dos sondas de temperatura: una interna y la otra externa de contacto. El termohigrómetro se sitúa en el banco de trabajo a una distancia cercana al sistema de medida sin que llegue a afectarle de manera directa el calor emitido por los instrumentos de medida. Al mismo tiempo, la sonda de temperatura externa del termohigrómetro se sitúa al lado del *shaker*, lo más próxima posible al conjunto formado por el acelerómetro patrón y el UUT.



Figura 6.2. Termohigrómetro con doble sonda de temperatura.

6.1.2. Configuración y preparación de los instrumentos

Antes de proceder a la calibración, es necesario que toda la instrumentación esté aclimatada a las condiciones ambientales del laboratorio. Se considera suficiente un tiempo de climatización de unas 12h para que todos los equipos que intervienen en la calibración se aclimaten a las condiciones del ambiente.

Cuando los instrumentos se conectan y ponen en marcha sufren un aumento de su temperatura debido a la circulación de corriente. Por tanto, cuando se vaya a realizar la calibración, es necesario dejar conectados previamente todos los instrumentos durante un mínimo de tiempo con el fin de que alcancen su estabilidad térmica y así minimizar la contribución del gradiente de temperatura en la incertidumbre de medida. Se considera suficiente un tiempo de 15 minutos para el UUT y de 30 minutos para el resto de la instrumentación para alcanzar la estabilidad térmica.

El montaje del acelerómetro patrón sobre el *shaker* requiere un par de apriete determinado. Este par de apriete, de unos 2,5N·m, se puede conseguir mediante una herramienta dinamométrica.



Figura 6.3. Ejemplo de una llave dinamométrica de apriete controlado mecánicamente.

6.1.3. Preparación del acelerómetro bajo prueba

Antes del montaje, es necesario cerciorarse de que la superficie del acelerómetro esté limpia y lo más plana y uniforme posible. Si es necesario, retirar restos de pegamentos, resinas o suciedad mediante un paño humedecido con alcohol isopropílico [22].

Se seleccionará el eje del UUT a calibrar y se situará sobre el acelerómetro patrón de manera que el eje del UUT apunte en la misma dirección que el del acelerómetro patrón.

El UUT se deberá fijar sobre la superficie del acelerómetro patrón asegurando un contacto lo más firme y solidario posible. Los elementos que se utilizan en la fijación del UUT sobre la superficie del acelerómetro patrón pueden llegar a ser decisivos en los resultados de calibración a frecuencias elevadas. Se recomienda, siempre que sea posible, utilizar elementos de fijación roscados específicos para dicho fin y aplicar aceite o grasa en la superficie de contacto. De no ser posible el uso de dichos elementos, se puede utilizar una fina película de pegamento instantáneo o cinta de doble cara, siempre que la frecuencia

de trabajo no supere los 2kHz . Según la directiva ISO 16063-21, los utillajes destinados a la fijación del acelerómetro se pueden utilizar para frecuencias no superiores a los 5kHz. Para mayores rangos de frecuencia, el UUT debe ser fijado directamente a la superficie del acelerómetro patrón mediante una varilla roscada aplicando el par recomendado por el fabricante.

En la figura 6.4 se puede observar el montaje mediante cinta de doble cara. Teniendo en cuenta la enorme cantidad de acelerómetros que se calibran en este laboratorio, el método de la cinta de doble cara es el más recurrido debido a la facilidad y rapidez del montaje y extracción, sin llegar a afectar a los resultados de manera apreciable en un rango de hasta 2kHz, tal y como se estudia en el apartado de resultados y prestaciones.

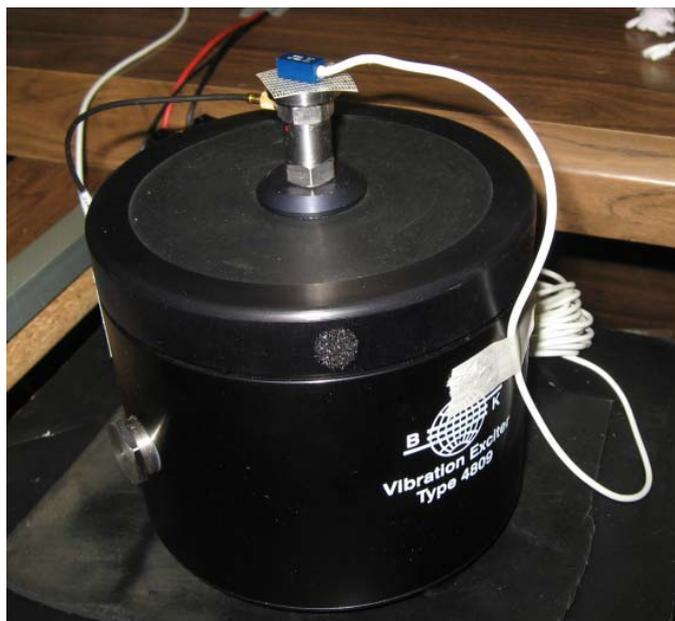


Figura 6.4. Ejemplo de montaje del UUT (azul) sobre el acelerómetro patrón mediante cinta de doble cara.

En caso de acelerómetros piezoeléctricos, es importante el uso del cable que acompaña al propio acelerómetro, ya que la impedancia del cable puede afectar a los resultados de la calibración. Por tanto, el cable deberá estar debidamente identificado para que no haya confusión posible a la hora de utilizarlo con su respectivo acelerómetro.

Es aconsejable el uso de guantes de fibras para minimizar la transferencia de calor en el momento del montaje. Aun así, se tendrá en cuenta el gradiente de calor transmitido al acelerómetro en la estimación de la incertidumbre de medida debido a que dicho gradiente siempre estará presente en menor o mayor medida.

El cable del propio acelerómetro puede influir en el resultado de la calibración si éste no está bien fijado y tira del acelerómetro cuando se está calibrando. Para evitarlo, se debe liberar la tensión mecánica ejercida por el cable fijándolo en el *shaker* de manera que se produzca un ligero arco en el extremo conectado al acelerómetro, tal y como se indica en la figura 6.5 [33].

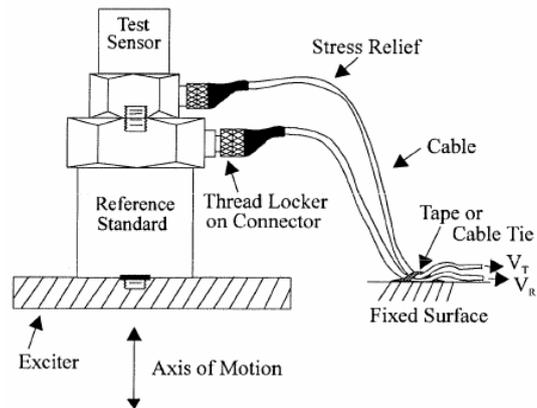


Figura 6.5. Ejemplo de montaje de un acelerómetro piezoeléctrico sobre el acelerómetro patrón.

6.2. Método de calibración

La calibración consiste en someter al acelerómetro patrón y al UUT a una misma vibración de amplitud y frecuencia determinadas y comparar la lectura de aceleración RMS de ambos mediante un multímetro digital. Una vez obtenidos los valores, se determina la sensibilidad del acelerómetro, su linealidad y su respuesta en frecuencia.

6.2.1. Conexión de los equipos

En la figura 6.6 se muestran las conexiones de todos los equipos que intervienen en la calibración. Los cables de señal se representan por líneas negras mientras que los buses de comunicación se han representado por líneas azules.

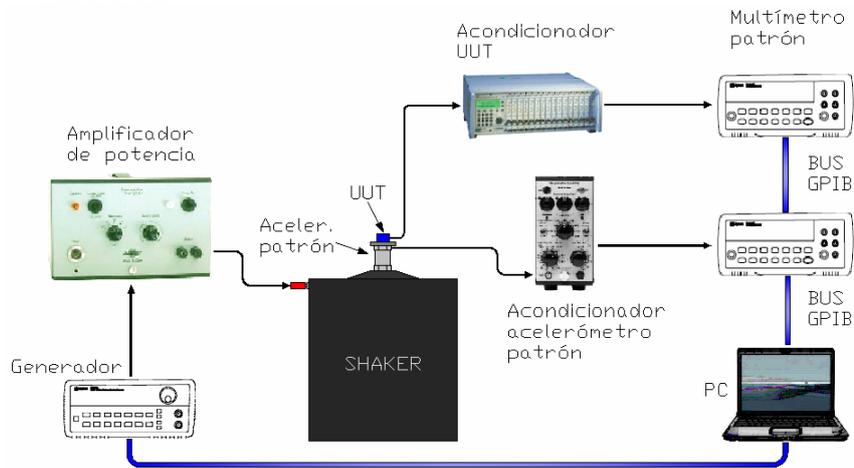


Figura 6.6. Esquema de conexiones del sistema automatizado de calibración con dos multímetros.

Una vez conectados, los multímetros patrón deben configurarse con la dirección GPIB adecuada para que el programa de calibración los reconozca.

En la anterior figura se observa que se han utilizado dos multímetros para leer la señal de salida del acelerómetro patrón y del acelerómetro bajo prueba. No obstante, es posible ahorrarse el uso de uno de los multímetros si se intercala un conmutador controlado que seleccione entre las dos salidas dependiendo de si queremos leer la señal del patrón o la del equipo en calibración. Las conexiones necesarias para llevar a cabo dicho sistema multiplexado pueden verse en la figura 6.7.

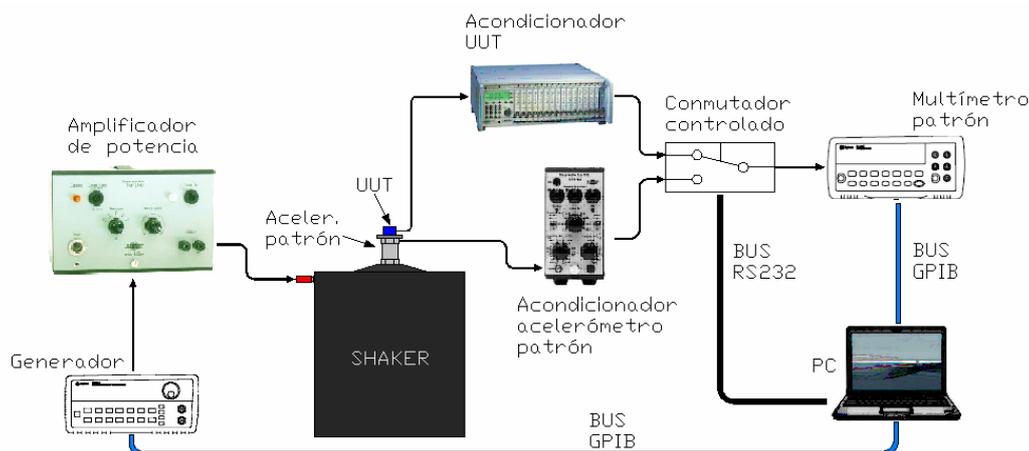


Figura 6.7. Esquema de conexiones del sistema automatizado de calibración con un solo multímetro.

En este caso, la dirección de GPIB que se deberá configurar en el multímetro será la correspondiente a la de la señal de la cadena de medida patrón.

6.2.2. Determinación de la sensibilidad

La sensibilidad se extrae a una amplitud y frecuencia determinada.

La frecuencia y amplitud de referencia se selecciona de acuerdo con los siguientes criterios:

- Instrucciones del fabricante, como por ejemplo, su certificado de calibración original de fábrica.
- Cualquier valor de frecuencia y amplitud será válido dentro del rango de operación de los acelerómetros. No obstante, es aconsejable utilizar la frecuencia y amplitud a la que se ha calibrado el acelerómetro patrón para asegurar una mayor exactitud y minimizar la incertidumbre de calibración.
- Por otro lado, la norma ISO 16063-21 aconseja el uso de vibraciones a una frecuencia de 160Hz o, en su defecto, de 80Hz, y amplitudes de 10, 20, 50 ó 100 m/s².

Teniendo en cuenta todo lo anterior, si el fabricante no indica lo contrario y permanece dentro del rango de operación del UUT, se utilizará una vibración constante de amplitud 10g_{RMS} (unos 100 m/s² aproximadamente) y una frecuencia de 160Hz equivalente a la frecuencia de calibración de sensibilidad del acelerómetro patrón.

Antes de continuar, es necesario conocer la sensibilidad de la cadena de medida en calibración ya que, en el caso de acelerómetros piezoeléctricos y piezorresistivos, se utiliza un acondicionador de señal que se encarga de amplificar la salida del acelerómetro en calibración. Teniendo la sensibilidad del acelerómetro y la ganancia configurada en el acondicionador, se puede extraer la sensibilidad de la cadena de medida mediante la siguiente expresión:

$$S_{out_cal} = G_{UUT} \cdot S_{UUT_config} \quad (6.1)$$

Una vez configurado el generador de funciones y el amplificador del shaker para generar una aceleración de 10g y 160Hz, se realizan un total de diez medidas de la señal de salida de la cadena en calibración y del patrón mediante un multímetro digital configurado en medidas de tensión alterna.

La señal de salida del acelerómetro patrón se mide dos veces en cada repetición, una antes de la medida de la señal del UUT y otra inmediatamente después, todo ello con la menor brevedad posible que permita

la adquisición del multímetro patrón configurado en la máxima precisión. La media de las dos lecturas es la que se utilizará como aceleración patrón. El motivo es la necesidad de conocer la deriva de la aceleración ante medidas consecutivas con el multímetro, ya que no es posible tomar medida del acelerómetro patrón y el UUT al mismo tiempo. Dicha deriva (diferencia entre la aceleración patrón antes y después de la medida) no deberá ser superior al $\pm 0.2\%$ según la norma ISO 16063-21.

Al mismo tiempo, la señal de salida de la cadena en calibración es conducida a un osciloscopio, mediante el cual se realizará inspección visual de la forma de onda en busca de ruido y distorsión de la señal del acelerómetro. En caso de utilizar un analizador de señal, se deberá medir el nivel de distorsión de las señales ofrecidas por el patrón y la cadena de medida en calibración.

Al final de la calibración se obtienen los siguientes datos:

G_{UUT} : ganancia del acondicionador del UUT.

S_{UUT_config} : sensibilidad del acelerómetro configurada en el acondicionador del UUT.

S_{out_cal} : Sensibilidad de la cadena en calibración en mV/g

$$S_{out_cal} = G_{UUT} \cdot S_{UUT_config} \quad (6.2)$$

S_p : Sensibilidad de la cadena de medida patrón en mV/g

V_{pi1} : Voltaje de salida en Volts de la cadena de medida patrón antes de cada repetición.

V_{pi2} : Voltaje de salida en Volts de la cadena de medida patrón después de cada repetición.

A_{pi} : Amplitud de aceleración en g medida por el patrón en cada repetición.

$$A_{pi} = \frac{V_{pi1} - V_{pi2}}{2} \cdot \frac{1}{S_p}$$

S_{UUT_i} : Resultado de la nueva sensibilidad del acelerómetro en cada repetición.

$$S_{UUT_i} = \frac{A_{UUT}}{A_p} \cdot S_{UUT_config} \quad (6.3)$$

S_{UUT_m} : Media de la sensibilidades del UUT halladas en la calibración. Ésta es la sensibilidad que se le asigna al acelerómetro en calibración para la amplitud y frecuencia de referencia.

$$S_{UUT_m} = \frac{\sum_{i=1}^N (S_{UUT_i})}{N} \quad (6.4)$$

s : Desviación estándar de la media.

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{UUT_i} - S_{UUT_m})^2}{n-1} \quad (6.5)$$

$e_{sensibilidad}$ (%): Diferencia respecto a la sensibilidad original.

$$e_{sensibilidad} (\%) = \frac{S_{UUT_m} - S_{UUT_{orig}}}{S_{UUT_{orig}}} \cdot 100 \quad (6.6)$$

Como norma general, cuando el error de sensibilidad respecto a la original sea mayor del $\pm 2\%$ deberá repetirse la calibración desde el primer paso, es decir, desde el propio montaje del UUT. Si el error persiste, se considerará que el acelerómetro no es apto si dicho error supera el $\pm 5\%$ o si la diferencia hallada entre calibraciones consecutivas supera el $\pm 2\%$, en cuyo caso se procede a avisar al responsable y a darlo de baja.

Asimismo, si mediante el osciloscopio se detecta un exceso de ruido o distorsión de la señal de salida de la cadena en calibración, se procederá a contactar con el responsable del equipo el cual decidirá si se da de baja o no en función de la gravedad.

6.2.3. Calibración de la linealidad en amplitud

La comprobación de la respuesta en amplitud se realiza para verificar que la sensibilidad del UUT se mantiene constante a lo largo de un rango en amplitud.

Se eligen un mínimo de 4 puntos de amplitud distribuidos a lo largo del campo de medida del acelerómetro o de la cadena patrón, a una frecuencia igual a la utilizada para la calibración de sensibilidad. Estos valores de amplitud y frecuencia se deberán configurar en el programa informático de calibración, el cual se encargará de comunicarse con los instrumentos para generar dichas amplitudes y procesar las señales de salida de ambos acelerómetros.

Según la directiva ISO 16063-21, se utilizarán, preferiblemente, amplitudes próximas a los valores 1, 2, 5g y sus múltiplos de 10. Además, estas amplitudes coinciden con las amplitudes calibradas del acelerómetro patrón.

De la calibración se extrae el error de linealidad, es decir, el error de sensibilidad con respecto a la hallada en el anterior apartado, en cada punto calibrado.

$$e_{linealidad,i} (\%) = \frac{S_{UUT_i} - S_{UUT_m}}{S_{UUT_m}} \cdot 100 \quad (6.7)$$

6.2.4. Respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia se lleva a cabo para conocer el comportamiento de la salida del acelerómetro ante distintas frecuencias y consiste en someter a ambos acelerómetros a un barrido de frecuencia dentro del ancho de banda del UUT a una amplitud determinada.

Según la ISO 16063-21, la respuesta en frecuencia se debe realizar en, al menos, 6 puntos dentro del rango de frecuencias especificado por el fabricante o por el propietario del acelerómetro. No obstante, 6 puntos se consideran escasos teniendo en cuenta el amplio rango de frecuencias de uso de los

acelerómetros. Por tanto, se decide realizar siempre un barrido de al menos 10 muestras por década, es decir, un mínimo de 10 observaciones por cada intervalo de frecuencias correspondiente a una década. La equidistancia entre valores de frecuencia deberá ser en escala logarítmica.

A ser posible, se deben utilizar los valores de frecuencia usados en la calibración del patrón. De esta forma, se asegura la correcta trazabilidad de las medidas y nos permite aplicar las correcciones halladas en el certificado de calibración del patrón.

La amplitud utilizada es recomendable que sea la misma que la utilizada para extraer la sensibilidad, con una tolerancia de un $\pm 20\%$ a lo largo de todo el intervalo de frecuencias calibrado. Se aplica esta tolerancia debido a que la amplitud materializada por el excitador de vibraciones depende tanto de la amplitud de la tensión del generador como de su frecuencia, por lo que para cada frecuencia, la amplitud materializada por el excitador puede ser diferente ante una misma consigna de amplitud.

Del mismo modo que en la calibración de linealidad en amplitud, se calcula la desviación de la sensibilidad en cada punto calibrado.

$$\Delta S_{Fi} (\%) = \frac{S_{UUT Fi} - S_{UUT m}}{S_{UUT m}} \cdot 100 \quad (6.8)$$

6.3. Expresión de los resultados

Según la directiva ISO 16063-21, en el informe de resultados deben expresarse los siguientes parámetros:

- Condiciones ambientales
- Técnica de montaje del UUT sobre el acelerómetro patrón
- Configuración de los acondicionadores de señal
- Resultados de la calibración incluyendo incertidumbre expandida y factor de cobertura en caso de ser distinto de 2.

Para ver los cálculos más detalladamente y la estimación de la incertidumbre de medida, así como el certificado de calibración, ver la instrucción de calibración en el Anexo 1.

CAPÍTULO 7. Diseño y desarrollo de la automatización del proceso de calibración.

7. Diseño y desarrollo de la automatización del proceso de calibración

En este capítulo se expone la parte de diseño y desarrollo de la automatización del proceso de calibración de acelerómetros. Esta automatización se consigue gracias a la programación de instrumentos virtuales mediante LabVIEW que permiten comunicar los instrumentos y otros dispositivos entre sí y entre el usuario y la máquina. Dicho programa se encargará de llevar a cabo el proceso de calibración de una forma automática pero, al mismo tiempo, el usuario podrá modificar cualquier parámetro relevante y podrá visualizar e interactuar con el proceso en todo momento.

7.1. Diseño y desarrollo del módulo de conmutación.

Para optimizar el uso de recursos de hardware es aconsejable el uso de un dispositivo que permita conmutar las señales procedentes del acelerómetro de referencia y el UUT hacia la entrada del multímetro de precisión. Con ello, es posible realizar la calibración con un solo multímetro sin sacrificar velocidad ni incertidumbre de medida.

Para introducir el módulo de conmutación en el sistema automatizado es preciso dotarle de un circuito de control y de comunicación. Con ello, el sistema automatizado podrá controlar el estado de conmutación libremente y así decidir cuándo realizar una medición de la salida del acelerómetro patrón o del UUT.

En el Anexo 9 se muestra el esquema y PCB de la placa de circuito impreso. La figura 7.1 corresponde a una fotografía de la placa de circuito impreso ya desarrollada.

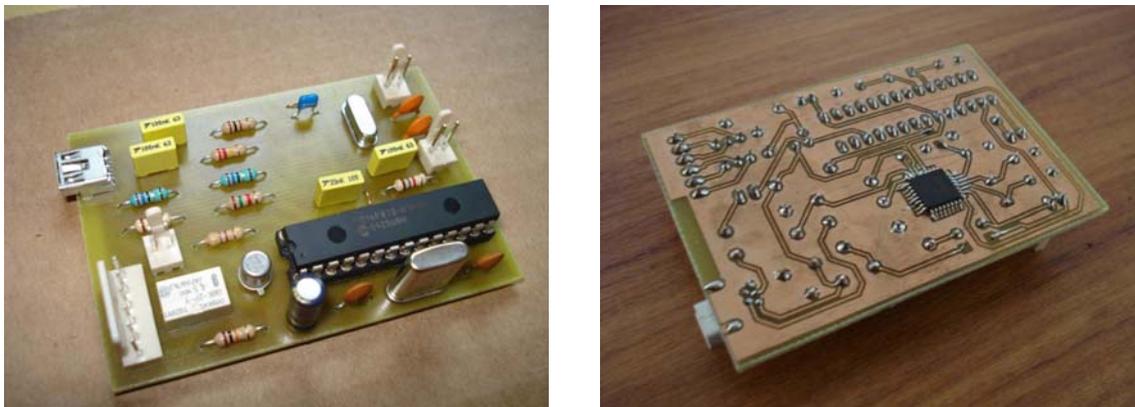


Figura 7.1. Vista superior e inferior de la placa de circuito impreso fabricada para llevar a cabo la conmutación a la entrada del multímetro (diseño propio).

Seguidamente se expone brevemente cómo se ha llevado a cabo el diseño y el desarrollo de dicha placa.

7.1.1. Conmutador controlado: relé electromecánico.

Para la elección del dispositivo conmutador hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Debe ser un dispositivo controlado electrónicamente. Es decir, debe ser un conmutador al que se le pueda cambiar de estado mediante la polarización eléctrica de uno de sus terminales de conexión.

- La resistencia eléctrica en estado ON debe ser lo más baja posible. De esta forma se minimizará el error causado por la caída de tensión en sus bornes.
- La velocidad y frecuencia de conmutación no es un aspecto condicionante a la hora de su elección. Cualquier conmutador electrónico/mecánico controlado cumple sobradamente con las condiciones de velocidad y frecuencia necesarias en nuestra aplicación. La velocidad y frecuencia de refresco de la lectura del voltímetro va a ser la que limite este aspecto.
- El consumo del circuito en el que se introduce el conmutador se considera despreciable para su elección puesto que se sitúa en serie con la entrada de un voltímetro (alta impedancia).
- La tensión de alimentación disponible en el circuito será de $5V_{DC}$. Esta tensión de alimentación deberá provenir del mismo conector utilizado para la comunicación con el PC (USB) para optimizar recursos y espacio.

Para una aplicación como ésta existen dos tipos de interruptores controlados según su tecnología y principio físico, el conmutador electromecánico - también llamado relé - y el conmutador de estado sólido.

El relé es un conmutador electromecánico controlado eléctricamente. Consta de uno o varios contactos que se accionan por medio de un electroimán. Cuando se hace circular corriente eléctrica a través de la bobina ésta hace que la armadura de hierro se desplace y accione los contactos para abrir o cerrar uno o varios circuitos eléctricos. Un ejemplo ilustrativo de un relé de tipo armadura puede verse en la figura 7.2 [53].

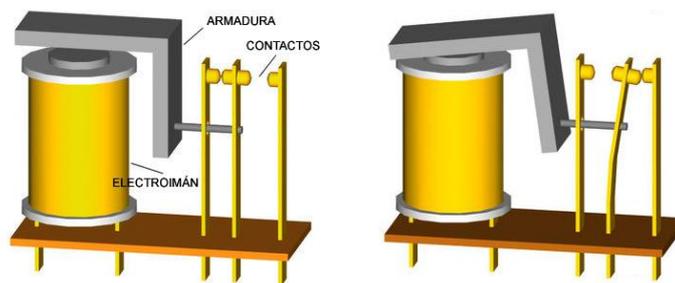


Figura 7.2. Esquema interno de un relé electromecánico.

Las características más relevantes de un relé en general son las que se detallan a continuación:

Ventajas:

- Muy baja impedancia en estado ON. Importante cuando el consumo es elevado o, en general, cuando se necesita una baja caída de tensión en sus bornes.
- Permite aislar eléctricamente el circuito de control del circuito de salida o de potencia. El circuito de control sirve únicamente para darle energía al electroimán. Es una armadura móvil la que se encarga de abrir o cerrar el circuito o circuitos de salida.
- Según el tipo de relé y características de sus contactos internos, pueden llegar a conmutar circuitos de alta potencia
- Los hay con multitud de contactos para conmutar varios circuitos.

Inconvenientes:

- La velocidad y frecuencia de conmutación es muy limitada debido a que su funcionamiento está basado en piezas móviles. La velocidad de conmutación estará condicionada por el tiempo invertido en desplazar el contacto móvil de un estado al otro. Esta velocidad puede ir del orden de unas décimas de milisegundo en los relés para circuitos de señal a más de 10 milisegundos en los relés de pequeña potencia.
- Puede llegar a producirse un efecto de rebote durante la transición de un estado al otro. Es decir, el contacto puede no ser firme durante un corto periodo de tiempo en el momento de la transición. Dicho tiempo suele ser del orden de menos de 1ms. También se puede producir un arco voltaico en el momento de la desconexión si la corriente es muy elevada.
- La vida útil es limitada debido a que utiliza piezas mecánicas móviles para su funcionamiento.

El SSR¹¹ es un dispositivo electrónico que permite abrir o cerrar un circuito eléctrico mediante un circuito de control, con la diferencia de que la conmutación se realiza mediante un dispositivo semiconductor como puede ser un transistor bipolar, MOS FET, un tiristor o un triac.

El circuito de control queda eléctricamente aislado del circuito de señal gracias a un optoacoplador o un transformador.

En la figura 7.3 se halla el esquema eléctrico interno de un relé de estado sólido basado en MOS FET. En concreto, se trata de un SSR de Omron modelo G3VM

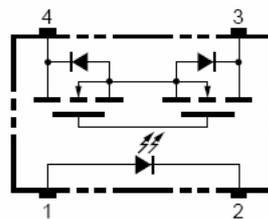


Figura 7.3. Esquema eléctrico interno de un SSR Omron G3VM.

Las características más relevantes de un SSR respecto a un relé electromecánico se detallan a continuación:

Ventajas:

- Dependiendo del dispositivo semiconductor utilizado puede detectar el paso por cero de la señal a conmutar. De esta forma puede conectarse en el paso de tensión por cero y desconectarse en el paso de intensidad de corriente por cero.
- Según características del SSR también puede llegar a controlar circuitos con elevados consumos.
- La velocidad y frecuencia de conmutación suele ser muy elevada en comparación con los relés electromecánicos. En este caso no interviene ninguna pieza mecánica móvil que pueda limitar la velocidad y frecuencia de conmutación.
- No se ve afectado por vibraciones.
- No se producen efectos de rebote ni arcos voltaicos.
- Funcionamiento silencioso.

¹¹ SSR: Del inglés *Solid State Relay* o “Relé de estado sólido”, es un conmutador controlado basado en elementos semiconductores.

- Menor consumo del circuito de control.
- Vida útil mucho mayor que la de un relé electromecánico.

Inconvenientes:

- La resistencia interna mínima en estado ON para los SSR de pequeña señal suele estar en torno a los 30Ω . Ésta es una resistencia mucho mayor que la ofrecida por los relés electromecánicos la cual suele ser despreciable para circuitos de señal.
- Rango de temperatura operativo más estrecho.
- El circuito de control es más sensible a perturbaciones.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, se decide utilizar un **relé electromecánico** principalmente por los siguientes motivos:

- Se necesita precisión a la hora de realizar la medición de la tensión de salida de la cadena de medida patrón y la cadena de medida en calibración. Por tanto es muy importante que la impedancia del interruptor en estado ON sea muy baja para que haya la menor caída de tensión posible.
- No se necesita una gran velocidad de maniobra ni una frecuencia de conmutación elevada. Además, los efectos de rebote no tienen importancia en nuestra aplicación. Una vez realizada la conmutación, se deja un tiempo prudencial para que la medición realizada por el voltímetro se estabilice para luego recoger la medida y pasar al otro estado de conmutación.
- Es necesario realizar la conmutación de dos circuitos independientes y eso es más sencillo de conseguir mediante un relé electromecánico que incorpore dos circuitos de conmutación.
- La vida útil de un relé electromecánico en nuestra aplicación puede ser muy elevada debido a que se utiliza a frecuencias muy bajas y no se le hace trabajar en exceso.

El dispositivo escogido es el relé electromecánico de baja señal modelo G6K-2P-Y de 4,5V de la marca OMRON. En la figura 7.4 se muestra una fotografía de dicho componente.

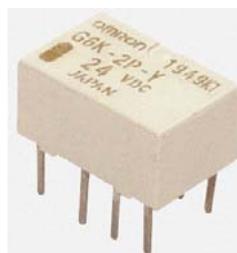


Figura 7.4. Fotografía del relé electromecánico G6K-2P-Y de Omron.

Se trata de un dispositivo preparado para trabajar con señales de baja tensión y baja potencia como las que se tratan en nuestra aplicación.

El consumo es de solamente unos 23mA lo cual lo hace apto para nuestra aplicación ya que el mismo puerto de comunicación utilizado (USB) es capaz de suministrar una corriente muy superior a esa.

El voltaje necesario para cebar al relé es de 4,5V nominales, aunque es capaz de actuar a partir de unos 4V. Se ha escogido con esta tensión nominal porque la tensión de 5V del puerto USB tiene una tolerancia y varía de un PC a otro, y además hay que contar con la inevitable caída de tensión presente entre colector y emisor del transistor utilizado para gobernarlo.

El tiempo de operación, es decir, el tiempo que tarda en realizar la maniobra de cambio de estado, es de unos 1,5ms y la máxima frecuencia a la que puede trabajar no se especifica, aunque en dispositivos de modelos similares suele estar en torno a los 10...20Hz. Estas últimas prestaciones son muy inferiores a las que ofrecería un relé de estado sólido, pero cumplen sobradamente las especificaciones de nuestra aplicación.

La resistencia del contacto mecánico es, como máximo, de 100mΩ según especificaciones del fabricante. Esto hace que la caída de tensión en bornes del relé sea despreciable, ya que la resistencia interna del voltímetro conectado en serie es, como mínimo, del orden de 100 millones de veces superior (10MΩ).

7.1.2. Interfaz de comunicación utilizada: RS232 a través de USB.

Como interfaz de comunicación con el PC se consideró en un principio en el bus GPIB debido a que se utiliza para la comunicación del resto de instrumentos. No obstante, en seguida se descartó debido a varios motivos:

- El interfaz GPIB es muy complejo para el uso que se le daría (únicamente enviar un byte para cambiar de estado un relé).
- El conector y el cable que lo acompaña es muy voluminoso y tiene un precio relativamente elevado.
- Se necesitaría alimentación externa para hacer funcionar la placa conmutadora, ya que el bus GPIB no dispone de una línea de alimentación.

Finalmente se opta por el protocolo serie RS232 para la comunicación entre la placa conmutadora y el software (PC). No obstante, hay que tener en cuenta que los fabricantes de placas base para PC hace tiempo están dejando de incorporar el puerto RS232 con su conector DB9 en casi todos sus modelos, sobretodo en los modelos para ordenadores portátiles como los que se utilizan en nuestra aplicación.

Para poder utilizar el puerto serie en cualquier PC que no disponga de conector RS232 se suele recurrir a los convertidores RS232-USB cuya función es la de incorporar el protocolo RS232 en un puerto USB del PC. Con ello, además, nos podemos beneficiar de la alimentación de 5V_{DC} que incorpora el conector USB para alimentar la placa.

Para adaptar el protocolo USB al RS232 se decide utilizar el circuito integrado FT232BL de la marca FTDI. En la figura 7.5 se observa una fotografía del mismo.



Figura 7.5. Fotografía del circuito integrado utilizado como convertidor USB-RS232.

El FT232BL contiene un controlador UARTx que se encarga de hacer de interfaz entre el protocolo USB y el RS232. Todos los mensajes recibidos por el puerto serie serán transferidos al puerto USB del PC y viceversa, adaptando los niveles de señal y resto de características de ambos protocolos.

En la figura 7.6 se muestra el diagrama de bloques del funcionamiento interno del circuito integrado en cuestión, extraído directamente de su hoja de características.

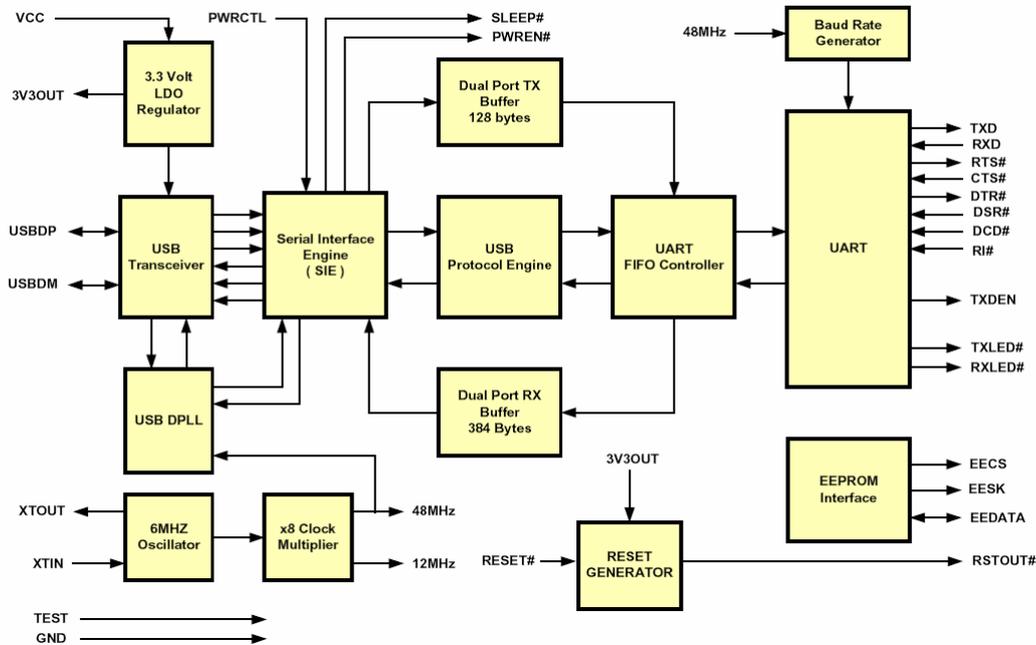


Figura 7.6. Diagrama de bloques del funcionamiento del C.I. FTDI FT232BL.

Para la configuración del FT232BL hay que tener en cuenta las siguientes condiciones:

- El FT232BL y el resto del circuito exterior deberá ser alimentado por el mismo puerto USB a 5V. De esta forma no es necesaria una fuente de alimentación externa.
- El protocolo USB nos dice que, cuando se encarga de alimentar circuitos externos, el consumo en el momento de la conexión no debe superar los 100mA. Al mismo tiempo, el consumo máximo admisible una vez reconocido el dispositivo será de 500mA. El consumo deberá bajar de los 500μA en el momento de la suspensión del dispositivo USB (antes de su desconexión).

El conexionado del circuito integrado hacia el conector USB se realiza como se indica en la figura 7.7.

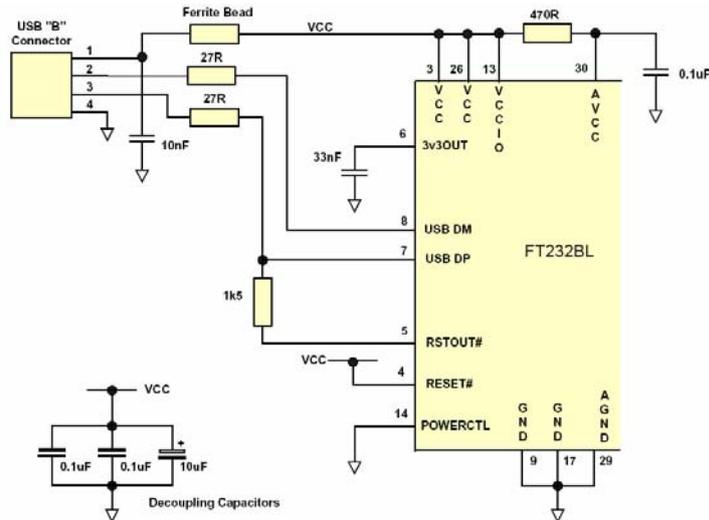


Figura 7.7. Esquema de conexión del FT232BL alimentado a través del conector USB.

7.1.3. Módulo de control.

Para el control de la conmutación a partir de los datos recibidos por el puerto serie a través del convertidor USB-RS232, se utilizará un microcontrolador reprogramable de Microchip: el PIC16F870.

Se decide utilizar el PIC16F870 porque dispone de controlador UART, por lo que será capaz de traducir automáticamente los datos que lleguen del puerto serie para poder ser procesados.

El PIC usado es el correspondiente al encapsulado de 28 pins ya que no se necesita un gran número de entradas y salidas.

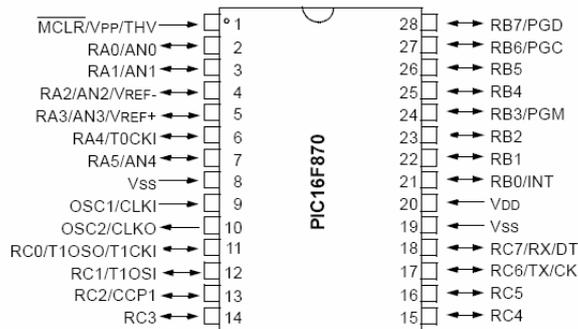


Figura 7.8. Diagrama de pins del PIC16F870 con encapsulado DIP28.

No es objetivo de este proyecto el describir el funcionamiento del PIC. Para más información al respecto se pueden consultar las hojas de características y manuales de programación [34]

La conmutación también se podrá llevar a cabo manualmente mediante un pulsador. Cada vez que se pulse, el conmutador cambiará de estado. Para ello, se dispone un conmutador en paralelo con un filtro RC para evitar efectos de rebote en el momento de la transición, tal y como se observa en la siguiente figura.

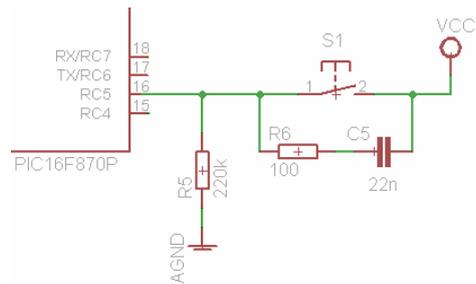


Figura 7.9. Detalle del circuito de disparo manual para el cambio de estado del conmutador.

7.1.4. Programación del módulo de control con microcontrolador PIC.

Para elaborar el código de programación del PIC se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La recepción de datos desde el puerto serie se realizará a través del pin nº 18 del PIC (pin RX)
- No habrá transmisión de datos desde el módulo de conmutación al PC. Solamente recepción.
- Los datos recibidos servirán únicamente para indicar el estado de conmutación que se requiere, por lo que solamente habrá dos mensajes distintos a los que el PIC responderá.
- La conmutación se puede llevar a cabo de dos maneras: remotamente desde el PC o manualmente desde un conmutador que actúa en el pin de entrada/salida RC5 (ver figura 6.9).
- Se utilizará un oscilador externo de 16MHz.
- Se indicará mediante dos LED's el estado en el que se encuentra el conmutador. Un LED rojo conectado al pin RB5 indicará que se ha realizado la conmutación para la lectura del patrón, mientras que un LED verde conectado al pin RC4 nos dirá que el conmutador está en el estado de lectura del equipo en calibración.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del programa introducido en el PIC. El código se presenta con detalle en el Anexo 5.

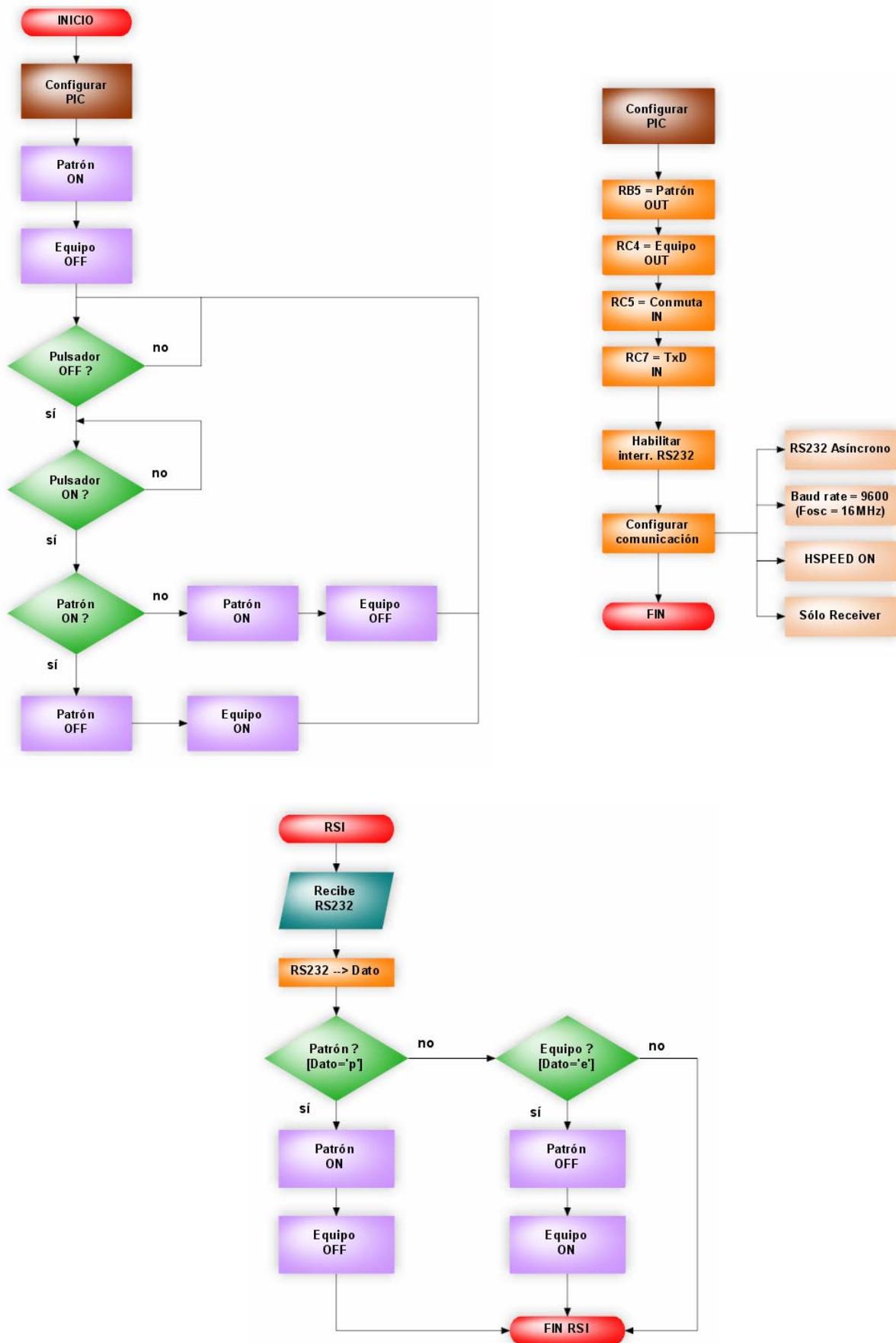


Figura 6.10. Diagrama de flujo del programa del módulo de control de la tarjeta conmutadora.

7.1.5. Listado de componentes y presentación de la placa.

Para la realización de la placa de circuito impreso se necesita la siguiente lista de componentes electrónicos:

Nº	Descripción	Valor	Unidades	Otros
1	Resistencia	27 Ω	2	1/4 W
2	Resistencia	1k5 Ω	1	1/4 W
3	Resistencia	470 Ω	1	1/4 W
4	Resistencia	220k Ω	1	1/4 W
5	Resistencia	100 Ω	1	1/4 W
6	Resistencia	1k8 Ω	2	1/4 W
7	Resistencia	10k Ω	1	1/4 W
8	Condensador	33nF	1	Poliéster
9	Condensador	100nF	3	Poliéster
10	Condensador	27pF	2	cerámico
11	Condensador	22nF	1	cerámico
12	Condensador	22pF	2	cerámico
13	Condensador	10 μ F	1	electrolítico
14	Transistor	BC107	1	
15	LED	Rojo	1	3mm
16	LED	Verde	1	3mm
17	Pulsador		1	
18	Relé 2 circuitos	5V	1	Omron G5V-2
19	PIC16F870		1	DIP-28
20	FT232BL		1	SMD
21	Oscilador	16MHz	1	
22	Oscilador	6MHz	1	
23	Zócalo		1	DIP-28
24	Conector mini-USB		1	5 pins

Tabla 7.1. Listado de componentes utilizado en la elaboración de la placa de conmutación.

En el **Anexo 9** se presenta el esquemático y PCB de la placa conmutadora.

A continuación se muestran algunas fotografías del módulo de conmutación ya finalizado y montado en su caja.

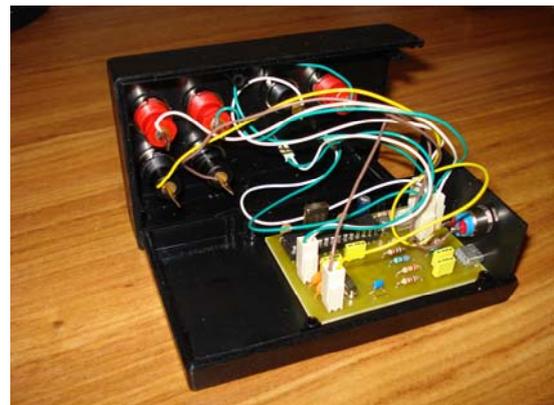




Figura 7.11. Fotografías de la tarjeta de conmutación una vez finalizada y operativa.

7.1.6. Problemas encontrados durante el proceso de diseño.

Uno de los mayores problemas que hicieron retrasar la fabricación de la placa conmutadora fue la primera elección del relé electromecánico. Se eligió el relé OMRON modelo G5V2 porque requiere una excitación del bobinado de 5V, que podría parecer ideal para un circuito cuya alimentación es a 5V.

No obstante, este relé presentaba dos problemas:

El problema más importante del relé G5V2 en nuestra aplicación es que, en realidad, la tensión utilizada para excitarlo no es exactamente de 5V, ya que existe una caída de tensión entre colector y emisor del transistor que lo alimenta. A esto hay que sumarle la tolerancia en el voltaje del puerto USB. Esto hacía que el módulo no funcionase.

Otro problema de este relé en concreto es el consumo. Cuando se escogió, no se miró con detenimiento el consumo del relé en estado ON, y éste puede ser importante debido a que el consumo máximo del puerto USB en el momento de la conexión está limitado a 100mA. Una vez detectado el dispositivo, el consumo máximo permitido sube a 500mA dependiendo de la versión del puerto.

El consumo del relé ya es de 100mA, por lo que el módulo al completo pasaría a consumir más de 100mA. No obstante, esto se puede subsanar programando el módulo de control de manera que el relé no se active en el momento de la conexión, pero aun así, un consumo de 100mA se consideró excesivo para este tipo de aplicación.

Con la elección del nuevo relé los problemas se solucionaron. Éste requiere únicamente una tensión de alimentación de 4,5V y tiene un consumo de solamente 23mA, lo cual lo hace totalmente apto para nuestra aplicación.

No obstante, el nuevo relé escogido poseía un encapsulado y patillaje diferente, por lo que fue preciso rediseñar y volver a fabricar la placa de circuito impreso.

Este error, a su vez, sirvió para arreglar otros pequeños defectos de diseño de la placa, como la ubicación del conector (ahora mucho más accesible), optimización del layout y la reducción de tamaño del PCB.

7.2 Diseño y desarrollo del software para la automatización del proceso de calibración.

7.2.1. Introducción.

El software utilizado para la automatización del proceso de calibración se desarrolla en lenguaje de programación gráfico mediante Labview 8.0.

Las principales funciones del software de calibración son las siguientes:

- Comunicación con la base de datos de calibración para recoger información del instrumento a calibrar
- Configuración automática de los parámetros de calibración según características del sensor a calibrar.
- Automatización del proceso de calibración de sensibilidad, linealidad en amplitud y respuesta en frecuencia mediante la comunicación bidireccional con los instrumentos de medida y de generación de señal.
- Generación del informe de calibración y archivo de resultados.
- Medida de aceleración RMS online.
- Verificación de la sensibilidad transversal.
- Recuperación de resultados anteriores y posterior generación del informe de calibración.

En los siguientes apartados se expone de manera resumida los pasos que han conducido al diseño y desarrollo de la aplicación. Más adelante, se estudia la estructura del panel frontal principal y el diagrama de flujo del programa. En el **Anexo 3** se explica con más detalle la estructura del código del programa y los sub-VI's que intervienen en todo el proceso.

7.2.2. Pasos seguidos en la elaboración de la aplicación.

Para la elaboración de la nueva aplicación se ha partido de un banco de trabajo controlado por un programa que presentaba numerosas limitaciones en cuanto a actualizaciones y ampliaciones, por lo que se decidió realizar una nueva aplicación partiendo de cero.

En este apartado se presentan los pasos que se han seguido para su diseño y los problemas que se han debido afrontar para su consecución.

7.2.2.1. Presentación del antiguo programa de calibración de acelerómetros.

Hasta la fecha, la calibración de acelerómetros se llevaba a cabo mediante una aplicación programada en lenguaje BASIC.

El proceso de calibración que se seguía mediante esta aplicación era el siguiente:

1- *Introducción manual de los datos generales del acelerómetro y del certificado de calibración*

- N° inventario
- Marca
- N° serie
- N° de certificado
- Verificador
- Periodo de calibración



Figura 7.12. Introducción de datos generales de calibración.

2- *Introducción manual de las especificaciones del UUT y de la configuración de la calibración*

- Sensibilidad original del UUT (de la calibración del fabricante)
- Sensibilidad actual del UUT (de la última calibración)
- Unidades de la sensibilidad (depende de la tecnología)
- Configuración de la cadena de medida patrón
- Configuración del amplificador del UUT



Figura 7.13. Introducción de parámetros de configuración de calibración.

3- Obtención de la sensibilidad del UUT

De manera manual, se controla el amplificador del shaker para someter a los acelerómetros a cuatro amplitudes distintas dentro del rango del acelerómetro. La única ayuda para conocer la amplitud a la que se someten los acelerómetros durante la calibración es visualizando el voltaje de salida del patrón en el multímetro, por lo que, si se desea aplicar unas amplitudes en concreto es necesario realizar un cálculo para saber su equivalencia en voltaje.

Una vez registrados los cuatro puntos, la aplicación obtiene una sensibilidad que corresponde a la media de las cuatro sensibilidades halladas a las distintas amplitudes, y un error de linealidad en tanto por ciento.



Figura 7.14. Determinación de la nueva sensibilidad.

4- Configuración del sistema para la respuesta en frecuencia

Para realizar la respuesta en frecuencia es preciso reconfigurar manualmente el amplificador del UUT con la nueva sensibilidad hallada en el anterior apartado. De no realizarse, la curva de la respuesta en frecuencia aparecería con un desplazamiento en magnitud.

Seguidamente, en el caso de estar calibrando acelerómetros con electrónica incorporada, es necesario introducir en el programa la nueva sensibilidad hallada en el anterior punto, ya que la aplicación no es capaz de distinguir entre una tecnología y otra.

Finalmente, se introducen los límites de frecuencia para la determinación de la respuesta en frecuencia.

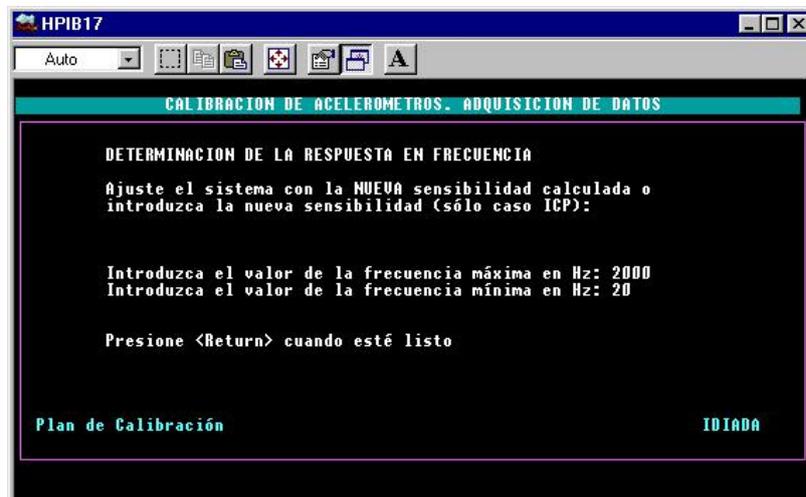


Figura 7.14. Configuración de la calibración en frecuencia.

5- Determinación de la respuesta en frecuencia

Una vez configurado, se aplica una amplitud cualquiera ajustando el control del amplificador del shaker y se indica al programa que ya puede iniciar el barrido.

La respuesta en frecuencia se realiza en unos 30 puntos distribuidos de manera lineal (no logarítmica) a lo largo del ancho de banda indicado. El proceso no se puede visualizar ni cancelar.

6- Impresión de resultados

Una vez llevada a cabo la calibración, la aplicación imprime en papel los resultados obtenidos en dos hojas. La primera hoja da información sobre los datos generales y de configuración introducidos en los dos primeros apartados, y muestra los resultados de la determinación de la sensibilidad.

La segunda hoja muestra la gráfica obtenida en la determinación de la respuesta en frecuencia.

En las dos páginas siguientes se muestra el informe escaneado de una calibración real llevada a cabo mediante el antiguo sistema. Este mismo acelerómetro fue calibrado, acto seguido, utilizando el sistema actual. La comparativa de ambos sistemas se lleva a cabo en el capítulo de resultados.

1. DATOS DEL EQUIPO CALIBRADO:

Nº de Inventario: 08205
 Descripción: Acelerómetro
 Marca: ENDEVCO
 Nº de serie: P10819
 Calibración realizada por: AR
 Fecha de calibración: 18-06-2010
 Próxima calibración: 18- 6- 2011

2. DATOS DEL EQUIPO PATRON:

Nº de Inventario: 93004
 Output de la cadena patrón = 9.827 mV/g

3. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION UTILIZADO:

IT-CAL-14 - Calibración de acelerómetros

4. RESULTADOS DE LA CALIBRACION:

Sensibilidad original = .6246 mV/g
 Sensibilidad actual = .627 mV/g
 Output amplificador = 50 mV/g

Valor patrón (g)	5.150	9.954	15.297	24.289
Indicación equipo (g)	5.146	9.943	15.292	24.294
Sensibilidad (mV/g)	0.6265	0.6263	0.6268	0.6271

NUEVA SENSIBILIDAD (mV/g) 0.6267 ± 0.0041

Error de linealidad = 0.12% (máximo 1%)
 Error de sensibilidad = 0.33% (máximo 5%)
 Incertidumbre = 0.65%
 Respuesta en frecuencia: ver gráfica adjunta

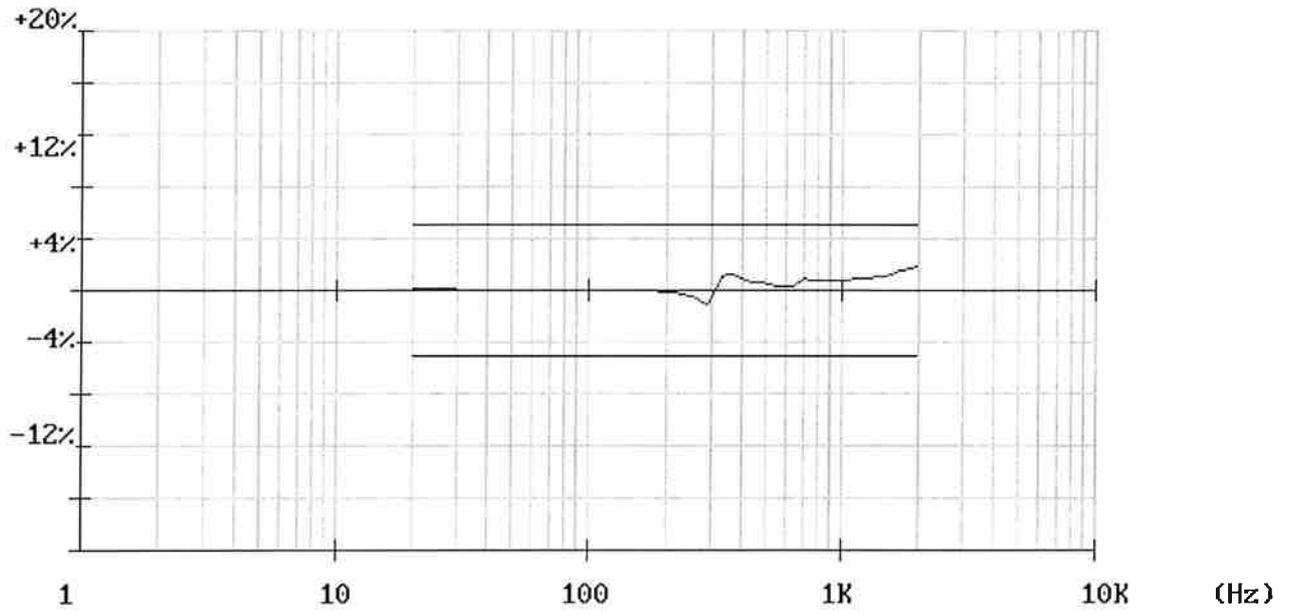
5. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura (°C) = 23

6. OBSERVACIONES: Equipo APT0

Revisado: Conforme responsable equipo:

RESPUESTA EN FRECUENCIA. ACELEROMETRO N/I 08205 (Certif. 101592)



7.2.2.2. *Aspectos a mejorar respecto a la antigua aplicación.*

En cuanto a **procedimiento**, los aspectos que se van a mejorar respecto a la aplicación antigua son, en resumen, los siguientes:

- Hasta ahora, la aplicación extraía la sensibilidad de la media de cuatro lecturas a amplitudes diferentes. Según la norma ISO 16063-21 este método no es el correcto, ya que la sensibilidad debe extraerse de la media de unas 10 repeticiones a una misma amplitud y frecuencia de referencia. Este valor de amplitud y de frecuencia debe coincidir con el utilizado en la calibración del acelerómetro patrón. En nuestro caso, la sensibilidad deberá hallarse a una amplitud de 10g RMS y a una frecuencia de 160Hz.
- La aplicación antigua seguía un proceso de calibración dividido en dos etapas. Una era para la obtención de sensibilidad y la otra era para la determinación de la respuesta en frecuencia. En la nueva aplicación, el proceso de calibración a seguir se deberá componer de tres partes diferenciadas. Una es la obtención de sensibilidad a una amplitud y frecuencia de referencia, otra es la determinación de la linealidad en amplitud y la última es la determinación de la respuesta en frecuencia.
- Para la lectura de las señales procedentes del UUT y del acelerómetro patrón se utilizaban dos multímetros. Además, el proceso de lectura no contemplaba el error debido al desfase entre las lecturas del patrón y el UUT. En la nueva aplicación se deberá hacer la corrección del error debido al desfase de lecturas tal y como indica la norma ISO 16063-21.
- En la aplicación antigua no se efectuaban las correcciones de las lecturas del acelerómetro patrón indicadas en su certificado de calibración. En la nueva aplicación se deberán introducir los datos de calibración del acelerómetro patrón cada vez que se envíe a calibrar (cada 3 años). De esta forma, el programa aplicará las correcciones adecuadas a cada lectura del patrón. Estos datos se introducirán una vez y quedarán guardados de manera predeterminada en un archivo de inicio de la aplicación.
- Anteriormente, la respuesta en frecuencia se realizaba en unos 30 puntos distribuidos linealmente en el rango de frecuencias. No había posibilidad de elegir el número de muestras y además no se correspondían con las utilizadas en la calibración del acelerómetro patrón. En la nueva aplicación, se podrá elegir el número de muestras por década y su distribución será logarítmica, tal y como se realiza en la calibración del acelerómetro patrón. En caso de obtener un número mayor de muestras que en la calibración del patrón, en los puntos intermedios se realizará una interpolación para aproximar el valor de corrección.

En cuanto a **funcionalidad**, se mejoran los siguientes aspectos:

- Ya no será necesario introducir los datos del acelerómetro en calibración. Estos datos se recogerán automáticamente de la base de datos de calibración. Esto supone una mejora en los tiempos de calibración y en la calidad de los informes debido a errores tipográficos.
- La configuración de la calibración se realizará de manera automática al conocer la marca, modelo y/o rango del acelerómetro a calibrar. Se establecerán un conjunto de filtros definibles por el usuario que determinarán los parámetros de configuración de las calibraciones en base a estos 3 datos. Esto permitirá una mayor solidez en las calibraciones y evitará los frecuentes errores tipográficos que podían llegar a influir en los resultados.
- El número de certificado se generará de manera automática en cada calibración. La generación de dicho número será inteligente, es decir, detectará si es necesario generarlo o no basándose en si ya hay escrito uno en el informe o si se ha generado anteriormente, etc. El número se escribirá en la base de datos de números de certificado del laboratorio.

- El programa indicará la configuración por defecto que se le debe aplicar al amplificador del UUT. De esta forma, el usuario ya no necesitará realizar ningún tipo de cálculo, evitando errores que pueden afectar al resultado de la calibración.
- Los ajustes de amplitud de vibración del shaker para la calibración de linealidad en amplitud ya no se deberán realizar a mano. La aplicación se encargará de variar la amplitud automáticamente por medio del generador de funciones. Para ello se elaborará un modelo que relaciona el voltaje de salida del generador con la amplitud de aceleración ofrecida por el shaker. Esto redundará en una mayor precisión y reproducibilidad en los puntos de calibración.
- Se suprimirá el uso de uno de los dos multímetros. El acelerómetro patrón y el UUT se leerán con el mismo multímetro utilizando para ello una tarjeta conmutadora desarrollada en este proyecto. Durante la calibración, se podrá seleccionar el uso de uno o dos multímetros.
- Ya no será necesario reconfigurar el amplificador del UUT después de extraer la nueva sensibilidad, el programa se encargará de realizar la compensación de manera automática. Esto mejorará el tiempo y, sobretodo, la calidad en las calibraciones, debido a que era frecuente que el técnico se olvidara de volver a configurar el amplificador.
- La calibración seguirá siendo un proceso lineal pero la aplicación permitirá retroceder en cualquier paso, cancelar cualquier acción y repetir cualquier etapa de calibración en cualquier orden. Antes esto no era posible, para repetir o cancelar alguno de los pasos había que repetir la calibración desde el principio, volviendo a configurar todos los parámetros.
- El informe de calibración vendrá dado en una plantilla en formato Excel y se podrá guardar en la misma base de datos que el resto de informes de calibración del laboratorio. Al ser una plantilla, ésta se puede modificar a nuestro antojo. Los resultados de calibración se copiarán en unas celdas definidas por el usuario en la aplicación sin afectar al resto de la plantilla. Con el anterior programa no era posible modificar ningún aspecto del informe sin tener que retocar el programa y volverlo a compilar.

7.2.2.3. *Primera versión de la nueva aplicación.*

Los primeros pasos en el diseño de la aplicación se desempeñaron durante el aprendizaje del uso de la herramienta de programación LabVIEW.

La primera versión, completamente funcional y utilizada por el laboratorio durante casi un mes, fue recibida con agrado por los técnicos del laboratorio de calibración.

La aplicación contaba con un panel frontal gráfico que suponía una gran ventaja frente al anterior programa. Lograba recoger en una sola pantalla todos los controles e indicadores necesarios.

Durante su diseño hubo algunos problemas que se debieron afrontar y que sirvieron para conocer mejor el entorno de programación y para mejorar la aplicación.

Uno de los problemas más graves fue el control de las etapas del proceso de calibración. El programa debía permitir retroceder en cualquier punto, cancelar la calibración y repetir alguna de las etapas en cualquier momento, y eso no resultaba nada sencillo de programar tal y como se había estructurado el diagrama de bloques en un principio. Este problema se supo subsanar en gran parte sin modificar la estructura básica del programa, pero con ello se complicó sobremanera la legibilidad del código ya que fue preciso añadir multitud de estructuras secuenciales y condicionales. Además, los botones de Salir y Reiniciar no eran nada intuitivos y, en muchas ocasiones, no funcionaban.

En la figura 7.15 se ilustra el panel frontal de la aplicación (primera versión)

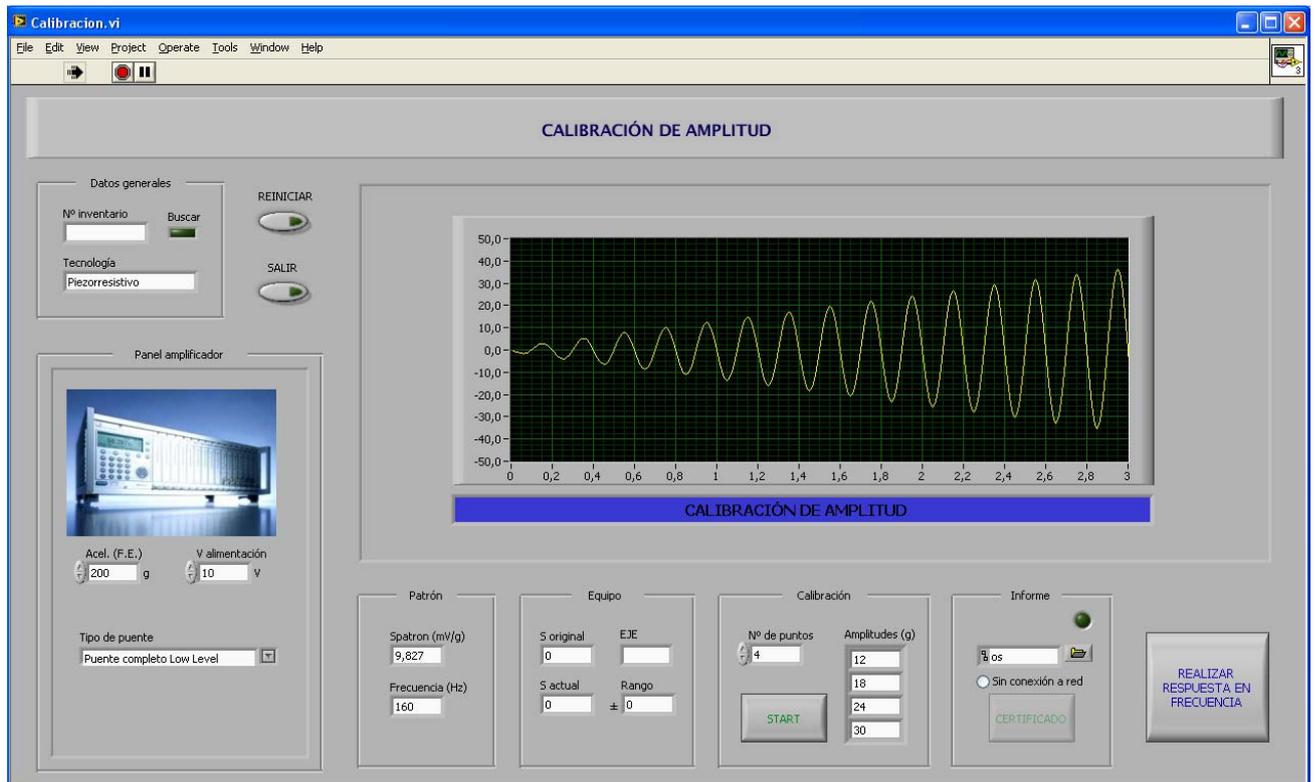


Figura 7.15. Panel frontal de la primera versión de la aplicación desarrollada.

Los técnicos de calibración tuvieron tiempo de valorar la funcionalidad de la aplicación y aportar ideas de mejora. La aplicación les era de gran utilidad pero empezaron a echar en falta algunas opciones y utilidades. La simplicidad del manejo era una de sus virtudes, pero tanta simplicidad no tenía porqué implicar una falta de opciones de ajuste y de utilidades.

7.2.2.4. Segunda versión de la nueva aplicación.

Gracias a las opiniones de los técnicos de calibración, se decide ampliar la aplicación con diversas utilidades. Estas utilidades son las siguientes:

- Opciones de ajuste del programa. Entre estas opciones se encontraban los directorios de trabajo, la sensibilidad del acelerómetro patrón y los filtros de configuración de parámetros de calibración. Estos filtros eran una novedad, ya que permitían configurar la calibración de manera automática según la marca, modelo y rango del UUT.
- Recuperación de antiguos informes de calibración. Cuando se realiza una calibración, se guardan los resultados en tres archivos diferentes, uno para cada etapa de calibración. Mediante esta opción, se pueden cargar los resultados de calibraciones ya realizadas anteriormente y volverlos a volcar en un informe de calibración. Esta modificación era fundamental, y más aun teniendo en cuenta que ya se disponía de ella en el programa de calibración original.
- Comprobación de la sensibilidad transversal. Mediante esta herramienta, montando el acelerómetro en posición perpendicular al eje del movimiento, la aplicación es capaz de obtener la sensibilidad transversal del acelerómetro a distintas amplitudes. Esto es muy útil en la verificación de acelerómetros nuevos y de otros acelerómetros que hayan recibido un impacto severo.

Además de añadir todas estas utilidades, se decidió modificar la estructura del diagrama de bloques porque resultaba muy difícil realizar cualquier modificación. Asimismo, se dio un lavado de cara al panel frontal de la aplicación pasando de un diseño excesivamente sobrio a uno más dinámico.

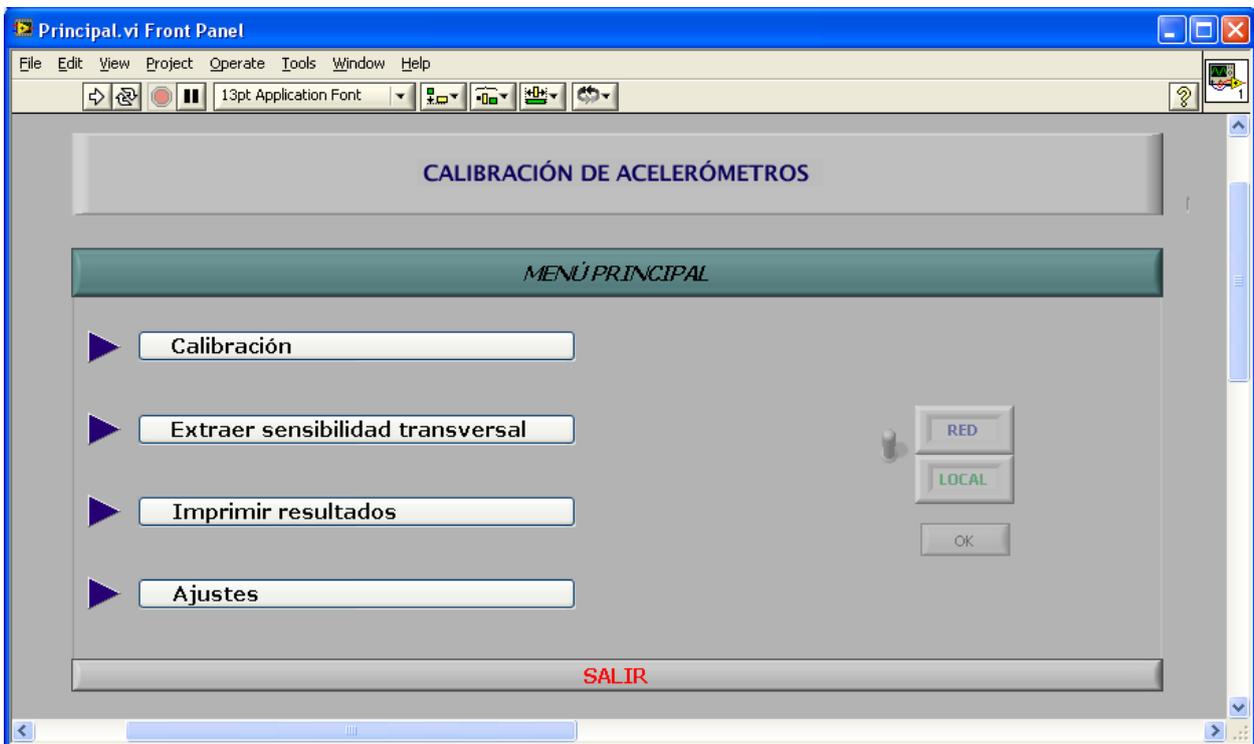


Figura 7.16. Panel frontal del menú principal de la segunda versión del programa.



Figura 7.17. Panel frontal de calibración de la segunda versión del programa.

7.2.2.5. *Última versión de la nueva aplicación.*

La segunda versión del programa vista en el anterior apartado era más completa que la primera y el código estaba más depurado. No obstante, resultaba difícil conocer en todo momento el estado en el que se encontraba la calibración, y había aspectos que se podían mejorar como por ejemplo, recoger toda la información del completo proceso de calibración en una sola pantalla.

Para aprovechar mejor el panel frontal, el sub-panel que servía de visualización del proceso de calibración debía ser eliminado. Este sub-panel se debería visualizar únicamente durante el proceso de calibración.

El estado en el que se encontraba la calibración y generación del informe debía ser reconocido de manera evidente. Para ello, se decide introducir unos indicadores que cambian de color según el estado del proceso.

Para poder acceder a las utilidades en cualquier momento sin tener que cancelar la calibración, se decide distribuir el panel frontal en pestañas. Asimismo, una vez más, se decide cambiar la estructura del código (diagrama de bloques) por una máquina de estado para facilitar el control de todos los procesos.

La máquina de estado es una técnica muy recurrida en la programación de interfaces de usuario ya que permite realizar saltos de programa cuando el usuario o el propio programa lo requiera, ya sea apretando un botón como cambiando de pestaña o si se cumple una condición determinada.

Esta modificación de la estructura del código es fundamental para organizar los diversos paneles frontales y permite una gran flexibilidad a la hora de actualizar y ampliar el programa de una manera rápida y sencilla. Para más información sobre la máquina de estados, ver la guía básica en el **Anexo 8**.

Aprovechando la facilidad con la que se puede ampliar la aplicación gracias a la nueva estructura del código, se decide incorporar otras utilidades como la Medida Online (visualización instantánea de la lectura del patrón y el UUT) y la visualización de resultados de diversas calibraciones.

En el siguiente apartado, se muestra el panel frontal principal de la última versión de la aplicación.

7.2.3. Panel frontal del programa principal.

El diseño del interfaz o panel frontal es una tarea, en muchos casos, más complicada de lo que en un principio se puede imaginar. El panel frontal debe reunir todos los controles e indicadores necesarios para la correcta interacción entre el usuario y la máquina, y además debe permitir hacerlo de una manera organizada, intuitiva y lo más interactiva posible.

Para el diseño del panel frontal es importante tener en cuenta, entre otros, los siguientes aspectos:

- Debe ser sencillo e intuitivo.

Los controles e indicadores se deben colocar en lugares estratégicos para facilitar su visualización. Además deben tener el tamaño correcto y deben acompañarse de un display en los casos en los que se requiera cierta precisión.

No debe haber mucha aglomeración de controles e indicadores. Si es preciso, distribuir el interfaz en pestañas o en subVI's para no cargar el panel de control y para tenerlo todo más organizado.

El interfaz debe ser lo más sencillo posible. Es preferible un diseño sobrio y organizado a un diseño muy vistoso pero sobrecargado.

- Debe ser flexible e interactivo.

El panel frontal, además de los propios indicadores y controles del proceso, debe incluir las opciones necesarias para la configuración de los mismos y de cualquier otro aspecto del proceso del programa que lo requiera. Así, por ejemplo, existen casos en los que sería recomendable una opción de ajuste del color de un indicador, o poder cambiar la ruta de emplazamiento de archivos de resultados por defecto, etc.

- Debe permitir visualizar el proceso con detalle.

Es muy importante seguir con detalle el transcurso de algunas ejecuciones del programa y el panel de control debe llevar a cabo esta función mediante gráficas, displays y otros indicadores. Hay que utilizar siempre el indicador adecuado para facilitar su visualización y comprensión del estado del proceso.

En la figura 7.18 se muestra el panel frontal que aparece cuando se ejecuta la aplicación de calibración. En ella se observa que el interfaz se distribuye en pestañas. Cada pestaña es una parte del programa bien diferenciada.

La pestaña “Principal”, que es la que se observa en la figura, es donde se encuentra el panel de control del proceso de calibración. A su vez, el panel de control principal se descompone en una serie de apartados o módulos bien diferenciados y que interactúan con el usuario.

Se observa que el control del proceso de calibración se lleva a cabo en el panel frontal principal por medio de tres módulos bien diferenciados, el módulo de calibración de sensibilidad, el de la linealidad en amplitud y el de la respuesta en frecuencia. Esto permite que la calibración no siempre sea algo secuencial que deba seguir siempre una pauta estricta, ya que en ocasiones, es necesario realizar únicamente una respuesta en frecuencia para realizar una comprobación, o repetir una parte de la calibración. Todo este proceso se puede realizar de una forma precisa e intuitiva a través de dicho panel frontal.

En los siguientes apartados del presente capítulo se realiza un repaso de la estructura del panel frontal principal y de los diagramas de bloques que intervienen. Para ver el funcionamiento más detallado del programa con el resto de paneles frontales de la máquina de estados, se recomienda ver el manual de la aplicación en el Anexo 3.

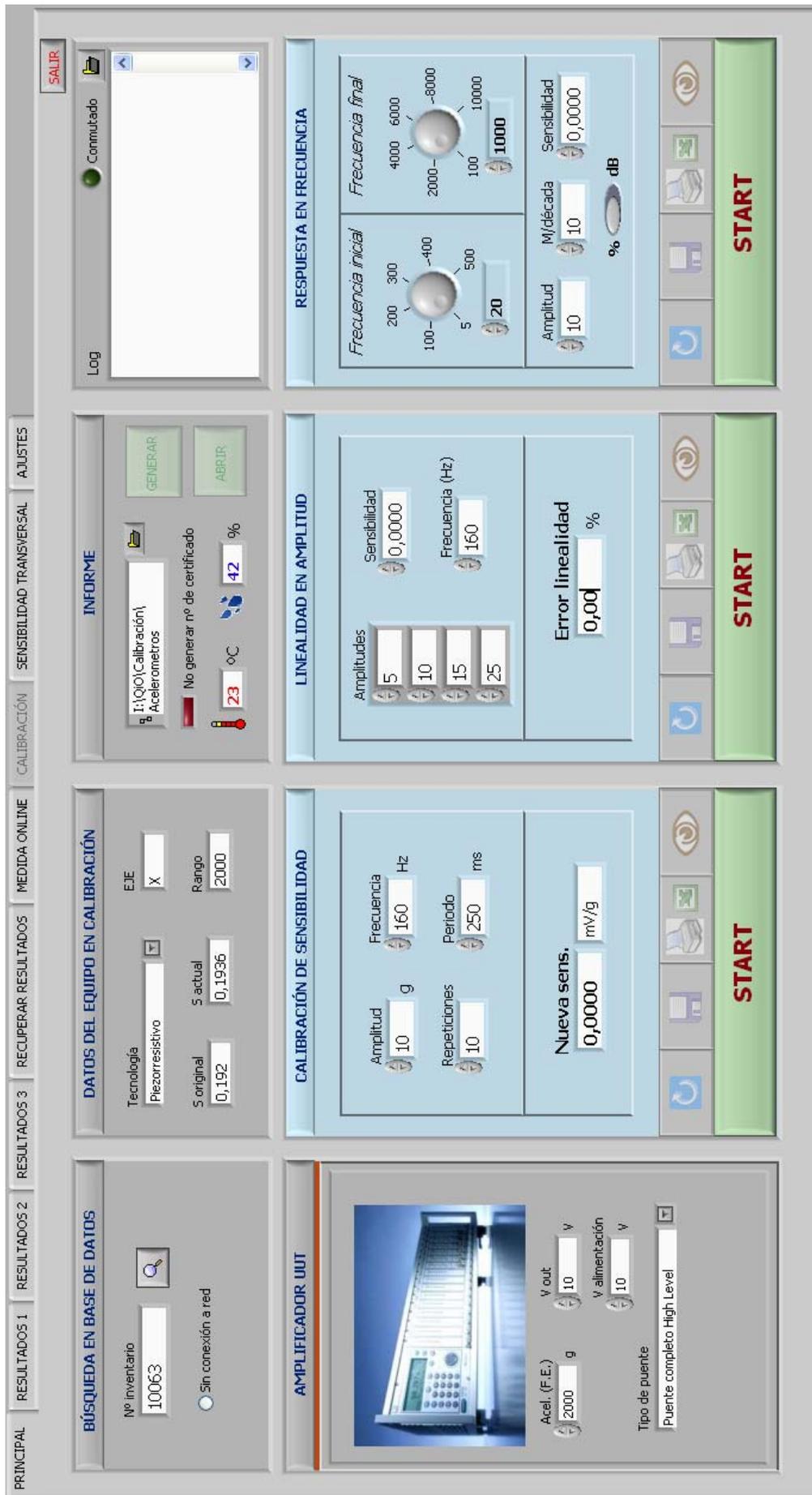


Figura 7.18. Panel frontal principal de la aplicación.

7.2.2.1. *Búsqueda en base de datos.*

En este apartado del panel se da la opción de cargar los datos y configuración del inventario del acelerómetro en calibración. De esta forma, accediendo al módulo de búsqueda, se realiza una búsqueda por el código de inventario o nº de serie del UUT en la base de datos de calibración (en este caso, en la base de datos SQL del software *Visual Factory Calibre* de *Elecsoft*) y se extrae toda la información que hay en ella, como la tecnología del acelerómetro, sus sensibilidades, rango, marca, modelo, etc. Estos datos servirán para configurar automáticamente los instrumentos y los parámetros de calibración, aunque siempre será posible modificarlos manualmente.

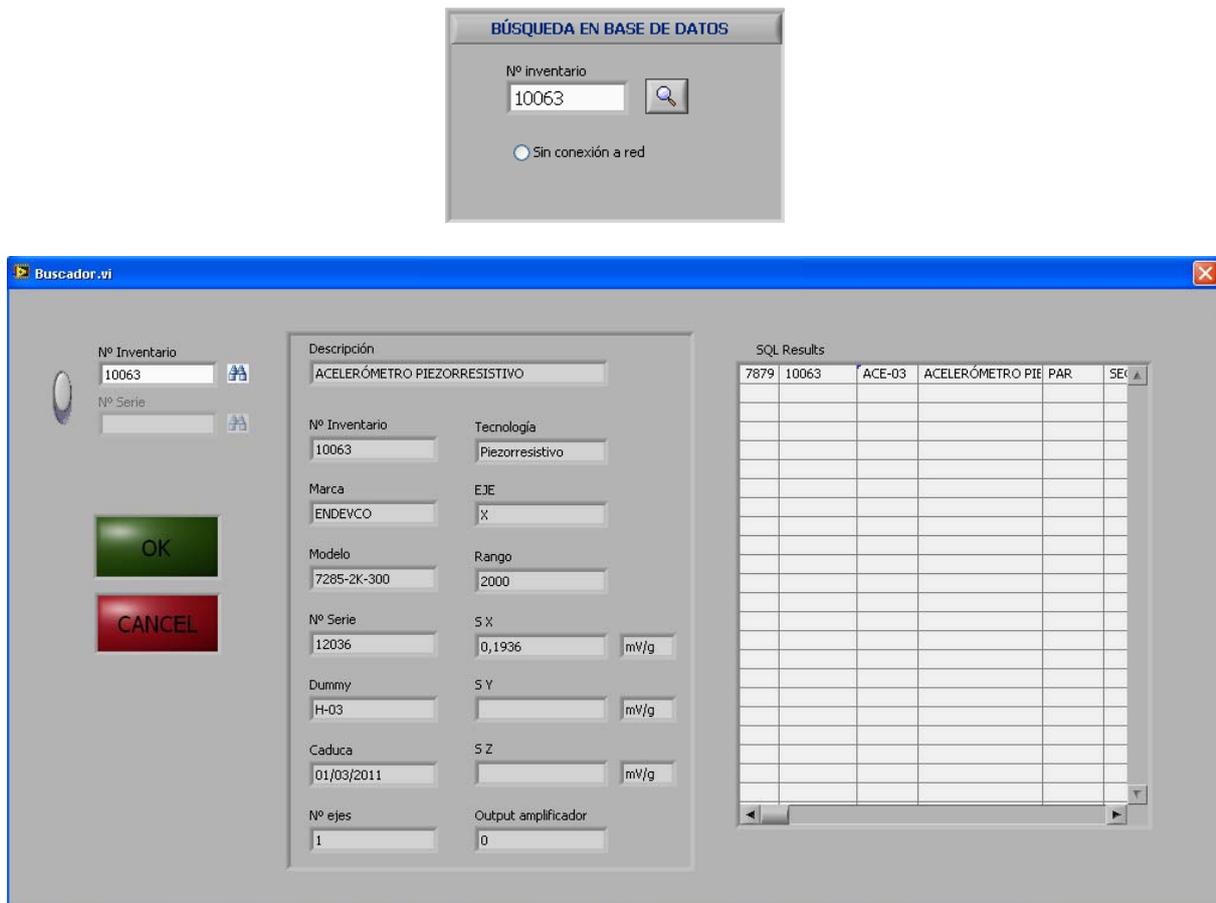


Figura 7.19. Arriba: Apartado de búsqueda en base de datos de calibración. Abajo: panel frontal de la búsqueda avanzada de acelerómetros en la base de datos.

7.2.2.2. *Datos del equipo en calibración.*

Aquí se muestran los datos más relevantes del acelerómetro en calibración. Estos datos son necesarios para la calibración y se pueden obtener automáticamente de la base de datos en el apartado de búsqueda o, simplemente, se pueden modificar manualmente para realizar una calibración personalizada.

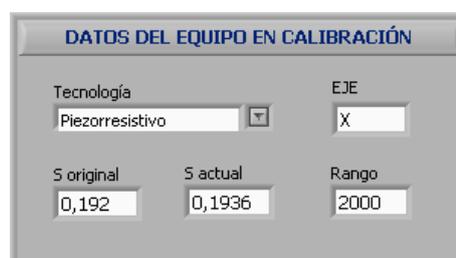


Figura 7.20. Apartado de manipulación de las especificaciones técnicas básicas del UUT.

7.2.2.3. *Informe.*

En este apartado aparecen algunas de las opciones configurables de generación del informe de calibración que se pueden modificar en cualquier momento durante el proceso de calibración. El resto de opciones se pueden hallar en la pestaña “Ajustes”.

Así pues, en este apartado se pueden realizar las siguientes acciones:

- Modificar la ruta donde se guardan los archivos de resultados.
- Generar el informe de calibración (una vez completada toda la calibración).
- Abrir los archivos de datos guardados de la actual calibración (archivos de texto).
- Decidir si se debe generar o no un nuevo número de certificado en caso de ser necesario.
- Configurar la temperatura y humedad relativa del ambiente en el momento de la calibración.

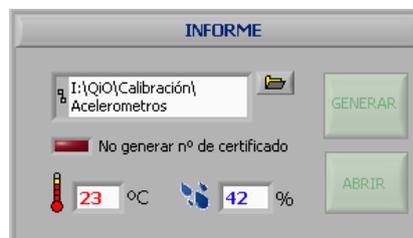


Figura 7.21. Apartado de manipulación de las especificaciones técnicas básicas del acelerómetro.

7.2.2.4. *Log.*

El “Log” es un archivo de texto que recoge todos los movimientos importantes e incidencias que acontecen durante el proceso de calibración. Dicho campo se va rellenando automáticamente, aunque también es posible introducir anotaciones que se irán guardando periódicamente en un archivo de texto.

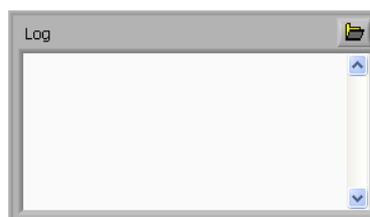


Figura 7.22. Apartado de “Log” o Registro de sucesos.

El archivo de texto se guardará en la misma ruta introducida en el apartado “Informe”.

7.2.2.5. *Configuración del amplificador del UUT.*

Este apartado es un sub-panel que va ligado directamente a la tecnología del acelerómetro. Según la tecnología introducida en el campo correspondiente de los datos del equipo en calibración (ver figura 7.20), el sub-panel del amplificador cambiará para ofrecer los distintos controles e indicadores para la configuración del respectivo acondicionador.

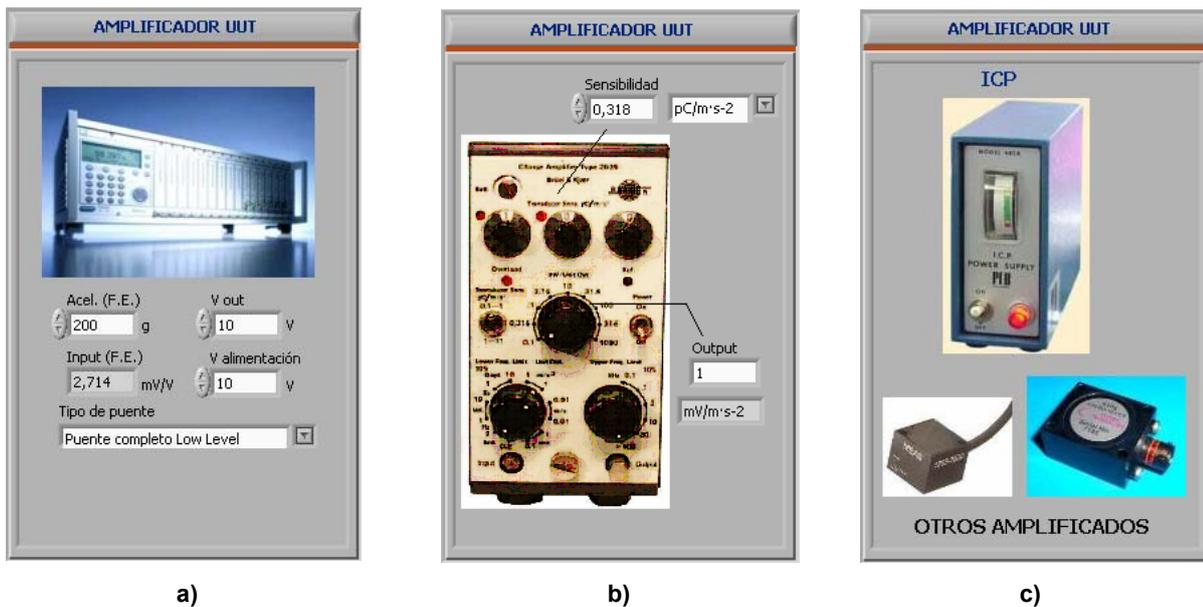


Figura 7.23. Configuración del sistema acondicionador del acelerómetro en calibración. a) Amplificador de extensometría para acelerómetros piezorresistivos, b) amplificador de carga para acelerómetros piezoeléctricos, c) acelerómetros con electrónica incorporada (capacitivos, IEPE, piezorresistivos con amplificador interno, etc.)

7.2.2.6. *Calibración de sensibilidad.*

En este apartado se configuran los parámetros de calibración para la obtención de la nueva sensibilidad. Estos parámetros son la amplitud y frecuencia de la aceleración de referencia, el número de repeticiones que se llevarán a cabo y el periodo de tiempo que deberá transcurrir entre cada repetición.

Una vez calibrado, se visualiza el resultado, es decir, la nueva sensibilidad del acelerómetro. Esta sensibilidad será utilizada para el resto del proceso de calibración.

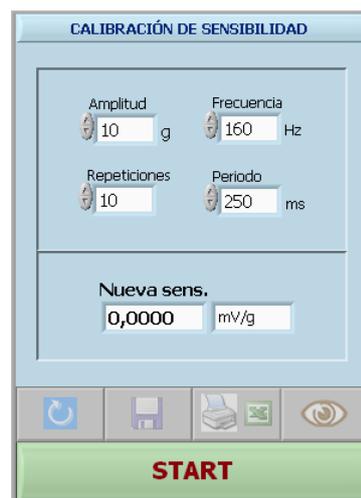


Figura 7.24. Configuración de la calibración de sensibilidad.

En la figura anterior se observa una serie de botones en la parte inferior. Estos controles sirven para controlar el proceso de calibración, para la generación del informe y visualización de resultados. En la figura 7.25 se detalla la función de cada uno de ellos.



Figura 7.25. Controles para el control del proceso de calibración del panel frontal principal.

7.2.2.7. Linealidad en amplitud.

Este apartado sirve para configurar y llevar a cabo la calibración de la linealidad en amplitud.

La configuración que se lleva a cabo es, la asignación de las amplitudes y la frecuencia de la señal de excitación y la sensibilidad del acelerómetro (hallada en la calibración de sensibilidad o introducida manualmente)

Una vez llevada a cabo, se visualiza la no linealidad máxima hallada.

Al igual que en la calibración de sensibilidad, se dispone de una serie de botones (controles) cuya función se ha explicado en el anterior apartado 7.2.3.6.

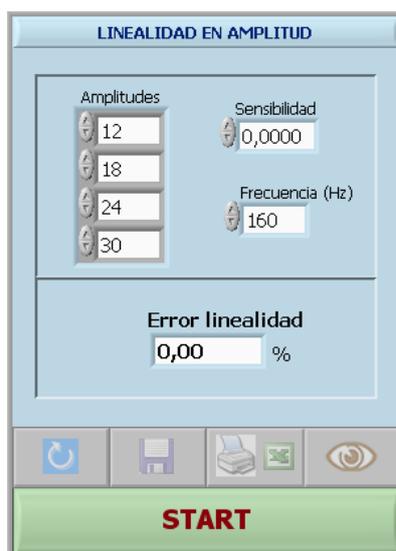


Figura 7.26. Controles e indicadores para la configuración de la calibración de linealidad en amplitud.

7.2.2.8. Respuesta en frecuencia.

Para la respuesta en frecuencia se sitúan los controles del rango de frecuencias a calibrar (frecuencias mínima y máxima), las muestras por cada década de frecuencia, la amplitud de la señal de excitación y la sensibilidad actual del acelerómetro en calibración (extraída de la calibración de sensibilidad o introducida manualmente).

Se observa también un control (conmutador) en la parte inferior que sirve para especificar las unidades de la magnitud (atenuación) de la gráfica de la respuesta en frecuencia que se visualiza durante la calibración. Las unidades pueden ser en porcentaje o en decibelios relativos a la sensibilidad nominal del acelerómetro.

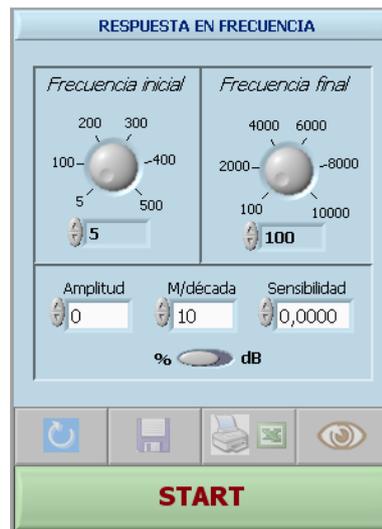


Figura 7.27. Controles para la configuración de la calibración de respuesta en frecuencia.

7.2.4. Descripción del programa: Diagrama de flujo.

A continuación se presenta de manera simplificada el diagrama de flujo del programa principal. En el Anexo 3 se detalla el proceso seguido y las técnicas utilizadas en la programación de la aplicación. Se ha decidido introducirlo como anexo debido a que, de otro modo, entorpecería la lectura de la memoria, pero al mismo tiempo se ha considerado importante anexarlo porque es una información relevante a la hora de comprender el funcionamiento y la estructura del programa y sirve como ayuda para futuras actualizaciones y ampliaciones.

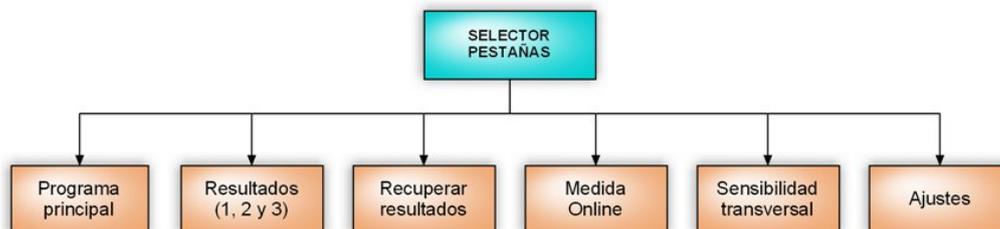


Figura 7.28. Diagrama del menú principal.

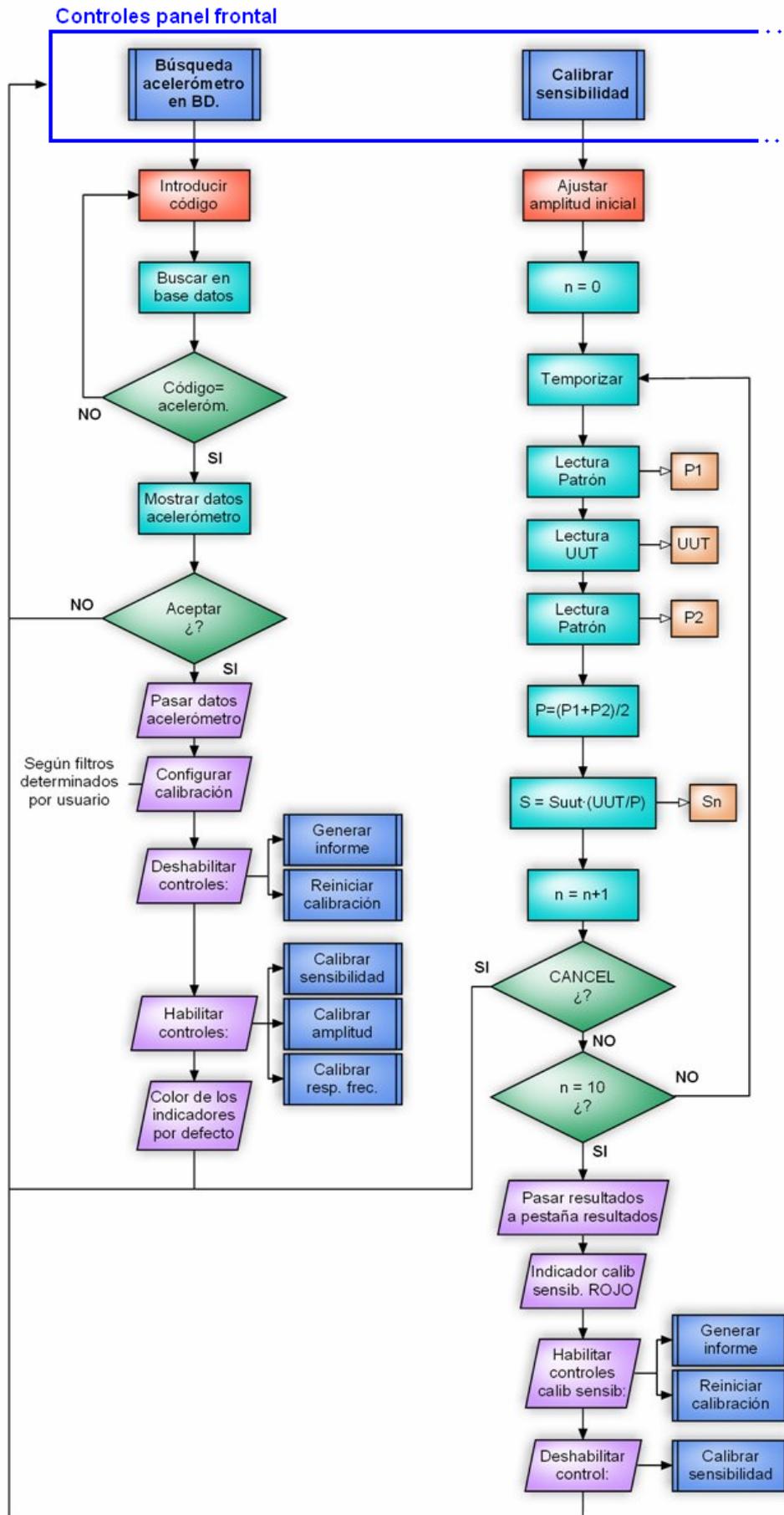
El selector de pestañas está siempre activo. En cualquier momento del programa se puede pasar de un subprograma a otro.

A continuación se describe, de manera esquematizada, las funciones que se llevan a cabo en el programa principal.

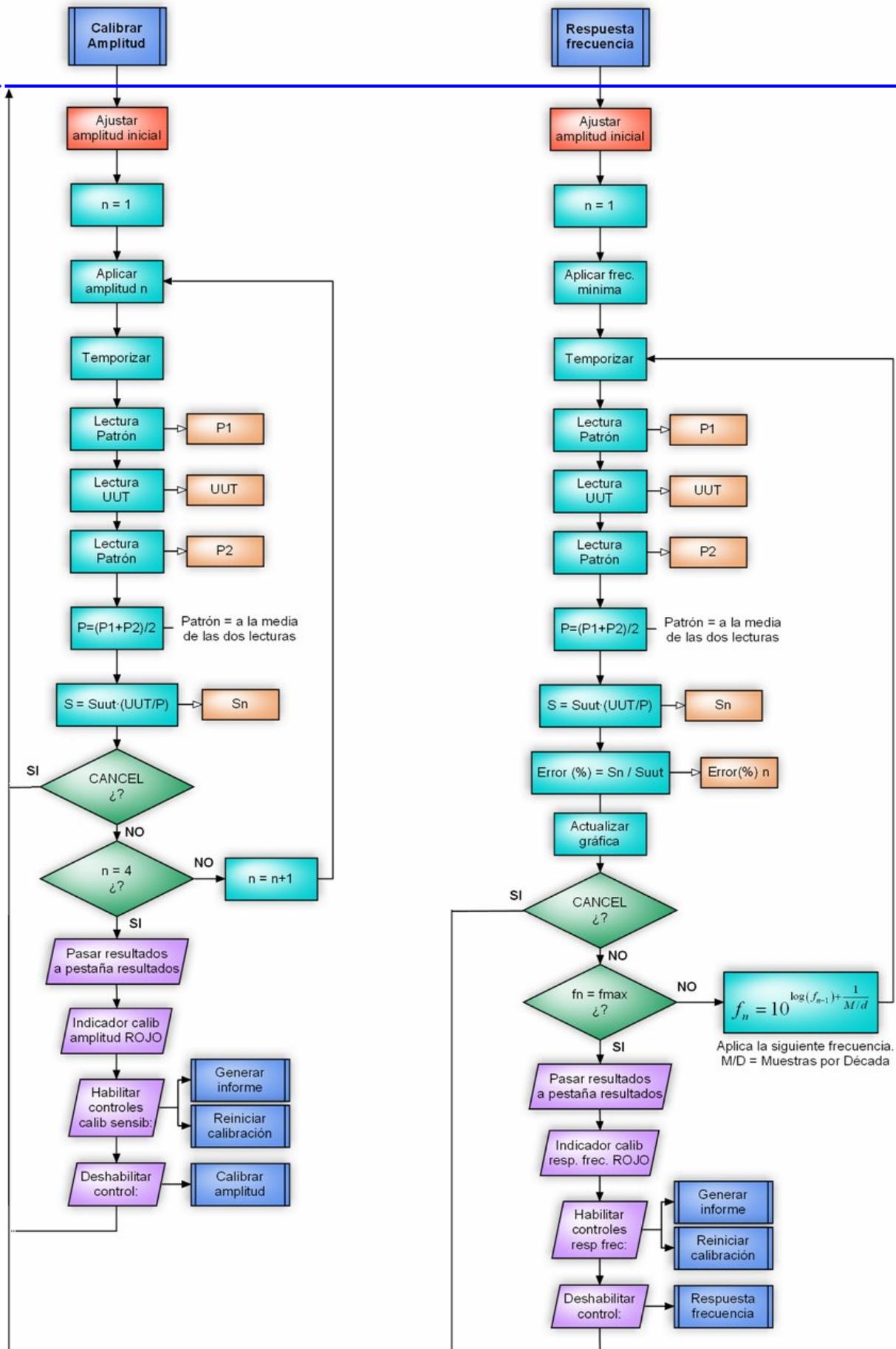
Los subprogramas no tienen una consecución lineal ya que el proceso depende del estado en el que se encuentre la aplicación y de las órdenes entradas por el usuario.

Para reproducir el proceso de una manera fiel se ha representado el diagrama partiendo de los controles del panel frontal, es decir, de las órdenes recibidas por el usuario desde el panel frontal. Así pues, observando el diagrama, las cajas azules que aparecen dentro del recuadro de controles del panel frontal, son los controles de los que dispone el usuario. El programa permanece en un bucle hasta que el usuario da una determinada orden mediante uno de estos controles, siempre y cuando estén habilitados.

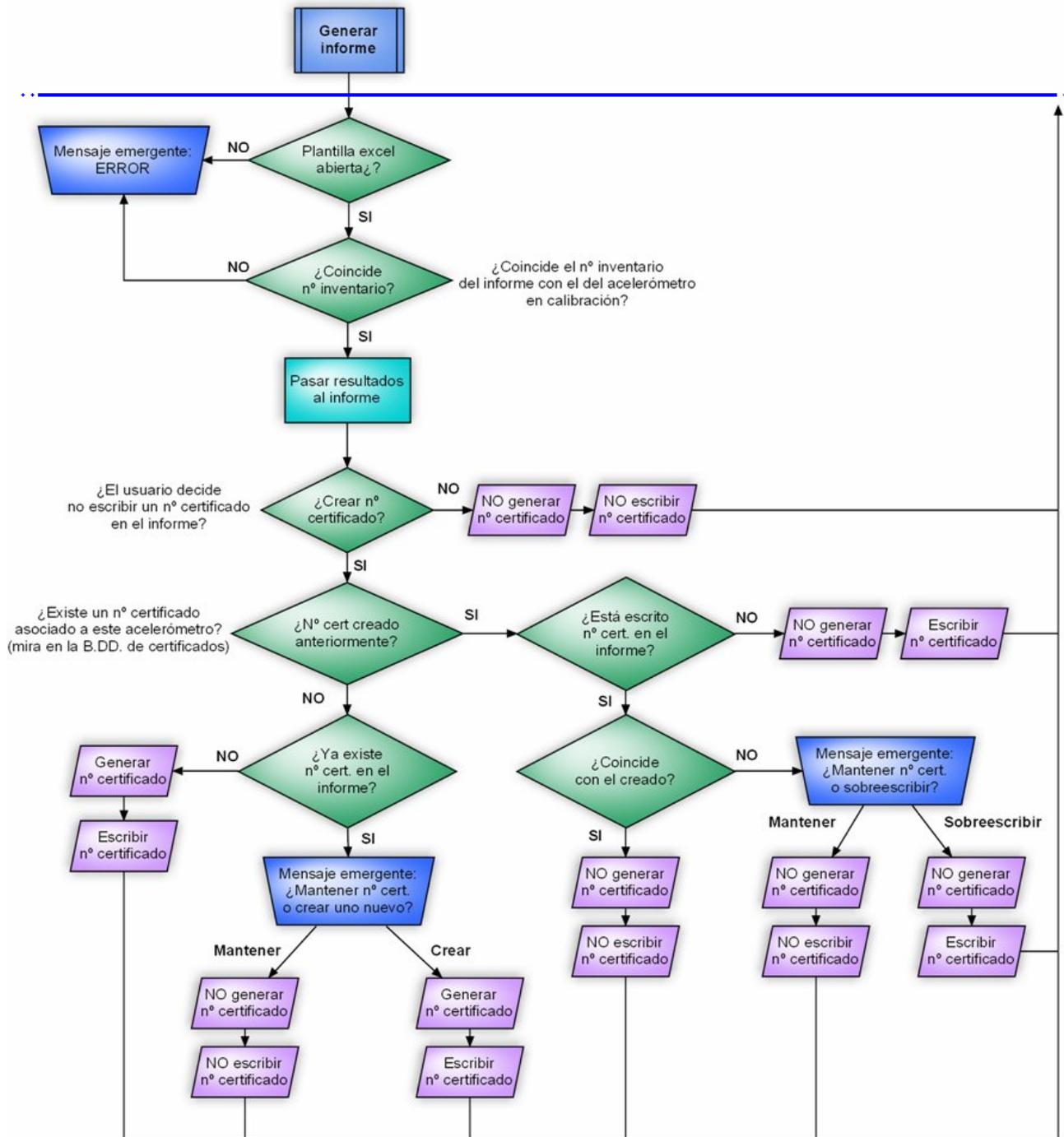
Los cajetines de color salmón representan las acciones que el usuario debe realizar manualmente, como por ejemplo, ajustar la amplitud del *shaker* mediante los mandos del amplificador. Los cajetines de color azul claro representan los procesos transparentes que lleva a cabo internamente la aplicación. Los cajetines de color magenta claro son acciones que se llevan a cabo sobre indicadores del panel frontal. Por último, los cajetines de color naranja claro son datos que se guardan en variables temporales para utilizarse posteriormente.



Controles panel frontal



Controles panel frontal



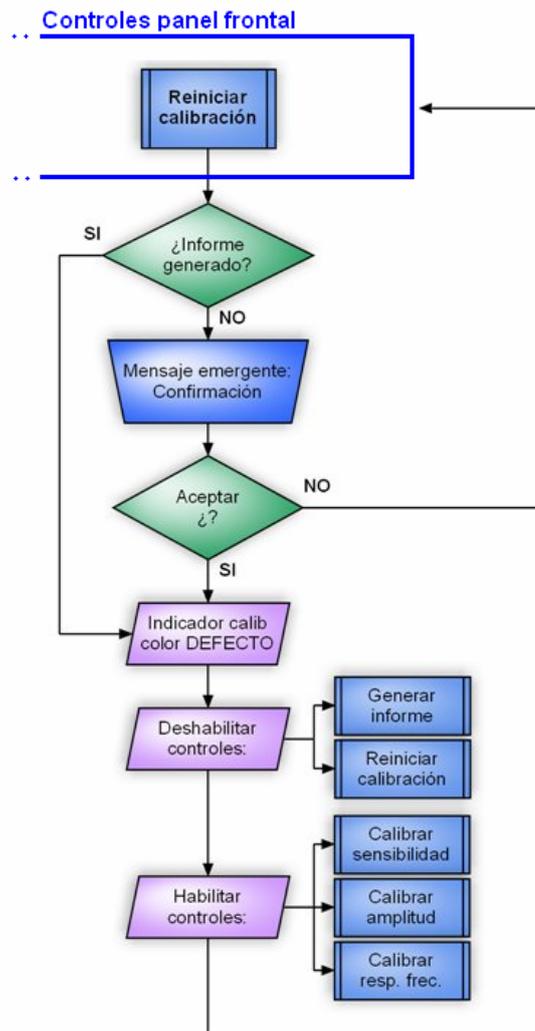


Figura 7.29. Diagrama de flujo del proceso llevado a cabo en el programa principal.

CAPÍTULO 8. Resultados y prestaciones.

8. Resultados y prestaciones.

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos al poner en funcionamiento el sistema automático de calibración de acelerómetros.

Primeramente se realizan calibraciones de varios tipos de sensores en cuanto a tecnología, marca, tamaño, masa y número de ejes, para comprobar el buen funcionamiento del sistema.

Seguidamente se analiza el funcionamiento del sistema ante distintos tipos de montaje y se estudian las prestaciones como la repetibilidad, la incertidumbre de calibración, el tiempo invertido en las calibraciones y la fiabilidad del programa.

Todos estos estudios se realizan para comprobar las prestaciones no sólo del sistema sino del mismo procedimiento de calibración utilizado.

8.1. Pruebas con distintos acelerómetros

Se ha realizado multitud de calibraciones de acelerómetros de distintas tecnologías para comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Al principio surgieron algunos problemas de programación de la aplicación pero se fueron solucionando dotando al sistema de una aplicación totalmente fiable que simplificaba y agilizaba el proceso de calibración.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las calibraciones de dos acelerómetros uniaxiales.

8.1.1. Calibración de un acelerómetro piezoeléctrico.

El primero se trata de uno de los acelerómetros piezoeléctricos más antiguos de la empresa. Es un acelerómetro de la marca B&K modelo 4371 fabricado en el año 1989. Dispone de un sistema de fijación roscado ideal para nuestra aplicación. Para su calibración se utiliza su propio cable de conexión al amplificador de carga, ya que al ser un acelerómetro piezoeléctrico, cualquier variación en la impedancia del cable supone una variación en la sensibilidad de la cadena de medida.



Figura 8.1. Acelerómetro piezoeléctrico B&K 4371 con su cable de señal asociado y el elemento de fijación.

Especificaciones del UUT:

Este modelo de acelerómetro se caracteriza por su gran robustez, su pequeña deriva en el tiempo y mínima sensibilidad a la temperatura. Por ello, en su largo historial de calibraciones, su sensibilidad no ha variado más de un 1% respecto a la original que proporcionó el fabricante en el año 1989.

Tiene un rango operativo de $\pm 6000g$ aunque es apto para medidas de vibraciones de baja amplitud. Su aplicación real es la medida de vibraciones en la carrocería de los automóviles durante los ensayos de acústica y vibraciones.

Su sensibilidad de fábrica es de $1.038 \text{ pC/m}\cdot\text{s}^{-2}$, mientras que la sensibilidad hallada en su última calibración fue de $1.030 \text{ pC/m}\cdot\text{s}^{-2}$ (periodo de calibración anual).

Preparación y configuración del UUT:

Antes de su calibración, la superficie del UUT se limpió de algunas impurezas mediante alcohol isopropílico y se lubricó para mejorar el contacto directo con la superficie del acelerómetro patrón.

Se montó roscado el UUT sobre el patrón aplicando el par de apriete recomendado por el fabricante (unos $2\text{N}\cdot\text{m}$)

Como acondicionador de señal se utilizó el amplificador de carga para calibración de acelerómetros piezoeléctricos disponible en el laboratorio B&K 2635 (ver figura 4.11). Éste se configuró con una sensibilidad de entrada igual a la sensibilidad hallada en la última calibración, es decir, $1,03 \text{ pC/m}\cdot\text{s}^{-2}$ y una sensibilidad de salida de $1\text{mV/m}\cdot\text{s}^{-2}$. En cuanto a las opciones de filtrado, se dejaron al mínimo, es decir, un filtrado pasa banda con frecuencias de corte a 0.2Hz y 100kHz .



Figura 8.2. Montaje del acelerómetro piezoeléctrico sobre el acelerómetro patrón.

Configuración de la calibración:

La calibración de sensibilidad se realizó a una frecuencia de 160Hz y una amplitud de $10g \text{ rms}$, que coincide con la configuración utilizada para la calibración del acelerómetro patrón, asegurando así una correcta trazabilidad en las mediciones.

La comprobación de la linealidad en amplitud se realizó en un total de 4 amplitudes distintas: $5g$, $10g$, $15g$ y $25g \text{ RMS}$. Estas amplitudes se corresponden con las verificadas en la calibración del patrón.

La determinación de la respuesta en frecuencia se llevó a cabo en un rango de frecuencias comprendido entre 20 y 2000Hz, utilizando un total de 10 muestras por década.

Resultados de la calibración:

En la calibración de sensibilidad se obtuvo como resultado una nueva sensibilidad de 1.0314 pC/m·s-2. La diferencia con la sensibilidad hallada en la anterior calibración realizada con el sistema antiguo un año antes es de un 0.13%, mientras que la diferencia con la original es de un **0.63%**. La desviación estándar del promedio de sensibilidades hallado es de solamente un 0.002%, lo cual se considera despreciable como contribución a la incertidumbre. Dicha incertidumbre es de un $\pm 1,5\%$, teniendo en cuenta todas las contribuciones presentadas en la última hoja del registro del informe de calibración.

1. Obtención de la nueva sensibilidad:

NUEVA SENSIBILIDAD:	1,0314	pC/m·s-2	Frecuencia de referencia:	160 Hz
			Amplitud de referencia:	10 g rms
Diferencia con la original:	0,63%			
Incertidumbre =	\pm	1,5%	(k = 2)	

Figura 8.3. Resultados de la calibración de sensibilidad.

En cuanto a la linealidad en amplitud, la máxima desviación hallada es de un -0.08% respecto a la nueva sensibilidad.

2. Linealidad en amplitud:

Frecuencia [Hz]	Patrón [g _{RMS}]	Equipo [g _{RMS}]	Sensibilidad [pC/m·s-2]	Error [%]
160	4,816	4,816	1,0314	0,01%
160	10,011	10,010	1,0314	0,00%
160	15,112	15,124	1,0322	-0,08%
160	25,033	25,040	1,0317	-0,03%

Figura 8.4. Resultados de la comprobación de la linealidad en amplitud.

La respuesta en frecuencia muestra un comportamiento que entra dentro de los límites de tolerancia establecidos ($\pm 5\%$). Los datos recogidos indican que la desviación es prácticamente logarítmica respecto a la frecuencia, por lo que en el uso habitual del acelerómetro podrían aplicarse las correcciones mediante una sencilla fórmula matemática.

3. Respuesta en frecuencia:

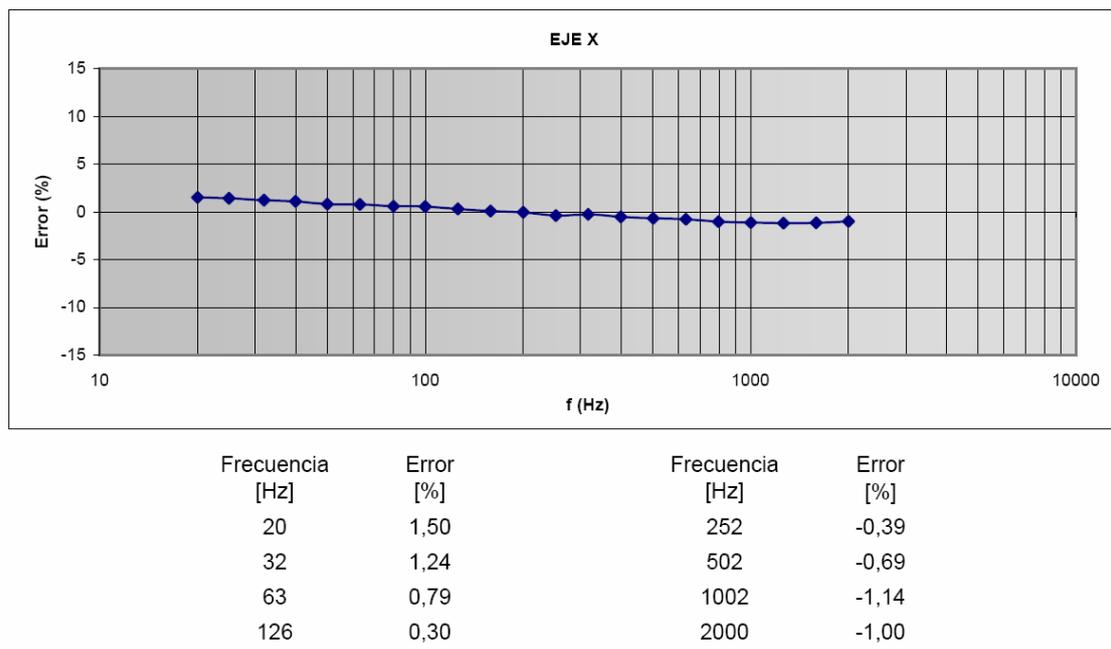


Figura 8.5. Resultados de la determinación de la respuesta en frecuencia.

Informe de calibración y calibración original:

El informe de calibración completo con el registro de datos de calibración se muestra en el Anexo 10. También se muestra el certificado de calibración original del fabricante realizado en el año 1989.

8.1.2. Calibración de un acelerómetro piezorresistivo.

Para la comprobación del sistema en la calibración de acelerómetros piezorresistivos se utilizó un acelerómetro nuevo de la marca ENDEVCO modelo 7285 con fecha de calibración del fabricante de enero de 2010.



Figura 8.6. Acelerómetro Endeveco 7285-2K.

Especificaciones del UUT:

El transductor escogido es un acelerómetro piezorresistivo de medio puente completado internamente.

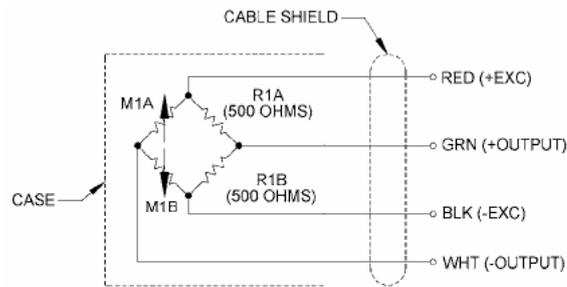


Figura 8.7. Esquema interno del acelerómetro Endevco 7285.

Es un acelerómetro de “Low cost” diseñado para ensayos de impacto en automoción. Su aplicación en la empresa es la medida de impactos en la carrocería de un automóvil durante un “crash test”. Su emplazamiento suele realizarse en zonas donde la carrocería va a recibir los impactos más severos por lo que muchos de estos acelerómetros no suelen durar más de 2 o 3 ensayos. Para zonas más críticas en cuanto a importancia en las mediciones se utilizan otros modelos de acelerómetros no tan económicos pero con mejores prestaciones.

Este modelo de acelerómetro se caracteriza por incorporar compensación por temperatura y una baja deriva de la sensibilidad en el tiempo.

Como todo acelerómetro piezorresistivo, a diferencia de un piezoeléctrico, posee respuesta en DC, es decir, es capaz de captar aceleraciones estáticas como la gravedad o impactos de muy larga duración.

Su sensibilidad de fábrica es de 0.1899 mV/g extraída en Enero de 2010. No se ha realizado ninguna calibración interna de este acelerómetro hasta la fecha y no se ha utilizado en ningún ensayo, por lo que se puede decir que el acelerómetro es totalmente nuevo.

Preparación y configuración del UUT:

El acelerómetro se montó sobre el acelerómetro patrón utilizando una de las bases de montaje disponibles y cinta de doble cara como elemento fijador.

Como acondicionador de señal se utilizó el acondicionador de extensometría HBM MGCPlus (ver figura 4.9). Éste se configuró con una sensibilidad de entrada igual a 0.1899 mV/g y una sensibilidad de salida de 5mV/m·s⁻². En cuanto a las opciones de filtrado, se dejaron al mínimo, es decir, un filtrado pasa bajos de 100kHz.

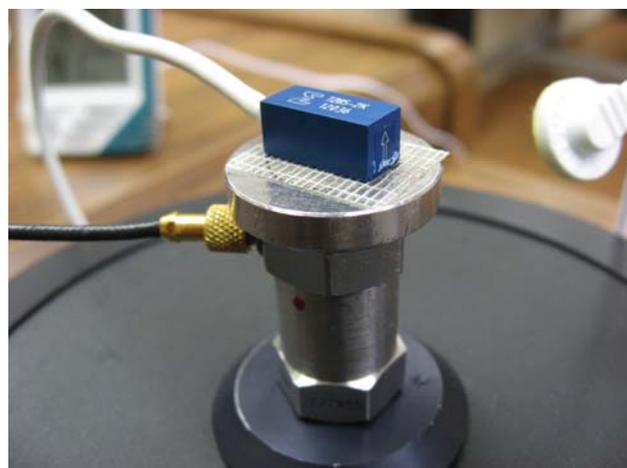


Figura 8.8. Montaje del acelerómetro piezorresistivo sobre el acelerómetro patrón.

Configuración de la calibración:

La configuración de los parámetros de calibración fueron los mismos que los utilizados para la calibración del acelerómetro piezoeléctrico (ver apartado 8.1.1).

Resultados de la calibración:

En la calibración de sensibilidad se obtuvo como resultado una nueva sensibilidad de 0.1898 mV/g. La diferencia con la sensibilidad original es de solamente un **0.08%** y la desviación estándar del promedio de sensibilidades hallado es de un 0.002%.

En este caso, la incertidumbre de calibración es de un $\pm 1,0\%$, un 0.5% menor que en el piezoeléctrico debido a que el amplificador de extensometría no aporta una contribución tan elevada como el amplificador de carga.

1. Obtención de la nueva sensibilidad:

NUEVA SENSIBILIDAD:	0,1898	mV/g	Frecuencia de referencia:	160 Hz
			Amplitud de referencia:	10 g rms
Diferencia con la original:	0,08%			
Incertidumbre =	\pm	1,0%	(k = 2)	

Figura 8.9. Resultados de la calibración de sensibilidad.

En cuanto a la linealidad en amplitud, la máxima desviación hallada es de un -0.23% respecto a la nueva sensibilidad.

2. Linealidad en amplitud:

Frecuencia [Hz]	Patrón [g _{RMS}]	Equipo [g _{RMS}]	Sensibilidad [mV/g]	Error [%]
160	4,811	4,822	0,1902	-0,23%
160	10,011	10,009	0,1897	0,02%
160	15,116	15,117	0,1898	-0,01%
160	24,107	24,117	0,1898	-0,04%

Figura 8.10. Resultados de la comprobación de la linealidad en amplitud.

La respuesta en frecuencia muestra un comportamiento prácticamente lineal que entra dentro de los límites de tolerancia establecidos ($\pm 5\%$) para el rango de 100 a 1000Hz (de 20 a 4000Hz en este caso).

3. Respuesta en frecuencia:

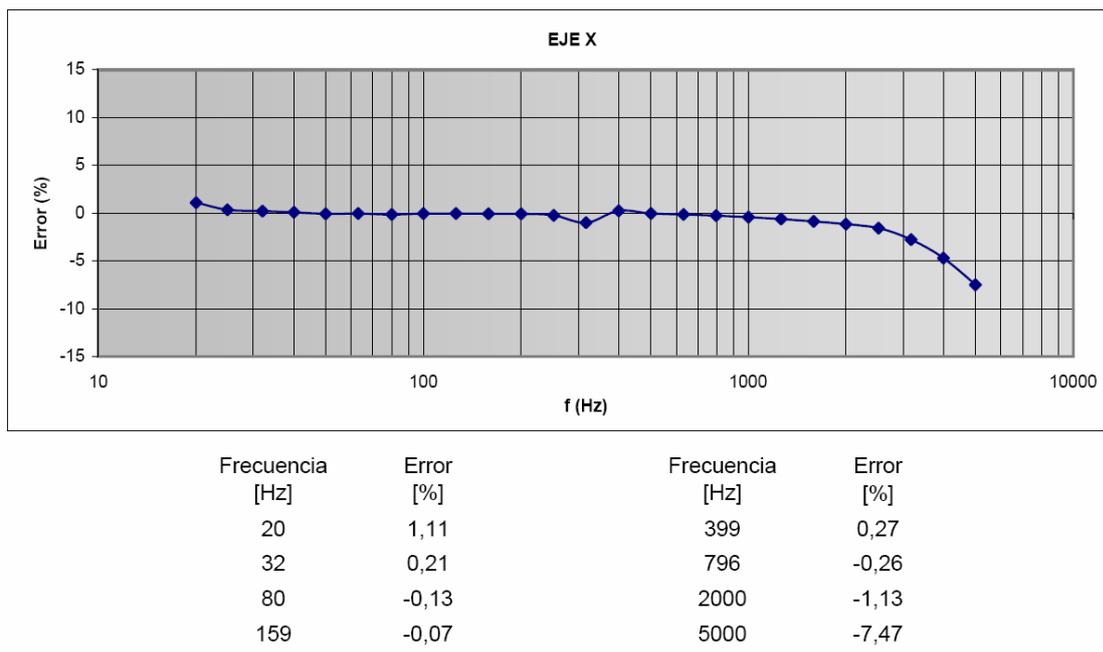


Figura 8.11. Resultados de la determinación de la respuesta en frecuencia.

Informe de calibración y calibración original:

El informe de calibración completo con el registro de datos de calibración se muestra en el Anexo 10. También se muestra el certificado de calibración original del fabricante acreditado por A2LA.

8.1.3. Conclusiones del estudio.

El sistema ha demostrado tener un comportamiento correcto en todo momento y la aplicación desarrollada ha demostrado ser fiable y robusta.

En cuanto a los resultados de calibración, éstos han sido plenamente satisfactorios. Se ha podido comprobar que la sensibilidad extraída en las calibraciones es prácticamente idéntica a la hallada por otros laboratorios externos con acreditación para calibración secundaria de acelerómetros.

8.2. Comparativa con el antiguo sistema de calibración

Para valorar parte de los objetivos alcanzados y ver si se cumplieron las expectativas, se ha realizado una comparativa de calibración de un acelerómetro con el sistema antiguo respecto al sistema desarrollado en este proyecto.

La calibración se realizó en las mismas condiciones y de manera consecutiva.

Como acelerómetro bajo prueba se escogió un ENDEVCO modelo 7264C de rango $\pm 500g$. A pesar de haber sido fabricado en el año 2008, el estado del acelerómetro es prácticamente nuevo debido a que apenas se ha utilizado en ensayos.



Figura 8.12. Fotografía de un acelerómetro Endevco modelo 7264B/C/D.

Este mismo acelerómetro se calibró en junio de 2009 dando como resultado una sensibilidad de 0.6270mV/g, con una diferencia de un 0.38% respecto a la calibración del fabricante.

Debido a que el acelerómetro se ha utilizado escasamente y está en muy buenas condiciones, los resultados de la calibración de 2010 deberían ser muy parecidos a los del año anterior.

Para asegurar la fiabilidad de los resultados, se ha realizado la calibración dos veces consecutivas con cada sistema. La primera calibración se realizó con el sistema antiguo. La segunda se realizó con el sistema nuevo y acto seguido se repitió el proceso. Los resultados fueron prácticamente idénticos respectivamente, por lo que se deduce que la comparativa resultó satisfactoria.

Las calibraciones se realizaron siguiendo los pasos dictados por la instrucción de calibración del anexo 1.



Figura 8.13. Montaje del UUT (verde) sobre el acelerómetro patrón utilizando adhesivo instantáneo y una base de montaje.

Los informes correspondientes a la calibración mediante el sistema antiguo y el nuevo se observan a continuación. El primer informe se tuvo que escanear y corresponde al generado por el sistema antiguo. El segundo informe corresponde al generado por el sistema nuevo.

Por último, se muestra escaneado el informe de calibración del fabricante. Como se puede observar, se trata de una calibración acreditada por **A2LA**, del inglés *American Association for Laboratory Accreditation*, que es la entidad de acreditación americana.

Calibración antigua:

1. DATOS DEL EQUIPO CALIBRADO:

Nº de Inventario: 08205
 Descripción: Acelerómetro
 Marca: ENDEVCO
 Nº de serie: P10819
 Calibración realizada por: AR
 Fecha de calibración: 18-06-2010
 Próxima calibración: 18- 6- 2011

2. DATOS DEL EQUIPO PATRON:

Nº de Inventario: 93004
 Output de la cadena patrón = 9.827 mV/g

3. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION UTILIZADO:

IT-CAL-14 - Calibración de acelerómetros

4. RESULTADOS DE LA CALIBRACION:

Sensibilidad original = .6246 mV/g
 Sensibilidad actual = .627 mV/g
 Output amplificador = 50 mV/g

Valor patrón (g)	5.150	9.954	15.297	24.289
Indicación equipo (g)	5.146	9.943	15.292	24.294
Sensibilidad (mV/g)	0.6265	0.6263	0.6268	0.6271

NUEVA SENSIBILIDAD (mV/g) 0.6267 ± 0.0041

Error de linealidad = 0.12% (máximo 1%)
 Error de sensibilidad = 0.33% (máximo 5%)
 Incertidumbre = 0.65%
 Respuesta en frecuencia: ver gráfica adjunta

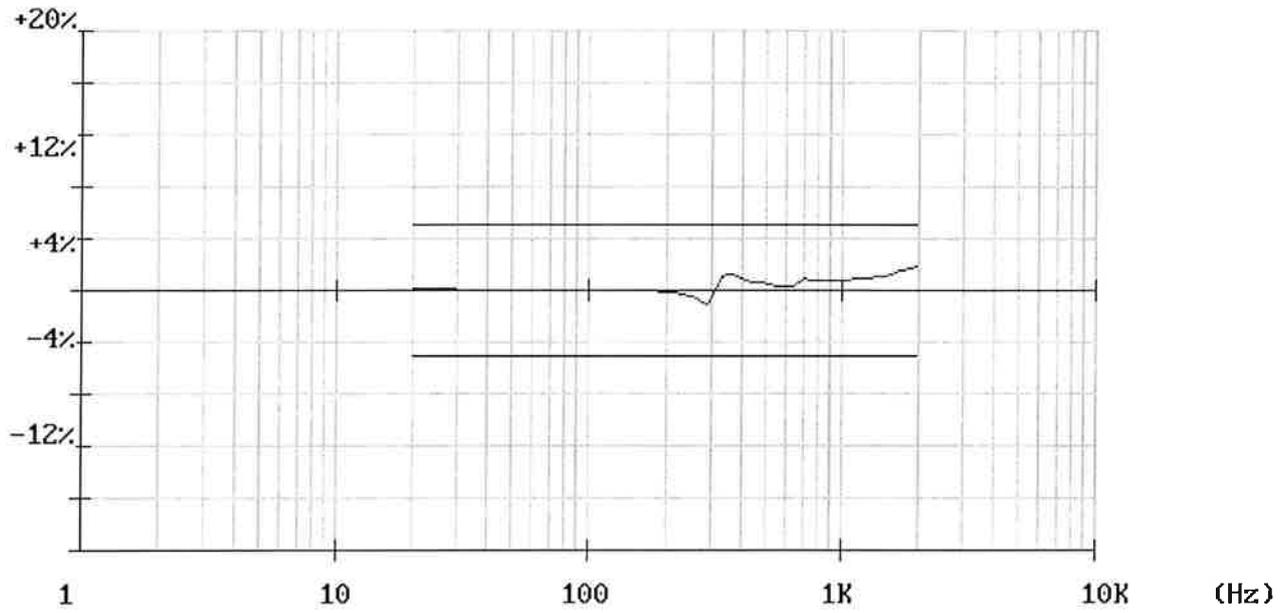
5. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura (°C) = 23

6. OBSERVACIONES: Equipo APT0

Revisado: Conforme responsable equipo:

RESPUESTA EN FRECUENCIA. ACELEROMETRO N/I 08205 (Certif. 101592)



Calibración nueva (utilizando el nuevo sistema):

Equipo calibrado:

Nº inventario: 08205	Procedimiento: IT-CAL-14
Descripción: ACELERÓMETRO PIEZORRESISTIVO	
Marca: ENDEVCO	Fecha calibración: 18/06/2010
Modelo: 7264C-500	Próx. Calibración: 18/06/2011
Nº de serie: P10819	

Patrones utilizados:

Nº inventario	Descripción	Próxima calibración
93004	Calibrador de acelerómetros	mar-13
98186	Multímetro Agilent 34401A	dic-10
03351	Amplificador de extensometría	abr-11

Condiciones ambientales:

Temperatura:	23°C
Humedad:	59%

Observaciones de la calibración:

Notas:

La nueva sensibilidad se extrae del promedio de 10 lecturas a una frecuencia y amplitud de referencia.

La incertidumbre expresada en el cálculo de la nueva sensibilidad corresponde a la incertidumbre expandida de calibración, obtenida multiplicando la incertidumbre típica por el factor de cobertura $k = 2$ que, para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

El equipo se considera apto cuando el error de sensibilidad es menor del 5%, el error de linealidad en amplitud menor del 1% y la máxima desviación en la respuesta en frecuencia menor del 5% entre 100 y 1000Hz.

Calibrado por:

AR

Revisado:

A. Ruiz

Conforme responsable:

Configuración

Resultados (Eje X)

Tecnología:	Piezorresistivo	Rango:	±500 g
Uso de amplificador:	SI	S original:	0,6246 mV/g
Output cadena UUT:	50 mV/g	S actual:	0,627 mV/g
Filtrado utilizado:	Pasa bajo 100kHz (Bessel)	<small>(Sensibilidad hallada en la anterior calibración.)</small>	
V alimentación:	10 Vdc	Montaje:	Adhesivo instantáneo

1. Obtención de la nueva sensibilidad:

NUEVA SENSIBILIDAD: 0,6262 mV/g

Frecuencia de referencia: **160 Hz**

Amplitud de referencia: **10 g rms**

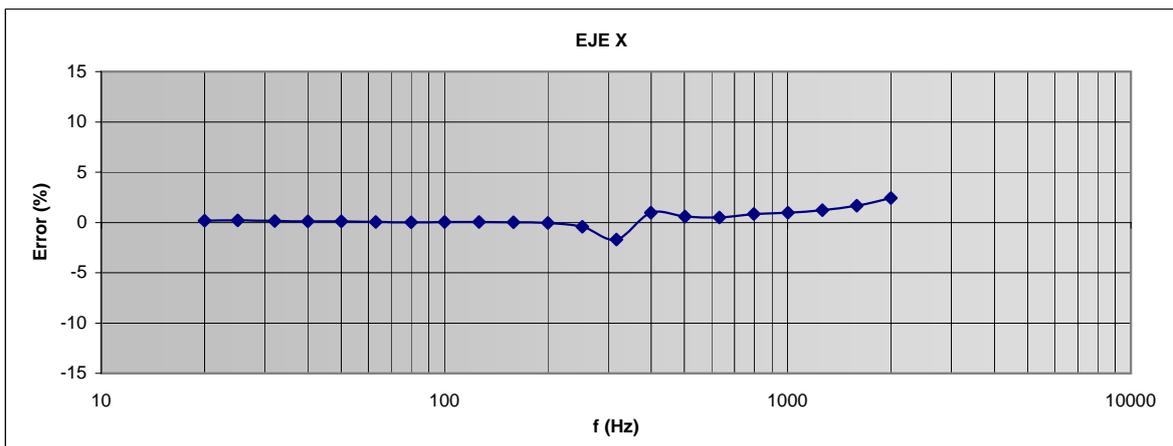
Diferencia con la original: **0,25%**

Incertidumbre = ± **1,0%** (k = 2)

2. Linealidad en amplitud:

Frecuencia [Hz]	Patrón [g _{RMS}]	Equipo [g _{RMS}]	Sensibilidad [mV/g]	Error [%]
160	5,011	5,012	0,6264	-0,03%
160	10,003	10,002	0,6261	0,01%
160	15,070	15,080	0,6266	-0,06%
160	24,134	24,133	0,6261	0,00%

3. Respuesta en frecuencia:



Frecuencia [Hz]	Error [%]	Frecuencia [Hz]	Error [%]
20	0,17	252	-0,43
32	0,15	502	0,58
63	0,05	1002	0,96
126	0,05	2000	2,44

Revisado:

EQUIPO APTO

Conforme responsable:

A. Ruiz

Tabla de incertidumbre de medida

Cantidad X_i	Descripción	Modelo de distribución de probabilidad	Esperanza x_i	Coficiente de sensibilidad c_i	Semi-intervalo	Factor	Contribución relativa %
S_p	Calibración del set acelerómetro + acondicionador patrón	Normal	0	1	0,5	1/2	0,25
δS_p	Deriva en el tiempo de sensibilidad del set patrón	Rectangular	0	1	0,15	1/ $\sqrt{3}$	0,09
S_{pNLx}	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje X)	Rectangular	0	1	N.A.	1/ $\sqrt{3}$	0,00
S_{pNLY}	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje Y)	Rectangular	0	1	N.A.	1/ $\sqrt{3}$	0,00
S_{pNLz}	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje Z)	Rectangular	0	1	N.A.	1/ $\sqrt{3}$	0,00
S_A	Sensibilidad del acondicionador del UUT (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,03	1/ $\sqrt{3}$	0,02
V_p	Voltaje de salida del set patrón (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,4	1/ $\sqrt{3}$	0,23
V_A	Voltaje de salida del set UUT (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,4	1/ $\sqrt{3}$	0,23
S_{Tp}	Sensibilidad transversal del acelerómetro patrón	Especial	0	1	0,16	1/ $\sqrt{18}$	0,04
S_{Tuut}	Sensibilidad transversal del UUT	Especial	0	1	0,3	1/ $\sqrt{18}$	0,07
δV_{p-UUT}	Desfase en las mediciones del patrón y el UUT	Rectangular	0	1	0,05	1/ $\sqrt{3}$	0,03
$I(V_{RTHD})$	Influencia del THD en el ratio de salida	Rectangular	0	1	0,26	1/ $\sqrt{3}$	0,15
$I(S_{pTamb})$	Influencia de la temperatura ambiente en la sensibilidad del acelerómetro patrón	Rectangular	0	Totalmente correlacionadas	0,015	1/ $\sqrt{3}$	0,08
$I(S_{uutTamb})$	Influencia de la temperatura ambiente en la sensibilidad del UUT	Rectangular	0		0,13	1/ $\sqrt{3}$	
$I(S_{p\Delta T})$	Influencia de la variación de temperatura interna del aceler. patrón durante la calibración.	Rectangular	0	1	0,07	1/ $\sqrt{3}$	0,12
$I(S_{uut\Delta T})$	Influencia de la variación de temperatura interna del UUT durante la calibración.	Rectangular	0	1	0,13	1/ $\sqrt{3}$	
$I(V_{RM})$	Influencia de los parámetros de montaje en el ratio de salida	Rectangular	0	1	0,1	1/ $\sqrt{3}$	0,06
$I(S_{pMF})$	Influencia del campo magnético en la sensibilidad del aceler. Patrón	Rectangular	0	1	0,02	1/ $\sqrt{3}$	0,01
s_x	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT_{mx}}$	1	s_x	1	0,002
s_y	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT_{my}}$	1	s_y	1	
s_z	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT_{mz}}$	1	s_z	1	
S_{UUTx}	Sensibilidad del eje X	Incertidumbre estándar (k = 1)	0,6262				0,48
S_{UUTy}	Sensibilidad del eje Y	Incertidumbre estándar (k = 1)					
S_{UUTz}	Sensibilidad del eje Z	Incertidumbre estándar (k = 1)					

Calibración del fabricante:

307100 KANONA Viejo Road
 San Juan Capistrano
 CA 92675-1748 USA
 Tel: +1 (949) 493 8181
 Fax: +1 (949) 661 7231
 www.endevco.com
 www.meggitt.com

MEGGITT

Transverse Sensitivity(%): 0.9

Temperature (°C): 25 , (°F): 77
 Relative Humidity (%): 53
 Input Resistance (ohms): 591
 Output Resistance (ohms): 607
 ZMO (mV): -3.4
 Resonance Frequency (Hz): 17965

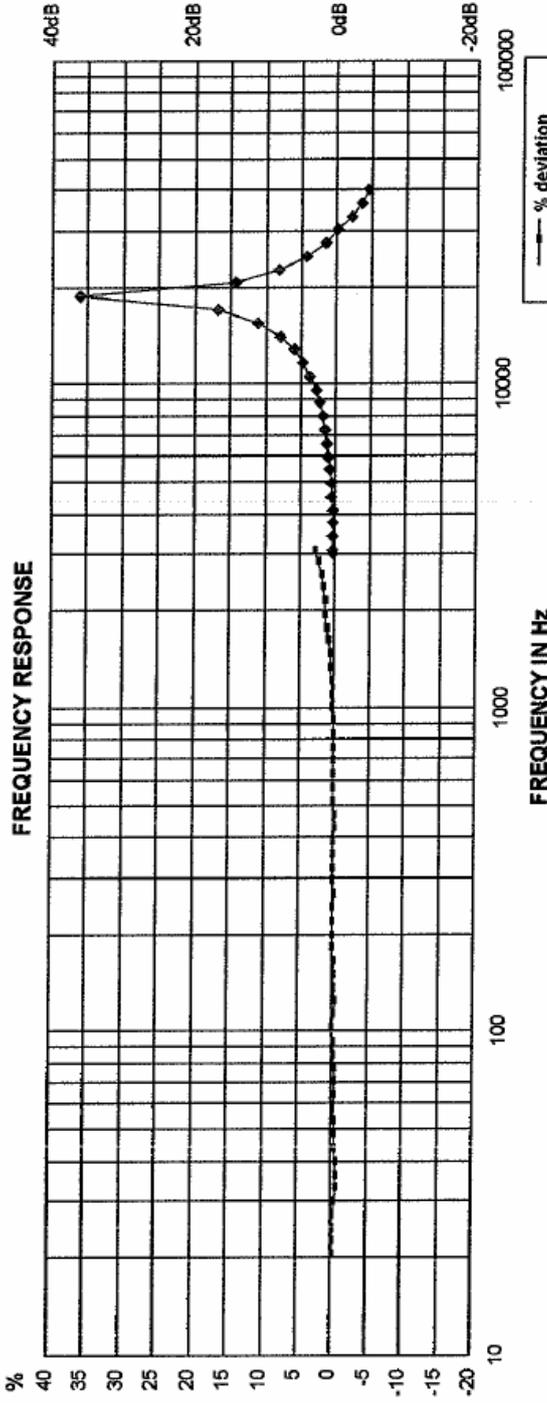
MEGGITT CALIBRATION

Document number: 21739
 Description: 4 Arm PR accelerometer
 Manufacturer: ENDEVCO
 Model Number: 7264C-500-2-300M13
 Serial Number: P10819

Sensitivity:
 0.6246 mV/g @ 100 Hz, 10 g pk
 0.06369 mV/ m/s² @ 100 Hz, 98 m/s² pk

Excitation: 10.0 V

Notes:



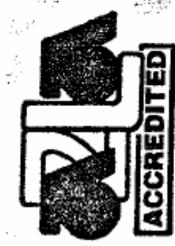
1074
 2377

Console serial number: AC34
 Equipment used: 2911
 Ref Manufacturer: ENDEVCO
 Ref Model number: 2270M18
 Ref Serial number: AB29
 NIST traceability #: 622/275061-07
 Test Name: TCA135

By: Cindy Bi 謝 5.4
 Test Date: 4/30/2008 4:32 PM
 Print Date: 5/2/2008

Uncertainty estimate (95% confidence, k=2)
 +/- 1.5 % 100.0 Hz Sensitivity
 +/- 1.7 % 20.0 < f <= 100.0 Hz
 +/- 1.5 % 100.0 < f <= 2500.0 Hz
 +/- 2.7 % 2500.0 < f <= 10000.0 Hz
 +/- 6.0 % 10000.0 < f <= 20000.0 Hz

MXM #3
 s/w 7.06



MX421 Rev E
 Page 1 of 1
 This instrument was tested using comparison calibrations on Endevco's Automated Accelerometer Calibration System (AACS) PN 69357.
 Certificate No. 1761.01

Analizando ambos informes se observa que los resultados en cuanto a la obtención de la sensibilidad difieren sutilmente. Este resultado era de esperar teniendo en cuenta que el procedimiento para la obtención de la sensibilidad es diferente en ambos sistemas. Mediante el antiguo sistema, la sensibilidad era la media hallada en las 4 observaciones a distintas amplitudes, mientras que mediante el sistema nuevo, la sensibilidad es la media hallada en las 10 repeticiones a una misma amplitud (10g) y frecuencia de referencia (160Hz).

En este caso, la diferencia es de solamente un 0,08%, pero dependiendo de la linealidad del acelerómetro, esta diferencia podría llegar a ser mayor.

Como reflexión de esto último, en el informe antiguo se observa que a una amplitud de 10g la sensibilidad es prácticamente la misma que la extraída en la calibración de sensibilidad con el sistema nuevo.

En cuanto a la calibración en amplitud, el sistema antiguo no la contemplaba como una etapa de calibración independiente: se realizaba la obtención de la sensibilidad y la comprobación de linealidad en una misma etapa.

A medida que aumenta la amplitud, la sensibilidad va variando. Analizando ambos informes, se observa que en la calibración antigua aparecía un error mayor a amplitudes elevadas que mediante el sistema nuevo. Esto es debido a que no se realizaba la corrección debido al desfase de lecturas. Mediante el sistema nuevo, al realizar dicha corrección, el error a amplitudes elevadas queda minimizado.

Respecto a la determinación de la respuesta en frecuencia, ambas gráficas parecen iguales a simple vista. Una de las diferencias más evidentes encontradas es que el antiguo sistema realizaba un barrido en frecuencia de manera lineal, mientras que el nuevo sistema realiza un barrido logarítmico, tal y como se presenta en el informe. La desventaja de realizar un barrido lineal era que las muestras se concentraban a frecuencias altas en la gráfica.

Mediante el sistema nuevo, a pesar de obtener únicamente 10 muestras frente a las 50 muestras del antiguo, siempre realiza el barrido en pasos logarítmicos. De esta manera, con una menor cantidad de muestras, se logra obtener una información más ordenada en el gráfico.

Como una imagen vale más que mil palabras, en las siguientes figuras 8.14 y 8.15 se muestra, respectivamente, la diferencia entre el barrido lineal realizado por la antigua aplicación y el barrido logarítmico realizado por la nueva.

A simple vista se deduce que mediante el sistema antiguo se obtenía un número de muestras muy elevado y la información obtenida era redundante a frecuencias elevadas, mientras que a frecuencias bajas la información obtenida era prácticamente nula. Mediante el nuevo sistema, las muestras se reparten por igual a lo largo del ancho de banda calibrado, contando además con la ventaja de poder aumentar el número de muestras por década a nuestro antojo.

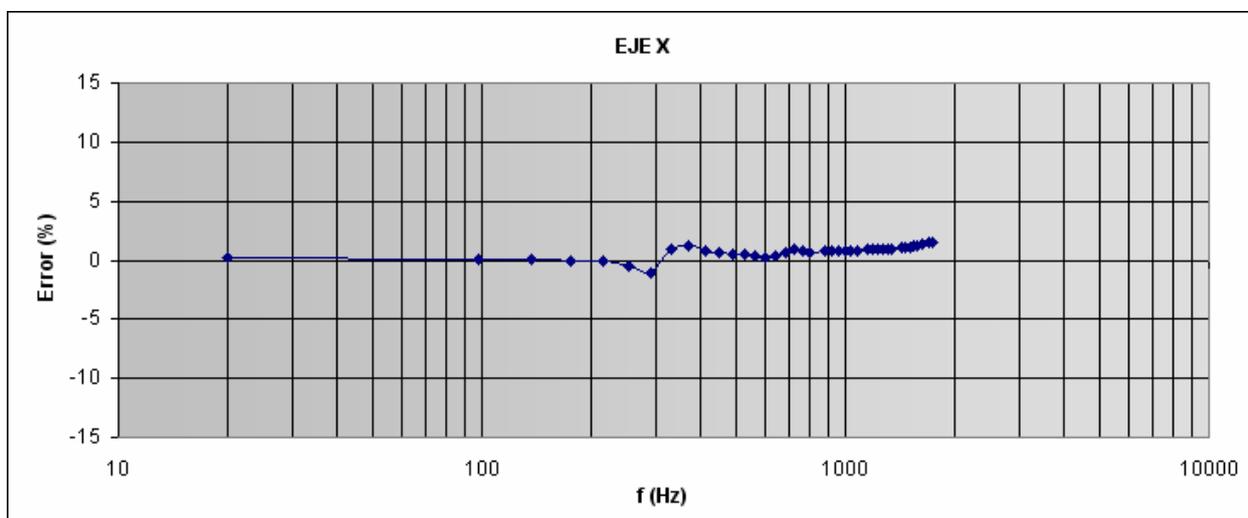


Figura 8.14. Barrido lineal de 50 muestras realizado por la antigua aplicación (pasado a Excel).

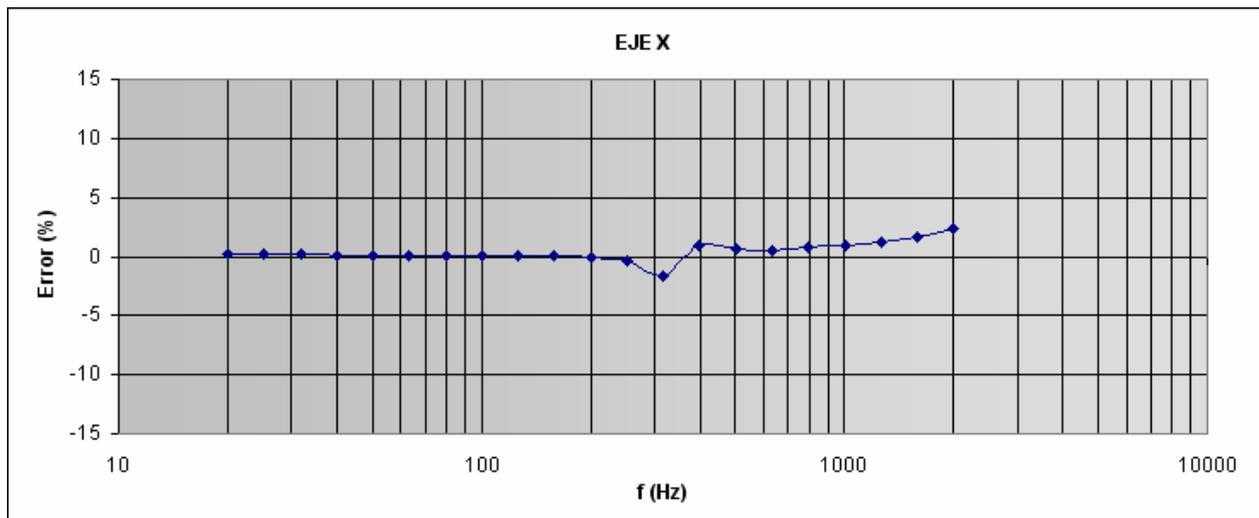


Figura 8.15. Barrido logarítmico de 10 muestras realizado por la nueva aplicación (gráfico obtenido directamente del informe de calibración).

De los resultados de la respuesta en frecuencia, se evidencia un pico abrupto en frecuencias comprendidas entre los 250 y 400Hz. Este suceso es debido a la alineación del eje de máxima sensibilidad transversal del UUT con el eje de máximo movimiento transversal del shaker, y se da a esa frecuencia porque es una de las frecuencias de resonancia del montaje en las que el movimiento transversal se acentúa ligeramente. En los pocos casos en los que se da este fenómeno, basta con repetir la calibración orientando el UUT en otra posición angular respecto al eje de movimiento del shaker para que no coincidan los ejes de máxima sensibilidad transversal del acelerómetro con el de máximo movimiento transversal del conjunto [40].

8.3. Pruebas de reproducibilidad utilizando distintas técnicas de montaje

Existen distintos métodos a la hora de fijar el acelerómetro en calibración sobre la superficie de montaje del acelerómetro patrón. El simple hecho de que ambos acelerómetros no forman un cuerpo único aporta un error en la medida que se acentúa según aumenta la frecuencia de la vibración. Este error y limitación del ancho de banda depende directamente del método y técnica de montaje utilizado [21] [22].

El método más recomendado por la mayoría de fabricantes es el que utiliza una rosca para fijar ambos acelerómetros, debido a la rapidez y fiabilidad del montaje. No obstante, no siempre es posible utilizar este método porque hay muchos acelerómetros que no están preparados para ello, por lo que en esos casos no queda más remedio que recurrir a otros métodos.



Figura 8.16. Ejemplos de elementos de fijación roscados.

Otro método de fijación es el que utiliza un adhesivo instantáneo, como el *Super Glue 3* de *Loctite*. Para utilizar este método se hace necesario el uso de una base de montaje adicional para permitir una superficie apta para el adhesivo instantáneo. Esta base de montaje va roscada al acelerómetro patrón y por el otro lado ofrece una superficie totalmente plana con micro-surcos para que el adhesivo penetre en ellos. Este método es muy fiable pero presenta la enorme desventaja de la complejidad y peligrosidad a la hora de despegar el acelerómetro y retirar los restos de adhesivo.



Figura 8.17. Base de montaje para el uso del método del adhesivo instantáneo.

Por último, el método más recurrido en calibraciones a frecuencias medias (hasta el orden de 1 o 2 kHz) es el que utiliza una cinta de doble cara como elemento fijador. En este caso también es imprescindible el uso de una base de montaje adicional. Esta base debe ser lo más plana y lisa posible para aprovechar la máxima superficie de fijación de la cinta de doble cara, por lo que la base utilizada para el montaje con adhesivo instantáneo no servirá. En lugar de ello, se utiliza una base de mayor superficie y fabricada mediante una aleación con titanio para aprovechar sus excelentes propiedades mecánicas como su dureza y resistencia a la tracción-compresión.



Figura 8.18. Base de montaje para el uso del método de la cinta de doble cara.

La mayor desventaja del uso de la cinta de doble cara es la limitación del ancho de banda de calibración. El efecto producido por la relativamente pobre fijación de la cinta se manifiesta a frecuencias relativamente elevadas tal y como se verá a continuación en los siguientes apartados.

8.3.1. Comparativa mediante un acelerómetro piezorresistivo uniaxial.

Para comparar los resultados utilizando el método del **adhesivo instantáneo** y la **cinta de doble cara** en acelerómetros uniaxiales miniaturizados para automoción se utilizó el modelo de acelerómetro 7264B de $\pm 2000g$ de Endevco (ver figura 8.13).

El estado del acelerómetro era excelente ya que era nuevo y acababa de venir del fabricante.

Como preparación, todos los equipos que intervienen en la calibración se conectaron un mínimo de 30 minutos antes de empezar las pruebas. Además, el acelerómetro bajo prueba se dejó un mínimo de 12 horas a las condiciones ambientales del laboratorio ($22 \pm 2^\circ C$, $40 \pm 10\%HR$).

Se realizó el primer montaje del acelerómetro utilizando el método de la cinta de doble cara, asegurándose antes de que no hubiese ninguna impureza en las superficies de contacto y que éstas fueran completamente lisas y uniformes.

La siguiente prueba se realizó utilizando el método del adhesivo instantáneo. El resto de condiciones son idénticas al de la prueba anterior. Se realizaron ambas pruebas seguidas sin desconectar ningún equipo y dejando un tiempo prudencial para el secado del adhesivo instantáneo. Se realizaron varias calibraciones seguidas para comprobar que los resultados eran repetibles mediante ambos métodos.

Los resultados de la calibración fueron los siguientes:

1. Obtención de la nueva sensibilidad:

Cinta de doble cara

Patrón	Equipo	Sensibilidad	Media	s
10,0096	10,0097	0,231067	0,2311	0,001%
10,0049	10,0046	0,231057		
10,0023	10,0024	0,231067		
10,0000	9,9997	0,231057		
9,9980	9,9980	0,231063		
9,9962	9,9963	0,231066		
9,9943	9,9944	0,231066		
9,9926	9,9926	0,231064		
9,9916	9,9915	0,231062		
9,9902	9,9904	0,231069		

Frecuencia de referencia: 160 Hz
Amplitud de referencia: 10 g rms

Sensibilidad original = 0.2321mV/g

Nueva sensibilidad = 0.2311mV/g (0.231064 mV/g)

Diferencia con la original = -0.43%

Desviación estándar de la media = 0.0006%

Adhesivo instantáneo

Patrón	Equipo	Sensibilidad	Media	s
10,0052	10,0041	0,231147	0,2312	0,003%
10,0031	10,0022	0,231153		
10,0009	10,0005	0,231163		
10,0002	9,9998	0,231164		
9,9987	9,9979	0,231153		
9,9974	9,9973	0,231171		
9,9957	9,9961	0,231181		
9,9949	9,9952	0,231180		
9,9935	9,9947	0,231201		
9,9927	9,9944	0,231211		

Frecuencia de referencia: 160 Hz
Amplitud de referencia: 10 g rms

Sensibilidad original = 0.2321mV/g

Nueva sensibilidad = 0.2312mV/g (0.231172 mV/g)

Diferencia con la original = 0.39%

Desviación estándar de la media = 0.0029%

2. Linealidad en amplitud:

Cinta de doble cara:

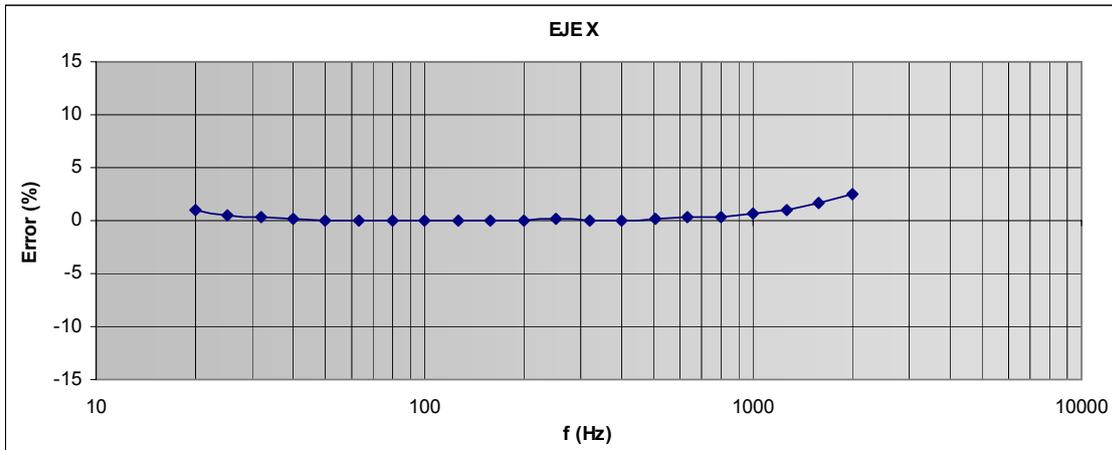
Frecuencia [Hz]	Patrón [g RMS]	Equipo [g RMS]	Sensibilidad [mV/g]	Error [%]
160	4,834	4,840	0,2314	-0,12%
160	10,020	10,020	0,2311	0,00%
160	15,101	15,110	0,2312	-0,06%
160	23,989	24,004	0,2312	-0,06%

Adhesivo instantáneo:

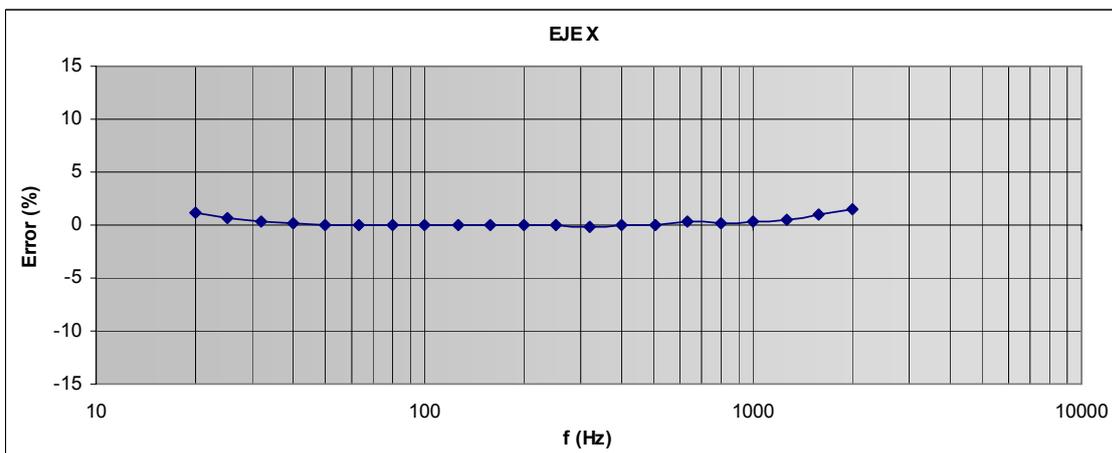
Frecuencia [Hz]	Patrón [g RMS]	Equipo [g RMS]	Sensibilidad [mV/g]	Error [%]
160	4,811	4,818	0,2315	-0,14%
160	10,016	10,018	0,2312	-0,01%
160	15,125	15,138	0,2314	-0,08%
160	24,137	24,146	0,2313	-0,04%

3. Respuesta en frecuencia:

Cinta de doble cara:



Adhesivo instantáneo:



Cinta de doble cara:

Frecuencia	Sensibilidad	Error (%)
20	0,2334	1,01
25	0,2323	0,54
32	0,2317	0,28
40	0,2314	0,14
50	0,2313	0,12
63	0,2311	0,00
80	0,2309	-0,07
100	0,2311	0,03
126	0,2310	-0,02
159	0,2310	-0,02
200	0,2309	-0,08
252	0,2313	0,11
317	0,2311	0,00
399	0,2311	0,03
502	0,2313	0,09
632	0,2316	0,23
796	0,2319	0,37
1002	0,2324	0,58
1262	0,2333	0,98
1589	0,2347	1,58
2000	0,2369	2,53

Adhesivo instantáneo:

Frecuencia	Sensibilidad	Error (%)
20	0,2339	1,19
25	0,2326	0,60
32	0,2319	0,33
40	0,2316	0,17
50	0,2312	0,03
63	0,2313	0,04
80	0,2311	-0,03
100	0,2314	0,08
126	0,2312	0,01
159	0,2312	-0,01
200	0,2312	0,02
252	0,2310	-0,05
317	0,2308	-0,14
399	0,2313	0,07
502	0,2313	0,06
632	0,2318	0,26
796	0,2314	0,10
1002	0,2318	0,26
1262	0,2324	0,55
1589	0,2333	0,92
2000	0,2347	1,53

De los resultados se observa que ambos métodos son igual de válidos para extraer la sensibilidad y comprobar la linealidad en amplitud del acelerómetro. En cuanto a la respuesta en frecuencia, el método mediante adhesivo instantáneo proporciona una mayor exactitud a frecuencias superiores a 1kHz. A frecuencias inferiores, ambos métodos proporcionan resultados casi idénticos.

Después de todas las pruebas realizadas con varias muestras de este tipo (uniaxiales miniatura) la diferencia encontrada en cuanto a la obtención de la sensibilidad mediante ambos métodos está en torno al 0,1%.

8.3.2. Comparativa mediante un acelerómetro IEPE triaxial.

En este caso se realiza una comparativa utilizando el método de la **cinta de doble cara** y el método del **elemento roscado**.

Prácticamente la totalidad de acelerómetros disponibles en la empresa que permiten montaje roscado son triaxiales y de tecnología piezoeléctrica. Por tanto, para realizar la siguiente comparativa, se utiliza un acelerómetro triaxial de la marca *PCB Piezotronics* modelo 356A15 de $\pm 50g$ de tecnología piezoeléctrica con electrónica incorporada (ICP[®]).

Se realizó el primer montaje del acelerómetro utilizando el método de elemento roscado, aplicando para ello, un par próximo al que especifica el fabricante, es decir, entre 113 y 225 N·cm. Este par se puede conseguir fácilmente atornillando el acelerómetro con la propia mano, sin ejercer excesiva fuerza, lo suficiente para que el acelerómetro quede anclado firmemente.

La siguiente prueba se realizó utilizando el método de la cinta de doble cara. Para ello se utilizó la base de montaje específica para ello.



Figura 8.19. Detalle del montaje de un acelerómetro utilizando el método de la cinta adhesiva.

Los resultados de la calibración fueron los siguientes:

1. Obtención de la nueva sensibilidad:

Cinta de doble cara

Patrón	Equipo	Sensibilidad	Media	s
10,0088	10,0072	97,0168	97,0318	0,002%
10,0043	10,0038	97,0267		
10,0012	10,0011	97,0301		
9,9985	9,9984	97,0310		
9,9963	9,9964	97,0332		
9,9944	9,9944	97,0315		
9,9929	9,9932	97,0351		
9,9907	9,9916	97,0401		
9,9885	9,9892	97,0384		
9,9879	9,9882	97,0350		

Frecuencia de referencia: 160 Hz
Amplitud de referencia: 10 g rms

Sensibilidad original = 97.49 mV/g
Nueva sensibilidad = 97.0318 mV/g
Diferencia con la original = 0.47%
Desviación estándar de la media = 0.0021%

Elemento roscado

Patrón	Equipo	Sensibilidad	Media	s
10,0001	9,9995	96,9542	96,9598	0,001%
9,9982	9,9978	96,9558		
9,9964	9,9962	96,9580		
9,9949	9,9948	96,9592		
9,9937	9,9938	96,9610		
9,9928	9,9928	96,9605		
9,9919	9,9921	96,9619		
9,9910	9,9913	96,9621		
9,9905	9,9906	96,9610		
9,9897	9,9901	96,9641		

Frecuencia de referencia: 160 Hz
Amplitud de referencia: 10 g rms

Sensibilidad original = 97.49 mV/g
Nueva sensibilidad = 96.9598 mV/g
Diferencia con la original = 0.54%
Desviación estándar de la media = 0.0010%

2. Linealidad en amplitud:

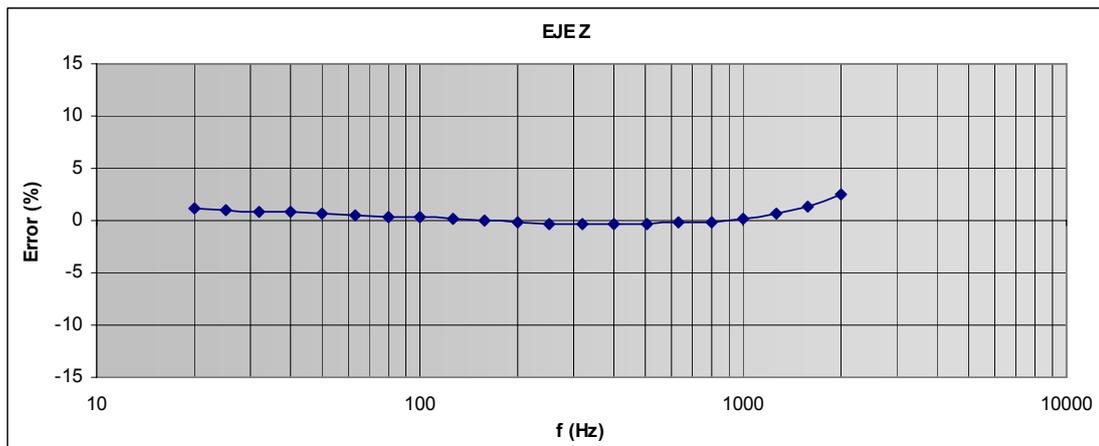
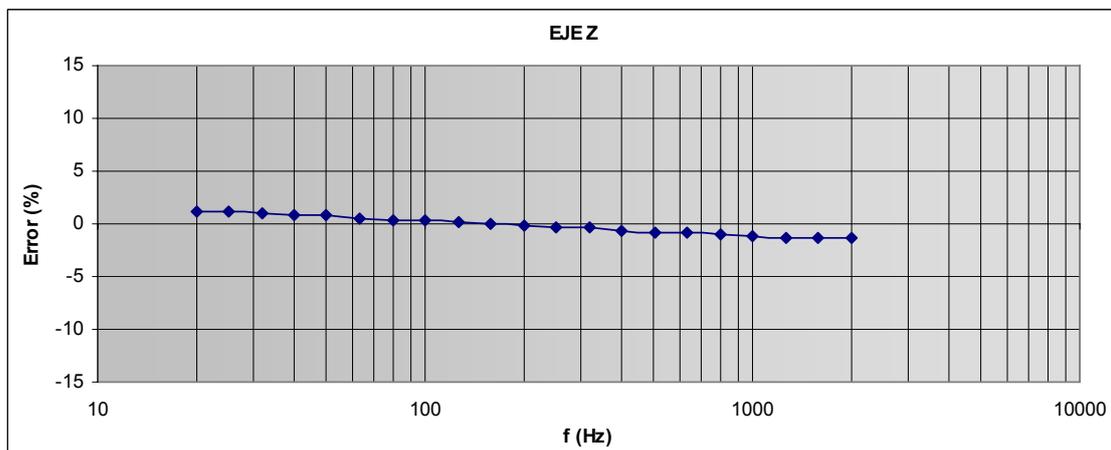
Cinta de doble cara:

Frecuencia [Hz]	Patrón [g _{RMS}]	Equipo [g _{RMS}]	Sensibilidad [mV/g]	Error [%]
160	4,835	4,835	97,0343	0,00%
160	10,017	10,017	97,0368	-0,01%
160	15,051	15,057	97,0699	-0,04%
160	23,844	23,849	97,0525	-0,02%

Elemento roscado:

Frecuencia [Hz]	Patrón [g _{RMS}]	Equipo [g _{RMS}]	Sensibilidad [mV/g]	Error [%]
160	4,815	4,815	96,9609	0,00%
160	10,016	10,016	96,9585	0,00%
160	15,104	15,108	96,9873	-0,03%
160	24,029	24,031	96,9673	-0,01%

3. Respuesta en frecuencia:

Cinta de doble cara:*Elemento roscado:**Cinta de doble cara:*

Frecuencia	Sensibilidad	Error (%)
20	98,1939	1,20
25	98,0387	1,04
32	97,9063	0,90
40	97,7747	0,77
50	97,6507	0,64
63	97,5084	0,49
80	97,3471	0,32
100	97,3272	0,30
126	97,1546	0,13
159	97,0260	-0,01
200	96,8746	-0,16
252	96,7659	-0,27
317	96,7012	-0,34
399	96,6703	-0,37
502	96,6540	-0,39
632	96,8436	-0,19
796	96,8810	-0,16
1002	97,1861	0,16
1262	97,7053	0,69
1589	98,3587	1,37
2000	99,4697	2,51

Elemento roscado:

Frecuencia	Sensibilidad	Error (%)
20	98,1611	1,24
25	98,0165	1,09
32	97,9042	0,97
40	97,7758	0,84
50	97,8274	0,89
63	97,5091	0,57
80	97,3209	0,37
100	97,3197	0,37
126	97,1303	0,18
159	96,9645	0,00
200	96,8012	-0,16
252	96,6457	-0,32
317	96,5646	-0,41
399	96,3786	-0,60
502	96,2315	-0,75
632	96,1905	-0,79
796	95,9415	-1,05
1002	95,8212	-1,17
1262	95,7347	-1,26
1589	95,6819	-1,32
2000	95,6668	-1,33

Una vez más se observa que los resultados de la obtención de sensibilidad y la linealidad en amplitud son casi idénticos mediante ambos métodos, hallando unas diferencias de en torno al 0.1%.

No obstante, en esta prueba se hace más evidente la repercusión que tiene el método de montaje con respecto a la respuesta en frecuencia. Se observa que a frecuencias bajas/medias el comportamiento mediante ambos métodos es prácticamente idéntico, pero a frecuencias más elevadas la cinta no es capaz de mantener totalmente solidarios ambos acelerómetros y se aprecia cómo la sensibilidad aumenta exponencialmente a partir de una cierta frecuencia.

En este caso, la diferencia vista en la respuesta en frecuencia es mayor que en la anterior prueba debido, principalmente, a dos motivos:

1. El método mediante elemento roscado es el que permite un mayor ancho de banda de todos los métodos analizados. Por tanto, si en el anterior caso ya se ha observado una diferencia entre los otros dos métodos (siendo el peor caso el de la cinta de doble cara), en el segundo caso, la diferencia debe ser mayor, ya que se está comparando el mejor caso con el peor caso.
2. En la segunda prueba, la masa del acelerómetro era mayor que en el anterior, lo cual hace mermar la eficacia de la cinta de doble cara a frecuencias elevadas. A esto hay que añadirle estudios científicos que han demostrado que una mayor masa del UUT provoca un aumento del error en las calibraciones a altas frecuencias mediante el método "Back to back" (por comparación con un acelerómetro de referencia)

Para más información sobre estos estudios, consultar el documento técnico 310 de ENDEVCO [20]

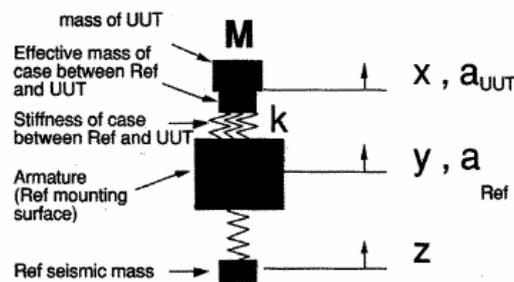


Figura 8.20. Modelo del conjunto Acelerómetro de referencia – UUT teniendo en cuenta la masa del UUT.

8.3.3. Conclusiones del estudio.

En conclusión, los tres métodos, si se ponen en práctica correctamente y tomando todas las precauciones, son igualmente válidos para la calibración de acelerómetros, hallando una diferencia máxima entre ellos inferior al 0.1%. No obstante, hay que tener en cuenta que los métodos de adhesivo instantáneo y, sobretodo, de cinta de doble cara, son adecuados para calibraciones en un rango de frecuencia de hasta 1kHz. Los resultados obtenidos a frecuencias superiores serán meramente orientativos a no ser que se apliquen las correcciones adecuadas.

Para obtener resultados fiables a frecuencias superiores a 1kHz mediante el método de cinta de doble cara, se pueden aplicar correcciones en función de la frecuencia y masa del UUT. Para obtener dichas correcciones, es necesario llevar a cabo un estudio consistente en un conjunto de calibraciones de acelerómetros con distintas masas utilizando los tres métodos y comparando los resultados tomando como referencia los obtenidos mediante elemento roscado.

8.4. Repetibilidad y deriva en el tiempo

Para comprobar la repetibilidad y la deriva en el tiempo de las calibraciones se realizaron una serie de pruebas en condiciones de repetibilidad a lo largo de un periodo de tiempo. Estas pruebas se efectuaron con las mismas muestras que las utilizadas en el apartado 7.3.

El estudio se realizó dejando un tiempo de unos 3 minutos entre prueba y prueba. A pesar de aprovechar únicamente los resultados de la obtención de la nueva sensibilidad, se realizó la calibración completa cada vez, por lo que cada prueba tiene una duración de unos 4 minutos.

Los resultados de la obtención de la nueva sensibilidad mediante el acelerómetro uniaxial Endevco 7264B fueron los siguientes:

<i>Nº de prueba</i>	<i>Sensibilidad</i>	<i>Desviación (%)</i>
1	0.231369 mV/g	0.18
2	0.231202 mV/g	0.11
3	0.231133 mV/g	0.08
4	0.231064 mV/g	0.05
5	0.231020 mV/g	0.03
6	0.231002 mV/g	0.02
7	0.230954 mV/g	0.00

Tabla 8.1. Resultados de las pruebas de repetibilidad con un acelerómetro Endevco 7264B.

Se realizó el mismo estudio para el acelerómetro triaxial PCB 356A15, obteniendo los siguientes resultados:

<i>Nº de prueba</i>	<i>Sensibilidad</i>	<i>Desviación (%)</i>
1	96.8520 mV/g	-0.19
2	96.9792 mV/g	-0.05
3	97.0059 mV/g	-0.03
4	97.0207 mV/g	-0.01
5	97.0299 mV/g	-0.002
6	97.0361 mV/g	0.004
7	97.0318 mV/g	0.000

Tabla 8.2. Resultados de las pruebas de repetibilidad con un acelerómetro triaxial PCB 356A15.

De las pruebas realizadas se observa que existe una deriva en el tiempo en los resultados tras varias calibraciones en un breve espacio de tiempo. Seguidamente, los resultados se estabilizan y se consigue una no repetibilidad inferior al 0.05%. Este resultado es despreciable a la hora de la estimación de la incertidumbre de medida, debido a que es del orden de 10 veces inferior a la máxima contribución a la incertidumbre.

En todas las pruebas realizadas (más de 10 además de las ya expuestas), la desviación máxima hallada debida a la deriva de los resultados de calibración fue inferior a $\pm 0.25\%$. Éste sí es un resultado a tener en cuenta en la estimación de la incertidumbre de calibración.

Para minimizar la contribución a la incertidumbre debida a esta deriva en el tiempo a corto plazo se dota a la aplicación de calibración de una opción de calentamiento que se ejecutará justo antes de empezar la calibración de cada acelerómetro. Dicho calentamiento consiste en aplicar una serie de vibraciones a amplitudes y frecuencias diferentes durante un espacio de tiempo de, aproximadamente, 2 minutos. Acto seguido, se procede a la calibración de manera automática. Gracias a este sistema ya no se debe tener en cuenta la repetibilidad y deriva en la estimación de la incertidumbre de medida del resultado.

8.5. Pruebas con el módulo de conmutación

A continuación se analiza el funcionamiento del sistema utilizando el módulo de conmutación, es decir, se realiza una comparativa de los resultados utilizando un multímetro (con conmutación) y utilizando dos multímetros.

Las pruebas se realizaron mediante un acelerómetro piezorresistivo uniaxial de la marca Endevco, modelo 7285 de $\pm 2000g$.

El acelerómetro se montó utilizando el método más habitual en este tipo de acelerómetros, la cinta de doble cara.



Figura 8.21. Montaje del UUT sobre el acelerómetro patrón.

Una vez preparado, se realizaron una serie de calibraciones en condiciones de repetibilidad, primero utilizando dos multímetros (uno para registrar las medidas del patrón y otro para las del UUT) y seguidamente, utilizando un solo multímetro mediante el módulo de conmutación. Los resultados, una vez estabilizadas las medidas, se detallan a continuación:

1. Obtención de la nueva sensibilidad

2 multímetros

Patrón	Equipo	Sensibilidad	Media	s
9,8880	9,8873	0,23426	0,23428	0,003%
9,8828	9,8826	0,23427		
9,8791	9,8789	0,23427		
9,8713	9,8734	0,23432		
9,8723	9,8715	0,23426		
9,8697	9,8690	0,23426		
9,8672	9,8671	0,23427		
9,8652	9,8654	0,23428		
9,8631	9,8633	0,23428		
9,8612	9,8615	0,23428		

Frecuencia de referencia: 160 Hz
 Amplitud de referencia: 10 g rms

V alimentación = 10V

Sensibilidad original = 0.2319 mV/g

Nueva sensibilidad = 0.2343 mV/g

Diferencia con la original = 1.03%

Desviación estándar de la media = 0.0026%

1 multímetro (conmutado)

Patrón	Equipo	Sensibilidad	Media	s
9,9190	9,9197	0,23425	0,23423	0,001%
9,9158	9,9159	0,23423		
9,9137	9,9139	0,23424		
9,9120	9,9120	0,23423		
9,9100	9,9101	0,23423		
9,9085	9,9087	0,23424		
9,9074	9,9072	0,23423		
9,9063	9,9061	0,23423		
9,9052	9,9048	0,23422		
9,9042	9,9039	0,23423		

Frecuencia de referencia: 160 Hz
 Amplitud de referencia: 10 g rms

V alimentación = 10V

Sensibilidad original = 0.2319 mV/g

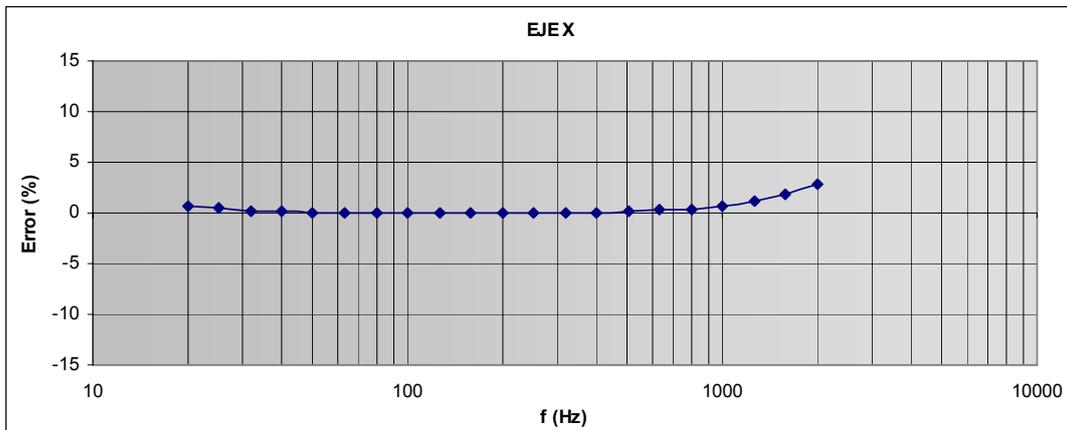
Nueva sensibilidad = 0.2342 mV/g

Diferencia con la original = 1.00%

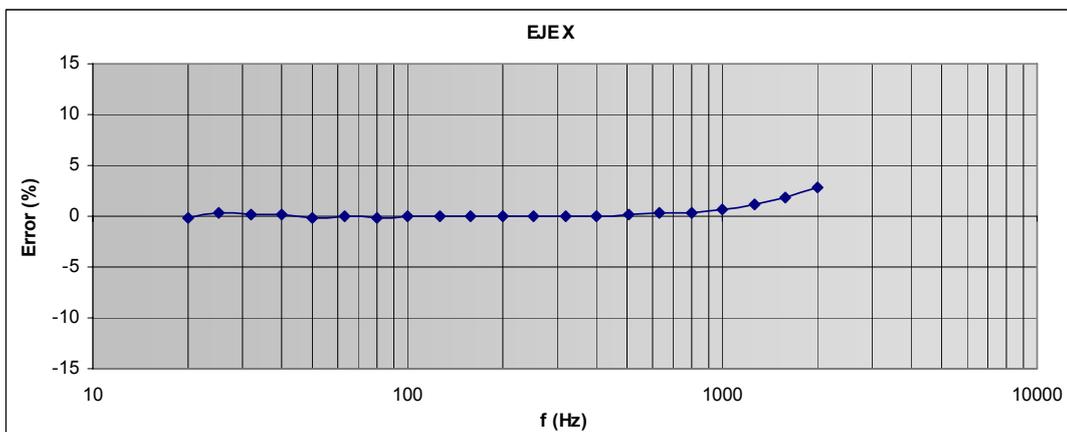
Desviación estándar de la media = 0.0010%

2. Respuesta en frecuencia

2 multímetros



1 multímetro (conmutado)



Las diferencias encontradas son despreciables y se deben, mayormente, a la propia deriva de las medidas en el tiempo como se observó en el anterior apartado.

En cuanto a la respuesta en frecuencia, los resultados fueron casi idénticos. Las sutiles diferencias se deben a las propias incertidumbres de medida de los multímetros, ya que hay que tener en cuenta que en el primer caso se utilizan dos multímetros diferentes para medir la señal del patrón y el UUT, mientras que en el segundo caso se utiliza un mismo multímetro para realizar todas las lecturas. No obstante, esto ya se tiene en cuenta en la estimación de la incertidumbre de calibración.

8.6. Desfase en las lecturas entre UUT y el acelerómetro patrón

Debido a que no es posible registrar la lectura del patrón y del UUT al mismo tiempo por limitaciones del bus de comunicación, existe un desfase en las lecturas que puede contribuir a la incertidumbre de medida en los resultados de la calibración. Dicha incertidumbre es debida a que la señal ofrecida por el *shaker* no es completamente estable en el momento de realizar las mediciones, sino que varía de manera *quasi* lineal. Esto significa que la amplitud de aceleración en el momento de la lectura del UUT ha podido variar con respecto a la amplitud leída por el patrón momentos antes.

Para contrarrestar este efecto, tal y como indica la norma ISO 16063-21, se realizan dos lecturas del patrón, una antes y la otra después de la lectura del UUT, y se realiza el promedio. De esta forma, se realiza una mejor aproximación de la lectura del patrón en el instante de lectura del UUT.

En este apartado se estudia el error que se puede llegar a cometer utilizando este método de aproximación y el error que se cometería si no se utilizara dicho método.

A continuación se exponen los puntos clave que se han creído necesarios a la hora de realizar el estudio:

1. La preparación de los equipos es fundamental. Todos los instrumentos deben haber alcanzado la estabilidad térmica antes de llevar a cabo el estudio. Para conseguir la temperatura habitual de funcionamiento del amplificador de potencia, éste se ha utilizado para realizar diversas calibraciones antes del estudio.
2. El estudio se centra en detectar la estabilidad en el tiempo de la amplitud de vibración proporcionada por el shaker y así determinar el error que se cometería al realizar dos medidas consecutivas con un multímetro.
3. Debido a que la respuesta del sistema se ve muy afectada dependiendo de la masa (*mass load*) que se le fije al *shaker*, el estudio se ha realizado utilizando diversas masas que van, desde los 40 gramos (masa del acelerómetro patrón) hasta los 100 gramos, utilizando para ello, las diversas bases de montaje y distintos acelerómetros fijados en ellas.
4. Las medidas se deben realizar en las mismas condiciones de calibración. Por tanto, hay que dejar un corto espacio de tiempo (unos 5 segundos) para la estabilización de la señal del shaker antes de proceder a las lecturas.
5. Se realizan tantas pruebas como masas escogidas. Cada prueba consistirá en analizar el comportamiento del shaker cuando se realiza la obtención de sensibilidad y cuando se realiza la comprobación de la linealidad en amplitud.

8.6.1. Desfase de lecturas en la obtención de la sensibilidad.

El método utilizado para obtener los resultados se describe a continuación.

Después de la preparación, para la prueba correspondiente a la obtención de la sensibilidad, se aplica una aceleración sinusoidal de unos 10g RMS y se realizan tres medidas consecutivas de la salida del acelerómetro patrón. La primera medida simula la primera lectura del patrón durante la calibración de la sensibilidad. La segunda medida se correspondería con la aceleración en el instante de medida del UUT. La tercera medida simula la segunda lectura del patrón.

Este proceso se repite 10 veces consecutivas, simulando la calibración de sensibilidad realizada por el programa de calibración de acelerómetros.

Para llevar a cabo dicho método se elabora un sencillo software que se encarga de automatizar el proceso y de escribir los datos en un archivo de Microsoft Excel.

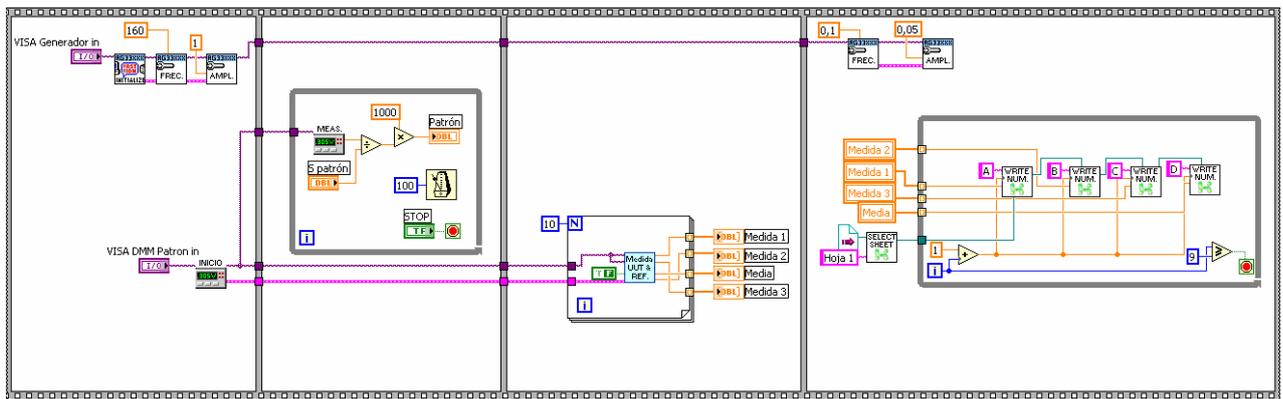


Figura 8.22. Software diseñado para realizar de manera automatizada el estudio de desfase de medidas.

Una vez obtenidos los resultados se elabora una tabla en la que se compara el error provocado por el desfase de medidas sin realizar la aproximación del promedio de lecturas patrón, con el error que provoca el desfase una vez aplicada la aproximación.

La primera prueba se ha realizado situando una masa total de 45 gramos, conseguida mediante el acelerómetro patrón (40 gramos), un acelerómetro uniaxial Endevco 7285 y una base de montaje pequeña. Los resultados se ilustran en la siguiente tabla.

Patrón 1	A (instante lectura)	Patrón 2	Media Patrón	Error sin aproximar	Error con aproximación
10,9611	10,9580	10,9569	10,9590	-0,0282%	-0,0089%
10,9538	10,9526	10,9515	10,9527	-0,0116%	-0,0010%
10,9494	10,9493	10,9471	10,9482	-0,0008%	0,0096%
10,9453	10,9435	10,9431	10,9442	-0,0159%	-0,0062%
10,9431	10,9416	10,9412	10,9421	-0,0142%	-0,0053%
10,9413	10,9414	10,9396	10,9405	0,0012%	0,0087%
10,9388	10,9388	10,9391	10,9390	-0,0008%	-0,0020%
10,9390	10,9381	10,9409	10,9399	-0,0084%	-0,0173%
10,9438	10,9425	10,9422	10,9430	-0,0120%	-0,0047%
10,9416	10,9420	10,9420	10,9418	0,0033%	0,0017%

A (instante lectura) = Amplitud de referencia en el instante de lectura del equipo

Error sin aproximar = A (instante lectura) - Patrón 1

Error con aproximación = A (instante lectura) - Media Patrón

Tabla 8.3. Resultados del estudio del desfase de lecturas para una masa de 45 gramos.

Como se observa, el error causado por el desfase, en este caso, llega a un 0,028%, mientras que el error máximo aplicando la aproximación del promedio de lecturas patrón es de un 0,0089%.

En este caso la diferencia no es representativa debido a que, al haber una masa tan reducida, la amplitud del shaker se estabiliza rápidamente y la aproximación deja de cobrar importancia a partir de la tercera serie de medidas.

Seguidamente se realiza el mismo estudio aplicando una masa de unos 58 gramos, es decir, el acelerómetro patrón y una base de montaje para acelerómetros de mayor tamaño.

Los resultados se observan en la tabla 8.4.

Patrón 1	A (instante lectura)	Patrón 2	Media Patrón	Error sin aproximar	Error con aproximación
10,1269	10,1249	10,1233	10,1251	-0,0199%	-0,0023%
10,1215	10,1201	10,1193	10,1204	-0,0131%	-0,0026%
10,1176	10,1165	10,1155	10,1166	-0,0112%	-0,0005%
10,1140	10,1132	10,1120	10,1130	-0,0080%	0,0017%
10,1106	10,1091	10,1083	10,1094	-0,0147%	-0,0030%
10,1072	10,1062	10,1054	10,1063	-0,0097%	-0,0009%
10,1044	10,1041	10,1039	10,1041	-0,0036%	-0,0009%
10,1027	10,1031	10,1027	10,1027	0,0035%	0,0035%
10,1018	10,1010	10,1004	10,1011	-0,0075%	-0,0007%
10,1006	10,1006	10,1005	10,1005	0,0003%	0,0005%

A (instante lectura) = Amplitud de referencia en el instante de lectura del equipo

Error sin aproximar = A (instante lectura) - Patrón 1

Error con aproximación = A (instante lectura) - Media Patrón

Tabla 8.4. Resultados del estudio del desfase de lecturas para una masa de 58 gramos.

De estos últimos resultados se aprecia que la aproximación conseguida mediante el promedio del patrón cobra mayor importancia a lo largo de casi toda la calibración, disminuyendo considerablemente el error provocado por el desfase de lecturas.

En este caso, el error máximo causado por el desfase sin realizar la compensación es de un -0.02%, mientras que el error máximo utilizando la compensación es de un 0.0035%.

El tercer estudio se ha realizado fijando una masa de unos 80 gramos, conseguidos uniendo el acelerómetro patrón con dos bases de montaje grandes y un acelerómetro piezoeléctrico.

Los resultados se ilustran en la tabla 8.5.

Patrón 1	A (instante lectura)	Patrón 2	Media Patrón	Error sin aproximar	Error con aproximación
10,3122	10,3090	10,3056	10,3089	-0,0311%	0,0006%
10,3019	10,2999	10,2977	10,2998	-0,0194%	0,0010%
10,2955	10,2938	10,2911	10,2933	-0,0167%	0,0048%
10,2897	10,2882	10,2883	10,2890	-0,0143%	-0,0077%
10,2885	10,2873	10,2858	10,2872	-0,0122%	0,0011%
10,2845	10,2834	10,2830	10,2838	-0,0112%	-0,0036%
10,2818	10,2821	10,2828	10,2823	0,0031%	-0,0020%
10,2832	10,2826	10,2819	10,2825	-0,0056%	0,0007%
10,2822	10,2798	10,2789	10,2805	-0,0234%	-0,0069%
10,2780	10,2761	10,2771	10,2775	-0,0182%	-0,0139%

A (instante lectura) = Amplitud de referencia en el instante de lectura del equipo

Error sin aproximar = A (instante lectura) - Patrón 1

Error con aproximación = A (instante lectura) - Media Patrón

Tabla 8.5. Resultados del estudio del desfase de lecturas para una masa de 80 gramos.

De los resultados obtenidos en la tabla 8.5 se observa cómo se logra compensar casi por completo la variación lineal de amplitud a lo largo de la calibración. No obstante, se observa en los últimos puntos que también existe una pequeña fluctuación aleatoria de esta amplitud que no es posible compensar, por lo que el error utilizando la aproximación no siempre es 100% efectivo.

Por último, se realiza un estudio de desfase de lecturas utilizando una masa de unos 108 gramos, conseguida acoplando el acelerómetro patrón (40 gramos) una base de montaje grande (18 gramos) y un acelerómetro triaxial piezorresistivo Endevco 7267A (50 gramos). Esta masa va a ser la máxima que se va a situar en el shaker durante el uso habitual del calibrador.

Patrón 1	A (instante lectura)	Patrón 2	Media Patrón	Error sin aproximar	Error con aproximación
10,1081	10,1037	10,0993	10,1037	-0,0438%	-0,0001%
10,0950	10,0922	10,0887	10,0919	-0,0287%	0,0026%
10,0850	10,0819	10,0793	10,0822	-0,0308%	-0,0022%
10,0765	10,0739	10,0715	10,0740	-0,0256%	-0,0008%
10,0702	10,0687	10,0669	10,0685	-0,0149%	0,0017%
10,0643	10,0625	10,0621	10,0632	-0,0179%	-0,0067%
10,0595	10,0579	10,0575	10,0585	-0,0158%	-0,0060%
10,0564	10,0556	10,0553	10,0558	-0,0072%	-0,0017%
10,0540	10,0528	10,0520	10,0530	-0,0116%	-0,0018%
10,0512	10,0502	10,0475	10,0493	-0,0096%	0,0088%

A (instante lectura) = Amplitud de referencia en el instante de lectura del equipo

Error sin aproximar = A (instante lectura) - Patrón 1

Error con aproximación = A (instante lectura) - Media Patrón

Tabla 8.6. Resultados del estudio del desfase de lecturas para una masa de 108 gramos.

De esta última prueba (la más extrema) se observa que la aproximación del promedio de lecturas patrón es efectiva a lo largo de toda la calibración, logrando disminuir el error máximo de un -0.0438% a un 0.0088%.

8.6.2. Desfase de lecturas en la verificación de la linealidad en amplitud.

Para comprobar la eficacia del método de compensación del desfase de lecturas durante la verificación de linealidad en amplitud, se elabora otro programa muy parecido al del anterior punto 7.5.1 con el que se automatiza el estudio.

El método utilizado es el mismo que el descrito en el anterior apartado, con la diferencia de que para cada serie de valores, la amplitud de aceleración varía hasta un total de cuatro veces, al igual que durante la verificación de linealidad en amplitud.

Se han realizado las mismas pruebas que en el apartado anterior, es decir, utilizando masas de 45, 58, 80 y 108 gramos.

En la tabla 7.7 se exponen los resultados extraídos en la prueba más extrema, es decir, aplicando una masa de 108 gramos.

Patrón 1	A (instante lectura)	Patrón 2	Media Patrón	Error sin aproximar	Error con aproximación
4,8489	4,8493	4,8496	4,8492	0,0088%	0,0018%
9,9955	9,9929	9,9900	9,9928	-0,0259%	0,0013%
14,9265	14,9147	14,9028	14,9147	-0,0795%	0,0000%
23,0911	23,0478	23,0096	23,0503	-0,1880%	-0,0110%

A (instante lectura) = Amplitud de referencia en el instante de lectura del equipo

Error sin aproximar = A (instante lectura) - Patrón 1

Error con aproximación = A (instante lectura) - Media Patrón

Tabla 8.7. Resultados del estudio del desfase de lecturas para una masa de 108 gramos.

De los resultados se deduce que la compensación del desfase en la verificación de linealidad es muy importante, ya que logra reducir el error máximo de un -0,19% a un -0,01%. Si no se realizase dicha compensación, la comprobación de linealidad en amplitud no sería válida.

8.6.3. Conclusiones del estudio.

Del estudio realizado en los apartados 7.6.1 y 7.6.2 se concluye que el método de compensación mediante la media de las lecturas patrón es eficaz, logrando disminuir considerablemente el error causado por el desfase de las medidas entre el patrón y el UUT.

Cuanto mayor es la masa fijada al shaker, mayor es la variación lineal de amplitud proporcionada por el shaker a lo largo del tiempo y mayor es el periodo de estabilización. Con la compensación, se logra minimizar el error causado por dicha variación lineal de amplitud.

Determinación de la sensibilidad a 10g		
Masa (gramos)	Error cometido sin usar la aproximación	Error cometido usando la aproximación
45	0,0282%	0,0089%
58	0,0199%	0,0026%
80	0,0311%	0,0077%
108	0,0438%	0,0088%

Tabla 8.8. Resumen de los resultados del estudio para la calibración de sensibilidad.

Del mismo modo, cuanto mayor es la amplitud generada por el shaker, mayor es la variación lineal de amplitud en el tiempo. Por ello, el efecto se manifiesta de manera más extrema en la calibración de linealidad en amplitud. En esta etapa de calibración es donde el método de compensación cobra más importancia.

Linealidad en amplitud		
Masa (gramos)	Error cometido sin usar la aproximación	Error cometido usando la aproximación
108	0,1880%	0,0110%

Tabla 8.9. Resumen de los resultados del estudio para la calibración de linealidad.

Por otro lado, también existe una pequeña fluctuación de carácter aleatorio en la amplitud ofrecida por el shaker durante el periodo de estabilización. Dicha fluctuación no es posible disminuirla con el método de compensación utilizado, por lo que todavía existirá una pequeña componente a la incertidumbre provocada por el desfase de las lecturas del patrón y el UUT.

En la obtención de sensibilidad, la componente a la incertidumbre provocada por el desfase de medidas se estima en un $\pm 0.05\%$. Dicha estimación se ha realizado redondeando al alza el valor máximo de error encontrado en todas las pruebas realizadas (más de 10 pruebas).

8.7. Incertidumbre de calibración

La incertidumbre de calibración se da a la amplitud y frecuencia de referencia y expresa el intervalo de valores en el que se sitúa, con una probabilidad próxima al 95%, el verdadero valor de sensibilidad del acelerómetro.

Para la estimación de la incertidumbre de medida en la calibración hay que combinar todas las contribuciones indicadas en la instrucción de calibración descrita en el Anexo 1. Dicha estimación se ha

realizado conforme a la norma ISO 16063-21, que es la misma que la utilizada por laboratorios acreditados según la ISO 17025:2005 para la calibración secundaria de acelerómetros.

Así pues, teniendo en cuenta dichas contribuciones, se elabora la siguiente tabla:

Tabla de incertidumbre de medida

Cantidad X_i	Descripción	Modelo de distribución de probabilidad	Esperanza x_i	Coefficiente de sensibilidad c_i	Semi-intervalo	Factor	Contribución relativa %
S_p	Calibración del set acelerómetro + acondicionador patrón	Normal	0	1	0,5	1/2	0,25
δS_p	Deriva en el tiempo de sensibilidad del set patrón	Rectangular	0	1	0,15	1/3	0,09
$S_{p\#Lx}$	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje X)	Rectangular	0	1	N.A.	1/3	0,00
$S_{p\#Ly}$	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje Y)	Rectangular	0	1	N.A.	1/3	0,00
$S_{p\#Lz}$	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje Z)	Rectangular	0	1	N.A.	1/3	0,00
S_A	Sensibilidad del acondicionador del UUT (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,03	1/3	0,02
V_p	Voltaje de salida del set patrón (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,4	1/3	0,23
V_A	Voltaje de salida del set UUT (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,4	1/3	0,23
S_{Tp}	Sensibilidad transversal del acelerómetro patrón	Especial	0	1	0,16	1/18	0,04
S_{Tuu}	Sensibilidad transversal del UUT	Especial	0	1	0,3	1/18	0,07
S_{Tuu}	Desfase en las mediciones del patrón y el UUT	Rectangular	0	1	0,05	1/3	0,03
$I(V_{RTHD})$	Influencia del THD en el ratio de salida	Rectangular	0	1	0,26	1/3	0,15
$I(S_{pT,amb})$	Influencia de la temperatura ambiente en la sensibilidad del acelerómetro patrón	Rectangular	0	Totalmente correlacionadas	0,015	1/3	0,08
$I(S_{UUT,amb})$	Influencia de la temperatura ambiente en la sensibilidad del UUT	Rectangular	0		0,13	1/3	
$I(S_{p\Delta T})$	Influencia de la variación de temperatura interna del aceler. patrón durante la calibración.	Rectangular	0		0,07	1/3	
$I(S_{UUT\Delta T})$	Influencia de la variación de temperatura interna del UUT durante la calibración.	Rectangular	0	0,13	1/3		
$I(V_{RH})$	Influencia de los parámetros de montaje en el ratio de salida	Rectangular	0	1	0,1	1/3	0,06
$I(S_{pRH})$	Influencia del campo magnético en la sensibilidad del aceler. Patrón	Rectangular	0	1	0,02	1/3	0,01
s_x	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT\leftrightarrow}$	1	s_x	1	
s_y	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT\leftrightarrow}$	1	s_y	1	
s_z	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT\leftrightarrow}$	1	s_z	1	
S_{UUTx}	Sensibilidad del eje X	Incertidumbre estándar (k = 1)					0,48
S_{UUTy}	Sensibilidad del eje Y	Incertidumbre estándar (k = 1)					0,48
S_{UUTz}	Sensibilidad del eje Z	Incertidumbre estándar (k = 1)					0,48

Tabla 8.10. Tabla para la expresión y cálculo de la incertidumbre de medida en las calibraciones de acelerómetros.

En la tabla 7.10 se observa que la incertidumbre típica de la sensibilidad extraída en la calibración ronda el 0,5% en el caso de acelerómetros piezorresistivos. La incertidumbre expandida de medida es la incertidumbre típica multiplicada por el factor de cobertura $k = 2$, por lo que la incertidumbre de medida del resultado será siempre de $\pm 1,0\%$ aproximadamente.

En el caso de acelerómetros piezoeléctricos sin amplificador incorporado, la incertidumbre expandida de medida se eleva a un $\pm 1,5\%$ debido a la contribución aportada por el amplificador de carga utilizado para acondicionar la señal del UUT.

Esta incertidumbre de calibración es comparable a la proporcionada por cualquier laboratorio acreditado según ISO 17025:2005 para calibración secundaria de acelerómetros por el método de vibración a frecuencias de entre 20 y 5000Hz [5].

8.8. Tiempo invertido en las calibraciones

El tiempo invertido en cada calibración dependerá de los siguientes factores:

1. Acondicionamiento del UUT. Hay que mantener conectada la muestra un tiempo determinado antes de empezar la calibración.
2. Montaje y configuración del UUT.
3. Número de ejes del acelerómetro.
4. Uso del módulo de conmutación.
5. Rango de frecuencias calibrado y número de muestras por década.

En la calibración de un acelerómetro uniaxial mediante el método de la cinta de doble cara (el más utilizado), se invierte el tiempo indicado en la tabla 8.11.

<i>Tarea</i>	<i>Tiempo (segundos)</i>
Montaje + configuración	120
Fase de calentamiento	120
Obtención de sensibilidad	50
Linealidad en amplitud	40
Respuesta en frecuencia	110
Tiempos muertos	30
TOTAL	7:50 min

Tabla 8.11. Tiempo invertido en las calibraciones usando dos multímetros.

En caso de utilizar el módulo de conmutación se logra prescindir de un multímetro. Como desventaja, el uso del módulo de conmutación afecta ligeramente al tiempo invertido en la calibración de manera negativa, tal y como se ilustra en la tabla 8.12.

<i>Tarea</i>	<i>Tiempo (segundos)</i>
Montaje + configuración	120
Fase de calentamiento	120
Obtención de sensibilidad	58
Linealidad en amplitud	43
Respuesta en frecuencia	127
Tiempos muertos	30
TOTAL	8:18 min

Tabla 8.12. Tiempo invertido en las calibraciones utilizando el módulo de conmutación (1 multímetro).

Los tiempos muertos son los espacios de tiempo entre una parte de la calibración y otra, elaboración del certificado de calibración y configuración de algún parámetro en la aplicación de calibración.

Del resultado de ambas tablas se obtiene una diferencia de 28 segundos cuando se utiliza el módulo de conmutación. Por tanto, el uso del conmutador supone un incremento del 6% en el tiempo de calibración de un acelerómetro.

En cuanto a la preparación, el acelerómetro debe estar un mínimo de 15 minutos conectado antes de realizar la calibración. No obstante, en algunas ocasiones puede mantenerse conectado mientras se está realizando la calibración de otro acelerómetro, por lo que, en esos casos, el tiempo de preparación queda muy reducido, cumpliendo íntegramente los 15 minutos únicamente en el primer acelerómetro calibrado. Si en un futuro próximo se decide desarrollar una caja para alimentación de varios acelerómetros (ver apartado 9.2.3 más adelante), el tiempo muerto invertido en la preparación se verá reducido al mínimo.

A continuación se muestra la tabla con los tiempos invertidos en la calibración con el sistema antiguo.

<i>Tarea</i>	<i>Tiempo (segundos)</i>
Montaje + configuración	120
Obtención de sensibilidad	20 a 40
Respuesta en frecuencia	220
Tiempos muertos	120 a 250
TOTAL	8:00 a 10:30 min

Tabla 8.13. Tiempo invertido en las calibraciones mediante el antiguo sistema.

En la tabla 7.13 se observa que, a pesar de contar con menos etapas y de no realizar los dos minutos de preparación, el tiempo invertido en la calibración podía llegar a ser mayor que con el sistema nuevo. Un gran porcentaje del tiempo se invertía en tiempos muertos que consistían en la búsqueda de informes anteriores y de los parámetros del acelerómetro para introducirlos manualmente en la aplicación. Además, eran frecuentes los errores tipográficos que hacían que se tuviera que repetir el proceso desde el principio, con el consiguiente aumento de tiempo invertido.

No se ha estudiado el ahorro económico que supone la disminución de los tiempos de calibración porque el laboratorio en cuestión es un laboratorio interno que presta un servicio al resto de la empresa sin cobrar por ello.

CAPÍTULO 9. Conclusiones y perspectivas.

9. Conclusiones y perspectivas.

9.1. Objetivos alcanzados

Se ha logrado desarrollar una aplicación gráfica para la automatización del proceso de calibración de acelerómetros y generación del informe de calibración, cumpliendo con el objetivo principal del proyecto. La aplicación desarrollada ha sido un éxito, contando con la aprobación de los técnicos de calibración y superando sus expectativas. Todos los objetivos propuestos han sido alcanzados.

Gracias a la automatización de todo el proceso y generación de informes se ha logrado incrementar considerablemente la calidad en las calibraciones realizadas. Ya no es necesario introducir ningún dato a mano ni consultar certificados antiguos ni ningún otro tipo de documentación para llevar a cabo la calibración de cualquier acelerómetro. Se han conseguido eliminar los frecuentes errores tipográficos.

Ahora la aplicación cuenta con un tratamiento de errores bastante sólido. Cuando ocurre un error, una ventana emergente nos comunica a qué ha sido debido el error (comunicación con algún instrumento, error en la red local, etc.) y el programa no queda bloqueado como pasaba en la anterior aplicación.

Antes, muchos datos del informe debían rellenarse manualmente. Al acabar la calibración se imprimía en papel de manera automática, se firmaba y se entregaba al cliente interno.

Ahora, la generación de todo el informe es automática y se guarda en un archivo Excel en la propia base de datos de calibraciones del laboratorio. Esta base de datos puede ser consultada por los trabajadores de la empresa que utilizan estos equipos, y los certificados pueden firmarse digitalmente, por lo que ya no es necesario imprimir ningún informe.

Antes, la estimación de la incertidumbre no contemplaba todas las contribuciones, y los cálculos realizados no eran conformes a la norma ISO 16063-21 ni a la guía GUM.

Ahora, mediante el nuevo formato de informe de calibración, se lleva a cabo la estimación de la incertidumbre de calibración de manera correcta. Además, si es necesario realizar algún cambio en algún cálculo, basta con modificar el formato.

Gracias al desarrollo de un módulo de conmutación controlado remotamente, ha sido posible eliminar el uso de un multímetro en el sistema de calibración. Este multímetro se podrá aprovechar ahora para otras calibraciones en el laboratorio.

La aplicación antigua no era nada flexible y no permitía realizar ningún tipo de ajuste. Cualquier ajuste requería reprogramar la aplicación y volverla a compilar.

A la nueva aplicación se le ha dotado de un panel de ajustes y ahora cualquier parámetro de la calibración se puede variar a nuestro antojo. Además, gracias a los filtros definibles por el usuario, los parámetros de calibración se adaptan automáticamente al tipo de acelerómetro a calibrar.

Se han realizado estudios suficientes para demostrar la eficacia del sistema. Las calibraciones de acelerómetros de distintas tecnologías se han comparado con las realizadas por laboratorios externos acreditados (A2LA en el caso de los acelerómetros ENDEVCO) y los resultados han sido prácticamente idénticos. Las incertidumbres expresadas en nuestros certificados de calibración son comparables con las de los demás laboratorios externos acreditados para este tipo de calibración.

En el procedimiento de calibración antiguo no se tenía en cuenta el desfase en las lecturas del UUT y el patrón. Este desfase de mediciones se ha logrado compensar realizando un promedio de dos lecturas del acelerómetro patrón, tal y como se indica en la norma ISO 16063-21, logrando reducir errores en las mediciones sobretodo en la calibración de linealidad en amplitud, tal y como indican los estudios realizados en el capítulo de resultados.

El estudio de los diversos métodos de montaje utilizados en la calibración de acelerómetros en nuestro laboratorio ha demostrado que los tres métodos utilizados son correctos para llevar a cabo calibraciones en un rango de 20 a 1000Hz asegurando una incertidumbre de $\pm 1,5\%$ en acelerómetros piezoeléctricos y de $\pm 1\%$ en el resto de acelerómetros.

El estudio de repetibilidad en las calibraciones de un mismo acelerómetro ha propiciado la elaboración de una etapa más en el proceso de calibración consistente en un “desperzamiento” del acelerómetro. De esta forma, aplicando distintas amplitudes y frecuencias de vibración al acelerómetro durante unos 2 minutos antes de la calibración, se ha logrado minimizar el error causado por la deriva de las mediciones del acelerómetro en calibraciones consecutivas.

9.1.1. Otros comentarios

Cabe destacar que este proyecto también ha servido para mejorar la formación de los técnicos de calibración, consiguiendo reducir el número de incidencias en las calibraciones de acelerómetros. Gracias a ello, se está disminuyendo considerablemente el tiempo de media invertido en las calibraciones y la calidad se ha visto incrementada viéndose reflejada en los informes de calibración los cuales muestran resultados más consistentes que anteriormente.

Como objetivo secundario se planteó el aprendizaje de la programación mediante LabVIEW. Gracias al desarrollo de este proyecto he logrado adquirir un buen nivel de uso de esta herramienta. Ello me ha motivado a planear otra serie de proyectos dentro de mi empresa para realizar mejoras en el laboratorio de calibración en un futuro próximo. Además, esto ha supuesto una mejora en mi formación para mi futuro profesional.

El desarrollo de este proyecto también me ha servido para profundizar y consolidar mis conocimientos en el campo de la instrumentación, en la metrología, en los cálculos de incertidumbre y sobretodo, en el mundo de los acelerómetros.

9.2. Futuras mejoras y ampliaciones

En este apartado se exponen las mejoras que se podrían realizar en el procedimiento de calibración de acelerómetros. Algunas de estas mejoras ya están programadas, mientras que otras todavía están en estudio para determinar si son viables de llevar a cabo.

9.2.1. Corrección de los resultados de la respuesta en frecuencia según método de fijación.

Tal y como indican los resultados hallados en el estudio realizado en el apartado 7.2, el método de fijación del UUT sobre el acelerómetro de referencia influye directamente en los resultados de la respuesta en frecuencia a partir de 1kHz. El error de medida se agrava cuanto mayor es la frecuencia y la masa del conjunto UUT + base de montaje.

Tomando como referencia los resultados hallados utilizando el método de fijación mediante elemento roscado, se pueden analizar las diferencias encontradas respecto al método de cinta de doble cara, utilizando acelerómetros de distinta masa.

El estudio se debería llevar a cabo utilizando como muestras diversos acelerómetros que comprendan todo el rango de masas posible (de 5 a 50 gramos) y que permitan ambos sistemas de fijación. De esta manera se podría realizar una calibración de referencia utilizando el método roscado para después compararlo con los resultados obtenidos mediante el método de la cinta de doble cara.

Una vez obtenidas las correcciones a distintas masas, se podría realizar una interpolación de dicha corrección para el resto de acelerómetros durante las calibraciones. De esta forma se podría calibrar la

respuesta en frecuencia de cualquier acelerómetro hasta los 2 kHz o incluso más, mediante cualquiera de los métodos de fijación, aportando una incertidumbre relativamente baja.

Esta mejora es viable ya que se dispone de todos los recursos necesarios para llevarla a cabo. Es una de las mejoras que se llevarán a cabo en un futuro inmediato.

9.2.2. Estimación de la incertidumbre de medida en los resultados de la respuesta en frecuencia.

Se puede estimar una incertidumbre de medida para los resultados hallados en todas las muestras de la respuesta en frecuencia. Dicha estimación se describe, en parte, en la norma ISO 16063-21. No obstante, debido al funcionamiento de la aplicación desarrollada para la calibración de acelerómetros, no es posible, de momento, hallar dicha incertidumbre.

El motivo por el que todavía no es posible estimar una incertidumbre de medida en los resultados de la respuesta en frecuencia es porque no se tiene un control absoluto de la amplitud a la que se genera dicha frecuencia a lo largo de todo el ancho de banda. La única amplitud conocida a priori es la generada a una frecuencia de 160Hz. Debido al comportamiento del *shaker*, la amplitud de salida a distintas frecuencias ante una misma amplitud de señal de entrada puede variar sustancialmente (del orden de hasta un 20 o 30% dependiendo de la frecuencia).

Se necesita generar las señales de la respuesta en frecuencia a la misma amplitud que las generadas en la calibración del patrón, es decir, a 10g. Si no se hiciera de esta forma, no se podría estimar la contribución del patrón a la incertidumbre de medida.

Para poder tener un control de la amplitud generada a lo largo de toda la respuesta en frecuencia, es preciso elaborar un modelo matemático del *shaker* a lo largo de todo ese rango de frecuencias utilizando para ello distintas masas. Una vez obtenido, se podría actuar sobre el valor de amplitud en el generador de funciones dependiendo de la frecuencia, para así obtener el valor de amplitud deseado independientemente de la frecuencia de la vibración.

Ésta es otra de las mejoras que están previstas llevar a cabo en un futuro inmediato. Se considera una de las prioridades, ya que mediante este sistema se realizan calibraciones de acelerómetros que se utilizan en ensayos acreditados que requieren un exhaustivo control de las mediciones y de sus incertidumbres de medida.

9.2.3. Caja de alimentación para múltiples acelerómetros piezorresistivos.

El calentamiento para la estabilización térmica del acelerómetro en calibración es un aspecto de la calibración cuyo tiempo invertido conviene minimizar. Dicho tiempo de estabilización se mueve en torno a los 15 minutos. Teniendo en cuenta que la calibración propiamente dicha de un acelerómetro uniaxial se realiza en un tiempo máximo de unos 8 minutos, el calentamiento del acelerómetro previo a la calibración supone un 187% del tiempo total de calibración.

Para minimizar el tiempo invertido en el calentamiento en calibraciones consecutivas, se pretende desarrollar, en un futuro inmediato, una caja acondicionadora de acelerómetros piezorresistivos que va a consistir únicamente en una caja de conexiones con una fuente de alimentación interna de 10V nominales. De esta forma, al conectar varios acelerómetros a la caja acondicionadora, siempre habrá algún acelerómetro acondicionado en cuanto se acabe la calibración del anterior. Cuando se desconecte un acelerómetro de la caja para calibrarlo, se sustituirá por el siguiente.

La caja deberá estar formada, al menos, por 6 conectores LEMO para la conexión de 6 acelerómetros piezorresistivos uniaxiales o bien de 2 acelerómetros triaxiales. Tres de los conectores deberán estar preparados para los acelerómetros piezorresistivos de medio puente y los otros 3 para los de puente completo. En la figura 9.1 se muestra el patillaje de ambos conectores del acelerómetro.

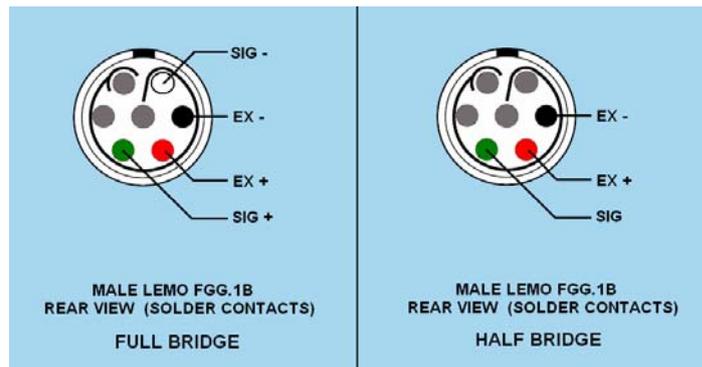


Figura 9.1. Patillaje del conector de los acelerómetros piezorresistivos de medio puente y puente completo.

Los conectores necesarios son los *LEMO FGG.1B* hembra. En la figura 9.2 se observa una fotografía de unos conectores LEMO macho (abajo) y hembra (arriba) de este modelo [32].



Figura 9.2. Conectores LEMO del tipo FGG.1B.

9.2.4. Actualización automática de sensores Pre-TEDS

Un identificador o ID es un circuito electrónico que se utiliza para identificar al transductor de forma unívoca cuando se conecta a un sistema. De esta forma, cuando el sistema detecta un sensor en concreto, puede estar programado, por ejemplo, para configurar el canal de una manera determinada.

TEDS, del inglés *Transducer Electronic Data Sheets*, es un protocolo utilizado no sólo para identificar un espécimen, sino para almacenar datos como la configuración del transductor, sus datos de calibración y otras especificaciones técnicas [46].

Los sensores pre-TEDS son aquellos que incorporan un identificador como el ID Dallas [24], desarrollado antes del estándar TEDS. El *ID Dallas One Wire Serial Number* es un circuito integrado con sólo dos terminales que incorpora un identificador de 64 bits. Un número tan elevado de bits permite un número de combinaciones muy alto, por lo que cada ID tiene un número de serie grabado y no existen dos iguales en el mundo.

Todos los acelerómetros utilizados en ensayos de choque han sido dotados de un ID Dallas para su identificación unívoca, por lo que se considera interesante la posibilidad de incorporar un lector de ID al sistema de calibración de acelerómetros para que éste identifique el acelerómetro conectado de manera automática y configure la aplicación para llevar a cabo su calibración.

La lectura del código se puede realizar conectando el ID a un pin de un microcontrolador. El microcontrolador debe programarse según el protocolo de comunicación del ID que está especificado en el datasheet del mismo. Una vez identificado por el microcontrolador, éste puede comunicarse con el sistema a través de un puerto del PC para pasarle directamente el número de identificación.

Esta mejora no se considera prioritaria actualmente, pero se deben estudiar las ventajas en cuestión de ahorro de tiempo y aumento de calidad en las calibraciones para determinar si se debería implantar en un futuro no muy lejano.

9.2.5. Medición del ángulo de fase durante la calibración de respuesta en frecuencia

Un parámetro importante a considerar en un acelerómetro cuando trabaja a frecuencias relativamente elevadas es el ángulo de desfase de la señal de salida respecto a la magnitud de entrada. Este ángulo de desfase es provocado por un retardo en la señal de salida respecto a la entrada.

Para calibrar la fase se debe disponer de un instrumento que sea capaz de medirla con cierta precisión, como por ejemplo, el medidor de fase 6000A de *Clarke-Hess*.



Figura 9.3. Medidor de ángulo de fase *Clarke-Hess 6000A*.

Este medidor de fase es capaz de medir ángulos de fase en frecuencias comprendidas entre 10Hz y 1MHz con una resolución de $0,001^\circ$ y una exactitud de $\pm 0.02^\circ$ de 10Hz a 2kHz. Además, se adapta a la perfección a nuestro sistema gracias al puerto GPIB del que dispone.

Según la norma ISO 16063-21 se recomienda realizar la medición de la fase en la calibración secundaria de acelerómetros, pero no es un requisito obligatorio si no más bien algo opcional. Es el laboratorio de calibración el que debe valorar si es necesario incorporar uno de estos instrumentos en su sistema de calibración.

Esta mejora no se considera prioritaria por el momento. Se trata de un parámetro importante a considerar, no obstante, en nuestro caso, no se considera decisivo para el tipo de ensayos llevados a cabo, ya que en los resultados de ensayo se aplican filtros que eliminan las frecuencias altas y aprovechan, únicamente, frecuencias relativamente bajas (como máximo unos 400Hz en la mayoría de casos) en las cuales no suele afectar el ángulo de desfase.

Los ensayos que requieren frecuencias de adquisición más elevadas, como por ejemplo los impactos producidos en los ensayos de homologación de cascos (ensayos de absorción de impactos), utilizan acelerómetros piezoeléctricos cuyo ancho de banda es mayor y la fase es más estable a lo largo de todo el rango de frecuencias. Además, en estos casos, el hecho de haber un pequeño desfase en la señal de salida no afecta a los resultados de ensayo.

9.2.6. Calibración por el método de choque

Otro de los aspectos que puede mejorar en el procedimiento de calibración secundaria de acelerómetros, es la capacidad de calibrar los acelerómetros a mayores amplitudes como las que se originan en un ensayo de impactos.

La manera habitual de conseguir amplitudes mayores es realizando la calibración por choque. Dentro de este tipo de calibración existen diversos métodos para llevarlo a cabo. Uno de ellos es mediante un péndulo de calibración como el que se puede observar en la figura 9.4 [48].

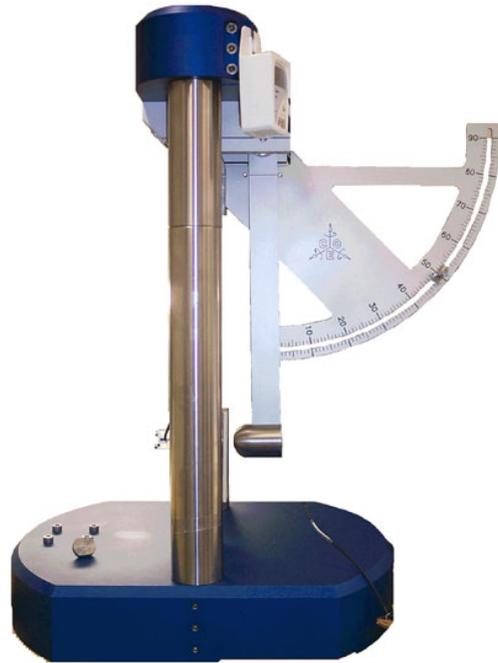


Figura 9.4. Péndulo de calibración por choque DENTON SER/8609-001-MG.

Mediante este método es posible realizar calibraciones en un rango de amplitud de entre 10 y 300g con impactos de entre 4 y 7ms de duración.

El péndulo está constituido por dos brazos, uno móvil y otro fijo. En el brazo fijo se sitúan el acelerómetro de referencia y el acelerómetro a calibrar, mientras que el móvil es el que se sitúa a una altura para dejarlo caer sobre el brazo fijo.

El péndulo incluye un juego de gomas de distinta densidad que se montan en la superficie de contacto del brazo fijo. Dependiendo de la goma utilizada, la duración del impacto se verá afectada, así como la amplitud, aunque esta última en menor medida. Para variar la amplitud, es más práctico variar la altura (ángulo) a la que se deja caer el brazo móvil del péndulo.

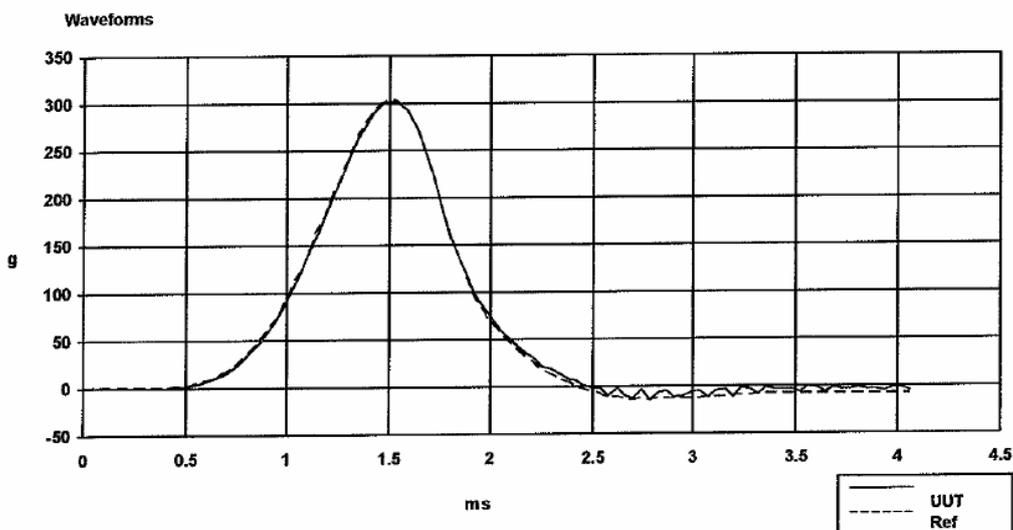


Figura 9.5. Ejemplo del resultado de una calibración por choque mediante péndulo.

No obstante, este sistema presenta el inconveniente de que únicamente llega a generar amplitudes del orden de hasta 300g dependiendo del modelo de péndulo, y en ocasiones se llega a superar dicha cifra en algunos ensayos.

Existen otros sistemas para conseguir mayores amplitudes de aceleración, aunque también son más difíciles de elaborar y, por tanto, más costosos económicamente. Uno de los más populares es el calibrador por choque mediante excitación neumática [36].

Mediante este sistema es posible alcanzar amplitudes de hasta los 10.000g en algunos casos, cubriendo un rango lo suficientemente amplio para casi cualquier aplicación en la industria. No obstante, la incertidumbre de calibración de estos sistemas asciende al orden de $\pm 2.5\%$.



Figura 9.6. Sistema de calibración por impacto mediante excitación neumática, PCB 9155C-525.

El funcionamiento de dicho sistema se ilustra en la figura 9.7. Un proyectil es conducido a través de un cilindro neumático para impactar en la superficie de un yunque sobre el que se sitúan el acelerómetro de referencia y el UUT.

Para regular la velocidad a la que debe alcanzar el proyectil al yunque, un sistema neumático es regulado manualmente para proporcionar un impulso de aire a presión en el cilindro.

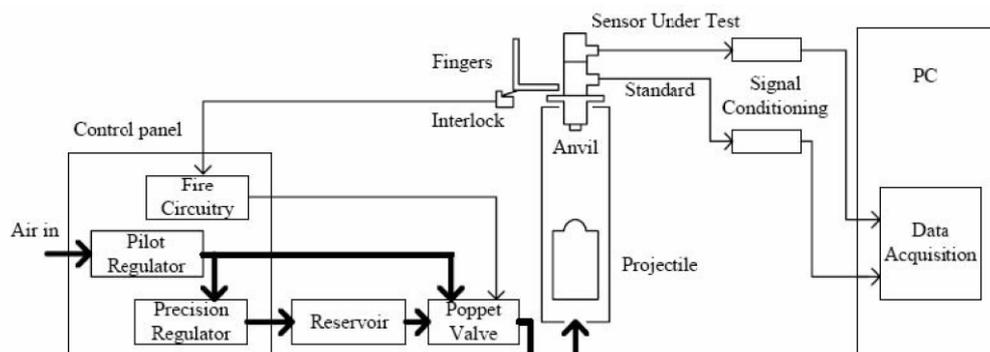


Figura 9.7. Esquema de funcionamiento del sistema de calibración de la figura 9.6.

La figura 9.8 es una fotografía del detalle del yunque sobre el que se atornillan el acelerómetro de referencia y el UUT. En la base del yunque, donde impacta el proyectil, hay una almohadilla de goma intercambiable. Se pueden situar diversas almohadillas de distintas densidades que harán que el impacto sea más o menos elástico permitiendo distintas duraciones.

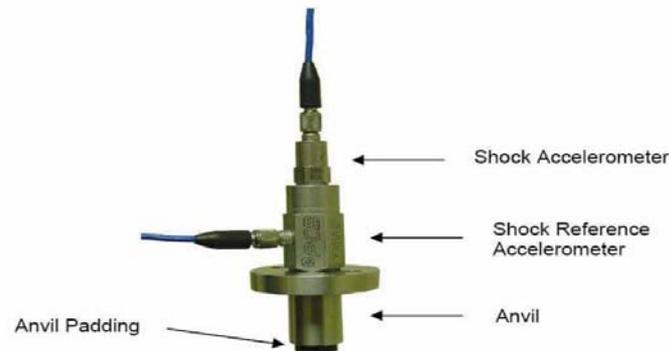


Figura 9.8. Medidor de ángulo de fase Clarke-Hess 6000A.

9.2.6.1. Estudio del sistema de calibración basado en péndulo.

Debido a que el sistema mediante péndulo de calibración conlleva un menor gasto económico, se estudia la posibilidad de implantarlo en un futuro.

Los equipos necesarios para implantar el sistema de calibración por choque de hasta 300g pueden ser los siguientes:

- Péndulo de calibración DENTON SER/8609 como el mostrado en la figura 8.4.
- Dispositivo de anclaje para el brazo fijo del péndulo (el péndulo no lo incorpora de serie).

Este enganche proporciona un armazón de soporte fijo para sujetar ambos péndulos durante el montaje del UUT. De este modo se reduce la tensión mecánica en los rodamientos del péndulo. El enganche se libera durante el ensayo.

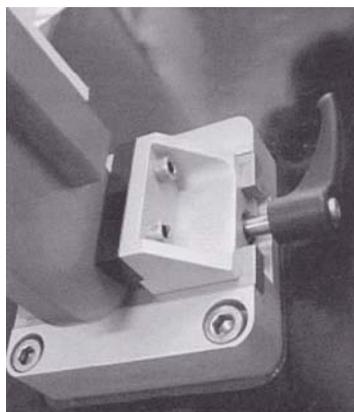


Figura 9.9. Estructura de enganche.

- Adaptadores para calibración de acelerómetros ENDEVCO.

Prácticamente la totalidad de acelerómetros que se calibrarán mediante este sistema son de la marca ENDEVCO. Cada modelo de adaptador es compatible con un conjunto de acelerómetros.

- Un adaptador para los siguientes modelos de acelerómetros ENDEVCO: 7264A/B/D, 7265A, 7270A, 7290A, 7231, 7232 y 2262
- Un adaptador para el modelo de acelerómetro triaxial ENDEVCO 7267A.

- Acelerómetro piezoeléctrico de referencia para medidas “Back to back” ENDEVCO modelo 2270.

Acelerómetro piezoeléctrico de $\pm 15.000g$ diseñado para calibración secundaria por comparación. Las características técnicas más relevantes son:

- Muy buena linealidad en amplitud, hasta un 0.1% a 1000g.
- Sensibilidad transversal inferior al 1%.
- Buena estabilidad en el tiempo de la sensibilidad tras repetidos ensayos, inferior al 0,2% por año.
- Muy buena respuesta en frecuencia permitiendo duraciones de impulsos a partir de $100\mu s$



Figura 9.10. Acelerómetro de referencia ENDEVCO 2270.

- Acondicionador de señal para el acelerómetro de referencia (B&K 2626 disponible en el laboratorio).
- Tarjeta de adquisición de datos National Instruments PCI-6111:

Como características más destacadas se encuentran las siguientes:

- 2 entradas analógicas con conversor A/D dedicado para cada una.
- 2 salidas analógicas.
- Resolución de 12 bits.
- Hasta 5MS/s (hasta 5 millones de muestras por segundo).
- 8 rangos de entrada configurables desde $\pm 200mV$ hasta $\pm 42V$.
- Trigger analógico o digital.



Figura 9.11. Tarjeta de adquisición de datos NI PCI-6111.

- Sistema acondicionador para transductores piezorresistivos (HBM MGCPlus disponible en el laboratorio).
- Software basado en LabVIEW para controlar el sistema.

Teniendo en cuenta que solamente el péndulo tiene un precio de unos 36.000 €, todo el sistema supondría un gasto en materiales de, aproximadamente, unos 40.000 €, contando el péndulo, la estructura de enganche, los adaptadores, el acelerómetro de referencia y la tarjeta de adquisición de datos. A esto habría que sumarle el tiempo dedicado a elaborar la aplicación de calibración.

CAPÍTULO 10. Ambientalización del PFC.

10. Ambientalización del PFC.

Durante el desarrollo del proyecto, se ha tratado de reducir el impacto medioambiental intentando gastar el mínimo papel y energía eléctrica posibles.

Para las pruebas en las que se extraían resultados para el proyecto, se han utilizado acelerómetros que estaban pendientes de calibrar en el laboratorio. Dichos resultados se han aprovechado como calibraciones válidas, por lo que el proceso de la obtención de éstos no ha afectado al medio ambiente de manera directa.

En cuanto al proceso de calibración y generación de informes, gracias al nuevo software de calibración se ha suprimido el uso de papel. Ahora, todos los informes de calibración se guardan en formato electrónico y no es necesario imprimirlos para que el cliente los visualice, ya que se guardan en una intranet donde todos los usuarios de los equipos calibrados tienen acceso. Esto supone un gran beneficio para el medio ambiente ya que, anteriormente, para la calibración de cada eje de acelerómetro se consumía un mínimo de dos hojas de papel que, multiplicado por los más de 1500 ejes calibrados al año, hacían un total de unas 3000 hojas al año como mínimo.

Gracias a la mejora del proceso de calibración y a la elaboración del módulo de conmutación, se logra suprimir el uso de uno de los multímetros Agilent 34401A, lo cual supone una reducción del impacto medioambiental, ya que estos equipos consumen unos 10W de media y el sistema suele estar casi toda la jornada conectado. Por otro lado, se ha añadido un módulo de conmutación en el sistema, pero su consumo de poco más de 0,25W se considera despreciable en comparación con el resto de la instrumentación. Además, se ha aprovechado el multímetro antiguo Agilent 34401A en lugar de comprar uno de los nuevos con conmutador incorporado, por lo que se ha contribuido a la sostenibilidad de los recursos del laboratorio.

También cabe mencionar que, anteriormente, se utilizaba un PC dedicado exclusivamente al sistema de calibración. Después de las mejoras introducidas en este proyecto, para el uso de la aplicación se utiliza cualquiera de los portátiles de oficina disponibles en el laboratorio. Esto significa que se ha eliminado el uso de un ordenador dedicado y su pantalla durante las 8 horas de la jornada laboral diaria, lo cual es una bajada sustancial del consumo general del sistema de calibración.

Por último, los únicos consumibles que se utilizan son las cintas adhesivas, adhesivos instantáneos y, en ocasiones, algún disolvente. Esto es algo inevitable, y ya se venía haciendo desde que se implantó la calibración de acelerómetros en el laboratorio. No obstante, a raíz de este proyecto, se ha concienciado a los técnicos de calibración el uso moderado de dichos consumibles utilizando, únicamente, las cantidades necesarias para llevar a cabo las calibraciones.

ANEXOS.

ANEXO 1. Instrucción de calibración de acelerómetros

1 Alcance

Mediante este procedimiento se podrá llevar a cabo la calibración de acelerómetros piezorresistivos, piezoeléctricos, IEPE y capacitivos de medio y alto rango de aceleración y para medidas dinámicas. El rango de amplitud calibrable va desde los 2g hasta los 40g, mientras que el rango de frecuencia puede ir desde los 10Hz hasta los 5kHz.

2 Documentos de referencia

- 2.1 ISO 16063-21 2003: “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer”.
- 2.2 Documento EA-4/02: “Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration”.
- 2.3 JCGM 200:2008 Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)
- 2.4 Documentos internos: IT-QUA-01 ; IT-QUA-02 ; IT-CAL-29 ; IT-CAL-42 ; IT-CAL-43 ; IT-CAL-91.

3 Equipos patrón utilizados

- 3.1 Cadena de medida patrón (a partir de ahora, *cadena patrón*) formada por el acelerómetro *Brüel & Kjær* modelo 8305 y su acondicionador de señal para transductores piezoeléctricos *B&K* modelo 2626. El conjunto está identificado con el número de inventario 93004. Su calibración se realiza cada 36 meses en un laboratorio externo acreditado por *DKD* para calibración primaria de acelerómetros.
- 3.2 Uno de los multímetros digitales de 6 ½ dígitos de resolución *Agilent* modelo 34401A disponibles en el laboratorio, identificados por los números de inventario 93006, 98186, 99270 y 04660. Se utilizarán dos de ellos en caso de no usar la placa conmutadora. Su calibración se lleva a cabo cada 24 meses en el laboratorio del fabricante en España el cual está acreditado por ENAC para este tipo de calibración.
- 3.3 Generador de funciones *Agilent* modelo 33201 identificado por el número de inventario 94056. Su calibración se realiza cada 24 meses en un laboratorio externo acreditado por ENAC.
- 3.4 Amplificador de extensometría marca *HBM* modelo *MGCPlus* con tarjeta acondicionadora de extensometría modelo ML10B. La calibración es acreditada por *DKD* y se lleva a cabo cada 24 meses en el laboratorio del fabricante.
- 3.5 Amplificador de carga para transductores piezoeléctricos *B&K* modelo 2635 n° inventario 91032. Su calibración se realiza internamente, asegurando una trazabilidad a patrones primarios a través de ENAC.
- 3.6 Acondicionador de señal en línea para transductores IEPE, marca *PCB Piezotronics* modelo 482A22. Su calibración se realiza internamente.
- 3.7 Para generar las señales de vibración al conjunto acelerómetro patrón + UUT, se utiliza el excitador de vibraciones electrodinámico marca *Brüel & Kjær* modelo 4809 identificado con el número de inventario 09236 junto con su amplificador de potencia *B&K* modelo 2706.

4 Condiciones ambientales

- 4.1 La sala deberá permanecer en unas condiciones ambientales estables.
- 4.2 La temperatura ambiente deberá ser de $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa inferior al 70%.
- 4.3 La temperatura y humedad relativa presentes en el momento y lugar de la calibración deberán medirse mediante uno de los termo-higrómetros disponibles en el laboratorio. Los valores adquiridos deberán indicarse en el informe de calibración con una resolución de 1°C para temperatura y 1% para humedad relativa.

5 Preparación

- 5.1 Toda la instrumentación que interviene en la calibración deberá permanecer en las condiciones ambientales presentes en el laboratorio un mínimo de 24 horas antes de la calibración.
- 5.2 El acelerómetro patrón deberá estar anclado al shaker utilizando el método y aplicando el par de apriete aconsejados por el fabricante.
- 5.3 Inspeccionar las superficies de contacto del acelerómetro patrón y el acelerómetro bajo prueba en busca de irregularidades, suciedad o pegamentos. Cuando proceda, limpiar las superficies mediante alcohol isopropílico utilizando para ello una gamuza adecuada que no deje restos de fibras. Indicar en el certificado de calibración cualquier imperfección hallada en la superficie del acelerómetro bajo prueba y si ha sido posible corregirse.
- 5.4 Utilizando los guantes apropiados, proceder al montaje del acelerómetro bajo prueba sobre la superficie del acelerómetro patrón. El acelerómetro bajo prueba debe quedar solidario al acelerómetro patrón procurando que sus centros de gravedad coincidan lo máximo posible en el eje de actuación.
- 5.5 Cuando sea posible, el montaje del acelerómetro bajo prueba se realiza mediante su correspondiente tornillo de montaje. Si el acelerómetro no dispone de este tipo de anclaje, se utilizará una base de montaje atornillada al acelerómetro patrón, sobre la que irá el acelerómetro en calibración fijado mediante adhesivo instantáneo o cinta de doble cara. En este caso, el adhesivo instantáneo se utilizará preferiblemente cuando la masa del acelerómetro supere los 20 gramos o presente alguna pequeña irregularidad en la superficie de contacto.
- 5.6 Liberar la tensión mecánica que pueda provocar el cable de los acelerómetros durante el proceso de calibración. Para ello, fijar el cable en una superficie inmóvil dejando una holgura en forma de arco en el extremo correspondiente al acelerómetro.
- 5.7 En el caso de acelerómetros piezoeléctricos, utilizar siempre el cable de señal suministrado con el acelerómetro.
- 5.8 Todos los instrumentos que intervienen en la calibración deberán permanecer conectados y encendidos un mínimo de 15 minutos antes de empezar la calibración en el caso del acelerómetro bajo prueba, y un mínimo de 60 minutos en el caso del resto de la instrumentación.
- 5.9 La conexión de los equipos se llevará a cabo tal y como muestra la figura A3.1.

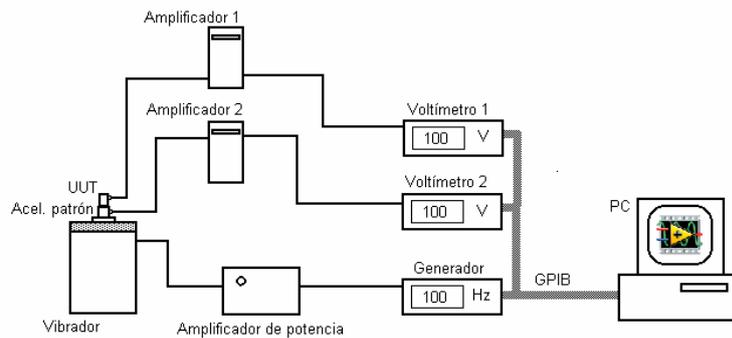


Figura A1.1. Diagrama de conexión de los instrumentos que intervienen en la calibración.

6 Realización de la calibración

6.1 Determinación de la nueva sensibilidad.

- 6.1.1 La determinación de sensibilidad se realiza sometiendo al acelerómetro patrón y al acelerómetro en calibración a una vibración de amplitud y frecuencia constantes y comparando sus señales de salida.
- 6.1.2 Configurar el acondicionador de señal del acelerómetro bajo prueba y calcular la sensibilidad de salida del conjunto en mV/g según la siguiente expresión:

$$S_{out_cal} = S_A \cdot S_{UUT_config}$$

donde:

S_{UUT_config} es la sensibilidad del UUT configurada en el acondicionador de señal,

G_{UUT} es la ganancia o sensibilidad del acondicionador de señal del UUT.

- 6.1.3 Someter al conjunto acelerómetro patrón + UUT a una vibración de 10g de amplitud RMS y 160Hz. Dejar estabilizar las señales 10 segundos.
- 6.1.4 Realizar una adquisición de la lectura del valor RMS de la señal de salida del acelerómetro patrón mediante el multímetro correspondiente. Acto seguido, hacer lo propio con la señal de salida del UUT, e inmediatamente después, volver a capturar la señal de salida del acelerómetro patrón. Con ello, se adquieren los siguientes datos:

V_{pi1} , primer valor de tensión de salida RMS adquirida de la cadena patrón,

V_{pi2} , segundo valor de tensión de salida RMS adquirida de la cadena patrón,

V_{UUT_i} , valor de tensión de salida RMS adquirida de la cadena en calibración

- 6.1.5 Con los dos valores de tensión RMS adquiridos del patrón realizar la media y obtener el valor de amplitud de referencia utilizando la sensibilidad del acelerómetro patrón, tal y como se indica a continuación.

$$A_{p_i} = \frac{V_{p_{i1}} - V_{p_{i2}}}{2} \cdot \frac{1}{S_p}$$

6.1.6 De modo similar, obtener la amplitud en g capturada por la cadena en calibración:

$$A_{UUT_i} = \frac{V_{A_{i1}}}{S_{out_cal}}$$

6.1.7 Finalmente, se obtiene la nueva sensibilidad del acelerómetro en calibración comparando las amplitudes indicadas por ambos acelerómetros y tomando como referencia la del acelerómetro patrón:

$$S_{UUT_i} = \frac{A_{UUT_i}}{A_{p_i}} \cdot S_{UUT_config}$$

6.1.8 Realizar un total de 10 repeticiones de todo el proceso para obtener la nueva sensibilidad como la media de las 10 sensibilidades halladas.

$$S_{UUT_m} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (S_{UUT_i})}{10}$$

6.1.9 Hallar la desviación estándar de la media utilizando la siguiente expresión:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{UUT_i} - S_{UUT_m})^2}{10 - 1}$$

6.2 Calibración de la linealidad en amplitud.

6.2.1 La calibración de la linealidad en amplitud consiste en someter a los acelerómetros a vibraciones de diversas amplitudes a una misma frecuencia de referencia y estudiar la desviación de la sensibilidad del acelerómetro en calibración respecto a la hallada en el punto 6.1.

6.2.2 Escoger un mínimo de 4 puntos dentro del rango de amplitud del acelerómetro en calibración, siendo la amplitud máxima permitido por el patrón de unos 40g_{RMS} en el mejor caso. Siempre que sea posible, escoger los valores de amplitud utilizados en la calibración del acelerómetro patrón (normalmente, 5, 10, 15, 20 y 24g_{RMS}).

6.2.3 Configurar el generador a la misma frecuencia utilizada para la calibración de sensibilidad y someter al conjunto acelerómetro patrón + UUT a la amplitud correspondiente al primer punto (la más baja, siempre en sentido creciente).

6.2.4 Dejar estabilizar las señales unos 10 segundos y tomar lecturas de las señales de salida del mismo modo que en el punto 6.1.4.

- 6.2.5 Aplicar las correcciones a los valores de amplitud patrón según su último certificado de calibración.

$$A_{p_i} = \frac{V_{p_{i1}} - V_{p_{i2}}}{2} \cdot \frac{1}{S_p - \Delta S_{p_i}}$$

donde:

ΔS_{p_i} es la corrección de la sensibilidad en el punto de amplitud i .

- 6.2.6 Obtener la amplitud en g leída por el UUT a partir de la nueva sensibilidad hallada en el punto 6.1.8.

$$A_{UUT_i} = \frac{V_{A_{i1}}}{S_A \cdot S_{UUT_m}}$$

- 6.2.7 Hallar la sensibilidad del acelerómetro en el punto de amplitud calibrado utilizando la siguiente expresión:

$$S_{UUT_i} = \frac{A_{UUT_i}}{A_{p_i}} \cdot S_{UUT_m}$$

- 6.2.8 Calcular el porcentaje de desviación de la sensibilidad respecto a la hallada en la calibración de sensibilidad:

$$e_{linealidad,i} (\%) = \frac{S_{UUT_i} - S_{UUT_m}}{S_{UUT_m}} \cdot 100$$

- 6.2.9 Repetir el proceso en el resto de amplitudes definidas en el punto 6.2.2.

6.3 Calibración de la respuesta en frecuencia.

- 6.3.1 La calibración de la respuesta en frecuencia consiste en someter a los acelerómetros a un barrido de frecuencias dentro de su ancho de banda, a una misma amplitud de referencia y estudiar la desviación de la sensibilidad del acelerómetro en cada punto.
- 6.3.2 Seleccionar el intervalo de frecuencias a calibrar y realizar un barrido discreto de, al menos, 10 muestras por década a una amplitud igual a la utilizada en la calibración de sensibilidad. Siempre que sea posible, los valores de frecuencia deberán coincidir con los utilizados en la calibración del acelerómetro patrón.
- 6.3.3 Para cada valor de frecuencia, dejar estabilizar las señales uno segundos y, acto seguido, obtener las lecturas del patrón y el UUT utilizando el método descrito en el punto 6.1.4 para minimizar el error producido por el desfase entre lecturas.

- 6.3.4 En caso de usar las frecuencias de la calibración del patrón, aplicar las correcciones a los valores de amplitud registrados por el patrón según los resultados de su calibración de respuesta en frecuencia. Utilizar para ello la misma expresión utilizada en el punto 6.2.5.
- 6.3.5 Hallar la sensibilidad del acelerómetro en el punto calibrado aplicando las expresiones vistas en los puntos 6.2.6 y 6.2.7.
- 6.3.6 Calcular el porcentaje de desviación de la sensibilidad respecto a la hallada en la calibración de sensibilidad.

$$e_{f_i}(\%) = \frac{S_{UUT_i} - S_{UUT_m}}{S_{UUT_m}} \cdot 100$$

- 6.3.7 Repetir el mismo proceso en el resto de frecuencias (siempre en sentido creciente).

7 Estimación de la incertidumbre de medida

Para cada eje de cada acelerómetro calibrado se estimará una incertidumbre de calibración, expresada en porcentaje y asociada a la nueva sensibilidad a la amplitud y frecuencia de referencia y otra incertidumbre de calibración asociada a los valores de desviación hallados en la calibración de la respuesta en frecuencia.

La estimación de la incertidumbre de medida se realiza de acuerdo con la norma ISO 16063-21 y la Guía GUM de la estimación de la incertidumbre de medida. Dicha estimación se lleva a cabo a las amplitudes y frecuencias de referencia y en las condiciones expresadas en el certificado de calibración, no siendo aplicable a los valores de linealidad en amplitud ni a medidas realizadas en otras condiciones de las expresadas en el informe.

La función modelo que describe el comportamiento del sistema es la siguiente:

$$S_{UUT} = \frac{S_p}{S_A} \cdot V_R + \sum \Delta x_i + \sum \alpha x_i$$

donde:

$\sum \Delta x_i$ es el sumatorio de errores sistemáticos,

$\sum \alpha x_i$ es el sumatorio de errores aleatorios provocados por cada componente de la incertidumbre.

$$V_R = \frac{V_A}{V_p}$$

Para la estimación de la incertidumbre de calibración se deberán tener en cuenta las contribuciones que se indican seguidamente.

Los coeficientes de sensibilidad de cada contribución son iguales a la unidad debido a que se trata de incertidumbres relativas expresadas en porcentaje.

7.1 Contribución debida a la incertidumbre del acelerómetro patrón (Tipo B)

Del último certificado de calibración del conjunto acelerómetro patrón + acondicionador, se extraerá su incertidumbre de calibración para el punto considerado. Dicha incertidumbre se corresponde con la

incertidumbre expandida, por lo que para hallar la incertidumbre típica se deberá dividir dicho valor por el factor de cobertura k utilizado para su cálculo (normalmente $k = 2$ para un intervalo de confianza próximo al 95%).

$$u_p(\%) = \frac{U_p(\%)}{k_p}$$

7.2 Contribución debida a las especificaciones del amplificador del UUT (Tipo B)

Esta contribución es la provocada por la inexactitud del acondicionador de medida del acelerómetro bajo prueba del laboratorio. No aplica en caso de que se utilice el propio acondicionador que acompaña al equipo, como es en el caso de los acelerómetros capacitivos.

Se dispone de la incertidumbre de calibración de los acondicionadores utilizados en el laboratorio. No obstante, en la contribución a la incertidumbre se tendrán en cuenta las especificaciones de exactitud en lugar de la incertidumbre de calibración (caso más desfavorable) debido a que no siempre se utilizan en las condiciones en las que se calibraron y se tiene en cuenta la deriva en el tiempo.

Para su evaluación se asume una distribución rectangular de esperanza nula y un semi-intervalo de desviación típica correspondiente a la exactitud expresada en las especificaciones del fabricante, tal y como se muestra en la figura A3.2.

$$u_{E_A}(\%) = \frac{2 \cdot E_A(\%)}{\sqrt{12}} = \frac{E_A(\%)}{\sqrt{3}}$$

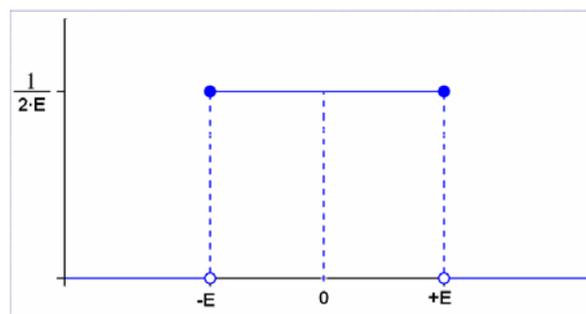


Figura A1.2. Contribución de la exactitud del acondicionador correspondiente a una distribución rectangular de intervalo [-Exactitud , +Exactitud].

7.3 Contribución debida a la sensibilidad transversal del acelerómetro patrón (Tipo B)

La sensibilidad transversal del acelerómetro patrón suele venir expresada en su certificado de calibración o, en su defecto, en las especificaciones del fabricante (más restrictivo).

El componente de error causado por la sensibilidad transversal depende de la amplitud transversal a_T generada por el excitador de vibraciones (a partir de ahora, excitación transversal) en conjunción con la propia sensibilidad transversal S_T del acelerómetro patrón. Sabiendo que existe una relación sinusoidal entre la sensibilidad transversal del conjunto con respecto al ángulo entre la excitación transversal y la sensibilidad transversal máxima del acelerómetro, se puede expresar la componente de error de la siguiente manera:

$$e_T = S_T \cdot a_T \cdot \cos(\beta)$$

Teniendo en cuenta que, en el momento de la calibración, no se conoce el ángulo relativo entre la dirección de la sensibilidad transversal de los transductores y la amplitud transversal del excitador, es razonable asumir una distribución rectangular del ángulo β de intervalo $[-\pi, \pi]$, siendo la densidad de probabilidad de la componente de error, la descrita por la siguiente expresión:

$$w(e_T) = \frac{1}{b \cdot \pi \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{e_T}{b}\right)^2}}$$

donde:

$$b = S_{T_{\max}} \cdot a_{T_{\max}}$$

$$-b < e_T < b$$

Esta densidad de probabilidad corresponde a la distribución de probabilidad arco seno, la cual puede venir representada como en el ejemplo de la figura A3.3 que se corresponde con el caso en estudio.

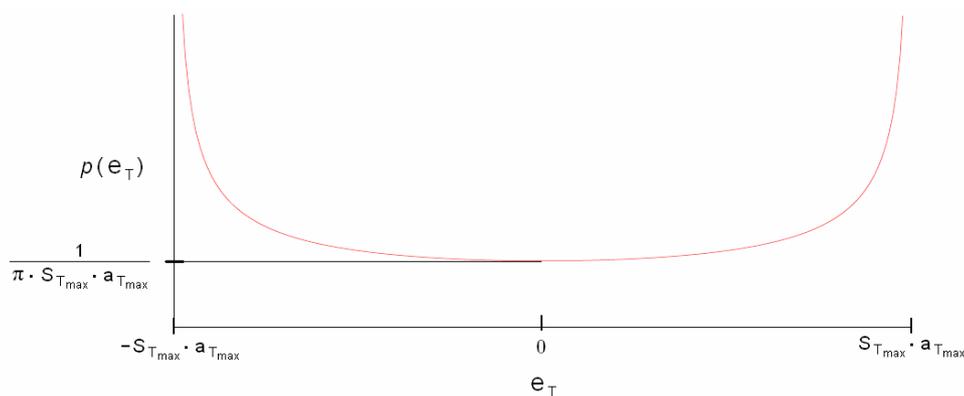


Figura A1.3. Distribución de probabilidad arco seno característico de la componente de error debido a la sensibilidad transversal del conjunto excitador + acelerómetro.

El factor utilizado para estimar una incertidumbre con distribución arco seno es $1/\sqrt{2}$. No obstante, hay que tener en cuenta que el ángulo β existente entre la dirección de la excitación transversal y la sensibilidad transversal máxima del acelerómetro no es conocido, aproximándolo mediante una distribución rectangular como se ha expuesto anteriormente. Asimismo, se debe tomar en cuenta que la sensibilidad transversal del acelerómetro es una estimación cuya distribución también podríamos asumir rectangular, hechos que provocan que debamos normalizar la incertidumbre estándar mediante el factor $1/\sqrt{12}$ correspondiente a la distribución rectangular, tal y como se observa a continuación:

$$u_{T_p}(mV) = \frac{2 \cdot S_{T_p} \cdot 2 \cdot a_{T_p}}{\sqrt{12} \cdot \sqrt{12} \cdot \sqrt{2}} = \frac{S_{T_p} \cdot a_{T_p}}{\sqrt{18}}$$

$$u_{T_p}(\%) = \frac{S_{T_p}(\%) \cdot a_T(\%)}{\sqrt{18}} \cdot \frac{1}{100}$$

7.4 Contribución debida a la sensibilidad transversal del UUT (Tipo B)

La incertidumbre estándar debida a la sensibilidad transversal del acelerómetro en calibración se calcula del mismo modo que en la incertidumbre debida a la sensibilidad transversal del acelerómetro patrón, cálculo que ya ha sido expuesto en el anterior párrafo.

Debido a la multitud de acelerómetros a calibrar y la diversidad de sus especificaciones, se les asignará una sensibilidad transversal del 3% a todos los acelerómetros en calibración. Se ha escogido dicha sensibilidad transversal porque va a ser la máxima y la más habitual que se va a encontrar en la calibración de los acelerómetros disponibles en la empresa.

Por tanto, la incertidumbre estándar debida a la sensibilidad transversal del UUT se obtendrá mediante la siguiente expresión:

$$u_{T_{UUT}}(\%) = \frac{S_{T_{UUT}}(\%) a_T(\%) \cdot 1}{\sqrt{18} \cdot 100}$$

7.5 Contribución debida a la distorsión armónica de la señal de aceleración (Tipo B)

Debido a la distorsión armónica de la señal de salida del generador de funciones y del amplificador de potencia, al roce de los mecanismos del excitador, la flexibilidad de los materiales y otras imperfecciones mecánicas, es inevitable que la aceleración presente armónicos indeseados en lugar de producirse únicamente a la frecuencia de estudio.

Los instrumentos que contribuyen a la distorsión armónica de la señal de salida son el generador de funciones, el amplificador de potencia y el excitador de vibraciones.

Asumiendo una distribución de probabilidad rectangular de esperanza nula y semi-intervalo de desviación típica igual a la combinación de los errores debidos a la distorsión armónica, se estima una incertidumbre típica definida por la siguiente expresión:

$$u_{THD}(\%) = \frac{\sqrt{THD_{gen}^2 + THD_{amp}^2 + THD_{exc}^2}}{\sqrt{3}}$$

7.6 Contribución debida a la deriva en el tiempo de la sensibilidad del acelerómetro patrón (Tipo B)

Todo instrumento de medida sufre una deriva de su comportamiento con el tiempo. Esta deriva empieza a contabilizarse desde que el equipo se fabricó o desde su última calibración.

La deriva se obtiene estudiando el historial de calibraciones del set acelerómetro + amplificador patrón y se estima que está dentro del intervalo $\pm 0.2\%$.

La evaluación de esta contribución a la incertidumbre de medida es de tipo B y su modelo de distribución de probabilidad se asume rectangular con esperanza nula y semi-intervalo de desviación típica d_p .

$$u_{d_p}(\%) = \frac{2 \cdot d_p}{\sqrt{12}} = \frac{d_p}{\sqrt{3}}$$

7.7 Contribución debida a la incertidumbre de medida del multímetro patrón (Tipo B)

El multímetro patrón utilizado para la lectura de las señales de salida del acelerómetro patrón y la cadena en calibración tiene su propia incertidumbre de medida, con $k = 2$, que viene reflejada en su último certificado de calibración.

A dicha incertidumbre de medida se le debe añadir la componente causada por la deriva en el tiempo de las especificaciones del multímetro. Esta deriva (d_{dmm}) viene dada en la hoja de características del multímetro, por lo que se trata como una incertidumbre de tipo B con modelo de distribución de probabilidad rectangular.

La incertidumbre típica asociada al multímetro se estima combinando ambas contribuciones tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$u_{dmm}(\%) = \sqrt{\left(\frac{U_{dmm,cert}}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_{dmm}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

7.8 Contribución debida al desfase temporal en las medidas del patrón y el UUT (Tipo B)

Existe un desfase temporal entre la medida del patrón y la de la cadena de medida en calibración. Este desfase logra compensarse, en gran parte, por el método del promedio de las medidas del patrón. No obstante, dicho método es una aproximación, por lo que seguirá existiendo una incertidumbre de medida provocada por la imposibilidad de medir el patrón y el UUT al mismo tiempo.

El error máximo provocado por el desfase de medidas se estima en un $\pm 0.05\%$ según estudios realizados con nuestro sistema. Su contribución a la incertidumbre de medida se estima asumiendo una distribución de probabilidad rectangular de esperanza nula y semi-intervalo igual al semi-intervalo de error máximo hallado en los estudios:

$$u_{desfase}(\%) = \frac{E_{desfase}}{\sqrt{3}} = \frac{0,05\%}{\sqrt{3}} = 0,029\%$$

7.9 Contribución debida a los parámetros de montaje del UUT sobre el acelerómetro patrón (Tipo B)

Una de las contribuciones a la incertidumbre de medida durante la calibración es la debida al propio montaje del UUT.

Para su estimación, se asume una distribución de probabilidad rectangular de esperanza nula y semi-intervalo de desviación típica igual al semi-intervalo de error provocado por los parámetros de montaje:

$$u_{E_M}(\%) = \frac{E_M}{\sqrt{3}}$$

7.10 Contribución debida al uso de una amplitud diferente de la usada en la calibración del patrón (Tipo B)

En los pocos casos en los que, para la extracción de la nueva sensibilidad, se utiliza una amplitud de aceleración diferente de la utilizada en la calibración de sensibilidad del acelerómetro patrón, hay que tener en cuenta la no linealidad en amplitud del patrón. Dicha no linealidad puede determinarse a partir de la calibración de la linealidad en amplitud que se muestra en el certificado de calibración del acelerómetro patrón. Dicha no linealidad está expresada en tanto por ciento respecto a la sensibilidad hallada a la amplitud y frecuencia de referencia (10g y 160Hz).

Debido a que en la calibración de linealidad en amplitud del acelerómetro patrón no se obtiene una incertidumbre de medida, se considerará la no linealidad como un parámetro del acelerómetro (evaluación de tipo B) cuya contribución seguirá el modelo de distribución rectangular con esperanza igual a la corrección hallada en el certificado del patrón y semi-intervalo de desviación típica igual a la no linealidad máxima del acelerómetro según especificaciones:

$$u_{NL_p}(\%) = \frac{NL_p}{\sqrt{3}}$$

$$E(u_{NL_p}) = \frac{V_A}{S_A \cdot V_p} \cdot (\Delta S_{p_i})$$

donde:

ΔS_{p_i} es la corrección de la sensibilidad patrón en el punto de amplitud calibrado.

7.11 Contribución debida al esfuerzo mecánico sufrido por la base de montaje (No aplica)

Debido a la aceleración, la base metálica que separa el acelerómetro patrón del UUT se ve sometida a un esfuerzo de tracción/compresión y flexión. Esta contribución puede despreciarse para frecuencias inferiores a los 5kHz por lo que, en nuestro caso, no se tendrá en cuenta en la estimación de la incertidumbre puesto que nunca se utilizarán frecuencias superiores a los 2kHz.

7.12 Contribución debida a la temperatura ambiente (Tipo B)

Durante la calibración, las condiciones ambientales del laboratorio son estables. No obstante, la medición de la temperatura ambiente tiene asociada una incertidumbre de medida. Esta incertidumbre se puede extraer del certificado de calibración del termo-higrómetro utilizado para medir la temperatura ambiente, y su incertidumbre típica se obtiene dividiendo la incertidumbre expandida por el factor de cobertura utilizado para su estimación (normalmente $k = 2$ si no se especifica lo contrario).

La incertidumbre expandida de la temperatura medida por el termo-higrómetro es de $\pm 1^\circ\text{C}$, por lo que su incertidumbre típica será de 0.5°C .

Según especificaciones de los transductores, el coeficiente de variación de la señal de salida respecto a la variación de temperatura en los sensores es el siguiente:

Para el acelerómetro patrón B&K 8305, $C_{temp} = 0.03\%/^\circ\text{C}$

Para los acelerómetros piezorresistivos (peor caso), el coeficiente termal máximo encontrado es de $\pm 0.25\%/^\circ\text{C}$ para acelerómetros triaxiales y de $\pm 0.1\%/^\circ\text{C}$ para uniaxiales.

La distribución de probabilidad de la contribución debida a la temperatura ambiente en cada uno de los transductores se asume rectangular, con esperanza nula y semi-intervalo de desviación típica igual a la variación relativa de la sensibilidad.

$$u_{Ta p} = \frac{C_{Tp} \cdot 0.5^\circ C}{\sqrt{3}}$$

$$u_{Ta UUT} = \frac{C_{TUUT} \cdot 0.5^\circ C}{\sqrt{3}}$$

Finalmente, para hallar la contribución debida a la temperatura ambiente, deben combinarse las incertidumbres típicas debidas a la temperatura ambiente de cada transductor. Para ello hay que aplicar la ley de propagación de varianzas, considerando que el coeficiente de sensibilidad es igual a la unidad (ya que son incertidumbres relativas) y su correlación es total porque ambos acelerómetros están sometidos a la misma temperatura ambiente:

$$u_{Tamb}^2 = u_{Ta p}^2 + u_{Ta UUT}^2 + 2 \cdot u_{Ta p} \cdot u_{Ta UUT} ;$$

$$u_{Tamb} = u_{Ta p} + u_{Ta UUT}$$

7.13 Contribución debida a la variación de temperatura en los transductores (Tipo B)

La variación de temperatura en los acelerómetros durante la calibración es debida a la pequeña fluctuación de la temperatura ambiente y, sobretodo, a la manipulación de los acelerómetros durante el montaje. Utilizando los guantes adecuados, se considera razonable una variación máxima de la temperatura interna del UUT durante la calibración de $\pm 0.5^\circ C$ en los acelerómetros triaxiales y de $\pm 1^\circ C$ en los uniaxiales. Esta diferencia es debida a que los acelerómetros triaxiales tienen un volumen mucho mayor que los uniaxiales y por tanto, mayor inercia térmica.

La variación máxima de temperatura del patrón será menor que en el caso del UUT debido a que no se manipula del mismo modo que el UUT. Se considera razonable una variación máxima de $\pm 0.2^\circ C$ durante el transcurso de la calibración.

Las incertidumbres del acelerómetro patrón y la del UUT debidas a su variación de temperatura interna durante la calibración se considera que están correlacionadas debido a que durante la manipulación de ambos acelerómetros sus temperaturas aumentan de manera proporcional.

La contribución del acelerómetro patrón se estima para una aceleración de referencia de 10g RMS que será la máxima utilizada en la calibración de sensibilidad y respuesta en frecuencia. Dicha contribución sigue un modelo de densidad de probabilidad rectangular con esperanza nula y semi-intervalo de desviación típica igual a la desviación máxima respecto a la temperatura de referencia:

$$u_{\Delta T_{ref}} = \frac{\Delta T_p \cdot C_{Tp}}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0.5 ms^{-2} / ^\circ C}{9,807 ms^{-2}} \cdot 0.2^\circ C}{10g \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} \cdot 100\% = 0.042\%$$

La contribución del UUT también se calcula mediante una evaluación de tipo B con distribución de probabilidad rectangular, tal y como se observa en la siguiente expresión:

$$u_{\Delta T_{UUT1}} = \frac{\Delta T_{UUT} \cdot C_{TUUT}}{\sqrt{3}} = \frac{0.25 \frac{\%}{^\circ C} \cdot 0.5^\circ C}{\sqrt{3}} = 0.072\%$$

$$u_{\Delta T_{UUT2}} = \frac{\Delta T_{UUT} \cdot C_{temp_{UUT}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.1 \frac{\%}{^\circ C} \cdot 1^\circ C}{\sqrt{3}} = 0.058\%$$

ambas contribuciones se combinan según la ley de propagación de incertidumbres para dar como resultado la incertidumbre estándar debida a las condiciones ambientales:

$$u_{\Delta T \text{ triaxial}} = u_{\Delta T \text{ ref}} + u_{\Delta T_{\text{UUT1}}} \approx 0.11\%$$

$$u_{\Delta T \text{ uniaxial}} = u_{\Delta T \text{ ref}} + u_{\Delta T_{\text{UUT2}}} \approx 0.1\%$$

7.14 Contribución debida a efectos medioambientales (Tipo B)

El único efecto medioambiental que podría afectar a la medida de manera perceptible es el debido al campo magnético provocado por el excitador de vibraciones. El resto de equipos como el generador de funciones, amplificador de potencia o el osciloscopio están situados a una distancia suficiente como para que sus campos magnéticos no afecten a la medida.

De la hoja de características del excitador de vibraciones se observa que el campo magnético producido es de unos 0,008T a una distancia de 0,5 pulgadas (12,7mm) de su base. Esta distancia es a la que se encuentra el sensor piezoeléctrico del acelerómetro patrón durante la calibración, tal y como se ilustra en la figura A3.3.

Según su hoja de características técnicas, el acelerómetro patrón B&K 8305 tiene una sensibilidad a los campos magnéticos de $1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{T}$, lo cual significa que, para un campo magnético de 0.008T la variación de la aceleración leída debido al mismo será aproximadamente de:

$$\Delta a_{MF} = 1 \frac{\text{m}\cdot\text{s}^{-2}}{\text{T}} \cdot 0.008\text{T} = 0.008\text{m}\cdot\text{s}^{-2} = 0.00082\text{g}$$

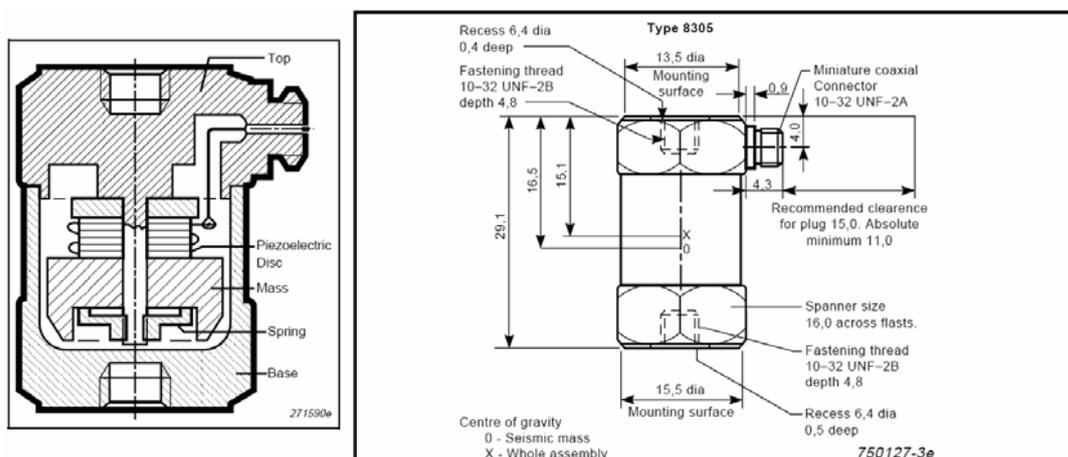


Figura A1.3. A la izquierda, vista de la sección del acelerómetro patrón B&K 8305 y a la derecha, sus dimensiones físicas.

Considerando que para la determinación de la nueva sensibilidad se utilizarán aceleraciones de entre 4 y 10g, dicha variación de aceleración encontrada supondrá entre el 0,01 y el 0,02%.

La contribución debida al campo magnético sigue un modelo de distribución de probabilidad rectangular de esperanza nula y semi-intervalo de desviación típica igual a la máxima variación de la sensibilidad del acelerómetro patrón debida al efecto del campo magnético:

$$u_{MF} = \frac{0.02\%}{\sqrt{3}}$$

7.15 Desviación estándar de la media (Tipo A)

Como última contribución a la incertidumbre de medida, para englobar otros posibles errores aleatorios no contemplados, se debe tener en cuenta la desviación típica de las diez mediciones realizadas en condiciones de repetibilidad:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

La contribución de la desviación típica de la media (también llamada incertidumbre típica) se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$u_s = \frac{s}{\sqrt{10}}$$

Su estimación se realiza asumiendo un modelo de distribución normal con esperanza igual a la sensibilidad media hallada en la calibración.

7.16 Incertidumbre combinada

Para la estimación de la incertidumbre de medida final se deben combinar todas las contribuciones halladas. Para ello, ha de aplicarse la ley de propagación de incertidumbres vista en el apartado 1.2.4.5.

Para proceder, primero se deben hallar todos los coeficientes de sensibilidad. En este caso, todos los coeficientes son iguales a la unidad debido a que todas las contribuciones están expresadas en porcentaje sobre la sensibilidad del acelerómetro.

$$u_{c\,rel}(\%) = \sqrt{u_p^2 + u_{amp}^2 + u_{T\,amb}^2 + u_{\Delta T}^2 + \dots + u_s^2}$$

7.17 Incertidumbre expandida de calibración

Dado que se han realizado 10 observaciones en condiciones de repetibilidad y que, por tanto, la incertidumbre típica asociada tiene los suficientes grados de libertad, de acuerdo con las recomendaciones de la EA-4/02 se puede atribuir una distribución normal atribuyendo un factor de cobertura $k=2$ correspondiente a un intervalo de confianza de, aproximadamente un 95%.

$$U_{rel}(S_{UUT\,m}) = \pm k \cdot u_{c\,rel} = \pm 2 \cdot u_{c\,rel}$$

8 Criterios de aceptación y rechazo

Por lo general y según la normativa de ensayos de Seguridad Pasiva, el acelerómetro en calibración se considerará apto siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- El error de linealidad observado en la calibración de linealidad en amplitud ha de ser inferior al 1%.
- La diferencia entre la sensibilidad hallada y la original debe ser menor del 5%.
- El error de sensibilidad hallado en la respuesta en frecuencia entre los 100 y 1000Hz debe ser inferior al 5%

Cuando lo requiera el cliente, el criterio de aceptación y rechazo podrá venir definido por las especificaciones del fabricante del acelerómetro o por las especificaciones impuestas por el mismo cliente.

9 Elaboración del informe de calibración

Para presentar los resultados de calibración y realizar los cálculos descritos anteriormente se utilizará la plantilla HD-Acelerómetros.v3 de la aplicación informática *Visual Factory Calibre*.

El certificado presentará, como mínimo, la siguiente información:

- a) Código de procedimiento de calibración.
- b) Fecha de calibración y de próxima calibración.
- c) Instrumentación utilizada.
- d) Condiciones ambientales.
- e) Técnica de montaje del UUT sobre el acelerómetro de referencia.
- f) Configuración del amplificador utilizado para acondicionar la señal del UUT.
- g) Resultados de la calibración.

El mismo software utilizado para la automatización de la calibración deberá encargarse de pasar todos los datos necesarios y los resultados de calibración, de forma automática, a la plantilla de Excel una vez concluida la calibración.

En los resultados de la calibración se incluirá la sensibilidad media hallada en la determinación de sensibilidad, la sensibilidad hallada en cada punto de linealidad en amplitud junto con su desviación respecto a la media, y la desviación de la sensibilidad en cada punto de la respuesta en frecuencia. Además, deberá indicarse la incertidumbre expandida relativa asociada a la nueva sensibilidad y a la sensibilidad hallada a cada frecuencia con un factor de cobertura $k = 2$.

La incertidumbre deberá calcularse y ordenarse por medio de una tabla esquematizada como la mostrada a continuación:

Tabla de incertidumbre de medida

Cantidad X_i	Descripción	Modelo de distribución de probabilidad	Esperanza x_i	Coefficiente de sensibilidad c_i	Semi-intervalo	Factor	Contribución relativa %
S_p	Calibración del set acelerómetro + acondicionador patrón	Normal	0	1	0,5	1/2	0,25
δS_p	Deriva en el tiempo de sensibilidad del set patrón	Rectangular	0	1	0,15	1/3	0,09
$S_{p\#Lx}$	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje X)	Rectangular	0	1	N.A.	1/3	0,00
$S_{p\#Ly}$	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje Y)	Rectangular	0	1	N.A.	1/3	0,00
$S_{p\#Lz}$	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje Z)	Rectangular	0	1	N.A.	1/3	0,00
S_A	Sensibilidad del acondicionador del UUT (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,03	1/3	0,02
V_p	Voltaje de salida del set patrón (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,4	1/3	0,23
V_A	Voltaje de salida del set UUT (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,4	1/3	0,23
S_{Tp}	Sensibilidad transversal del acelerómetro patrón	Especial	0	1	0,16	1/18	0,04
S_{Tuu}	Sensibilidad transversal del UUT	Especial	0	1	0,3	1/18	0,07
S_{Tuu}	Desfase en las mediciones del patrón y el UUT	Rectangular	0	1	0,05	1/3	0,03
$I(V_{RTHD})$	Influencia del THD en el ratio de salida	Rectangular	0	1	0,26	1/3	0,15
$I(S_{pT...})$	Influencia de la temperatura ambiente en la sensibilidad del acelerómetro patrón	Rectangular	0	Totalmente correlacionadas	0,015	1/3	0,08
$I(S_{uUT...})$	Influencia de la temperatura ambiente en la sensibilidad del UUT	Rectangular	0		0,13	1/3	
$I(S_{p\Delta T})$	Influencia de la variación de temperatura interna del aceler. patrón durante la calibración.	Rectangular	0		0,07	1/3	
$I(S_{u\Delta T})$	Influencia de la variación de temperatura interna del UUT durante la calibración.	Rectangular	0	0,13	1/3		
$I(V_{RH})$	Influencia de los parámetros de montaje en el ratio de salida	Rectangular	0	1	0,1	1/3	0,06
$I(S_{pH})$	Influencia del campo magnético en la sensibilidad del aceler. Patrón	Rectangular	0	1	0,02	1/3	0,01
s_x	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT...}$	1	s_x	1	
s_y	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT...}$	1	s_y	1	
s_z	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT...}$	1	s_z	1	
S_{UUTx}	Sensibilidad del eje X	Incertidumbre estándar (k = 1)					0,48
S_{UUTy}	Sensibilidad del eje Y	Incertidumbre estándar (k = 1)					0,48
S_{UUTz}	Sensibilidad del eje Z	Incertidumbre estándar (k = 1)					0,48

La plantilla del informe de calibración se anexa a continuación. Se incluyen únicamente las hojas correspondientes a un eje (eje X) ya que el resto de hojas son prácticamente iguales.

Equipo calibrado:

Nº inventario:	Procedimiento:
Descripción:	Fecha calibración:
Marca:	Próx. Calibración: 00/01/1900
Modelo:	
Nº de serie:	

Patrones utilizados:

Condiciones ambientales:

Nº inventario	Descripción	Próxima calibración		
93004	Calibrador de acelerómetros	mar-13	Temperatura:	°C
98186	Multímetro Agilent 34401A	dic-10		
03351	Amplificador de extensometría	abr-11	Humedad:	0%

Observaciones de la calibración:

Notas:

La nueva sensibilidad se extrae del promedio de 10 lecturas a una frecuencia y amplitud de referencia.

La incertidumbre expresada en el cálculo de la nueva sensibilidad corresponde a la incertidumbre expandida de calibración, obtenida multiplicando la incertidumbre típica por el factor de cobertura $k = 2$ que, para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

El equipo se considera apto cuando el error de sensibilidad es menor del 5%, el error de linealidad en amplitud menor del 1% y la máxima desviación en la respuesta en frecuencia menor del 5% entre 100 y 1000Hz.

Calibrado por:

Revisado:

Conforme responsable:

0

Configuración

Resultados (Eje X)

Tecnología:	Piezorresistivo	Rango:	±
Uso de amplificador:	SI	S original:	0
Output cadena UUT:	0 0	S actual:	0
Filtrado utilizado:	Pasa bajo 100kHz (Bessel)	<small>(Sensibilidad hallada en la anterior calibración.)</small>	
V alimentación:	0 Vdc		

1. Obtención de la nueva sensibilidad:

NUEVA SENSIBILIDAD:	0
----------------------------	----------

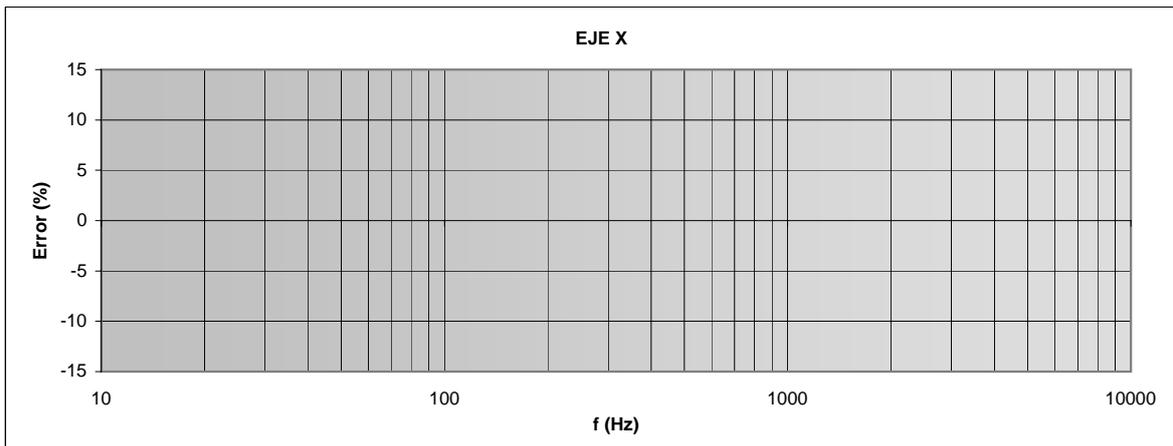
Frecuencia de referencia: **Hz**
Amplitud de referencia: **g rms**

Diferencia con la original:
Incertidumbre = ±

2. Linealidad en amplitud:

Frecuencia [Hz]	Patrón [g _{RMS}]	Equipo [g _{RMS}]	Sensibilidad []	Error [%]
0				
0				
0				

3. Respuesta en frecuencia:



Frecuencia [Hz]	Error [%]	Frecuencia [Hz]	Error [%]
--------------------	--------------	--------------------	--------------

Revisado:

#¡VALOR!

Conforme responsable:

0

0

Tabla de incertidumbre de medida

Cantidad	Descripción	Modelo de distribución de probabilidad	Esperanza	Coefficiente de sensibilidad	Semi-intervalo	Factor	Contribución relativa
X_i			x_i	c_i			%
S_p	Calibración del set acelerómetro + acondicionador patrón	Normal	0	1	0,5	1/2	0,25
δS_p	Deriva en el tiempo de sensibilidad del set patrón	Rectangular	0	1	0,15	1/ $\sqrt{3}$	0,09
S_{pNLx}	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje X)	Rectangular	0	1	N.A.	1/ $\sqrt{3}$	0,00
S_{pNLy}	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje Y)	Rectangular	0	1	N.A.	1/ $\sqrt{3}$	0,00
S_{pNLz}	No linealidad del acelerómetro patrón cuando se utiliza una amplitud distinta de 10g (eje Z)	Rectangular	0	1	N.A.	1/ $\sqrt{3}$	0,00
S_A	Sensibilidad del acondicionador del UUT (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,03	1/ $\sqrt{3}$	0,02
V_p	Voltaje de salida del set patrón (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,4	1/ $\sqrt{3}$	0,23
V_A	Voltaje de salida del set UUT (especificaciones)	Rectangular	0	1	0,4	1/ $\sqrt{3}$	0,23
S_{Tp}	Sensibilidad transversal del acelerómetro patrón	Especial	0	1	0,16	1/ $\sqrt{18}$	0,04
S_{Tuut}	Sensibilidad transversal del UUT	Especial	0	1	0,3	1/ $\sqrt{18}$	0,07
S_{Uut}	Desfase en las mediciones del patrón y el UUT	Rectangular	0	1	0,05	1/ $\sqrt{3}$	0,03
$I(V_{RTHD})$	Influencia del THD en el ratio de salida	Rectangular	0	1	0,26	1/ $\sqrt{3}$	0,15
$I(S_{pTamb})$	Influencia de la temperatura ambiente en la sensibilidad del acelerómetro patrón	Rectangular	0	Totalmente correlacionadas	0,015	1/ $\sqrt{3}$	0,08
$I(S_{uutTamb})$	Influencia de la temperatura ambiente en la sensibilidad del UUT	Rectangular	0		0,13	1/ $\sqrt{3}$	
$I(S_{p\Delta T})$	Influencia de la variación de temperatura interna del aceler. patrón durante la calibración.	Rectangular	0	1	0,07	1/ $\sqrt{3}$	0,12
$I(S_{uut\Delta T})$	Influencia de la variación de temperatura interna del UUT durante la calibración.	Rectangular	0	1	0,13	1/ $\sqrt{3}$	
$I(V_{RM})$	Influencia de los parámetros de montaje en el ratio de salida	Rectangular	0	1	0,1	1/ $\sqrt{3}$	0,06
$I(S_{pMF})$	Influencia del campo magnético en la sensibilidad del aceler. Patrón	Rectangular	0	1	0,02	1/ $\sqrt{3}$	0,01
S_x	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT_{mx}}$	1	s_x	1	
S_y	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT_{my}}$	1	s_y	1	
S_z	Desviación estándar de la media	Normal	$S_{UUT_{mz}}$	1	s_z	1	
S_{UUTx}	Sensibilidad del eje X	Incertidumbre estándar (k = 1)					0,48
S_{UUTy}	Sensibilidad del eje Y	Incertidumbre estándar (k = 1)					0,48
S_{UUTz}	Sensibilidad del eje Z	Incertidumbre estándar (k = 1)					0,48

ANEXO 2. Manual de uso del calibrador de acelerómetros.

El presente manual comprende las instrucciones para la configuración, instalación y uso del sistema automatizado para la calibración de acelerómetros desarrollado en este proyecto.

A.2.1. Componentes del sistema

El sistema está compuesto por los siguientes equipos:

- Uno o dos multímetros *Agilent 34401A*



- Un generador de funciones *Agilent 33120A*



- Un módulo de conmutación controlado por USB-RS232



- Un excitador de vibraciones electrodinámico *B&K 4809* con amplificador de potencia *B&K 2706*



- Un acelerómetro piezoeléctrico de referencia para medidas “back to back” *B&K 8305* con su acondicionador de carga *B&K 2609*



- Un sistema acondicionador para transductores piezorresistivos *HBM MGCPPlus* con tarjeta amplificadora *ML10B* y tarjeta de conexión *AP01*.



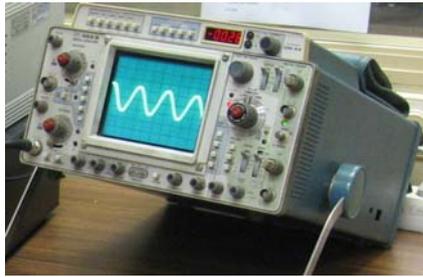
- Un acondicionador de carga para transductores piezoeléctricos *B&K 2626*.



- Una fuente acondicionadora para transductores IEPE (piezoeléctricos con electrónica incorporada).



- Un osciloscopio para observar la forma de onda de la señal de salida del equipo en calibración.



- Un PC para el control automatizado del proceso de calibración.



- Una tarjeta controladora de bus GPIB NI GPIB-USB-HS



A.2.2. Conexión de los equipos

Los equipos se conectan tal y como indica, de manera esquematizada, la siguiente figura:

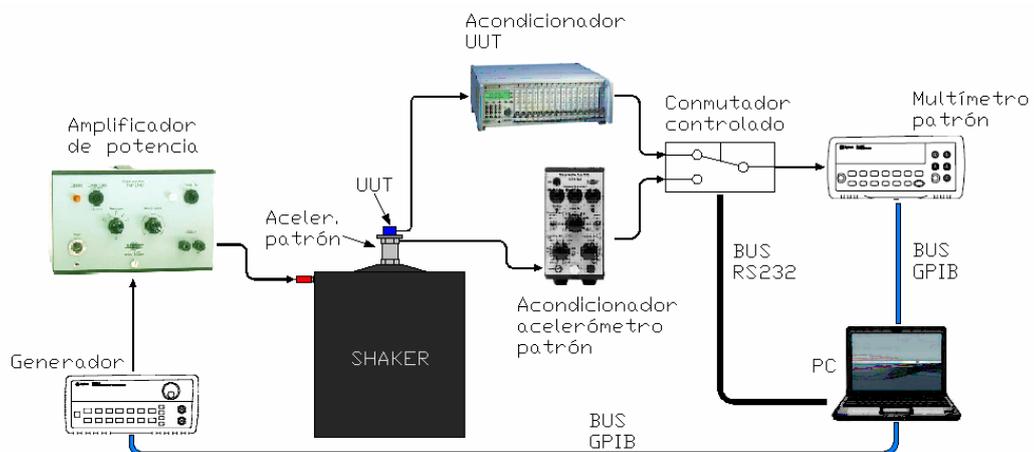


Figura A.2.1. Esquema gráfico de configuración del sistema.

Los equipos que lo requieran, deberán conectarse a la alimentación a 230VAC. El módulo de conmutación y la tarjeta controladora de bus GPIB no necesitan alimentación externa, el propio puerto USB es el encargado de suministrarles energía para su funcionamiento.

A.2.3. Requisitos mínimos del PC

Microsoft Windows XP SP2 (o posterior)		
NI LabVIEW 8.0 (o posterior)		
Visual Factory Calibre 6		
Microsoft Excel 2003 (o posterior)		
Características técnicas:		
	Mínimo	Recomendado
CPU	Pentium III / Celeron 866MHz o equivalente	Pentium 4 o equivalente
RAM	512MB	1024MB
Disco duro	900 MB libres en disco (LabVIEW opciones mínimas)	1,2GB libres en disco (LabVIEW instalación normal)
Puertos (libres)	1 x USB 1.0	2 x USB 2.0
Resolución pantalla	1280 x 800 (o superior)	1280 x 800 (o superior)

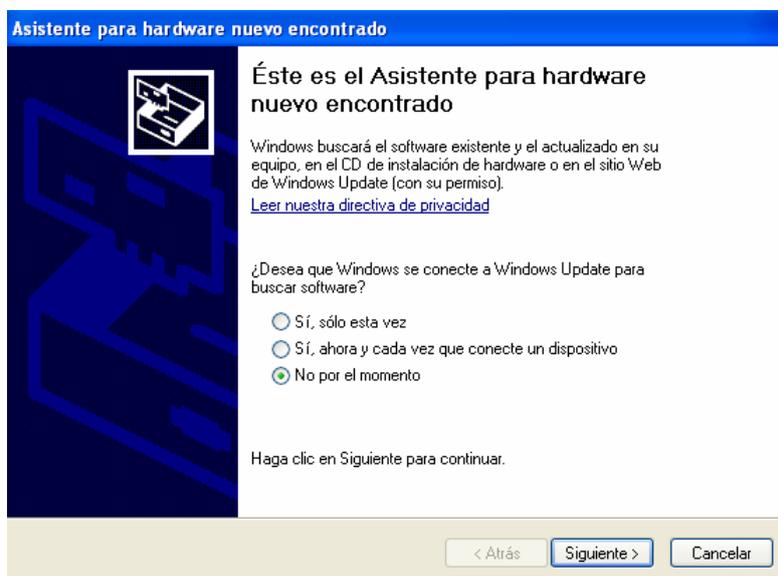
A.2.4. Instalación de la aplicación y los controladores

Para que la aplicación funcione al 100% es preciso tener instalado el software NI LabVIEW versión 8.0 ó posterior.

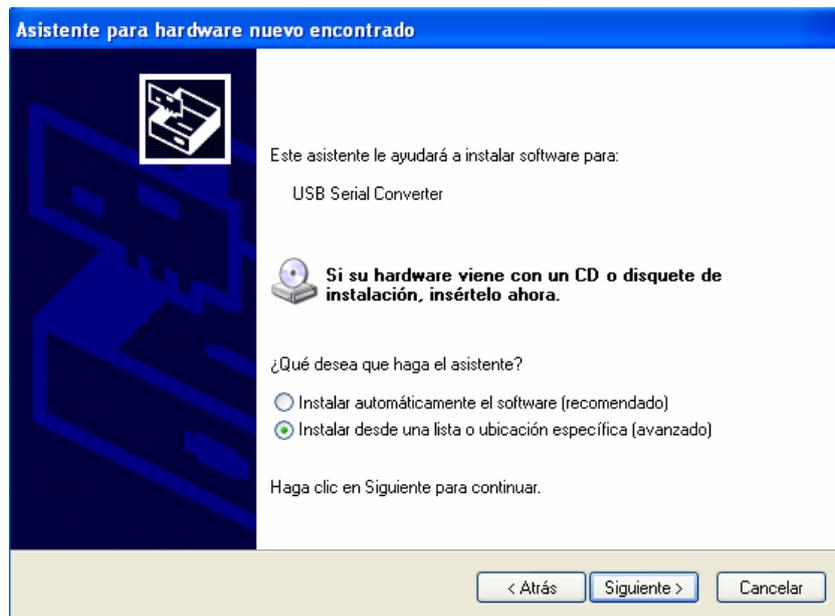
A.2.4.1 Instalación de los controladores

Para poder utilizar el módulo de conmutación es necesario instalar los controladores de FTDI. Para ello, seguir los pasos que se indican a continuación:

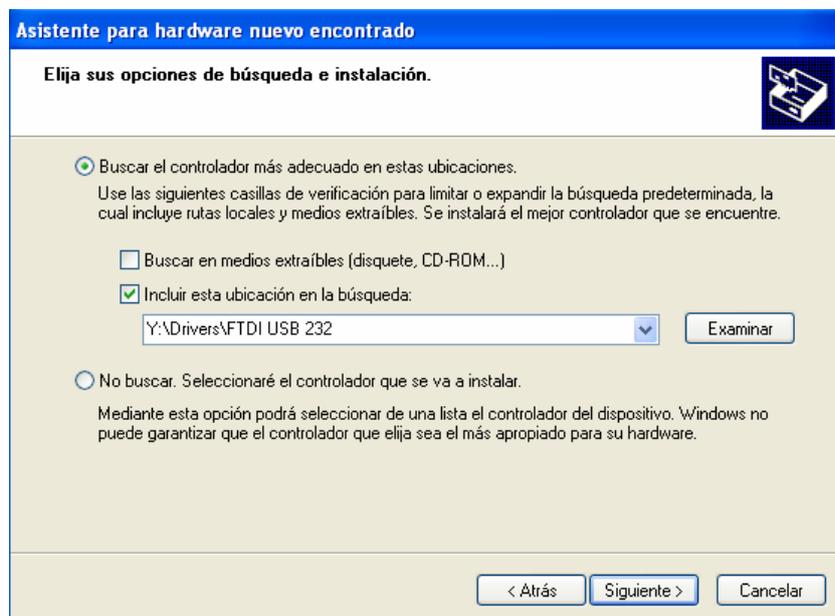
1. Conectar el módulo de conmutación en uno de los puertos USB del PC. El sistema operativo detectará un nuevo dispositivo y abrirá la ventana de instalación de nuevo Hardware.



2. Hacer clic en siguiente y seguir las instrucciones para la instalación en una ubicación específica.

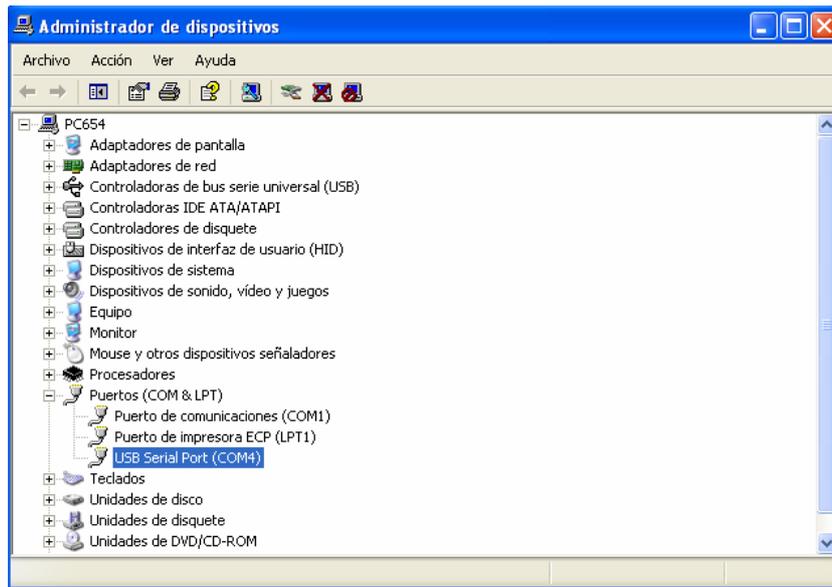


3. Elegir el directorio donde está ubicada la carpeta de drivers FTDI USB 232 y hacer clic en siguiente. Los drivers serán instalados automáticamente.



Es posible que el proceso deba repetirse una vez instalados por primera vez. Si se vuelve a ejecutar la instalación automáticamente, seguir los mismos pasos desde el punto 2.

4. Entrar en el administrador de dispositivos del sistema en “*Panel de control / Sistema / Hardware / Administrador de dispositivos*”, y hacer clic en el desplegable “*Puertos (COM & LPT)*”. En este desplegable debería aparecer nuestro nuevo dispositivo instalado, reconocido como “*USB Serial Port (COM X)*”.



A.2.4.2. Instalación de la aplicación

La instalación de la aplicación no requiere el uso de un instalador. Para utilizarla en cualquier ordenador que cumpla los requisitos del punto 3 bastará con copiar la carpeta de los archivos del programa en el directorio que el usuario desee.

Antes de ejecutar la aplicación, una vez copiados los archivos, ejecutar el archivo “**Configurar.vi**” y seguir las instrucciones para configurar los directorios predeterminados donde se guardarán y cargarán los documentos generados en las calibraciones:



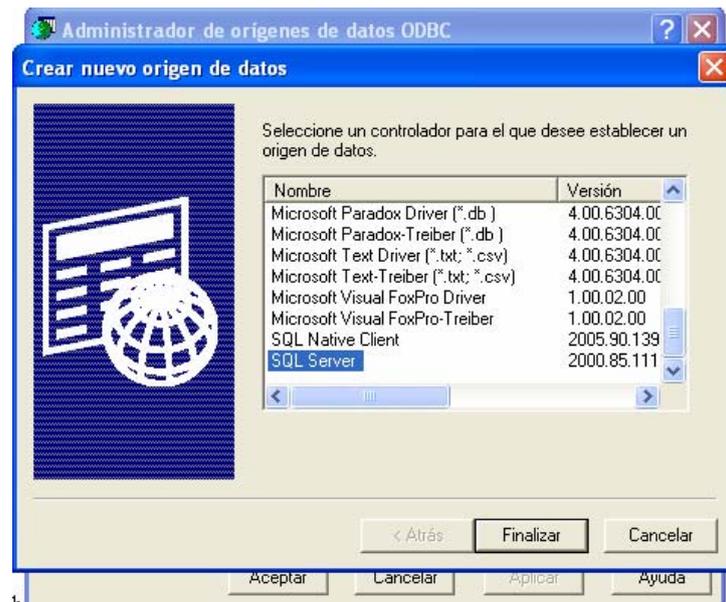
Figura A.2.2. Panel de configuración durante la instalación de la aplicación. Aquí se configuran los directorios predeterminados donde se guardarán los diferentes archivos de calibración.

A.2.4.3. Configuración de la base de datos de calibración

Por último se debe configurar el sistema para que la aplicación pueda leer la base de datos SQL donde están todos los datos de los acelerómetros inventariados.

Ir a Panel de control / Herramientas Administrativas / Orígenes de datos (ODBC) y en la pestaña “*DSN del sistema*” agregar un nuevo origen de datos del tipo *SQL Server*.

Una vez creado, configurarlo con los datos del servidor SQL.



A.2.5. Montaje de los acelerómetros

El UUT se debe montar sobre el acelerómetro patrón procurando que sus centros de gravedad coincidan en el eje del movimiento. Para ello, utilizar una de las bases de montaje disponibles que se adapten mejor a la forma y tipo de acelerómetro.



Figura A.2.3. Bases de montaje disponibles en el laboratorio.

Siempre que sea posible se deberá montar el UUT sobre el acelerómetro patrón utilizando un elemento roscado, ya que es el que proporciona mejores resultados en la respuesta en frecuencia a partir de unos 700Hz.



Figura A.2.4. Ejemplo de montaje de un acelerómetro utilizando cinta de doble cara

A.2.6. Manual de uso de la aplicación

A continuación se explica con detalle el funcionamiento de la aplicación.

A.2.6.1. Puesta en marcha del programa

Ejecutar el archivo “Acelerómetros.exe” ubicado en la raíz del directorio del programa. El programa iniciará automáticamente mostrando el panel frontal principal de la aplicación.

A.2.6.2. Ajustes previos

Al panel de ajustes del programa se puede acceder en cualquier momento haciendo clic en la pestaña “Ajustes” siempre y cuando no se esté llevando a cabo una calibración en ese preciso momento. Una vez se accede, se deshabilitan el resto de pestañas. Para volver al panel principal se debe seleccionar Aceptar o Cancelar.

En el panel de ajustes se pueden configurar todos los parámetros por defecto del proceso de calibración y de generación del informe de calibración. Todos los datos modificados se guardan en un archivo de inicio ubicado en el directorio de calibración indicado para que se puedan cargar cada vez que se inicia la aplicación.

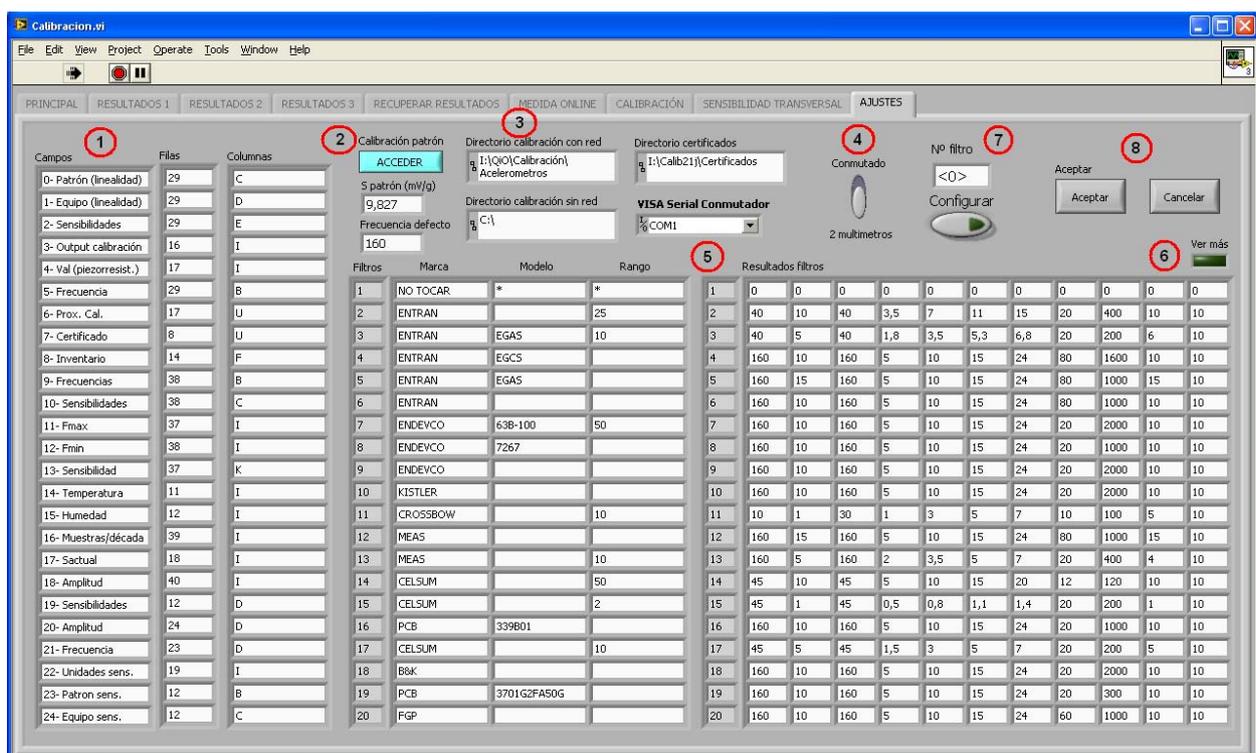


Figura A.2.5. Panel frontal de ajustes del sistema

- 1) Identificación de las celdas del informe de calibración donde se pasarán los datos de calibración y resultados.
- 2) Mediante este control se accede a los resultados de calibración de la respuesta en frecuencia del acelerómetro patrón. De esta forma, la aplicación realiza las correcciones pertinentes durante la calibración de respuesta en frecuencia de los acelerómetros.

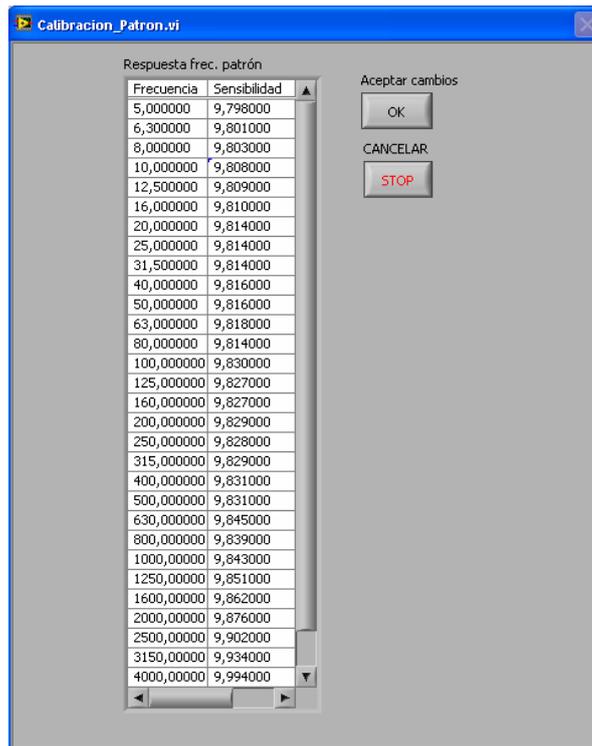


Figura A.2.6. Calibración del acelerómetro patrón

- 3) Directorios de calibración y de los números de certificado. Se debe indicar el directorio de red donde se guardarán los archivos de resultados generados durante las calibraciones, el directorio equivalente cuando no se puede trabajar con red, y por último, el directorio donde se generará y guardará el archivo en el que se generan los números de certificado.
- 4) Mediante este control se le indica a la aplicación si se va a realizar la calibración mediante uno o dos multímetros. Si se utiliza un solo multímetro se debe conectar el módulo de conmutación a un puerto USB o a un puerto RS232 disponible en el PC, y se debe indicar el número de puerto COM en el que está instalado el dispositivo (ver punto 4.1 del manual).
- 5) Aquí se encuentran los filtros determinados por el usuario. Estos filtros sirven para configurar los parámetros de calibración según la marca, modelo y rango del acelerómetro.
- 6) Mediante este botón se accede a una segunda tabla de filtros (40 filtros en total).
- 7) Este botón sirve para acceder al filtro que se desea configurar. Al seleccionar el filtro y hacer clic en el control se abre una nueva ventana en la que se puede configurar el filtro.

A.2.6.3. Configuración de la calibración

La configuración de la calibración se puede llevar a cabo de forma totalmente manual o de manera automática seleccionando en la base de datos el acelerómetro a calibrar.

Para abrir el panel de búsqueda del UUT, hacer clic en el control de búsqueda del cajetín “Búsqueda en base de datos”

Al hacer clic en OK se pasan todos los datos al panel frontal principal, configurándose automáticamente todos los datos de calibración.

Una vez en el panel frontal, cuando proceda, se pueden variar todos los parámetros de forma manual. Al variar la tecnología, se cambia automáticamente el sub-panel del amplificador UUT en el cual se configuran automáticamente los parámetros requeridos según el tipo de sensor, su alimentación y su sensibilidad vigente. Estos parámetros pueden variarse manualmente pero siempre se **deben corresponder con los configurados físicamente en el acondicionador del UUT.**

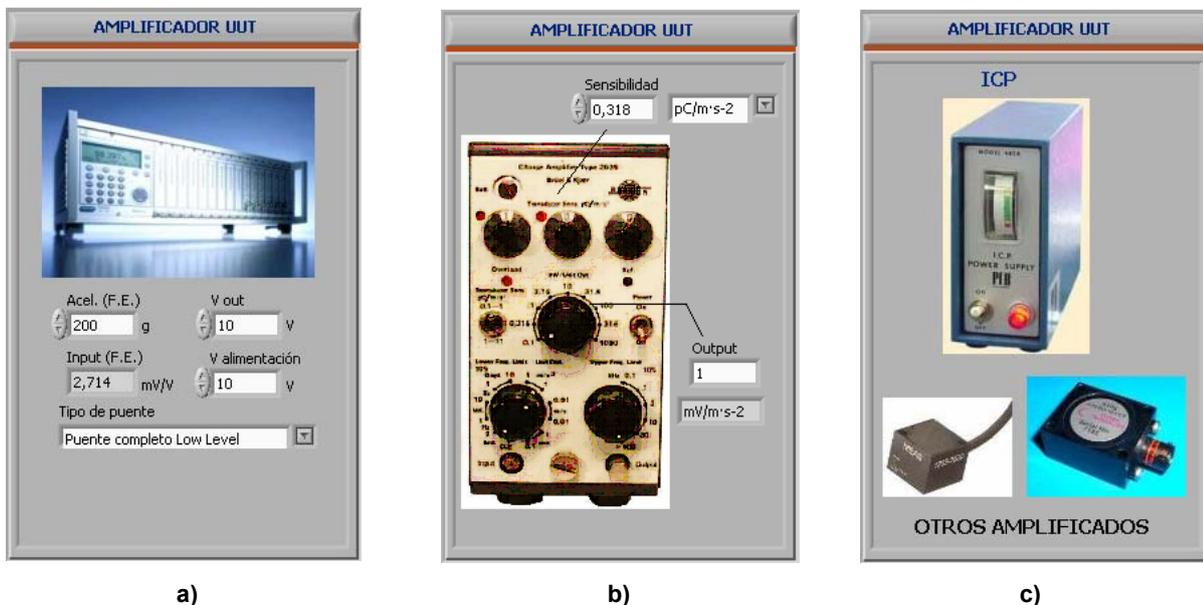


Figura A.2.9. Configuración del sistema acondicionador del acelerómetro en calibración. a) Amplificador para acelerómetros piezoresistivos, b) amplificador para acelerómetros piezoeléctricos, c) acelerómetros con electrónica incorporada (capacitivos, IEPE, piezoresistivos con amplificador incluido)

A.2.6.4. Calibración de sensibilidad

Para iniciar la calibración de sensibilidad, una vez configurados todos los parámetros, hacer clic en START.

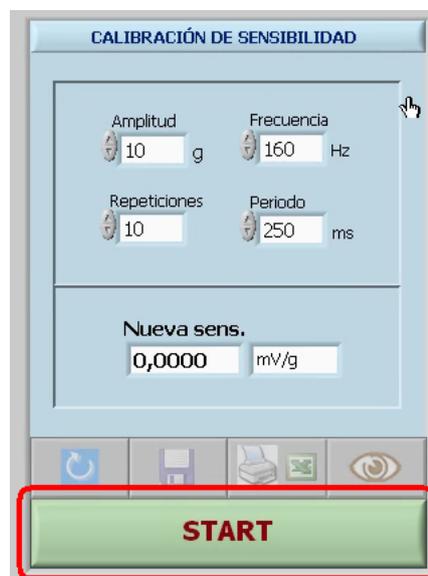


Figura A.2.10. Cajetín para el control de la calibración de sensibilidad

En este momento se activará la pestaña de calibración y entrará en acción el sub-panel de medida online para configurar la amplitud de la vibración a la aceleración predeterminada. Esta amplitud deberá graduarse hasta obtener una amplitud próxima a la predeterminada, con una tolerancia de $\pm 0.4g$. Esta función permite, al mismo tiempo, evaluar subjetivamente el correcto funcionamiento del UUT, ya que se podrá ver la diferencia de lectura con respecto al patrón de manera instantánea.

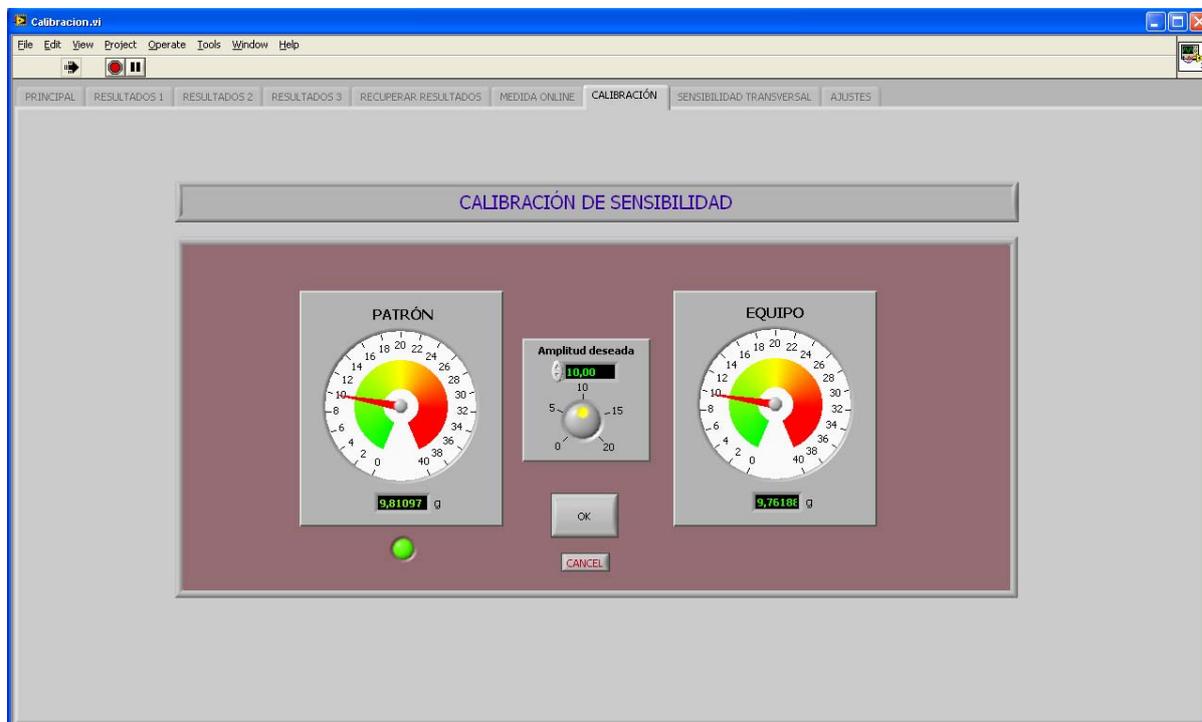


Figura A.2.11. Subpanel para la obtención de la amplitud de referencia

Cuando el piloto verde luminoso se enciende, se puede iniciar la calibración automática haciendo clic en OK. La calibración se ejecuta de manera automática y se puede cancelar en cualquier momento.



Figura A.2.12. Subpanel de calibración de sensibilidad. En esta captura, la calibración ya se ha completado.

Una vez completada la calibración, se visualizan los resultados (figura A.2.12). Ésta se puede aceptar (clic en OK) o cancelar (clic en Cancel). Al aceptar, se pasan todos los datos al panel frontal principal y a la pestaña “Resultados 1”, en la que quedarán guardados todos los datos de forma segura por si ocurre algún error antes de generar el informe.

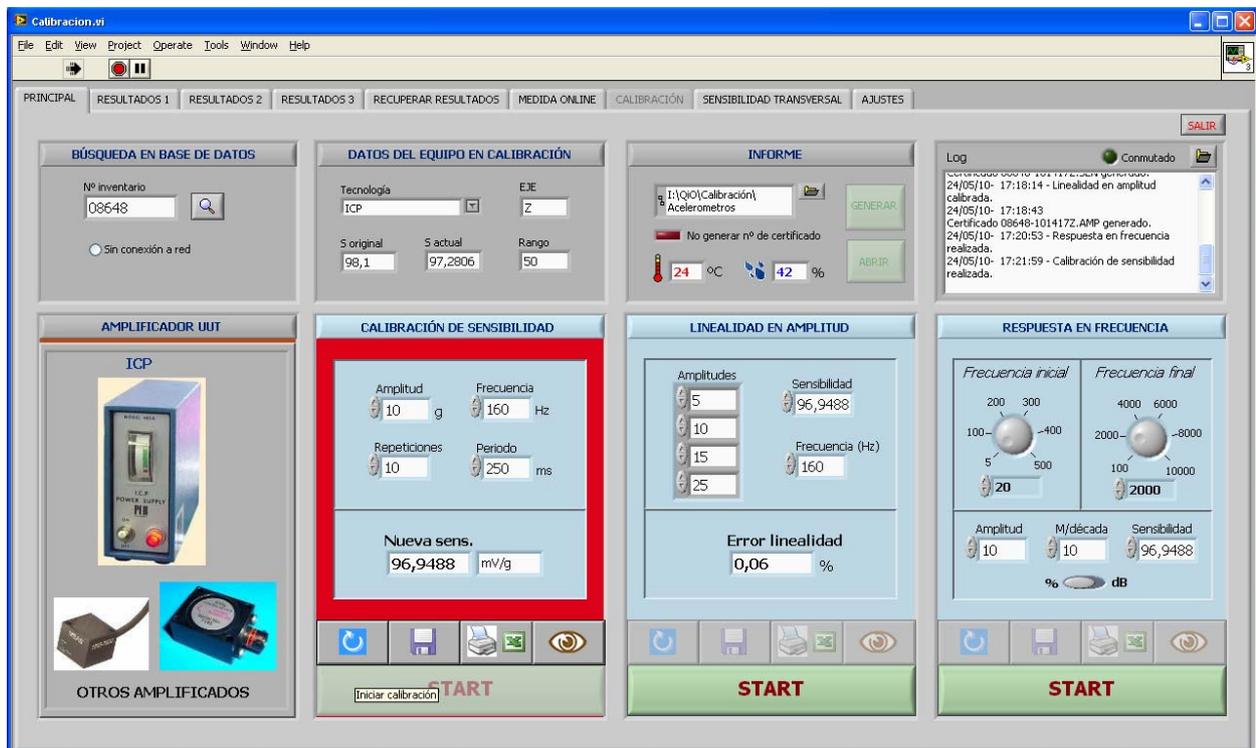


Figura A.2.13. Panel frontal principal cuando se ha completado la calibración de sensibilidad.

En estos momentos se activan las opciones de reiniciar calibración, generar archivos de resultados, generar informe de calibración y ver resultados. Además, el cajetín de calibración de sensibilidad se torna de color rojo indicando que se ha realizado la calibración pero todavía no se ha generado el informe.



Figura A.2.14. Controles que se activan cuando se finaliza una calibración.

Si se decide reiniciar la calibración se perderán los resultados obtenidos en el panel frontal, pero seguirán estando de manera segura en la pestaña “Resultados 1”. De esta forma, si se oprime de manera accidental no se pierden los resultados obtenidos.

Al generar el informe de calibración también se genera automáticamente el archivo de resultados el cual se guarda en el directorio de red indicado en el cajetín “Informe”.

Para generar el informe de calibración es necesario tener abierto el Excel con la plantilla del informe, la aplicación se encargará de pasarle los datos de la calibración de manera automática.

Al generar el informe, el recuadro rojo se torna de color verde. Durante la generación, se crea un nuevo número de certificado y se guarda en la base de datos de números de certificado, siempre y cuando no tengamos seleccionado el control “No generar nº de certificado” en el cajetín “Informe”. El generador de

informes se ha diseñado para que no sobrescriba ningún nº de certificado ya existente en el informe sin consentimiento.

A.2.6.5. Calibración de Linealidad en amplitud

En el cajetín “Linealidad en Amplitud” debe haberse especificado los puntos a calibrar y la frecuencia de la vibración. Estos parámetros se configuran automáticamente cuando seleccionamos el acelerómetro de la base de datos de calibración siempre y cuando haya un filtro definido en la pestaña “Ajustes”.

Para realizar la linealidad en amplitud es preciso haberle asignado una nueva sensibilidad al acelerómetro. Esto se consigue al finalizar la calibración de sensibilidad o introduciendo manualmente el valor de sensibilidad del acelerómetro en el campo “Sensibilidad” del cajetín de linealidad en amplitud.

El procedimiento para iniciar/cancelar la calibración y generar informe es el mismo que en la calibración de sensibilidad.

A.2.6.6. Respuesta en frecuencia

Para la calibración de respuesta en frecuencia hay que configurar el rango de frecuencias a calibrar, las muestras por década y la amplitud de la señal a generar. Estos parámetros, al igual que en la calibración de linealidad en amplitud, se configuran automáticamente siempre y cuando exista el filtro definido en la pestaña “Ajustes”.

A.2.6.7. Utilidades

A.2.6.7.1. Medida online

La medida online se utiliza para comprobar el funcionamiento del acelerómetro de manera instantánea.

Para que esta utilidad pueda ejecutarse de manera eficiente se recomienda utilizar dos multímetros, uno para la lectura del UUT y el otro para la lectura del patrón. Si se intenta ejecutar mediante el módulo de conmutación, las lecturas se ralentizarán.

Configurar el acondicionador de UUT y hacer clic en START. El resto de pestañas se desactivan y se da comienzo a las lecturas rápidas del patrón y el UUT. De esta manera se puede comparar las mediciones del patrón y el UUT a distintas amplitudes y frecuencias para verificar su estado. En la parte inferior disponemos de dos campos que indican la diferencia entre el patrón y el equipo, y un control para pausar la lectura de ambos equipos y así observar una medida instantánea.

Mientras se visualizan las medidas es posible variar la frecuencia de manera instantánea mediante el control de frecuencia que se observa en la parte superior izquierda de la figura. Asimismo, es posible regular la amplitud mediante el control manual del amplificador del shaker.

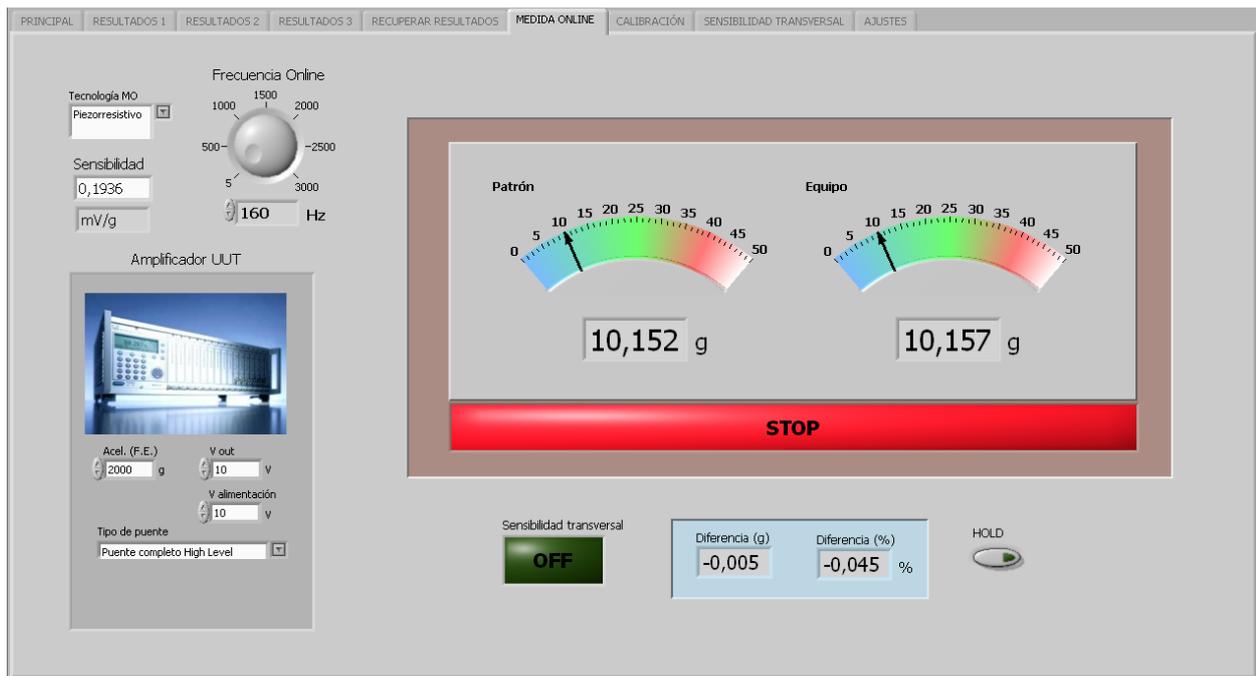


Figura A.2.15. Panel frontal de la utilidad Medida Online.

Mediante esta misma utilidad es posible realizar una comprobación de la sensibilidad transversal del acelerómetro.

A.2.6.7.2. Determinación de la sensibilidad transversal

En el apartado anterior (A.2.6.7.1) se ha visto que mediante la medida online es posible realizar una comprobación de la sensibilidad transversal. No obstante, para determinarla con mayor precisión se debe utilizar la herramienta ubicada en la pestaña “Sensibilidad transversal”.

Mediante esta herramienta se realiza un barrido de la sensibilidad transversal a diferentes amplitudes y/o frecuencias. Para ello, colocar el acelerómetro en la posición que se indican en las figuras del panel frontal y hacer clic en START. Seleccionar la primera amplitud y hacer clic en CAPTURAR para que la aplicación realice una lectura con precisión de la sensibilidad transversal en ese punto. Seguidamente repetir el proceso seleccionando otras amplitudes hasta completar la tabla (5 puntos).

Al final, la aplicación calcula las sensibilidades transversales máximas y mínimas halladas y el porcentaje de la sensibilidad transversal media.

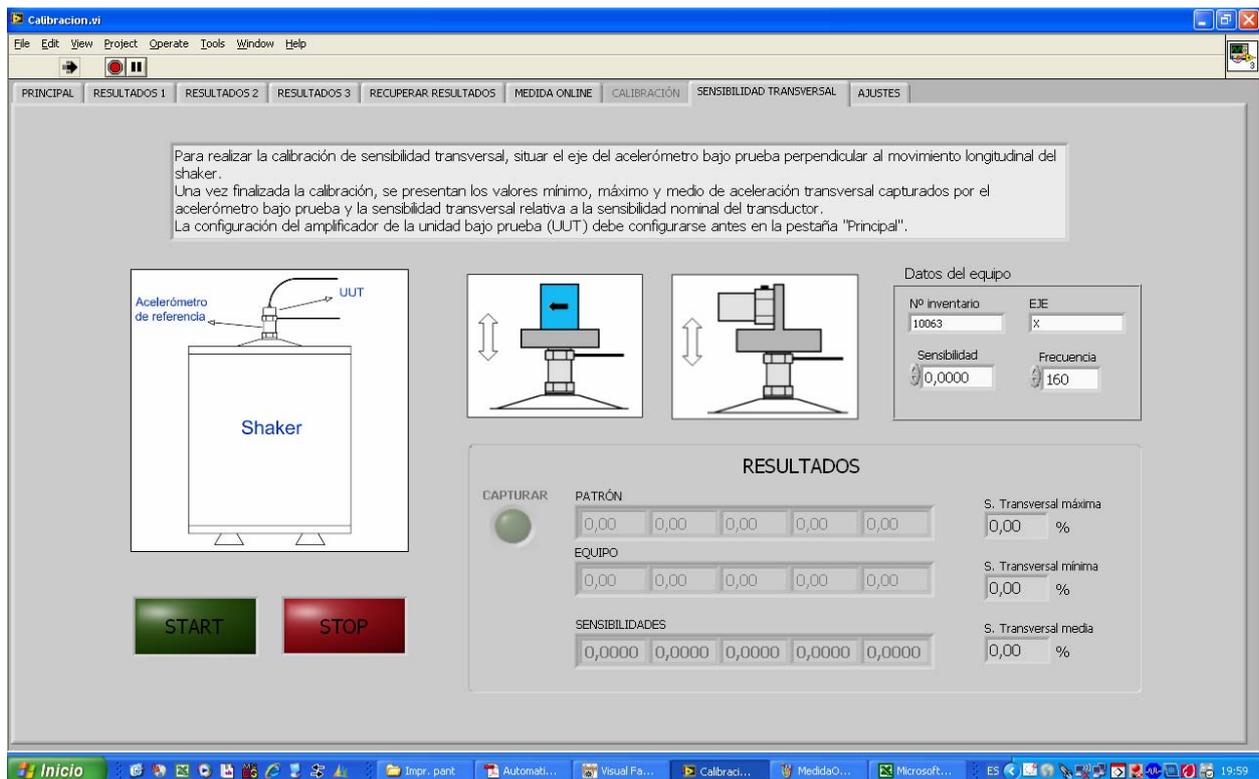


Figura A.2.16. Panel frontal de la utilidad para determinar la sensibilidad transversal del UUT.

A.2.6.7.3. Recuperación de calibraciones anteriores

Mediante esta herramienta se pueden volver a realizar los informes de calibración de calibraciones antiguas, ya que los datos de todas las calibraciones se guardan en archivos en la ubicación especificada en la pestaña "Ajustes".

Se puede realizar una búsqueda por nº de inventario del acelerómetro o por el nº de certificado de calibración. La búsqueda es dinámica, por lo que mientras se introduce el código, se muestran los resultados en la tabla de resultados. Cuando se halla el certificado que se desea, seleccionarlo y hacer clic en "RECUPERAR".

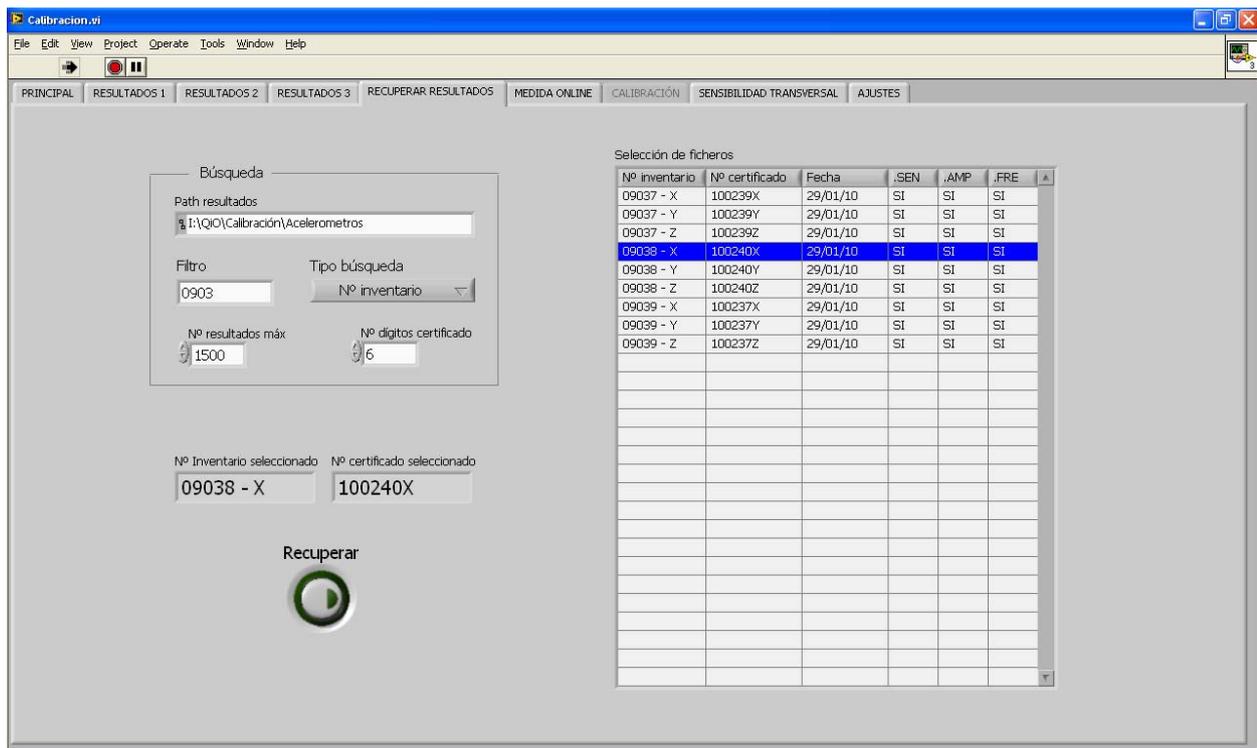


Figura A.2.17. Panel frontal de la utilidad de Recuperar Resultados.

El certificado es recuperado y los datos son pasados a los controles del panel ubicado en la pestaña “Resultados 3”. Desde allí seremos capaces de visualizar los resultados y de generar el informe de calibración.



Figura A.2.18. Panel de resultados. En él se van guardando de manera consecutiva los resultados de las calibraciones. El panel Resultados 3 se utiliza también para visualizar los resultados después de recuperarlos.

A.2.6.8. Salir

Para salir de la aplicación, se debe acceder a la pestaña “Principal” y hacer clic en el botón “SALIR” ubicado en la parte superior derecha del panel.

ANEXO 3. Diagrama de bloques de la aplicación.

A.3.1. Estructura del programa.

La programación en LabVIEW presenta el inconveniente de que si no se realiza de manera muy ordenada, el diagrama de bloques finalizado puede resultar tan caótico que complicaría sobremanera los posteriores cambios o arreglos del programa, el tratamiento de errores e incluso puede llegar a ralentizar considerablemente el flujo del programa.

Para llevar a cabo la programación de la manera más organizada posible, se ha optado por utilizar un panel frontal basado en pestañas las cuales serán utilizadas en el diagrama de bloques mediante la técnica de la **máquina de estado** o *State Machine*. Esta técnica es muy recurrida en la programación de interfaces de usuario ya que permite realizar saltos de programa cuando el propio usuario lo requiera, ya sea apretando un botón como cambiando de pestaña o mediante cualquier otra interacción usuario-máquina.

Al mismo tiempo, cada estado (en nuestro caso, cada pestaña del panel frontal) corresponderá a una parte muy diferenciada del programa, y éste, a su vez, estará organizado en estructuras que gestionan la ejecución del programa y en subVI's que actúan como funciones muy determinadas para su fácil comprensión y posterior manipulación y depuración.

La estructura principal se halla en el VI principal (Calibracion.vi) y su diagrama de bloques puede verse de manera esquemática en la figura A.3.1.

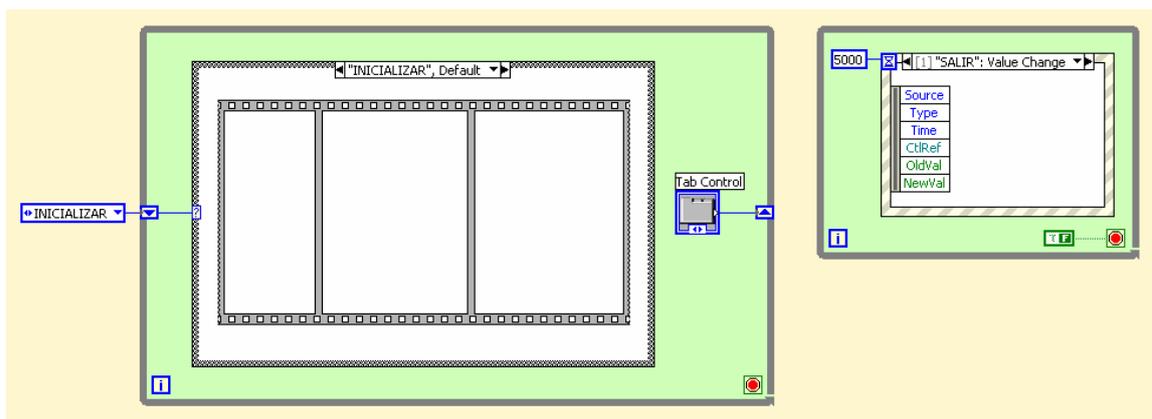


Figura A.3.1. Representación esquematizada de la estructura del programa utilizando la máquina de estados.

En dicha figura se observa, a la izquierda, un bucle *while* que se encarga de mantener el programa en ejecución indefinidamente. Dentro de dicho bucle se encuentra la máquina de estados en la que se organizan los distintos procesos: la inicialización de las variables, la búsqueda en base de datos, la configuración de los parámetros de calibración, la calibración, la visualización de resultados, la medida online, el generador de informes, el buscador de resultados y los ajustes personalizados.

En la misma figura del ejemplo, a la derecha, se encuentra un segundo bucle *While* que se ejecuta paralelamente, en el cual se halla una estructura de eventos. Esta estructura, a diferencia de las demás, no se ejecuta de una manera secuencial, sino que lo hace cuando ocurre un evento determinado. De esta manera, por ejemplo, podemos ejecutar una secuencia determinada del programa en cualquier momento apretando un botón del interfaz o incluso detener el programa. Todo esto, independientemente del estado en el que se encuentre el proceso del programa.

A.3.2. Inicialización de variables.

Lo primero que se debe hacer al iniciar el VI principal es la inicialización de variables, es decir, se debe configurar las propiedades y asignar valor a los controles e indicadores que toman partido en la ejecución del programa.

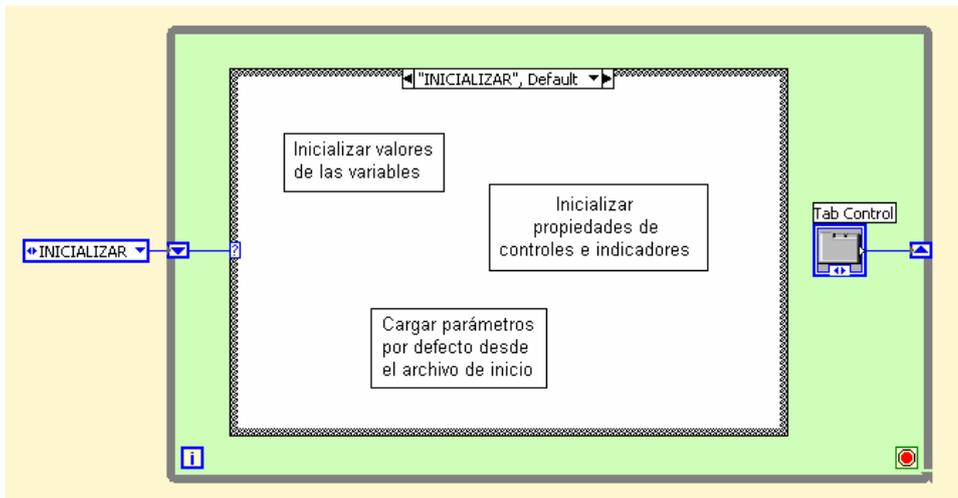


Figura A.3.2. Estructura de inicialización de variables.

En la inicialización se determina qué controles e indicadores estarán activos, visibles y qué valor predeterminado tendrán.

Algunas variables deben tener un valor predeterminado que puede ir variando en el tiempo. Por ejemplo, el valor de sensibilidad del acelerómetro patrón puede variar después de su calibración, por lo que su nuevo valor predeterminado deberá actualizarse. Pasa lo mismo con otros controles como el directorio de archivos de resultados, los filtros de búsqueda o los campos del certificado de calibración.

Para fijar un valor predeterminado de un control / indicador y poder manipularlo en un futuro se crea un archivo de inicio. Este archivo de inicio, con el nombre "Acelerómetros.ini", se encarga de almacenar todos los valores predeterminados de dichas variables y es el programa el que carga el archivo e inicia las variables con los datos extraídos del mismo durante la inicialización. Una parte del diagrama de bloques que se encarga de ello se observa en la figura A.3.3.

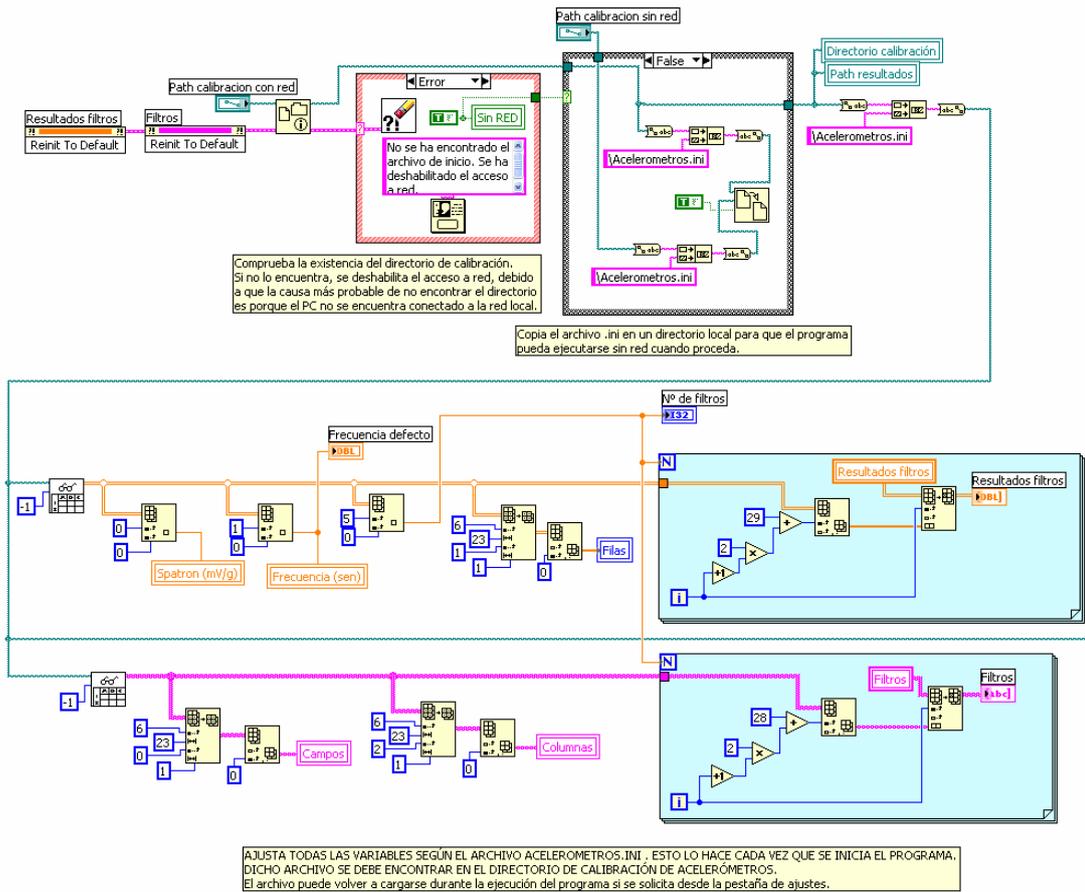


Figura A.3.3. Fragmento de diagrama de bloques encargado de cargar los valores predeterminados de algunas variables a partir del archivo de inicio.

A.3.3. Programa principal.

Una vez inicializadas las variables se da paso al programa principal. En él se realizan las llamadas a los subVI's que ejecutan todo el proceso de calibración automatizado y generan los certificados de calibración.

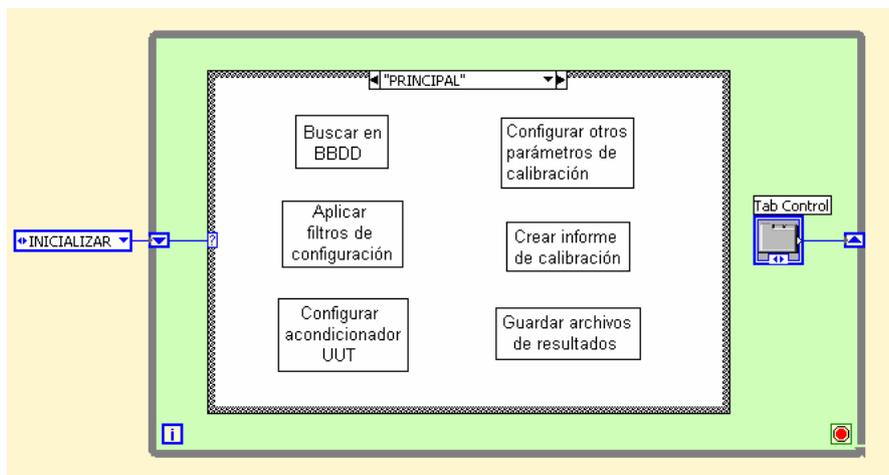


Figura A.3.4. Estructura del programa principal.

A.3.3.1 Buscar en la base de datos.

Descripción:

Dentro del programa principal, la primera acción que se suele llevar a cabo es la búsqueda de los datos del acelerómetro a calibrar en la base de datos de calibración de Visual Factory Calibre.

La búsqueda se puede realizar mediante el número de inventario o el número de serie. Una vez realizada la búsqueda se presentan los resultados en una tabla en la cual se podrá elegir el adecuado. Una vez elegido se muestran los datos relevantes del acelerómetro y se pasan al programa principal a través de un cluster. Estos datos son la sensibilidad original y actual de cada eje, la tecnología, el rango de medida, nº de ejes, marca, modelo, nº serie, etc.

Para obtener los parámetros de la base de datos SQL se ha desarrollado una pequeña librería para realizar consultas a la base de datos del programa *Visual Factory Calibre*. A su vez, dicha librería está construida a partir de otra librería de consultas SQL basada en ADO¹² llamada LabSQL [49]. En la figura A.3.5 se observa uno de los SubVI's de la librería creado para buscar una cadena de caracteres en una base de datos SQL a partir de una consulta determinada.

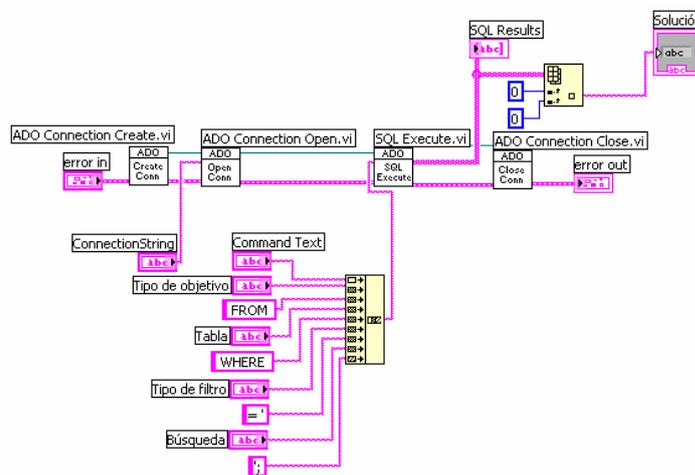


Figura A.3.5. Diagrama de bloques del subVI SQL-Buscar_1_parametro de la librería VFC.

Sub-VI's más importantes:

	Descripción	Entrada	Salida
BUSCA VFC	Búsqueda avanzada. Muestra un panel en el que el usuario puede introducir un nº de inventario o nº de serie y realizar la búsqueda. Los resultados son visualizados y una vez aceptados se pasan al programa principal.	N.A.	Datos del acelerómetro extraídos de la base de datos de calibración
SELEC. EJE	Se abre un panel en el que el usuario determina el eje del acelerómetro que se desea calibrar.	- Nº inventario - Nº de ejes	- Eje en calibración
BUSCA STRING VFC	A partir de una base de datos SQL, realiza una búsqueda (query) de una cadena de caracteres alojada en un campo de una tabla.	- Tabla - Columna objetivo - Columna filtrada - Búsqueda	Valor del campo de la columna objetivo donde la columna filtrada es igual al parámetro "búsqueda".
BUSCA NUM. VFC	En el primero se realiza una búsqueda de una cadena de caracteres, mientras que en el segundo se busca un valor numérico.		

¹²ADO: Del inglés *Active Data Objects*, es una tecnología de Microsoft utilizada para comunicarse con bases de datos.

A.3.3.2 Aplicar filtro de configuración de la aplicación.

Descripción:

En los ajustes del programa es posible elaborar un conjunto de filtros según la marca, modelo y rango del acelerómetro. Estos filtros definidos por el usuario se encargan de asignar los parámetros de calibración según marca, modelo y rango del acelerómetro, como la frecuencia y amplitud de la calibración de sensibilidad, las amplitudes utilizadas en la calibración de linealidad en amplitud, o el rango de frecuencias calibrado en la respuesta en frecuencia.

En la figura A.3.6 se muestra un fragmento del diagrama de bloques del subVI utilizado para buscar y aplicar el filtro correspondiente. En él se observa cómo se comprueba si algunos de los parámetros de búsqueda coincide con alguno de los filtros establecidos.

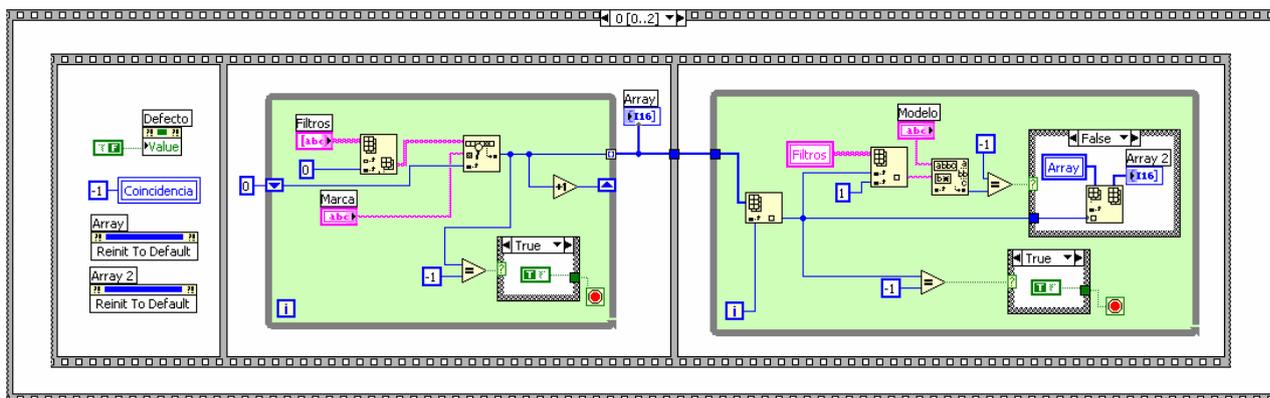


Figura A.3.6. Fragmento de diagrama de bloques del subVI “Busca Filtro.vi” encargado de buscar y aplicar los filtros definidos por el usuario para la configuración de la calibración.

Sub-VI’s más importantes:

	Descripción	Entrada	Salida
	Busca coincidencias de los datos del acelerómetro con los filtros configurados por el usuario en la pestaña “Ajustes” y aplica los parámetros correspondientes.	- Marca - Modelo - Rango	Parámetros de configuración de la calibración.

A.3.3.3 Configurar acondicionador UUT.

Descripción:

Según la tecnología del acelerómetro, la aplicación elige de manera automática el sistema de acondicionamiento a configurar. El usuario, una vez haya configurado el acondicionador, pasará los parámetros configurados al panel frontal del acondicionador virtual de la aplicación.

En el caso de acelerómetros piezorresistivos, se deberá indicar la tensión de alimentación y la tensión de salida a una amplitud determinada (span). La sensibilidad la extraerá de la base de datos y se podrá modificar manualmente en cualquier momento. El panel frontal mostrará en todo momento el ratio de

voltaje en mV/V de la salida del UUT que deberá configurarse en el acondicionador una vez introducidos los demás parámetros, por lo que no será necesario realizar ningún cálculo a mano.

Para los acelerómetros piezoeléctricos, se deberá indicar la sensibilidad en $\text{pC/m}\cdot\text{s}^{-2}$ configurada en el amplificador de carga utilizado y la sensibilidad de salida en $\text{mV/m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Sub-VI's más importantes:

	Descripción	Entrada	Salida
	Panel frontal del sistema acondicionador para acelerómetros piezorresistivos.	- Sens. actual	- Output calib. - V alimentación - Unidades sensib.
	Panel frontal del sistema acondicionador para acelerómetros piezoeléctricos.	- Sens. actual	- Output calib. - Unidades sensib.
	Panel frontal que indica que se ha configurado el sistema para la calibración de acelerómetros IEPE.	N.A.	- Unidades sensib.

A.3.3.4 Crear informe de calibración.

Descripción:

Una vez finalizada la calibración se activan unos controles (botones) para que el usuario pueda generar el informe de calibración. Se pasan los resultados y los datos de configuración de la calibración a una plantilla en Excel que deberá estar abierta previamente. Los datos se pasan a las celdas que ha definido previamente el usuario en la pestaña de ajustes.

Sub-VI's más importantes:

	Descripción	Entrada	Salida
  	Generación de los informes de calibración correspondientes a la obtención de la nueva sensibilidad, la linealidad en amplitud y la respuesta en frecuencia.	Resultados y datos de configuración de la calibración (clústers) y datos de configuración del certificado.	Clústers de salida de datos y configuración y otros datos importantes para el progreso del programa.
	Se determina si es necesario generar, posteriormente, un número de certificado en función de si ya se ha generado uno o de si la hoja de Excel abierta se corresponde con la plantilla o de si se ha indicado que no se desea generar.	- N° inventario - Filtros - Directorio de calibración	- N° certificado - Generar n° cert. - Escribir n° cert. - Cancelado

	<p>Genera un nuevo nº de certificado. Para ello, lee el último nº generado en un archivo .txt y genera el siguiente. Por último, guarda el nuevo número con el código de inventario correspondiente en un archivo de Excel destinado a ello.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Nº inventario - Directorio certificados 	<ul style="list-style-type: none"> - Nº certificado
	<p>Se presenta un panel frontal donde se indica la fecha de la próxima calibración. Por defecto se configura con un periodo de 24 meses, pero se puede modificar manualmente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cancelado. (Si la generación del informe se cancela, no se ejecuta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fecha de próxima calibración
	<p>Sub-VI utilizado para añadir un texto determinado al control de cadena de caracteres "Log". Automáticamente, al texto se le añade la hora a la que se generó.</p> <p>Todo el texto introducido se guarda en un archivo cada cierto tiempo y cuando se sale del programa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Log IN - Texto 	<ul style="list-style-type: none"> - Log OUT - Texto
   	<p>Estos sub-VI se utilizan para comunicarse con Microsoft Excel.</p> <p>Por orden:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Escribe un número en una celda específica de una hoja determinada del libro abierto. - Escribe una cadena de caracteres en una celda específica de una hoja del libro abierto. - Obtiene el valor numérico de una celda de una hoja determinada del libro abierto. - Obtiene la cadena de caracteres de una celda determinada de una hoja del libro abierto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Excel Worksheet-in - Fila - Columna - Valor (sólo para los sub-VI de escritura) 	<ul style="list-style-type: none"> - Excel Worksheet-out

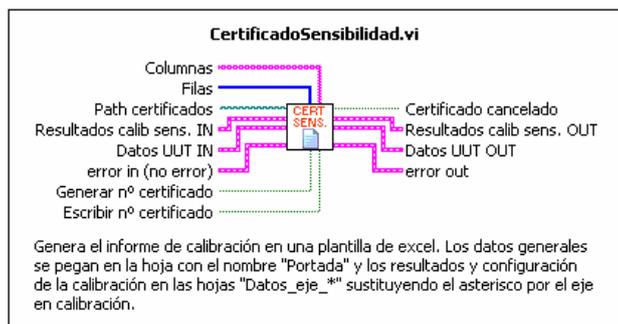


Figura A.3.7. Sub-VI utilizado para pasar los datos de calibración de la sensibilidad al informe.

A.3.3.5 Guardar archivos de resultados.

Descripción:

En cualquier momento durante la ejecución del programa principal y una vez realizada la calibración, el usuario puede guardar los resultados de la calibración en un archivo con sólo presionar un botón. Este archivo se puede utilizar posteriormente para recuperar los resultados de calibración y realizar el informe de calibración cuando sea necesario.

Los archivos de resultados también se generan automáticamente cuando se genera el informe de calibración.

Sub-VI's más importantes:

Descripción	Entrada	Salida
   Mediante estos sub-VI's se guardan, en archivos independientes, los resultados y configuración de la calibración de sensibilidad, linealidad en amplitud y respuesta en frecuencia respectivamente.	Resultados y datos de configuración de la calibración (clústers) y datos de configuración del certificado.	- Nombre del archivo de datos
Otros ya descritos:		
   		

A.3.4. Calibración.

Una vez configurados todos los parámetros en el panel frontal principal, si el usuario decide llevar a cabo la calibración se abrirán nuevos sub-paneles ubicados en la pestaña de “Calibración”. El sub-diagrama correspondiente se descompone en los módulos que se observan en la siguiente figura.

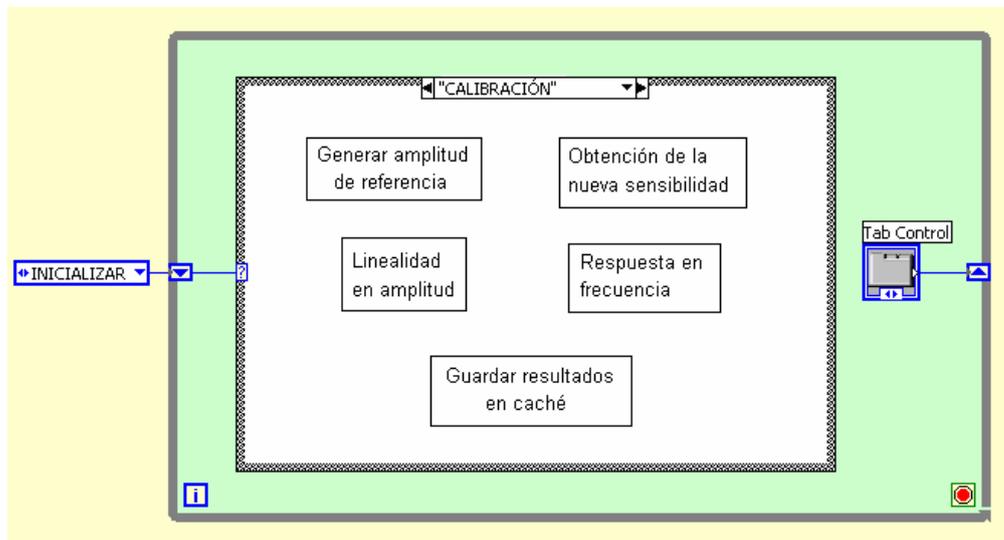


Figura A.3.8. Estructura del sub-diagrama de calibración.

A.3.4.1. Generar amplitud de referencia.

Descripción:

En este apartado se presenta un panel frontal en el que se puede observar la lectura *online* de aceleración en unidades g tanto del patrón como del equipo. Las mediciones se realizan rápidamente para obtener

lecturas instantáneas aunque sin mucha precisión. En este caso no se requiere precisión porque únicamente se requiere obtener valores orientativos y no se utilizarán para resultados de la calibración.

Se configura automáticamente una amplitud objetivo que se debe generar (con un buen margen de tolerancia) variando la amplitud de vibración mediante el amplificador de potencia del shaker. Una vez alcanzada, un indicador muestra que ya se puede comenzar la calibración. El resto del proceso de calibración es totalmente automático.

Este módulo se ejecuta siempre automáticamente antes de empezar cualquier calibración, ya sea la calibración de sensibilidad, linealidad en amplitud o respuesta en frecuencia.

Sub-VI's más importantes:

	Descripción	Entrada	Salida
	Muestra el panel frontal en el que se visualiza la medida instantánea de aceleración RMS captada por la salida de la cadena patrón y la salida de la cadena de medida en calibración.	<ul style="list-style-type: none"> - Voltaje de pico configurado en el generador. - Frecuencia - Amplitud deseada - Sensib. patrón - Sensib. equipo - Conmutado 	<ul style="list-style-type: none"> - Amplitud real generada - Cancelado
	Configuración del multímetro para medidas rápidas de poca resolución. NO se utiliza para resultados de calibración.	- Dirección GPIB	- Dirección GPIB
	Captura la señal de salida del multímetro rápidamente.	- Dirección GPIB	<ul style="list-style-type: none"> - Dirección GPIB - Valor leído

A.3.4.2. Obtención de la nueva sensibilidad.

Descripción:

Este módulo se encarga de realizar una calibración automática de la sensibilidad. Al mismo tiempo, se visualiza un panel frontal que indica en todo momento el transcurso de la calibración, pudiendo cancelarla en cualquier instante.



Figura A.3.9. Panel frontal utilizado para controlar el progreso de la calibración de sensibilidad.

Sub-VT's más importantes:

	Descripción	Entrada	Salida
	<p>Se encarga de llevar a cabo la calibración de la sensibilidad del UUT midiendo la señal de salida del acelerómetro patrón y del UUT a una amplitud y frecuencia determinadas.</p> <p>Para hallar la desviación estándar, se realizan un total de 10 mediciones en condiciones de repetibilidad.</p> <p>En el panel frontal se muestra el progreso de la calibración.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Frecuencia. - Amplitud - Sensib. patrón - Sensib. equipo - Conmutado - Otros parámetros de config. de calib. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados de la calibración - Cancelado
	<p>Recoge una muestra de la señal de salida del patrón y del UUT (mediante el/los multímetro/s).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Direcciones GPIB - Puerto COM - Conmutado 	<ul style="list-style-type: none"> - Dirección GPIB - Voltaje patrón 1 - Voltaje patrón 2 - Media patrón - Desviación de la media patrón - Voltaje UUT
	<p>Envía una orden al módulo de conmutación para que realice la conmutación a la entrada del multímetro. De esta forma se cambia entre la lectura de la señal de salida del patrón y la del UUT.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Puerto COM - Conmutación (patrón o equipo) 	<ul style="list-style-type: none"> - Puerto COM
 	<p>Aparece un panel frontal en el que el usuario debe indicar la temperatura y la humedad relativa presentes en el ambiente en el momento y lugar de la calibración.</p> <p>Sólo se ejecutan cuando no se ha introducido la temperatura o la humedad en el panel frontal principal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura in 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura out

	<p>Calcula la sensibilidad del acelerómetro en calibración a partir de los datos leídos por el multímetro y los parámetros de configuración del amplificador del UUT.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Voltaje patrón - Voltaje equipo - S patrón - Ganancia ampli. UUT 	<ul style="list-style-type: none"> - S equipo.
	<p>Configura, únicamente, la frecuencia o la amplitud (respectivamente) de la salida del generador de funciones. Es una modificación realizada a partir de los VI's de los controladores del generador de funciones.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dirección GPIB - Frecuencia Hz / Amplitud V 	<ul style="list-style-type: none"> - Dirección GPIB
	<p>Configuración del multímetro para medidas a su máxima resolución (mediciones “lentas”).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dirección GPIB 	<ul style="list-style-type: none"> - Dirección GPIB
	<p>Captura la señal leída por el multímetro a su máxima resolución.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dirección GPIB 	<ul style="list-style-type: none"> - Dirección GPIB - Valor leído

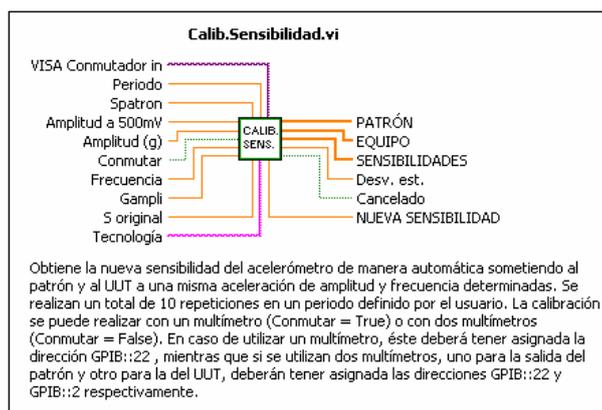


Figura A.3.10. Sub-VI para la calibración de la nueva sensibilidad.

A.3.4.3. Linealidad en amplitud.

Descripción:

En este apartado, se realiza una calibración automática de la linealidad en amplitud. Al mismo tiempo, se visualiza un panel frontal que indica en todo momento el transcurso de la calibración, pudiendo cancelarla en cualquier instante.

Para generar las amplitudes necesarias en Volts para obtener las aceleraciones correspondientes de manera automática, ha sido precisa la elaboración de un modelo matemático del comportamiento del shaker ante distintas consignas a diversas frecuencias. Para ello, se hizo un estudio en el que se comprobó la linealidad ante distintas amplitudes reguladas por el amplificador y se elaboraron un conjunto de ecuaciones que relacionaban la variación del voltaje de entrada con la variación de aceleración. Seguidamente se unificaron todas las ecuaciones en una sola ecuación de sexto grado para mayor precisión.



Figura A.3.11. Panel frontal utilizado para controlar el progreso de la calibración de linealidad.

Sub-VI's más importantes:

	Descripción	Entrada	Salida
	<p>Se encarga de llevar a cabo la calibración de la linealidad en amplitud.</p> <p>Realiza un barrido en amplitud de, como mínimo, 4 puntos aproximadamente equidistantes, a una frecuencia de referencia determinada.</p> <p>En el panel frontal se muestra el progreso de la calibración.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Frecuencia. - Amplitudes (g) - Sensib. patrón - Sensib. equipo - Conmutado - Otros parámetros de config. de calib. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados de la calibración - Cancelado
	<p>Modelo matemático que se aproxima al comportamiento del sistema amplificador + shaker ante distintas frecuencias y amplitudes de tensión de entrada. Devuelve los voltajes de consigna del generador necesarios para obtener unas amplitudes en g determinadas según la frecuencia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Array de Amplitudes (g) - Amplitud en g generada a 500mV 	<ul style="list-style-type: none"> - Array de amplitudes en mV
Otros ya descritos:			
        			

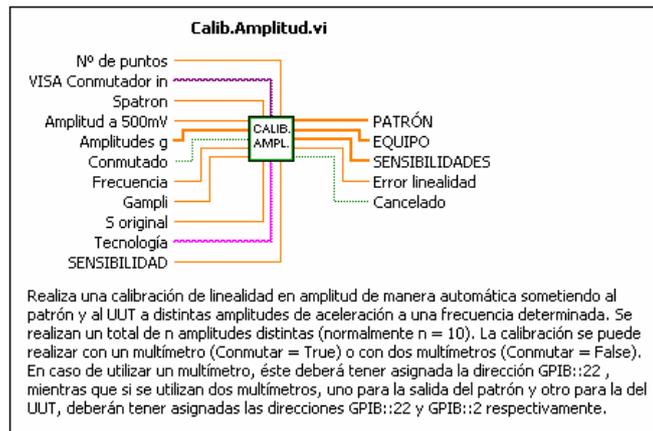


Figura A.3.12. Sub-VI para la calibración de la linealidad en amplitud.

A.3.4.4. Respuesta en frecuencia.

Descripción:

En este apartado, se realiza un barrido de frecuencia de manera automática a una amplitud determinada (dentro de un intervalo de tolerancia). Los parámetros para la ejecución de dicho barrido se configuran de manera automática o manual en el panel principal. Estos parámetros son, el rango de frecuencias a calibrar (normalmente de 20 a 2000Hz), el número de muestras por década (normalmente 10 muestras por década) y la amplitud de aceleración en g.



Figura A.3.13. Panel frontal utilizado para controlar el progreso de la respuesta en frecuencia.

Sub-VI's más importantes:

	Descripción	Entrada	Salida
RESP. FREC.	<p>Se encarga de obtener la respuesta en frecuencia.</p> <p>Realiza un barrido en un intervalo de frecuencias definido por el usuario a una amplitud determinada (normalmente, la misma amplitud que en la obtención de sensibilidad).</p> <p>En el panel frontal se muestra una gráfica que indica el progreso de la calibración.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Frecuencia. - Amplitudes (g) - Sensib. patrón - Sensib. equipo - Conmutado - Otros parámetros de config. de calib. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados de la calibración - Cancelado
Otros ya descritos:			

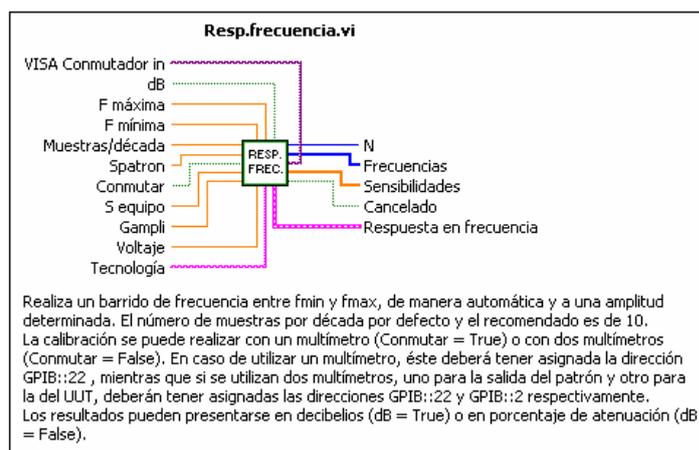


Figura A.3.14. Sub-VI para la obtención de la respuesta en frecuencia.

A.3.4.5. Presentación de los resultados.

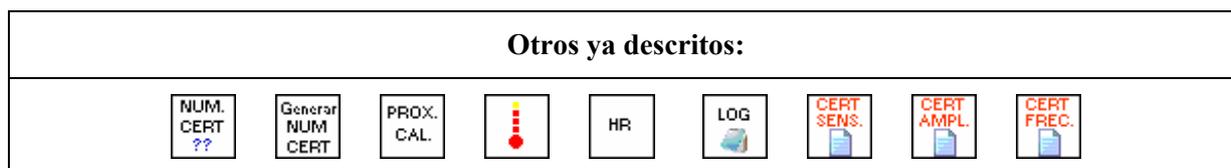
Una vez realizada la calibración o cuando se recupera una calibración anterior, los resultados se almacenan en los clústers de resultados y en las pestañas “Resultados”. Al mismo tiempo, los resultados que se hallaban anteriormente en “Resultados 1” se pasan a la pestaña “Resultados 2” y de ésta, a la pestaña “Resultados 3”, para poder recuperarlos rápidamente en caso de que sea necesario.

En estas pestañas es posible visualizar todos los datos de calibración y resultados en un panel frontal, permitiendo, incluso, realizar un zoom en la gráfica de la respuesta en frecuencia para analizarla con más detalle. También es posible pasar todos los datos al informe de calibración del mismo modo que en el panel frontal principal.



Figura A.3.15. Fragmento del panel frontal utilizado para visualizar los resultados de la calibración.

Sub-VI's más importantes:



A.3.5. Recuperar resultados de anteriores calibraciones.

En la aplicación se ha programado una herramienta capaz de recuperar cualquier calibración realizada con anterioridad para visualizar los resultados y volverlos a pasar a un informe de calibración. Esto es muy útil por si el informe se pierde o si ocurre algún fallo de red cuando se intenta guardar.

Se ha programado un motor de búsqueda de manera que, a medida que se va introduciendo el número de inventario del acelerómetro o el número de certificado a recuperar, te va mostrando las coincidencias en una tabla. Cuando se observa el resultado en la tabla, se elige y se acepta, pasando todos los resultados a la pestaña “Resultados 3”.

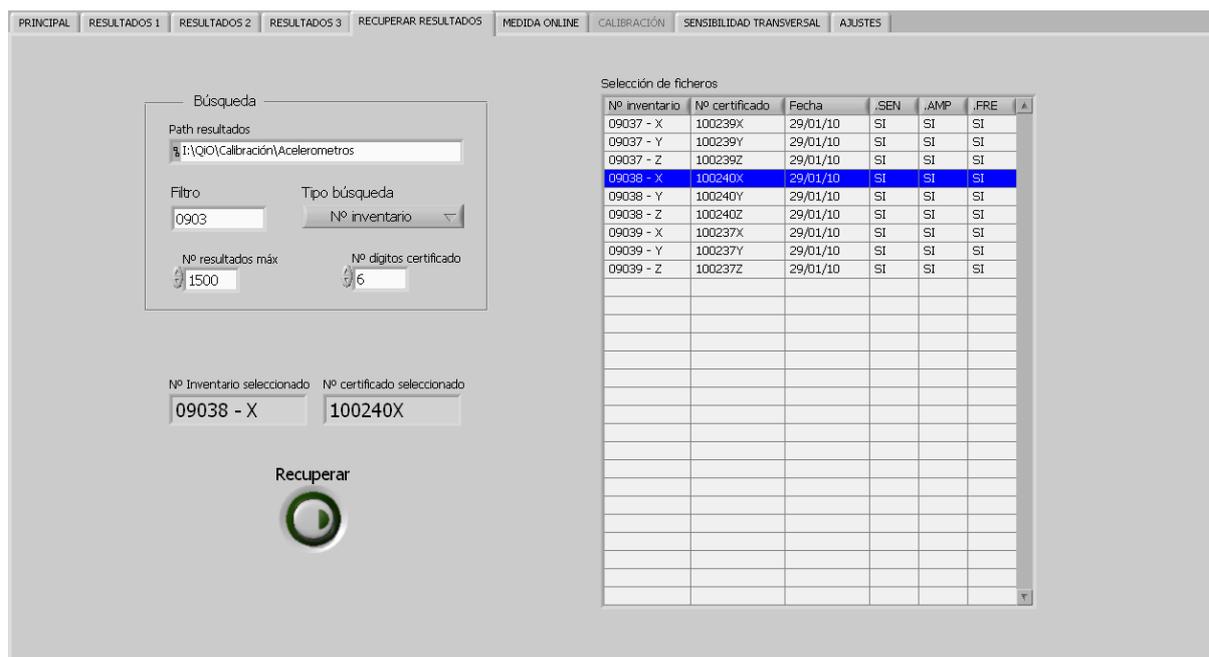


Figura A.3.16. Panel frontal utilizado para visualizar los resultados de la calibración.

Este módulo del programa no dispone de sub-VI's.

En la figura A.3.17 se observa un fragmento del diagrama de bloques encargado de llevar a cabo esta utilidad. Dicho fragmento corresponde al motor de búsqueda de resultados.

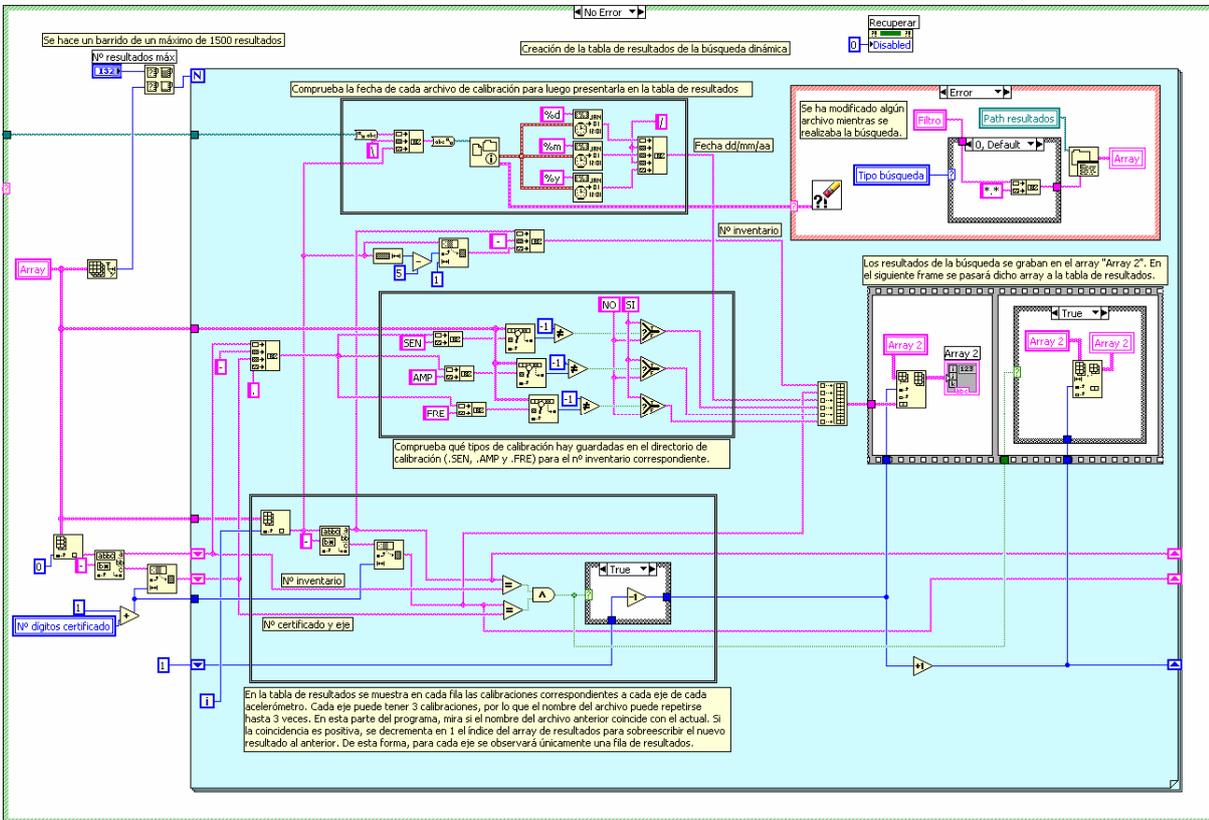


Figura A.3.17. Fragmento del diagrama de bloques del módulo de recuperación de resultados anteriores.

A.3.6. Medida online.

En este módulo es posible visualizar las mediciones instantáneas del patrón y el UUT mientras el usuario varía, a su antojo, la amplitud, frecuencia y algunos parámetros del UUT. También es posible visualizar la sensibilidad transversal instantánea de manera aproximada a petición del usuario, siempre que sea posible instalar el acelerómetro en posición perpendicular al eje de actuación del shaker.

Es muy útil para cuando se quiere comprobar rápidamente el estado del acelerómetro sin necesidad de llevar a cabo el proceso de calibración.

Cabe destacar que no se debe realizar una calibración mediante el módulo de medida online, ya que las lecturas obtenidas no son lo suficientemente exactas. La configuración de los multímetros y el procedimiento de lectura no es el adecuado para utilizar estas mediciones como resultados de una calibración.

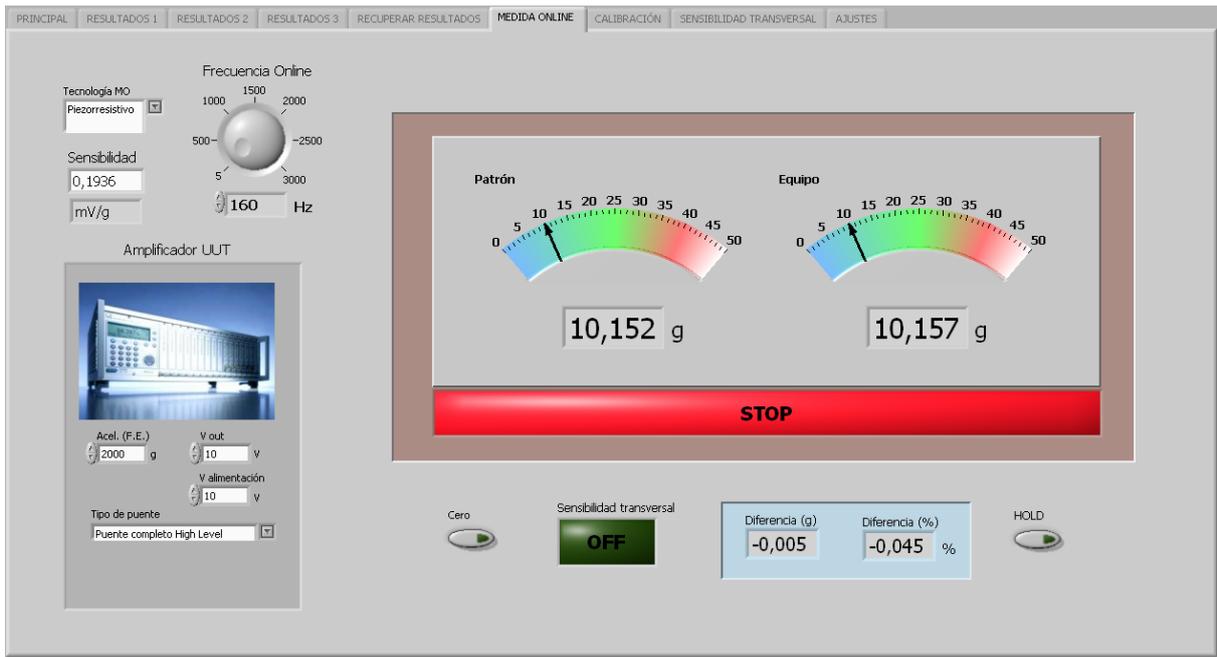


Figura A.3.18. Panel frontal utilizado para visualizar los resultados de la calibración.

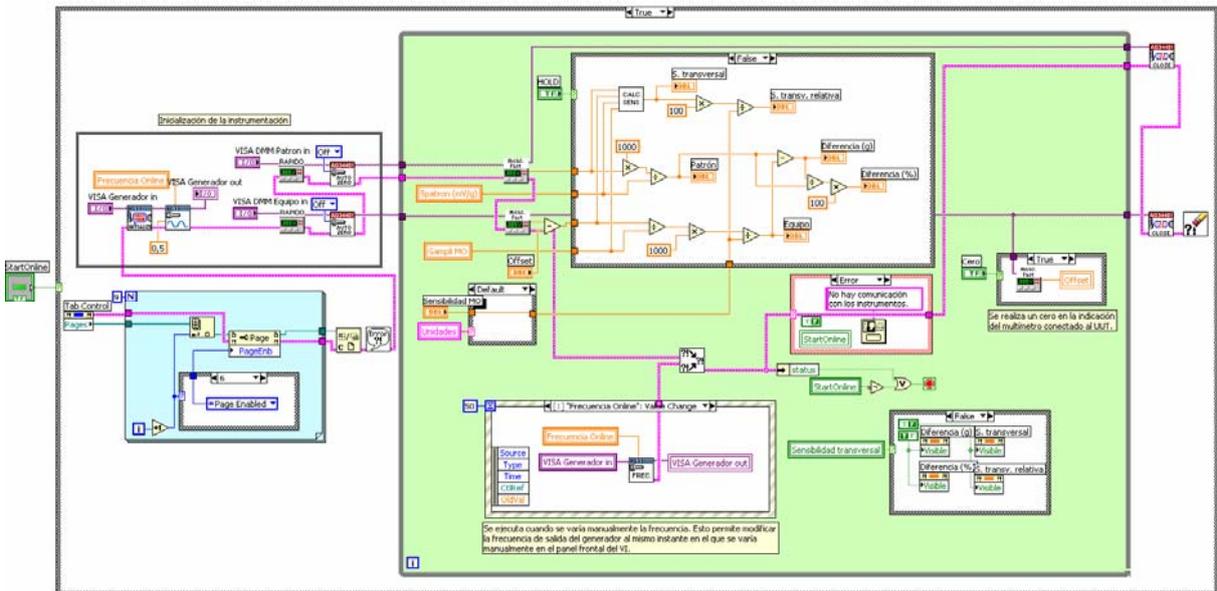


Figura A.3.18. Fragmento del diagrama de bloques del módulo de Medida Online.

Sub-VI's más importantes:

Otros ya descritos:

RAPIDO
305W

meas. fast
305W

Switch
DMM

CALC
SENS

FREC.

AMPL.

ICP

A.3.7. Ajustes.

En el apartado de ajustes, el usuario es capaz de modificar aspectos de la configuración de la aplicación, del automatismo de la calibración y de la generación del informe de calibración. Todas las configuraciones que se necesitan guardar para mantenerlas cuando se vuelve a abrir el programa, se guardan en un archivo .ini que se ejecuta siempre al iniciar la aplicación.

Entre los aspectos que se pueden ajustar en este panel son las celdas donde se introducirán los datos de calibración en el informe de calibración en Excel, los filtros por marca, modelo y rango de los acelerómetros para la configuración automática de los parámetros de calibración, la calibración del acelerómetro patrón, los directorios de trabajo, etc.

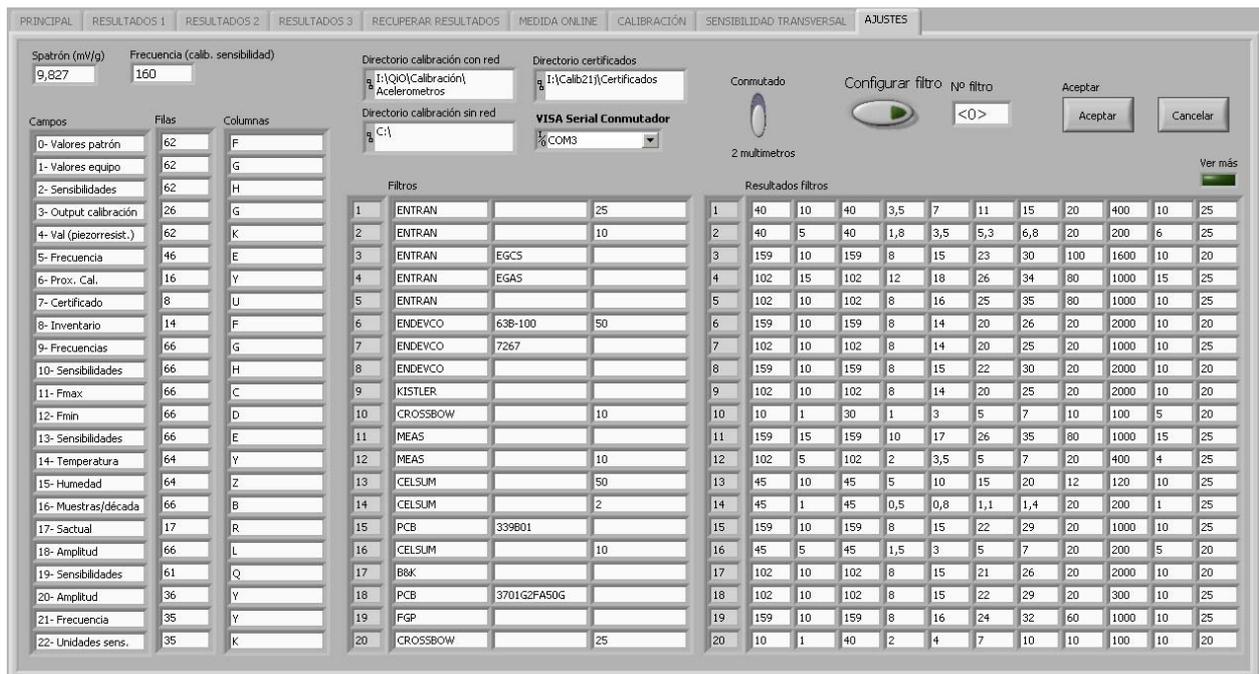


Figura A.3.19. Panel frontal del apartado de ajustes.

Sub-VI's más importantes:

	Descripción	Entrada	Salida
	<p>Abre un panel frontal dentro de un sub-panel en el que se visualizan los parámetros de ajuste. Los valores que indican por defecto se obtienen del archivo de inicio "Acelerómetros.ini" y se entran directamente a este sub-VI.</p> <p>Este sub-VI no devuelve los valores modificados. Los escribe directamente en el archivo de inicio cuando el usuario acepta los cambios.</p>	<p>- Parámetros de entrada configurables.</p>	<p>- Resultados de la calibración</p> <p>- Cancelado</p>
	<p>Mediante esta herramienta, el usuario puede modificar uno de los filtros configurables. Dichos filtros se utilizan para asignar los parámetros de calibración por defecto automáticamente según la marca, modelo y/o rango del acelerómetro a calibrar.</p>	<p>-Nº de orden del filtro</p> <p>-Array de filtros IN</p>	<p>- Array filtros out</p>

ANEXO 4. Estimación de la incertidumbre de medida en las calibraciones.

Todo proceso de medida se caracteriza por la falta de exactitud. No es posible realizar una medida perfecta, es decir, toda medida implica un error, ya sea debido a la limitación de exactitud del instrumento utilizado, su precisión y la reproducibilidad de las medidas o de otras causas externas como las condiciones ambientales. Otro inconveniente que se extrae de todo proceso de medida es que no es posible cuantificar esta combinación de errores de manera exacta, ya que se desconocen los valores precisos que intervienen en su causa. No obstante, es posible estimar dicha combinación de errores con un margen de confianza muy amplio mediante la estimación de la incertidumbre de medida.

A.4.1 Definición de la función modelo

La función modelo o función de medición describe el comportamiento de la magnitud de salida (mensurando) a partir de las magnitudes de entrada que intervienen en el proceso de medición [3].

Por ejemplo, si se desea obtener la densidad de un material midiendo su masa y volumen, la función modelo será la siguiente:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

La función modelo también se utiliza para calcular la incertidumbre de medida asociada al valor medido de la magnitud de salida a partir de las incertidumbres de medida de las magnitudes de entrada. Realizando las derivadas parciales de la función modelo respecto a cada magnitud de entrada se obtienen los coeficientes de sensibilidad que servirán para combinar las incertidumbres de cada una de ellas, tal y como se describirá en el apartado A.4.4.

Existen dos métodos para la evaluación de la incertidumbre, el Tipo A y el Tipo B [3] [4].

A.4.2 Evaluación de Tipo A

La evaluación de Tipo A cuantifica las fuentes de incertidumbre mediante análisis estadísticos a partir de observaciones experimentales. Por ejemplo, la falta de repetibilidad de un instrumento es una fuente de incertidumbre. Esta falta de repetibilidad podemos estimarla en una calibración analizando la dispersión de las medidas a partir de un conjunto de repeticiones. Dicha dispersión, caracterizada por una desviación típica, es una componente de la incertidumbre y tiene como modelo lo que en estadística se denomina una distribución de student. Dicha distribución se aproximará a una **distribución normal** cuanto más alto sea el valor de los grados de libertad utilizados para su estudio, es decir, cuanto más alto sea el número de repeticiones realizadas. Su representación puede observarse en la figura A.4.1. A dicha desviación típica se le llama también **incertidumbre típica**.

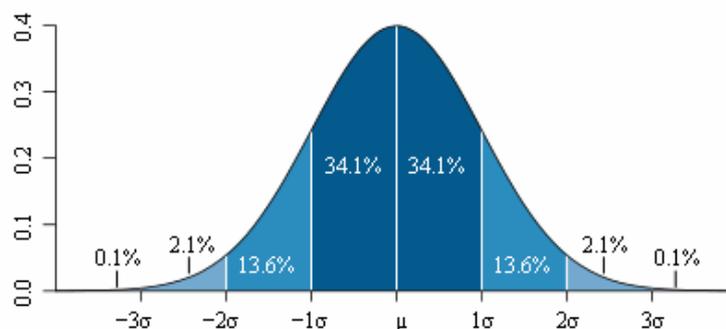


Figura A.4.1. Representación de la desviación típica de un conjunto de medidas alrededor de una media poblacional μ que representa la esperanza. En el eje vertical se encuentra el índice de probabilidad mientras que en el eje horizontal se observa el conjunto de posibles medidas que se pueden dar. Las superficies coloreadas dan información sobre el porcentaje de probabilidad de que el mensurando se encuentre dentro de esos intervalos.

Fijándonos en la figura A.4.1, la desviación típica de la media o incertidumbre típica “ u ”, es exactamente el valor “ σ ” cuyo estimador “ s ” se halla mediante la siguiente expresión:

$$s(\bar{x}) = u(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (\text{A.4.1})$$

Siendo n el número de observaciones, x_i el valor de cada observación individual y \bar{x} la media de los valores de todas las observaciones.

También se puede observar que, con una amplitud del intervalo de $\pm 2\sigma$ se abarca aproximadamente el 95% de las probabilidades suponiendo una distribución normal. De esta forma podríamos expresar un resultado de la siguiente forma:

$$Y = \bar{X} \pm 2 \cdot u \quad (\text{A.4.2})$$

Donde \bar{X} es la media de todas las observaciones y $\pm 2 \cdot u$ es el intervalo de valores en el que, con un 95% de probabilidad, se encontrará el verdadero valor de la magnitud medida (incertidumbre de medida).

Al valor que va delante de la desviación típica se le denomina **Factor de Cobertura**. Este factor determina el porcentaje de probabilidad o confianza de que el mensurando esté situado dentro de ese intervalo. Así pues, con un factor de cobertura k próximo al valor 2 se obtiene un porcentaje de confianza del 95,5%, mientras que con un $k = 3$ la confianza será próxima al 99,6%.

Al valor resultante de multiplicar la incertidumbre típica por el factor de cobertura ($k \cdot u$) se le denomina **Incertidumbre expandida “ U ”** y es el valor que deberá ir siempre acompañado de la media y el error sistemático en el resultado de una medida.

No obstante, generalmente existe más de una fuente de incertidumbre en una medida, por lo que la incertidumbre expandida no se podrá calcular hasta que no se hallen todas las contribuciones.

A.4.3 Evaluación de Tipo B

La evaluación de **Tipo B** se lleva a cabo cuando las fuentes de incertidumbre no se pueden cuantificar por métodos experimentales. Ejemplos de evaluación de tipo B pueden ser las realizadas a partir de valores obtenidos de un certificado de calibración, valores de la clase de exactitud de un instrumento de medida o

valores obtenidos de las propias especificaciones del equipo (resolución, deriva en el tiempo, etc.). En estos casos, se cuantifica la dispersión que generan estas fuentes de incertidumbre en base a patrones de variabilidad (distribuciones de probabilidad).

Una **distribución de probabilidad** es un patrón con el que se asignan las probabilidades de que se den un conjunto de valores de una variable aleatoria.

Un ejemplo de distribución de probabilidad es la Normal que se ha estudiado anteriormente (ver fig. A.4.1). La distribución normal se utiliza para las variables aleatorias que tienden a seguir un modelo de dispersión de este tipo, como la repetibilidad, y se deduce que la media de los valores (esperanza) tiene la máxima probabilidad de darse, y conforme los valores se alejan de la media, la probabilidad de que se den va decreciendo siguiendo la campana de Gauss.

Otro tipo de distribución es la rectangular o uniforme, la cual puede verse representada en la figura A.4.2. Se utiliza para estimar las fuentes de incertidumbre cuyos valores del intervalo se asume que tienen todos la misma probabilidad de darse. Unos ejemplos de este tipo de fuentes de incertidumbre son la resolución o el error máximo permitido del equipo. Este es el modelo más recurrido a la hora de evaluar incertidumbres de tipo B.

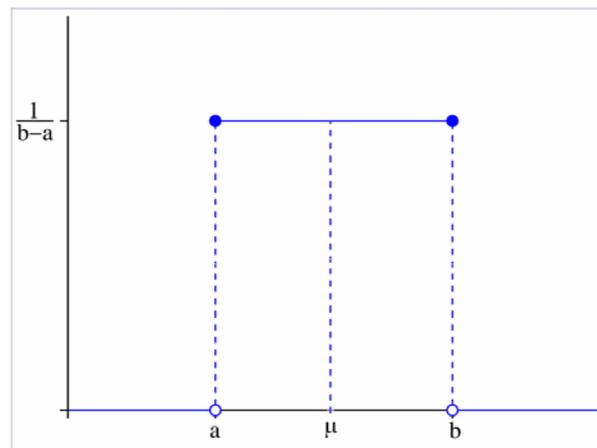


Figura A.4.2. Representación de la distribución de densidad de probabilidad rectangular o uniforme. Todos los valores del intervalo [a, b] tienen la misma probabilidad de darse [1/(b-a)]. El área del rectángulo es 1.

Para determinar la incertidumbre típica (dispersión) de una variable aleatoria con distribución rectangular se debe realizar la siguiente operación:

$$u_x = \frac{b-a}{\sqrt{12}} \quad (\text{A.4.3})$$

donde b-a corresponde a la amplitud del intervalo de la fuente de incertidumbre en estudio.

Otro modelo de distribución algo menos recurrido es la distribución triangular. Ésta se utiliza en evaluaciones de tipo B en las que los valores de dispersión tienen menos probabilidad de darse conforme se alejan de la esperanza. Esta distribución asume que dicha probabilidad va creciendo de manera lineal cuando el valor se acerca a la media poblacional, tal y como se ilustra en la figura A.4.3. Un ejemplo de fuente de incertidumbre cuya cuantificación se suele asumir con una distribución triangular es el error de enrase que puede cometer el usuario al efectuar una medida de volumen en una probeta.

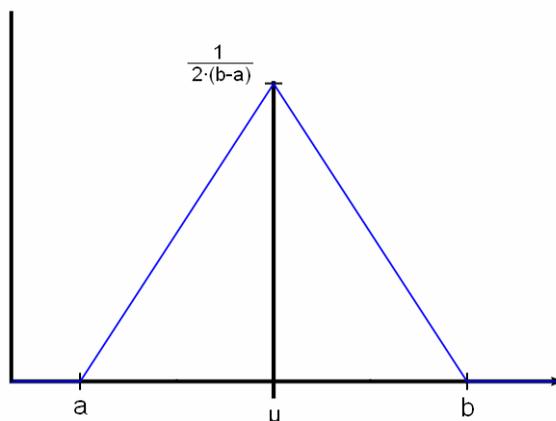


Figura A.4.3. Representación de la distribución de densidad de probabilidad triangular. El área del triángulo tiene como valor la unidad.

Para determinar la incertidumbre típica (dispersión) de una variable aleatoria cuya distribución se asume como una densidad de probabilidad triangular, se debe realizar la siguiente operación:

$$u_x = \frac{b - a}{\sqrt{24}} \quad (\text{A.4.4})$$

A.4.4 Ley de propagación de varianzas. La incertidumbre combinada.

Una vez halladas todas las incertidumbres típicas es hora de combinarlas.

La ley de propagación de incertidumbres nos dice cómo se deben combinar todas las contribuciones de las magnitudes de entrada para así obtener la incertidumbre combinada de la magnitud de salida. Para ello hay que valerse de la siguiente expresión [6]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (\text{A.4.5})$$

Donde $\delta f / \delta x_i$ es la derivada de la función modelo respecto a la variable de entrada x_i . A este parámetro se le llama **coeficiente de sensibilidad**. La variable $u_c(y)$ es la incertidumbre combinada de la magnitud de salida y , mientras que $u(x_i)$ es la incertidumbre típica correspondiente a la variable de entrada x_i . El valor N indica el número de magnitudes de entrada que compone la función modelo.

En caso de que haya una relación directa entre la magnitud de entrada y la de salida, la derivada de la función modelo respecto a la magnitud de entrada será igual a la unidad.

Al mismo tiempo, la incertidumbre de cada magnitud de entrada $u(x_i)$ suele ser la combinación no correlacionada de diversas fuentes de incertidumbre [28]. Ejemplos de este tipo de combinación de incertidumbres suelen ser la resolución del instrumento, la incertidumbre del patrón o la dispersión de las repeticiones efectuadas para calibrar dicha magnitud x_i . En ese caso, las fuentes de incertidumbre se combinarán del siguiente modo:

$$u(x_i) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (\text{A.4.6})$$

Donde $u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2$ son las incertidumbres típicas correspondientes a cada fuente de incertidumbre de la magnitud x_i . Cuando proceda, el valor extraído de (A.4.6) deberá introducirse en (A.4.5) para el cálculo de incertidumbre combinada de la magnitud de salida, quedando el cálculo de la siguiente manera:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot \sum_{j=1}^M u_j^2(x_i)} \quad (\text{A.4.7})$$

donde $u_j(x_i)$ son las incertidumbres típicas evaluadas de cada fuente de incertidumbre para la magnitud de entrada x_i , mientras que c_i son los coeficientes de sensibilidad vistos en la expresión A.4.5.

En el supuesto caso de que diversas fuentes de incertidumbre estén mutuamente correlacionadas, su covarianza también debe considerarse una contribución a la incertidumbre de medida:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u_{X_i})^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^n c_i \cdot c_{i+1} \cdot \text{Cov}(X_i, X_{i+1})} \quad (\text{A.4.8})$$

Suponiendo una relación directa entre la entrada y la salida (la magnitud de entrada es la misma que la de salida) y una correlación total entre las magnitudes de entrada, la ecuación A.4.8 se simplifica dando como resultado la siguiente expresión:

$$u(y) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n u_{X_i}\right)^2} = \sum_{i=1}^n u_{X_i} \quad (\text{A.4.9})$$

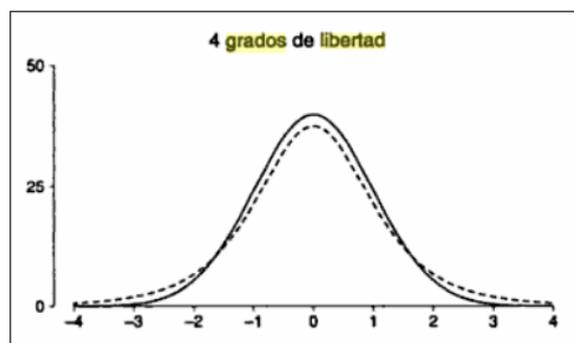
La siguiente expresión A.4.10 es un ejemplo de la combinación de dos fuentes de incertidumbre totalmente correlacionadas u_1 y u_2 con una tercera fuente de incertidumbre no correlacionada u_3 :

$$u(y) = \sqrt{(u_1 + u_2)^2 + u_3^2} \quad (\text{A.4.10})$$

A.4.5 Expresión de la incertidumbre de medida en los resultados. Incertidumbre expandida.

La incertidumbre expandida de la medida se calcula multiplicando la incertidumbre combinada por el factor de cobertura (también llamado factor de confianza).

Según el Teorema del Límite Central [4], independientemente de la distribución de probabilidad de las incertidumbres típicas, se asume que la incertidumbre combinada tiene siempre una distribución de probabilidad student, tendiendo a una normal cuando los grados de libertad eficaces utilizados para su determinación son lo suficientemente elevados. Un ejemplo de ello se muestra en la figura A.4.4. [7]



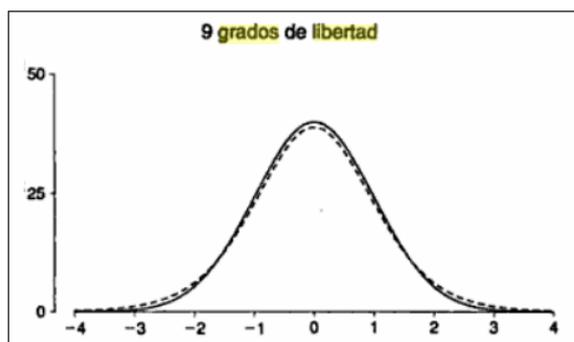


Figura A.4.4. Representación de una distribución student con 4 grados de libertad (arriba) y 9 grados de libertad (abajo). En líneas discontinuas se observa la curva student y en línea continua, una distribución normal. Se observa cómo la distribución student se aproxima a una normal cuanto más alto es el valor de los grados de libertad eficaces utilizados para su determinación.

A.4.5.1 Factor de cobertura

El factor de cobertura describe el nivel de confianza de la incertidumbre estimada. Se suele asumir una confianza próxima al 95,45% en la estimación de la incertidumbre de los instrumentos de medida, que para una distribución normal equivale a un factor de cobertura $k = 2$.

En caso de que no se disponga de los grados de libertad necesarios para considerar una distribución normal (por ejemplo, si el número de observaciones es menor que 10), se deben calcular los grados de libertad eficaces para poder hallar el valor del factor de cobertura para una confianza del 95,45%. En ese caso, k será siempre mayor o igual que 2.

A.4.5.2 Grados de libertad

La distribución t de student es caracterizada por un parámetro ν_{eff} llamado grados de libertad eficaces.

Dependiendo de ese parámetro, la forma de la distribución será más estrecha o más alargada (ver figura A.4.4), llegando a coincidir con la normal cuando ν_{eff} tienda a infinito. Cuantos más datos se utilizan para estimar una incertidumbre, más grados de libertad efectivos habrá y menor será el factor de cobertura (hasta un límite inferior $k = 2$).

Para una evaluación de tipo A, los grados de libertad de la incertidumbre típica vienen dados por $\nu_i = n - 1$, donde n es el número de observaciones de la magnitud de entrada x_i .

Para una evaluación de tipo B, los grados de libertad ν_i de la incertidumbre típica se consideran infinitos.

Una vez hallados los grados de libertad de cada incertidumbre típica, se deben calcular los grados de libertad eficaces de la incertidumbre combinada de la magnitud de salida. Para ello, se utiliza la siguiente expresión:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (\text{A.4.11})$$

Siendo u_c la incertidumbre combinada de la magnitud de salida, u_i cada una de las incertidumbres típicas de la magnitud de salida de las que está compuesta la incertidumbre combinada, y ν_i sus grados de libertad.

A.4.5.3 Incertidumbre expandida

El valor del factor de cobertura equivale al valor de $t_p(v)$ de la distribución t de student para v_{eff} grados de libertad que normalmente define un intervalo de confianza del 95,45%. Este valor puede extraerse de una porción de la tabla de valores de la distribución t de student que se ilustra en la tabla A.4.1.

v	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	50	100	∞
$t_p(v_{ef})$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,32	2,28	2,13	2,05	2,025	2,000

Tabla A.4.1. Algunos valores representativos de $t_p(v)$ de la distribución t para v grados de libertad que define un intervalo de confianza del 95,45%.

Finalmente, la incertidumbre expandida se calcula multiplicando el factor de cobertura hallado por la incertidumbre combinada:

$$U = \pm k \cdot u_c \tag{A.4.12}$$

ANEXO 5. Programación del PIC del módulo de conmutación.

```

;***** PROCESADOR *****
;
;    PROCESSOR 16F870
;    list      p=16F870
;    include <P16f870.inc>

;***** DECLARACIÓN DE REGISTROS *****

dato    equ    0x135    ; Registro para guardar el dato recibido vía USART
aux     equ    0x136

;***** ESTRUCTURA DE LA MEMORIA *****

        ORG    0x00                ; vector de reset
        goto   inicio

        ORG    0x04                ; vector de interrupción
        goto   RSI                  ; Rutina de servicio a la interrupción (RSI)

;***** DECLARACIÓN DE PUERTOS *****

#define banco0 STATUS,5
#define banco1 STATUS,6
#define banco  STATUS,7
#define equipo PORTB,5
#define patron PORTC,4
#define fdato  PIR1,5
#define OERR   RCSTA,1
#define conmutaPORTC,5
#define SINC   TXSTA,4
#define HSPEED TXSTA,2

;***** PROGRAMA PRINCIPAL *****

inicio    bsf    STATUS,RP0
          bcf    STATUS,RP1
          movlw  0x00
          movwf  TRISB                ; Configuro Puerto B como salida
          movlw  b'10100000'
          movwf  TRISC                ; Configuro RC5 y RC7 como entradas y el resto como salidas
          movlw  0x20
          movwf  PIE1                  ; Habilito interr. buffer RS232
          bsf    INTCON,7              ; Habilito las interrupciones
          bsf    INTCON,6              ; Habilito las interr. de periféricos (RS232...)
          movlw  b'00011001'
          movwf  SPBRG                ; Muevo 25 a SPBRG para configurar a 9600Baud con Fosc = 16MHz
          bcf    HSPEED                ; RS232 modo asíncrono, deshabilitado TX y habilitado HSPEED...
          bcf    SINC                  ; ... para mayor precisión en el Baud rate
          bcf    STATUS,RP0
          movlw  b'10010000'
          movwf  RCSTA
          bcf    equipo                ; Deshabilito equipo (se apaga el LED amarillo de prueba del equipo)
          bsf    patron                ; Habilito el patrón (se enciende el LED rojo de prueba del patrón)
          clrf  dato
          clrf  aux

```

```

sigue      btfsc  OERR
           bcf    OERR
           btfss  conmuta
           goto   sigue      ; se queda en este bucle mientras no se presione el pulsador (RC5)
           btfsc  patron
           goto   equipON
           bsf    patron
           bcf    equipo
           goto   espera

```

```

equipON    bcf    patron
           bsf    equipo
           goto   espera

```

```

espera     btfsc  conmuta      ; Espera hasta que el usuario suelta el pulsador
           goto   espera
           goto   sigue

```

```

,*****
,
,***** RSI *****
,
,*****
,

```

```

RSI        bcf    INTCON,GIE   ; deshabilitamos todas las interrupciones
           btfsc  INTCON,GIE   ; nos aseguramos de que están todas deshabilitadas antes de seguir
           goto   RSI
           btfss  fdato
           goto   finRSI
           bcf    fdato
           movf  RCREG,W        ; Guardo el dato recibido en el registro "dato" y al mismo tiempo se...
           movwf dato          ; vacía RCREG volviendo el flag de interrup. por recepción a estado
                               ; LOW

```

```

patron?    movlw  b'01110000'   ; El byte recibido tiene el valor "p" cuando queremos conmutar al...
           subwf  dato,aux      ; ...patrón, y "e" cuando queremos conmutar al equipo
           btfss  STATUS,Z
           goto   equipo?
           bcf    equipo
           bsf    patron
           goto   finRSI

```

```

equipo?    movlw  b'01100101'   ; El byte recibido tiene el valor "p" cuando queremos conmutar al...
           subwf  dato,aux      ; ...patrón, y "e" cuando queremos conmutar al equipo
           btfss  STATUS,Z
           goto   finRSI
           bsf    equipo
           bcf    patron
           goto   finRSI

```

```

finRSI     bsf    INTCON,GIE   ; Borramos el flag de interrupción
           retfie

```

```

END

```


ANEXO 6. Modelado del comportamiento del *shaker*.

Para conocer los valores de tensión de salida del generador necesarios para obtener aceleraciones determinadas en la salida del shaker, ha sido necesario realizar un estudio de su comportamiento para obtener un modelo matemático que se adapte a la aplicación de calibración de acelerómetros.

Existen dos maneras de aumentar la amplitud de salida del shaker. Una es aumentando la tensión de salida del generador de funciones, y otra es mediante el regulador que incorpora el amplificador de potencia conectado a la entrada del shaker. Debido a que el regulador del amplificador funciona solamente de manera manual, es necesario **fijarlo en un punto conocido** para, después, variar la tensión de salida del generador y así poder controlar la amplitud de salida de manera remota.

Para fijarlo en un punto conocido, la aplicación desarrollada para la calibración automática de acelerómetros sigue el siguiente procedimiento:

- Mediante el generador, aplica una onda senoidal de 0,5V de pico a la entrada del amplificador.
- Se visualiza la lectura *online* del acelerómetro patrón en el panel frontal.
- Se indica un nivel de aceleración al que se debe llegar de manera aproximada. En este momento, el usuario regulará manualmente la salida del amplificador hasta alcanzar un nivel de amplitud de aceleración próximo al nivel necesario.
- Una vez alcanzado dicho intervalo de amplitud de salida, se ilumina un indicador señalando que ya se puede proceder a la calibración. Al aceptar, el software registra la amplitud real alcanzada en ese momento.

La amplitud registrada es la amplitud de aceleración a 0,5V. Este dato se utilizará como punto de partida para obtener el modelo matemático utilizado para calcular las amplitudes en mV correspondientes a las amplitudes en g necesarias.

Para obtener el modelo matemático, se realizaron una serie de mediciones a distintas amplitudes partiendo de diferentes aceleraciones iniciales a 0,5V.

Después de recoger todas las muestras se ha observado que, partiendo de una misma aceleración inicial a 0,5V, al variar el voltaje de salida del generador variaba de manera casi proporcional la aceleración de salida del shaker, por lo que el comportamiento se puede aproximar por una recta. No obstante, cuando se varía la aceleración inicial a 0,5V, aunque el comportamiento sigue siendo quasi-lineal, la recta que lo define varía, y dicha variación no es lineal.

Para solucionar este problema, se realizaron un conjunto de mediciones de linealidad a varias aceleraciones iniciales a 0,5V y se halló una ecuación de sexto grado que definía los parámetros de la recta (m y n) dependiendo de dicha aceleración inicial a 0,5V. Todas las mediciones y los cálculos se hallan en el archivo de Excel "*ModeloShaker.xls*".

El resultado es una ecuación de sexto grado con variable dependiente la amplitud a 500mV para la determinación de la pendiente m de la recta, y otra ecuación de tercer grado para la determinación de la intersección del eje n de la recta:

$$m = 0.0059 \cdot x^6 - 0.2700 \cdot x^5 + 4.8871 \cdot x^4 - 45.1287 \cdot x^3 + 228.1825 \cdot x^2 - 632.6846 \cdot x + 894.7282$$

$$n = -0.0368 \cdot x^3 + 0.2376 \cdot x^2 - 0.8043 \cdot x$$

donde x = amplitud en g ante una consigna de 500mV (salida del generador).

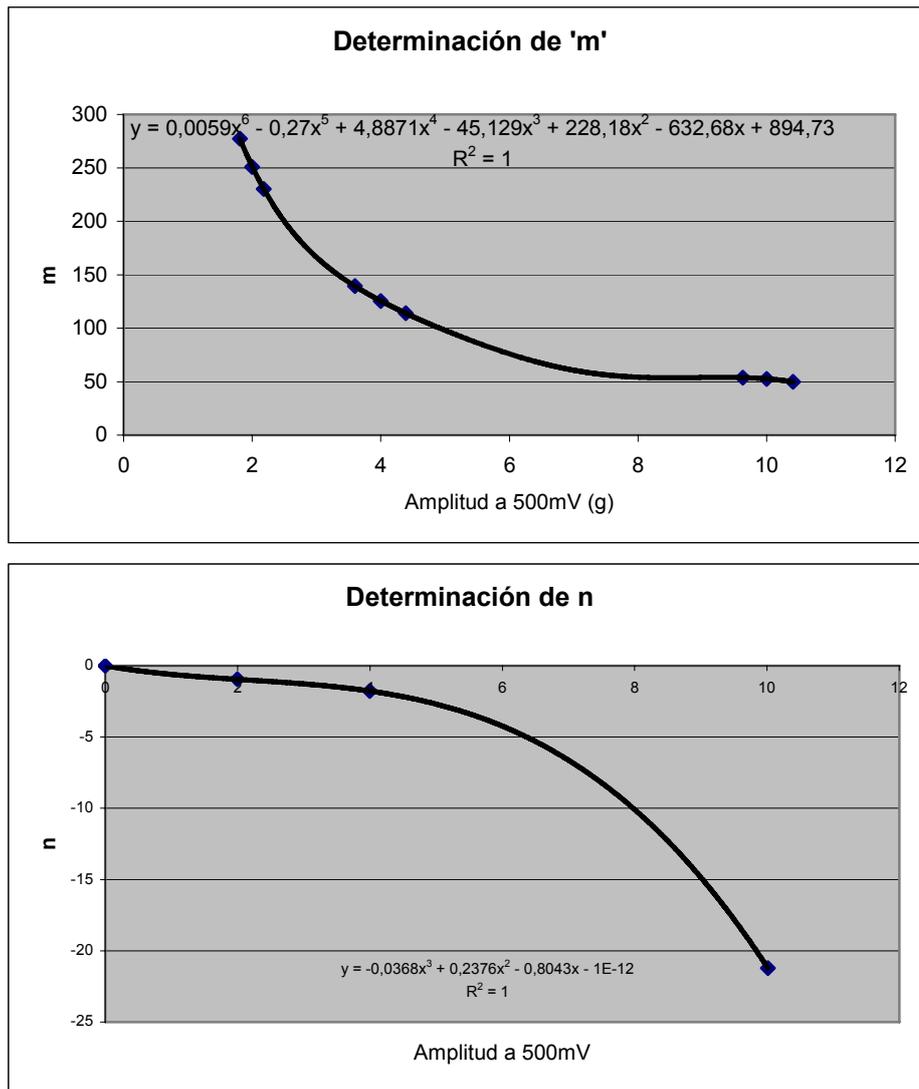


Figura XX. Gráficas para la determinación de los parámetros de la recta. Arriba, determinación de la pendiente m de la recta, y abajo, determinación de la intersección con el eje n .

Finalmente, la recta que se debe aplicar para la determinación de los valores de voltaje necesarios para obtener las amplitudes en g indicadas se halla mediante los parámetros calculados anteriormente:

$$A(V) = m \cdot A(g) + n$$

ANEXO 7. Modelo mecánico del acelerómetro.

En la figura A.7.1 se muestra el modelo mecánico para comprender más detalladamente el proceso de medida de aceleración. Se sustituye el sensor de fuerza por uno de desplazamiento para comprender mejor el funcionamiento. El modelo es equivalente ya que el desplazamiento será proporcional a la fuerza ejercida siempre que estemos dentro del rango elástico del material [52].

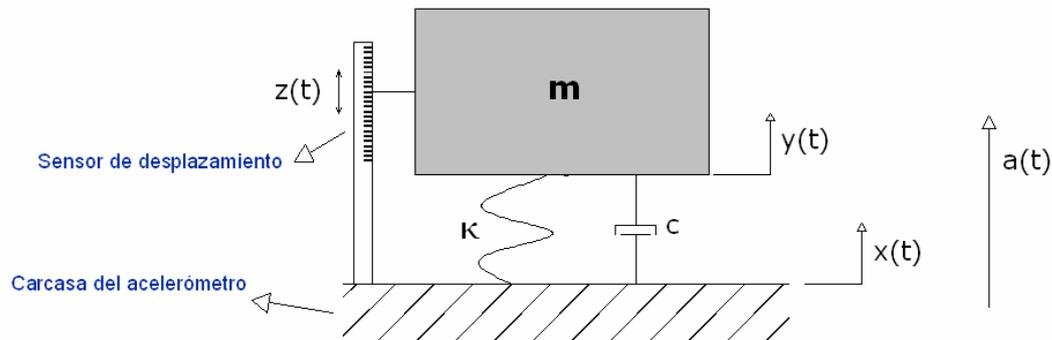


Figura A.7.1. Modelo básico del sistema mecánico interno de un acelerómetro con masa sísmica.

En esta representación se observa que el anclaje de la masa sísmica sobre la carcasa del acelerómetro se modela por un resorte y un dispositivo amortiguador, lo cual hará que se produzca un movimiento oscilatorio amortiguado en la masa sísmica.

El desplazamiento relativo de la masa sísmica respecto a la aceleración del acelerómetro se modela por una función de transferencia de segundo orden con bajo coeficiente de amortiguamiento. Esto explica el hecho de que el sistema tenga siempre una frecuencia de resonancia con un pico abrupto de amplitud.

El movimiento de la masa sísmica del sistema mecánico de la figura anterior puede modelarse por la siguiente ecuación diferencial:

$$-k(y - x) - c(\dot{y} - \dot{x}) = m \cdot \ddot{y} ; \quad (\text{A.7.1})$$

$$m \cdot \ddot{y} + c \cdot \dot{y} + k \cdot y = c \cdot \dot{x} + k \cdot x , \quad (\text{A.7.2})$$

donde:

k es la constante de fuerza del muelle

c es la constante de amortiguamiento

Pasando a parámetros de Laplace:

$$Y(s)(m \cdot s^2 + c \cdot s + k) = X(s)(c \cdot s + k) ; \quad (\text{A.7.3})$$

$$Y(s) = \frac{c \cdot s + k}{m \cdot s^2 + c \cdot s + k} \cdot X(s) \quad (\text{A.7.4})$$

Debido a que se pretende encontrar la ecuación del movimiento relativo de la masa sísmica respecto a la carcasa del acelerómetro, se introduce una nueva variable de desplazamiento:

$$z(t) = x(t) - y(t) \quad (\text{A.7.5})$$

Por tanto:

$$Z(s) = X(s) - Y(s) = \frac{m \cdot s^2}{m \cdot s^2 + c \cdot s + k} \cdot X(s) \quad (\text{A.7.6})$$

$$Z(s) = \frac{m}{m \cdot s^2 + c \cdot s + k} \cdot A(s), \quad (\text{A.7.7})$$

siendo $A(s) = X(s) \cdot s^2$ la transformada de Laplace de la aceleración del sistema, es decir, la transformada de la aceleración que se desea medir, que coincide con la segunda derivada del desplazamiento $x(t)$.

Siendo la ecuación canónica que describe una función de transferencia de segundo orden la siguiente [25],

$$H(s) = A \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (\text{A.7.8})$$

se puede hallar la ganancia A , la frecuencia natural del sistema ω_n y el coeficiente de amortiguamiento ρ del siguiente modo:

$$\frac{Z(s)}{A(s)} = H(s) = \frac{m}{k} \frac{k/m}{s^2 + \frac{c}{m} \cdot s + \frac{k}{m}} \quad (\text{A.7.9})$$

$$A = \frac{m}{k} \quad (\text{A.7.10})$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{A.7.11})$$

$$\xi = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{k \cdot m}} \quad (\text{A.7.12})$$

El sistema de la figura A.7.1 es lineal e invariante en el tiempo, lo cual significa que si a dicho sistema se le aplica una fuerza armónica $f_0(t)$,

$$f_0(t) = F \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (\text{A.7.13})$$

la respuesta será siempre una señal senoidal de la misma frecuencia que la de excitación pero con diferente amplitud y fase. La relación entre la amplitud y fase de la señal de excitación senoidal y la amplitud y fase de la señal de salida senoidal del acelerómetro se mantiene prácticamente constante dentro de su ancho de banda. Es en frecuencias próximas a la frecuencia de resonancia donde se produce una drástica variación de la amplitud y fase de la señal de salida respecto a la de excitación.

Ejemplo:

Suponiendo una frecuencia natural de 20kHz, una masa sísmica de 1 gramo y un coeficiente de amortiguación $\xi = 0.005$, lo cual podría bien ser aplicable a un caso práctico, mediante la ecuación A.7.9 podemos estudiar el comportamiento del sistema ante una excitación armónica en todo el espectro de frecuencia.

Para hallar la función de transferencia del ejemplo, es necesario antes hallar los parámetros A , k y c a partir de las ecuaciones A.7.10, A.7.11 y A.7.12, tal y como se muestra a continuación:

$$k = \omega_n^2 \cdot m = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot m \approx 1,579 \cdot 10^7 \text{ kg} / \text{s}^2$$

$$c = 2 \cdot \rho \cdot \sqrt{k \cdot m} = 1,2566 \text{ kg} / \text{s}$$

$$A = \frac{m}{k} = 6,332 \cdot 10^{-11}$$

$$A(\text{dB}) = 20 \cdot \log(6,332 \cdot 10^{-11}) = -203,97 \text{ dB}$$

Una vez hallados todos los parámetros es posible hallar la función de transferencia que define el movimiento relativo a la carcasa de la masa sísmica respecto a la aceleración del sistema:

$$H(s) = \frac{Z(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + 1256,637 \cdot s + 1,579 \cdot 10^{10}}$$

El diagrama de bode de la función de transferencia se ilustra en la figura A.7.2.

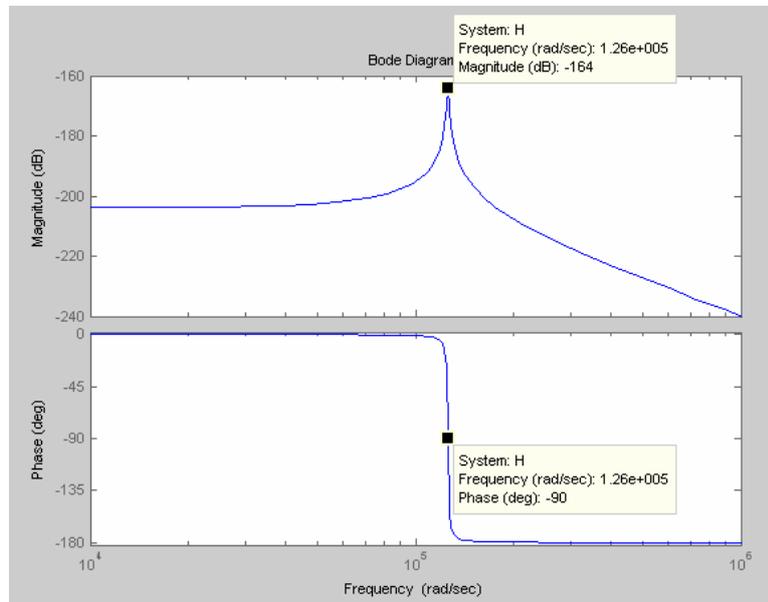


Figura A.7.2. Diagrama de bode de la función de transferencia del sistema con masa sísmica del ejemplo.

En el diagrama ilustrado en la figura A.7.2 se puede observar cómo la ganancia del sistema es de unos -200dB aproximadamente, tal y como se dedujo en los cálculos. Del mismo modo, se observa un sobrepico muy abrupto cercano a la frecuencia natural del sistema que se denomina frecuencia de resonancia. Este pico será más pronunciado cuanto menor sea el valor del coeficiente de amortiguamiento, siendo siempre este último mayor que cero. En el ejemplo, esto provoca que a frecuencias cercanas a la frecuencia natural del sistema se incremente hasta 40dB la amplitud de la vibración del acelerómetro ante una misma amplitud de aceleración.

También cabe destacar que en frecuencias menores a la frecuencia de resonancia la fase de las señales de entrada y salida se mantiene a cero, es decir, la señal de salida tendrá la misma fase que la de excitación. Para frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia, la fase de la señal va disminuyendo hasta situarse a -180°, con lo que la señal de salida se encontrará retrasada 180° respecto a la de entrada.

Se muestra también que la ganancia del sistema se mantiene en un amplio rango de frecuencias, lo cual significa que el acelerómetro mantendrá su sensibilidad en todo su ancho de banda dentro de unas tolerancias, siempre y cuando el elemento sensor tenga un comportamiento lo suficientemente lineal.

ANEXO 8. Guía básica de LabVIEW.

A.8.1 Funciones de programación básicas de LabVIEW 8.0

A continuación se resumen las principales funciones básicas de programación de las que dispone Labview y que se utilizan en la elaboración del programa. No es objetivo de este proyecto el profundizar en la programación en Labview ya que para ello existen multitud de libros y recursos online [9] [36] [37].

El entorno de programación LabVIEW de National Instruments dispone de un conjunto de funciones predeterminadas utilizadas para programar los VI's. Como en todo lenguaje de programación, estas funciones se pueden combinar para realizar cualquier tipo de operación. Las funciones de programación se encuentran en la ventana de diagramas de bloque.

Cuando se sitúa un control o indicador en el panel frontal, se visualiza en el diagrama de bloques en forma de icono. Este icono representa ese control o indicador y será de entrada (indicador) o de salida (control).

Las principales funciones que se utilizan en este proyecto para manipular los valores de controles e indicadores se resumen a continuación:

A.8.1.1 Funciones Programming

El apartado *Programming* del menú de programación es el más utilizado puesto que ofrece casi todas las operaciones necesarias para desarrollar un programa. En la figura A.8.1 se muestran los subapartados o librerías de las que se compone el menú *Programming*.

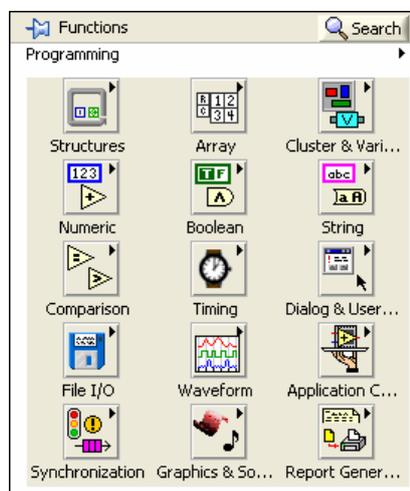


Figura A.8.1. Apartado *Programming* del menú de funciones de LabVIEW.

Así pues, incluye las operaciones numéricas y de conversión, booleanas y de arrays básicas y las funciones tipo estructura tan conocidas de otros lenguajes de programación, como los bucles *While* y *For*, o las estructuras *Case*, *Event* o *sequence*.

Mediante este menú también se puede realizar cualquier tipo de manipulación de cadenas de caracteres (strings) y se pueden elaborar diálogos que podrán aparecer en el transcurso del programa para dar orientaciones o informar de errores.

El menú programming también recoge las funciones de entrada/salida de archivos, las cuales permiten crear, leer y escribir archivos de datos llamados *Spreadsheets* en inglés.

El apartado *Application Control* es una colección de funciones que se utilizan para asumir el control de otras aplicaciones instaladas en la computadora y para llamar y controlar otros VI's de LabVIEW.

A.8.1.2 Funciones Instrument I/O

El conjunto de funciones Instrument I/O permite establecer comunicación con instrumentos mediante protocolo serie, GPIB o VISA. En el apartado *Data Communication* aparecen más protocolos de comunicación como el UDP, TCP o el USB, pero no se hablará de ellos porque no son materia de estudio en este proyecto.

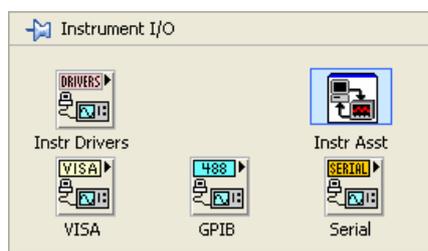


Figura A.8.2. Apartado *Instrument I/O* del menú de funciones de LabVIEW.

Mediante estas funciones es posible transferir y recibir datos de cualquier instrumento de medida que integre uno de estos protocolos de comunicación.

A.8.1.3 Funciones Connectivity

Del apartado Connectivity del menú de funciones únicamente cabe mencionar el submenú ActiveX para el propósito del proyecto. Mediante este set de funciones es posible manipular variables de otros programas externos como Excel, tal y como se verá en el apartado de desarrollo del proyecto.

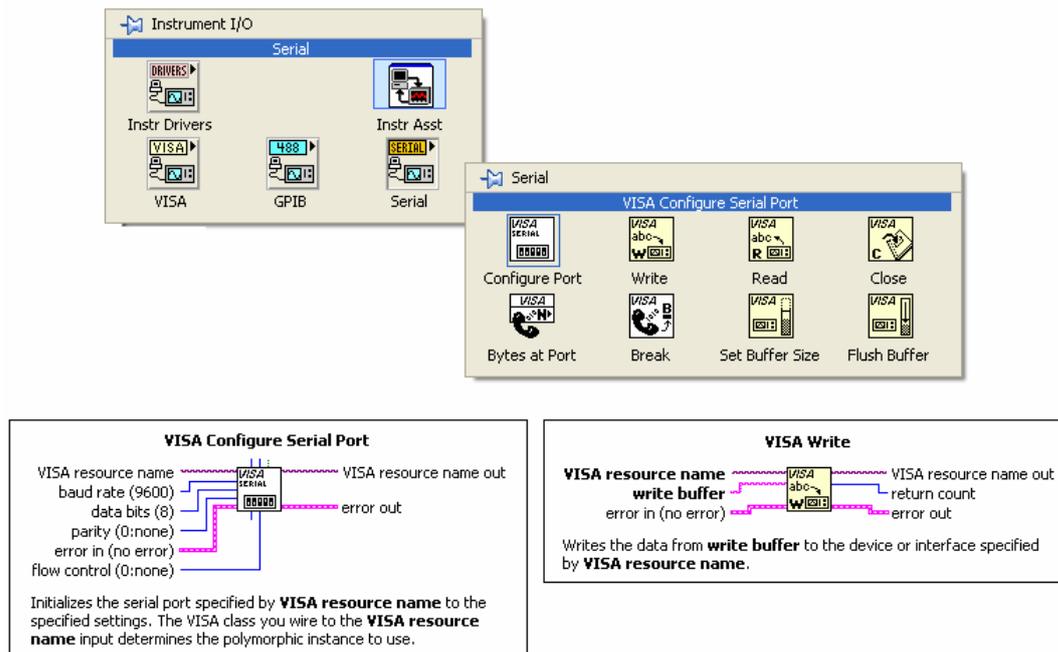


Figura A.8.3. Apartado *Connectivity* del menú de funciones de LabVIEW.

A.8.2 Comunicación con instrumentos, bases de datos y controles ActiveX

La comunicación con los instrumentos se lleva a cabo a través del apartado de funciones de programación “Instrument I/O” del diagrama de bloques. Mediante estas funciones, el usuario no necesita conocer cómo funciona exactamente el protocolo de comunicación ya que se trata de funciones de alto nivel cuya ejecución es transparente.

En caso de comunicación serie mediante protocolo VISA, lo único que se pide es la configuración del puerto, lo cual implica conocer datos como la velocidad de transmisión/recepción (*baud rate*), el número de bits de datos, la longitud del bit de parada y la configuración del bit de paridad.



- Figura A.8.4. Funciones para la comunicación a través de puerto serie. -

A.8.2.1 Drivers de instrumentos

Generalmente, los instrumentos de medida que permiten comunicación a través de LabVIEW, incluyen una serie de controladores para dicho programa. Dichos controladores se pueden descargar desde la página oficial del fabricante del instrumento [51] o directamente desde la página de National Instruments [52].

Estos drivers se presentan como funciones en el apartado *Instrument I/O (Instr Drivers)* y permiten facilitar la configuración del instrumento y llevar a cabo sus funciones con una programación de nivel más alto, sin tener que preocuparse por aspectos como los comandos que intervienen en los protocolos de comunicación.

En ocasiones incluyen todos los controles e indicadores dispuestos en el panel frontal que nos permiten controlar el instrumento en tiempo real de manera remota desde el PC, tal y como lo haríamos físicamente en el panel frontal del equipo.

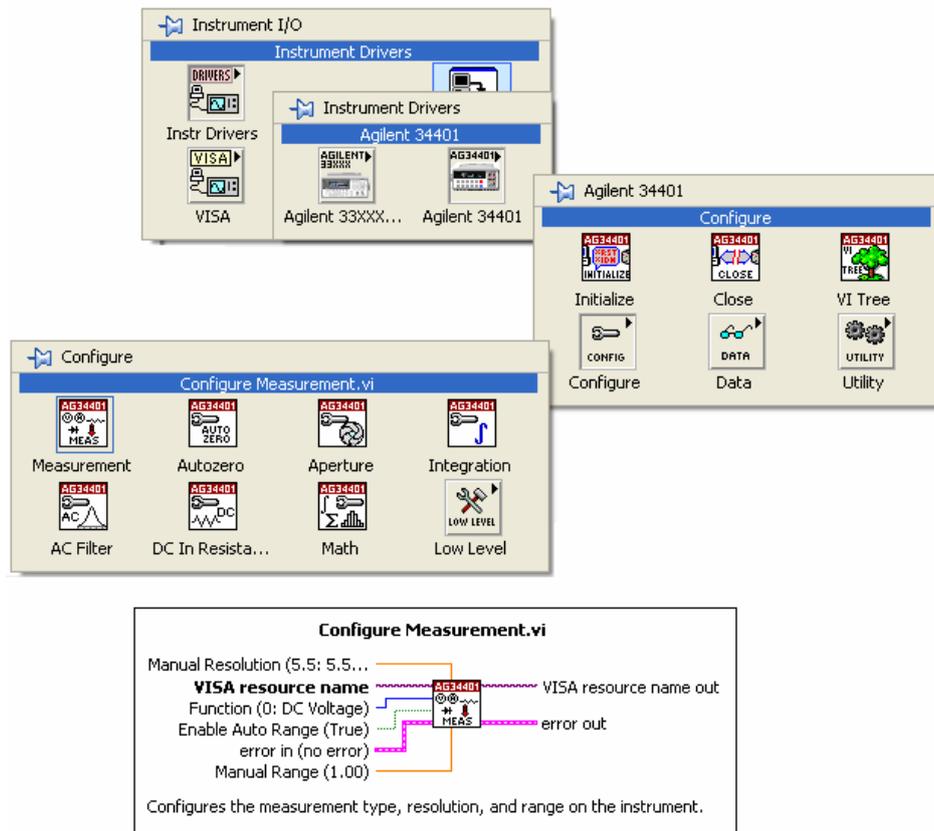
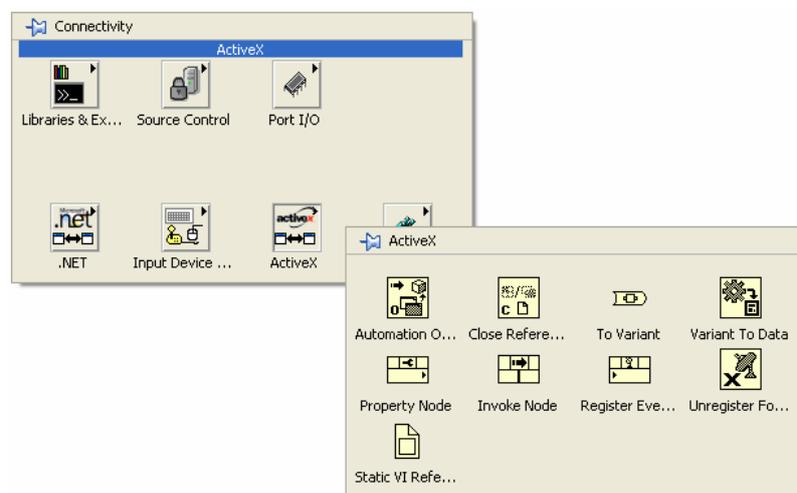


Figura A.8.5. Ejemplo de funciones que aparecen en los drivers de un multímetro Agilent modelo 34401.

A.8.2.2 Controles ActiveX

ActiveX es un protocolo desarrollado por Microsoft que permite la interacción entre distintos programas. Se basa en el uso de un conjunto de instrucciones que permiten leer datos o incluso tomar el control total o parcial de otros programas que incluyan también dicho protocolo.

Las funciones destinadas al manejo de los controles ActiveX se encuentran en el apartado *Connectivity* del menú de funciones.



- Figura A.8.6. Conjunto de funciones para el uso de controles ActiveX. -

El proceso que hay que seguir para la creación de un control ActiveX podría ser el siguiente:

- Introducir la referencia a la aplicación sobre la que se quiere tomar control.
- Mediante los nodos de propiedad, leer o modificar las propiedades de un objeto de esa aplicación.
- Utilizando los nodos de invocación, llevar a cabo métodos o acciones como rellenar con un dato la celda de Excel indicada por un nodo de propiedad.
- Finalmente, se deben cerrar todas las referencias a objetos ActiveX.

Un ejemplo de este proceso se ilustra en la figura A.8.7. El programa de dicha figura es uno de los que se ha elaborado durante el proyecto para la creación automatizada del certificado de calibración.

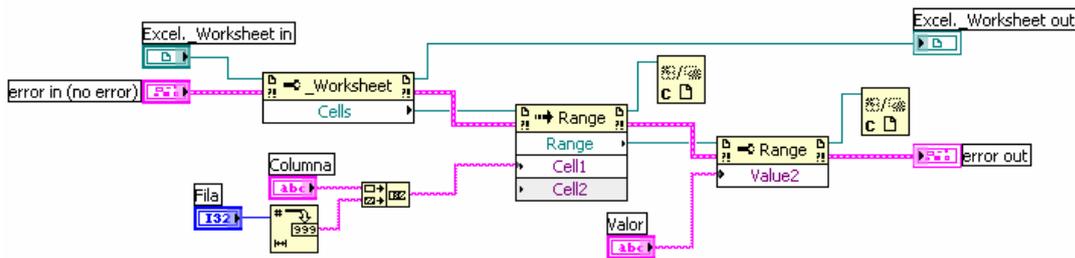


Figura A.8.7. Ejemplo del uso de funciones basado en controles ActiveX. En este programa, se escribe una cadena de caracteres indicada por la variable “Valor” en la celda indicada en una hoja de Excel determinada.

A.8.2.3 Gestión de bases de datos

En el presente proyecto resulta necesario el uso de funciones de programación relacionadas con la gestión de bases de datos SQL para la manipulación de los registros contenidos en la base de datos de las fichas de inventario de los equipos. Esta base de datos es creada y actualizada constantemente por el software Visual Factory Calibre 6.

Para llevar a cabo las búsquedas de registros (*queries*) y la manipulación de los datos de la base de datos SQL a través de LabVIEW, se utiliza como base un juego de VI's de libre distribución llamado LabSQL [49]. Mediante este conjunto de VI's basado en controles ActiveX (ADO, del inglés *ActiveX Data Objects*) es posible realizar cualquier tipo de búsqueda y manipular cualquier registro de una base de datos compatible con SQL.

Una vez instalado LabSQL, sus funciones aparecen en el apartado *User Libraries* del menú de funciones.

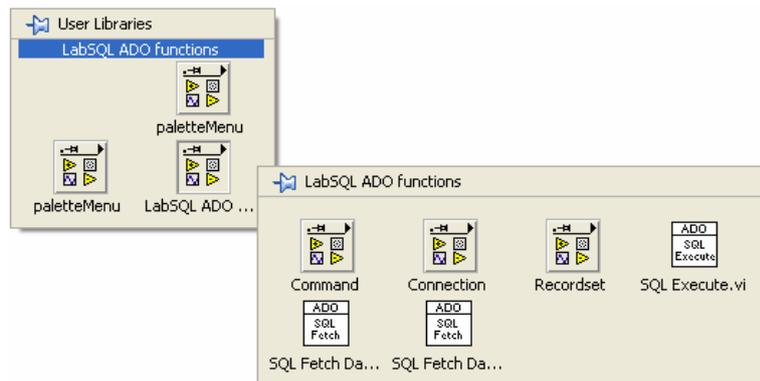
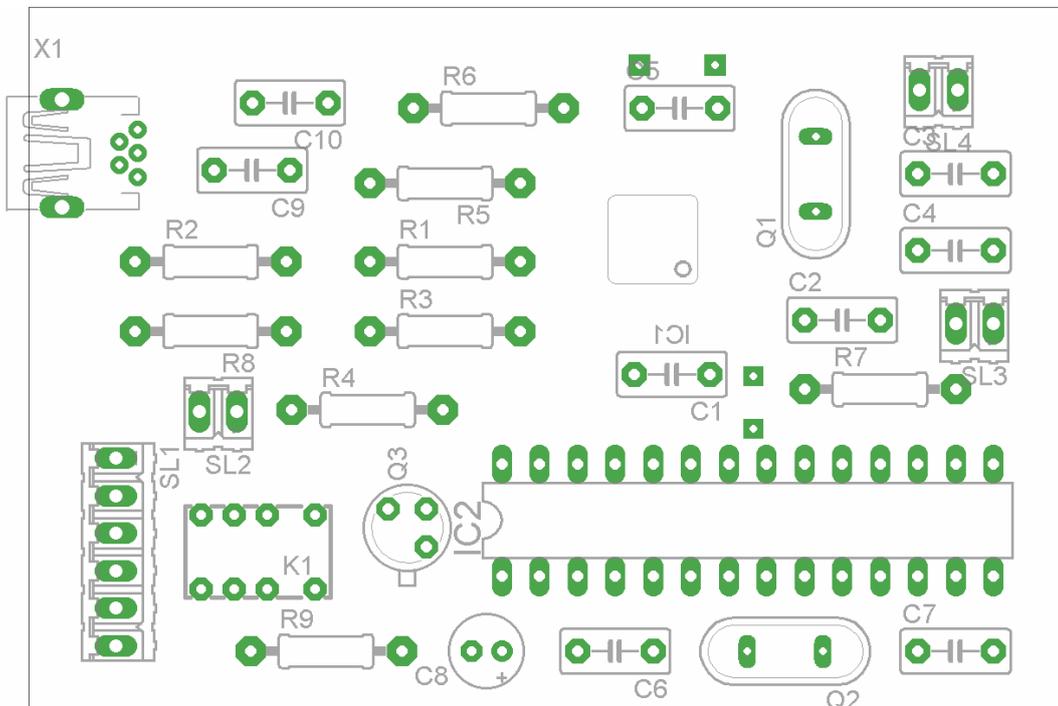


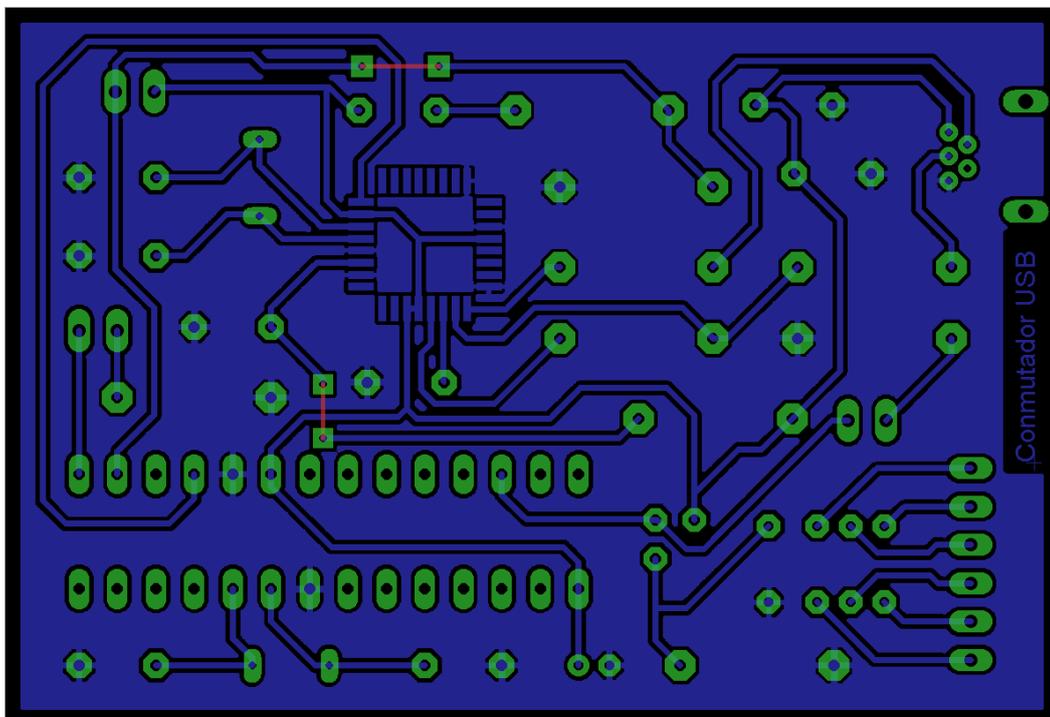
Figura A.8.8. Librería de funciones LabSQL.

Seguidamente, se observa una captura de imagen del PCB diseñado mediante la herramienta *Eagle Layout Editor 5.6.0*.

Cara de componentes:



Cara de pistas



Las dos pistas que se observan en la cara de componentes son en realidad puentes, ya que la placa es de una sola cara.

ANEXO 10. Informes de calibración de los resultados del apartado 8.1.

Equipo calibrado:

Nº inventario: 91071	Procedimiento: IT-CAL-14
Descripción: ACELEROMETRO PIEZOELECTRICO	
Marca: B&K	Fecha calibración: 17/06/2010
Modelo: 4371	Próx. Calibración: 17/06/2011
Nº de serie: 1515700	

Patrones utilizados:

Condiciones ambientales:

Nº inventario	Descripción	Próxima calibración		
93004	Calibrador de acelerómetros	mar-13	Temperatura:	23°C
98186	Multímetro Agilent 34401A	dic-10		
91043	Amplificador de carga	abr-11	Humedad:	58%

Observaciones de la calibración:

Se ha utilizado un amplificador de carga como sistema de acondicionamiento para el acelerómetro en calibración.
 La sensibilidad configurada en el amplificador de carga en el momento de la calibración fue de 1,03 pC/ms-2
 La nueva sensibilidad que se deberá configurar en el amplificador de carga se expresa en los resultados de la hoja 2.

Notas:

La nueva sensibilidad se extrae del promedio de 10 lecturas a una frecuencia y amplitud de referencia.
 La incertidumbre expresada en el cálculo de la nueva sensibilidad corresponde a la incertidumbre expandida de calibración, obtenida multiplicando la incertidumbre típica por el factor de cobertura $k = 2$ que, para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.
 El equipo se considera apto cuando el error de sensibilidad es menor del 5%, el error de linealidad en amplitud menor del 1% y la máxima desviación en la respuesta en frecuencia menor del 5% entre 100 y 1000Hz.

Calibrado por:

AR

Revisado:

A. Ruiz

Conforme responsable:

Configuración

Resultados (Eje X)

Tecnología:	Piezoeléctrico	Rango:	±6000
Uso de amplificador:	SI	S original:	1,038 pC/m·s-2
Output cadena UUT:	1 mV/m·s-2	S actual:	1,03 pC/m·s-2
Filtrado utilizado:	[0,2Hz ; 100kHz]	<small>(Sensibilidad hallada en la anterior calibración.)</small>	
		Montaje:	Elemento roscado

1. Obtención de la nueva sensibilidad:

NUEVA SENSIBILIDAD: 1,0314 pC/m·s-2

Frecuencia de referencia: **160 Hz**

Amplitud de referencia: **10 g rms**

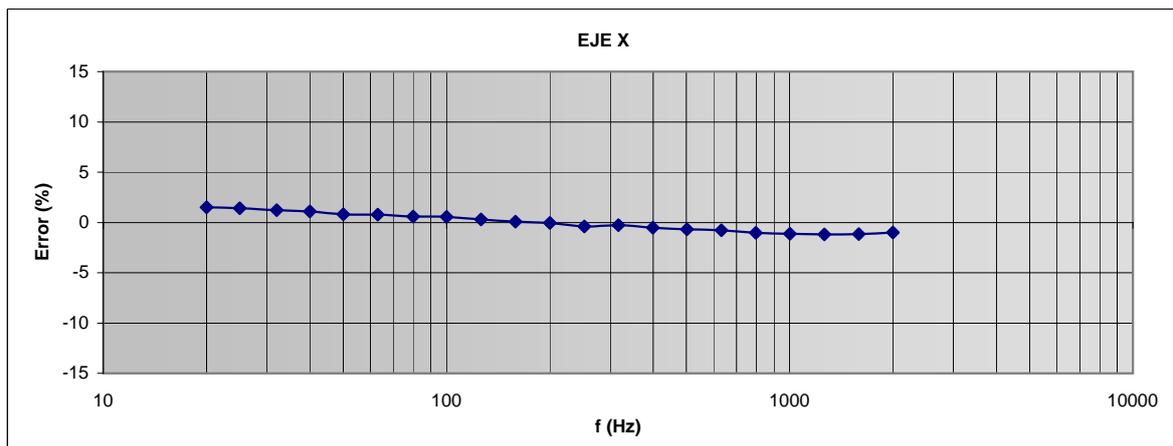
Diferencia con la original: **0,63%**

Incertidumbre = ± **1,5%** (k = 2)

2. Linealidad en amplitud:

Frecuencia [Hz]	Patrón [g _{RMS}]	Equipo [g _{RMS}]	Sensibilidad [pC/m·s-2]	Error [%]
160	4,816	4,816	1,0314	0,01%
160	10,011	10,010	1,0314	0,00%
160	15,112	15,124	1,0322	-0,08%
160	25,033	25,040	1,0317	-0,03%

3. Respuesta en frecuencia:



Frecuencia [Hz]	Error [%]	Frecuencia [Hz]	Error [%]
20	1,50	252	-0,39
32	1,24	502	-0,69
63	0,79	1002	-1,14
126	0,30	2000	-1,00

Revisado:

EQUIPO APTO

Conforme responsable:

A. Ruiz

**Calibration Chart for
Accelerometer Type 4371**



Serial No. 1515700

Reference Sensitivity at 159,2 Hz ($\omega = 1000 \text{ s}^{-1}$),
100 ms^{-2} and 23 °C

Charge Sensitivity* 103.9 pC/ ms^{-2}

Voltage Sensitivity* (incl. AO 0038)

0.807 mV/ ms^{-2} or 7.91 mV/g
(Voltage Preamp. input Capacitance: 3,5 pF)

Capacitance (incl. cable) 1250 pF

Typical Capacitance of cable AO 0038 110 pF

Maximum Transverse Sensitivity
(at 30 Hz, 100 ms^{-2}) 0.5 %

Typical Undamped Natural Frequency 48 kHz

Typical Transverse Resonance Frequency, using Cali-
bration Exciter 4290, with accelerometer mounted on a
steel cube by a 10 - 32 UNF-2A steel stud, mounting
torque 1,8Nm and greased surfaces:
..... 15 kHz

Polarity is positive on the center of the connector for an
acceleration directed from the mounting surface into the
body of the accelerometer

Resistance minimum 20.000M Ω at room temperature

Date: 89.09.28 Signature: [Signature]

1 g = 9,807 ms^{-2} or 10 $\text{ms}^{-2} = 1,02 \text{ g}$

* This calibration is traceable to the National Bureau of Standards
Washington D.C.

BC0101-14

Environmental:

Humidity: Welded, Sealed

Temperature Range: -74 to +250 °C (-100 to +482 °F)

Max. Shock Acceleration: 200 kms^{-2} peak

Typical Magnetic Sensitivity (50 Hz - 0,03 T):
4 ms^{-2}/T

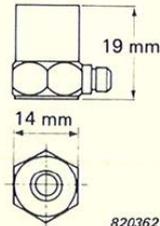
Typical Acoustic Sensitivity: 0,01 ms^{-2} at 154 dB SPL (2
- 100 Hz)

Typical Base Strain Sensitivity (at 250 $\mu\epsilon$ in base
plane): 0,02 $\text{ms}^{-2}/\mu\epsilon$

Typical Temperature Transient Sensitivity (3 Hz LLF):
0,4 $\text{ms}^{-2}/^\circ\text{C}$

Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11-
1969

Physical:



Electrical Connector:
Coaxial 10 - 32 UNF-2A

Material: Titanium, ASTM Grade 2

Piezoelectric Material: PZ23

Weight: 11 gram

Construction: Delta Shear

Mounting Thread: 10 - 32 UNF-2B

Mounting Stud: 10 - 32 UNF-2A x13 mm, steel

Mounting Surface Flatness: <3 μm

Mounting Torque: Normal 1,8 Nm. Min. 0,5 Nm.
Max. 3,5 Nm

Seismic Mass: 2,6 gram

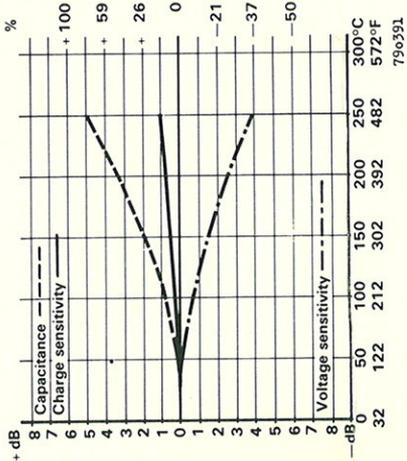
Center of Gravity of Seismic Mass: 11,5 mm from
mounting surface on central axis

Center of Gravity of Accelerometer: 7,8 mm from
mounting surface on central axis

For further information see B & K "Piezoelectric Ac-
celerometer and Preampifier" handbook

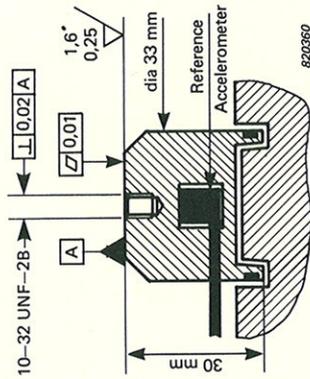
Pat. DK 131401

Typical Temperature Sensitivity Deviation:
(Piezoelectric Material PZ23)



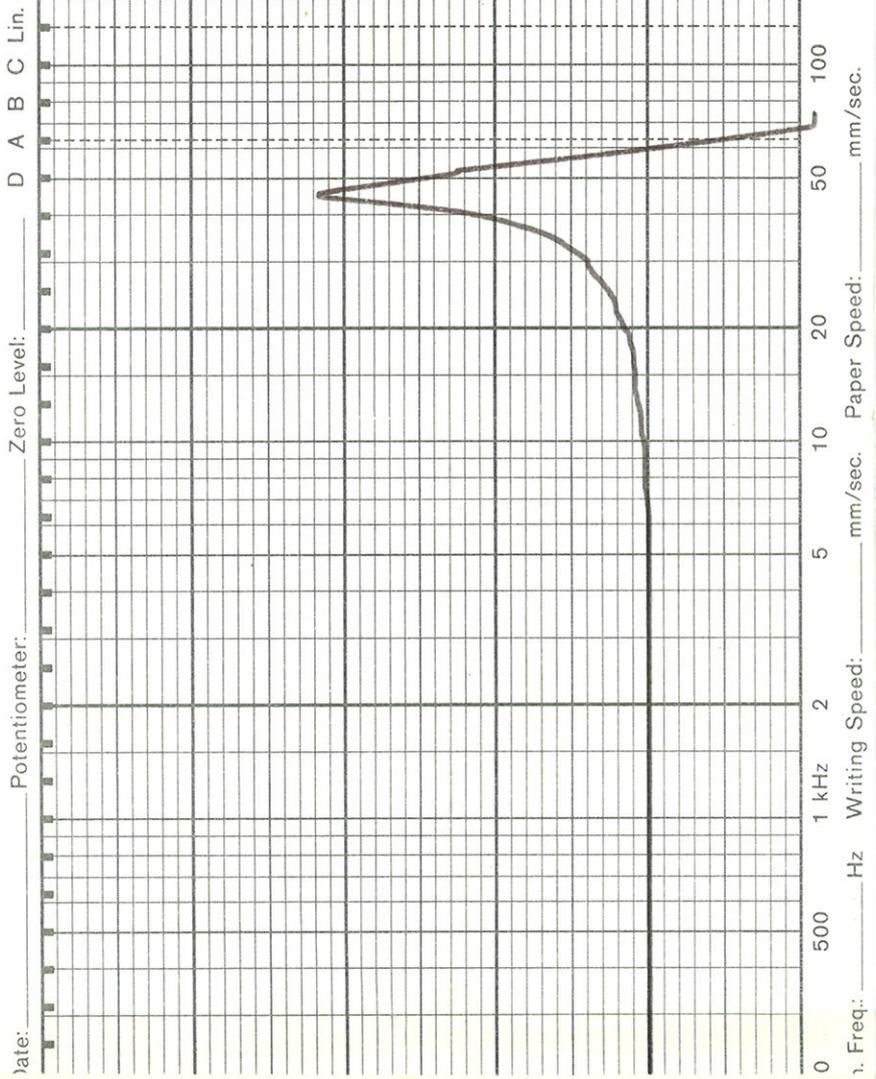
Mounting Technique:
Examine the mounting surface for cleanliness and smoothness.
If necessary, machine surface to tolerances shown in schematic drawing of Calibration Exciter 4290.
Fasten the 4371 using a 10 - 32 UNF-2A stud. Take care not to exceed the recommended mounting torque and that the stud does not bottom in the mounting holes.
A thin film of oil or grease between the accelerometer and the mounting surface helps achieve good contact and improves mounting stiffness.
For other types of mounting, see B & K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook.

Schematic Drawing of Exciter 4290:
(Modified laboratory reference)



Material: Stainless steel
Mass of Exciter table: 180 gram

Mounted Resonance Frequency obtained on the Exciter 4290 using the recommended mounting technique is shown on the attached individual **Frequency Response Curve**.



Rate: _____ Potentiometer: _____ Zero Level: _____

1. Freq.: _____ Hz Writing Speed: _____ mm/sec. Paper Speed: _____ mm/sec.

Equipo calibrado:

Nº inventario: 10123	Procedimiento: IT-CAL-14
Descripción: ACELERÓMETRO PIEZORRESISTIVO	
Marca: ENDEVCO	Fecha calibración: 14/05/2010
Modelo: 7285-2K-300	Próx. Calibración: 14/05/2011
Nº de serie: 11902	

Patrones utilizados:

Condiciones ambientales:

Nº inventario	Descripción	Próxima calibración		
93004	Calibrador de acelerómetros	mar-13	Temperatura:	24°C
98186	Multímetro Agilent 34401A	dic-10		
03351	Amplificador de extensometría	abr-11	Humedad:	38%

Observaciones de la calibración:

Para medir la señal de salida del UUT se ha utilizado un sistema acondicionador para acelerómetros piezorresistivos. El acondicionador de extensometría se ha configurado para transductores de puente completo con una tensión de alimentación de 10VDC, una sensibilidad de entrada de 0,1899 mV/g y un output de 5 mV/g.

Notas:

La nueva sensibilidad se extrae del promedio de 10 lecturas a una frecuencia y amplitud de referencia. La incertidumbre expresada en el cálculo de la nueva sensibilidad corresponde a la incertidumbre expandida de calibración, obtenida multiplicando la incertidumbre típica por el factor de cobertura $k = 2$ que, para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. El equipo se considera apto cuando el error de sensibilidad es menor del 5%, el error de linealidad en amplitud menor del 1% y la máxima desviación en la respuesta en frecuencia menor del 5% entre 100 y 1000Hz.

Calibrado por:

AR

Revisado:

A. Ruiz

Conforme responsable:

Configuración

Resultados (Eje X)

Tecnología:	Piezorresistivo	Rango:	±2000 g
Uso de amplificador:	SI	S original:	0,1899 mV/g
Output cadena UUT:	5 mV/g	S actual:	0,1899 mV/g
Filtrado utilizado:	Pasa bajo 100kHz (Bessel)	<small>(Sensibilidad hallada en la anterior calibración.)</small>	
V alimentación:	10 Vdc	Montaje:	Adhesivo instantáneo

1. Obtención de la nueva sensibilidad:

NUEVA SENSIBILIDAD: 0,1898 mV/g

Frecuencia de referencia: **160 Hz**

Amplitud de referencia: **10 g rms**

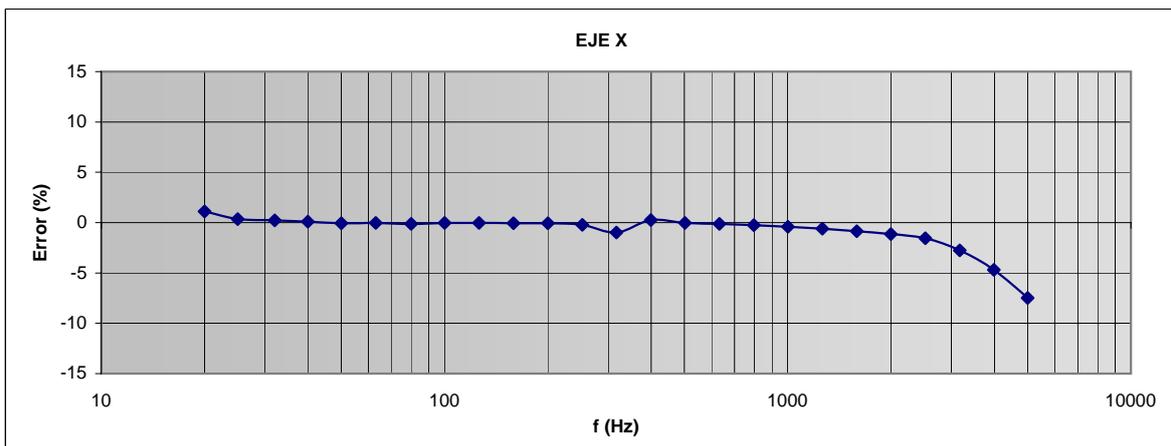
Diferencia con la original: **0,08%**

Incertidumbre = ± **1,0%** (k = 2)

2. Linealidad en amplitud:

Frecuencia [Hz]	Patrón [g _{RMS}]	Equipo [g _{RMS}]	Sensibilidad [mV/g]	Error [%]
160	4,811	4,822	0,1902	-0,23%
160	10,011	10,009	0,1897	0,02%
160	15,116	15,117	0,1898	-0,01%
160	24,107	24,117	0,1898	-0,04%

3. Respuesta en frecuencia:



Frecuencia [Hz]	Error [%]	Frecuencia [Hz]	Error [%]
20	1,11	399	0,27
32	0,21	796	-0,26
80	-0,13	2000	-1,13
159	-0,07	5000	-7,47

Revisado:

EQUIPO APTO

Conforme responsable:

A. Ruiz

Calibration Report

10123

Endevco

30700 Rancho Viejo Road
San Juan Capistrano
CA 92675-1748
USA

Document number: **24531**

Description: **4 Arm PR accelerometer**

Manufacturer: **ENDEVCO**

Model Number: **7285-2K-300**

Serial Number: **11902**

Tel: +1 (949) 493 8181
Fax: +1 (949) 661 7231

www.endevco.com
www.meggitt.com

MEGGITT

Sensitivity

0.1899 mV/g @ 100 Hz, 10 g pk
0.01936 mV/ m/s² @ 100Hz, 98 m/s² pk

Transverse Sensitivity(%): 4.3

Excitation: 10.0 V

Temperature (°C): 23 , (°F): 73
Relative Humidity (%): 40
Input Resistance (ohms): 574
Output Resistance (ohms): 584
ZMO (mV): 8.5

Notes:

Frequency Response

Hz	%Deviation
20	0.42
200	-0.07
4000	-3.60

Traceability:

Ref Manufacturer: ENDEVCO
Ref Model number: 2270M7A/2771A-10
Ref Serial number: AC71/ED80
NIST traceability #: 822/278085-09

Uncertainty estimate (95% confidence, k=2)

+/- 1.2 % 100.0 Hz Sensitivity
+/- 1.5 % 20.0 < f <= 100.0 Hz
+/- 1.2 % 100.0 < f <= 2500.0 Hz
+/- 2.5 % 2500.0 < f <= 10000.0 Hz
+/- 5.0 % 10000.0 < f <= 20000.0 Hz

Equipment and procedures used:

Console serial number: AC37
Equipment used: 2901
Test Name: CAL LAB

By: _____

HUY VU

Test Date: 1/18/2010 10:47 AM

Print Date: 1/18/2010

SJC - PR SBU

s/w 8.0



Certificate No. 1761.01

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Antoni Mánuel Lázaro y Joaquín del Río Fernández. LabVIEW 7.1. Programación Gráfica para el Control de la Instrumentación. Universitat Politècnica de Catalunya. Thomson, 2005. 326p.
- [2] Antonio Creus Sole. Instrumentación Industrial. Séptima edición. Barcelona: Marcombo, 2005. 775p.
- [3] Apuntes Teoría de Control (TCON), profesor Francisco J. Ruiz Vegas, 2006.
- [4] CEA-ENAC-LC/02 rev.1, 1998. Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones. 22p.
- [5] Certificado de acreditación del laboratorio de calibración de Spektra (Consultado Junio 2010) http://www.spektra-dresden.com/images/unternehmen/SPEKTRA_DKD-certificate_en.pdf
- [6] David Freedman, Alicia Coduras y Toni Cuff. Estadística, Segunda edición. Antoni Bosch S.A., 1993. Páginas 536-540.
- [7] Descarga de controladores de Agilent Technologies para LabVIEW (Consultado Noviembre 2009) <http://www.home.agilent.com/agilent/facet.jsp?s=180850.j.1&to=80045.k.1&cc=ES&lc=spa&sm=g>
- [8] Descarga de controladores de instrumentos para LabVIEW desde la propia web de LabVIEW (Consultado Noviembre 2009) <http://www.ni.com/devzone/idnet/>
- [9] Determinación de la gravedad terresetre (Consulta Noviembre 2009) http://www.ptb.de/en/org/1/11/115/_index.htm
- [10] ENAC: Actividades y objetivos (Consulta Mayo 2010) <http://www.enac.es/web/enac/objetivos>
- [11] Enrique Palacios, Fernando Remiro y Lucas J. López. Microcontrolador PIC16F84, Desarrollo de proyectos. Segunda edición. RA-MA, 2005. 623p.
- [12] Estimación de la incertidumbre de medida. Apuntes de formación en Técnicas de Control Metrológico TCM, Barcelona, Mayo 2009.
- [13] Estimation of Uncertainty Contribution on Transverse Sensitivity and Vibration Distribution on Primary Accelerometer Calibration (Consultado Febrero 2010) http://www.imeko2009.it.pt/Papers/FP_95.pdf
- [14] Foros oficiales de LabVIEW (Consultado Septiembre 2009 a Febrero 2010) <http://forums.ni.com/t5/LabVIEW/bd-p/170>
- [15] Fundamentos de los acelerómetros piezoeléctricos. Soporte técnico PCB Piezotronics (consultado Diciembre 2009) http://www.pcb.com/techsupport/tech_accel.php
- [16] Galgas extensiométricas (Consultado Noviembre 2009) http://fisica.udea.edu.co/~lab-gicm/2009_electronica/2009_Galgas_extensiometricas.pdf
- [17] Hojas técnicas de ENDEVCO (Consulta Octubre 2009 a Mayo 2010). <http://www.endevco.com/resources/TechPapers.aspx> - Hojas técnicas de Endevco
- [18] 292 Automated Accelerometer Calibration from 1 Hz to 50 kHz. 11p.
- [19] Hoja técnica de ENDEVCO 299: Minimizing Measurement Uncertainty in Calibration and Use of Accelerometers. 12p.

- [20] Hoja técnica de ENDEVCO 310: Mass Loading in Back-to-Back Reference Accelerometers. 8p.
- [21] Hoja técnica de ENDEVCO 312: Guide to Adhesively Mounting Accelerometers. 7p.
- [22] Hoja técnica de ENDEVCO 319: Guide to Accelerometer Installation. 4p.
- [23] Hoja técnica de ENDEVCO 328: Practical understanding of key accelerometer specifications.
- [24] ID Dallas / Maxim 1-Wire Devices (Consultado Junio 2010)
<http://www.maxim-ic.com/products/1-wire/>
- [25] Indicadores de LabVIEW modificados
<http://members.multimania.co.uk/sgctek/main.html>
- [26] ISO 16063-21:2003. Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer. 29p.
- [27] ISO/IEC 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. 28p.
- [28] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expresión of uncertainty in measurement. 120p.
- [29] JCGM 200:2008. Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). 88p.
- [30] LabSQL para LabVIEW (software gratuito y de libre distribución)
<http://jeffreyltravis.com/lost/labsql.html>
- [31] LabVIEW Graphical Programming Course (Consultado Septiembre 2009)
<http://cnx.org/content/col10241/1.4/>
- [32] Lemo connectors (Consultado Junio 2010) <http://www.lemo.com/>
- [33] Manual de operación e instalación de acelerómetros ICP PCB M353B13 www.pcb.com
- [34] Microchip: Hojas de datos y manuales de programación. (Consultado Marzo 2010)
www.microchip.com/
- [35] Paul A. Tipler, Gene Mosca. Tipler Mosca: Física para la ciencia y la tecnología. Volumen 1, 5ª Edición. Reverté, 2003. Páginas 397 a 420.
- [36] PCB, The Modal Shop - ISO 16063-22 - Shock Calibration via Reference (Consultado Octubre 2009)
<http://www.modalshop.com/calibration.asp?ID=198>
- [37] Principios de funcionamiento de transductores de posición, velocidad y aceleración (Consulta Diciembre 2009).
<http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/gdieck/ppts/MR-00-4001-Transductores-de-pos-mov-aceleracion.ppt>
- [38] Protocolo VISA (Consultado Noviembre 2009)
<http://cnx.org/content/m12288/latest/>
- [39] QUAM:2000.1. EURACHEM / CITAC Guide CG 4. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Second Edition. 120p.

- [40] Richard W. Bono, Eric J. Seller. The Effect of High Transverse Inputs on Accelerometer Calibration. The Modal Shop, Inc. PCB Group. 9p.
- [41] RS AMIDATA
<http://es.rs-online.com/web/>
- [42] Sensibilidad transversal (Consulta Noviembre 2009)
<http://www.sensorland.com/HowPage052.html>
- [43] Sensores, acondicionadores y procesadores de señal SILICA (Consulta Diciembre 2009)
www.bairesrobotics.com.ar/data/sensores_2003.pdf
- [44] The Fundamentals of Signal Analysis – Application note 243 – Agilent Technologies. 67p.
- [45] The Principles of Acceleration, Shock and Vibration Sensors (Consultado Diciembre 2009)
http://www.sensorsmag.com/sensors/acceleration-vibration/the-principles-acceleration-shock-and-vibration-sensors-574?page_id=4
- [46] Transducer Electronic Data Sheet TEDS (Consultado Junio 2010)
http://en.wikipedia.org/wiki/Transducer_electronic_data_sheet
- [47] Web oficial de LabVIEW
www.ni.com/labview/
- [48] Web principal de los laboratorios Spektra GmbH Dresden (Consultado Febrero 2010)
<http://www.spektra-dresden.com>
- [49] Wikipedia: Galga extensiométrica (Consultado Noviembre 2009)
http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Strain_gauge.svg
- [50] Wikipedia: Ley de la elasticidad de Hooke (Consultado Mayo 2010)
http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_elasticidad_de_Hooke
- [51] Wikipedia: National Instruments (Consultado Mayo 2010)
http://es.wikipedia.org/wiki/National_Instruments
- [52] Wikipedia: Protocolo RS232 (Consultado Marzo 2010)
<http://en.wikipedia.org/wiki/RS-232>
- [53] Wikipedia: Relé electromecánico (Consultado Mayo 2010)
<http://es.wikipedia.org/wiki/Rel%C3%A9>

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

A2LA:	The American Association for Laboratory Accreditation.
ADDR:	Address.
ADO:	ActiveX Data Objects.
ATN:	Attention.
DC:	Direct Current (Corriente Continua).
DCE:	Data Terminal Equipment.
DKD:	Deutsche Kalibrierdienst (Entidad nacional de acreditación alemana).
DTE:	Data Communications Equipment.
EAGLE:	Easily Applicable Graphical Layout Editor.
ENAC:	Entidad Nacional de Acreditación.
GUM:	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement.
GPIO:	General Purpose Interface Bus.
IDN:	Identification.
LSB:	Least Significant Bit.
MSB:	Most Significant Bit.
PCB:	Print Circuit Board.
PTB:	Physikalisch-Technische Bundesanstalt .
RMS:	Root Mean Square.
RS232:	Recommended Standard 232.
SQL:	Structured Query Language.
TEDS:	Transducer Electronics Data Sheet.
THD:	Total Harmonic Distortion.
UART:	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.
UKAS:	United Kingdom Accreditation Service
UUT:	Unit Under Test.
VIM:	Vocabulario Internacional de Metrología.
VFC:	Visual Factory Calibre.

