



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Bilbao

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

INGENIERITZA GOI ESKOLA TEKNIKO  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
BILBAO

# TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**ANÁLISIS Y MEJORAS DEL STRUCTURAL  
HEALTH MONITORING ULTRASONIC SYSTEM  
(SHMUS)**

<b>Alumno/a</b>	<i>Olivares Fulgencio, Mikel Ander</i>
<b>Fecha</b>	<i>Octubre, 2017</i>
<b>Director/a</b>	<i>Aranguren Aramendia, Gerardo</i>
<b>Departamento</b>	<i>Tecnología electrónica</i>
<b>Curso académico</b>	<i>2016/2017</i>

**Director/a**  
*Aranguren Aramendia, Gerardo*

**Curso Académico**  
2016/2017

## ÍNDICE

<b>RESUMEN TRILINGÜE .....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>9</b>
<b>1 RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>3 SISTEMA DE GENERACIÓN DE SHMUS.....</b>	<b>26</b>
<b>4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE SHMUS .....</b>	<b>37</b>
<b>5 DETECTOR DE IMPACTO.....</b>	<b>63</b>
<b>6 OPTIMIZACIÓN EN SISTEMA DE GENERACIÓN DE SHMUS.....</b>	<b>68</b>
<b>7 DESCRIPCIÓN DE TAREAS. DIAGRAMA DE GANTT .....</b>	<b>82</b>
<b>8 DESCARGO DE GASTOS .....</b>	<b>89</b>
<b>9 ANÁLISIS DE RIESGOS.....</b>	<b>91</b>
<b>10 CONCLUSIONES .....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO I: RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS .....</b>	<b>98</b>

## RESUMEN TRILINGÜE

Este proyecto consiste en caracterizar un sistema de monitorización de estructuras (SHM), Structural Health Monitoring Ultrasonic System (SHMUS), mediante el desarrollo de ensayos técnicos del sistema de generación y de adquisición del mismo.

Los ensayos se han realizado a diferentes frecuencias, distintos tipos de señales y en dos estructuras de diferentes materiales, aluminio y material compuesto.

Con los ensayos realizados se ha verificado el correcto funcionamiento de SHMUS y se ha podido caracterizar su rango de trabajo.

Se ha hecho una comparación con otro sistema SHM, Phased Array Monitoring for Enhanced Life Assessment (PAMELA III), para determinar el grado de mejora de SHMUS.

Una vez realizada la comparativa se ha estudiado las posibles mejoras de SHMUS en el sistema de generación.

Para finalizar se ha comprobado el circuito integrado en SHMUS de detección de impacto y se ha detallado como se deben de procesar los datos obtenidos del mismo.

**Palabras Clave:** sistema de monitorización de estructuras, caracterización SHMUS, mejoras respecto a PAMELA III

This project is based in characterizing a Structural Health Monitoring system (SHM), Structural Health Monitoring Ultrasonic System (SHMUS), by developing technical tests of it system of generation and acquisition.

The tests have been carried out at different frequencies, different types of signals and in two structures of different materials, aluminium and composite material.

With the tests performed, the correct operation of SHMUS has been verified and its working range has been characterized.

A comparison has been made with another SHM system, PAMELA III, to determinate the grade of improvement of SHMUS.

Once the comparison has been made, the possible improvements of SHMUS in the generation system have been studied.

Finally the integrated circuit in SHMUS of impact detection has been checked and detailed how to process the data obtained from it.

**Keywords:** Structural Health Monitoring system, characterization of SHMUS, improvements over PAMELA III

Proiektu hau estrukturen monitorizazio sistema (SHM ingelesez) baten karakterizazioan datza, Structural Health Monitoring Ultrasonic System (SHMUS), bere sortze eta eskuratze sistemaren proba teknikoen bitartez.

Probak frekuentzia ezberdinetan egin dira, seinale mota desberdinekin eta bi estrukturetan material desberdinekin, aluminioa eta material konposatua.

Egindako probekin SHMUS-en funtzionamendu egokia egiztatu da eta bere lan tarte karakterizatu ahal izan da.

Behin sortze eta eskuratze sistemak karakterizatuak izan dira SHMUS-en sortze sistemaren hobekuntza posibleak aztertu dira.  
Amaitzeko, inpaktu detekzioaren SHMUS-en zirkuitu integratua egiztatu da eta bertatik lortutako datuak nola prozesatu behar diren zehaztu da.

**Gako hitzak:** estrukturen monitorizazioa, SHMUS-en karakterizatu, PAMELA III-ri buruz hobekuntzak

## LISTA DE ABREVIATURAS

SHM .....	Structural Health Monitoring
GDE .....	Grupo de Diseño Electrónico
PAMELA.....	Phased Array Monitoring for Enhanced Life Assessment
FPGA .....	Field Programmable Gate Array
EHU/UPV .....	Euskal Herriko Unibertsitate/Universidad del País Vasco
SHMUS .....	Structural Health Monitoring Ultrasonic System
GA6C .....	Generation Acquisition 6 Channels
FIFO .....	First In, First Out
PC .....	Personal Computer
SDRAM .....	Synchronous Dynamic Random Access Memory
USB.....	Universal Serial Bus
SO .....	Sistema Operativo
FW.....	Firmware
HW .....	Hardware
SW .....	Software
SWe .....	Software embebido
DAC.....	Digital-to-Analog Converter
FFT.....	Fast Fourier Transform
I2A2.....	Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema SHM.....	14
Figura 2: Sistema de monitorización de estructuras PAMELA III .....	15
Figura 3: Representación de los niveles del equipo PAMELA III.....	16
Figura 4: Diagrama funcional del HW de PAMELA III .....	17
Figura 5: Sistema de monitorización de estructuras SHMUS .....	18
Figura 6: Esquema de tarjeta Rear-End de SHMUS .....	19
Figura 7: Diagrama de bloques de tarjeta GA6C de SHMUS .....	19
Figura 8: Esquema de un circuito de generación de señal arbitraria.....	27
Figura 9: Procedimiento de ensayo para medir las señales de generación.....	27
Figura 10: Ejemplo de adquisición de señal durante los ensayos.....	28
Figura 11. Ejemplo de adquisición de señal durante los ensayos.....	29
Figura 12: Capturas de osciloscopio de la señal generada a 150 kHz (amarillo) por PAMELA III sobre material compuesto con piezoeléctrico SMD07T02R412WL y FFT (blanco-rosa). Izda: señal sinusoidal. Dcha: sinusoidal con enventanado de Hanning.	30
Figura 13: Modelo eléctrico más aceptado de un piezoeléctrico.....	31
Figura 14: Amarillo: señal generada aplicando el máximo de tensión. Naranja: señal generada aplicando la máxima tensión para no deformar la señal. Blanco-rosa: FFT de la señal de máxima tensión (amarilla).....	32
Figura 15: Naranja: señal generada aplicando el máximo de tensión. Amarillo: señal generada aplicando la máxima tensión para no deformar la señal. Blanco-rosa: FFT de la señal de máxima tensión para que no se deforme la señal (amarilla).....	32
Figura 16: Representación gráfica de los datos de la Tabla 8.....	34
Figura 17: Representación gráfica de los datos de la Tabla 9.....	35
Figura 18: Comparación entre las señales generadas sobre aluminio y material compuesto.....	36
Figura 19: Procedimiento de ensayo para medir las señales recibidas.....	38
Figura 20: Ejemplo de generación y adquisición .....	39
Figura 21: Ejemplo de señal adquirida en Excel .....	40
Figura 22: Ejemplo de señal enventanada adquirida en Excel .....	40
Figura 23: Procedimiento de ensayo para medir las señales recibidas.....	42

Figura 24: Adquisición de señales, señal sin filtrar (verde) y señal filtrada (rosa).....	42
Figura 25: Filtro paso bajo de 8MHz .....	43
Figura 26: Esquemático canal de entrada.....	43
Figura 27: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con PAMELA III sobre aluminio con señal sinusoidal. ....	45
Figura 28: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con PAMELA III sobre aluminio con señal sinusoidal con enventanado de Hanning. ....	45
Figura 29: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con PAMELA III sobre material compuesto con señal sinusoidal.....	46
Figura 30: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con SHMUS sobre aluminio con señal sinusoidal. ....	48
Figura 31: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con SHMUS sobre aluminio con señal sinusoidal con enventanado de Hanning. ....	48
Figura 32: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con SHMUS sobre material compuesto con señal sinusoidal. ....	49
Figura 33: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con SHMUS sobre material compuesto con señal con enventanado de Hanning.....	50
Figura 34: Representación gráfica de los datos de la Tabla 14.....	52
Figura 35: Representación gráfica de los datos de la Tabla 15.....	52
Figura 36: Representación gráfica de los datos de la Tabla 16.....	53
Figura 37: Representación gráfica de los datos de la Tabla 17.....	55
Figura 38: Representación gráfica de los datos de la Tabla 18.....	56
Figura 39: Representación gráfica de los datos de la Tabla 19.....	56
Figura 40: Señales adquiridas a 225 kHz.....	57
Figura 41: Señal adquirida con el software de control de SHMUS a 225 kHz. ....	58
Figura 42: Señales adquiridas a 275 kHz.....	58
Figura 43: Señal adquirida a 275 kHz con software de SHMUS .....	59
Figura 44: Señales adquiridas a 325 kHz.....	59
Figura 45: Señal adquirida a 325 kHz con software de SHMUS .....	60
Figura 46: Señales adquiridas a 400 kHz.....	60
Figura 47: Señal adquirida a 400 kHz con software de SHMUS .....	61

Figura 48: Señales adquiridas a 475 kHz.....	61
Figura 49: Señal adquirida a 475 kHz con software de SHMUS .....	62
Figura 50: Esquemático del circuito de detección de impactos .....	64
Figura 51: Detección de impacto de forma analógica (verde) y de forma digital (azul). .....	65
Figura 52: Detección de la primera señal del impacto.....	66
Figura 53: Detección de la primera señal del impacto con zoom. ....	67
Figura 54: Esquema del circuito en MODO D .....	69
Figura 55: Esquema del circuito en MODO E .....	70
Figura 56: Esquema del circuito en MODO F.....	71
Figura 57: Ensayos mejoras señal generada de SHMUS .....	72
Figura 58: Test a 200 kHz en MODO A.....	73
Figura 59. Test a 300 kHz en MODO A.....	73
Figura 60. Test a 200 kHz en MODO B.....	74
Figura 61. Test a 300 kHz en MODO B.....	74
Figura 62. Test a 200 kHz en MODO D. ....	75
Figura 63. Test a 300 kHz en MODO D. ....	75
Figura 64. Test a 200 kHz en MODO E.....	76
Figura 65. Test a 300 kHz en MODO E.....	77
Figura 66. Test a 200 kHz en MODO E ampliado a tres canales. ....	78
Figura 67. Test a 300 kHz en MODO E ampliado a tres canales. ....	78
Figura 68. Test a 200 kHz en MODO F sin piezoeléctrico.....	80
Figura 69. Test a 300 kHz en MODO F sin piezoeléctrico.....	80
Figura 70: Diagrama Gantt.....	88
Figura 71: Matriz de riesgos.....	95



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Primera fase del proyecto .....	23
Tabla 2: Segunda fase del proyecto.....	23
Tabla 3: Tercer fase del proyecto .....	24
Tabla 4: Cuarta fase del proyecto .....	24
Tabla 5: Quinta fase del proyecto .....	25
Tabla 6: Sexta fase del proyecto.....	25
Tabla 7: Séptima fase del proyecto.....	25
Tabla 8: Voltaje pico a pico de ensayos de generación de señal sobre aluminio con piezoeléctrico SMD07T02R412WL en distintas condiciones.....	33
Tabla 9: Voltaje pico a pico de ensayos de generación de señal sobre material compuesto con piezoeléctrico SMD07T02R412WL en distintas condiciones.....	35
Tabla 10: Ensayos con PAMELA III sobre aluminio. Valores máximos de tensión pico a pico expresadas en milivoltios en los piezoeléctricos catches.....	44
Tabla 11: Ensayos con PAMELA III sobre material compuesto. Valores máximos de tensión pico a pico expresadas en milivoltios en los piezoeléctricos catches. ....	46
Tabla 12: Ensayos con SHMUS sobre aluminio. Valores máximos de tensión pico a pico expresadas en milivoltios en los piezoeléctricos catches. ....	47
Tabla 13: Ensayos con SHMUS sobre material compuesto. Valores máximos de tensión pico a pico expresadas en milivoltios en los piezoeléctricos catches. ....	49
Tabla 14: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre aluminio a una distancia de 30 cm.....	50
Tabla 15: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre aluminio a una distancia de 40 cm.....	51
Tabla 16: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre aluminio a una distancia de 50 cm.....	51
Tabla 17: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre material compuesto a una distancia de 30 cm.....	54
Tabla 18: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre material compuesto a una distancia de 40 cm.....	54
Tabla 19: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre material compuesto a una distancia de 50 cm.....	55
Tabla 20: Comparación Modos en generación.....	81

Tabla 21: Comparación Modos en adquisición.....	81
Tabla 22: Planificación.....	86
Tabla 23: Horas internas.....	89
Tabla 24: Gastos .....	90
Tabla 25: Descargo de gastos total.....	90

## 1 RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto consiste en caracterizar el funcionamiento de un sistema de monitorización de estructuras mediante ultrasonidos (Structural Health Monitoring Ultrasonic System).

Para la caracterización se han realizado numerosos ensayos sobre dos estructuras de diferentes materiales: aluminio y material compuesto. Estos dos materiales se utilizan para las estructuras de los aviones. Por lo tanto, los datos obtenidos son de gran interés para el sector aeronáutico.

La caracterización se ha centrado en cuatro aspectos.

Por una parte se ha tratado la generación de SHMUS, se ha establecido el procedimiento y ajuste de los ensayos a realizar, estos ensayos se han realizado en circuito abierto (sin carga) o bien con carga (piezoeléctrico) a distintas frecuencias y en diferentes materiales, determinando los niveles de amplitud de la señal aplicada a los transductores piezoeléctricos de la monitorización. Estos niveles han determinado si SHMUS es capaz de proporcionar niveles de tensión necesarios en generación para poder tener una adquisición de medidas aceptables.

En la adquisición al igual que el caso anterior se ha establecido el procedimiento y ajuste de los ensayos a realizarse y después se ha llevado a cabo dos estudios, por un lado determinar los niveles de tensión que son recogidos de distintos piezoeléctricos a distintas distancias, y por otro lado la adquisición del software de SHMUS comparándolo con un sistema de medida certificado como es un osciloscopio. Estos últimos ensayos se han realizado a una misma distancia pero a diferentes frecuencias.

Una vez realizado los ensayos y procesado los resultados obtenidos se procedió a comparar SHMUS con otro sistema SHM, el sistema elegido fue PAMELA III (Phased Array Monitoring for Enhanced Life Assessment), por lo que se repitieron los ensayos de generación y adquisición para PAMELA III. Esta comparación se realizó con el fin de determinar el grado de mejora que proporciona SHMUS frente a PAMELA III.

Otro punto a estudiar fue el sistema de detección de impacto que se introdujo en la versión 2 de SHMUS. Se realizaron ensayos para verificar el funcionamiento del circuito y se ha detallado la mejora SW que es necesaria para el correcto procesamiento de la información adquirida.

También se ha estudiado el método para mejorar la generación y proporcionar mayores niveles de tensión en estructuras de material compuesto. Para ello se han estudiado diferentes alternativas, como por ejemplo, combinar los distintos transformadores, ya sea en serie o en paralelo, o combinar distintos canales.

Los resultados obtenidos para la generación muestran niveles de tensión de en torno a los 45 Vpp. Estos niveles de tensión permanecen estables en ambas

estructuras. Si se aplican los métodos estudiados para mejorar la generación los niveles aumentan y se obtienen valores de en torno a 100 Vpp, los cuales son unos niveles muy buenos para el sector aeronáutico.

Las mejoras en los niveles de generación implican una mejora en los niveles de adquisición ya que están directamente relacionadas.

Para finalizar se puede concluir que SHMUS es un SHM mucho más potente que su predecesor PAMELA III. SHMUS en niveles de energía consume una décima parte que su predecesor y tiene un comportamiento más estable en cualquier estructura.

## 2 INTRODUCCIÓN

En este apartado se va a realizar una breve introducción al trabajo realizado en este proyecto, así como el alcance del mismo, los beneficios que aporta y la metodología que se ha utilizado.

### 2.1 Contexto

El proyecto se ha realizado en colaboración con el Grupo de Diseño Electrónico (GDE); formado por diversos investigadores y profesores de la Universidad del País Vasco (EHU/UPV), que realizan labores en el área de Tecnología Electrónica en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. El grupo se centra en el desarrollo de sistemas SHM mediante la técnica de transductores piezoeléctricos, utilizando una FPGA para la generación y recepción.

Hoy en día existen numerosas empresas preocupadas por la integridad de las estructuras de sus productos y para garantizar esta integridad someten a las estructuras a numerosas pruebas.

Ante esta necesidad el GDE de la UPV/EHU decidió desarrollar proyectos basados en sistemas electrónicos para SHM para permitir reducir el consumo de recursos empleados, para garantizar la integridad de las estructuras y aumentar la capacidad de procesamiento.

El SHM es una técnica de ensayo no destructivo para analizar estructuras en busca de fallos con el fin de prevenir fallos o roturas. Este aspecto es especialmente importante en algunos campos como la aeronáutica o la eólica, donde prevenir accidentes es especialmente importante por motivos económicos y de seguridad.



**Figura 1: Sistema SHM**

Como se observa en la Figura 1, un sistema SHM tiende a imitar el comportamiento del sistema nervioso humano. En esta analogía, los nervios se sustituyen por sensores y el cerebro por una unidad de procesamiento de la información que suministran dichos sensores. De esta manera, ambos sistemas son capaces de detectar, cuantificar y localizar los posibles daños ocasionados en el cuerpo/estructura e incluso son capaces de diferenciar entre diferentes tipos de desperfectos.

Entre los diferentes tipos de desperfectos destacan los siguientes:

- Roturas y grietas (localización y tamaño).
- Impactos (localización e intensidad).
- Corrosión (localización y severidad).
- Delaminación (localización y tamaño).
- Cargas/Tensiones excesivas (localización e intensidad).
- Desgastes (localización y severidad).

En aeronáutica la estructura es un aspecto fundamental ya que el mal estado de la misma puede comprometer gravemente la seguridad, por tanto debe de revisarse y estar controlada de forma periódica. Esta tarea de mantenimiento consiste en desmontar por completo la aeronave y comprobar por medio de análisis visual el perfecto estado de cada elemento. En caso de que se encuentre algún fallo se debe sustituir el elemento por uno nuevo. Esta tarea puede llevar meses, lo que implica un gran impacto económico para la compañía al tener aviones parados por causa del mantenimiento.

En el año 2009 se presentó PAMELA III, un proyecto del grupo de diseño electrónico en colaboración con Aernnova y financiado mediante el proyecto ICARO.

Aunque el proyecto PAMELA III se desarrolló de forma correcta si se desea implantar en el sector aeronáutico era necesario seguir mejorándolo.

Para poder implementarse en un avión debe de tener unas dimensiones y consumo reducidos, ya que estas especificaciones son críticas en un avión.

En 2016 se diseñó en el GDE de la EHU/UPV un prototipo de sistema de monitorización de estructuras nuevo llamado SHMUS, este prototipo de diseño para solventar carencia del sistema PAMELA III, las mejoras que incorpora SHMUS frente a su predecesor son varias:

Desde el punto de vista energético, el sistema SHMUS ha reducido el consumo de su predecesor en un 10% y debido a su diseño se ha logrado aumentar el número de canales, se ha pasado de 12 canales (PAMELA III) a 18 canales (SHMUS).

Desde el punto de vista de la generación y la adquisición SHMUS permite generar y obtener señales de mayores amplitudes.

Ambos sistemas de monitorización de estructuras utilizan ondas de Lamb.

### Sistema de monitorización de estructuras PAMELA III

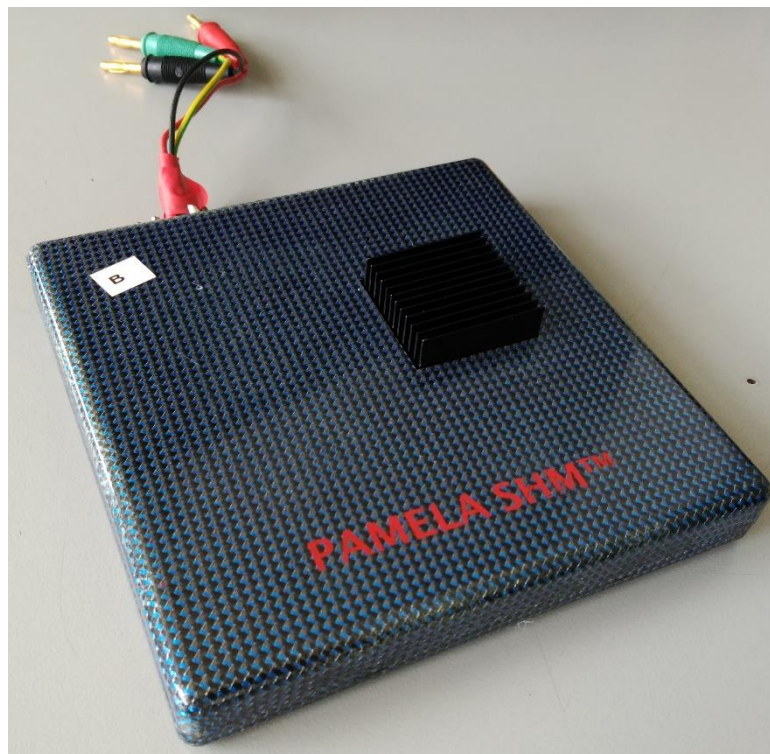
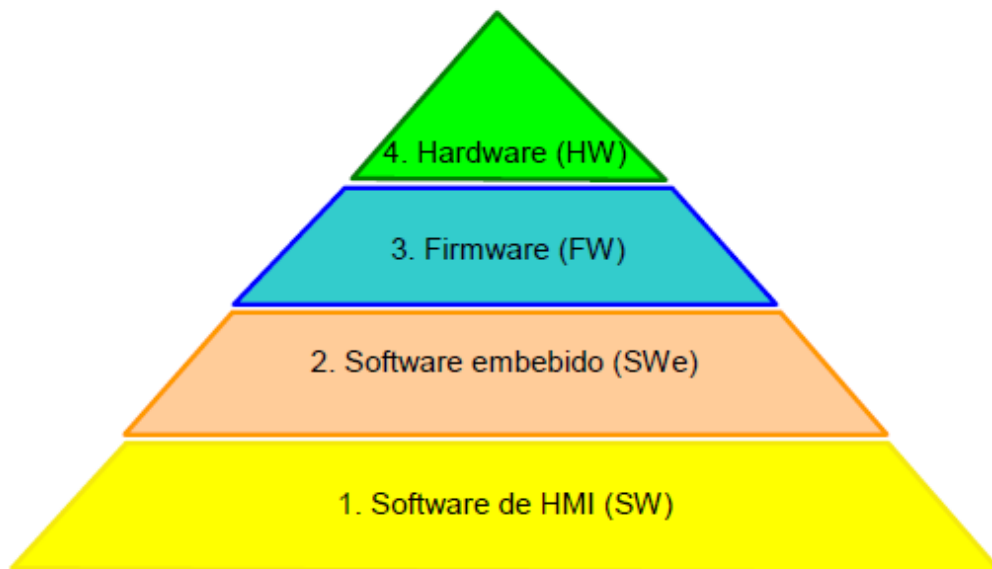


Figura 2: Sistema de monitorización de estructuras PAMELA III

En PAMELA III se puede considerar que hay 4 niveles, cada uno de ellos sustentado sobre el anterior y con distintas capacidades. En la Figura 3 se representan los distintos niveles o capas.



**Figura 3: Representación de los niveles del equipo PAMELA III**

El nivel 1, Software de HMI (Human Machine Interface), representa el software empleado por el usuario, a través de un PC, para el control de uno o varios equipo PAMELA III (SW). Este sistema de control incluye la selección de las señales de excitación de los piezoeléctricos, los modos de funcionamiento para realizar los ensayos y la posterior visualización de los resultados, además de otras funciones.

El nivel 2, Software embebido (SWe), hace referencia a los programas de alto nivel grabados en la memoria de PAMELA III que se ejecutan en el procesador embebido PowerPC.

El objeto de estos programas es: realizar la comunicación entre el ordenador de control y

PAMELA, controlar los niveles inferiores de PAMELA III, tratar las señales recibidas de los sensores y transmitir los datos de monitorización al PC.

En el nivel 3, Firmware (FW), se encuentran una serie de programas o drivers, ejecutados en el PowerPC, que se encargan de configurar los parámetros de control de los distintos circuitos para la realización de las operaciones básicas.

Por último, en la parte superior de la Figura 3 se ha representado la actuación de los circuitos electrónicos o hardware (HW) encargados de generar las señales de excitación de los piezoeléctricos y la adquisición de datos. Esta operación se realiza en función de la configuración existente en una serie de registros,



registros que son configurados por el FW en base a las órdenes recibidas del SWe y a su vez del SW.

En la Figura 4 se muestra el diagrama funcional de PAMELA III.

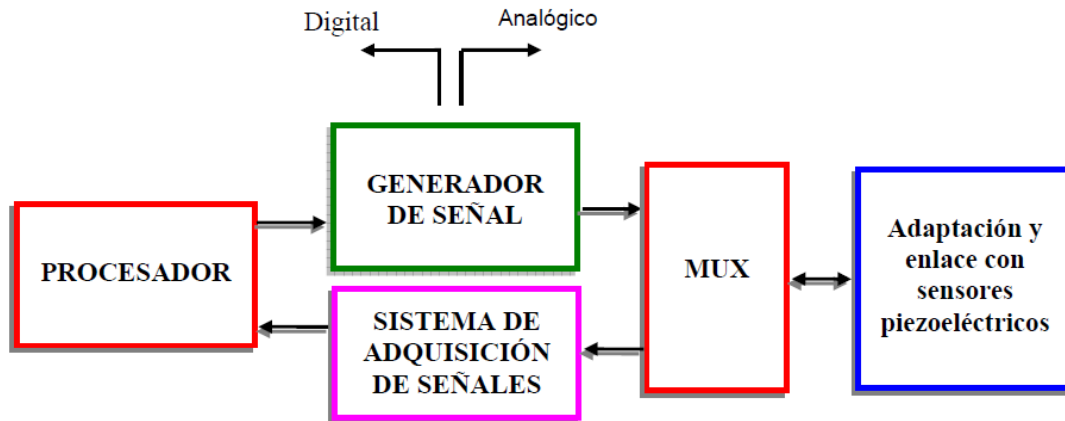


Figura 4: Diagrama funcional del HW de PAMELA III

Características generales:

- 165 x 173 x 30 mm
- 12 canales
- Consumo en reposo: 10-12 vatios.
- Peso con caja de material compuesto: 386 gramos.
- Comunicación Ethernet
- Capacidad de memoria DRAM externa 512 Mbytes DDR2 SDRAM
- Capacidad de memoria no volátil externa 128 Mbytes (~15 % ocupado por el sistema operativo)
- Procesado de señal Microprocesador embebido

Capacidad de generación de señal:

- 12 canales individuales o simultáneos
- Tensión máxima transmitida ~40 voltios de señal por canal
- Frecuencia programable entre 25 kHz y 1 MHz
- Forma de señal programable: sinusoidal o enventanada de Hanning y Hamming
- Modos de funcionamiento: Beamforming, Round Robin, simple canal, time reversal, etc
- Retraso entre señales de  $\geq 10$  ns (incremento de 10 ns)

### Capacidad de adquisición de señal:

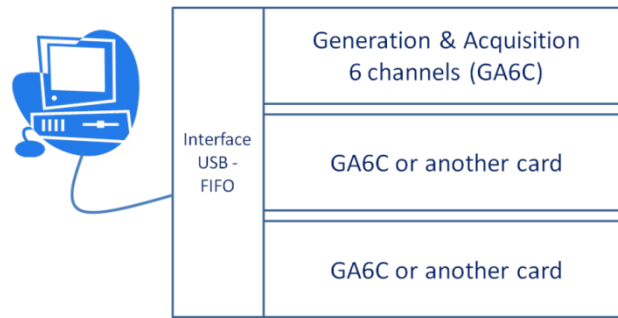
- 12 canales simultáneos
- Frecuencia de muestreo por canal: 12 Msps

### Sistema de monitorización de estructuras SHMUS

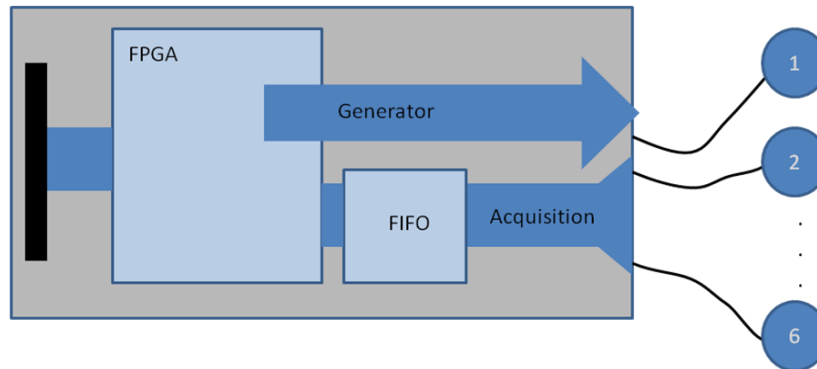


**Figura 5: Sistema de monitorización de estructuras SHMUS**

SHMUS es un sistema constituido que se compone por una tarjeta base, denominada Rear-End, la cual incluye el USB-FIFO que permite la conexión del sistema con un PC y tres ranuras que permiten conectar 3 tarjetas de generación y adquisición denominadas GA6C, estas como su propio nombre indica son las encargadas de la generación y adquisición de los datos y cada una de estas tarjetas dispone de 6 canales que sirve tanto para generar o adquirir señales, su funcionamiento vendrá dado por la configuración que se realice en su SW. A continuación se muestra un esquema general de cada tarjeta que compone SHMUS.



**Figura 6: Esquema de tarjeta Rear-End de SHMUS**



**Figura 7: Diagrama de bloques de tarjeta GA6C de SHMUS**

#### Características generales:

- 120 x 45 x 95 mm
- Tres presentaciones con 6, 12 y 18 canales (algunas especificaciones van referidas a estos tres modelos).
- Consumo en reposo: 1.5, 2.3 y 3.2 vatios.
- Peso con caja de aluminio: 400, 500 y 600 gramos.
- Comunicación USB 2.0 (400 megabits/s)

#### Capacidad de generación de señal:

- 6, 12 o 18 canales individuales o simultáneos
- Más de 40 voltios de señal por canal
- Modo HV hasta 80 voltios, modo XHV hasta 118 voltios
- Frecuencia programable entre 10 kHz y 5 MHz
- Forma de señal programable: sinusoidal o enventanada de Hanning, Hamming y Blackman
- Modos de funcionamiento: Simple canal y time reversal (en dos pasos)
- Generación simultánea con retraso programable de hasta 68 microsegundos en múltiplos de 16.6 ns. (Empleado principalmente para operación en modo Beamforming).

Capacidad de adquisición de señal:

- 6, 12 o 18 canales simultáneos
- 128 k muestras de 12 bits por canal
- Programable: 60, 50, 40, 30, 25 y 20 ksps

## 2.2 Alcance - objetivos

El alcance de este proyecto se centra en la caracterización de cuatro aspectos de SHMUS.

El **bloque de generación**, en el que se detalla el método utilizado para la realización de los distintos ensayos de generación. Los ensayos se han realizado con SHMUS y PAMELA III sobre diferentes estructuras de distintos materiales, a distintas frecuencias y con distintos eventanados.

El **bloque de adquisición**, como en el caso anterior se detalla el método utilizado para la realización de los distintos ensayos. Los ensayos se han realizado con SHMUS y PAMELA III sobre diferentes estructuras de distintos materiales, a distintas frecuencias, distintas distancias y con distintos eventanados.

En este bloque también se han realizado ensayos para comparar la adquisición del SW de SHMUS y la adquisición de un osciloscopio. Estos ensayos se han realizado a una determinada distancia pero a distintas frecuencias.

El **bloque de detección de impacto**, en este bloque se explica el funcionamiento del circuito de detección de impacto y el método que es necesario implementar en la FPGA (no se detallará el código) de SHMUS para el correcto procesamiento de los resultados adquiridos.

El **bloque de mejoras en generación**, en este bloque se detalla las distintas soluciones posibles para mejorar la generación de SHMUS, así como su forma de implementarse.

Y para finalizar se entregarán los resultados obtenidos de los distintos ensayos en los diferentes anexos del proyecto para que sean consultados en caso de necesidad.

## **2.3 Beneficios del proyecto**

La realización del proyecto aporta beneficios en distintos ámbitos como el técnico y económico.

### **Beneficio técnico:**

La realización del proyecto permite desarrollar una base para futuras investigaciones de nuevas técnicas de sistemas basados en SHM así como la mejora de las prestaciones de los diseños ya existentes.

SHMUS es uno de los sistemas pioneros de análisis de estructuras de pequeñas dimensiones con el objetivo de ser implementado en el sector aeronáutico de forma permanente.

### **Beneficio económico:**

En el plano económico la línea que sigue el proyecto podrá suponer un importante ahorro de dinero y tiempo a las empresas a la hora de utilizar sus recursos para el mantenimiento de las aeronaves ya que SHMUS permite un análisis estructural de manera automatizada, sin necesidad de desmontar ninguna estructura como se ha citado anteriormente.

Este diseño permite tener una mayor precisión a la hora de detectar posibles defectos o fallos estructurales lo cual permitiría tomar decisiones preventivas o anticipadas sin correr ningún riesgo y evitar que se rompan en un futuro lo cual supondría un desembolso económico importante.

SHMUS aporta un grado más de seguridad a la hora de asegurarse de que las estructuras estén en perfectas condiciones, ya que aunque una estructura haya pasado una inspección visual para comprobar su correcto estado no garantiza que esa estructura no sea dañada una vez este instalada de nuevo en la aeronave, ya sea porque un operario haya apretado de más una tuerca y la haya fracturado o por otros motivos esto podría suponer un fallo grave de seguridad.

En caso que hubiera sucedido lo anteriormente nombrado SHMUS podría detectar ese nuevo fallo y emitir una señal de que habría una estructura dañada y se pudiera reemplazar antes de lamentar problema alguno.

## 2.4 Metodología

En este apartado se va a describir la planificación que se ha seguido para la ejecución del proyecto definiendo las principales fases y tareas del mismo.

Para la realización de este proyecto se cuenta con la ayuda de un ingeniero senior, en este caso un catedrático en tecnología electrónica con una muy amplia experiencia en el campo del diseño electrónico y especialmente en el campo de SHM, habiendo participado en numerosos proyectos relacionados con ello.

Se encarga de realizar la propuesta del proyecto, definir el proyecto, establecer un plan de trabajo y hacer un seguimiento y gestión del proyecto.

La primera fase del proyecto es el análisis de proyectos SHM anteriormente realizados, para ello se realizarán dos tareas: Revisar proyectos ya realizados y recopilar y analizar la información de estos proyectos.

En la siguiente tabla se representa la primera fase:

**Tabla 1: Primera fase del proyecto**

PT1: Análisis de proyectos SHM
Tarea 1.1: Revisión de proyectos realizados
Tarea 1.2: Recopilación y análisis de la información obtenida

La segunda fase del proyecto es la definición de los ensayos que se van a realizar.

En la siguiente tabla se representa la segunda fase:

**Tabla 2: Segunda fase del proyecto**

PT2: Definición de ensayos
Tarea 2.1: Metodología de ensayo
Tarea 2.2: Método de adquisición de los resultados
Tarea 2.3: Medio de comparación de los resultados obtenidos

La tercera fase del proyecto son los ensayos de las señales de generación de los dos sistemas de monitorización de estructura para su posterior comparación.

En la siguiente tabla se representa la tercera fase:

**Tabla 3: Tercer fase del proyecto**

PT3: Análisis de generación
Tarea 3.1: Recopilación de datos de ensayos de generación de PAMELA
Tarea 3.2: Recopilación de datos de ensayos de generación de SHMUS
Tarea 3.3: Procesamiento de los datos obtenidos
Tarea 3.4: Comparación de ambos sistemas con los datos obtenidos

La cuarta fase del proyecto son los ensayos de las señales adquiridas de los dos sistemas de monitorización de estructura para su posterior comparación.

En la siguiente tabla se representa la cuarta fase:

**Tabla 4: Cuarta fase del proyecto**

PT4: Análisis de adquisición
Tarea 4.1: Recopilación de datos de ensayos de adquisición de PAMELA
Tarea 4.2: Recopilación de datos de ensayos de adquisición de SHMUS
Tarea 4.3: Procesamiento de los datos obtenidos
Tarea 4.4: Comparación de ambos sistemas con los datos obtenidos

La quinta fase del proyecto es la comparación de los datos obtenidos en adquisición con un osciloscopio y los datos obtenidos en el propio SW de adquisición de SHMUS.



En la siguiente tabla se representa la quinta fase:

**Tabla 5: Quinta fase del proyecto**

PT5: Comparación de adquisiciones de SHMUS
Tarea 5.1: Recopilación de datos de ensayos de adquisición de SHMUS
Tarea 5.2: Recopilación de datos de ensayos de adquisición SW de SHMUS
Tarea 5.3: Procesamiento de los datos obtenidos
Tarea 5.4: Comparación de los resultados obtenido de ambas adquisiciones

La sexta fase del proyecto es la optimización el diseño actual mediante mejoras que sirvan para futuras versiones de SHMUS.

En la siguiente tabla se representa la sexta fase:

**Tabla 6: Sexta fase del proyecto**

PT6: Optimización de SHMUS
Tarea 6.1: Definir mejoras
Tarea 6.2: Realización de ensayos de posibles mejoras
Tarea 6.3: Procesar y analizar los resultados obtenidos para validar las mejoras

La séptima fase es la elaboración de la documentación del proyecto.

En la siguiente tabla se representa la séptima fase:

**Tabla 7: Séptima fase del proyecto**

PT7: Documentación
Tarea 7.1: Elaboración de la documentación

### **3 SISTEMA DE GENERACIÓN DE SHMUS**

#### **3.1 Objetivos**

Diseñar un procedimiento de ensayos que permitan caracterizar y estudiar el funcionamiento del sistema de generación de SHMUS.

Una vez establecido el procedimiento de ensayos es necesario ajustar los mismos para poder dar validez a los resultados obtenidos.

Se ha estudiado el rango de trabajo de SHMUS mediante su SW con distintos tipos de enventanados, con distintas frecuencias y en estructuras de distintos materiales.

Para finalizar se ha realizado una comparación con su predecesor PAMELA III (sistema SHM patentado y único equipo específico embarcable) con la finalidad de determinar el grado de mejora en generación de SHMUS.

#### **3.2 Ensayos de generación de señal**

Se analiza la generación de señal. Este estudio compara distintas circunstancias:

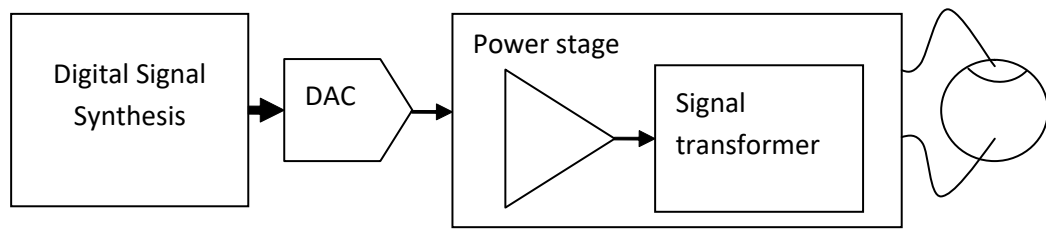
- La generación de señal realizada por PAMELA III y SHMUS
- La utilización de varias frecuencias
- La generación de señal con forma sinusoidal y sinusoidal enventanada
- La utilización de estructuras de aluminio y material compuesto
- El empleo de dos tipos de transductores piezoeléctricos

Hay numerosos fabricantes que ofrecen instrumentación para generación de señales arbitrarias. La mayor parte de los experimentos realizados en SHM utilizan este tipo de generadores. Con estos equipos se puede generar cualquier forma de señal, de las frecuencias habituales, pero las tensiones máximas generadas suelen ser de 20 Vpp en circuito abierto.

Esta limitación en tensión disminuye en gran medida la capacidad de los ensayos de SHM. Por otra parte el costo, peso y volumen de esta instrumentación los hace inviables para un sistema de monitorización real.

De manera sencilla, como se ha demostrado con PAMELA III y SHMUS, también se pueden diseñar circuitos de bajo costo y pequeño tamaño. El empleo de estos circuitos es fundamental para generalizar la monitorización de estructuras.

Básicamente el circuito de generación de señal para SHM por ultrasonidos está formado por los componentes presentados en la Figura 8.

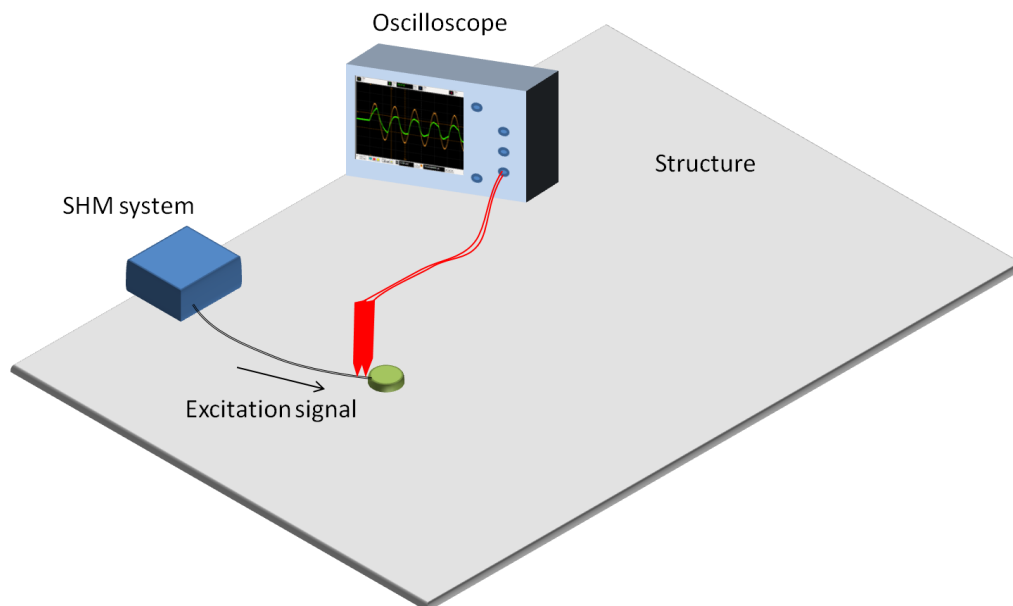


**Figura 8: Esquema de un circuito de generación de señal arbitraria.**

Un circuito Digital Signal Synthesis produce la señal arbitraria deseada como un flujo de datos digitales y a continuación se convierte en señal analógica mediante un DAC. Esta señal analógica tiene muy poca tensión por lo que es necesario ampliar su valor mediante una etapa de potencia.

Para realizar la etapa de potencia, lo más sencillo es utilizar un amplificador operacional y un transformador de señal. Los sistemas para SHM PAMELA III y SHMUS utilizan distintos amplificadores operacionales y algunas variantes en el circuito de potencia.

El procedimiento de ensayo se refleja en la Figura 9

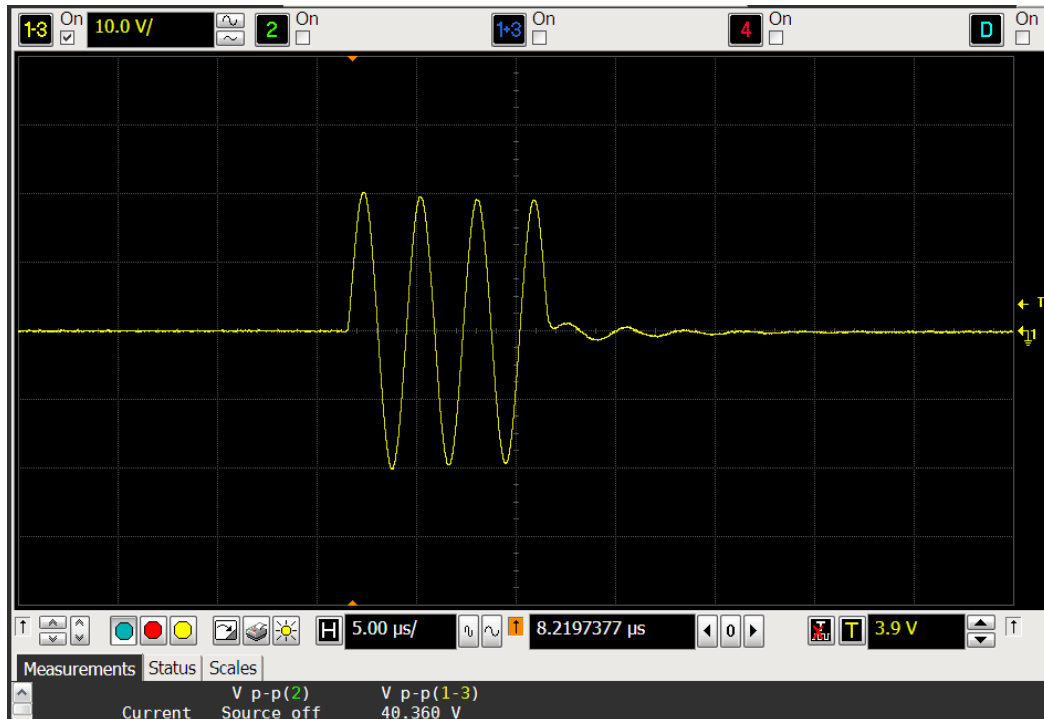


**Figura 9: Procedimiento de ensayo para medir las señales de generación.**

En cada ensayo se ha guardado la imagen recogida por el osciloscopio y la forma de la señal en formato csv, para ser tratada mediante Excel. La mayor parte de

ensayos se ha repetido numerosas veces con resultado tan parecidos en todas las circunstancias que no son reseñables las diferencias.

Por ejemplo, en la Figura 10 se muestra la adquisición de una señal sinusoidal de 300 kHz y 3,5 ciclos generada por SHMUS. En la parte inferior de la figura, el propio osciloscopio mide el valor máximo pico a pico de la señal.



**Figura 10: Ejemplo de adquisición de señal durante los ensayos.**

Si adquirimos la señal mediante un fichero csv y lo plasmamos en Excel obtenemos la Figura 11, semejante a la anterior. En Excel además se realizarán las comparaciones entre señales y ocasionalmente se tratarán las señales para realizar alineamientos en el tiempo u otras modificaciones.

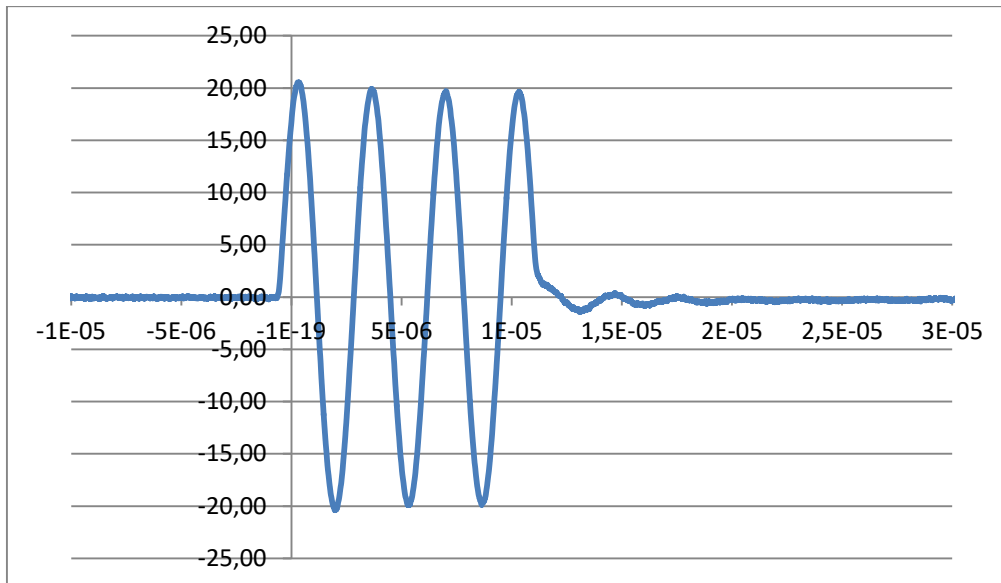


Figura 11. Ejemplo de adquisición de señal durante los ensayos.

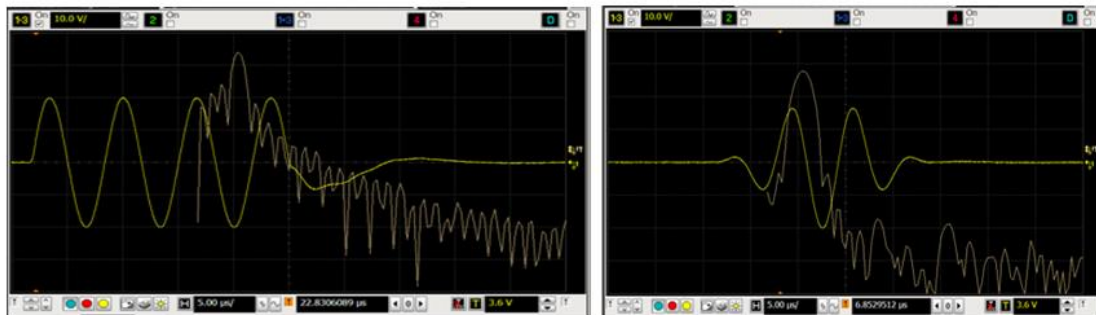
Durante los ensayos se ha utilizado el transductor piezoeléctrico SMD07T02R412WL de STEMiNC.

Sus características son las siguientes:

- Radial mode vibration
- Piezo Material: SM412
- Dimensions: 7mm dia. x 0.2mm thickness
- Resonant frequency  $f_r$ : 300 KHz $\pm$ 10 KHz
- Electromechanical coupling coefficient  $K_p$ :  $\geq 55\%$
- Resonant impedance  $Z_m$ :  $\leq 10.0 \Omega$
- Static capacitance  $C_s$ : 3000pF $\pm$ 15% @1kHz
- Test Condition: 23 $\pm$ 3 °C 40~70% R.H.
- $f_r$ ,  $Z_m$ ,  $K_p$  => Radial mode vibration
- $C_s$  => LCR meter at 1KHz 1Vrms

### 3.2.1 Forma de la señal

En PAMELA III y en SHMUS se pueden generar distintas formas de onda: sinusoidal o sinusoidal enventanada (varios modos), arbitraria, etc. A continuación se va a mostrar que los mejores resultados se obtienen con las señales sinusoidales con enventanado de Hanning.



**Figura 12: Capturas de osciloscopio de la señal generada a 150 kHz (amarillo) por PAMELA III sobre material compuesto con piezoeléctrico SMD07T02R412WL y FFT (blanco-rosa). Izda: señal sinusoidal. Dcha: sinusoidal con enventanado de Hanning.**

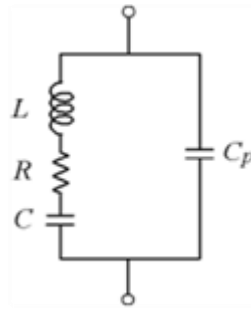
En la Figura 12 izquierda se puede ver que la señal alcanza un valor de 40 voltios pico a pico, mientras que en la imagen de la derecha solo alcanza 36 voltios pico a pico. Pero si nos fijamos en las FFT de las dos señales se puede ver que la señal de la derecha aporta la energía más concentrada en una frecuencia.

Aunque se han realizado todos los ensayos para ambos tipos de señal, en algunas partes del documento se va a considerar principalmente el empleo de señal sinusoidal con enventanado de Hanning.

### **3.2.2 Tensión máxima programada durante los ensayos**

En todos los ensayos se ha programado la máxima tensión de generación para PAMELA III y SHMUS. Pero en PAMELA III al aumentar la frecuencia llega un valor en que la señal generada para este piezoeléctrico pierde su forma sinusoidal. Para esos casos se ha limitado la tensión máxima de PAMELA III a la tensión límite para generar una señal sinusoidal.

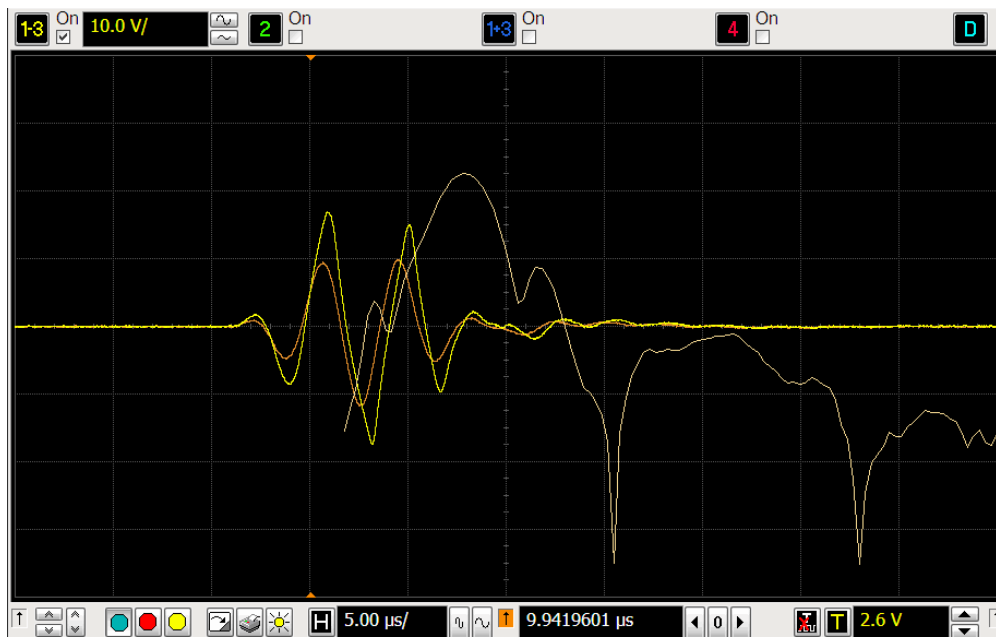
La pérdida de la forma sinusoidal en las señales generadas por PAMELA III se debe a la relación entre la impedancia del piezoeléctrico y la máxima intensidad que puede proporcionar un canal de salida. Si modelamos un piezoeléctrico como un componente pasivo con carga principalmente capacitiva,  $R+1/j\omega C$ , al aumentar la frecuencia disminuye el valor de la impedancia, por tanto aumenta la intensidad y llegado al límite máximo disminuye la tensión.



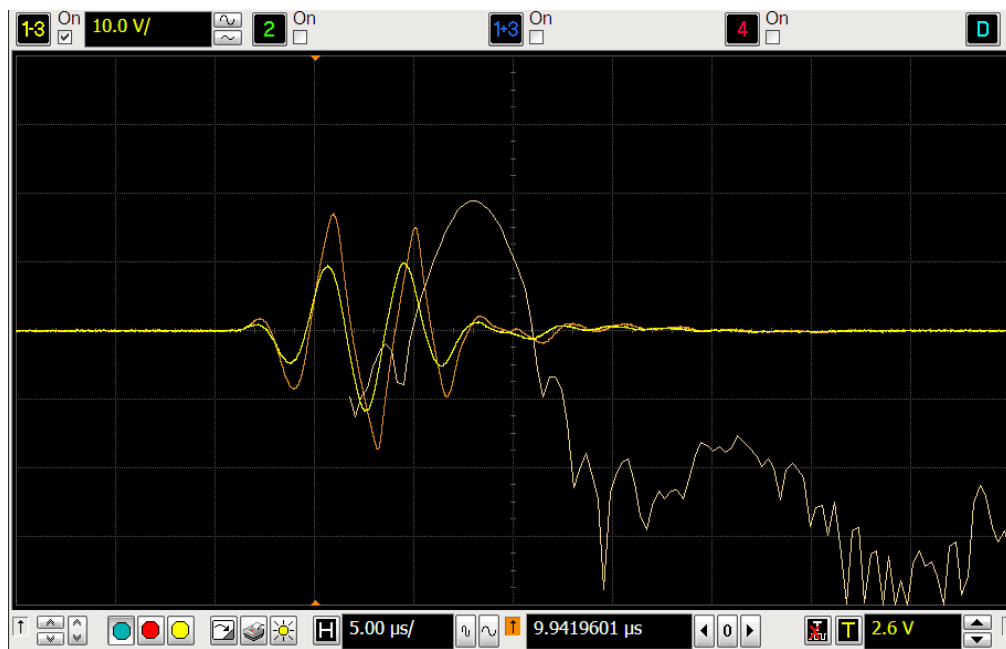
**Figura 13: Modelo eléctrico más aceptado de un piezoeléctrico.**

Este fenómeno descrito en este apartado con detalle, ya se descubrió utilizando PAMELA III con otros piezoeléctricos y frecuencias. También hemos podido ver que con determinados piezoeléctricos no se produce este efecto, posiblemente sea debido a que: su impedancia no disminuye tanto con la frecuencia, tiene menos componente capacitiva, el efecto inductivo es mayor, la componente real resistiva es la predominante, o bien otras razones.

La Figura 14 y la Figura 15 muestran las mismas dos señales. Son señales sinusoidales con enventanado de Hanning generadas con PAMELA III a 250 kHz sobre un piezoeléctrico pegado a una estructura de material compuesto. En ambos casos, mirando con detalle la señal de mayor amplitud, se ve que no conserva una forma sinusoidal y parece más una señal triangular. En cambio la señal de menor amplitud corresponde a una senoide. Comparando las FFT de ambas señales se confirma claramente este problema. En la Figura 14 no queda claramente identificada una señal en una frecuencia dominante, lo que confirma la pérdida de forma de la señal de mayor amplitud. Mientras que en la Figura 15 queda claramente identificada una frecuencia principal y, por tanto, la señal corresponde a una senoide con enventanado de Hanning.



**Figura 14:** Amarillo: señal generada aplicando el máximo de tensión. Naranja: señal generada aplicando la máxima tensión para no deformar la señal. Blanco-rosa: FFT de la señal de máxima tensión (amarilla).



**Figura 15:** Naranja: señal generada aplicando el máximo de tensión. Amarillo: señal generada aplicando la máxima tensión para no deformar la señal. Blanco-rosa: FFT de la señal de máxima tensión para que no se deforme la señal (amarilla).



### 3.3 Resultados

En este apartado se han comparado los resultados obtenidos para los sistemas PAMELA III y SHMUS en diferentes estructuras.

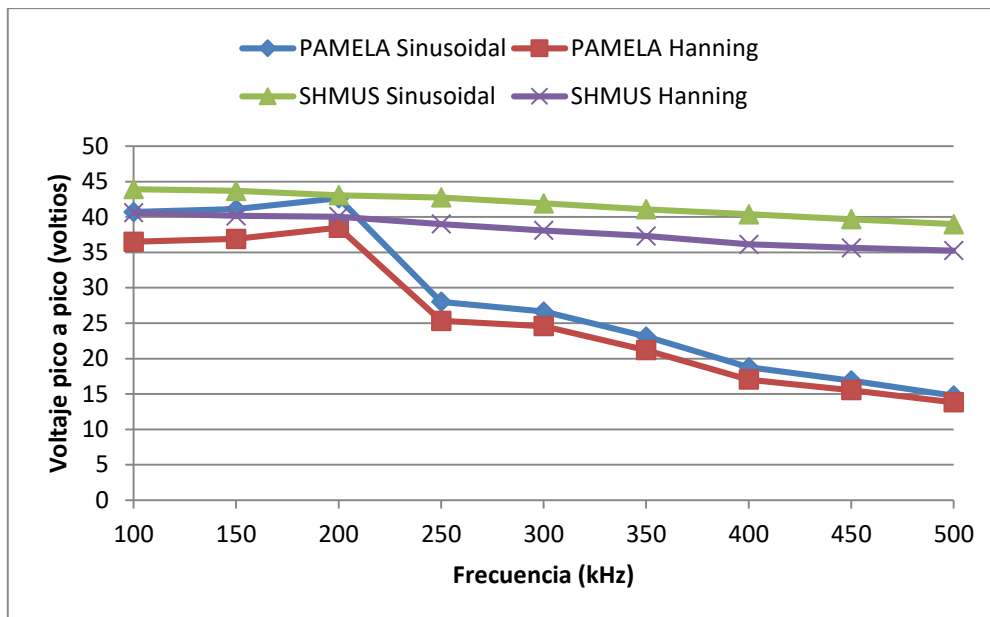
#### 3.3.1 PAMELA III vs SHMUS en aluminio

A continuación se van a comparar los resultados de los ensayos realizados con los sistemas PAMELA III y SHMUS utilizando el piezoeléctrico SMD07T02R412WL pegado sobre una estructura de aluminio. El piezoeléctrico se ha pegado con cianocrilato a más de 20 centímetros de los bordes de la placa de aluminio. La medida se ha realizado a diferentes frecuencias y en la Tabla 8 se ha reflejado el valor máximo de tensión pico a pico.

**Tabla 8: Voltaje pico a pico de ensayos de generación de señal sobre aluminio con piezoeléctrico SMD07T02R412WL en distintas condiciones**

kHz	PAMELA		SHMUS	
	Sinusoidal (V)	Hanning (V)	Sinusoidal (V)	Hanning (V)
100	40,71	36,50	43,95	40,60
150	41,12	36,90	43,68	40,16
200	42,64	38,50	43,07	40,04
250	28,02	25,32	42,76	39,00
300	26,65	24,58	41,93	38,10
350	23,11	21,19	41,10	37,31
400	18,77	17,03	40,38	36,14
450	16,90	15,54	39,68	35,63
500	14,76	13,82	38,98	35,26

La Figura 16 muestra los mismos datos de manera gráfica. Como se puede ver en la Figura 16 o en los datos de la Tabla 8 el sistema PAMELA III sufre una pérdida de la tensión máxima a medida que aumenta la frecuencia, posiblemente por la disminución de impedancia del piezoeléctrico.



**Figura 16: Representación gráfica de los datos de la Tabla 8**

Como se puede ver en la Figura 16, con PAMELA III se sufre una pérdida significativa de la amplitud máxima de la señal a medida que aumenta la frecuencia, tanto para una señal sinusoidal como para una sinusoidal enventanada.

Por el contrario, en SHMUS la disminución de la amplitud de la tensión máxima con la frecuencia es mucho menor. En consecuencia con SHMUS se podrá generar una mayor tensión en los piezoeléctricos en cualquier circunstancia. Este hecho es debido al amplificador utilizado en SHMUS que permite aproximadamente 10 veces más corriente que el empleado en PAMELA III, además de otros detalles del circuito electrónico.

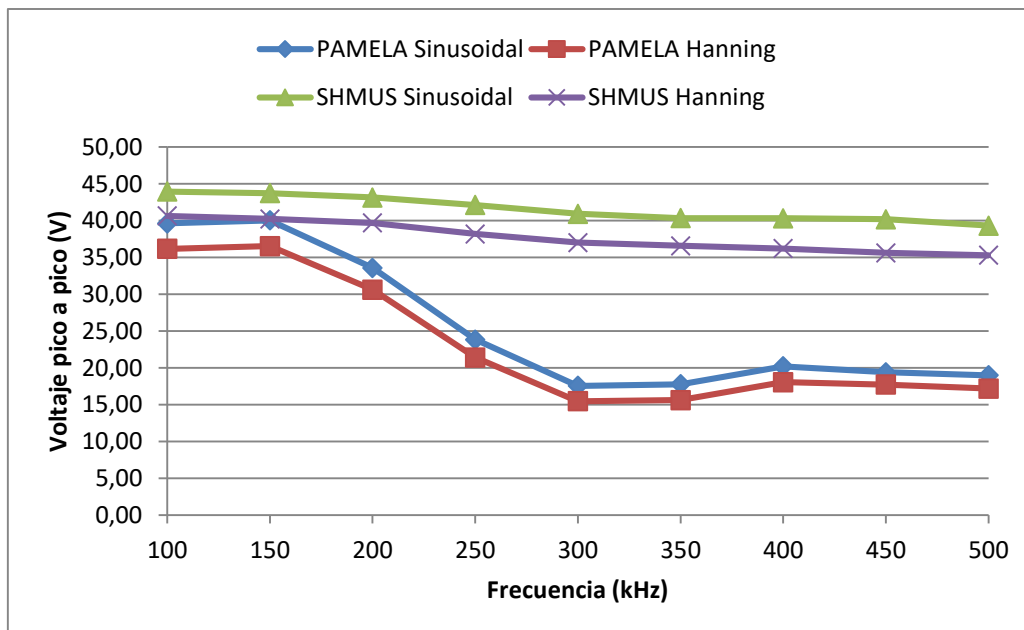
### 3.3.2 PAMELA III vs SHMUS en material compuesto

El mismo experimento realizado sobre material compuesto nos aporta los datos mostrados a continuación.

En la Tabla 9 se presentan los valores máximos de tensión pico a pico obtenidos con PAMELA III y SHMUS al aplicar su tensión de salida sobre un piezoeléctrico pegado con cianocrilato a una pieza de material compuesto. La Figura 17 muestra la gráfica de dichos datos.

**Tabla 9: Voltaje pico a pico de ensayos de generación de señal sobre material compuesto con piezoeléctrico SMD07T02R412WL en distintas condiciones**

kHz	PAMELA		SHMUS	
	Sinusoidal (V)	Hanning (V)	Sinusoidal (V)	Hanning (V)
100	39,63	36,18	43,97	40,66
150	40,05	36,54	43,74	40,24
200	33,59	30,62	43,15	39,70
250	23,85	21,41	42,13	38,19
300	17,56	15,46	40,94	37,02
350	17,78	15,63	40,36	36,59
400	20,22	18,05	40,32	36,22
450	19,41	17,74	40,19	35,62
500	19,00	17,18	39,33	35,30

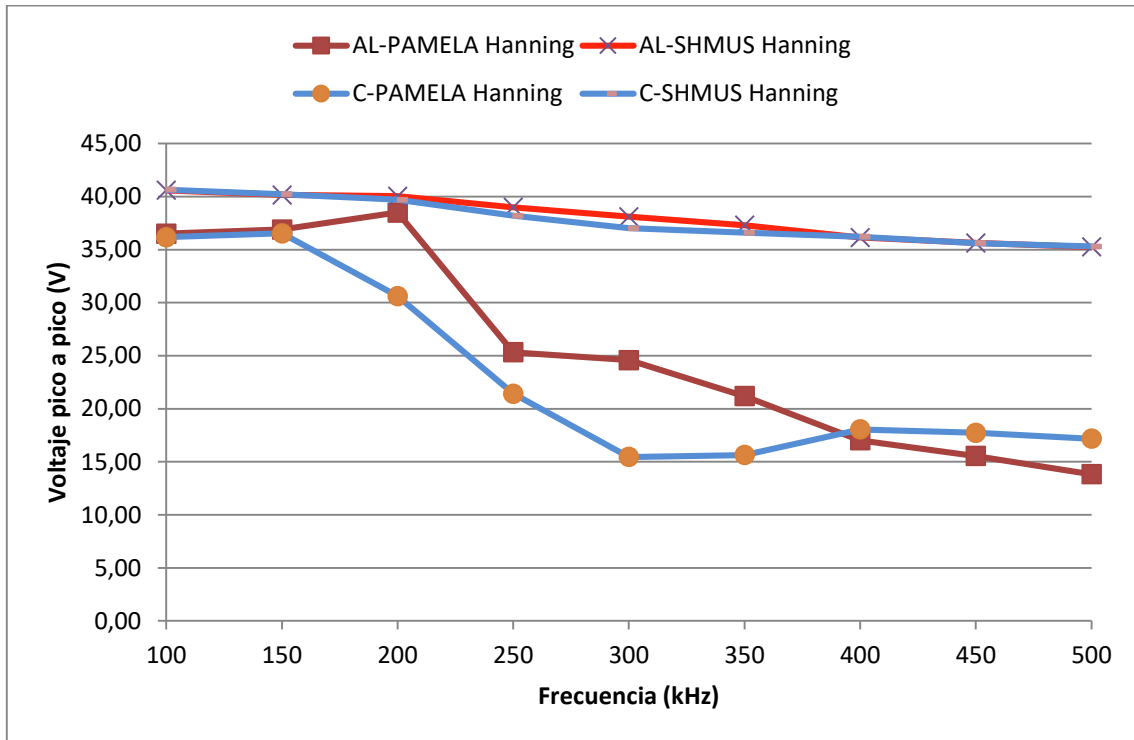


**Figura 17: Representación gráfica de los datos de la Tabla 9**

De nuevo se pueden hacer consideraciones muy similares a las realizadas para el piezoeléctrico dispuesto sobre una estructura de aluminio.

Con PAMELA III se sufre una disminución importante de la amplitud de la tensión máxima al aumentar la frecuencia, mientras que con SHMUS la disminución de amplitud es menos importante.

Por último se ha realizado una comparación entre los distintos tipos de materiales empleados, comparando los resultados de la Figura 16 y Figura 17 se obtiene el gráfico presentado en la Figura 18.



**Figura 18: Comparación entre las señales generadas sobre aluminio y material compuesto.**

Se puede ver que para el sistema SHMUS no hay grandes diferencias entre realizar la generación de señal en aluminio o en material compuesto mientras que para el sistema PAMELA III los resultados obtenidos para material compuesto son significativamente inferiores además de tener que generar la señal con menor amplitud para evitar que esta se deforme como se ha mencionado en el apartado anterior de ensayos.

## **4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE SHMUS**

### **4.1 Objetivos**

Al igual que en el caso anterior, el objetivo es diseñar un procedimiento de ensayos y ajuste de los mismos para que permitan caracterizar y estudiar el funcionamiento del sistema de adquisición de SHMUS.

Comparar la adquisición del SW de SHMUS frente a un osciloscopio para determinar la precisión de la adquisición de SHMUS, para ello se ha diseñado un filtro de 8 MHz con el fin de eliminar señales que distorsionen las señales de adquisición de SHMUS.

Estudiar el rango de trabajo de SHMUS mediante el uso de señales a diferentes frecuencias, enventanados, distancias y estructuras.

Realizar una comparación con su predecesor PAMELA III con la finalidad de determinar el grado de mejora en adquisición.

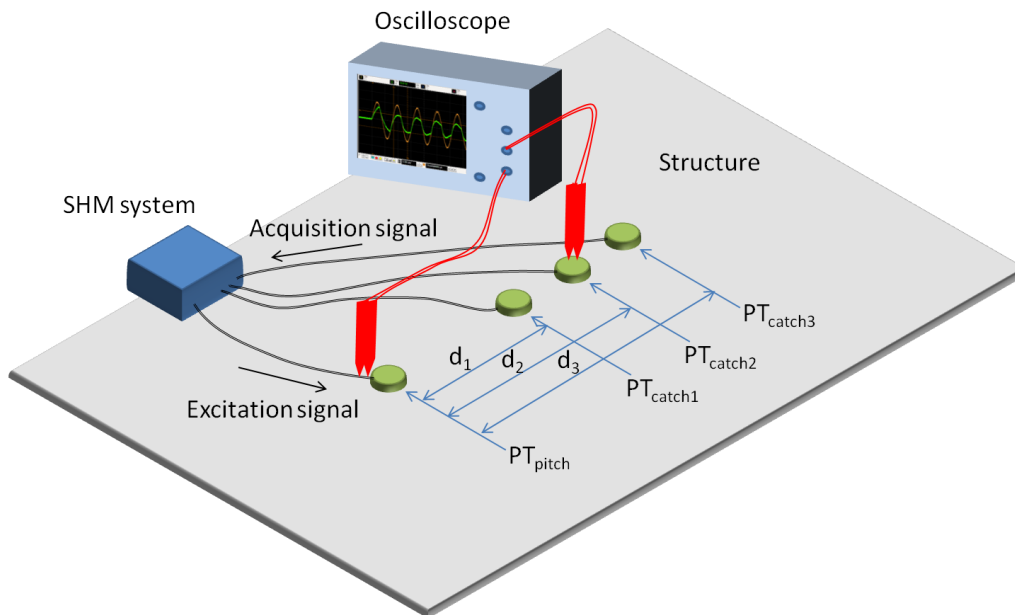
### **4.2 Ensayos de adquisición de señal**

Se analiza las señales recibidas en varios piezoeléctricos mediante el modo pitch-catch. Es decir, se analiza la señal recibida en un piezoeléctrico (catch) tras la excitación producida en otro piezoeléctrico distante (pitch).

Este estudio compara distintas circunstancias para la recepción de las señales:

- La recepción de la señal para distintas frecuencias
- La recepción de la señal para distintas distancias
- La recepción de la señal para distintas estructuras de aluminio y material compuesto
- La recepción de la señal para señal generada con forma sinusoidal o enventanada con Hanning
- Comparación entre dos sistemas SHM distintos: PAMELA III y SHMUS.

Para obtener los resultados de los ensayos realizados se parte del escenario de la Figura 19.



**Figura 19: Procedimiento de ensayo para medir las señales recibidas.**

En cada ensayo se excita el piezoeléctrico (pitch) y la señal producida por este es recogida por los demás piezoeléctricos (catch) que se encuentran a distintas distancias del pitch.

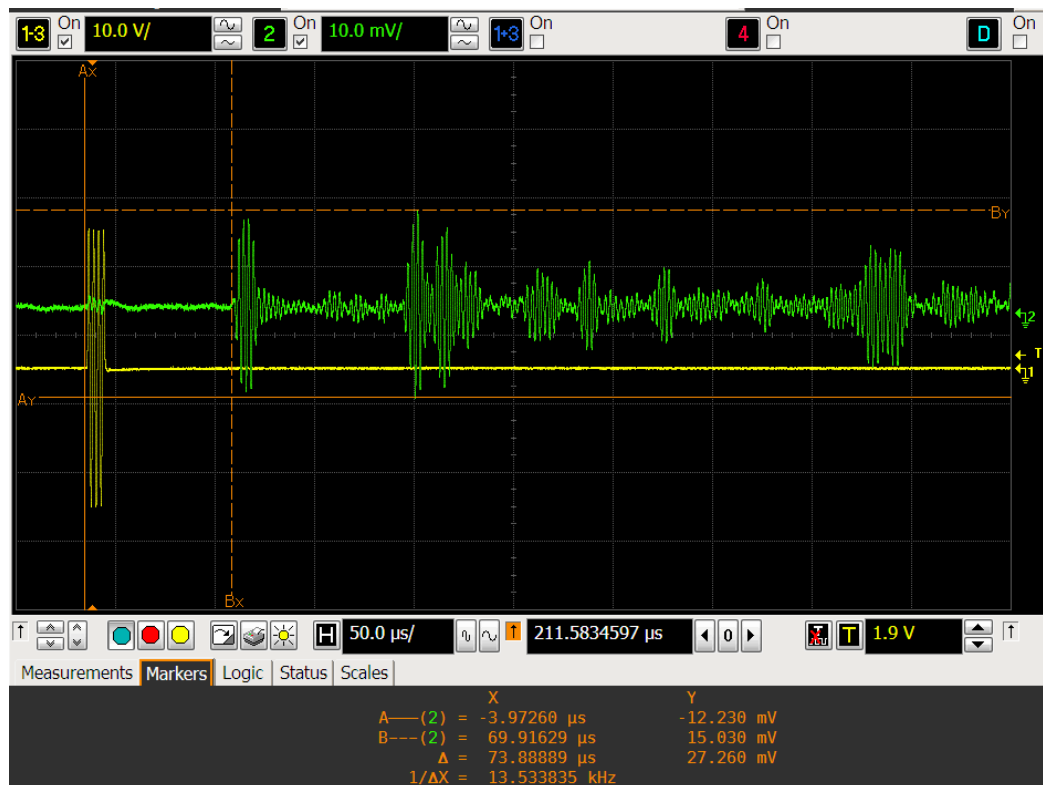
La señal es recogida por el osciloscopio en forma de imagen y en forma de señal con formato csv, para que posteriormente pueda ser tratada en Excel.

A continuación en la Figura 20 se muestra la generación y la adquisición de una señal sinusoidal de 400 kHz y 3,5 ciclos generada por SHMUS en una estructura de aluminio.

Durante todos los ensayos se han utilizado los transductores piezoeléctricos SMD07T02R412WL de STEMiNC los cuales ya se han detallado anteriormente en la generación.

Para la adquisición de señal se ha utilizado un osciloscopio conectado directamente a los extremos del piezoeléctrico catch. Durante la adquisición no se ha utilizado ninguno de los equipos de SHM (PAMELA III Y SHMUS). La comparación entre lo adquirido a través de un osciloscopio y los equipos de SHM se presentará en ensayos posteriores.

Todas las capturas de osciloscopio están realizadas en modo diferencial. Las señales amarillas están capturadas entre dos sondas pasivas y utilizando el modo diferencial del osciloscopio. Las señales verdes están capturadas mediante una sonda diferencial activa.



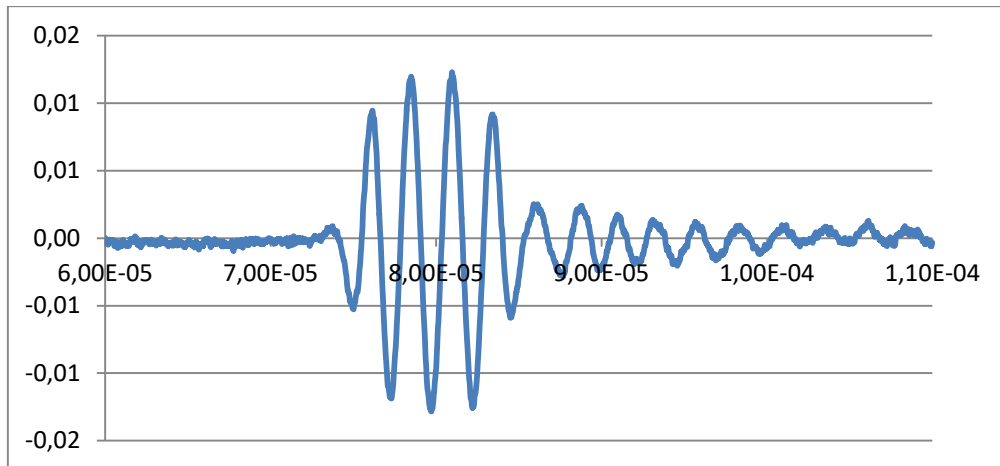
**Figura 20: Ejemplo de generación y adquisición**

En la Figura 20 se puede apreciar en color amarillo la señal generada por SHMUS y en color verde la señal recibida en un piezoeléctrico a una distancia de 40 cm.

Se puede apreciar como la señal recibida tiene una amplitud máxima pico a pico de 27,26 mV y se encuentra retrasada 73,89 μs con respecto a la señal generada.

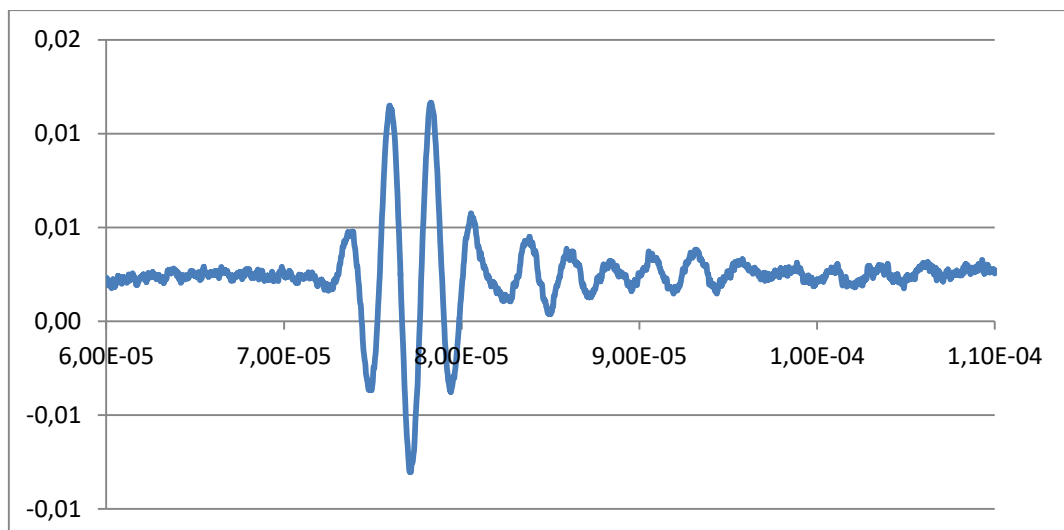
Teniendo en cuenta que la velocidad de propagación del aluminio es de 5400 m/s y la distancia entre los piezoeléctricos es de 40 cm, obtenemos que la señal debiera de estar retrasada 74,07 μs, valor muy similar al obtenido en los ensayos.

Si se plasma en Excel los datos obtenidos del fichero csv obtenemos la Figura 21. Es una imagen semejante a la anterior donde el eje vertical esta en voltios y la señal que se observa es la primera zona representativa de la señal adquirida y mostrada en la Figura 20.



**Figura 21: Ejemplo de señal adquirida en Excel**

En la Figura 22 se muestra este mismo ensayo pero se ha modificado el tipo de señal de excitación, se ha pasado de una señal sinusoidal a una señal enventada con Hanning.



**Figura 22: Ejemplo de señal enventada adquirida en Excel**

Se puede observar como la señal es semejante a la Figura 21 pero de menor amplitud. Además esta señal conserva mucho mejor el parecido con la forma de la señal de excitación.

### **4.3 Comparación de adquisiciones de SHMUS**

Se comparan las señales adquiridas por SHMUS frente a las señales adquiridas por un osciloscopio. Para eso se realizan experimentos en modo pitch-catch



colocando los piezoeléctricos a una distancia de 30 cm y se mide la señal producida en el piezoeléctrico catch.

Por otro lado a las señales obtenidas por el SW de SHMUS se les aplica un factor de escala que permite convertir la señal numérica obtenida de SHMUS a valores de voltaje.

Para obtener los resultados de los ensayos realizados se parte del escenario de la Figura 23.

En cada ensayo se excita el piezoeléctrico (pitch) y la señal producida por este es recogida por el piezoeléctrico (catch) que se encuentran a 30 cm de distancia del pitch.

La señal es recogida por el osciloscopio en forma de imagen y en forma de señal con formato csv, para que posteriormente pueda ser tratada en Excel.

A continuación se adquiere la misma señal mediante el sistema SHMUS y se almacena la adquisición en formato xlsx para poder ser comparada con la señal del osciloscopio.

En la Figura 24 se muestra la adquisición de una señal sinusoidal de 300 kHz y 3,5 ciclos generada por SHMUS en una estructura de material compuesto.

Durante todos los ensayos se han utilizado los transductores piezoeléctricos SMD07T02R412WL de STEMiNC los cuales ya se han detallado anteriormente en los ensayos de generación.

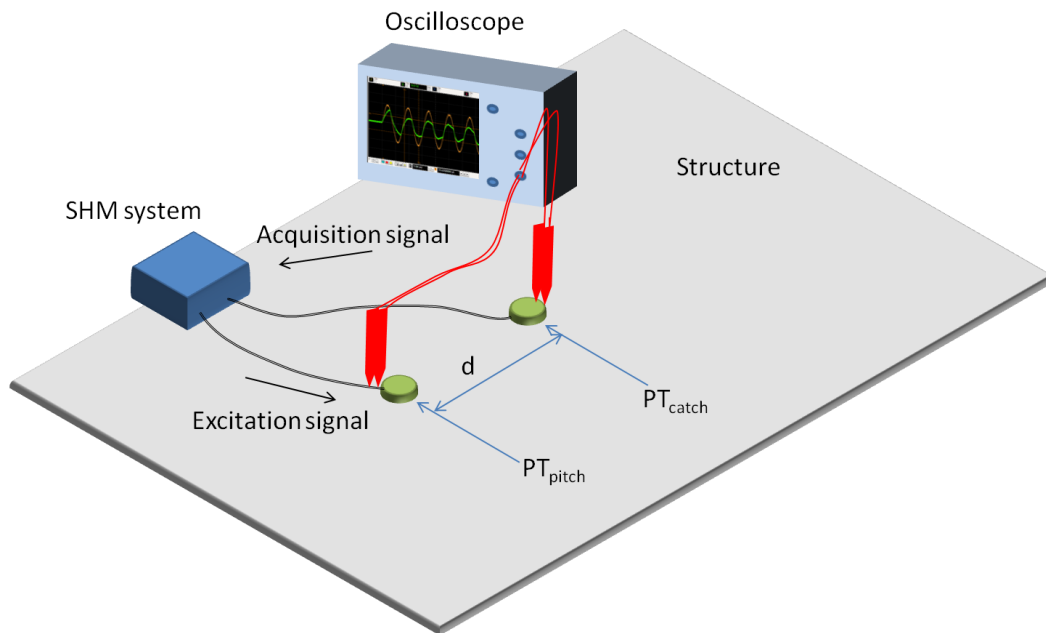


Figura 23: Procedimiento de ensayo para medir las señales recibidas.

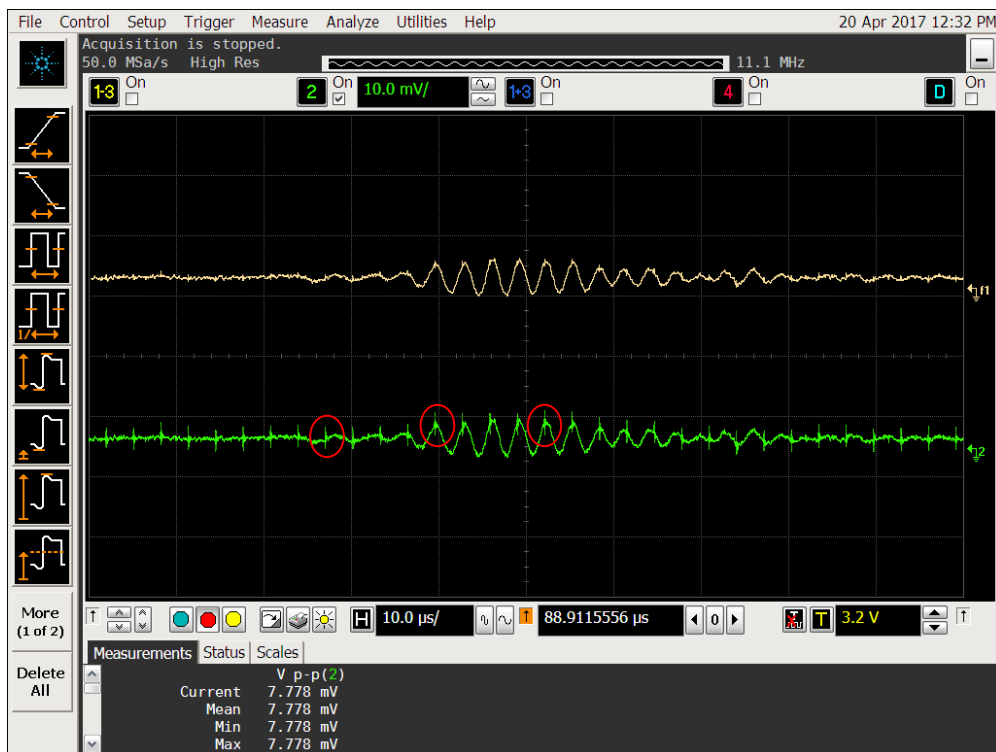


Figura 24: Adquisición de señales, señal sin filtrar (verde) y señal filtrada (rosa).

En la Figura 24 se aprecia como existen pequeñas señales que se repiten en el tiempo y distorsionan la señal adquirida. Estas señales son de frecuencias

superiores a 8 MHz, por lo que se han tratado de filtrar para eliminar las componentes no deseadas. El filtro utilizado tiene las características que se muestran en la Figura 25.

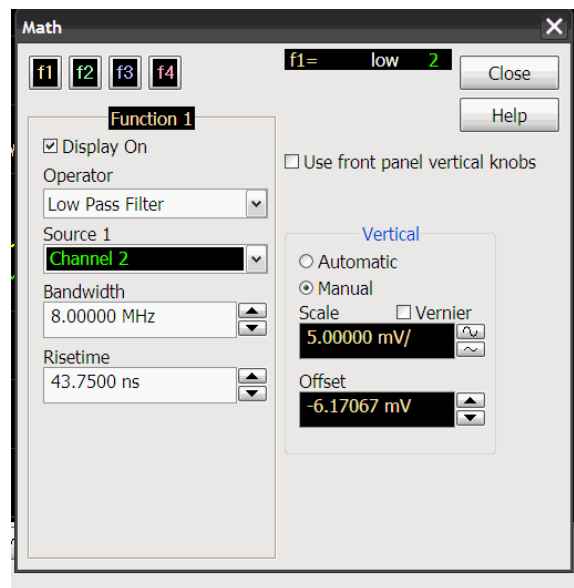


Figura 25: Filtro paso bajo de 8MHz

Como se observa es un filtro paso bajo de frecuencia 8 MHz, el cual nos elimina las señales no deseadas que distorsionaban la señal adquirida, además con este filtro simularemos de forma real el funcionamiento del sistema SHMUS, ya que este dispone ese filtro antes de la adquisición de los datos.

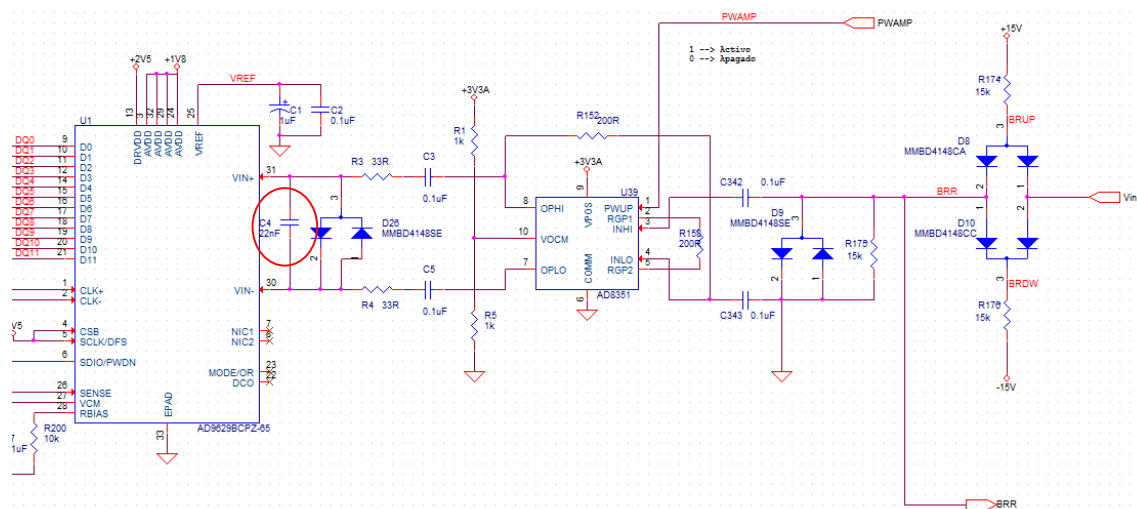


Figura 26: Esquemático canal de entrada

En la Figura 26 se puede apreciar el condensador C4 con un valor de 22 nF que actúa como filtro y permite filtrar la señal de 8 MHz.

## 4.4 Resultados

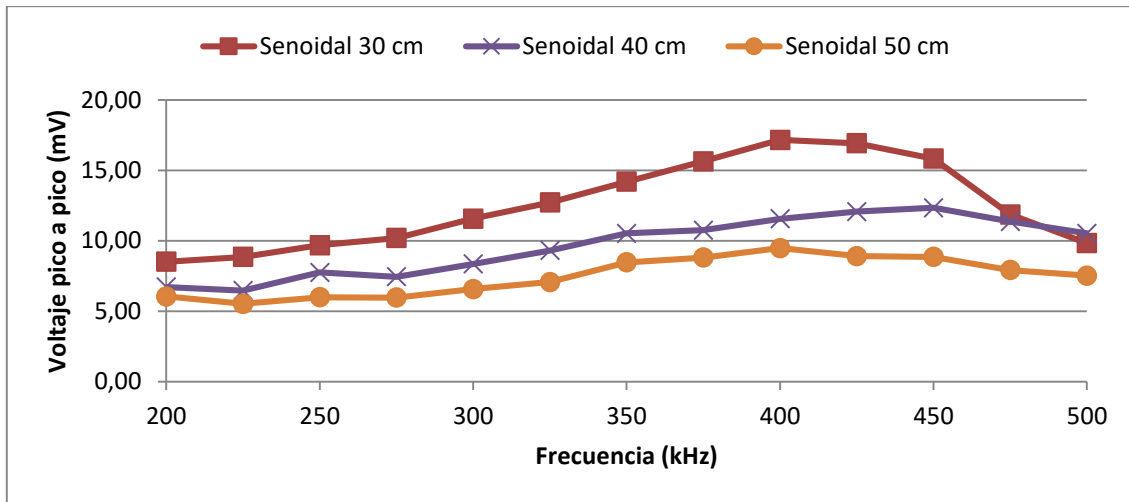
### 4.4.1 Ensayos con PAMELA III

En primer lugar se han analizado los resultados obtenidos con PAMELA III. Como ya se explicó anteriormente, al aumentar la frecuencia llega un valor en que la señal generada para este piezoeléctrico pierde su forma sinusoidal, por lo que ha sido necesario ir modificando las máximas tensiones de generación para la estructura de material compuesto.

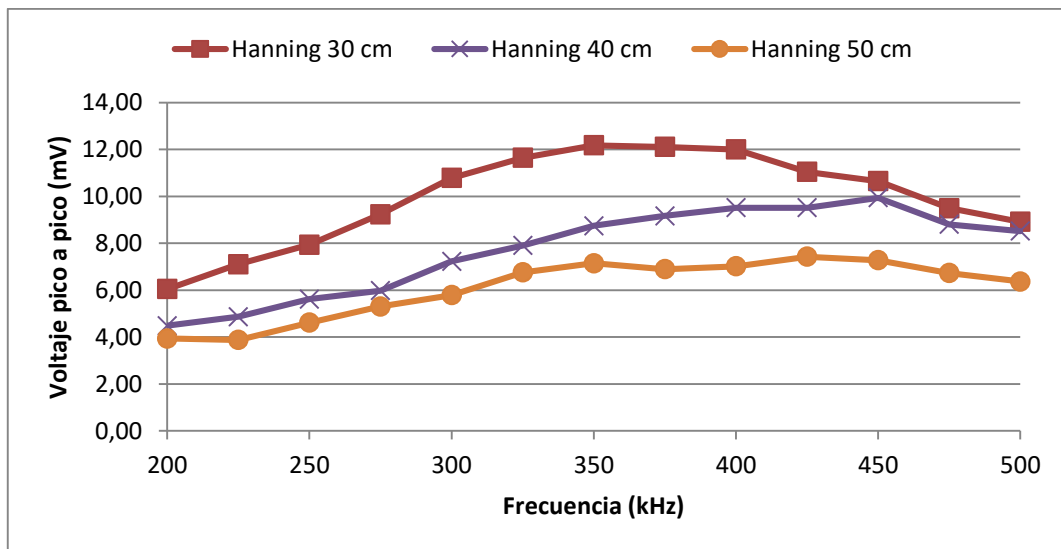
**Tabla 10: Ensayos con PAMELA III sobre aluminio. Valores máximos de tensión pico a pico expresadas en milivoltios en los piezoeléctricos catches.**

kHz	Aluminio					
	30 cm		40 cm		50 cm	
	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)
200	8,51	6,05	6,72	4,49	6,05	3,94
225	8,85	7,11	6,47	4,87	5,52	3,88
250	9,69	7,94	7,75	5,62	5,99	4,62
275	10,20	9,24	7,44	5,98	5,97	5,31
300	11,57	10,79	8,36	7,23	6,57	5,79
325	12,72	11,65	9,31	7,91	7,07	6,76
350	14,20	12,18	10,53	8,75	8,47	7,15
375	15,64	12,11	10,75	9,17	8,81	6,90
400	17,16	12,00	11,56	9,52	9,48	7,02
425	16,93	11,05	12,07	9,52	8,91	7,43
450	15,84	10,65	12,35	9,94	8,85	7,28
475	11,87	9,50	11,37	8,81	7,92	6,73
500	9,83	8,92	10,52	8,52	7,53	6,37

En la Tabla 10 se puede observar los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados con PAMELA III en una estructura de aluminio a diferentes distancias, frecuencias y diferentes tipos de señal. En la Figura 27 se presentan gráficamente los resultados con señales sinusoidales. En la Figura 28 los resultados con señales con enventanado de Hanning.



**Figura 27: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con PAMELA III sobre aluminio con señal sinusoidal.**



**Figura 28: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con PAMELA III sobre aluminio con señal sinusoidal con enventanado de Hanning.**

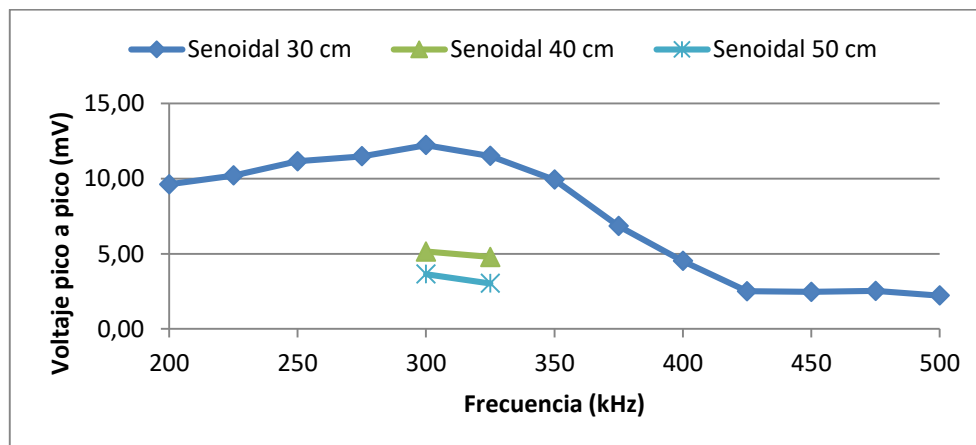
Como se observa en la Figura 27 y en Figura 28 a mayores distancias las tensiones se van reduciendo como era de esperar. Por otra parte, aunque se utiliza el mismo piezoeléctrico en los dos ensayos, la frecuencia a la que se obtiene una mayor tensión se desplaza con el cambio de material.

A continuación se repitió los mismos ensayos pero en una estructura de material compuesto.

**Tabla 11: Ensayos con PAMELA III sobre material compuesto. Valores máximos de tensión pico a pico expresadas en milivoltios en los piezoeléctricos catches.**

kHz	Material compuesto					
	30 cm		40 cm		50 cm	
	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)
200	9,61	8,07				
225	10,20	6,85				
250	11,15	7,07				
275	11,48	7,55				
300	12,22	7,18	5,15	2,99	3,64	2,44
325	11,50	6,17	4,78	3,09	3,03	2,45
350	9,92	5,65				
375	6,84	4,78				
400	4,52	4,13				
425	2,50	3,04				
450	2,46	2,41				
475	2,53	1,95				
500	2,22	1,73				

En este caso, como se puede observar en la Tabla 11 los resultados obtenidos para la distancia más corta son muy pequeños, por lo que se ha optado por no realizar todos los ensayos para el resto de las distancia, ya que los valores no iban a tener mucha relevancia. Solo se han realizado los ensayos a las frecuencias que mayor tensión se ha obtenido a la mínima distancia.



**Figura 29: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con PAMELA III sobre material compuesto con señal sinusoidal.**

Comparando los resultados obtenidos en ambas estructuras se puede observar que las tensiones adquiridas en la estructura de material compuesto son menores que las obtenidas en aluminio, esto se debe a las características del propio material.

#### 4.4.2 Ensayos con SHMUS

A continuación se repitieron los mismos ensayos con el sistema SHMUS con el fin de poder comparar los dos sistemas de SHM.

En este caso el sistema SHMUS nos permite generar las señales de excitación a la máxima tensión sin necesidad de ajusta su valor máximo.

En la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos para SHMUS sobre una estructura de aluminio. En la Figura 30 se muestra la gráfica para los ensayos realizados con señal sinusoidal y en la Figura 31 los ensayos realizados con señal enventanada.

**Tabla 12: Ensayos con SHMUS sobre aluminio. Valores máximos de tensión pico a pico expresadas en milivoltios en los piezoeléctricos catches.**

kHz	Aluminio					
	30 cm		40 cm		50 cm	
	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)
200	8,52	6,56	6,35	4,77	5,43	3,72
225	10,42	8,67	7,39	5,54	6,31	4,43
250	12,52	10,05	8,88	6,97	7,59	5,92
275	15,45	14,12	10,82	9,16	8,58	7,6
300	19,17	17,41	12,97	11,92	10,56	9,47
325	23,07	20,57	15,79	14,17	12,26	11,52
350	27,17	23,07	19,33	17,09	16,14	13,28
375	32,58	24,82	23,53	18,58	18,81	14,23
400	37,33	24,84	25,13	19,71	20,23	15,16
425	38,9	24,52	26,96	20,79	20,21	15,77
450	36,66	24,07	27,86	21,87	20,6	16,05
475	30,49	23,17	28,57	21,18	20,2	16,13
500	26,9	23,2	27,93	21,02	20,27	15,85

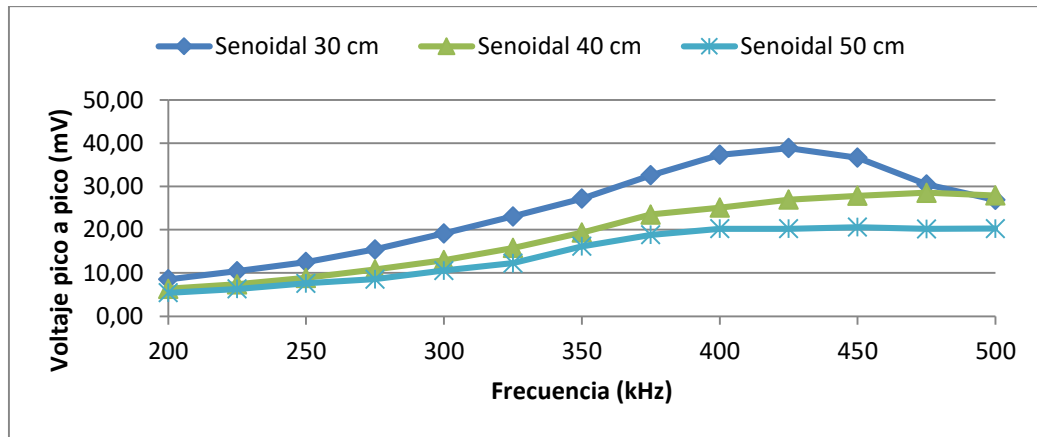


Figura 30: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con SHMUS sobre aluminio con señal sinusoidal.

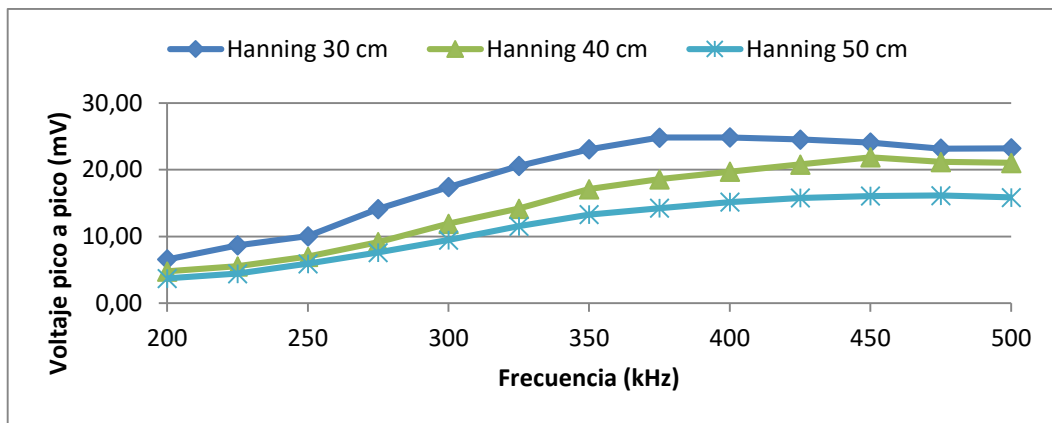


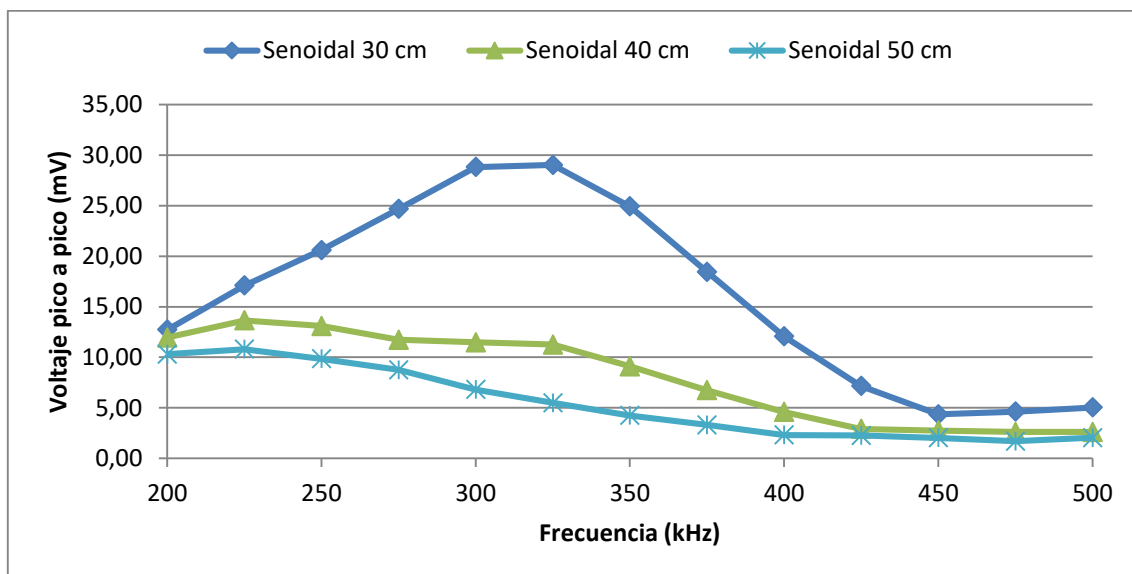
Figura 31: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con SHMUS sobre aluminio con señal sinusoidal con eventanado de Hanning.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los ensayos sobre una estructura de material compuesto con SHMUS: Tabla 13, Figura 32 y Figura 33.



**Tabla 13: Ensayos con SHMUS sobre material compuesto. Valores máximos de tensión pico a pico expresadas en milivoltios en los piezoelectric catches.**

kHz	Material compuesto					
	30 cm		40 cm		50 cm	
	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)
200	12,73	10,35	11,95	9,09	10,31	7,14
225	17,10	11,34	13,65	8,73	10,80	6,52
250	20,59	12,12	13,09	7,93	9,84	5,88
275	24,67	15,09	11,73	6,91	8,75	4,75
300	28,82	15,72	11,48	6,66	6,81	3,99
325	29,02	15,30	11,25	6,19	5,50	3,54
350	24,92	13,37	9,10	5,21	4,25	3,05
375	18,44	11,09	6,75	4,55	3,31	2,32
400	12,07	9,62	4,59	3,62	2,31	2,00
425	7,15	7,62	2,91	3,11	2,26	2,00
450	4,35	6,11	2,75	2,45	2,02	1,64
475	4,63	4,65	2,61	2,11	1,70	1,42
500	5,04	3,91	2,61	1,99	2,04	1,26



**Figura 32: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con SHMUS sobre material compuesto con señal sinusoidal.**

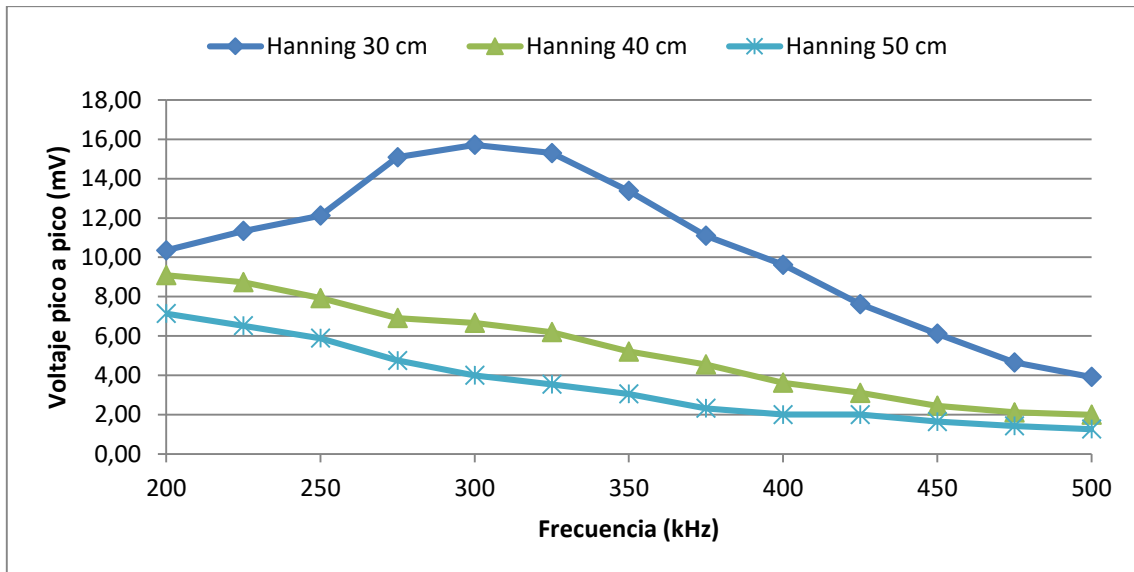


Figura 33: Resultados a diferentes distancias de los ensayos con SHMUS sobre material compuesto con señal con enventanado de Hanning.

#### 4.4.3 PAMELA III vs SHMUS en aluminio

A continuación se van a comparar los resultados de los ensayos realizados con los sistemas PAMELA III y SHMUS utilizando los piezoeléctricos citados anteriormente pegados con cianocrilato sobre una estructura de aluminio.

Tabla 14: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre aluminio a una distancia de 30 cm

kHz	30 cm			
	SHMUS		PAMELA	
	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)
200	8,52	6,56	8,51	6,05
225	10,42	8,67	8,85	7,11
250	12,52	10,05	9,69	7,94
275	15,45	14,12	10,20	9,24
300	19,17	17,41	11,57	10,79
325	23,07	20,57	12,72	11,65
350	27,17	23,07	14,20	12,18
375	32,58	24,82	15,64	12,11
400	37,33	24,84	17,16	12,00
425	38,90	24,52	16,93	11,05
450	36,66	24,07	15,84	10,65
475	30,49	23,17	11,87	9,50
500	26,90	23,20	9,83	8,92

**Tabla 15: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre aluminio a una distancia de 40 cm**

kHz	40 cm			
	SHMUS		PAMELA	
	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)
200	6,35	4,77	6,72	4,49
225	7,39	5,54	6,47	4,87
250	8,88	6,97	7,75	5,62
275	10,82	9,16	7,44	5,98
300	12,97	11,92	8,36	7,23
325	15,79	14,17	9,31	7,91
350	19,33	17,09	10,53	8,75
375	23,53	18,58	10,75	9,17
400	25,13	19,71	11,56	9,52
425	26,96	20,79	12,07	9,52
450	27,86	21,87	12,35	9,94
475	28,57	21,18	11,37	8,81
500	27,93	21,02	10,52	8,52

**Tabla 16: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre aluminio a una distancia de 50 cm**

kHz	50 cm			
	SHMUS		PAMELA	
	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)
200	5,43	3,72	6,05	3,94
225	6,31	4,43	5,52	3,88
250	7,59	5,92	5,99	4,62
275	8,58	7,60	5,97	5,31
300	10,56	9,47	6,57	5,79
325	12,26	11,52	7,07	6,76
350	16,14	13,28	8,47	7,15
375	18,81	14,23	8,81	6,90
400	20,23	15,16	9,48	7,02
425	20,21	15,77	8,91	7,43
450	20,60	16,05	8,85	7,28
475	20,20	16,13	7,92	6,73
500	20,27	15,85	7,53	6,37

Las siguientes figuras representan gráficamente los datos de los ensayos de las Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16.

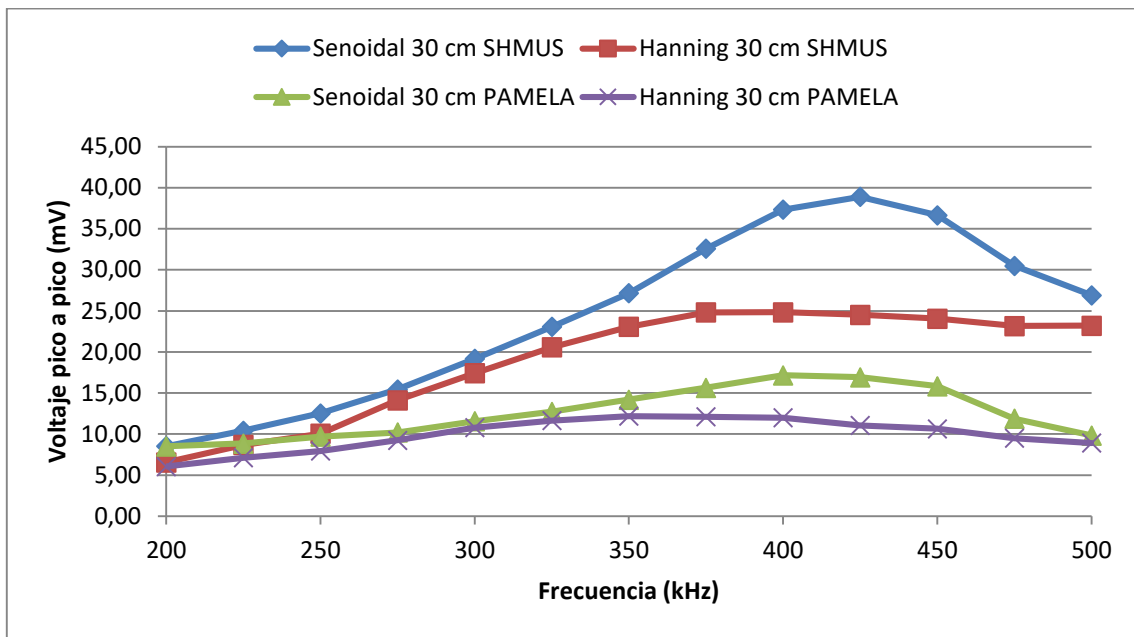


Figura 34: Representación gráfica de los datos de la Tabla 14

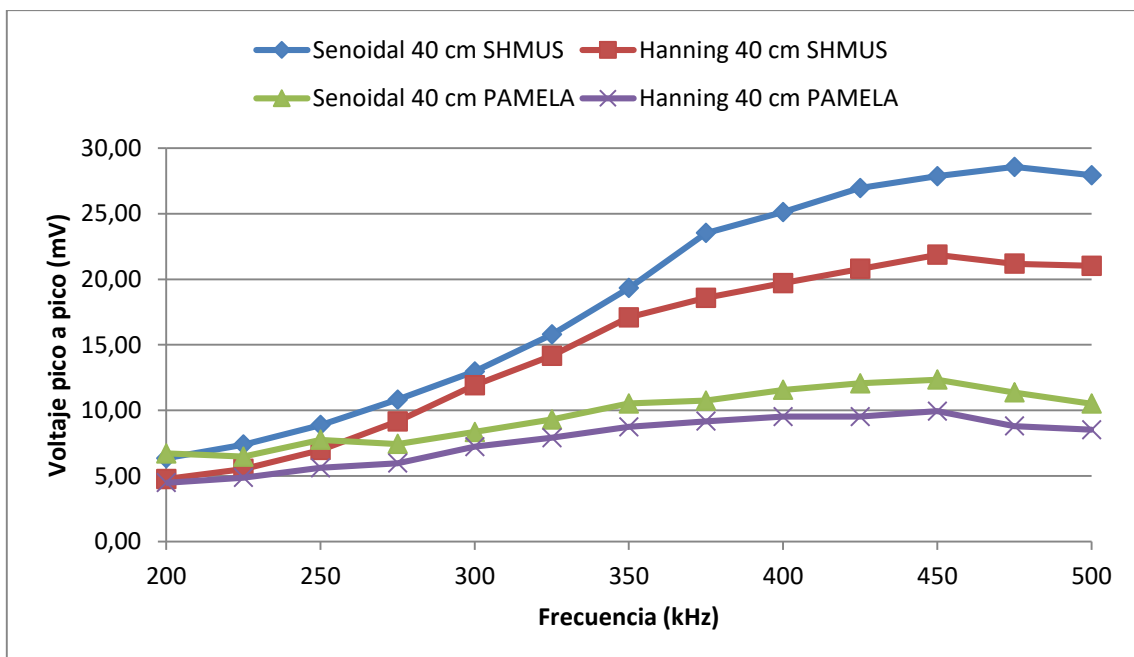


Figura 35: Representación gráfica de los datos de la Tabla 15

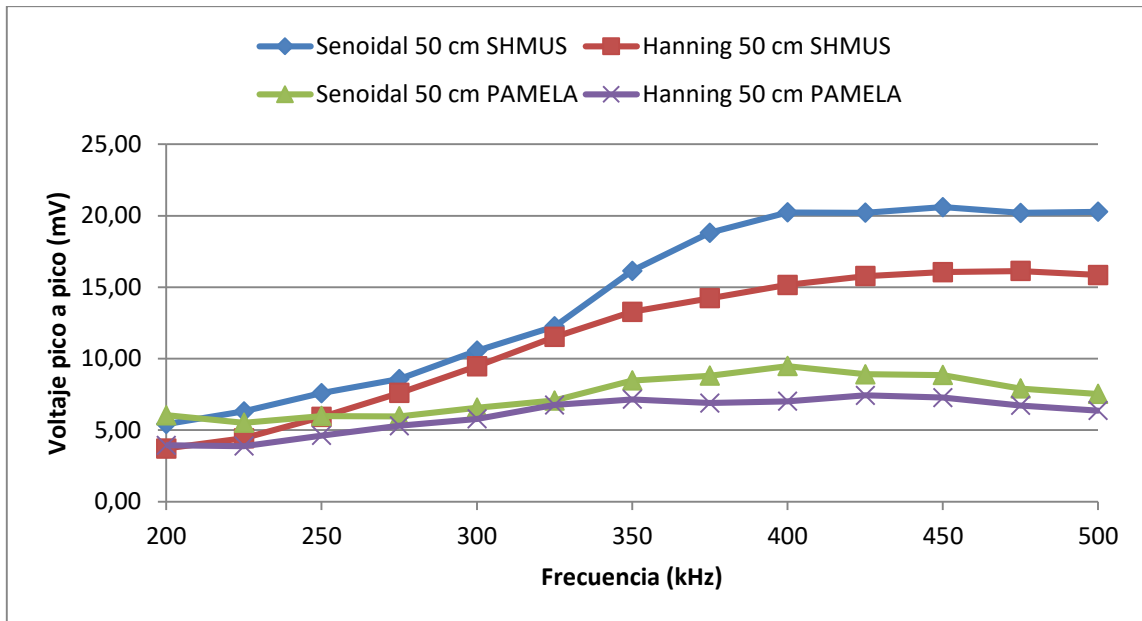


Figura 36: Representación gráfica de los datos de la Tabla 16

Como se puede observar en las Figura 34, Figura 35 y Figura 36 el sistema SHMUS obtiene unas mayores tensiones en las señales de adquisición frente al sistema PAMELA III.

#### 4.4.4 PAMELA III vs SHMUS en material compuesto

El mismo experimento realizado sobre material compuesto nos aporta los datos mostrados a continuación.

**Tabla 17: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre material compuesto a una distancia de 30 cm**

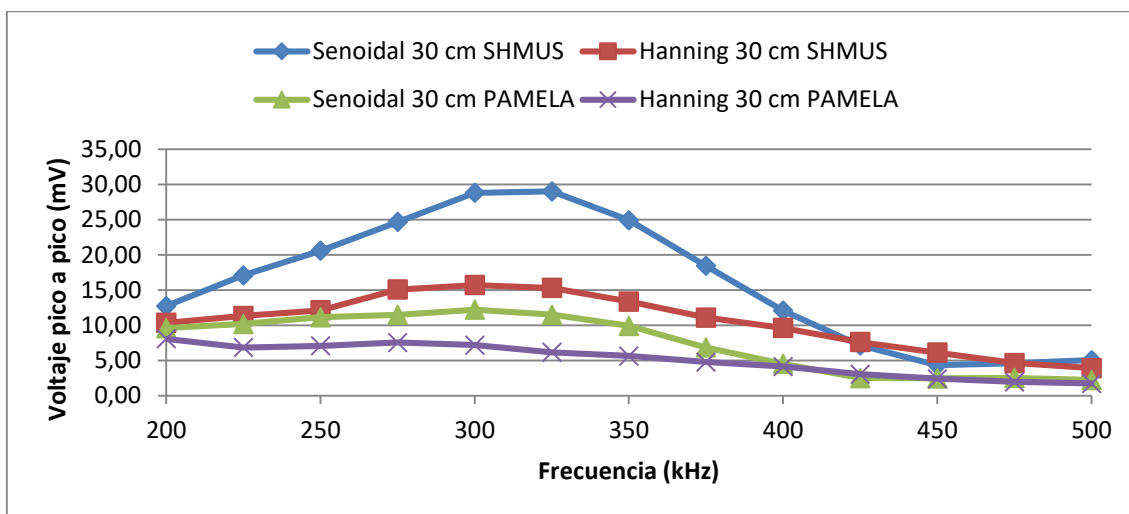
kHz	30 cm			
	SHMUS		PAMELA	
	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)
200	12,73	10,35	9,61	8,07
225	17,10	11,34	10,20	6,85
250	20,59	12,12	11,15	7,07
275	24,67	15,09	11,48	7,55
300	28,82	15,72	12,22	7,18
325	29,02	15,30	11,50	6,17
350	24,92	13,37	9,92	5,65
375	18,44	11,09	6,84	4,78
400	12,07	9,62	4,52	4,13
425	7,15	7,62	2,50	3,04
450	4,35	6,11	2,46	2,41
475	4,63	4,65	2,53	1,95
500	5,04	3,91	2,22	1,73

**Tabla 18: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre material compuesto a una distancia de 40 cm**

kHz	40 cm			
	SHMUS		PAMELA	
	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)
200	11,95	9,09		
225	13,65	8,73		
250	13,09	7,93		
275	11,73	6,91		
300	11,48	6,66	5,15	2,99
325	11,25	6,19	4,78	3,09
350	9,10	5,21		
375	6,75	4,55		
400	4,59	3,62		
425	2,91	3,11		
450	2,75	2,45		
475	2,61	2,11		
500	2,61	1,99		

**Tabla 19: Voltaje pico a pico de ensayos de adquisición de señal sobre material compuesto a una distancia de 50 cm**

kHz	50 cm			
	SHMUS		PAMELA	
	Senoidal (mV)	Hanning (mV)	Senoidal (mV)	Hanning (mV)
200	10,31	7,14		
225	10,80	6,52		
250	9,84	5,88		
275	8,75	4,75		
300	6,81	3,99	3,64	2,44
325	5,50	3,54	3,03	2,45
350	4,25	3,05		
375	3,31	2,32		
400	2,31	2,00		
425	2,26	2,00		
450	2,02	1,64		
475	1,70	1,42		
500	2,04	1,26		



**Figura 37: Representación gráfica de los datos de la Tabla 17**

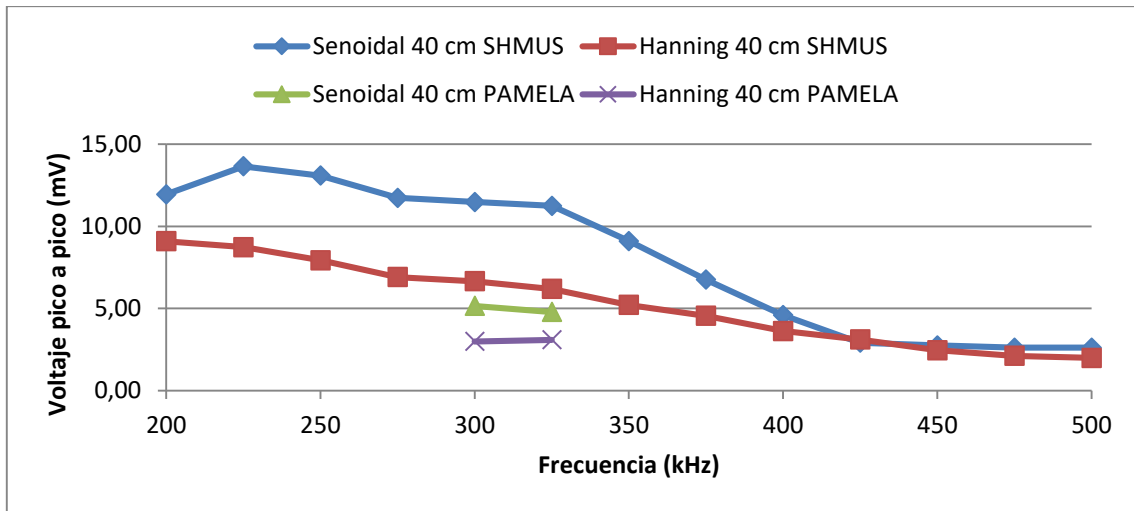


Figura 38: Representación gráfica de los datos de la Tabla 18

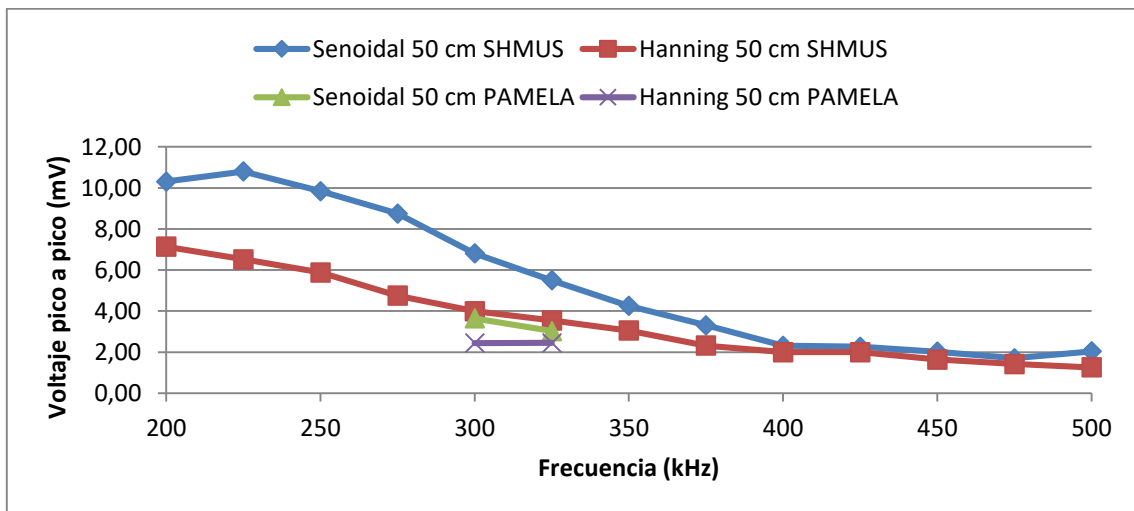


Figura 39: Representación gráfica de los datos de la Tabla 19

Como se puede observar en las Figura 37, Figura 38 y Figura 39, como en el anterior caso el sistema SHMUS obtiene unos valores más elevados de tensiones en las señales de adquisición que el sistema PAMELA III, pero cabe destacar que los valores son bastante más pequeños que en el caso anterior debido a las propiedades de esta estructura.

Por este motivo como se ha mencionado anteriormente no se realizaron todos los ensayos con el sistema PAMELA III, ya que los valores eran del orden de los valores de ruido y no tienen un valor significativo.

Para finalizar en las Figura 37, Figura 38 y Figura 39 se aprecia como en el primer caso la tensión máxima se encuentra una determinada frecuencia y como en las otras dos figuras se encuentra en otra frecuencia, esto puede ser debido al pegado de los piezoeléctricos, ya que tras varios ensayos pude observar su



especial relevancia, ya que fue necesario volver a pegar nuevos piezoeléctricos para volver a realizar los ensayos a 30 cm, ya que primeramente los resultados ofrecían unos datos que no seguían una coherencia con las distancias.

#### 4.4.5 Resultados de la comparación de la adquisición del sistema SHMUS y el osciloscopio

A continuación, después de recoger los datos de los diferentes sistemas y ser procesados con la herramienta Excel, se van a comparar los resultados obtenidos para diferentes frecuencias.

Los datos recogidos por el sistema SHMUS son numéricos. Para convertirlos en voltios es necesario multiplicarlos por un factor de escala. En las imágenes que se muestran a continuación los datos obtenidos de SHMUS ya han sido escalados para poder compararse con los obtenidos por el osciloscopio.

NOTA: las representaciones en Excel y las capturas con el SW de control de SHMUS se han obtenido en días diferentes, por lo que no coinciden plenamente sus formas. A pesar de eso se ve que existe un parecido muy grande, por lo que se demuestra la repetitividad de los ensayos.

En la Figura 40 se puede observar en color azul la señal adquisición del osciloscopio y en color rojo la señal adquirida con el sistema SHMUS aplicando ya el factor de escala citado anteriormente. El factor de escala aplicado para esta frecuencia es de 4096.

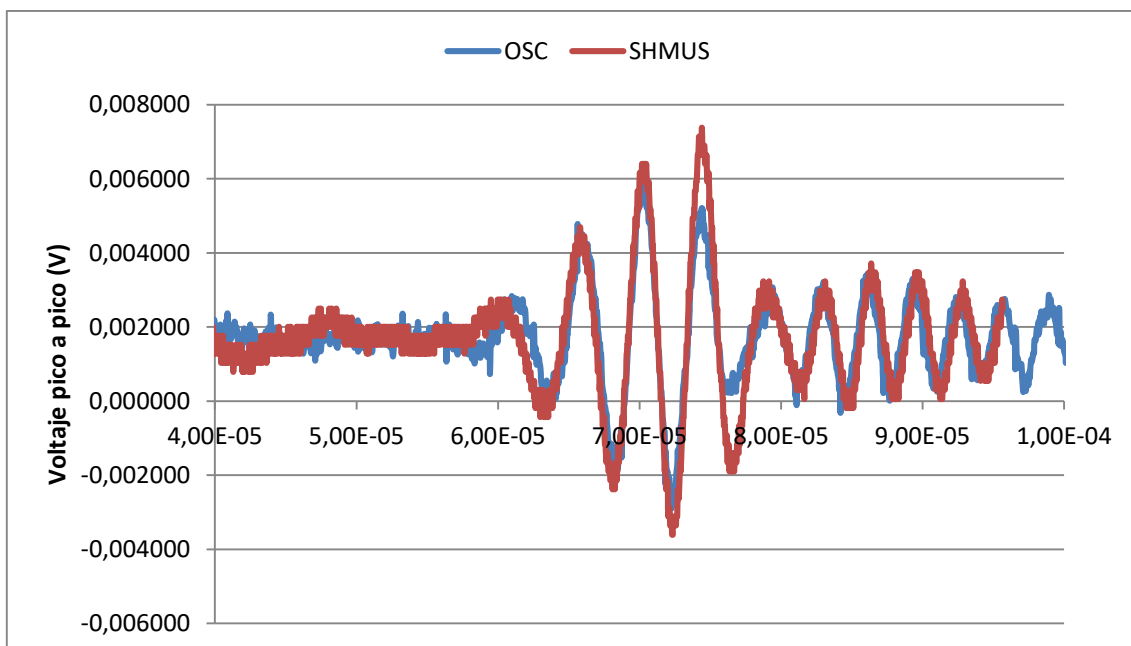


Figura 40: Señales adquiridas a 225 kHz

Al ser valores tan pequeños la exactitud viene dada por la precisión de los dos sistemas a comparar, de todas formas aunque existen pequeñas diferencias las señales adquiridas tienen una gran similitud.

Para demostrar que los valores obtenidos no han sido manipulados se adjunta la señal obtenida del software del sistema SHMUS como muestra la Figura 41, esto se realizará para todos los casos.

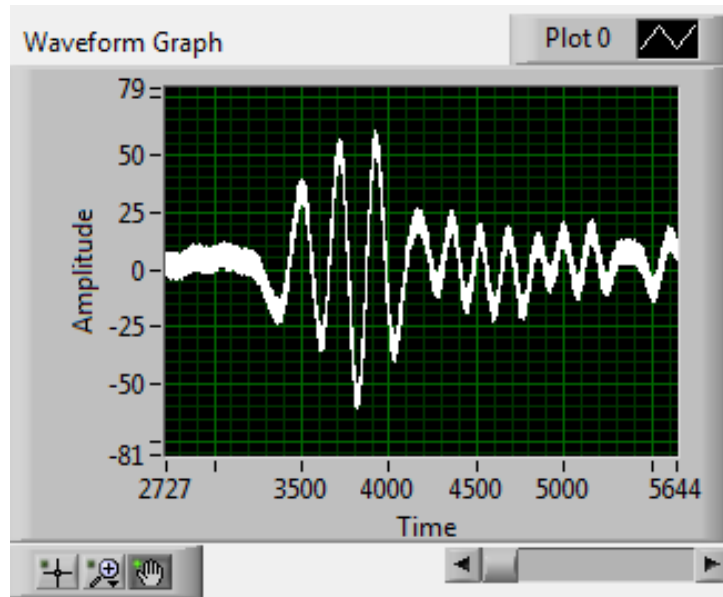


Figura 41: Señal adquirida con el software de control de SHMUS a 225 kHz.

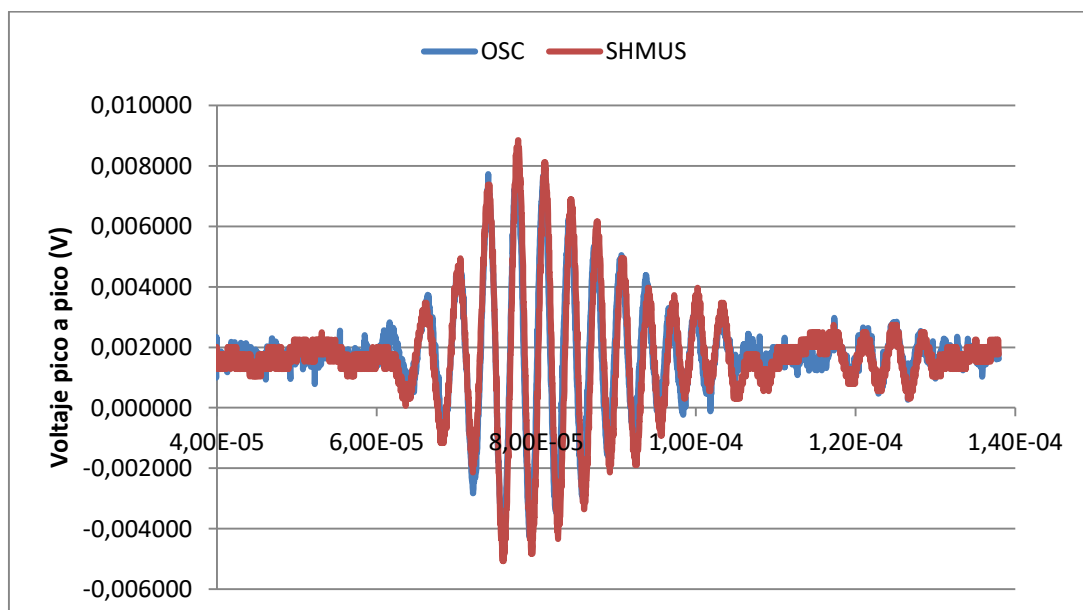


Figura 42: Señales adquiridas a 275 kHz

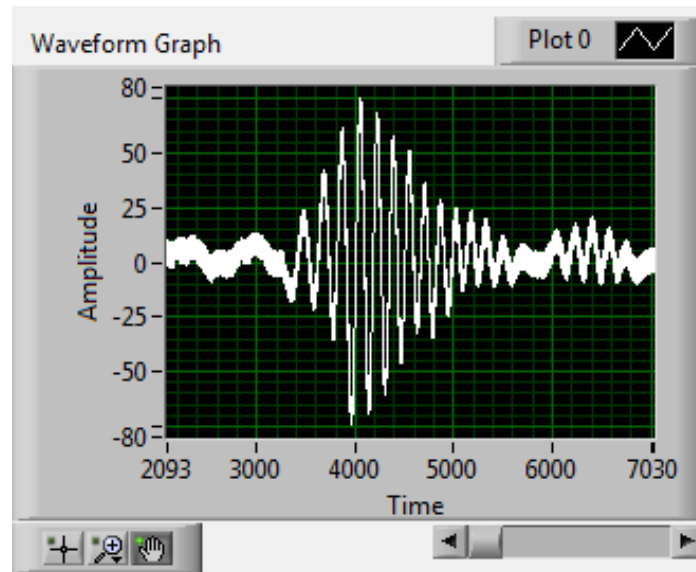


Figura 43: Señal adquirida a 275 kHz con software de SHMUS

Como se explicó en apartados anteriores, al aumentar la frecuencia las señales adquiridas tiene una mayor amplitud. En la Figura 42 se puede observar como para amplitudes mayores la similitud aumenta.

El factor de escala aplicado en este caso para esta frecuencia también es de 4096 al igual que el caso anterior.

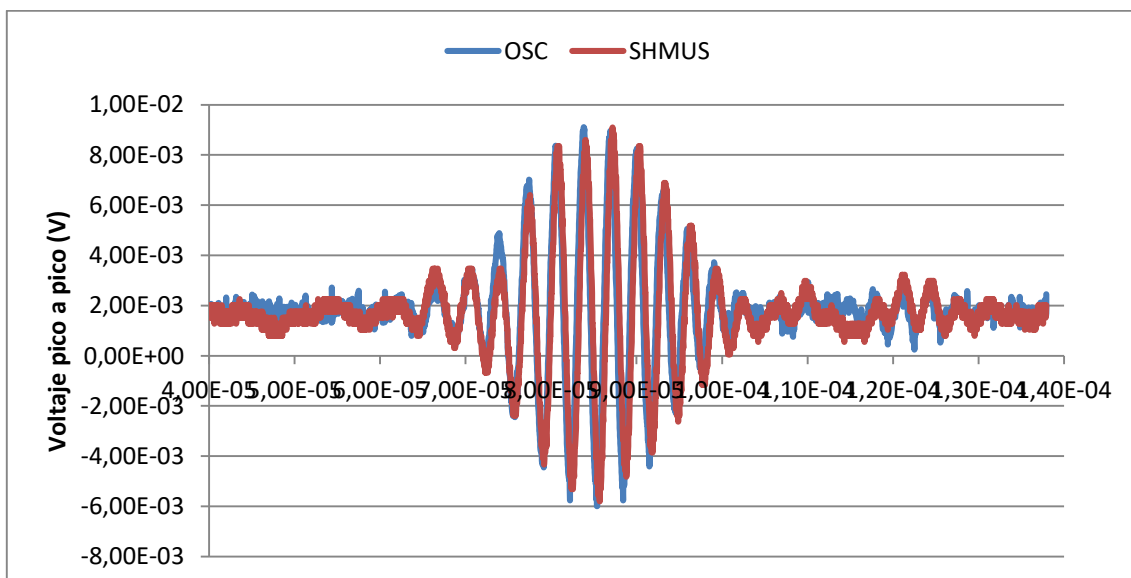
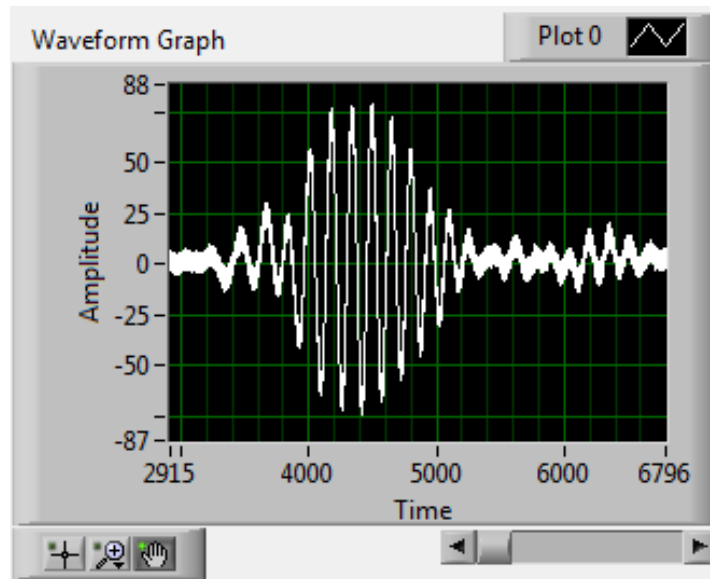


Figura 44: Señales adquiridas a 325 kHz

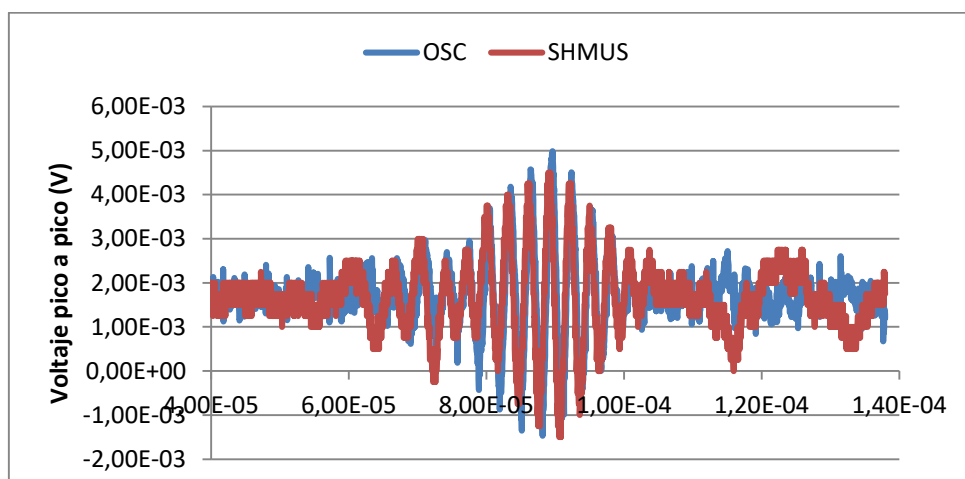


**Figura 45: Señal adquirida a 325 kHz con software de SHMUS**

En la frecuencia que muestra la Figura 44 los valores de las señales son los máximo adquiridos en los ensayos y como en el caso anterior al aumentar estos valores las señales tienden a parecerse más.

El factor de escala aplicado para esta frecuencia es de 4096 como en los dos casos anteriores.

Para los dos siguientes casos, tanto en la Figura 46 como en la Figura 48, los resultados se empeoran debido a que los valores de las señales son muy pequeños, e incluso en el último caso para una frecuencia de 475 kHz se puede observar una imagen como pixelada, esto es debido a la resolución de los sistemas ya que depende del bit menos significativo de la digitalización.



**Figura 46: Señales adquiridas a 400 kHz**

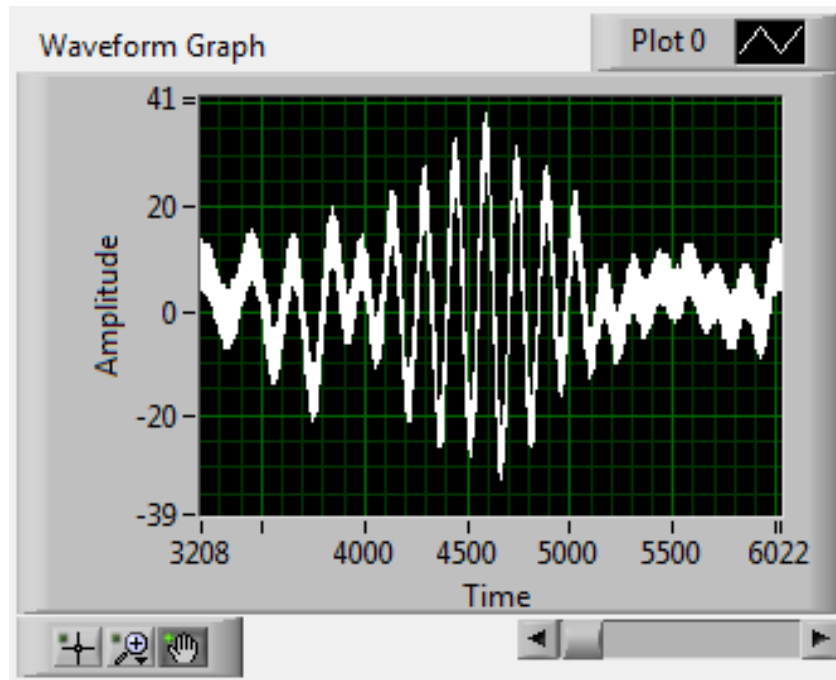


Figura 47: Señal adquirida a 400 kHz con software de SHMUS

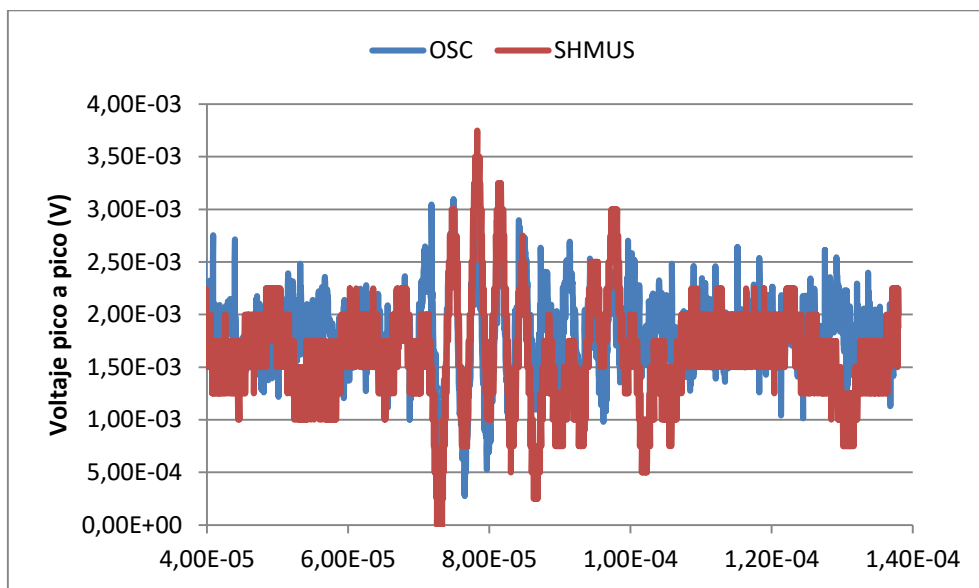
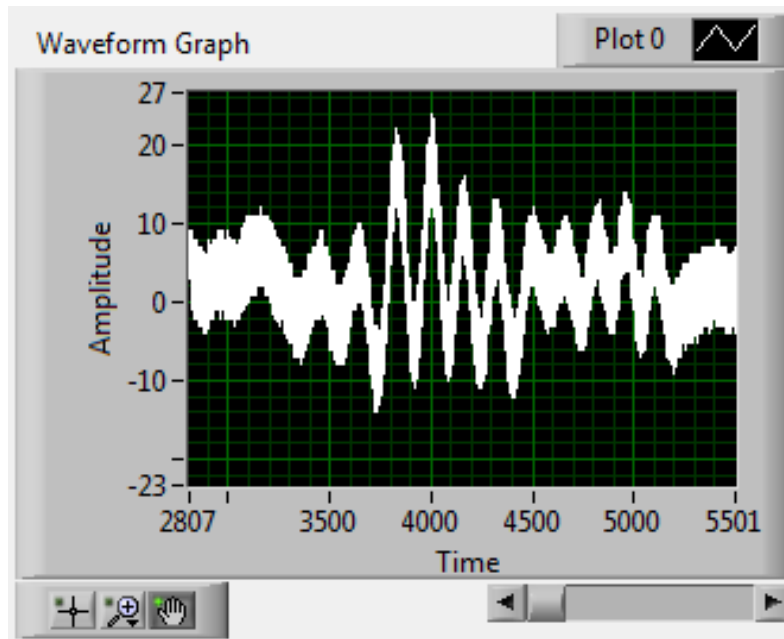


Figura 48: Señales adquiridas a 475 kHz



**Figura 49: Señal adquirida a 475 kHz con software de SHMUS**

Para estas dos últimas frecuencias el factor de escala aplicado como en los casos anteriores ha sido 4096.

## **5 DETECTOR DE IMPACTO**

### **5.1 Objetivo**

Partiendo de la versión 1 de SHMUS donde no se incorpora detección de impacto, se diseñó la versión 2 de SHMUS, en esta versión se propuso incorporar un sistema de detección de impacto.

El objetivo de estos ensayos ha sido verificar el funcionamiento del circuito de detección de impacto implementado en la versión 2 del sistema SHMUS.

También se detalla la forma en la que se deben de procesar los datos obtenidos del sistema en la FPGA.

### **5.2 Funcionamiento y Circuito**

El funcionamiento del sistema de detección de impacto se basa en un comparador con un nivel de tensión de referencia, en el momento que ocurre un impacto en la estructura se compara el nivel de señal del impacto con el de referencia.

La señal del impacto tendrá un determinado número de pulsos de una determinada duración, los cuales dependerán del impacto que se ha producido.

La repercusión del impacto de determinará en función del número de pulsos y de la duración de los mismos.

Previamente en el procesamiento de la FPGA es necesario establecer la duración de los pulsos mínima para considerar que se ha producido un impacto y un contador en la FPGA con un tiempo de guarda determinado, de tal manera que si se han producido dos impactos pero en un tiempo superior al de guarda estos no se cuenten como un único impacto y lleven a un error.

En caso de que se hayan producidos dos impactos con tiempos superiores al de guarda será necesario que se reinicie el contador para evitar falsos positivos.

Esto se tomará como referencia y así en el momento que se produzca un impacto se podrá determinar la gravedad del mismo.

Este procesamiento se llevará a cabo en la FPGA por lo que es necesario el desarrollo del código, esto queda fuera del alcance de este proyecto, en este proyecto solo se detalla la forma de procesar los resultados obtenidos del detector de impacto.

En la Figura 50 se observa el diseño HW del detector de impactos.

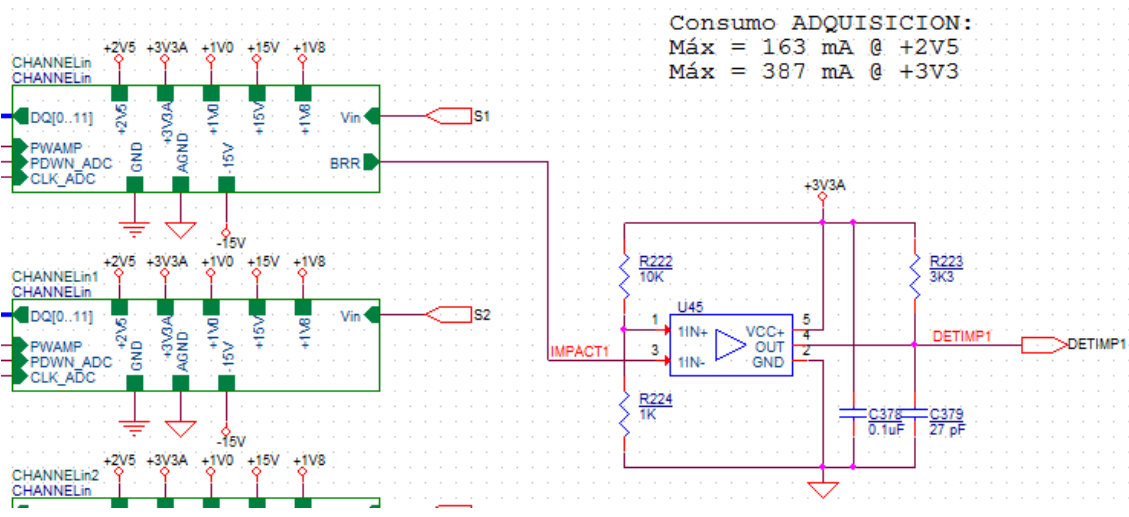


Figura 50: Esquemático del circuito de detección de impactos



### 5.3 Ensayos detección de ensayo

Los ensayos realizados se han llevado a cabo en una estructura de material de aluminio a la que se le ha aplicado un golpe con un martillo para simular un impacto. Los resultados obtenidos son muy pequeños en comparación con un impacto que se podría provocar en un avión en vuelo pero permiten corroborar el correcto funcionamiento del detector de impacto.

Los resultados obtenidos se detallan el siguiente apartado.

### 5.4 Resultados

Como se ha citado en el apartado anterior las pruebas realizadas para verificar el correcto funcionamiento del detector de impacto han sido en una estructura de material de aluminio y golpeando con un martillo para simular un impacto.

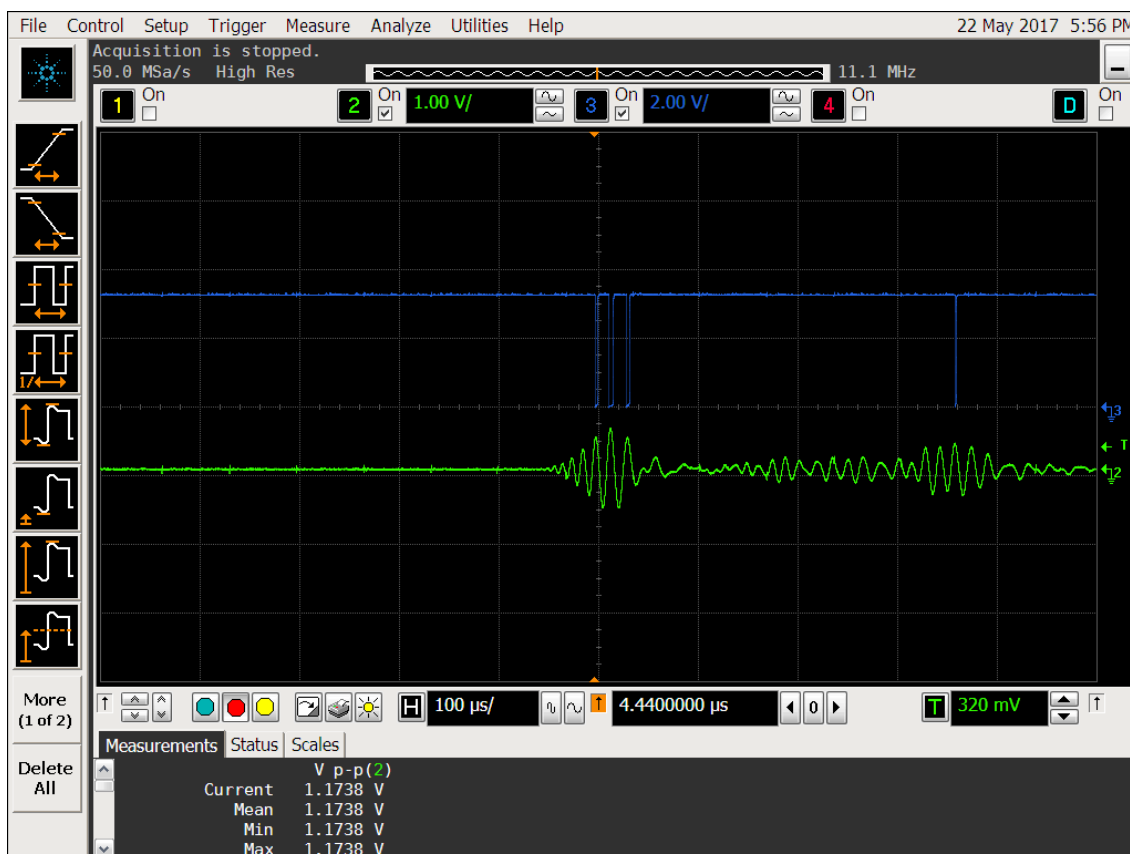


Figura 51: Detección de impacto de forma analógica (verde) y de forma digital (azul).

En la Figura 51 se puede observar como al golpear la estructura de material de aluminio el sistema SHMUS a través de los piezoeléctricos ha detectado el impacto, en la figura se aprecia un primer impacto que es propiciado por el golpe

del martillo y un segundo que es causado por el rebote del impacto sobre la estructura, la señal del impacto se ha recogido tanto en forma analógica como forma digital.

A continuación se va a representar el impacto de forma más detallada.

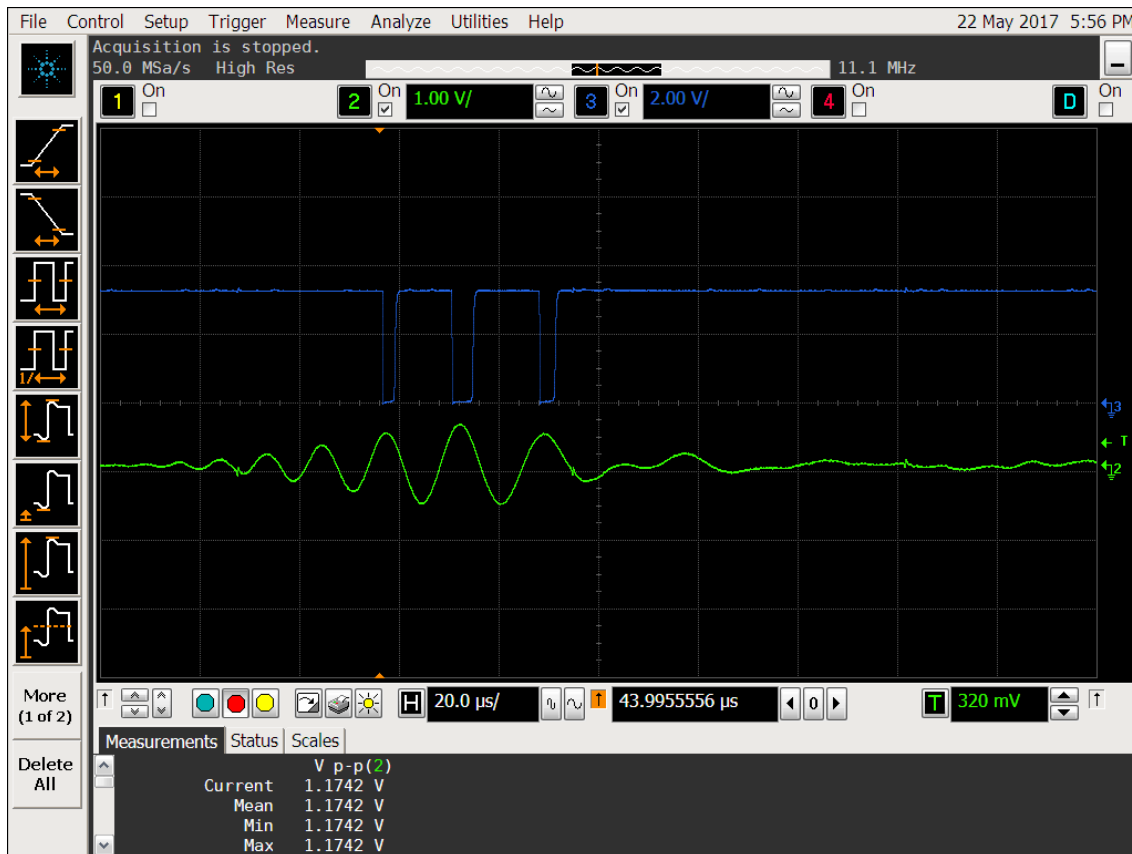
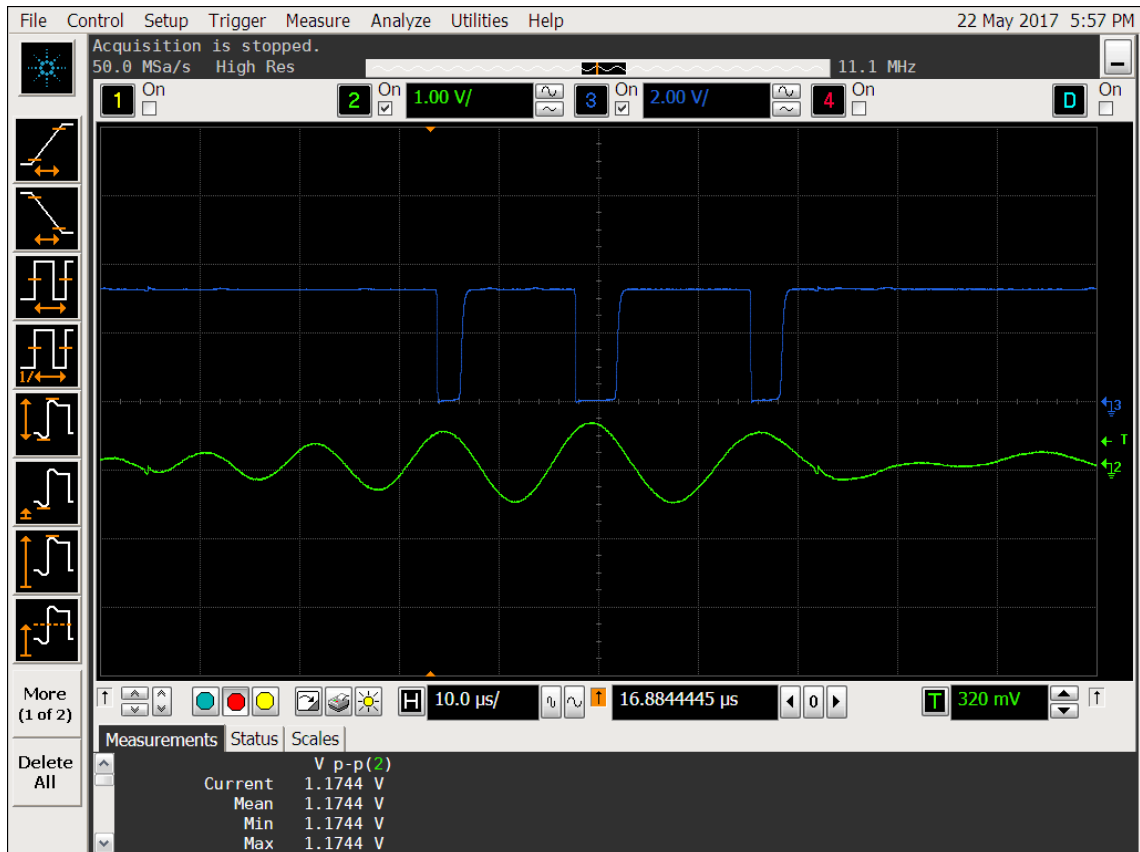


Figura 52: Detección de la primera señal del impacto.



**Figura 53: Detección de la primera señal del impacto con zoom.**

En las Figura 52 y Figura 53 se muestra más en detalle la primera detección del impacto de la Figura 51. Como se observan en estas figuras en la detección digital aparecen unos flancos cuando la señal que reciben supera una determinada tensión de referencia.

Estos flancos son los que se deben de contabilizar en el procesamiento en función de un periodo determinado previamente para que se pueda determinar la gravedad del impacto recibido.

## **6 OPTIMIZACIÓN EN SISTEMA DE GENERACIÓN DE SHMUS**

### **6.1 Objetivo**

En los ensayos de SHM un aspecto importante es la tensión aplicada al piezoeléctrico de excitación. Hay materiales que provocan una gran amortiguación de las señales ultrasónicas. Para esos materiales, utilizando unas amplitudes de señal mayores en la excitación se consigue también mayores señales de adquisición.

El objetivo de estos ensayos ha sido aumentar la tensión pico a pico de la parte de generación de señal y en consecuencia la adquisición para una estructura de material compuesto..

Primeramente se presentan diferentes modos para aumentar la tensión de la generación modificando mínimamente SHMUS.

Posteriormente se determina cuantitativamente cuál de estos modos genera mayor tensión pico a pico, es decir, cual implica una mayor mejora.

### **6.2 Mejoras en el circuito de generación**

En los ensayos anteriores se concluyó que la señal producida por PAMELA no tiene la suficiente potencia para determinadas operaciones de SHM. También se vio que la señal adquirida en los piezoeléctricos catches cuando se utiliza material compuesto no tiene gran amplitud.

En consecuencia se ha estudiado las posibilidades de aumentar la amplitud de la señal de excitación que se aplica a un piezoeléctrico pitch de cara a producir una mayor tensión en un piezoeléctrico catch.

Todas las técnicas estudiadas se basan en la modificación del circuito electrónico de excitación de SHMUS, fundamentalmente en relación al transformador de aislamiento.

Para ello se ha estudiado distintos modos para mejorar la amplitud de la señal generada, lo cuales se van a describir a continuación.

#### **6.2.1 MODO A.**

Se consigue con SHMUS en modo normal. Sirve como referencia para realizar la comparación con el resto de modos.

En este modo se utiliza un transformador con relación 1:1, pero la señal procedente de un amplificador operacional se introduce por el punto medio del

primario, por lo que dobla la tensión y la relación entre el amplificador operacional y el piezoeléctrico viene a ser de 1:2.

### 6.2.2 MODO B.

Sustitución del transformador de SHMUS por un Coilcraft PWB-2-CLB.

Este transformador tiene una relación 1:2. Introduciendo la señal del amplificador operacional por el punto medio del primario se tiene una relación equivalente a 1:4.

Este modo requiere modificar el circuito electrónico de SHMUS.

### 6.2.3 MODO C.

Sustitución del transformador de SHMUS por un Coilcraft PWB-4-CLB.

Se ha considerado esta opción con un transformador de relación 1:4, lo que resultaría una relación total de 1:8. Pero no se ha llegado a probar ya que los resultados con el MODO B no han sido buenos, como se verá posteriormente.

Este modo requiere modificar el circuito de SHMUS.

### 6.2.4 MODO D.

Disposición de dos transformadores en serie según el siguiente esquema.

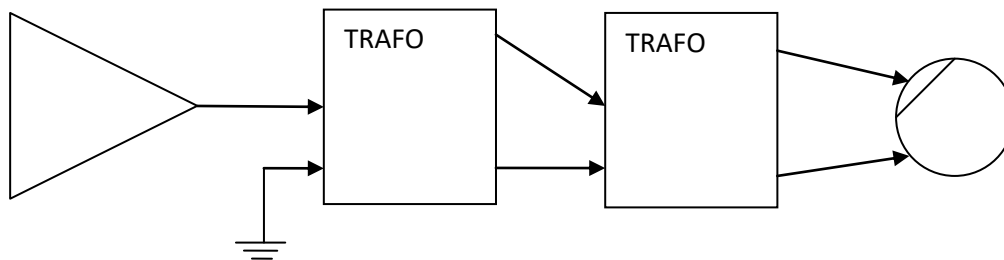


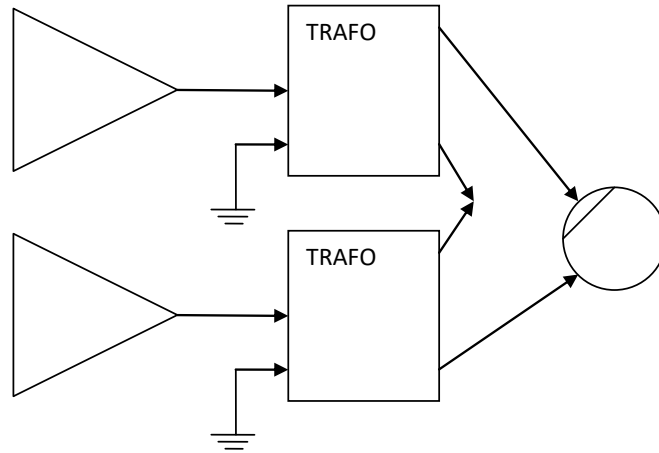
Figura 54: Esquema del circuito en MODO D

En el primer transformador, tal y como está en SHMUS, la entrada de señal se produce por el punto medio del primario. La salida del secundario de este transformador se introduce en el segundo transformador utilizando de nuevo la entrada intermedia del primario. Los transformadores son de relación 1:1, pero el punto intermedio del primario supone duplicar la tensión en el secundario. Por tanto, este circuito debería dar una relación total desde el amplificador al piezoeléctrico de 1:4.

Este modo se puede conseguir con el sistema SHMUS actual añadiendo externamente el transformador adicional.

### 6.2.5 MODO E.

Disposición de dos canales en paralelo según el siguiente esquema.



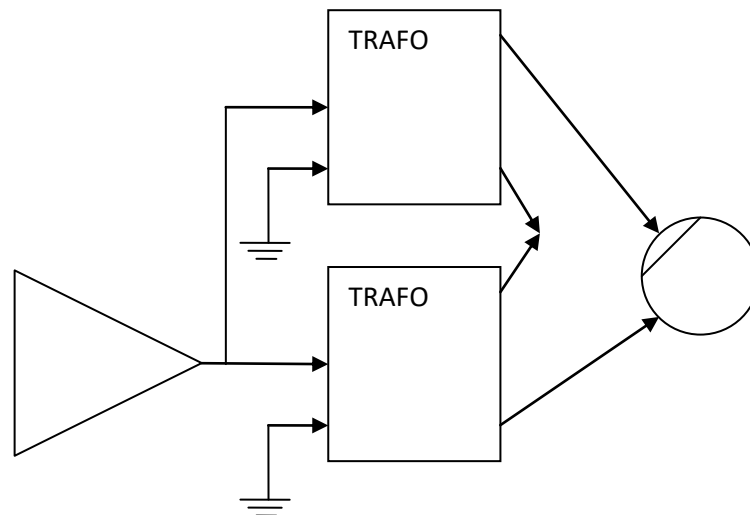
**Figura 55: Esquema del circuito en MODO E**

La señal aplicada al piezoeléctrico es la composición de las señales generadas en los dos canales. Luego la relación debería ser equivalente a 1:4. Es necesario programar la misma señal en los dos canales para que la señal generada sea del doble de amplitud.

Este modo se puede conseguir con el sistema SHMUS actual, modificando el cableado externo que se conecta al piezoeléctrico y sin añadir componentes.

### 6.2.6 MODO F.

Disposición de dos transformadores en paralelo según el siguiente esquema.



**Figura 56: Esquema del circuito en MODO F**

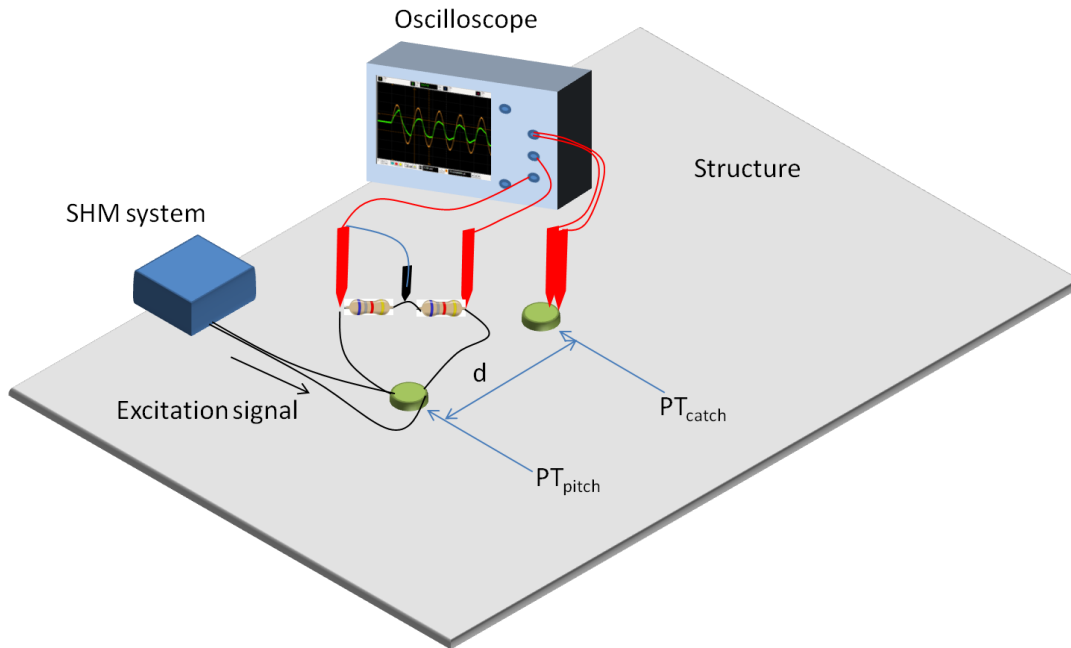
Dado que la potencia suministrada por los amplificadores operacionales dispuestos en SHMUS es bastante elevada, se puede proporcionar la misma señal a los dos transformadores a partir de un solo canal analógico de generación de señal.

Este modo requiere modificar el circuito electrónico de SHMUS.

A continuación una vez explicados los diferentes modos de mejora de la generación se va a detallar el procedimiento de ensayo.

Los ensayos se han realizado según la Figura 57. Los piezoeléctricos utilizados son el modelo SMD07T02R412WL de STEMiNC y la distancia de ensayo  $d=30$  cm. El material sobre el que están pegados en un material compuesto.

Para la adquisición de las señales de excitación, en previsión de grandes amplitudes, se han utilizado dos canales del osciloscopio. Entre los dos polos del piezoeléctrico de excitación se han puesto dos resistencias en serie de 470 Ohmios. En el punto medio se ha tomado la referencia y en los extremos se han colocado las sondas del osciloscopio. La medida se ha realizado mediante la resta de las dos señales. En la siguiente figura se muestra un esquema del modo de medida.



**Figura 57: Ensayos mejoras señal generada de SHMUS**

La adquisición de señal en el piezoelectrico catch se ha realizado con una sonda diferencial activa.

Los test se han realizado con señales de excitación máximas a 200 kHz y 300 kHz, ya que por anteriores ensayos se ha visto que son frecuencias significativas. A 200 kHz se consiguen las mayores amplitudes en la excitación del piezoelectrico pitch. A 300 kHz se consiguen las mayores amplitudes de adquisición (piezoelectrico catch).

En el siguiente apartado de resultados y análisis de los resultados se podrán ver los resultados obtenidos para los diferentes modos.

### 6.3 Resultados

Como se ha mencionado en el apartado anterior se han realizado con señales de excitación máximas a 200 kHz y 300 kHz, ya que por anteriores ensayos se ha visto que son frecuencias significativas. A 200 kHz se consiguen las mayores amplitudes en la excitación del piezoelectrico pitch. A 300 kHz se consiguen las mayores amplitudes de adquisición (piezoelectrico catch).

En las figuras siguientes la señal amarilla-blanca corresponde a la señal de excitación generada con SHMUS.

La señal verde corresponde a la señal de adquisición.

En la parte inferior de las figuras se puede ver el valor pico a pico máximo calculado por el osciloscopio.



### 6.3.1 Resultados del MODO A

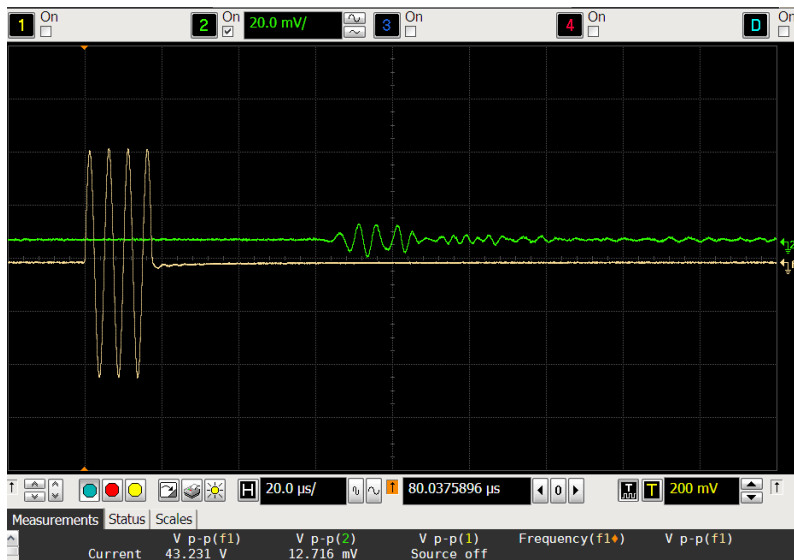


Figura 58: Test a 200 kHz en MODO A.

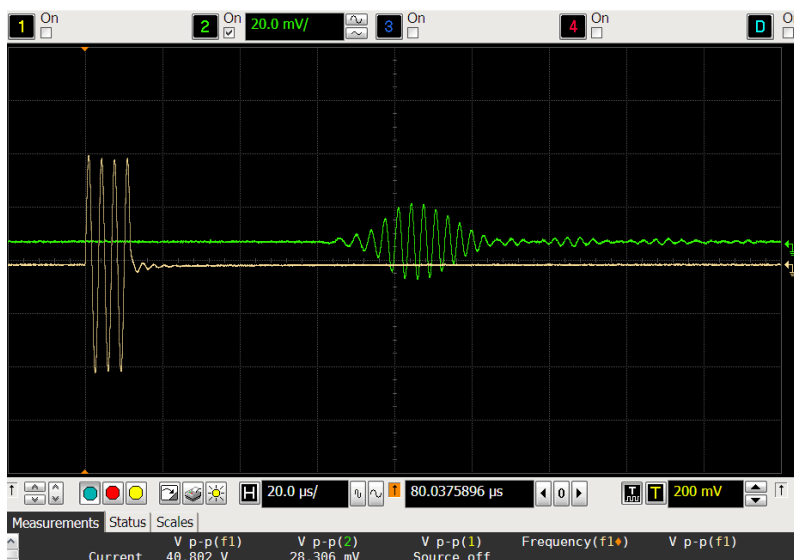


Figura 59. Test a 300 kHz en MODO A.

### 6.3.2 Resultados del MODO B

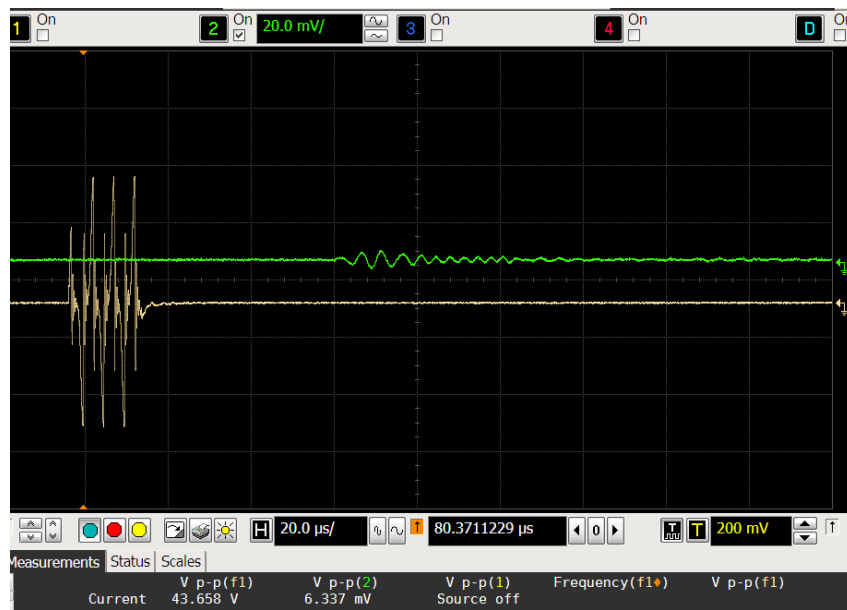


Figura 60. Test a 200 kHz en MODO B.

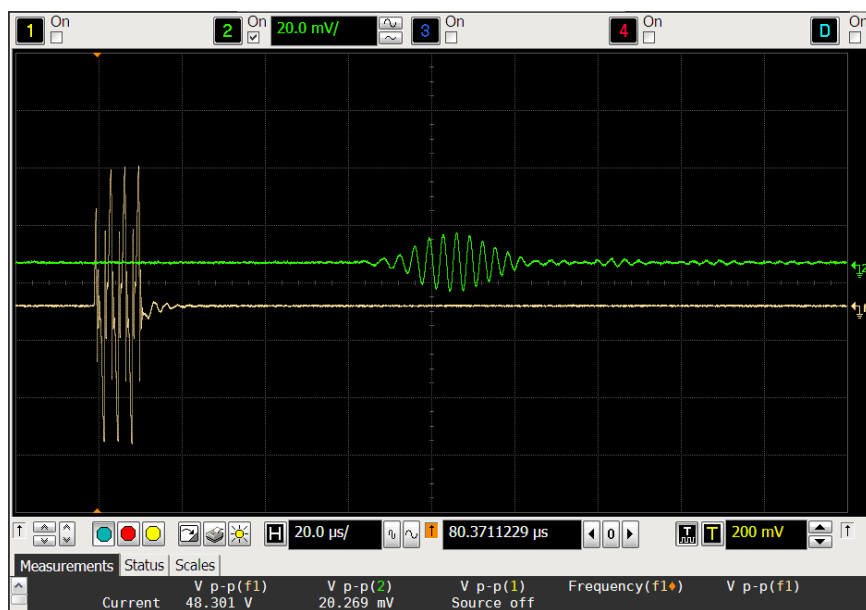


Figura 61. Test a 300 kHz en MODO B.

Las señales en este modo se deforman mucho y pierden su forma sinusoidal.

La amplitud de la señal de excitación debería haberse doblado hasta unos 80 voltios, pero ha quedado en 43.6 V.

Por estas razones parece que el transformador probado no conserva las características del original utilizado en SHMUS. El MODO C no se ha probado, ya que posiblemente se obtendrán también señales deformadas. Queda pendiente realizar ensayos con otros transformadores.

### 6.3.3 Resultados del MODO D

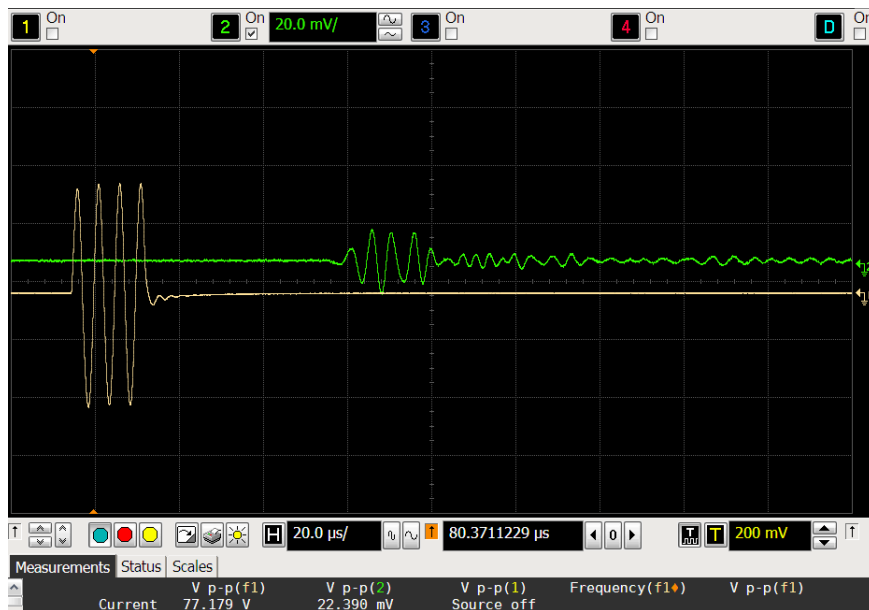


Figura 62. Test a 200 kHz en MODO D.

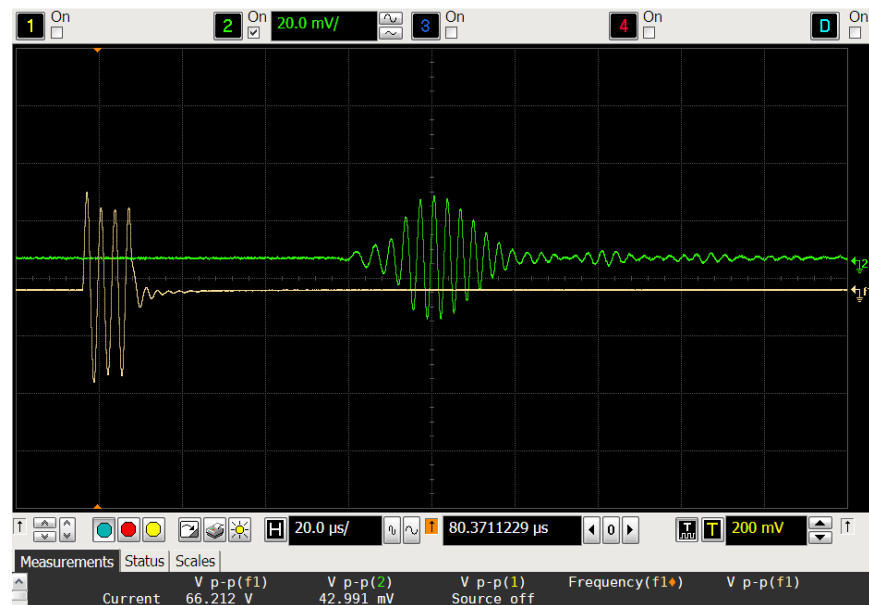


Figura 63. Test a 300 kHz en MODO D.

Con este modo se consigue un notable aumento de la amplitud máxima de la señal de excitación aunque no llega a doblarse respecto del MODO A como teóricamente cabía esperar. En consecuencia la señal adquirida también ha aumentado considerablemente.

Señales de excitación:

- A 200 kHz, pasa de 43,23 V a 77,18 V (78% de aumento)
- A 300 kHz, pasa de 40,88 V a 66,21 V (62% de aumento)

Señales adquiridas:

- A 200 kHz, pasa de 12,71 mV a 22,39 mV (76% de aumento)
- A 300 kHz, pasa de 28,31 mV a 42,99 mV (52% de aumento)

Se puede ver que la señal recibida aumenta en proporción parecida a la señal de excitación producida.

### 6.3.4 Resultados del MODO E

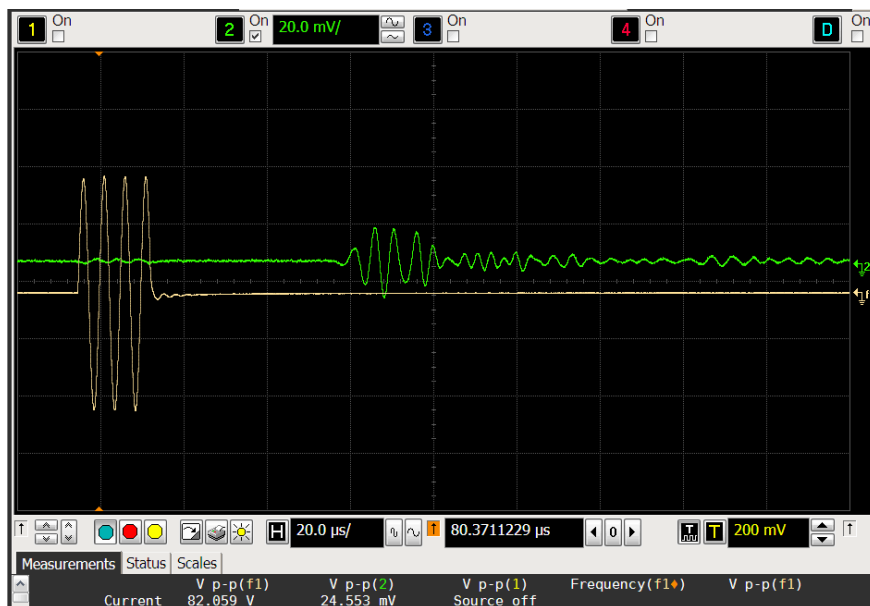
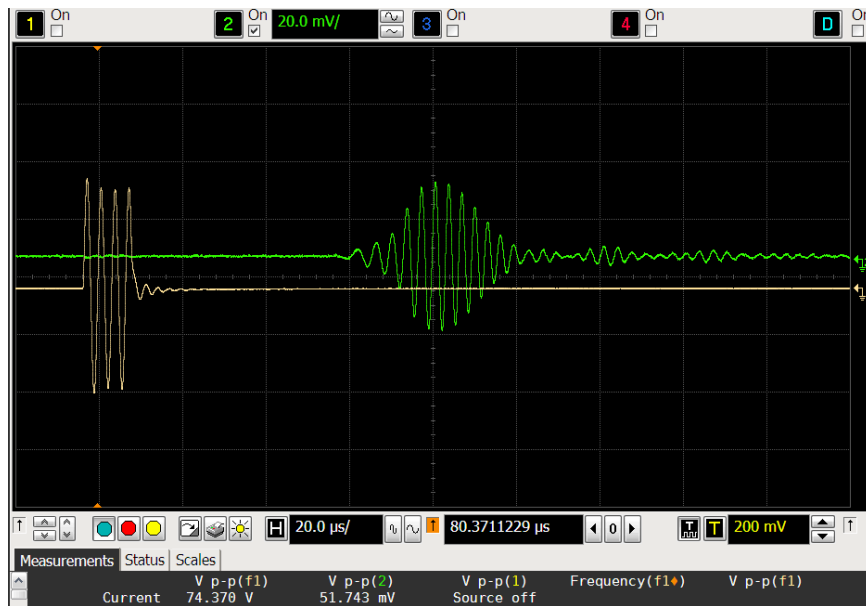


Figura 64. Test a 200 kHz en MODO E.



**Figura 65. Test a 300 kHz en MODO E.**

Este modo mejora todavía más las amplitudes conseguidas y se acerca al valor teórico de doblar los valores respecto del MODO A. La señal adquirida también aumenta notablemente.

Señales de excitación:

- A 200 kHz, pasa de 43,23 V a 82,06 V (90% de aumento)
- A 300 kHz, pasa de 40,88 V a 74,37 V (82% de aumento)

Señales adquiridas:

- A 200 kHz, pasa de 12,71 mV a 24,55 mV (93% de aumento)
- A 300 kHz, pasa de 28,31 mV a 51,74 mV (83% de aumento)

De nuevo la señal recibida aumenta en proporción parecida a la señal de excitación producida.

Este modo se ha probado juntando dos canales y casi se ha doblado la tensión generada. Como se aporta la energía de dos canales, cabe esperar que la potencia suministrada también pueda doblarse, manteniéndose la capacidad para producir la señal sin deformación.

Ante los buenos resultados obtenidos, este modo también se ha probado con 3 canales.

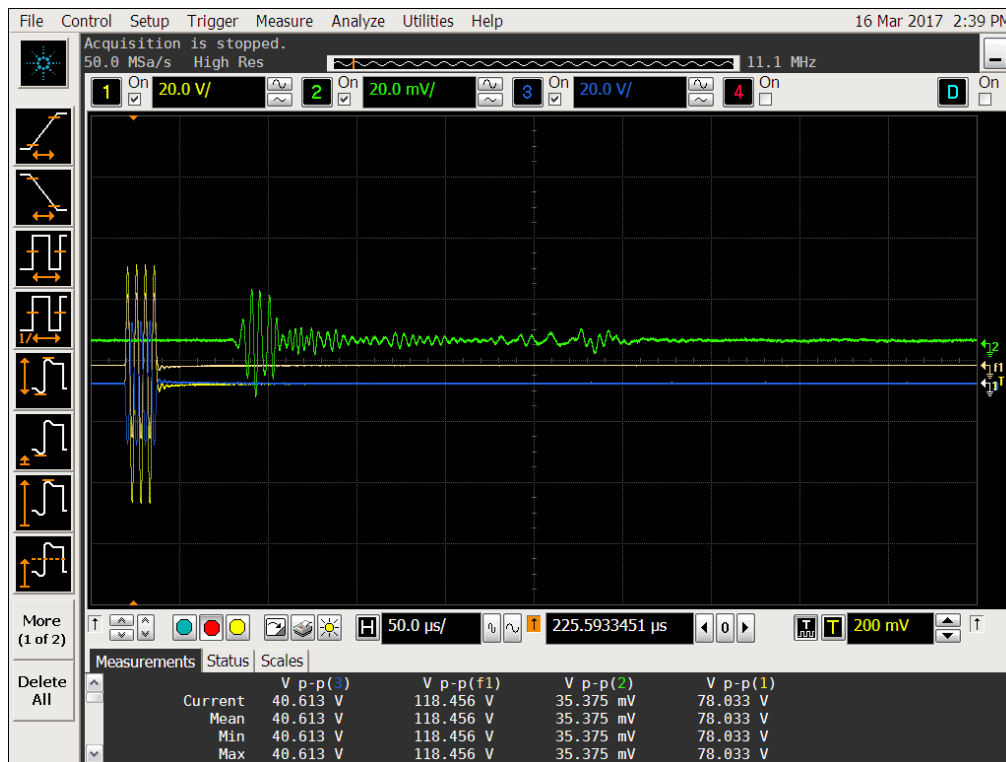


Figura 66. Test a 200 kHz en MODO E ampliado a tres canales.



Figura 67. Test a 300 kHz en MODO E ampliado a tres canales.

En la Figura 67 además de mostrarse el ensayo a 300 kHz con el MODO E se muestra la estadística calculada por el osciloscopio de 20 ensayo 20 consecutivos. Como se puede ver la diferencia máxima entre ensayos es inferior al 0,4 %, por lo que podemos considerar que son ensayos estables con alta repetitividad. Esta repetitividad la hemos observado en casi todos los ensayos realizados.

El resumen de los resultados del MODO E con tres canales es el siguiente:

Señales de excitación:

- A 200 kHz, pasa de 43,23 V a 118,46 V (174 % de aumento)
- A 300 kHz, pasa de 40,88 V a 104,55 V (155 % de aumento)

Señales adquiridas:

- A 200 kHz, pasa de 12,71 mV a 35,37 mV (178 % de aumento)
- A 300 kHz, pasa de 28,31 mV a 70,40 mV (148 % de aumento)

De estos datos se puede ver que el MODO E permite aumentar la tensión generada y en proporción parecida la tensión adquirida. Aunque esta progresión no es lineal, todavía se podría realizar este circuito cooperando más canales para aumentar la amplitud de la señal generada y adquirida. El límite lo determinaría la máxima tensión admitida por el piezoeléctrico.

### **6.3.5 Resultados del MODO F**

A priori este modo hacía presagiar unos resultados parecidos al MODO E pero menos costoso de cara a un nuevo desarrollo. Pero por el contrario los resultados encontrados han sido muy malos, por lo que se ha probado a realizar los ensayos sin piezoeléctricos.

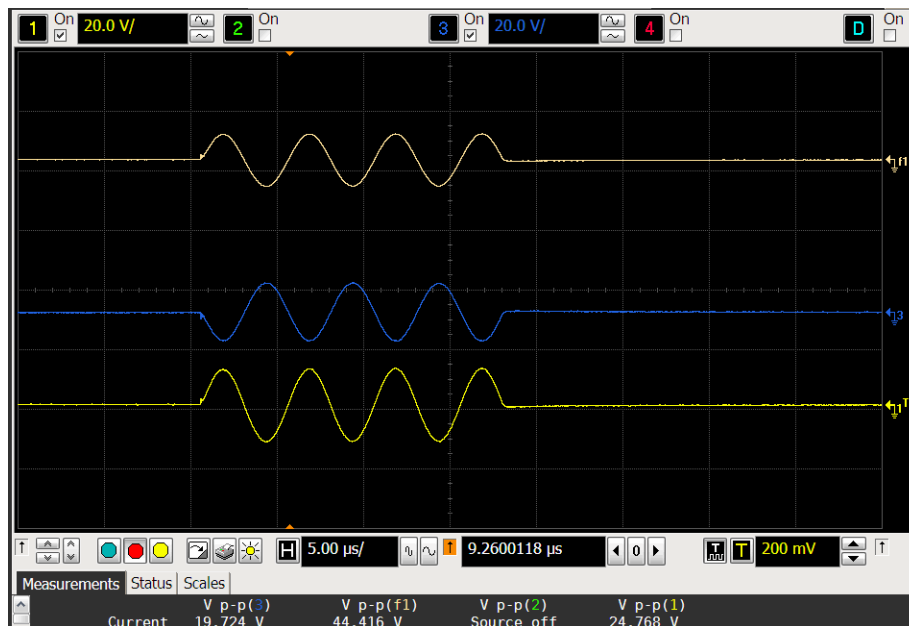


Figura 68. Test a 200 kHz en MODO F sin piezoeléctrico.

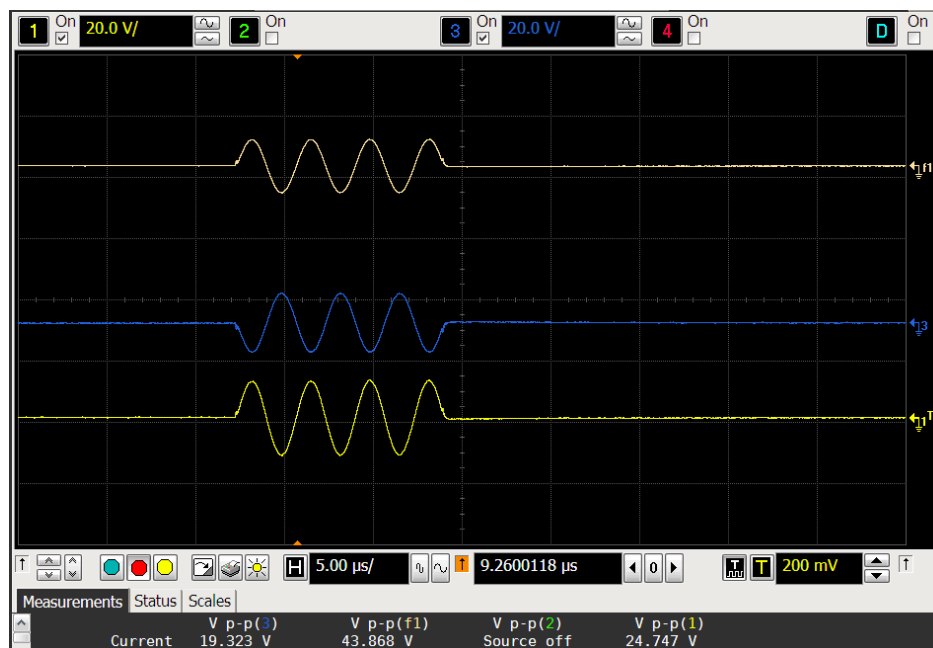


Figura 69. Test a 300 kHz en MODO F sin piezoeléctrico.

En la Figura 68 y Figura 69 se representa en el canal 1 (amarillo) la señal generada utilizando dos transformadores pero con un solo amplificador operacional. Como se puede ver la tensión generada es muy inferior al MODO A de referencia.

Se ha tomado la señal entre los dos transformadores, canal 3 (azul). Se puede observar que la forma de la señal generada por uno de los transformadores es



inversa y, por tanto, será negativa respecto de la señal generada. Calculando la función  $f_1$  (blanco-rosa) como diferencia entre las dos señales se obtiene una señal similar al modo de referencia. No se ha encontrado explicación a este hecho, por lo que debe de estudiar la causa por si alguna modificación puede contribuir a mejorarlos.

### 6.3.6 Comparación

Como se ha citado anteriormente algunos de los modos que se han estudiado no han dado los resultados esperados. En este apartado se va a realizar una comparación de los modos que mejores resultados han dado con el fin de determinar cuál es la mejor opción para mejorar el sistema de generación de SHMUS.

**Tabla 20: Comparación Modos en generación**

Generación	Modo A ( modo normal)	Modo D		Modo E	
	Voltaje (V)	Voltaje (V)	% mejora	Voltaje (V)	% mejora
200 kHz	43,23	77,18	78	82,06	90
300 kHz	40,88	66,21	62	74,37	82

**Tabla 21: Comparación Modos en adquisición**

Adquisición	Modo A ( modo normal)	Modo D		Modo E	
	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	% mejora	Voltaje (mV)	% mejora
200 kHz	12,71	22,39	76	24,55	93
300 kHz	28,31	42,99	52	51,74	83

Como se puede apreciar en la Tabla 20 y Tabla 21 el modo que implica mayor mejora es el Modo E, combinación de varios canales, con esta mejora casi es posible lograr doblar el valor de la tensión.

## 7 DESCRIPCIÓN DE TAREAS. DIAGRAMA DE GANTT

En este apartado se va a describir el programa de trabajo que se ha seguido hasta la entrega del TFM.

Para ello se definirán las tareas con una breve descripción, recursos humanos y materiales utilizados, duración e hitos.

### **Fase Análisis de proyectos SHM**

En esta fase simplemente se ha recopilado información relativa de proyectos de SHM previamente realizados y se estudiaron como estaban diseñados y cuáles eran sus características para poder definir los ensayos a realizar.

*Recursos Humanos:* Director de proyecto

Ingeniero Junior

*Recursos Materiales:* Ordenador de sobremesa Dell Precision T3500

*Duración:* 30 horas

*Hitos:* En este caso como solo se pretendía recopilar información no se ha establecido ningún hito.

### **Fase Definición ensayos**

En esta fase se ha analizado y estudiado la metodología que iban a seguir los ensayos, es decir, que tipos de ensayos se iban a realizar, como se iban a obtener los resultados y como iban a ser tratados los mismos.

Los datos son adquiridos mediante el osciloscopio en formato CSV para su posterior tratamiento en Excel, donde se llevarán a cabo las correspondientes comparaciones.

*Recursos Humanos:* Director de proyecto

Ingeniero Junior

*Recursos Materiales:* Ordenador de sobremesa Dell Precision T3500

*Duración:* 30 horas

*Hitos:* Se ha establecido un hito en esta fase para definir de forma definitiva la metodología de los ensayos que se van a realizar en el proyecto.

### **Fase Análisis de generación**

En esta fase se centra la generación de señales de excitación de ambos sistemas de monitorización de estructuras en diferentes materiales y para diferentes frecuencias, de tal manera que definan el rango de voltaje de cada uno de ellos para su posterior comparación.

Los ensayos se realizaron en vacío y aplicándoles una carga (piezoeléctrico).

Una vez realizados los ensayos se obtendrán los datos del osciloscopio y se trasladaran a Excel para su ser comparados ambos sistemas.

*Recursos Humanos:* Ingeniero Junior

*Recursos Materiales:* Ordenador de sobremesa Dell Precision T3500

Osciloscopio Infiniium

Sistema PAMELA III

Sistema SHMUS

*Duración:* 80 horas

*Hitos:* Se ha establecido un hito en esta fase para definir mediante una figura comparativa los rangos de voltaje de cada sistema.

### **Fase Análisis de adquisición**

En esta fase se centra la adquisición de las señales recibidas para unas determinadas señales de excitación en ambos sistemas de monitorización y en diferentes materiales.

Los ensayos se realizaron adquiriendo las señales en distintos piezoeléctricos situados a distintas distancias de la señal de excitación, lo cual permite ver como varía la señal adquirida en función de la distancia y el material. Una vez realizados los ensayos se obtendrán los datos del osciloscopio y se trasladaran a Excel para su ser comparados ambos sistemas.

*Recursos Humanos:* Ingeniero Junior

*Recursos Materiales:* Ordenador de sobremesa Dell Precision T3500

Osciloscopio Infiniium

Sistema PAMELA III

Sistema SHMUS

*Duración:* 90 horas

*Hitos:* Se ha establecido un hito en esta fase para definir mediante una figura comparativa los rangos de voltaje de cada sistema.

### **Fase Comparación de adquisición de SHMUS**

En esta fase se ha comparado la señal adquirida en un piezoeléctrico a una determinada distancia con el osciloscopio y con el SW de SHMUS.

Para poder ser comparadas ambas señales los datos obtenidos del SW de SHMUS han sido tratados para convertirlos en datos del mismo orden de magnitud obtenidos del osciloscopio para su posterior comparación.

*Recursos Humanos:* Ingeniero Junior

*Recursos Materiales:* Ordenador de sobremesa Dell Precision T3500

Osciloscopio Infiniium

Sistema SHMUS III

SW de SHMUS

*Duración:* 80 horas.

*Hitos:* Se ha establecido un hito en esta fase para definir mediante una figura comparativa las adquisiciones del osciloscopio y del SW de SHMUS para verificar su diseño y validez de las medidas.

### **Fase Optimización de SHMUS**

En esta fase se han estudiado la manera de poder optimizar SHMUS, para ello se ha tratado de aumentar el voltaje de las señales de generación mediante el acoplamiento en diferentes modos de los transformadores, aumentando las señales de generación se garantiza adquirir señales de mayores ordenes por lo que se optimizan tanto la generación y la adquisición.

También se ha introducido un detector de impacto lo cual permite al sistema detectar posibles impactos en las estructuras.

*Recursos Humanos:* Ingeniero Junior

*Recursos Materiales:* Ordenador de sobremesa Dell Precision T3500

Osciloscopio Infiniium

Sistema SHMUS

*Duración:* 60 horas

*Hitos:* Se ha establecido un hito en esta fase para verificar el correcto diseño y la funcionalidad de las modificaciones realizadas.

## **Fase Documentación**

En esta fase se ha realizado la memoria del proyecto para definir de forma unívocamente el proyecto. En la memoria se ha explicado el objetivo del proyecto, los beneficios que aporta el proyecto, la metodología, medios y técnicas básicas utilizadas, resultados y análisis de los resultados, descargo de datos, análisis riesgos y los anexos con los distintos ensayos realizados y pliego de condiciones.

*Recursos Humanos:* Ingeniero Junior

*Recursos Materiales:* Ordenador de sobremesa Dell Precision T3500

Microsoft Office 2007

*Duración:* 50 horas

*Hitos:* Se ha establecido un hito en esta fase para verificar que el proyecto está definido de forma correcta.

## **Otros Proyectos**

Para poder llevar a cabo este proyecto ha sido necesario la realización de 3 proyectos previamente, dos de ellos, el diseño HW y el diseño de la lógica programable de SHMUS ha sido llevado a cabo por el GDE y el tercero el diseño del sistema operativo y FW de SHMUS ha sido llevado por la Universidad de Madrid.

En la siguiente tabla se representan las distintas fases previamente explicadas:

**Tabla 22: Planificación**

Texto1	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Nombres de los recursos
<b>TFM</b>	<b>ANÁLISIS Y MEJORAS DE SHMUS</b>	<b>140 días</b>	<b>mié 01/02/17</b>	<b>vie 14/04/17</b>	<b>Mikel Ander Olivares</b>
<b>P.T.1</b>	<b>Análisis de proyectos SHM</b>	<b>10 días</b>	<b>mié 01/02/17</b>	<b>lun 06/02/17</b>	
T.1.1	Revisión de proyectos realizados	15 horas	mié 01/02/17	jue 02/02/17	
T.1.2	Recopilación y análisis de la información obtenida	15 horas	jue 02/02/17	lun 06/02/17	
<b>P.T.2</b>	<b>Definición de ensayos</b>	<b>10 días</b>	<b>lun 06/02/17</b>	<b>vie 10/02/17</b>	
T.2.1	Metodología de ensayo	12,5 horas	lun 06/02/17	mié 08/02/17	
T.2.2	Método de adquisición de los resultados	12,5 horas	mié 08/02/17	jue 09/02/17	
T.2.3	Medio de comparación de los resultados obtenidos	5 horas	jue 09/02/17	vie 10/02/17	
H.1	Definición de ensayos	0 días	vie 10/02/17	vie 10/02/17	
<b>P.T.3</b>	<b>Análisis de generación</b>	<b>26,67 días</b>	<b>vie 10/02/17</b>	<b>vie 24/02/17</b>	
T.3.1	Recopilación de datos de ensayos de generación de PAMELA	15 horas	vie 10/02/17	mar 14/02/17	
T.3.2	Recopilación de datos de ensayos de generación de SHMUS	15 horas	mar 14/02/17	jue 16/02/17	
T.3.3	Procesamiento de los datos obtenidos	30 horas	jue 16/02/17	mar 21/02/17	
T.3.4	Comparación de ambos sistemas con los datos obtenidos	20 horas	mié 22/02/17	vie 24/02/17	
H.2	Análisis de generación	0 días	vie 24/02/17	vie 24/02/17	
<b>P.T.4</b>	<b>Análisis de adquisición</b>	<b>30 días</b>	<b>vie 24/02/17</b>	<b>lun 13/03/17</b>	
T.4.1	Recopilación de datos de ensayos de adquisición de PAMELA	15 horas	vie 24/02/17	mar 28/02/17	
T.4.2	Recopilación de datos de ensayos de adquisición de SHMUS	15 horas	mar 28/02/17	jue 02/03/17	
T.4.3	Procesamiento de los datos obtenidos	40 horas	jue 02/03/17	jue 09/03/17	

T.4.4	Comparación de ambos sistemas con los datos obtenidos	20 horas	jue 09/03/17	lun 13/03/17	
H.3	Análisis de adquisición	0 días	lun 13/03/17	lun 13/03/17	
<b>P.T.5</b>	<b>Comparación de adquisiciones de SHMUS</b>	<b>26,67 días</b>	<b>lun 13/03/17</b>	<b>lun 27/03/17</b>	
T.5.1	Recopilación de datos de ensayos de adquisición de SHMUS	15 horas	lun 13/03/17	mié 15/03/17	
T.5.2	Recopilación de datos de ensayos de adquisición SW de SHMUS	15 horas	mié 15/03/17	vie 17/03/17	
T.5.3	Procesamiento de los datos obtenidos	30 horas	vie 17/03/17	jue 23/03/17	
T.5.4	Comparación de los resultados obtenido de ambas adquisiciones	20 horas	jue 23/03/17	lun 27/03/17	
H.4	Comparación de adquisiciones de SHMUS	0 días	lun 27/03/17	lun 27/03/17	
<b>P.T.6</b>	<b>Optimización de SHMUS</b>	<b>20 días</b>	<b>lun 27/03/17</b>	<b>jue 06/04/17</b>	
T.6.1	Definir mejoras	20 horas	lun 27/03/17	jue 30/03/17	
T.6.2	Realización de ensayos de posibles mejoras	20 horas	jue 30/03/17	lun 03/04/17	
T.6.3	Procesar y analizar los resultados obtenidos para validar las mejoras	20 horas	lun 03/04/17	jue 06/04/17	
H.5	Optimización de SHMUS	0 días	jue 06/04/17	jue 06/04/17	
<b>P.T.7</b>	<b>Documentación</b>	<b>16,67 días</b>	<b>jue 06/04/17</b>	<b>vie 14/04/17</b>	
T.7.1	Elaboración de la documentación	50 horas	jue 06/04/17	vie 14/04/17	
H.6	Trabajo Fin de Master finalizado	0 días	jue 06/04/17	jue 06/04/17	
P.1	<b>Diseño Hardware</b>	176 días?	lun 03/10/16	lun 02/01/17	GDE
P.2	<b>Diseño Lógica Programable</b>	176 días?	lun 03/10/16	lun 02/01/17	GDE
P.3	<b>Diseño Sistema Operativo y Firmware</b>	176 días?	lun 03/10/16	lun 02/01/17	Universidad Politécnica de Madrid (I2A2)

En la siguiente figura se representa el diagrama de Gantt:

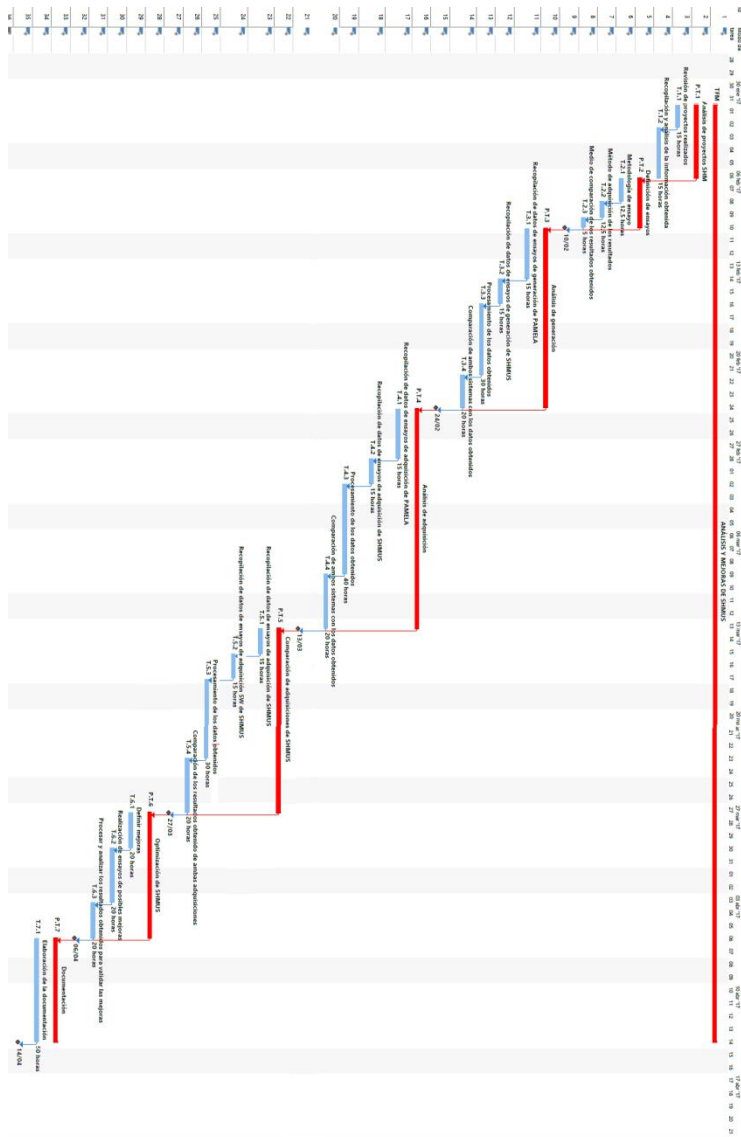


Figura 70: Diagrama Gantt



## 8 DESCARGO DE GASTOS

En este apartado se van a tratar los costes que ha supuesto la realización de este proyecto.

Para ello se dividirán los gastos en distintas partidas y se calculará los subtotales de cada una de ellas.

Al tratarse de un proyecto que analiza dos sistemas de monitorización de estructuras ya fabricados previamente en el GDE los únicos gastos a tener en cuenta son las horas internas de los recursos humanos y los gastos de los indirectos relacionados con los recursos necesarios para la realización de los ensayos.

No se tendrán en cuenta las amortizaciones de los activos fijos del GDE ya que al ser adquiridos hace más de 3 años, estos ya han sido amortizados antes de la realización del proyecto.

### Horas internas:

En la siguiente tabla se representan las horas que han utilizado para realizar el proyecto así como su tasa horaria.

**Tabla 23: Horas internas**

Puesto	Nº horas	€/h	Total(€)
Director de proyecto	60	60	3600
Ingeniero Junior	432	35	15120
SUBTOTAL			18720

**Gastos:**

En la siguiente tabla se representa todo lo que se ha utilizado durante el proyecto.

**Tabla 24: Gastos**

Material	Número de unidades	€/unidad	Total(€)
Cable Audio jack 3.5mm	20	1.95	39
Piezoeléctrico SMD07T02R412WL	100	2.4	240
SUBTOTAL			279

**Descargo de gastos total:**

En la siguiente tabla se representa el presupuesto total del proyecto.

**Tabla 25: Descargo de gastos total**

Costes Directos	18999 €
Coste Indirectos (15%)	2849.85 €
TOTAL	21848.85 €

**Nota:** En la partida de costes indirectos se han tenido en cuenta todos los gastos no tangibles en el desarrollo del proyecto como por ejemplo la luz, Internet, material de oficina ...

## 9 ANÁLISIS DE RIESGOS

En la ejecución del proyecto existen diversos riesgos genéricos que, en mayor o menor medida, pueden llegar a afectar a la correcta ejecución del trabajo, o al menos retrasar la finalización del mismo en el plazo inicialmente fijado. Para evitar que estos riesgos provoquen situaciones indeseadas, es conveniente disponer de un plan preventivo desde el comienzo, con el fin de no dar lugar a que se produzcan este tipo de problemas. No obstante, en este apartado también se van a tratar los riesgos futuros del desarrollo del proyecto, en la mayoría de las ocasiones, garantizar que algunos de los riesgos no puedan llegarse a dar jamás es prácticamente imposible, por eso se debe establecer, en la medida de lo posible, un plan de mitigación ante los mismos.

En los próximos apartados se van a analizar algunos de los posibles riesgos que pueden ocasionar problemas, clasificados por su naturaleza.

Se distinguen tres tipos:

- Riesgos de fiabilidad
- Riesgos futuros
- Riesgos genéricos
  - Riesgos de problemas de salud del personal.
  - Riesgos de ruptura o avería del material HW.
  - Riesgo de falta de acceso a los servidores o problemas de red local.

Para cada uno de ellos también se comentan los planes de prevención o mitigación pensados

Para ello se han de analizar los factores que se tienen en cuenta para evaluar el impacto de los riesgos, estos factores son los siguientes:

- Probabilidad de ocurrencia (P):
  - Baja: 0.1
  - Media: 0.3
  - Alta: 0.5
- Impacto en caso de ocurrencia (I):
  - Bajo: 0.1
  - Medio: 0.3
  - Alto: 0.5

El impacto final será el producto de ambos factores.

## 9.1 Riesgos de fiabilidad

Uno de los riesgos más importante que pueden ocurrir y se debe de tener en cuenta es la falta de fiabilidad de SHMUS, esto podría ser un riesgos muy importante que podría comprometer todo el desarrollo del proyecto, ya que implicaría que el trabajo desarrollado no tendría ningún valor.

- P: Baja
- I: Alto

❖ **Impacto final: 0.05**

### Plan de mitigación:

Para reducir la probabilidad que puede suponer este riesgo es conveniente que las pruebas realizadas a SHMUS se realicen días independientes y que los resultados que se obtengan sean idénticos y se muestre una repetitividad en los ensayos.

## 9.2 Riesgos futuros

Otro riesgo que se ha tratado es el riesgo que supone que el desarrollo de este proyecto, por falta de interés de las entidades, quede en desuso.

Este riesgo es el más complejo de evaluar debido a que depende de entidades externas, a las que pueda interesar un SHM, que se continúe con el desarrollo de SHMUS.

- P: Media
- I: Medio

❖ **Impacto final: 0.09**

### Plan de mitigación:

Para reducir el impacto y la probabilidad que puede suponer este riesgo SHMUS se debe de dar a conocer en distintos medios, como pueden ser publicaciones o congresos, para así llamar la atención de entidades interesadas en sistemas de monitorización de estructuras.

## 9.3 Riesgos genéricos

### 9.3.1 Riesgos de problemas de salud del personal

Uno de los riesgos genéricos más importante que pueden ocurrir y se debe de tener en cuenta es la ausencia del ingeniero encargado de desarrollar el proyecto

debido a algún problema de salud, esto podría ser un riesgo muy importante que podría comprometer los plazos de desarrollo del proyecto.

- P: Baja
- I: Bajo

❖ **Impacto final: 0.01**

**Plan de mitigación:**

Para reducir el impacto que puede suponer este riesgo desde el punto de vista de una empresa es conveniente que no sea únicamente un ingeniero el que esté capacitado para realizar las numerosas pruebas sino que existan más ingenieros capaces de llevar a cabo las mismas, como se trata de un trabajo de fin de máster esto no sería posible aplicarse en este caso.

### **9.3.2 Riesgos de ruptura o avería HW**

Como se ha mencionado anteriormente para la realización de los ensayos es necesario un ordenador, un osciloscopio, ambos sistemas SHM (PAMELA III y SHMUS), fuente de alimentación, estructuras y demás herramientas necesarias, por eso una avería en alguna de estas herramientas disponibles puede suponer importantes retrasos.

- P: Baja
- I: Bajo

❖ **Impacto final: 0.01**

**Plan de mitigación:**

Ante esta posibilidad, resulta conveniente disponer de un servicio técnico rápido y eficaz, que atienda adecuadamente cualquier demanda de reparación que se le solicite de las herramientas como el ordenador, osciloscopio y fuente de alimentación. Mientras tanto, puede venir bien disponer de otro ordenador, osciloscopio y fuente de alimentación de sustitución que permita seguir trabajando mientras duran las tareas de reparación del otro.

Sin embargo si alguno de los SHM se estropea no cabe la posibilidad de acudir a un servicio técnico, ya que son sistemas desarrollados en el GDE, por lo que será necesaria la rápida actuación de los ingenieros para localizar y corregir los posibles errores localizados en dichos sistemas, cabe destacar que no solo se dispone de un único sistema PAMELA III y un único sistema SHMUS, pero aun así es conveniente identificar la causa del problema para evitar que se vuelva a repetir, ya que la causa puede ser por un error humano a la hora de realizar el ensayo o por deterioro de algún componente de los sistemas. En caso de

deterioro de algún componente de los sistemas es conveniente disponer de recambios para proceder a su sustitución en caso de necesidad.

### 9.3.3 Riesgo de falta de acceso a los servidores o problemas de red local

Uno de los problemas que podría llegarse a producir es una la falta de acceso a los datos obtenidos por un fallo en el sistema de red de la universidad.

Esto también podría suponer que no se pudiera verificar la licencia del software y por lo tanto no poder trabajar con el mismo, este riesgo también podría comprometer los plazos de desarrollo del proyecto.

- P: Baja
- I: Bajo

❖ **Impacto final: 0.01**

#### **Plan de mitigación:**

En principio este es un riesgo que no es posible controlar al cien por cien, ya que no depende de nosotros, en caso de la caída de los servidores del software o bien la red de la EHU/UPV no se puede hacer nada, simplemente esperar que la avería sea puntual y se restablezca el servicio lo antes posible.

## 9.4 Resumen y matriz de riesgos

Se va a mostrar en una matriz de una forma sencilla, la gravedad de cada riesgo y su probabilidad de ocurrencia. Con ésta se trata de determinar aquellos problemas que pueden dificultar en mayor medida el desarrollo del trabajo fin de máster, para así centrarse en mayor grado en la obtención de una posible solución ante los más perjudiciales.

Hay riesgos que, aun siendo poco probables pueden llegar a ser graves, mientras que, otros que tienen una mayor probabilidad de ocurrencia pueden solucionarse más fácilmente. En la matriz de riesgos que se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran tres colores, los riesgos menos preocupantes son los de color verde, luego los amarillos y los más graves los rojos. Dentro de cada uno de estos colores existen varios grados, la diferencia entre ellos estriba en la probabilidad de ocurrencia de cada contratiempo. En este caso, el más preocupante será aquel situado más a la derecha de la fila, esto es, el más probable dentro de un mismo grado de gravedad.

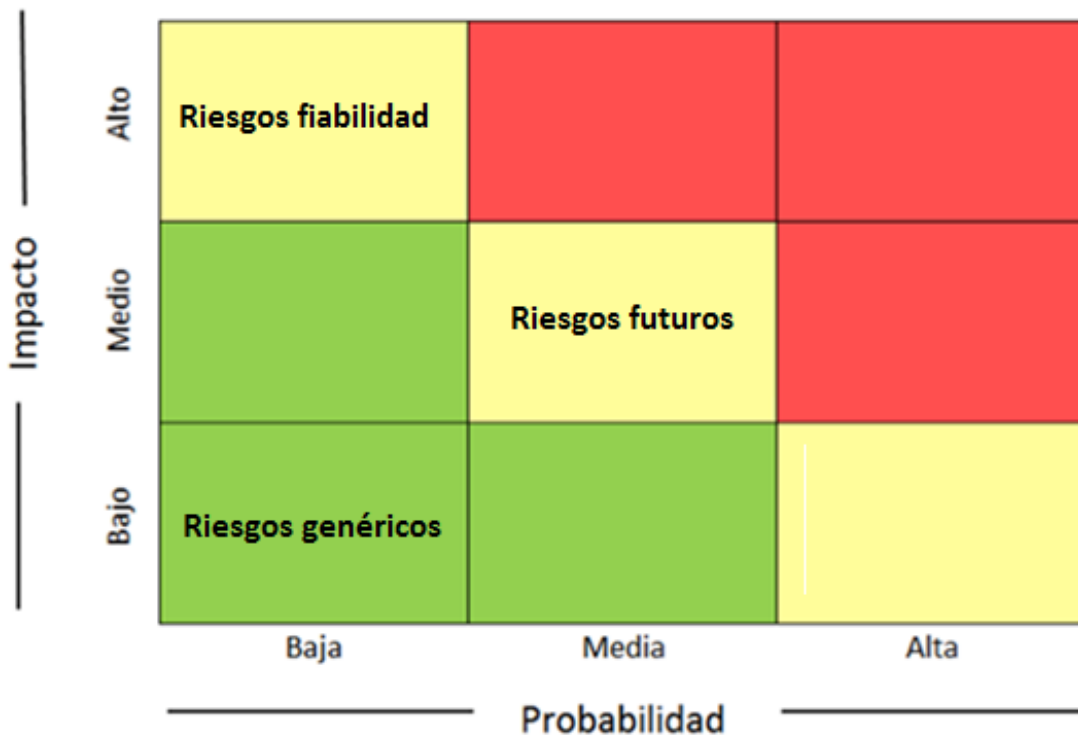


Figura 71: Matriz de riesgos

## 10 CONCLUSIONES

Tras la realización de este proyecto se han obtenido las siguientes conclusiones:

De los ensayos realizados en el bloque de generación se puede concluir que SHMUS es un sistema muy estable ya que permite trabajar en un gran rango de frecuencias con valores en torno a los 40 Vpp y su comportamiento es prácticamente idéntico independientemente de en qué estructura se realicen los ensayos manteniendo unos niveles de tensión aceptables para ambas estructuras y superiores en la estructura de material compuesto en comparación con PAMELA III, el cual en material compuesto no es capaz de mantener los niveles de tensión que obtiene en la estructura de material de aluminio.

De los ensayos realizados en el bloque de generación se puede concluir el correcto funcionamiento del sistema de adquisición de SHMUS, ya que al comparar los resultados obtenidos con los de un osciloscopio los resultados son iguales, y los resultados obtenidos de los ensayos muestran niveles de tensión al igual que en el caso anterior aceptables, no obstante en estructuras de material compuesta es conveniente mejorar los niveles de tensión para mejorar los niveles de adquisición. Comparándolo con PAMELA III en este bloque se aprecia una gran diferencia ya que PAMELA III al tener que reducir su tensión máxima en la generación de las señales los resultados obtenidos en la adquisición son muy pequeños con valores cercanos a los del ruido, imposibilitando en muchos casos su correcta apreciación en la adquisición.

Del desarrollo de los ensayos de detección de impacto se ha verificado el correcto diseño y funcionamiento del mismo en la versión 2 de SHMUS, y es necesario desarrollar el SW para su tratamiento en la FPGA en futuras versiones de SHMUS.

Para finalizar, de las mejoras de SHMUS se puede concluir que de los numerosos métodos probados para mejorar la generación de SHMUS solo dos han tenido éxito, ambos se realizan de modo interno interconectando 2 canales en serie mediante SW y un cable que se diseñó en el GDE, ambas mejoras han supuesto un incremento en el sistema de generación de SHMUS, estas mejoras suponen un incremento de más del 80% del sistema de generación de SHMUS, llegando a alcanzar los 75 Vpp en el peor de los casos.

Como conclusión final, el desarrollo de este proyecto me ha supuesto un gran aprendizaje en puesta en marcha y testeo de equipos y espero que sirva para bases futuras de nuevos diseños de monitorización de estructuras.



## FUENTES DE INFORMACIÓN

En este apartado se va a citar las distintas fuentes de información que se han utilizado para el desarrollo del proyecto. Estas fuentes han sido de diferentes tipos, bien libros de texto, artículos o páginas web.

L. C. Martínez, «Nuevas tecnologías electrónicas para la monitorización de la integridad estructural en aeronáutica,» UPV/EHU, 2011.

P. M. MONJE, L. CASADO, G. ARANGUREN, V. COKONAJ, E. BARRERA y M. RUIZ, «Integrated Electronic System for Ultrasonic,» *6th European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2012.

Wieslaw Staszewski, Christian Boller y Geof Tomlinson, <<Health Monitoring of Aerospace Structures Smart Sensor Technologies and Signal Processing>>

Björn Richter, Jens Twiefel, Jörg Wallaschek, <<Piezoelectric Equivalent Circuit Models>>. In *Energy Harvesting Technologies*. Shashank Priya and Daniel J. Inman Editors, Springer. Cap. 4. 2009.

## ANEXO I: RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

En este apartado se representan las hojas de Excel y las capturas del osciloscopio de los datos recogidos de los ensayos realizados.

Este apartado está adjunto en el archivo Anexo I.zip.