



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

Grado en Ingeniería Mecánica

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE
VIBRACIONES MECÁNICAS BASADO EN LabVIEW Y EN LA
TARJETA DE ADQUISICIÓN NI 9234**

Autor:

Muñoz Rodríguez, Juan Fernando

Tutor:

**Del Val Puente, Lara
Dpto. CMelM
Área de Ingeniería Mecánica**

Valladolid, Mayo, 2021.





AGRADECIMIENTOS:

En primer lugar doy las gracias a mi familia, mi padre y mi madre, por su apoyo incondicional a lo largo de este tedioso proceso, siempre han confiado en mí y gracias a ellos se ha terminado. A mi novia Geles por aguantarme siempre, animarme y darme fuerzas en épocas en las que flaqueaban bastante.

No me olvido de mi tutora y amiga Lara del Val, quien me ha formado desde el inicio en la herramienta informática utilizada en este TFG, LabVIEW. Muchas han sido las dudas, y siempre pendiente, ha hecho que la carga de este TFG se llevase de manera más liviana.

A Marta Herráez por enseñarme, encaminarme e iniciarme en el complejo mundo de las vibraciones, dado que yo era primerizo en ello cuando comencé este TFG.







RESUMEN:

Este TFG se ha construido con el propósito de elaborar un programa en lenguaje LabVIEW que, de manera conjunta con el montaje de una cadena de medida de vibraciones, sea capaz de medir y procesar señales de excitación y respuestas vibracionales de piezas, en dominios temporales y de frecuencia. Este programa elaborado obtiene las Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRF), en términos de Inertancia, Movilidad y Receptancia, presentando una interfaz sencilla para su uso didáctico.

PALABRAS CLAVE:

LabVIEW, vibraciones, medir, procesado de señal, FRF.

ABSTRACT:

This TFG has been built with the purpose of developing a program in LabVIEW language that, together with the assembly of a vibration measurement chain, is capable of measuring and processing excitation signals and vibrational responses of parts, in time and frequency domains. This elaborated program obtains the Frequency Response Functions (FRF), in terms of Inertance, Mobility and Reception, presenting a simple interface for its didactic use.

KEYWORDS:

LabVIEW, vibrations, measure, signal processing, FRF.





INDICE:

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	9
1.1. Introducción general.....	9
1.2. Objetivos.....	11
2. CONCEPTOS TEORICOS.....	13
2.1. Entorno LabVIEW.....	13
2.2. Conceptos matemáticos principales.....	15
2.2.1. Transformada de Fourier.....	15
2.2.2. Transformada discreta de Fourier (DFT) y Transformada rápida de Fourier (FFT).....	16
2.3. Procesado digital de señal.....	17
2.3.1. Frecuencia de Muestreo y teorema de Nyquist.....	17
2.3.2. Función de respuesta en frecuencia FRF.....	18
2.3.3. Inertancia, Movilidad y Receptancia.....	19
2.3.4. Errores asociados al procesado de señal: Aliasing, Leakage y Picket Fence.....	20
2.3.5. Ventanas.....	23
3. CADENA DE MEDIDA DE VIBRACIONES.....	25
3.1. Medida de la excitación.....	26
3.1.1. Martillo PCB 086C03.....	26
3.2. Medida de la respuesta.....	28
3.2.1. Acelerómetro Brüel & Kjaer 4393.....	28
3.3. Acondicionador de señal Brüel & Kjaer 2635.....	31
3.4. Tarjeta de adquisición de datos NI 9234.....	33
3.5. Chasis NI 9174.....	34
4. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE ESTIMACION DE INERTANCIAS.....	37
4.1. Funciones y estructuras básicas de LabVIEW utilizadas.....	37
4.2. Funciones de programa. Implementación software.....	39
4.3. Interfaz de usuario.....	55
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO.....	61
5.1. Conclusiones.....	61
5.2. Líneas de trabajo futuro.....	62
6. BIBLIOGRAFÍA.....	63





ANEXO A: MANUAL DE USUARIO.....	65
ANEXO B: COMPARATIVO DE VENTANAS.....	81
ANEXO C: PROGRAMA COMPLETO.....	91
C.1 Diagrama de bloques.....	91
C.2 Panel de control.....	92





1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.

Las vibraciones están presentes de muy diferentes formas en nuestro entorno; podemos encontrarlas desde en nuestro cuerpo, en forma de oscilaciones de baja frecuencia, en corazón y pulmones, y oscilaciones de alta frecuencia, en nuestro oído, hasta vibraciones en sistemas mecánicos, ocasionadas por diferentes motivos. Cualquier tipo de desequilibrio en estos sistemas mecánicos ocasiona vibraciones. Éstas se encuentran también en sistemas estructurales, y pueden ser debidas a diferentes tipos de movimientos producidos en ellas. Posibles ejemplos serían, camiones al circular sobre dichas estructuras o a fenómenos naturales como seísmos o huracanes.

Las vibraciones en ciertas ocasiones son indeseables, como ejemplo de ello, podemos tomar la medición con instrumentos ultra precisos, como podría ser un microscopio electrónico, en el cual, una mínima perturbación debida a una vibración podría ocasionar resultados nefastos; o en el ruido que ocasionan las vibraciones en un vehículo, éste puede ser molesto para el cliente, y el fabricante ha de reducirlo al máximo. En este caso el ruido ocasionado por las vibraciones es molesto y no deseado, pero no siempre es así, no olvidemos que la música que escuchamos también es ocasionada, de igual modo, por una vibración [Balachandran, 2005].

Estos fenómenos vibratorios, en numerosas ocasiones, son beneficiosos, un ejemplo podría ser el de un reloj atómico, un mezclador de pintura, instrumentos ultrasónicos utilizados en cirugía, sirenas o alarmas.

Es probable que el interés por estos fenómenos surgiera en India y China hacia el año 4000 a.C. debido al surgimiento de los instrumentos musicales. Según datan estudios arqueológicos realizados en las tumbas reales de Egipto, hacia el año 3000 a.C. ya existían instrumentos de cuerda. Uno de los primeros científicos que estudió estos fenómenos debidos a estos instrumentos fue Pitágoras. Hacia el año 582 a.C., demostró que si dos cuerdas idénticas están sometidas a tensiones iguales, y que si una es la mitad de longitud de la otra, los tonos que producen están separados una octava [Balachandran, 2005] (intervalo de ocho grados entre dos notas de la escala musical) [Web 1].

Otro científico interesado por el fenómeno de las vibraciones fue Galileo Galilei. Fue el primero en demostrar que el tono (impresión que produce la frecuencia de vibración a la que se manifiesta una determinada onda sonora) [Sanz, 2005] se relaciona con la frecuencia de vibración. Galileo estableció también las bases de los estudios en vibraciones basándose en el movimiento de una lámpara en la catedral de Pisa en el año 1583. Observó que el periodo





del movimiento era independiente de la amplitud de la oscilación de dicha lámpara. Esta propiedad se cumple en todos los sistemas de tipo lineal [Balachandran, 2005].

El ruido anormal producido por una máquina nos indica un defecto en ella (mal alineamiento de un eje, cojinetes o rodamientos desgastados, holguras en ciertas piezas) o un posible intervalo de mantenimiento cercano, este ruido normalmente es debido a vibraciones [Lyon, 1986].

Cuando una máquina está formada por diferentes mecanismos, estos ocasionan ruidos o vibraciones propios de cada uno, lo que produce que las vibraciones anómalas de un mecanismo puedan inferir en el funcionamiento de alguno de los otros, produciendo un fallo en cadena de la máquina y ocasionando un sobrecoste por no haber identificado la vibración inicial, de ahí que sea tan importante una buena diagnosis y control de las máquinas [Lyon, 1986].

A la hora de realizar un mantenimiento en una máquina existen dos tipos de análisis, la diagnosis mecánica o el mantenimiento predictivo, la gran diferencia entre estos dos es, a grandes rasgos, que en el primero el fallo en la máquina ya ha ocurrido y se intenta solucionar, y en el segundo se intenta predecir el error antes de que ocurra [Wowk, 1991].

A la hora de diagnosticar el mal funcionamiento de una máquina, suelen utilizarse diversas herramientas, una de ellas es el análisis del espectro en frecuencia, dado por la Transformada de Fourier. Este tipo de tecnología empezó a implantarse a partir del año 1970 [Wowk, 1991]. Las herramientas iniciales eran de gran tamaño, coste y extensas botoneras con grandes submenús, en definitiva muy complejas de utilizar, poco a poco fueron reduciendo su tamaño hasta ser portátiles y bastante manejables. La manera de visualizar que algo no funciona como debe en la máquina o elemento analizado se reduce a una gráfica amplitud-frecuencia, en la cual aparecen picos, cada uno de ellos asociado a defectos específicos. Si este espectro cambia en cada una de las monitorizaciones que se hagan significa un mantenimiento anómalo. Debemos tener en cuenta que a la hora de analizar vibraciones ocasionadas en una máquina, dicha máquina en su funcionamiento diario puede ser muy ruidosa y vibrante, pero dentro de todo ese comportamiento puede tener una vibración, cuyo ruido asociado sea imperceptible al oído humano y que pueda ocasionar un fallo fatal. De ahí el uso de estas herramientas y del concienzudo mantenimiento que se ha de llevar [Wowk, 1991].

Otro tipo de análisis utilizado en el campo estructural y aeroespacial, es el análisis modal, este tipo de análisis se basa en comprobar qué comportamiento tiene una estructura o componente al aplicarle ciertas





solicitaciones en lugares que previamente se sabe pueden ser problemáticos. La manera de realizarlo es colocar agitadores o martillos mecánicos en esos lugares y comprobar el comportamiento del sistema analizado [Wowk, 1991].

1.2. OBJETIVOS:

El trabajo consiste en la realización de una aplicación que permita hacer un análisis vibratorio de una pieza a través de un software de programación gráfica, LabVIEW 2018. En concreto, la aplicación permitirá evaluar la función de respuesta vibratoria (función de transferencia) de la pieza, para que después se puedan analizar distintos parámetros vibratorios como las frecuencias de resonancia, las deformadas modales y los factores de amortiguamiento.

Este Trabajo Fin de Grado se ha realizado ante la necesidad de actualizar un montaje utilizado de manera didáctica en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones, del área de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingenierías Industriales, de la Universidad de Valladolid. La función de dicho montaje es la determinación experimental de Funciones de Respuesta Vibratoria FRF de una pieza. Con este montaje, se enseña a los alumnos cómo determinar experimentalmente estas funciones FRF, aunque servirá también para cualquier aplicación real industrial. La actualización consistirá en la utilización de un hardware más moderno y un software de programación gráfica, LabVIEW, que sustituirá al actual analizador FFT de dos canales, de uso en el laboratorio antes mencionado.

Los objetivos que se persiguen a la hora de afrontar la realización de este TFG son:

- 1- Montaje de una cadena de medida de Funciones de Respuesta en Frecuencia vibratorias que permita analizar, señales de excitación, así como señales vibratorias de respuesta, tanto en el dominio temporal como en el dominio de las frecuencias.
- 2- El programa debe tener una interfaz de usuario clara, descriptiva y sencilla. Ésta debe ser manejada por un usuario que se inicia en el mundo de la medida en vibraciones. En concreto, el programa debe ser didáctico y de manejo sencillo para un estudiante de Grado de una Escuela de Ingenieros. El alumno debe poder interactuar con el programa para así poder asimilar los conceptos impartidos, de esta manera la enseñanza será más dinámica.
- 3- Se ha establecido que ha de realizarse un manual de usuario, que puede verse en el Anexo A. Este ha de ser gráfico y de fácil lectura, para que cualquier nuevo usuario pueda tanto, montar y desmontar la





cadena de medida, como configurar las tareas y funciones que este programa es capaz de ejecutar.

- 4- El programa debe representar con claridad las funciones de excitación, respuesta, FRF (en sus tres versiones: Inertancia, Movilidad y Receptancia) y en sus tres posibles representaciones (módulo y fase, parte real y parte imaginaria, y diagrama de Nyquist), así como la función de coherencia asociada a la medida.
- 5- Se ha establecido que en el código del programa se introduzcan comentarios para que pueda visualizarse el proceso que éste sigue, de esta manera las posibles actualizaciones que se hagan posteriormente se realizarán de manera más eficiente.

Como objetivo personal para afrontar con éxito los objetivos antes descritos, se establece, la formación en el programa con el cual va a elaborarse este TFG, LabVIEW, además de ésta, se estima oportuna una formación más específica en el campo del análisis modal y de las vibraciones.





2. CONCEPTOS TEORICOS:

2.1. ENTORNO LABVIEW:

LabVIEW, siglas que significan Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, es un entorno de programación gráfico, mediante el cual se va a realizar el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado. LabVIEW es un sistema multiplataforma, funcional para cualquier sistema operativo (Mac, Windows, Linux).

La empresa que desarrolló este programa fue National Instruments (NI), fundada en el año 1976 en Austin, Texas. Sus primeros productos eran dispositivos para el bus de instrumentación GPIB (General Purpose Instrumentation Bus); bus de datos digital de corto rango, utilizado para conectar osciloscopios y demás instrumental. Fue en 1983 cuando comenzó el desarrollo de lo que sería más tarde su producto principal, LabVIEW. No sería hasta 1986 cuando este programa vio la luz en su primer desarrollo, conocido como LabVIEW 1.0, solamente útil para equipos Mac, muy extendidos en aquella época, puesto que disponían de interfaz gráfica, algo que caracteriza a este software.

En un principio la idea que se tuvo al diseñar LabVIEW era la de que este programa fuera a los ingenieros lo que la hoja de cálculo fue en sus inicios a economistas y analistas financieros, un programa que facilitara al ingeniero el desarrollo de programas de control de una manera más visual y también más rápida. Se ideó con el objetivo de que fuera útil en una amplia variedad de sectores sin ser específico para ninguno, lo utilizan desde ingenieros y físicos nucleares en el CERN de Suiza, para el control de la máquina más grande del mundo, su acelerador de partículas, hasta técnicos en ensayos de fiabilidad y seguridad en el mundo del automóvil o la aviación.

Originalmente este programa estaba diseñado para aplicaciones de control de equipos electrónicos usados en el desarrollo de sistemas de instrumentación, lo que comúnmente se conoce como instrumentación virtual. Se puede explicar el término instrumentación virtual del siguiente modo, un módulo de software que simula el panel de control de cualquier instrumento de medida (osciloscopios, velocímetros, anemómetros...) y que de manera virtual, apoyándose en tarjetas de adquisición de datos u otro tipo de hardware es capaz de realizar una serie de medidas como si de un instrumento real se tratase y así poder ahorrar costes a la hora de adquirir hardware innecesario.

El entorno de trabajo de este programa se divide en dos partes. Una de ellas es el Panel Frontal, lugar donde se visualizan todos los indicadores y demás controles del programa, y que se corresponde con lo que será la interfaz del programa. Puede visualizarse un ejemplo de panel frontal en la Figura 2.1,



donde un ejemplo sencillo calcula el área de un triángulo, siendo introducidos por el usuario los datos de base y altura.

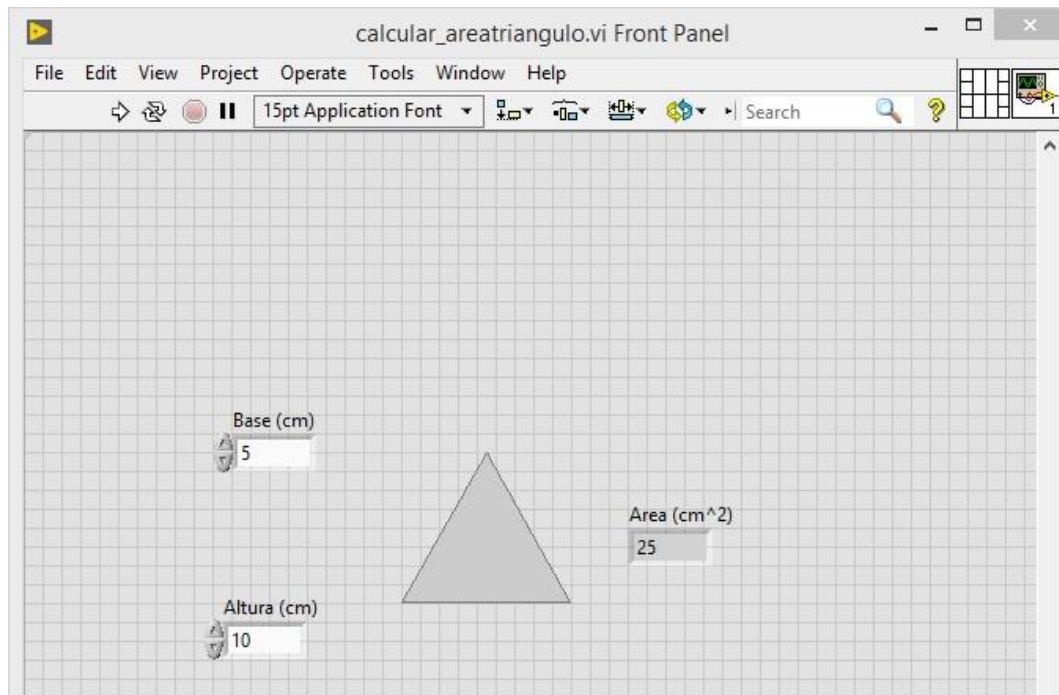


Figura 2.1. Panel frontal

La otra parte del programa, es el Diagrama de Bloques. Esta parte es el programa en sí, el lugar donde en otros programas tipo C se encontraría el código escrito como tal. En este diagrama de bloques es donde se deben intercalar las diversas funciones necesarias para que el programa sea válido y funcional. En la Figura 2.2 puede visualizarse un ejemplo de diagrama de bloques, que calcula el área del triángulo que se ha visto antes en la Figura 2.1 del panel frontal.

Se ve cómo los valores de base y altura son multiplicados, su resultado intermedio dividido entre dos, y el resultado final mostrado al usuario por pantalla en las unidades elegidas.

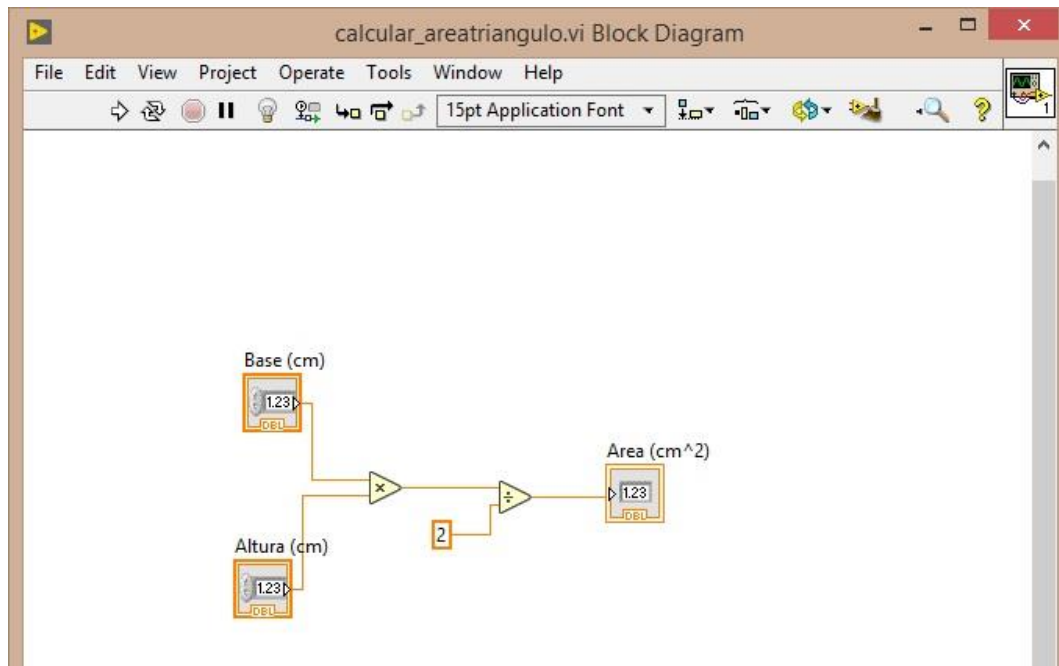


Figura 2.2. Diagrama de bloques LabVIEW

La manera mediante la cual se guardarán los programas que se vayan desarrollando será en formato VI (Virtual Instrument), específico de LabVIEW.

Este programa ofrece la posibilidad de hacer uso de módulos de funciones, o toolboxes, específicos de cada una de las tareas que pueden realizarse con él. Para este caso concreto el módulo más utilizado será el llamado “Sound and Vibration”. Dentro de este módulo se pueden encontrar funciones como FFT, FRF..., muy útiles para el desarrollo de este TFG.

2.2. CONCEPTOS MATEMATICOS PRINCIPALES:

2.2.1. TRANSFORMADA DE FOURIER

En este apartado se va a dar una primera aproximación del fundamento matemático, la Transformada de Fourier, en el que se basa la herramienta FFT antes comentada.

Para dar una aproximación de la Transformada de Fourier se hablará primero del desarrollo en serie de Fourier. Una señal temporal periódica puede expresarse como la superposición de un número infinito de señales sinusoidales de distintas frecuencias, cada una de ellas con una amplitud y una fase inicial determinadas, esta suma es lo que tradicionalmente se conoce como serie de Fourier. La representación de la serie de Fourier de una función en el dominio de tiempo ha de cumplir ciertas condiciones, conocidas como condiciones de Dirichlet, que aseguren la convergencia de la serie. Para una función genérica $g(t)$ [Ewins, 1984]:

- La función $g(t)$ tiene un número finito de discontinuidades en un periodo.
- La función $g(t)$ tiene un número finito de máximos y mínimos en un periodo.
- La integral del valor absoluto de $g(t)$ en un periodo es finita, es decir:

$$\int_{-T/2}^{T/2} |g(t)| dt < \infty \quad (\text{Ec 2.1})$$

Cuando la señal que se tenga no sea periódica del tipo transitorio o aleatorio, se tratará de manera análoga, considerando que una función no periódica es aquella en la cual el periodo es infinito. Para este caso concreto la tercera condición de Dirichlet tomaría esta forma:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)| dt < \infty \quad (\text{Ec 2.2})$$

Y la transformación al espacio de las frecuencias, en lugar de venir representada por una suma, vendrá representada por una integral, conocida como Transformada de Fourier, tomando una forma como la siguiente:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (\text{Ec 2.3})$$

Dada la condición que tiene que cumplir la función no periódica, esta transformada no es válida para todo tipo de señales, por ejemplo las funciones periódicas o las aleatorias no la cumplen, por ello habrá que buscar otra forma de representarlas.

2.2.2. TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT) Y TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER (FFT)

La siguiente herramienta que se va a describir es la Transformada Discreta de Fourier, o DFT. En los casos de secuencias de duración finita, es posible desarrollar una representación de Fourier alternativa denominada DFT. La DFT es una secuencia, no una función de una variable continua, y corresponde a muestras equiespaciadas en frecuencia de la Transformada de Fourier en tiempo discreto de la señal [Oppenheim, 2011].

Considerando una secuencia $\vec{x}[n]$ que es periódica de periodo N , de forma que $\vec{x}[n] = \vec{x}[n + rN]$, para cualquier valor entero de n y r , como en el caso de señales periódicas en tiempo continuo, esa secuencia se puede representar mediante un desarrollo en serie de Fourier en forma de una suma de secuencias exponenciales complejas armónicamente relacionadas. Es



decir, exponenciales complejas con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental ($2\pi/N$) asociadas a la secuencia periódica $\vec{x}[n]$. Estas exponenciales complejas son de la forma:

$$e_k[n] = e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} = e_k[n + rN] \quad (\text{Ec 2.4})$$

Siendo k un número entero, la Transformada Discreta de Fourier tiene entonces la forma:

$$\vec{x}[n] = \frac{1}{N} \sum_k \vec{X}[k] e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad (\text{Ec 2.5})$$

La representación mediante el desarrollo en serie de Fourier de una señal periódica en tiempo continuo requiere generalmente infinitas exponenciales complejas relacionadas armónicamente, mientras que el desarrollo en serie de Fourier de cualquier señal en tiempo discreto de periodo N sólo requiere N exponenciales complejas relacionadas armónicamente.

Comentada una breve introducción de la Transformada Discreta de Fourier, fundamento en el que se basa la herramienta a analizar ahora, se presenta la FFT, o Fast Fourier Transform. La principal ventaja de esta operación respecto a su homóloga, la DFT, es su ahorro en cuanto a operaciones a realizar, pasando de ser N^2 operaciones de la DFT, a $N \log N$ de la FFT.

2.3. PROCESADO DIGITAL DE SEÑAL:

2.3.1. FRECUENCIA DE MUESTREO Y TEOREMA DE NYQUIST

En el proceso de captura digital de una señal, ésta debe ser discretizada en el dominio del tiempo, es decir, deben tomarse muestras equiespaciadas de dicha señal temporal. Esta discretización se consigue eligiendo correctamente una frecuencia de muestreo, es decir definiendo cada cuánto tiempo tomar una muestra.

La definición teórica de frecuencia de muestreo f_s es, el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para transformarla en una señal discreta. Las unidades de este parámetro son los hertzios (Hz). [Oppenheim, 2011].

El concepto teórico que se va a describir a continuación y que está íntimamente relacionado con la frecuencia de muestreo es el Teorema de Nyquist.



El teorema de Nyquist dice: “Dada una señal analógica, limitada en banda, tal que su frecuencia máxima sea f_{max} , siempre deberá muestrearse como mínimo al doble de su frecuencia máxima, para a partir de sus muestras poder recuperar la señal analógica original” [Oppenheim, 2011].

Para el caso concreto del software empleado en este trabajo, LabVIEW, éste, a la hora de configurar los parámetros correspondientes, no va a dejar introducir frecuencias de muestreo que no cumplan este teorema; si aun así el usuario lo hace, le saldrá un error por pantalla y dicho programa no arrancará.

2.3.2. FRF (FREQUENCY RESPONSE FUNCTION)

La Función de Respuesta en Frecuencia, o FRF, es, junto con la Transformada de Fourier, una de las herramientas de procesamiento de señal más utilizadas en este TFG. Por ello se va a dar una introducción a la misma en este apartado [Ewins, 1984].

Sea $X(f)$ el espectro en frecuencia de una señal temporal de excitación como entrada $x(t)$, y sea $Y(f)$ el espectro de salida, de respuesta del sistema, correspondiente a la señal temporal $y(t)$. La relación entre las señales antes descritas es la Función de Respuesta en Frecuencia FRF, denominada simbólicamente como $H(f)$:

$$Y(f) = H(f) \cdot X(f) \quad (\text{Ec 2.6})$$

Por lo tanto, el cálculo de la FRF en cuestión se obtiene despejando $H(f)$ en la ecuación vista con anterioridad.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (\text{Ec 2.7})$$

El cálculo de la FRF se puede realizar a través de varios algoritmos que se pueden considerar como estimadores. Estos estimadores aproximan la función FRF de un problema que se debe analizar. El usuario, para comprobar que el estimador está trabajando correctamente, tiene una herramienta o indicador, llamado coeficiente de correlación o función de coherencia, que depende de la frecuencia y cuyo valor varía entre 0 y 1. Este valor indica el grado de causalidad. Si lo que se obtiene es un valor unidad significa que la relación es completamente lineal entre las señales respuesta y excitación. Si por el contrario el valor es más bajo que la unidad, en la entrada existiría algún ruido que está contribuyendo en la señal de salida, o respuesta.

Causas por las cuales la coherencia puede ser menor que la unidad:

- Ruido no correlacionado en las medidas de $x(t)$ y/o $y(t)$.
- El sistema que se estudia es no lineal.



- La respuesta que se estudia no se puede atribuir a la señal de excitación.

2.3.3. INERTANCIA, MOVILIDAD Y RECEPTANCIA

Las Funciones de Respuesta en Frecuencia son funciones que informan de la relación que existe, en régimen estacionario de respuesta, entre la amplitud de una excitación de entrada (senoidal) y la amplitud de respuesta (senoidal también). Esta amplitud cambia para cada frecuencia de excitación, habiendo zonas donde el ratio respuesta/excitación es máximo (picos, fenómeno de resonancia) y zonas donde ese ratio es mínimo (valles, fenómeno de antirresonancia). En dinámica de estructuras, la entrada en el sistema suele ser una fuerza aplicada en algún punto de la estructura. La respuesta, que se puede medir en uno o varios puntos, suele ser alguna magnitud cinemática: desplazamiento, velocidad o aceleración. Según cuál de esas tres magnitudes se midan y correlacionen con la fuerza de entrada se tienen receptancias (m/N), movilidades (m/s/N) o inertancias (m/s²/N), respectivamente. Cada una de ellas relaciona, pues, la amplitud de respuesta de algún punto de la estructura en esa magnitud (desplazamiento, velocidad, aceleración) con la amplitud de la fuerza aplicada en ese mismo punto o en otro.

Las FRFs en el campo práctico solamente suelen informar de las frecuencias propias de la estructura (y no siempre de todas), que son las frecuencias a las cuales se produce el fenómeno de la resonancia ("picos" o máximos en la gráfica de la magnitud de la FRF). A simple vista, también, se puede intuir si el factor de amortiguamiento crítico de cada modo es "mucho" o es "poco" (de forma muy cualitativa) atendiendo a la forma del pico: un pico más "romo" o "aplastado" está asociado a un amortiguamiento alto y uno más afilado o puntiagudo está asociado a un factor de amortiguamiento más reducido. La única forma de conocer numéricamente el factor de amortiguamiento es aplicando alguna técnica de identificación, como el Peak-Picking (a veces conocido como Peak-Amplitude), el Circle-Fit, etc.

Aunque todos los tipos de FRF tienen los picos en el mismo sitio, para averiguar el valor de los factores de amortiguamiento se suele utilizar la curva de receptancia (desplazamiento/fuerza). Se pueden utilizar las otras, pero hay que adaptar los métodos.

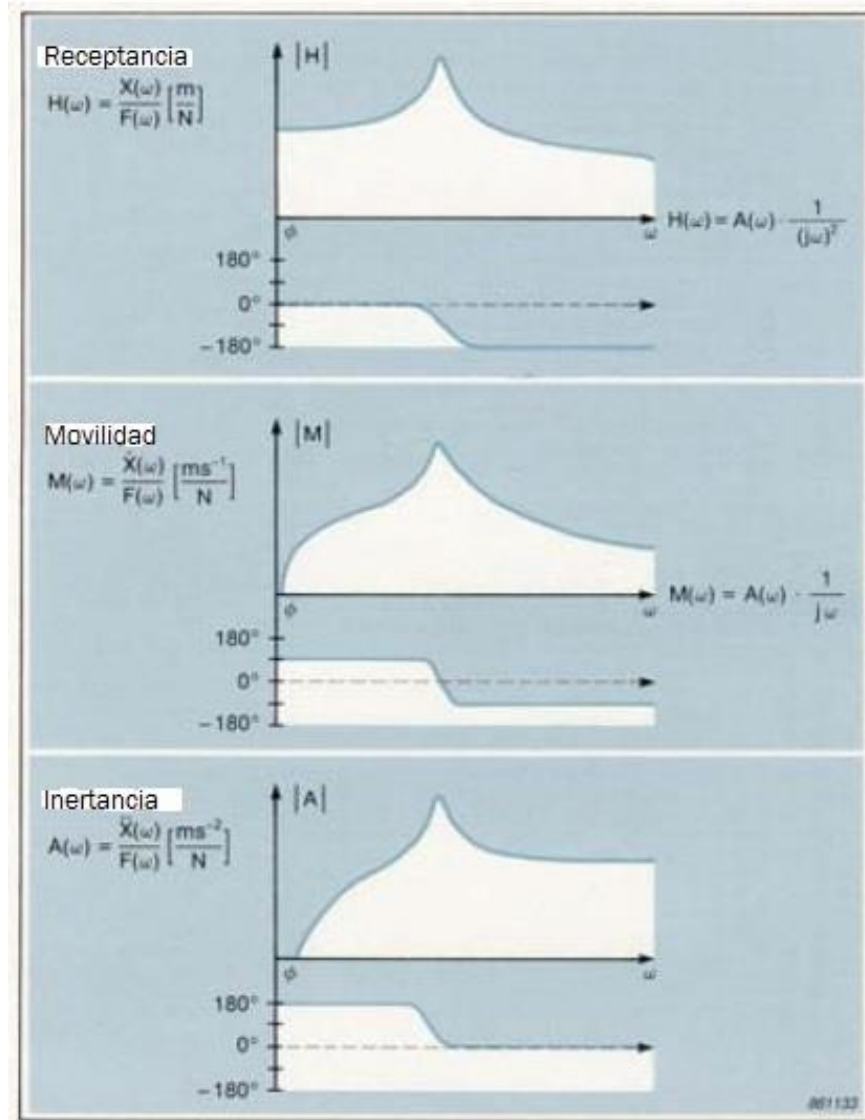


Figura 2.3 Inertancia, Movilidad y Receptancia

2.3.4. ERRORES DE PROCESADO DE SEÑAL:

Cuando se está analizando cualquier tipo de señal, pueden aparecer errores, debidos al procesado de ésta. Estos errores son típicos de sobrecargas, ruido digital, errores de cuantificación (frecuencia de muestreo errónea), etc.

No obstante se va a hacer una descripción de algunos de ellos.

ALIASING:

El error de aliasing puede aparecer al muestrear las señales en el tiempo. Al muestrear una señal temporal, se toma una secuencia de valores de dicha señal en puntos discretos equidistantes en el tiempo. Si el tiempo entre muestras no es el adecuado, al intentar reconstruir la señal temporal original a partir de las muestras tomadas, se cometerá un error por aliasing, y la señal

reconstruida no tendrá nada que ver con la original. En la Figura 2.4 puede verse el significado gráfico de este concepto.

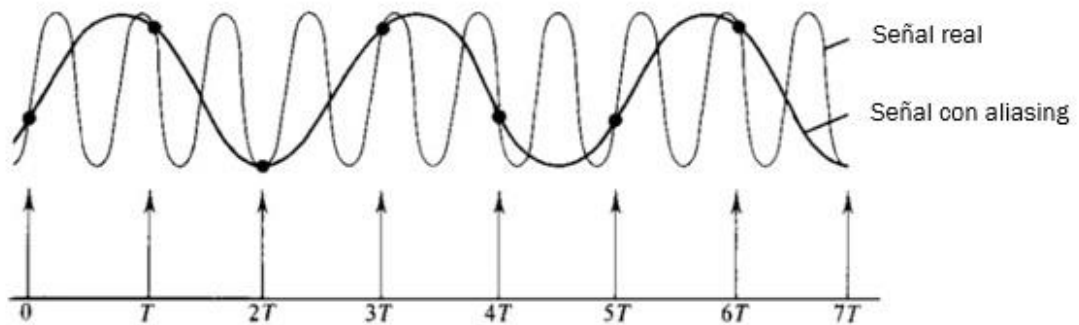


Figura 2.4. Efecto de Aliasing en muestreo [Web 2].

Las componentes de la señal que poseen alta frecuencia pueden causar errores en la amplitud y en la frecuencia de los espectros. Si por ejemplo la frecuencia más alta de la señal a analizar, se supone f_{max} , no cumple el teorema de Nyquist ($f_{max} \leq f_s/2$, siendo f_s la frecuencia de muestreo elegida) las frecuencias que sean superiores a $f_s/2$ aparecen reflejadas como inferiores a $f_s/2$, como puede verse en la Figura 2.5, y la señal se distorsiona.

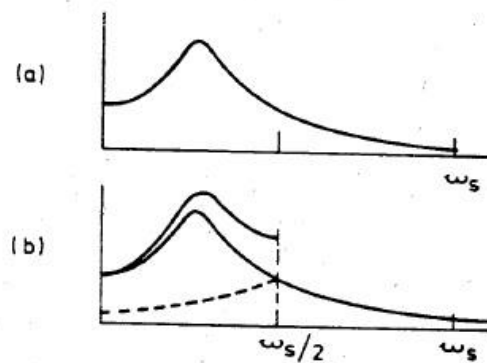


Figura 2.5 Efecto Aliasing por $f_{max} \geq f_s/2$. (a) Espectro real. (b) Espectro deformado.

Un ejemplo conocido por todo el mundo de este efecto es el que ocurre en las ruedas de las carretas en las películas del oeste, cuando el carro avanza muy rápido da la apariencia de la rueda está parada o incluso que rueda hacia atrás. El problema en este caso es que se está muestreando la imagen (tomando fotogramas) a una frecuencia insuficiente en relación a la frecuencia a la que está girando la rueda, esto hace que el cerebro humano, al reconstruir el giro de la rueda a partir de las insuficientes muestras tomadas, interprete una frecuencia de giro de la rueda errónea.

El aliasing puede ser eliminado si se localizan y eliminan las frecuencias superiores a $f_s/2$, las cuales no cumplen el teorema de Nyquist, al no cumplir este teorema la frecuencia de muestreo que se habría elegido sería errónea. Esto se puede conseguir con una señal de excitación adecuada, o de manera general con un filtro paso bajo, el cual presente una frecuencia de corte igual a $f_s/2$. A este filtro se lo conoce como filtro anti-aliasing.

LEAKAGE:

El error de leakage normalmente viene dado porque se da por supuesto que todas las señales son periódicas y al elegir la ventana de procesado no se tiene en cuenta esta discontinuidad, unido a una resolución elegida pobre en número de muestras. Al unirse estos dos problemas, el resultado que se obtiene en el dominio de las frecuencias, es la unión de varias frecuencias (leak) cerca del punto donde en realidad se encuentra la verdadera frecuencia, ocasionando un lóbulo más ancho en la gráfica. [Ewins, 1984].

La manera de solucionar este fenómeno sería aumentar la resolución en el procesado de la señal o cambiar el periodo elegido en la señal (elegir otro tipo de ventana o de otra longitud) si se considera que existe una discontinuidad. En la Figura 2.6 se puede ver el efecto leakage debido una discontinuidad en una señal sinusoidal, la señal (a) sería la que obtiene buenos resultados y la (b) la que al procesarla produciría el efecto descrito en este apartado.

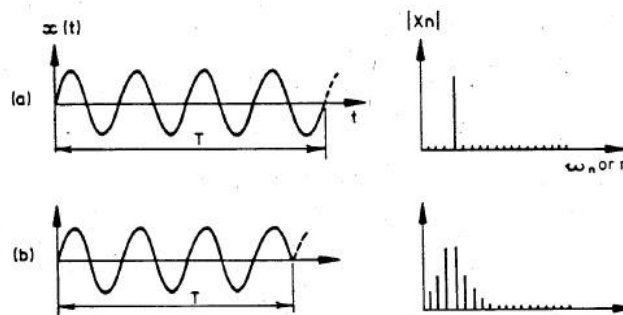


Figura 2.6 Leakage

PICKET FENCE:

El efecto valla de estacas o *picket fence*, figura 2.7, es un término utilizado para describir los efectos del muestreo discreto en el rango de frecuencias [Ewins, 1984]. Al elegir una frecuencia de muestreo insuficiente (número de puntos en el dominio de la frecuencia) el procesado de la señal no se atiene a la realidad, pudiendo quedar ocultos los valores pico de la frecuencias. Tiene varias connotaciones:

- Tiene como resultado una medida de frecuencias no uniformes que corresponden a un conjunto de características de filtro solapadas, la parte superior de las cuales tiene efecto de valla de estacas.
- Es como si el espectro de la señal analizada fuera visto a través de los huecos entre las barras de una valla, y por tanto existe la posibilidad de que no se observen los valores pico.

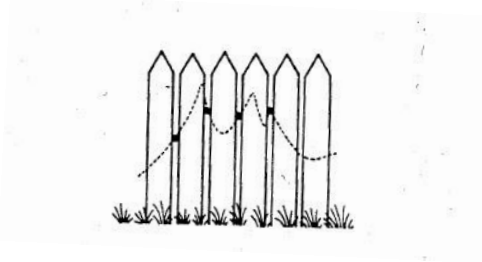


Figura 2.7 Picket Fence

2.3.5. VENTANAS

En el procesado de señales digitales en el dominio del tiempo no se puede evitar el uso de ventanas. Cuando se mide una señal en el dominio del tiempo sólo se está considerando un intervalo de tiempo de valor T . La función de estas ventanas es la de disminuir las discontinuidades en las proximidades a los periodos de muestreo, ya que fuerzan a la señal a ser periódica.

La elección de una ventana siempre es un compromiso entre buena estimación de los valores de amplitud y una buena resolución espectral.

En el anexo B, el usuario puede ver el resultado de aplicar los diferentes tipos de ventanas que pueden utilizarse en este programa a una determinada señal, con su expresión y su Transformada de Fourier correspondiente.



3. CADENA DE MEDIDA DE VIBRACIONES:

Todo el hardware, a excepción del martillo de impactos y el acelerómetro, que se utilizará para llevar a cabo este TFG ha sido fabricado por la compañía NI (*National Instruments*).

En primer lugar, en la Figura 3.1, se va a visualizar el montaje general de todos los elementos que forman parte de este TFG. De esta manera se podrá identificar mejor cada aparato y así poder hacerse una idea más general de su lugar en la cadena de medida, antes de pormenorizar las funciones propias de dichos componentes.

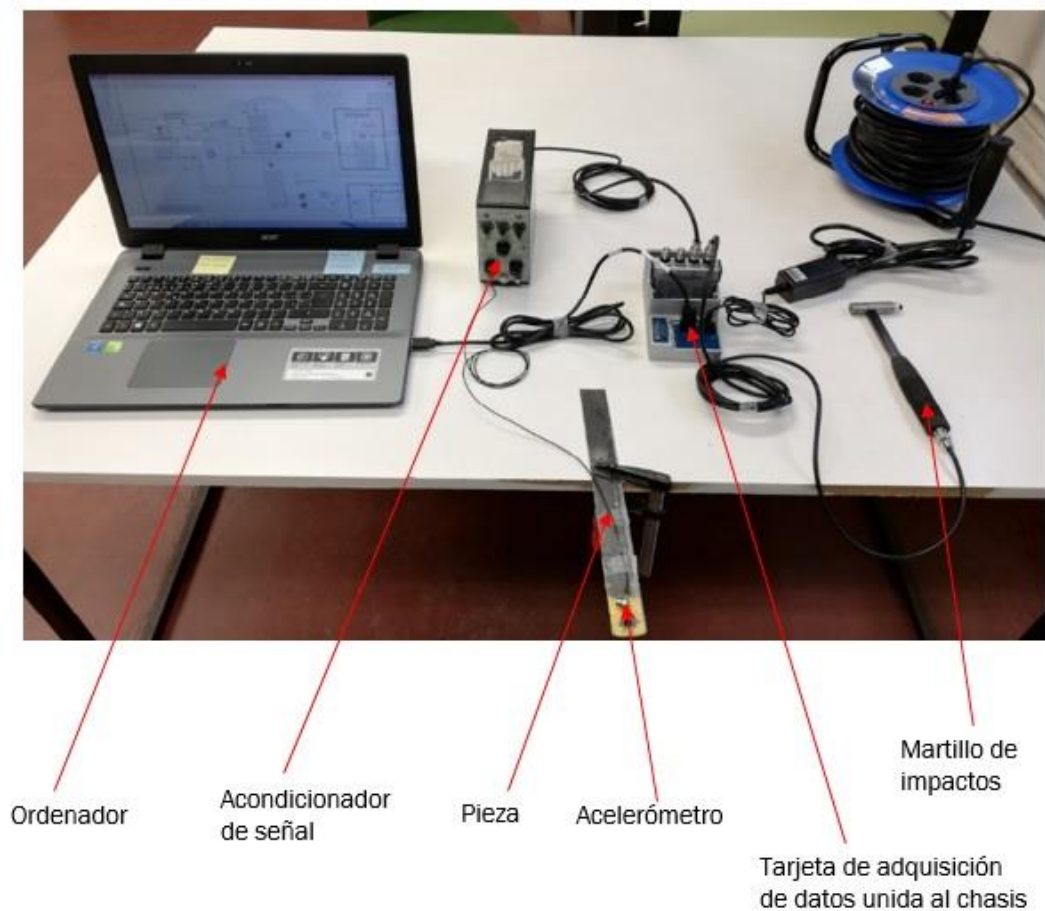


Figura 3.1 Montaje general

Una vez visualizado cada elemento, la configuración para su funcionamiento y su interconexión con el resto de elementos, se puede empezar a analizar más en profundidad la función propia de cada uno de ellos.

3.1. MEDIDA DE LA EXCITACIÓN:

3.1.1. MARTILLO PCB PIEZOTRONICS MODELO 086C03:

Uno de los parámetros de configuración que el usuario va a tener que introducir en el programa va a ser la sensibilidad del transductor de fuerza del martillo de impactos, tal y como se verá más adelante cuando se explique la programación del software y el funcionamiento del programa. Este parámetro sólo debe cambiarse si este elemento es sustituido. Puesto que esta propiedad es intrínseca de cada transductor.

Para el caso del transductor de fuerza que posee el martillo de impactos, su sensibilidad es la relación de carga que genera por Newton de fuerza aplicado en el impacto.

El martillo de impactos está formado por varias partes, como puede distinguirse en la Figura 3.2:

- punta o cabezal con varias durezas disponibles que nos ofrecen diferentes modos de excitación de la estructura.
- la estructura (el martillo en sí mismo, mango y cabeza)
- el transductor ICP situado entre la punta y la cabeza.



Figura 3.2 Martillo Impactos PCB 086C03

La función del martillo de impactos es la de poder aplicar y medir una fuerza (impacto) en un punto requerido de una estructura. La magnitud del

impacto está caracterizada mayoritariamente por la masa de la cabeza y por la velocidad en el momento de dicho choque, siendo más importante la precisión a la hora de realizar el impacto sobre el punto que deseamos analizar, que la cantidad de fuerza ejercida en el mismo. En este tipo de ensayo debemos controlar que el golpe se aplique de manera homogénea y sin rebotes, puesto que estos rebotes ocasionan problemas en el procesado de la señal [Herráez, 1991].

Denominamos impacto, a la transmisión de energía cinética a nuestro sistema en un intervalo pequeño de tiempo, este tipo de excitación se caracteriza por un gran contenido de armónicos, y por tanto no interesa demasiado la amplitud de la frecuencia, sino la forma de la envolvente del espectro [Herráez, 1991].

El martillo consta de varias cabezas con diferentes durezas, estas cabezas harán que a medida que la dureza va aumentando también lo haga la frecuencia de la respuesta que nosotros detectamos, con rangos variables entre 600 y 6000 Hz como se distingue en la Figura 3.3.

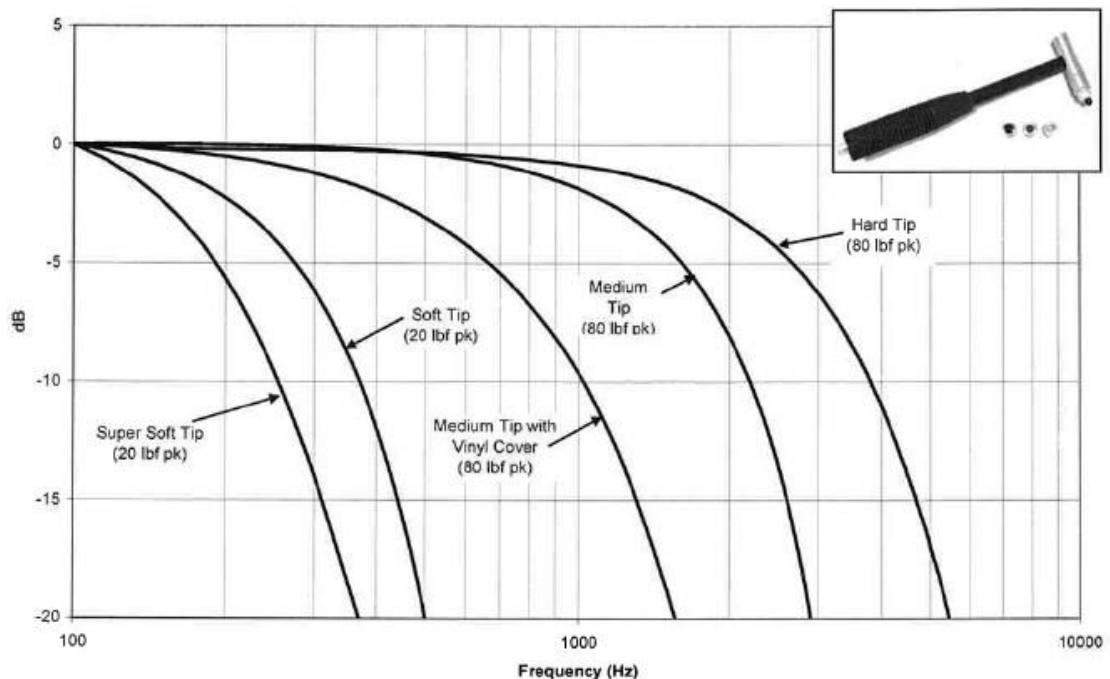


Figura 3.3 Respuesta frecuencial del martillo en función del tipo de cabezal.

La tecnología mediante la cual funcionan los transductores de este martillo en concreto, es conocida como ICP (Integrated Circuit Piezoelectric), y su funcionamiento es el mismo que la tecnología IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric) que soporta la tarjeta de adquisición de datos NI 9234 utilizada en este TFG. Puede verse una explicación de esta tecnología en el apartado

3.2.2. Aunque la denominación comercial cambia, NI lo denomina IEPE, y PCB lo nombra como ICP, el principio teórico en el que se basa es el mismo.

En la Figura 3.4 se puede ver la carta de especificaciones del martillo de impactos utilizado en este TFG. En esta carta se pueden contemplar valores que pueden ser interesantes para las diferentes utilizaciones que se pueden dar a este elemento. Para este TFG el valor de esta carta que va a utilizarse es la sensibilidad del transductor de fuerza, la cual aparece en primer lugar en esta carta con un valor de 2.25 mV/N en el Sistema Internacional de medida [Web 3].

Model Number	ICP® IMPACT HAMMER		Revision: L
086C03			ECN #: 32387
Performance	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used. T - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4 TLD - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE 1451.4
Sensitivity (± 15%)	10 mV/gf	2.25 mV/N	
Measurement Range	± 500 lbf pk	± 2224 N pk	NOTES: [1] Typical. [2] See PCB Declaration of Conformance PS068 for details.
Resonant Frequency	≥ 22 kHz	≥ 22 kHz	
Non-Linearity	≤ 1 %	≤ 1 %	
Electrical			
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC	SUPPLIED ACCESSORIES: Model 081B05 Mounting Stud (10-32 to 10-32) (2) Model 084A08 Extender - Steel, 0.6" Diameter (1) Model 084B03 Hard Tip- Hard (S.S) (1) Model 084B04 Hammer Tip- Medium (White Plastic) (1) Model 084C05 Hammer Tip- Soft (Black) (2) Model 084C11 Hammer Tip- Supersoft (Red) (2) Model 085A10 Vinyl Cover For Medium Tip (Blue) (2) Model HCS-2 Calibration of Series 086 instrumented impact hammers (1)
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	<100 ohm	<100 ohm	
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC	
Discharge Time Constant	≥ 2000 sec	≥ 2000 sec	
Physical			
Sensing Element	Quartz	Quartz	
Sealing	Epoxy	Epoxy	
Hammer Mass	0.34 lb	0.16 kg	
Head Diameter	0.62 in	1.57 cm	
Tip Diameter	0.25 in	0.63 cm	
Hammer Length	8.5 in	21.6 cm	
Electrical Connection Position	Bottom of Handle	Bottom of Handle	
Extender Mass Weight	2.6 oz	75 gm	
Electrical Connector	BNC Jack	BNC Jack	
[2]			
<small>All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.</small>			
Entered: <i>JA</i> Engineer: <i>DJS</i> Sales: <i>DDM</i> Approved: <i>EB</i> Spec Number:		Date: <i>2/24/10</i> Date: <i>12/8/09</i> Date: <i>2/17/10</i> Date: <i>2/17/10</i> 15273	
		Phone: 716-684-0001 Fax: 716-685-3886 E-Mail: vibration@pcb.com	
<small>3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043</small>			

Figura 3.4 Carta de especificaciones martillo de impactos.

3.2. MEDIDA DE LA RESPUESTA:

3.2.1. ACELERÓMETRO BRUEL & KJAER 4393

Antes de hacer una introducción del acelerómetro como instrumento de medida en general, y del que se va a utilizar en este TFG en particular, se va dar una breve pincelada de unos de los parámetros intrínsecos de este instrumento de medida.

Otro de los parámetros de configuración del programa que el usuario va a tener que introducir va a ser la sensibilidad del acelerómetro, tal y como se verá más adelante cuando se explique la programación del software y el funcionamiento del programa. Este parámetro sólo debe cambiarse si este elemento es sustituido.

La sensibilidad en el caso del acelerómetro es la relación entre la Voltaje que genera por cada unidad de aceleración a la que está sometido. Esta propiedad es intrínseca de cada acelerómetro.

El elemento que se va a describir en este punto va a ser el acelerómetro piezoeléctrico. Es el encargado de medir las aceleraciones que se producen en la pieza al realizar una sollicitación con el martillo de impactos, antes descrito en la pregunta 3.1.1.

El modelo de comportamiento mecánico de un acelerómetro, se puede asimilar a un sistema masa-muelle de 1 gdl (grado de libertad). La deformación del muelle es proporcional a la aceleración de la base y la salida eléctrica es proporcional a la aceleración. En la Figura 3.5 que se ve a continuación se puede distinguir cómo es un acelerómetro y qué partes lo forman.

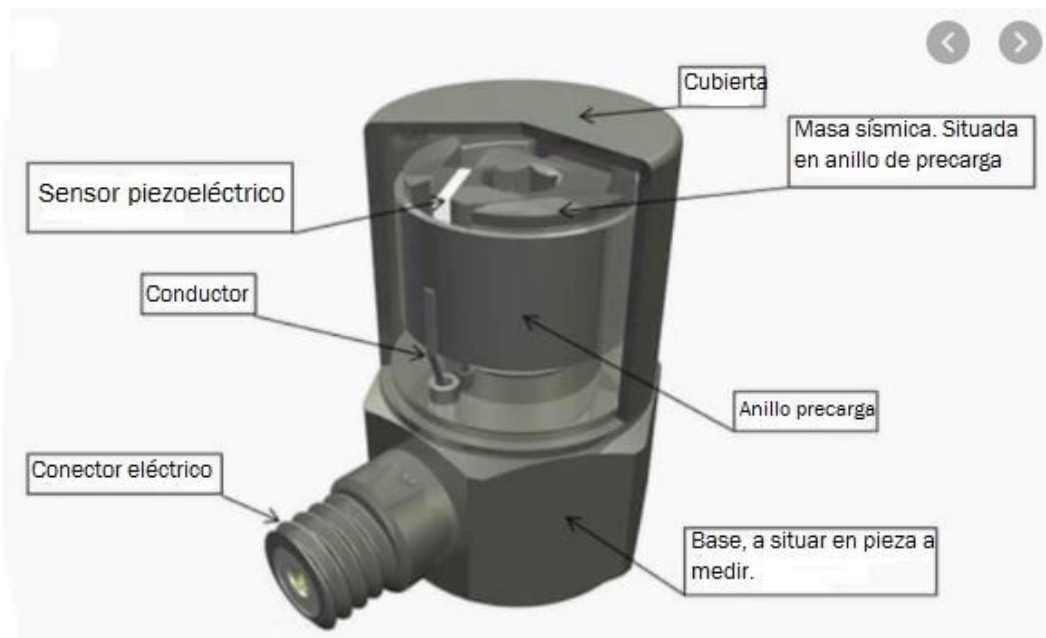


Figura 3.5 Acelerómetro.

A la hora de elegir un acelerómetro se deben tener en cuenta diferentes parámetros como: sensibilidad, masa, rango dinámico y rango de frecuencias.

La sensibilidad es la característica que se suele considerar en primer lugar. En principio convendría un alto nivel de salida, pero es aconsejable llegar a un compromiso porque las altas sensibilidades implican elementos activos grandes [Maraver, 1997]. Para el caso concreto del acelerómetro utilizado en este TFG se tiene una sensibilidad de 0.316 pC/ms^{-2} [Web 4].

La masa del acelerómetro tiene importancia al medir elementos ligeros. La adición de demasiados acelerómetros a la estructura, podría provocar fuerzas y momentos ocasionados por el movimiento de los mismos. En el caso

concreto de este TFG, ese no sería un inconveniente puesto que para las mediciones que se necesitan, con un acelerómetro sería suficiente. Como regla general en la elección de la masa del acelerómetro a utilizar se podría considerar que, la masa del acelerómetro debería de ser al menos la décima parte de la masa de la pieza sobre la que se quiere medir. En la cadena de medida que se está analizando se cumple este requisito puesto que el peso del acelerómetro utilizado es de 2.4 gramos frente al peso de la pieza que es 220 gramos.

Otra de las propiedades del acelerómetro a tener en cuenta es el rango dinámico. Éste debe cubrir toda la gama de frecuencia que tiene interés para el análisis que se esté ejecutando. El acelerómetro que forma parte de este TFG posee un rango de medida de entre 0.1 y 16500 Hz.

Normalmente el extremo de bajas frecuencias viene delimitado por dos factores: uno es la frecuencia de corte de bajas, normalmente 1 Hz, por lo que no es un problema, y el otro es la temperatura ambiental y sus fluctuaciones. La temperatura ambiental no es un factor de gran influencia para el TFG que se está tratando, pero aun así se va a realizar una pequeña descripción de cómo afectaría este fenómeno en el caso de la medición con acelerómetros. Los acelerómetros de propósito general suelen tolerar temperaturas de hasta 250°C. Cuanto mayor sea la temperatura, las cerámicas piezoeléctricas que el acelerómetro posee en su interior empezarán a despolarizarse, afectando a la sensibilidad y esto a la precisión del acelerómetro [Maraver, 1997].

A la hora de fijar el acelerómetro a la superficie del elemento que se quiere analizar o medir se deben tener en cuenta algunas consideraciones. Existen varias formas de fijar el acelerómetro a la superficie, algunas de ellas podrían ser: tornillos, cera, pegamento... Según el método que el montador elija para el montaje, éste afectará en mayor o menor medida a la frecuencia de resonancia de la pieza a medir. Para el caso concreto de este TFG, como puede verse en la Figura 3.5 el acelerómetro ha sido fijado con cera a la pieza, siendo para el uso que atañe a este montaje, la manera más sencilla de hacerlo. De esta forma, si la pieza que se ve en la Figura 3.6 quiere ser sustituida por otra de otro material u otras dimensiones, se puede mantener la anterior sin haber sufrido ningún daño.



Cera de montaje

Figura 3.6 Montaje acelerómetro

El tipo de transductor que se está utilizando para este TFG no incorpora la tecnología IEPE (Integrated Electronic Piezo-Electric), en este caso se trata de un acelerómetro piezoeléctrico, pero aun así y puesto que es una tecnología muy utilizada a día de hoy se va a realizar una breve descripción de ella. La tecnología IEPE se basa en un transductor que tiene incorporado un acondicionador de carga. Debido a que la carga producida por un transductor IEPE es muy pequeña, la señal producida podría ser susceptible al ruido. Por este motivo, IEPE integra los componentes electrónicos sensibles lo más cerca posible al transductor para asegurar una mejor inmunidad al ruido. El funcionamiento de este tipo de sensores es el siguiente: los transductores IEPE constan de un amplificador de instrumentación y una fuente de corriente constante [Web 5]. El amplificador permite establecer el rango dinámico a la entrada para aprovechar al máximo la señal entrante, evitando el problema del ruido en la medida de lo posible. Por su parte, la fuente de corriente hace fluir corriente en el transductor, que se comporta como una resistencia. El valor de esta resistencia será proporcional a la aceleración experimentada por el transductor en cuestión, de manera que la señal a la salida de éste será una tensión proporcional a la aceleración soportada.

3.3. ACONDICIONADOR DE SEÑAL BRÜEL & KJAER 2635

Los acelerómetros piezoeléctricos generan una señal de carga que no puede introducirse directamente en la tarjeta de adquisición de datos utilizada. Dado que el acelerómetro utilizado no incorpora la tecnología IEPE anteriormente descrita, se ha de incorporar una etapa intermedia, la cual realiza este acondicionador de señal. Su función es la de transformar una señal de alta impedancia en una de baja impedancia.

El proceso, que puede verse gráficamente en la Figura 3.7, sería el siguiente: el acelerómetro mediría una aceleración en m/s^2 , éste nos daría una

salida en pC (picoCoulombios), la cual mediante la entrada que vemos en la Figura 3.7 se le proporciona al acondicionador, obteniendo de él una salida en Voltios (V), que sí podemos incorporar a la tarjeta de adquisición.



Figura 3.7 diagrama explicativo acondicionador

El acondicionador utilizado posee las siguientes características: es de tamaño reducido, con lo cual es fácilmente portátil y de bajo ruido, y su alimentación es independiente, con pilas. A través de unos diales, mostrados en la Figura 3.8, se pueden introducir la sensibilidad del acelerómetro que se va a utilizar. Posee redes activas de integración que permiten convertir señales de aceleración de vibración en velocidad y desplazamiento.



Figura 3.8 Acondicionador señal



3.4. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI 9234:

Antes de hablar de la tarjeta que se utilizará para la adquisición de datos en este TFG, se especificará el significado general del término “adquisición de datos” para este software concreto, LabVIEW. Existen varios sistemas por los cuales pueden adquirirse datos, entre todos podemos encontrar los dos grupos más significativos:

- los data loggers: sistemas que operan de manera autónoma e independiente, siendo sólo necesario un ordenador para volcar los datos por ellos recogidos.
- las tarjetas de adquisición o DAQ (Data Acquisition): sistemas que no operan de manera independiente, sino que están gobernadas por un ordenador. Éste será el proceso mediante el cual se adquirirán datos en este Trabajo Fin de Grado.

Existen dos clases dentro de éstas: las internas, como pueden ser las PCI, PXI, etc., y las externas, basadas en conexión externa o USB, existiendo también las inalámbricas [Lajara, 2011].

Las capacidades que suelen tener este tipo de tarjetas de adquisición, tanto externas como internas, son las siguientes: adquisición de señales analógicas, generación de señales analógicas, generación y adquisición de señales digitales, contadores y timers o temporizadores, autocalibración, sensores...

La misión de la tarjeta externa que se va a utilizar, la NI 9234, es la de adquisición de datos, de manera precisa, a través de cuatro canales de entrada. En uno de los canales se conectará la entrada 1, la señal eléctrica que proviene del transductor acelerómetro (aceleración), y en la entrada 2 se conectará la señal eléctrica que proviene del transductor del martillo de impactos (Fuerza). De esta manera la tarjeta será la encargada de capturar ambas señales de una manera precisa e instantánea.

El rango dinámico ofrecido por esta tarjeta NI 9234 es de 102 dB con una resolución de 24 bits. Lo que estos parámetros quieren decir es lo siguiente: la resolución de 24 bits significa que esta tarjeta es capaz de representar 2^{24} números, codificados con 24 bits, es decir con 0s y 1s. Esto implica que el rango de representación sea de 0 a 2^{24} si son números positivos o de -2^{11} a 2^{12} si se tienen números negativos. El nivel de precisión que se puede alcanzar con esta tarjeta se obtiene realizando la división de los 102 dB, antes comentados, entre la resolución que posee la tarjeta [Web 6].

La tarjeta es capaz de procesar señales de aceleración constantes de valor 5g siendo g la aceleración de la gravedad de valor 9.81 m/s^2 y tolera aceleraciones por impactos de hasta 50g [Web 6].



Los cuatro canales de entrada que posee esta tarjeta, mostrados en la Figura 3.9, son capaces de adquirir datos a una velocidad de 51.2 KS/s (kiloSamples per second, kilomuestras por segundo).

Esta tarjeta incorpora una serie de filtros anti-aliasing de manera que ajusta automáticamente la frecuencia de corte en función de la frecuencia de muestreo elegida por el usuario.



Figura 3.9 Tarjeta NI 9234

3.5. CHASIS C-DAQ 9174:

Este tipo de chasis con adaptador USB, como el que puede verse en la figura 3.10, ha sido diseñado para la obtención de medidas o datos mediante sistemas de pequeña envergadura. Las conexiones al PC se realizan mediante USB de manera rápida y fiable. Este chasis cuenta también con cuatro temporizadores de 32 bits [Web 7], lo que significa que el chasis es capaz de esperar las señales de otros controladores ensamblados en él, por espacio de tiempo de $2^{32} - 1$ intervalos de tiempo, de esta manera asegura que no haya desfases entre señales analizadas, aunque éstas sean procesadas con elementos más rápidos o lentos entre ellos.



Figura 3.10 Chasis NI 9174



4. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE ADQUISICIÓN DE INERTANCIAS:

En esta capítulo se va a realizar una explicación detallada de las funciones que realiza el programa y de cómo ha sido diseñado y programado, dando también una explicación de qué módulos o toolboxes se han utilizado en su programación.

4.1. FUNCIONES Y ESTRUCTURAS BÁSICAS UTILIZADAS

En este apartado se va a hacer una pequeña introducción de las funciones y estructuras más básicas de LabVIEW utilizadas en este programa. De esta manera cuando el lector avance más en este capítulo entenderá mejor el desarrollo de dicho programa.

La primera función que va a describirse tiene el nombre de **Enum**. Esta función es la que va a permitir elegir al usuario entre las diferentes opciones del sistema, memorizando para cada opción una función diferente, la cual es programable de múltiples formas.

Un ejemplo sencillo de ello puede ser la elección de la operación a realizar entre dos números, el usuario mediante un **Enum** elegiría qué operación desea realizar (suma o resta) el programa tendría asociada a cada opción una función, en este caso se tendría una estructura **Case** que englobaría las dos operaciones, dando el resultado por pantalla de la opción elegida. En la Figura 4.1 puede visualizarse el ejemplo, para el caso en que el usuario elija la opción *suma*.

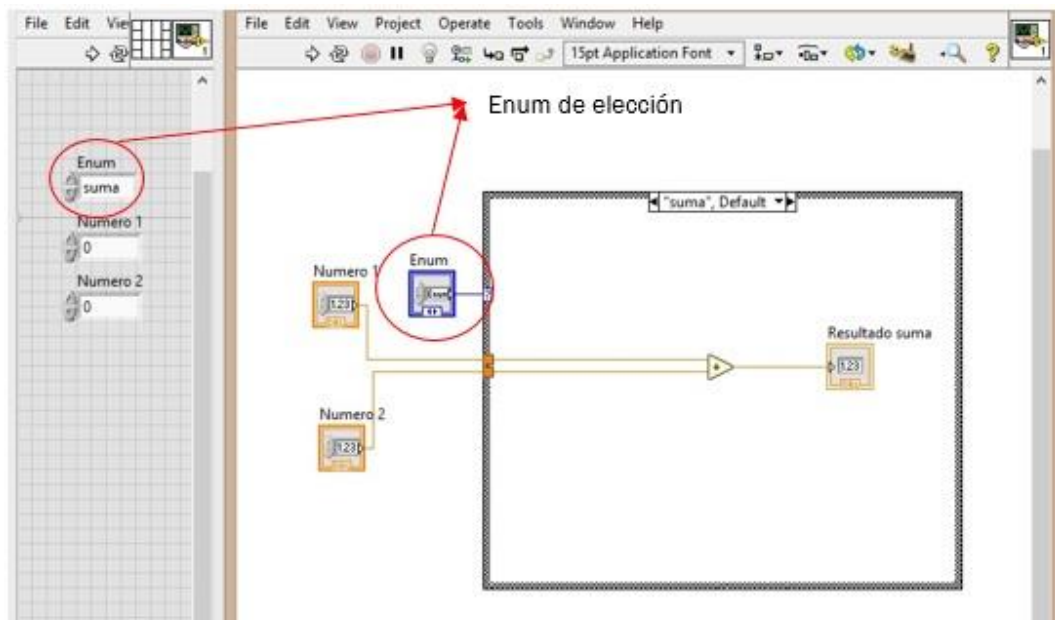


Figura 4.1. Ejemplo función Enum suma.

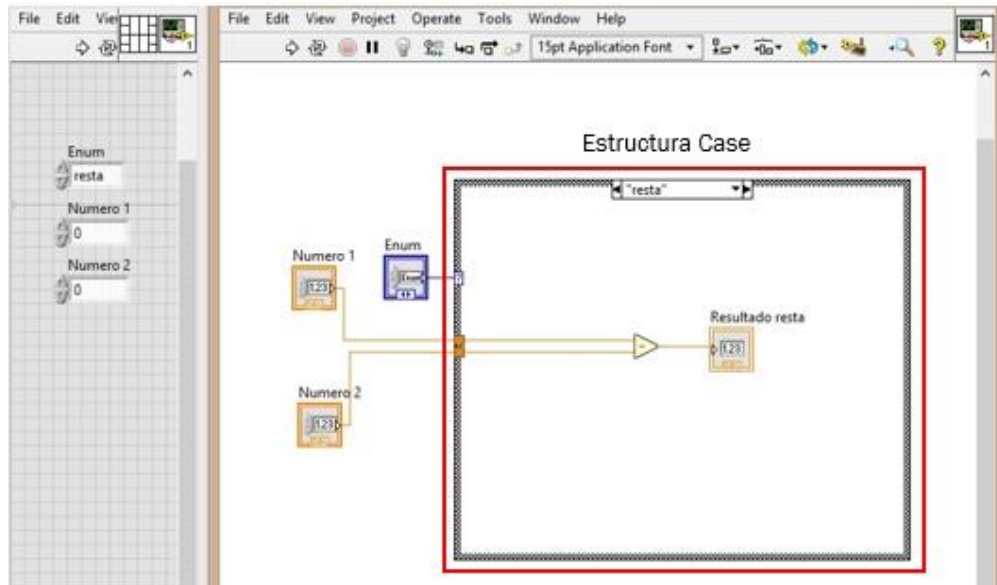


Figura 4.2 Ejemplo función Enum resta y estructura Case

En la Figura 4.2 el usuario ha elegido la opción *resta*, puede apreciarse en las dos figuras cómo en función de la elección del usuario el programa cambia su propósito.

Otra de las estructuras básicas más utilizadas en este programa es la estructura **Case**. Esta estructura, siempre asociada a una función **Enum**, antes comentada, permite al programa ejecutar diferentes funciones según la opción elegida por el usuario. En el ejemplo de los dos números visto antes, mostrado en la Figura 4.2 la estructura **Case** sería el bucle que englobaría la operación a realizar en función de la opción elegida por el usuario.

La siguiente estructura que se va a analizar es el bucle **While**. Este bucle es utilizado en bastantes lenguajes de programación (C, Visual basic...). Lo que realiza el bucle es la ejecución de un programa, concretamente de la función o funciones ubicadas dentro de él, hasta que se cumpla una condición. En el caso concreto de este programa, el bucle **While**, Figura 4.3, engloba todo el software creado. La función que tiene es la de hacer funcionar el programa hasta que el usuario no diga que se tiene que parar. Esto se hace asociando un botón de parada de programa al bucle, como puede verse en la Figura 4.3. En el momento que el usuario desea detenerlo, lo presiona e instantáneamente el programa se para.

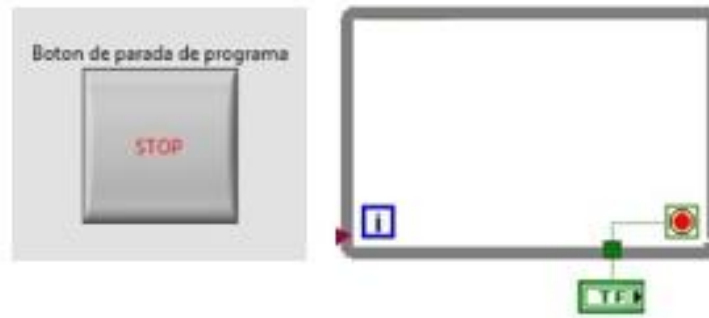


Figura 4.3 Bucle while y botón de parada.

4.2. FUNCIONES DE PROGRAMA. IMPLEMENTACIÓN SOFTWARE.

En esta parte se va a describir más en profundidad cómo se ha desarrollado todo el programa, desglosando todos los bloques utilizados, funciones programadas, y realizando una conexión entre el programa en sí, y la interfaz de usuario antes explicada.

En primer lugar, se va a visualizar un diagrama de bloques con la estructura completa que va a seguir el programa, Figura 4.4, en ella se distinguirá de manera general la línea de ejecución con los diferentes pasos que sigue el programa. Observando por completo este diagrama de bloques, cuando posteriormente se analice el programa más en profundidad, será más fácil entender la explicación, pudiendo ubicar mejor cada función.

En los Anexos C1 y C2 el lector puede encontrar tanto el diagrama de bloques del programa, en lenguaje LabVIEW, como su panel de control o interfaz de usuario, respectivamente.

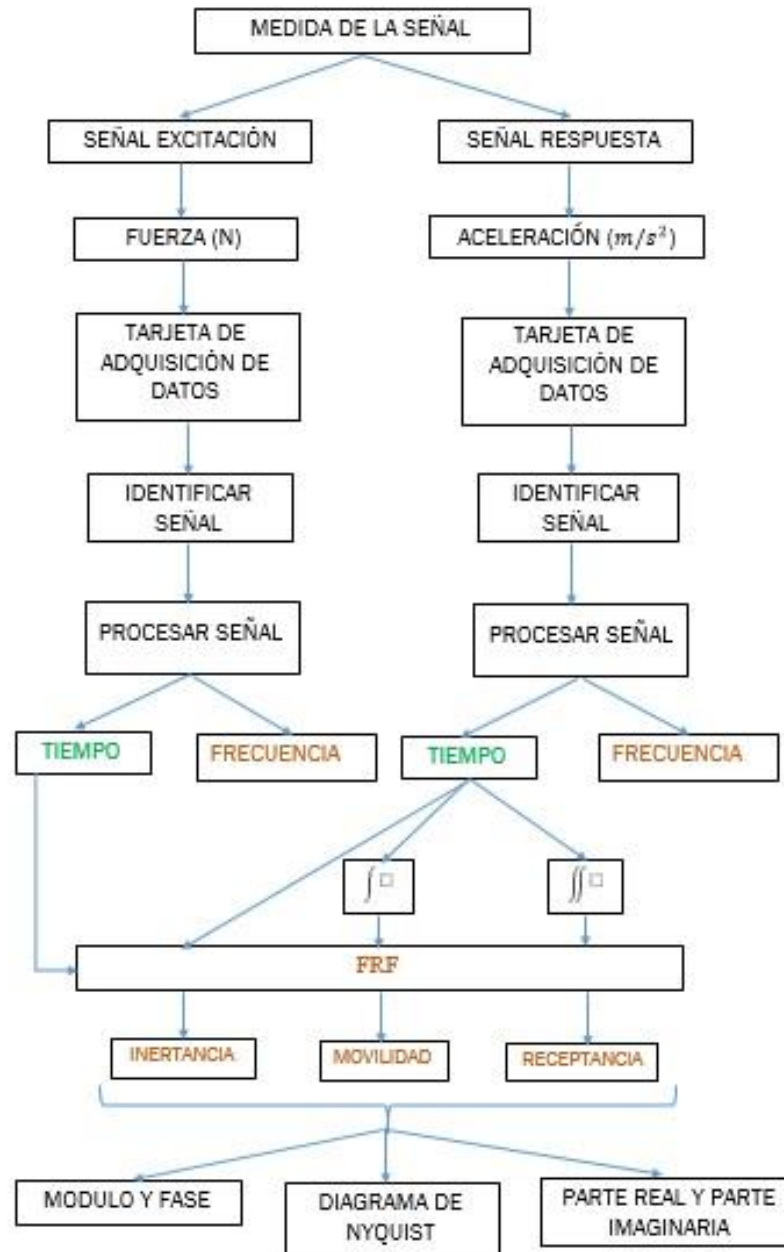


Figura 4.4 Diagrama de bloques

Visto el diagrama de bloques y la estructura que va a seguir el programa, se empezará a describir la primera parte de éste, la adquisición de datos. En la Figura 4.5 se visualiza la parte del programa que se encarga de realizar esa función.

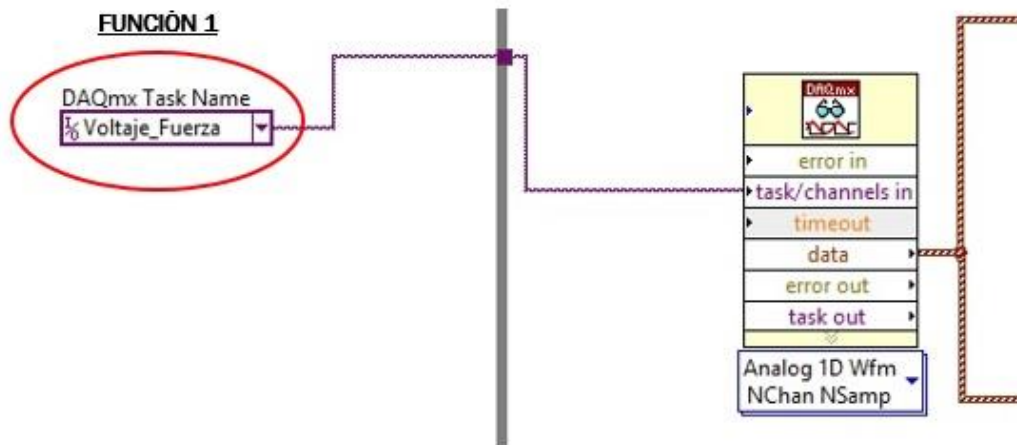


Figura 4.5 Adquisición de datos

La adquisición de datos se realiza mediante la tarjeta DAQ, ella es la encargada de adquirir y procesar los datos. Este proceso está controlado por el software que se ha implementado. La manera mediante la cual se realiza este proceso es la siguiente.

La *Función 1* visualizada en la Figura 4.5 es la encargada de hacer entender al programa a qué magnitud física corresponde la señal que se va a adquirir (fuerza, aceleración...) y a qué canal de la tarjeta se va a asociar. En este caso, la excitación (martillo de impactos) está asociada al canal AI3 y la respuesta vibratoria al canal AI2, como puede visualizarse en la Figura 4.6.

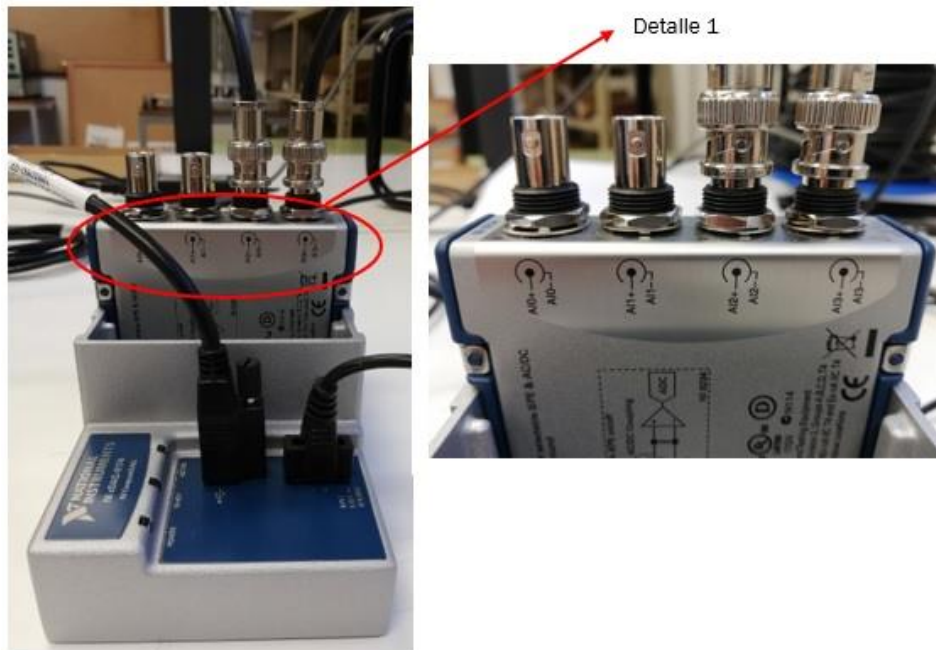


Figura 4.6 Visualización número de canales

En la Figura 4.7 se pueden distinguir los parámetros que han de introducirse para realizar la medida de fuerza. Estos parámetros son la sensibilidad del transductor del martillo de impactos utilizado. Este valor se puede encontrar en las especificaciones de dicha herramienta siendo sus unidades mV/N. Ha de introducirse manualmente en el programa como puede observarse resaltado en rojo en la Figura 4.7.

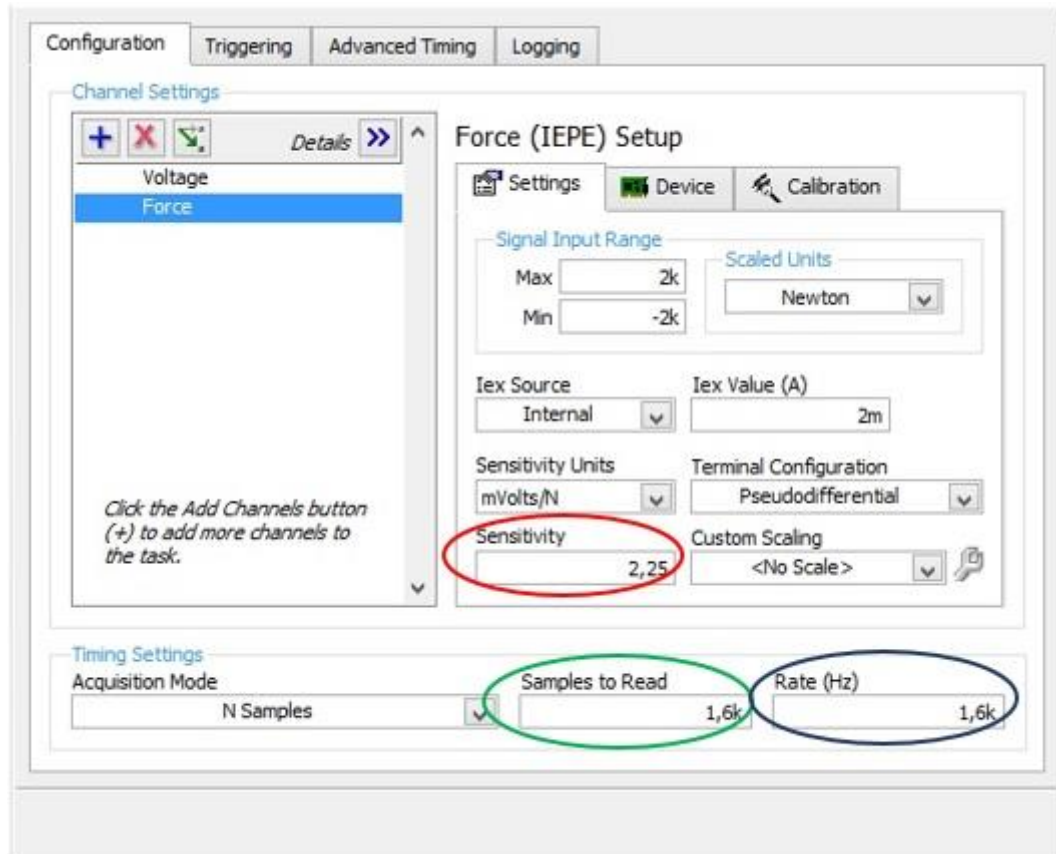


Figura 4.7 Adquisición fuerza.

El otro parámetro que debemos configurar es la frecuencia de muestreo, resaltado en azul en la Figura 4.7, junto con el número de muestras resaltado en verde en la misma figura. La definición del concepto frecuencia de muestreo puede leerse en el apartado 2.4 de esta memoria. En este caso concreto, para la señal excitación, se ha elegido una frecuencia de muestreo de 1600 Hz. Se ha elegido este valor de 1600 Hz porque la señal es muestreada de manera correcta, y al procesarla no se tienen errores de procesado, descritos en el punto 2.3. Se ha aplicado el mismo valor al número de muestras puesto que el programa por defecto lo ejecuta de esa forma. Este número de muestras se puede modificar para que el usuario pueda comprobar diferentes resultados a la hora de muestrear la señal.

En la Figura 4.8 puede apreciarse la misma configuración de señal esta vez para la aceleración. También en este caso puede especificarse la frecuencia de muestreo a través de la configuración del programa. Ésta va a ser la misma para las dos señales (excitación y respuesta) para que así se tome la misma cantidad de muestras de ambas. Si se eligieran frecuencias de muestreo distintas para las señales, la medida sería errónea puesto que cada señal estaría siendo muestreada de manera diferente. El programa no funcionaría, apareciendo un error por pantalla que avisa de este problema.

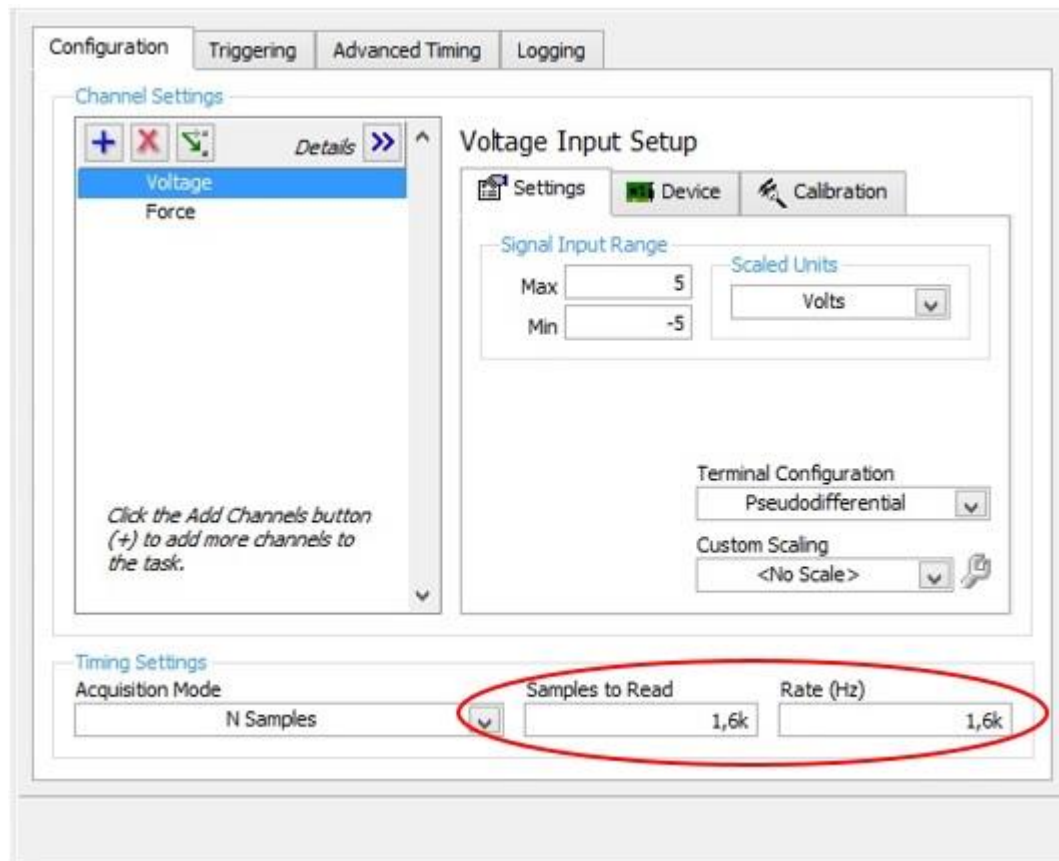


Figura 4.8 Adquisición Aceleración

En la *Función 2* que se distingue en la Figura 4.9, lo que realiza el programa es la discretización de ambas señales, para que el programa pueda trabajar independientemente con cada una de ellas, en función de las operaciones que se requieran hacer. Como puede verse, se tienen dos salidas, por un lado la aceleración y por otro la fuerza.

En la parte baja de la función identificada como 2 en la Figura 4.9, se ha elegido la opción *NChan NSamp*. Esta opción lo que realiza es especificar que se están analizando varias entradas con sus frecuencias de muestreo correspondientes. Para este caso concreto son dos, pero en función del proyecto podrían ser más. Este valor depende de las entradas que se puedan

incorporar a la tarjeta de adquisición, en este caso se pueden llegar a 4 entradas (señales) por tarjeta, tal y como se describió en el apartado 3.4 y de las tarjetas que se puedan conectar al chasis. Este chasis en concreto admite un máximo de 4 tarjetas, como pudo verse en la Figura 3.8.

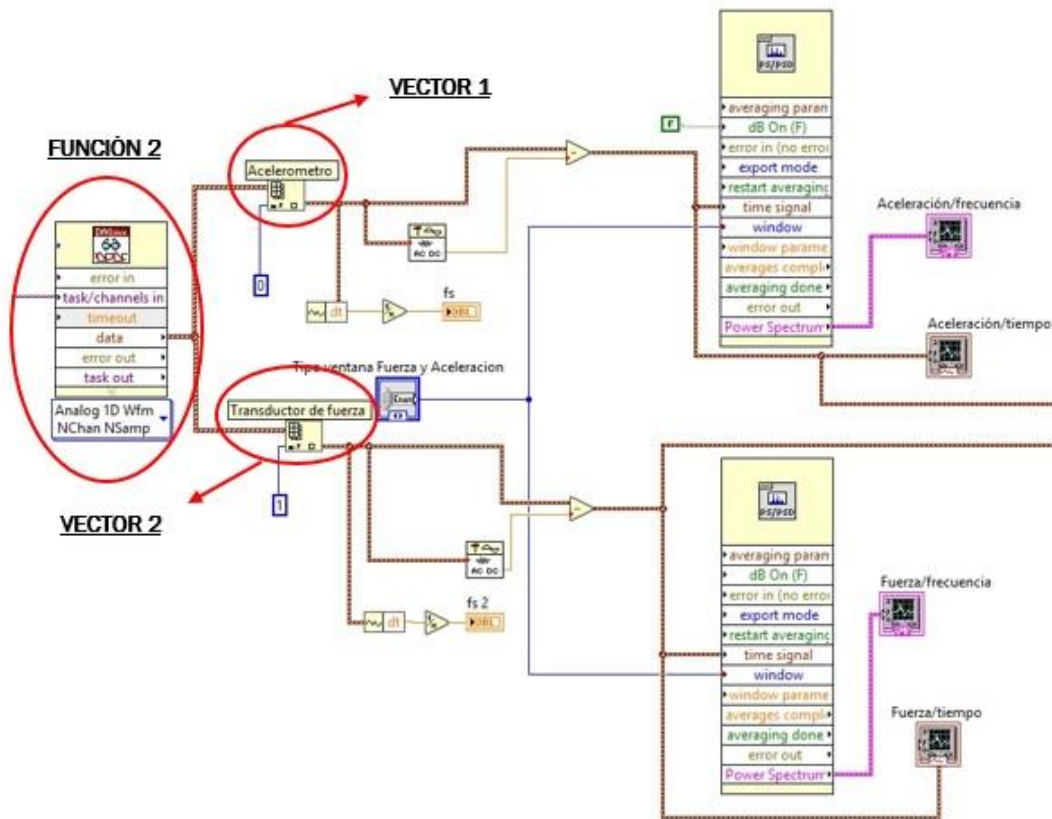
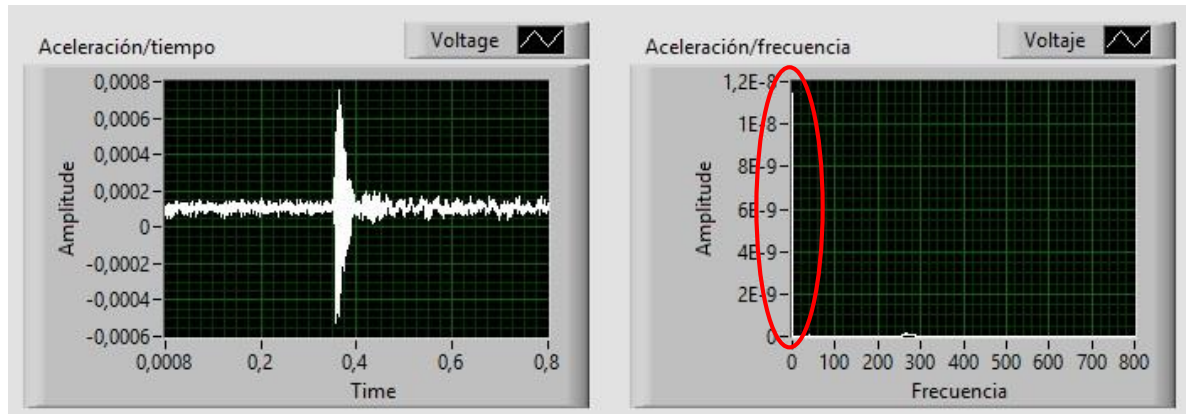


Figura 4.9 Procesamiento de señales

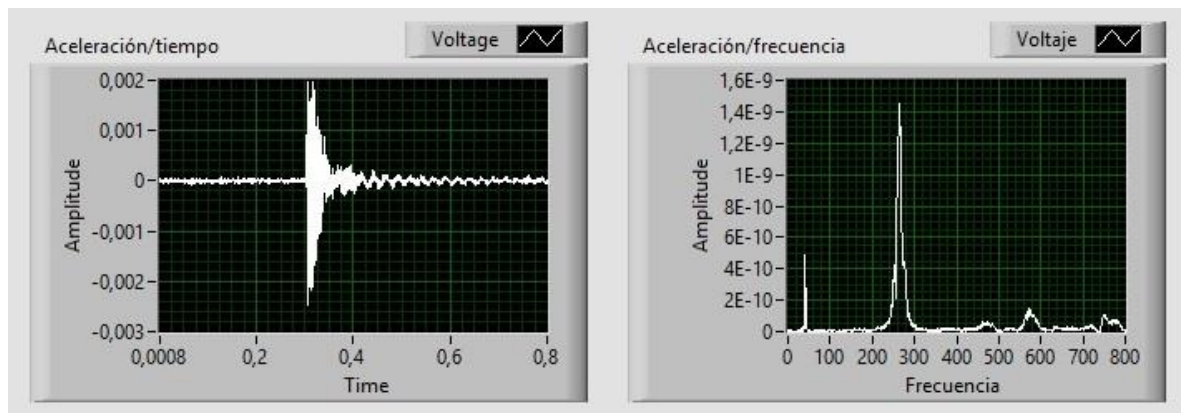
Las señales de salida que se tienen en la *Función 2*, se almacenan en dos vectores diferentes, dando un orden de tarea distinto a cada una: 0 para la aceleración, y 1 para la fuerza. De esta forma se podrá trabajar independientemente con cada una de ellas.

En el espectro en frecuencia de la respuesta, puede apreciarse un cierto nivel de continua en la gráfica inicial, tal y como se observa en la Figura 4.10a. Este nivel de continua desvirtúa la escala del gráfico, y hace que no puedan apreciarse con exactitud y de manera nítida los valores pico de las frecuencias que se buscan y mucho menos de sus amplitudes correspondientes. Por esta razón se elimina previamente, el efecto de esta eliminación puede observarse en la Figura 4.10b.

Este nivel de continua es, simplemente, el nivel medio de señal a partir del cual la señal oscila. Este efecto se debe al procesado de señal.



(a)



(b)

Figura 4.10 (a) con nivel de continua (b) sin nivel de continua

Descrita la primera parte del programa, en la cual se adquieren los datos temporales de ambas señales, se va a pasar a describir cómo se han obtenido los espectros de las dos señales, es decir, su representación en el dominio de la frecuencia.

El primer bloque que se visualiza en la Figura 4.11 identificado en dicha figura como *Función 3*, consta de una función pre-configurada por el programa llamada PS/PSD (Power Spectrum - Power Spectrum Density, Espectro de Potencia - Densidad Espectral de Potencia), capaz de obtener el espectro en frecuencia. Tan solo hay que proporcionar la entrada, que para este caso sería la señal respuesta en el dominio del tiempo (aceleración o fuerza), y el tipo de ventana que es necesario introducir para minimizar el leakage. Si no se indicara el tipo de ventana que se elige, el programa tomaría una ventana tipo Hanning por defecto. El concepto teórico de ventana puede verse en el punto 2.3.3, y una comparativa de todas las ventanas disponibles, se muestra en el anexo B.

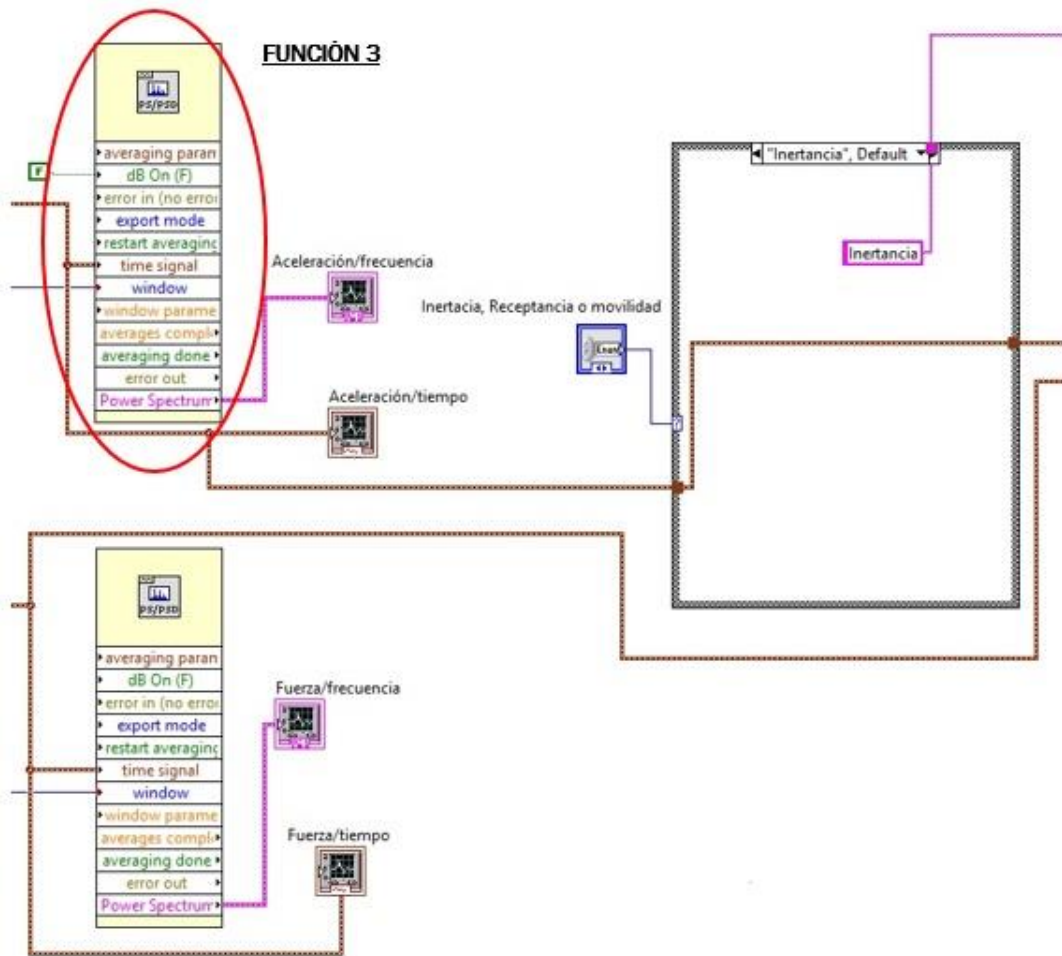


Figura 4.11 Espectro en frecuencia

El siguiente paso que se va a describir es cómo el programa realiza las funciones FRF correspondientes para pasar de Inertancia a Movilidad o a Receptancia. En la Figura 4.12 se puede apreciar una estructura Case en la cual el programa realiza las diferentes operaciones que están almacenadas dentro de ella, la operación a realizar se elige mediante la función *Enum* que se aprecia.

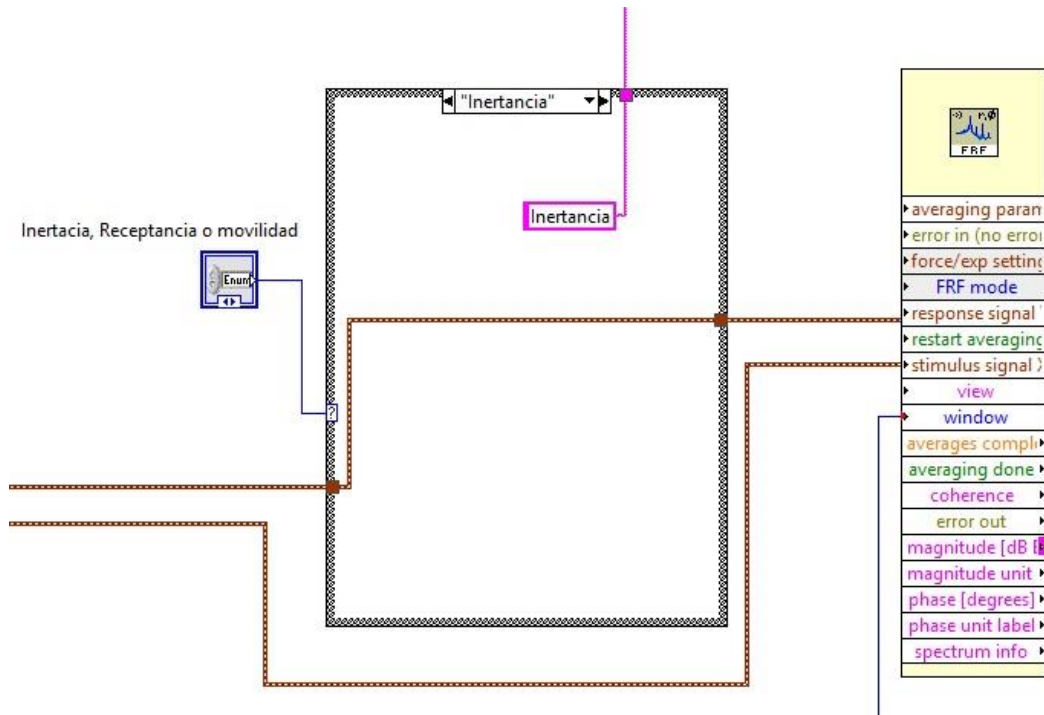


Figura 4.12 Inertancia

Para este caso, el de Inertancia, la señal de la aceleración en el dominio del tiempo pasa directamente al bloque que realiza la función FRF, la estructura Case que se ve en la Figura 4.12 no realiza ninguna operación, a mayores, de esta forma el usuario obtiene la función Inertancia, asociada por defecto a dicha estructura.

Como puede observarse, dentro de la estructura Case se aprecia una línea de texto que aparece en color violeta, con el nombre de la operación a realizar (Inertancia, Movilidad o Receptancia). Ese cuadro de texto no tiene una función como tal para la realización de las operaciones dentro del bucle, pero sí está ahí para después identificar mejor el gráfico correspondiente, como se explicará más adelante.

En el caso de que se quiera trabajar con la Movilidad, el programa deberá realizar una integral sobre la señal de la aceleración en el dominio del tiempo, para evaluar la velocidad. Puede observarse el proceso en la Figura 4.13, para después introducir esta señal integrada como entrada a la función FRF, la salida de esta función FRF del programa será la Movilidad que se busca, siempre en el dominio de las frecuencias.

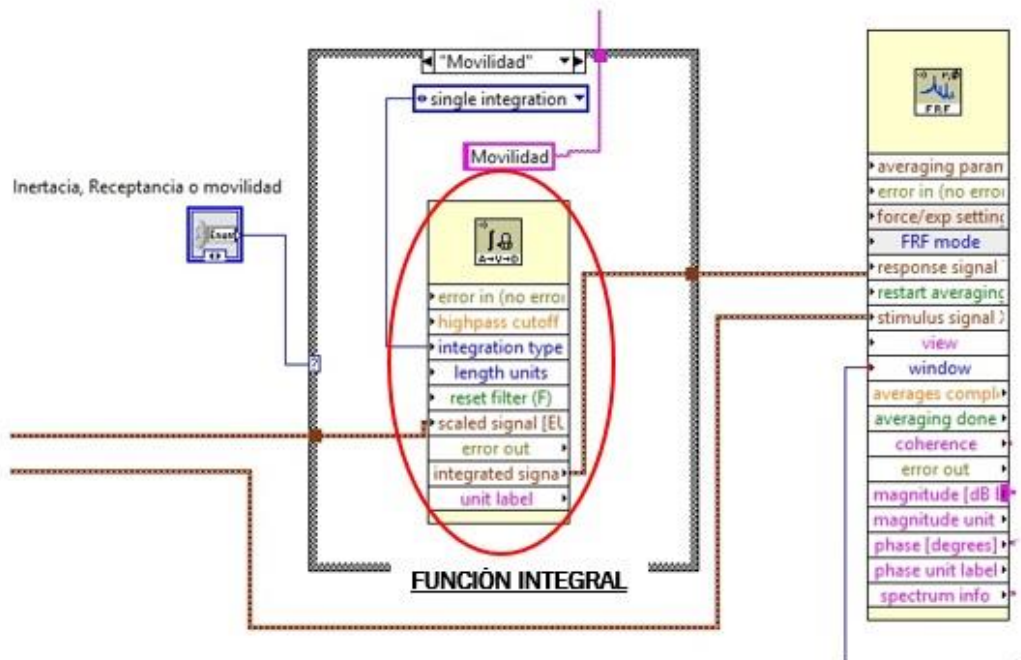


Figura 4.13 Movilidad

En la Figura 4.13, se ve cómo mediante la función que hay identificada como *Función integral* dentro de la estructura case, se ha elegido la opción *single integration*, la cual hay que proporcionar a la *Función integral* para que ésta trabaje sin errores. De esta manera se integrará tan solo una vez la señal aceleración en el dominio del tiempo, para obtener la función respuesta *Movilidad* de la que se hablaba previamente.

El mismo proceso se sigue para calcular la *Receptancia* (Figura 4.14), sólo que la *Función integral*, será programada mediante la opción *double integration*, y así ésta integrará dos veces la aceleración para obtener el resultado buscado, el desplazamiento que procesará como entrada la función *FRF* para obtener a la salida la función transferencia *Receptancia*.

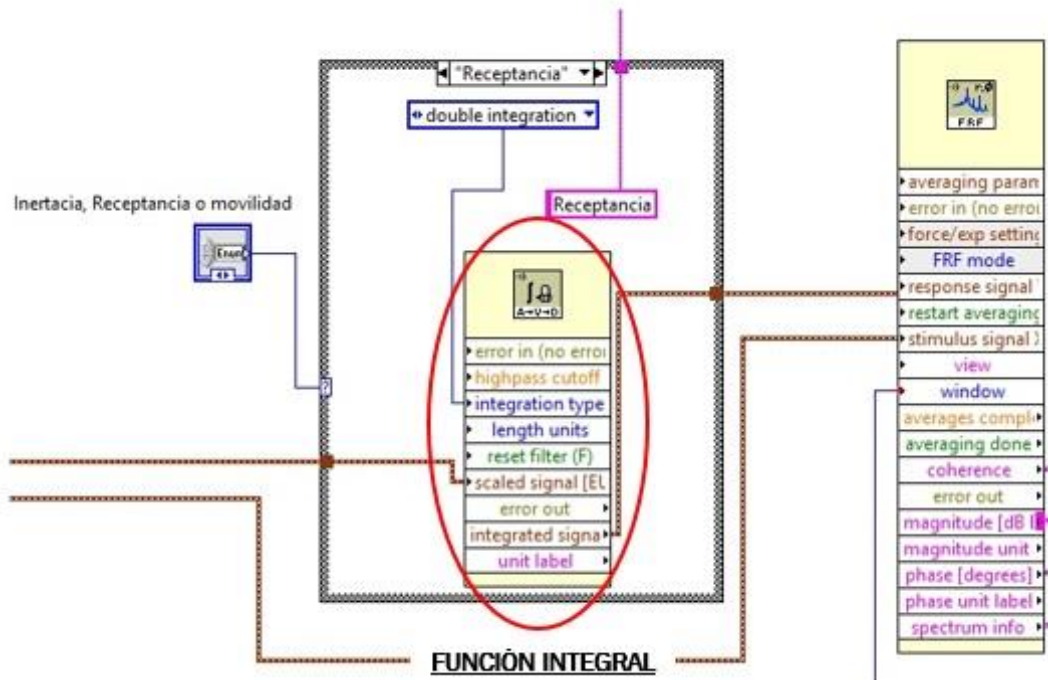


Figura 4.14. Receptancia

La siguiente parte del programa que se va a describir es una de las más importantes, cómo calcula el programa la FRF (*Frequency Response Function*). En esta sección se tiene también una estructura Case en la cual el usuario podrá elegir qué tipo de representación quiere de la FRF, si módulo y fase, o parte real e imaginaria. En la Figura 4.15 puede verse cómo se realiza el proceso.

Existen varias funciones en LabVIEW que evalúan la función FRF, todas ya programadas. En este caso se ha elegido la que, en primer lugar realiza la función en módulo y fase, para después cambiarla, mediante la función identificada como *Función 4* que se ve dentro de la estructura Case, a parte real y parte imaginaria, si así lo desea el usuario. Podría hacerse también al revés, LabVIEW proporciona esa opción mediante una función FRF que da como resultado los correspondientes módulo y fase. De esa forma, en el hipotético caso que sólo se necesitara o se quisiera una forma concreta de representar la función FRF, no se tendría por qué programar otra función a mayores para cambiarla.

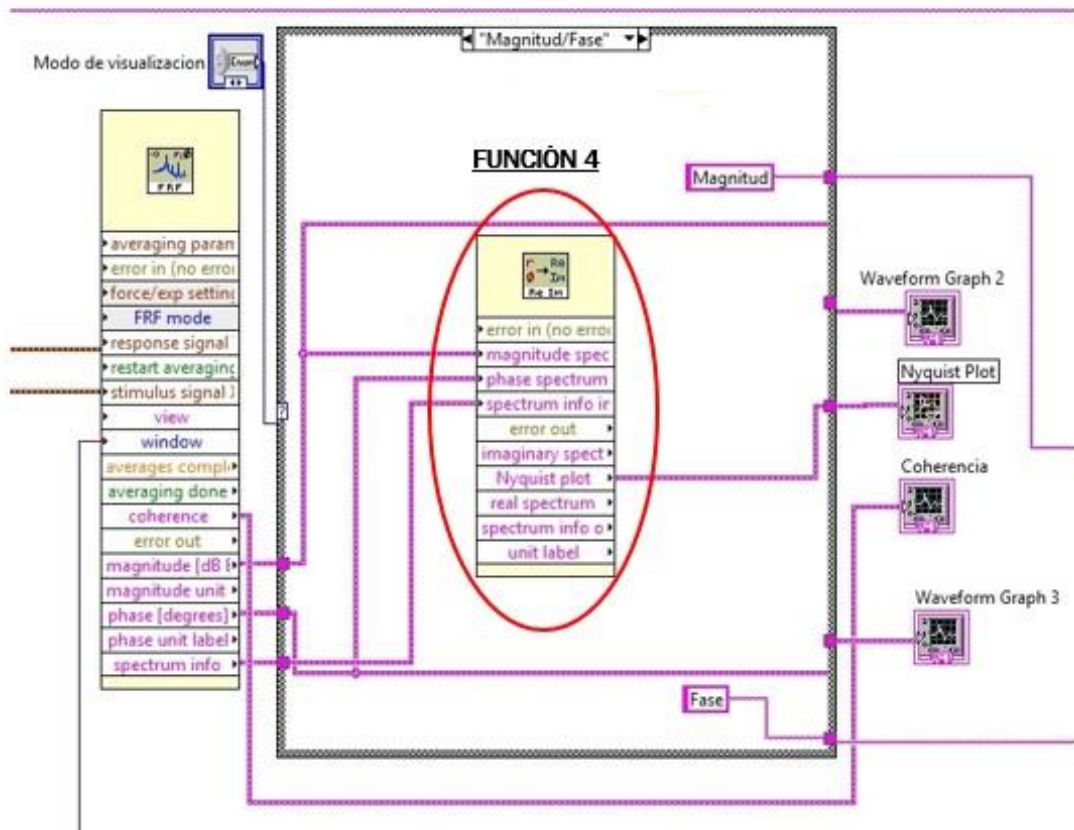


Figura 4.15 FRF Módulo/Fase

Para este caso concreto el usuario ha elegido la opción Módulo y fase. Se aprecia cómo la función FRF realiza su operación enviando directamente sus salidas a las gráficas correspondientes. Tan solo se utiliza la *Función 4* dentro de la estructura Case para representar el diagrama de Nyquist, y para obtener esta representación, la *Función 4* debe utilizar las salidas de la FRF.

En la Figura 4.16 el usuario ha elegido la opción de parte real y parte imaginaria. Aquí puede visualizarse cómo las entradas que se direccionan a las gráficas son las salidas de la *Función 4* y no las salidas de la función FRF.

En ambas estructuras Case, se aprecia también, al igual que en la estructura que realizaba las correspondientes integrales de las funciones de transferencia Inertancia, Movilidad y Receptancia, unos cuadros de textos con el nombre del modo de visualización que estamos utilizando: módulo y fase, o parte real e imaginaria. Estos cuadros de texto definen los rótulos de los gráficos correspondientes.

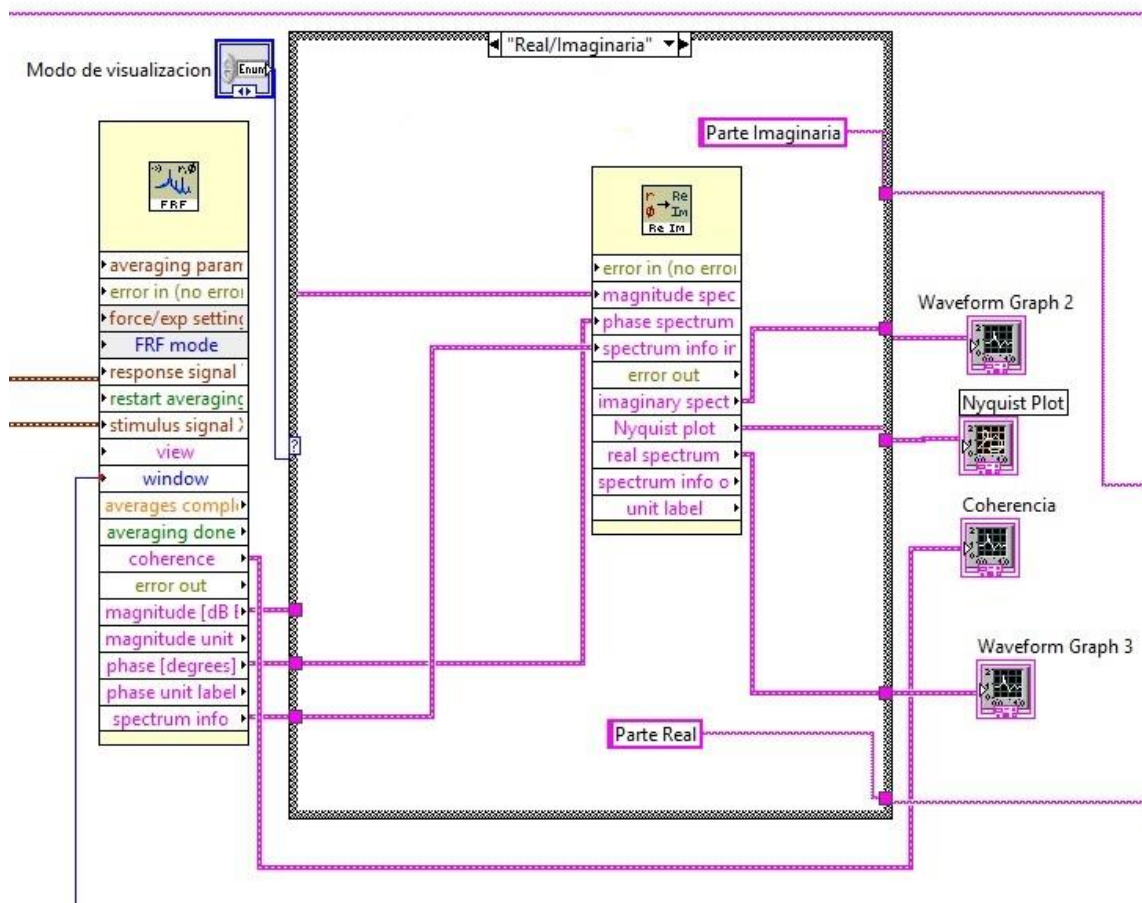


Figura 4.16 FRF Real/Imaginaria

Se va a realizar una pequeña explicación de cómo se han programado las gráficas. Esta parte del programa, se ha hecho así para conseguir una interfaz más clara y nítida para el usuario, lo cual es uno de los objetivos que se fijaron como principales en la realización del TFG. En lugar de tener 4 gráficas, dos para una forma de representación (Modulo y Fase) y dos para la otra forma de representación (Parte Real e Imaginaria), se han condensado en tan solo dos gráficas, en función de la elección del usuario. Como puede verse en la Figura 4.17, el título del grafico está asociado a la elección de Inertancia, Movilidad o Receptancia y el eje Y de cada grafica se modifica en función del tipo de representación, manteniendo siempre fijo el eje X con Frecuencia y unidades de Hz, puesto que ese dominio en las funciones analizadas no cambia.

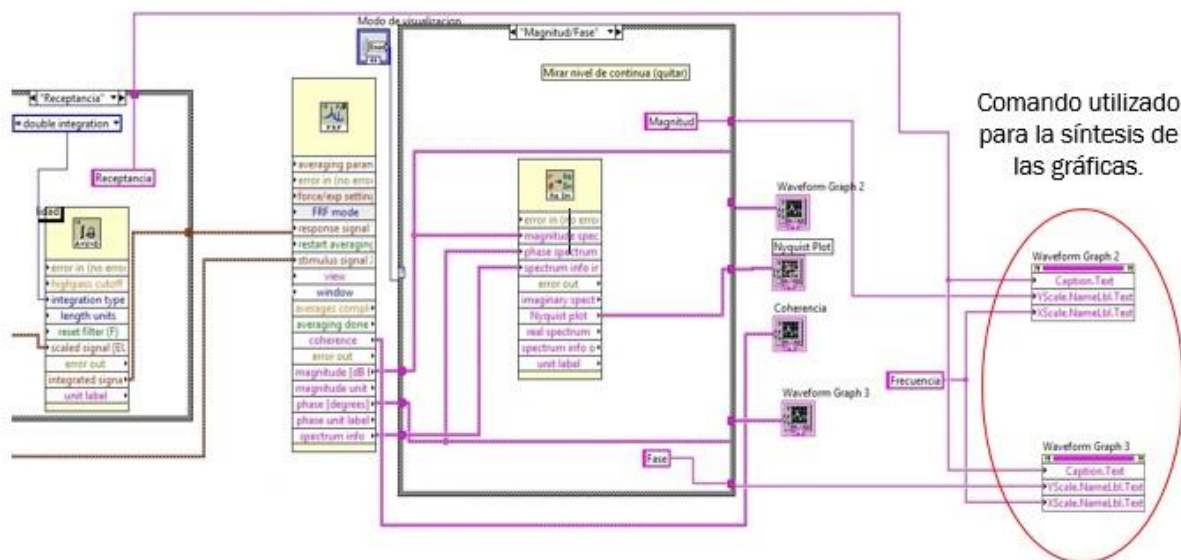


Figura 4.17. Descripción gráficas.

La última parte que va a describirse del programa es la elección del tipo de ventana en cada una de las señales analizadas. Uno de los motivos por los cuales hay que prestar atención a esta elección es que si se elige una ventana errónea en cualquiera de las gráficas que representan las magnitudes que se van a analizar, éstas pueden no medirse de manera correcta. Por ello se va a hacer una descripción teórica pormenorizada que podrá encontrarse en el anexo B de esta memoria. En este anexo se podrá contemplar, además de la función matemática que sigue cada tipo de ventana, también su forma.

Lo que podrá verse en este punto es cómo se ha programado esta función que permite la elección al usuario de la ventana que desea, en las siguientes líneas podrán contemplarse los pasos que se han seguido.

En primer lugar, se va a empezar por los tipos de ventana que LabVIEW permite utilizar para las señales excitación y respuesta. En la Figura 4.18 se muestran los tipos de ventana considerados por LabVIEW.

0	Rectangle
1	Hanning (default)
2	Hamming
3	Blackman-Harris
4	Exact Blackman
5	Blackman
6	Flat Top
7	4 Term B-Harris
8	7 Term B-Harris
9	Low Sidelobe
11	Blackman Nutall
30	Triangle
31	Bartlett-Hanning
32	Bohman
33	Parzen
34	Welch
60	Kaiser
61	Dolph-Chebyshev
62	Gaussian

Figura 4.18 Tipo de ventana Fuerza/Aceleración

A través de los números que se aprecian en el margen izquierdo de la figura, la función utilizada es capaz de distinguir qué tipo de ventana está demandando el usuario. Ese número puede aportarse a la función de manera fija, si por ejemplo se supiera de antemano la ventana que se debe elegir en concreto, o mediante una función *Enum*, dando la posibilidad al usuario de elegir qué tipo de ventana es la más adecuada o simplemente probar entre todas las posibilidades para ver los resultados aportados. En este trabajo, la elección del tipo de ventana se ha realizado de esta segunda forma, puesto que el programa tendrá un futuro uso didáctico, y de esta manera el alumno podrá interactuar con él.

De manera análoga se ha realizado la elección de ventanas para el caso de la FRF, para las gráficas de las funciones de transferencia Inertancia, Movilidad o Receptancia. La única diferencia es que aquí se ha programado el uso de todas las ventanas posibles. En el caso anterior (tipo de ventana para la señal excitación y respuesta) tan solo se ha hecho desde la opción 1 a la 9 (números margen izquierdo de la Figura 4.18) Se realizó solo de éstas porque después de una serie de pruebas, era a través de las cuales se obtenían mejores resultados

Para esta programación se han utilizado varios bucles condicionales *if* encadenados. Así, el *Enum* de elección que se identifica en la Figura 4.19

almacena las opciones de ventana como números consecutivos. Para este caso concreto se tienen 20 ventanas diferentes, como se aprecia en la Figura 4.18, por lo que la función *Enum*, los va a almacenar de 0 a 19. Si la función *Enum* pasa ese número concreto a la función FRF, el resultado que se obtendría en algunas ventanas, no sería el deseado, incluso en algunas el programa daría error. La razón de esto es que como se puede identificar en la Figura 4.18 cuando se pasa de la ventana *Blackman nuttall* a la ventana *triangle*, el número deja de ser consecutivo y pasa de ser 11 a ser 30. De ahí que el bucle inicial diga que los valores menores que 11 pasen directos, como se ve en la Figura 4.19, por el contrario, en la Figura 4.20 se aprecia qué ocurre con los valores asociados a ventanas correspondientes al intervalo entre 12 y 16, que deben corresponderse con aquellos valores que van desde 30 a 34 (ver Figura 4.18).

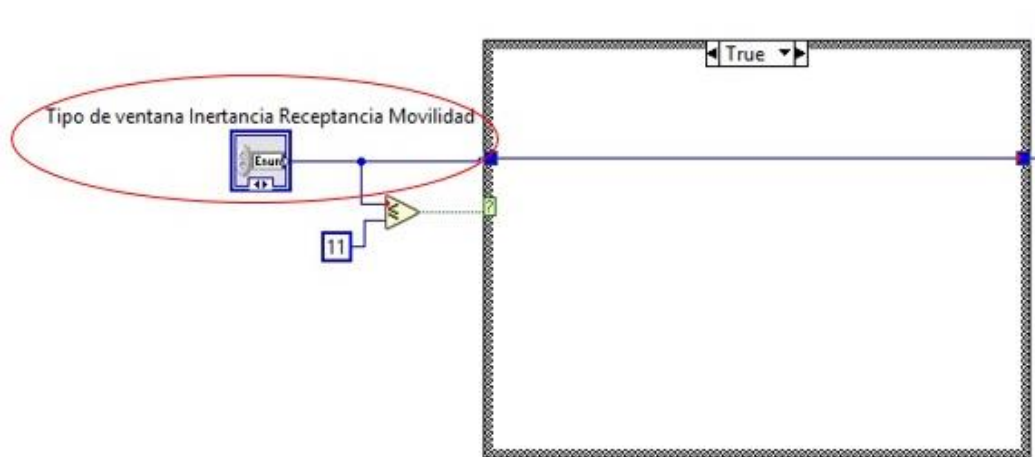


Figura 4.19 Bucles ventanas FRF de 1 a 11

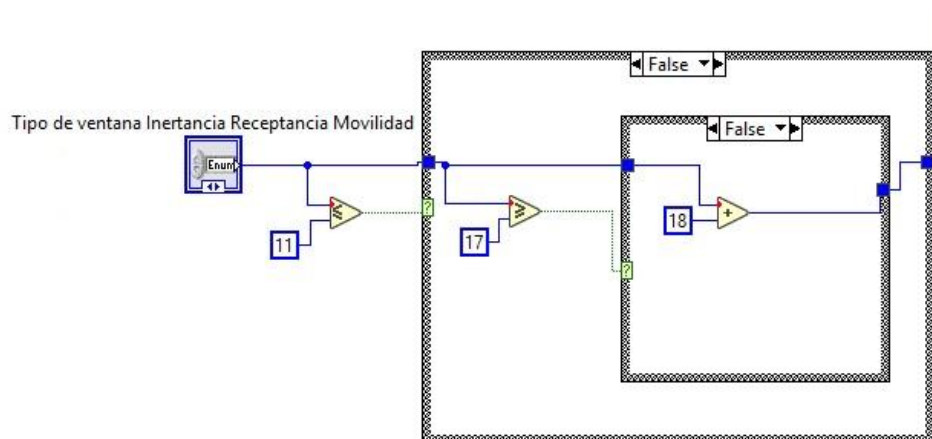


Figura 4.20 Bucles ventanas FRF de 30 a 34 (previos de 12 a 16)

Para este caso se ve que si los valores que están comprendidos en *Enum*, entre 12 y 16 ambos incluidos, se les suma un entero de valor 18. De

esta manera, el número que se envía a la FRF está comprendido entre 30 y 34, el número correcto de la ventana que se podría elegir en el caso de necesitarla.

Para el caso de las últimas 3 ventanas, el procedimiento se realiza de manera análoga como puede verse en la Figura 4.21, en la cual se cambia el entero a sumar, 18 por el entero 48, de esa manera se consigue el número buscado, pasando del intervalo entre 17 y 19, a los valores entre 60 y 62.

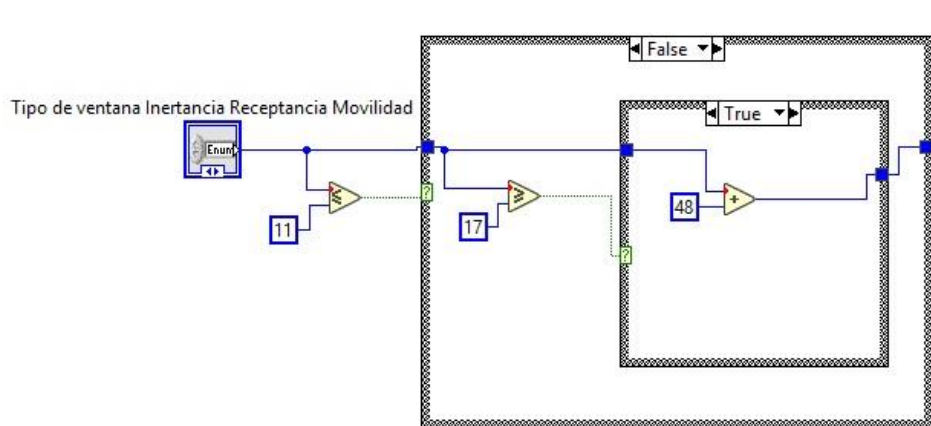


Figura 4.21. Bucles ventanas FRF de 60 a 62 (previos de 17 a 19)

4.3. INTERFAZ DE USUARIO:

El programa se ha diseñado de manera que sea sencillo visualizar las magnitudes o funciones a analizar. De esta forma el usuario podrá adquirir los datos que le interesan de manera sencilla. En el anexo C.2 puede verse una imagen de la interfaz completa que podrá visualizarse.

En este apartado se va a describir cada una de las gráficas de las funciones obtenidas por el programa de manera más pormenorizada.

En las gráficas que se observan en la Figura 4.22a, lo que se puede distinguir es el impacto del martillo (señal excitación), apreciando en el dominio del tiempo, grafica izquierda, la amplitud de dicho impacto, el cual, tal y como se observa, es muy corto en el dominio del tiempo y de amplitud variable en función de la intensidad con la que el usuario efectúe el golpe.

En el dominio de la frecuencia, en la Figura 4.22b, se distingue el rango de frecuencias que excita el martillo. Antes de que la gráfica decaiga serían los valores admisibles de excitación. Esta gráfica puede compararse con la teórica proporcionada por el fabricante en la Figura 3.3. Haciendo esta comparación puede verse que, la amplitud final en la que la gráfica cae es desde -20 dB y el valor de la frecuencia está en torno a los 500 Hz, por lo que puede comprobarse que los resultados obtenidos a través del programa son correctos.

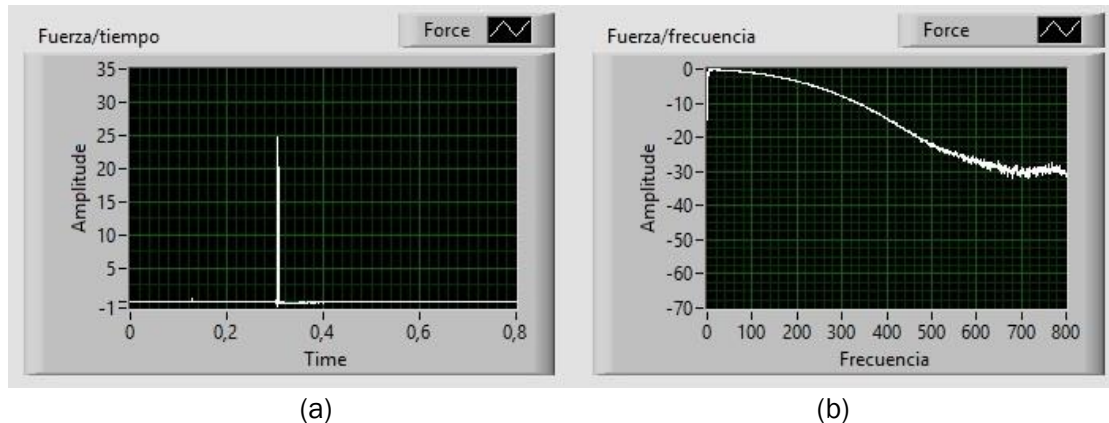


Figura 4.22 Impacto dominios (a) tiempo y (b) frecuencia.

En la Figura 4.23a puede distinguirse la señal respuesta en el dominio del tiempo y en la Figura 4.23b su espectro en frecuencia. Lo que se aprecia en la Figura 4.23b (aceleración en el dominio de las frecuencias) son las frecuencias de resonancia de la pieza analizada.

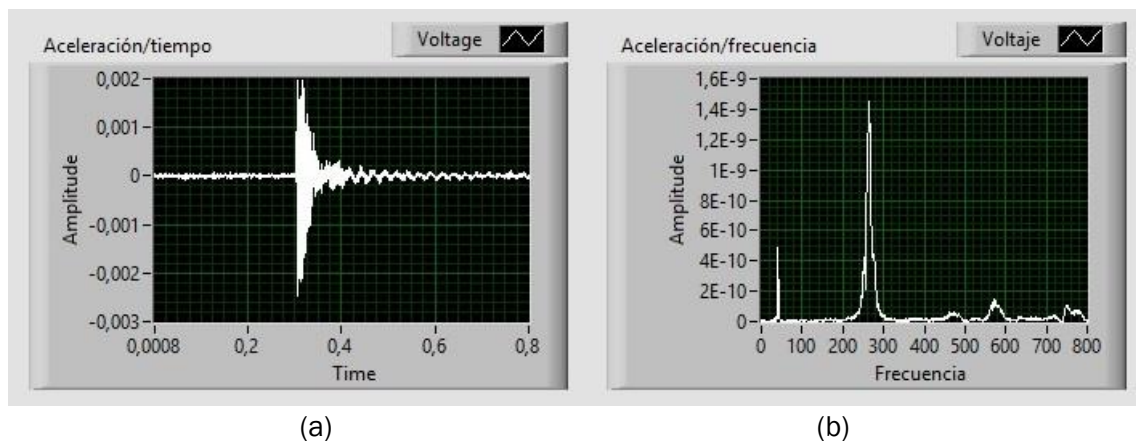


Figura 4.23 Aceleración dominios (a) tiempo y (b) frecuencia

Las siguientes gráficas que se van a analizar son las de la función coherencia y el diagrama de Nyquist.

La función coherencia en este caso particular (Figura 4.24a) es una función teórica, puesto que al tratarse de una medida instantánea el resultado sería malo, si se pudiese realizar un promedio de varias medidas podría verse cómo esta función iría aproximándose a 1.

El mismo resultado ocurre con el diagrama de Nyquist, que debería asemejarse a una circunferencia, pero por la misma razón descrita antes, el resultado es el que puede apreciarse en la Figura 4.24b. Al tratarse de una pieza real nunca podrá ser una circunferencia perfecta, pero sí algo más precisa si se lleva a cabo el promedio antes descrito.

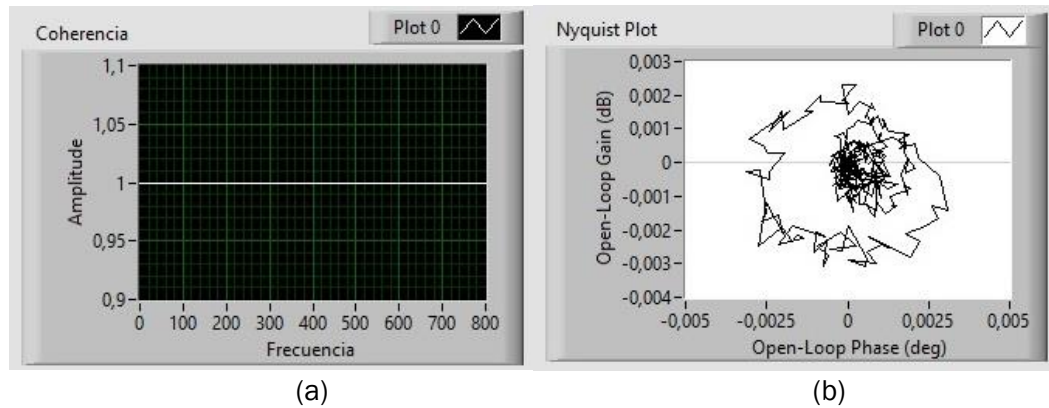


Figura 4.24 Función Coherencia (a) y Diagrama de Nyquist (b)

Las siguientes graficas que van a describirse son las funciones FRF calculadas por el programa, Inertancia, Movilidad y Receptancia. Se empezará por la función Inertancia, puede verse en sus dos representaciones módulo y fase, y parte real y parte imaginaria en las Figuras 4.25 y 4.26, respectivamente.

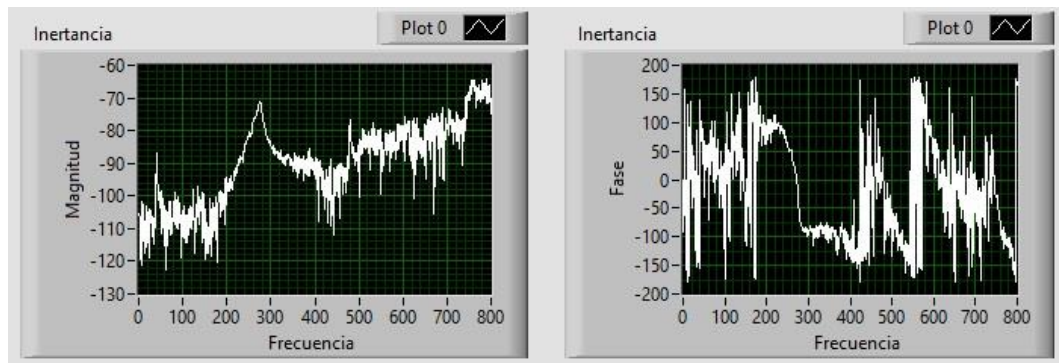


Figura 4.25 Inertancia en Modulo/Fase.

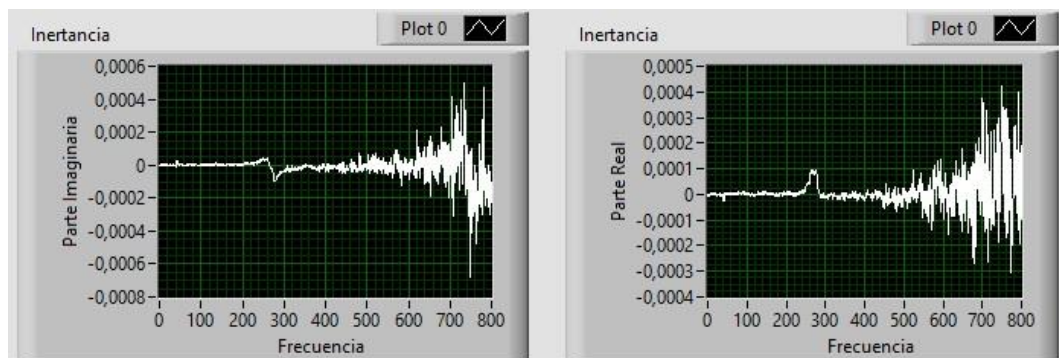


Figura 4.26 Inertancia en Parte Real y Parte Imaginaria.

En las figuras 4.27 y 4.28 pueden apreciarse, también en sus dos representaciones, la FRF movilidad.

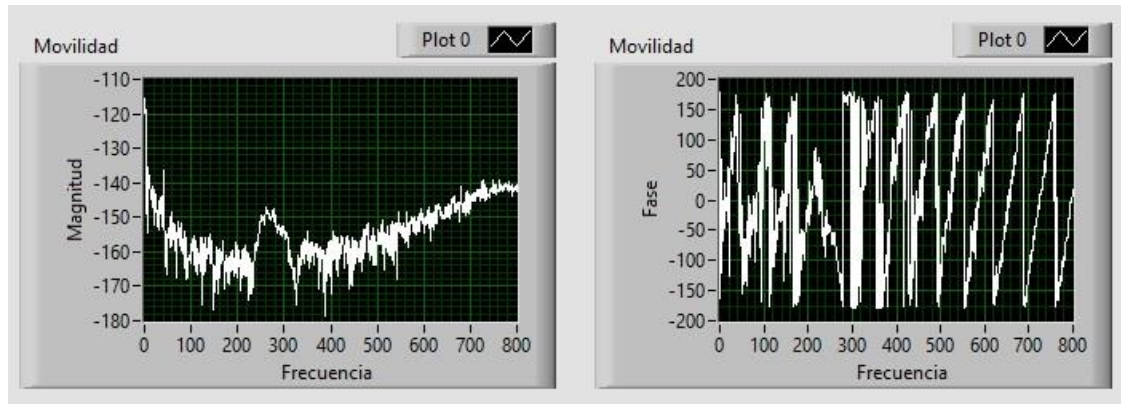


Figura 4.27 Movilidad en Módulo/fase

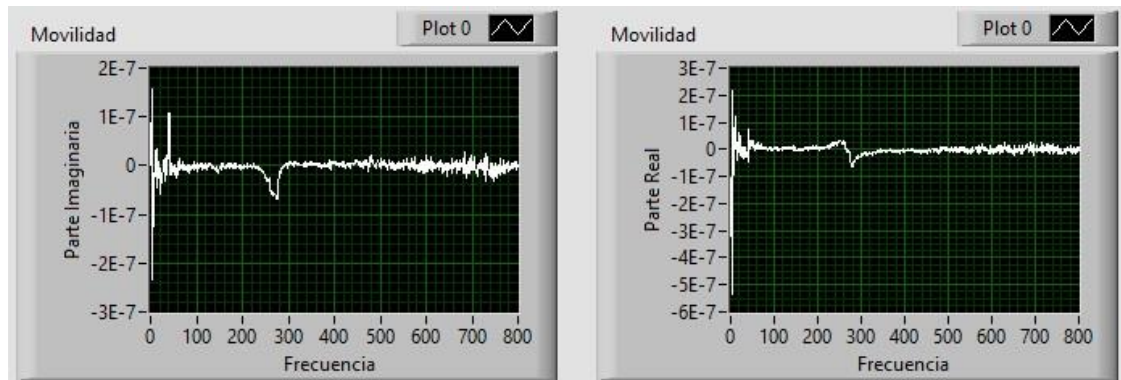


Figura 4.28 Movilidad en Parte real y Parte imaginaria

En estas dos últimas gráficas, figuras 4.29 y 4.30 lo que se ve es, la FRF Receptancia, en sus diferentes representaciones.

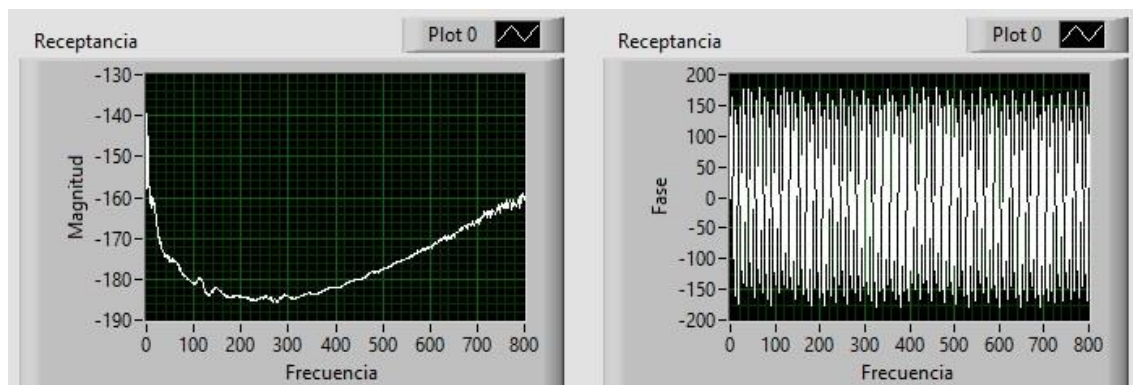


Figura 4.29 Receptancia en Modulo/fase

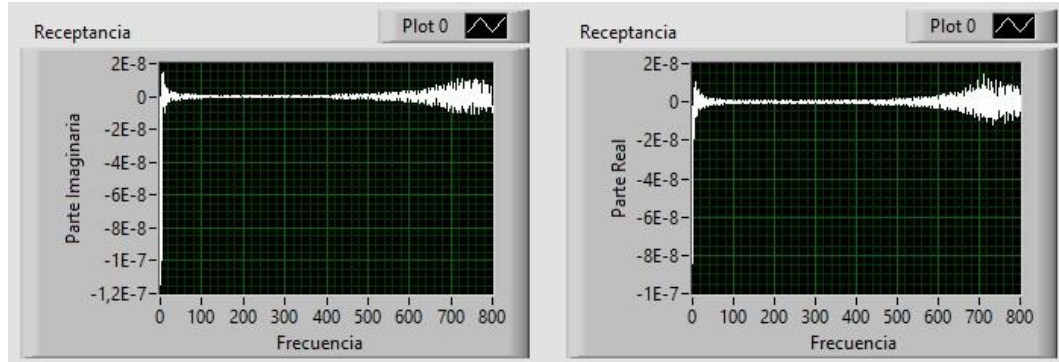


Figura 4.30 Receptancia Parte real y Parte imaginaria.

En los desplegables que se distinguen en la Figura 4.31, lo que encuentra el usuario es la posibilidad de elegir qué tipo de ventana desea para representar las magnitudes aceleración y fuerza, así como las Funciones Respuesta en Frecuencia Inertancia, Movilidad y Receptancia, pudiendo de esta manera visualizarlas de una manera más correcta en función del tipo de magnitud que se esté analizando. El otro desplegable que se aprecia es el que da la opción por pantalla de elegir entre dos tipos de visualización diferentes, representadas por parte real y parte imaginaria, o módulo y fase.



Figura 4.31 Desplegables

Como resumen final a este capítulo se va a mostrar la Figura 4.32, en la cual puede visualizarse toda la interfaz de usuario y de esta manera el lector va a poder ubicar mejor todas las gráficas previamente explicadas. Si el lector necesitase una imagen más descriptiva puede acudir al Anexo C.2.

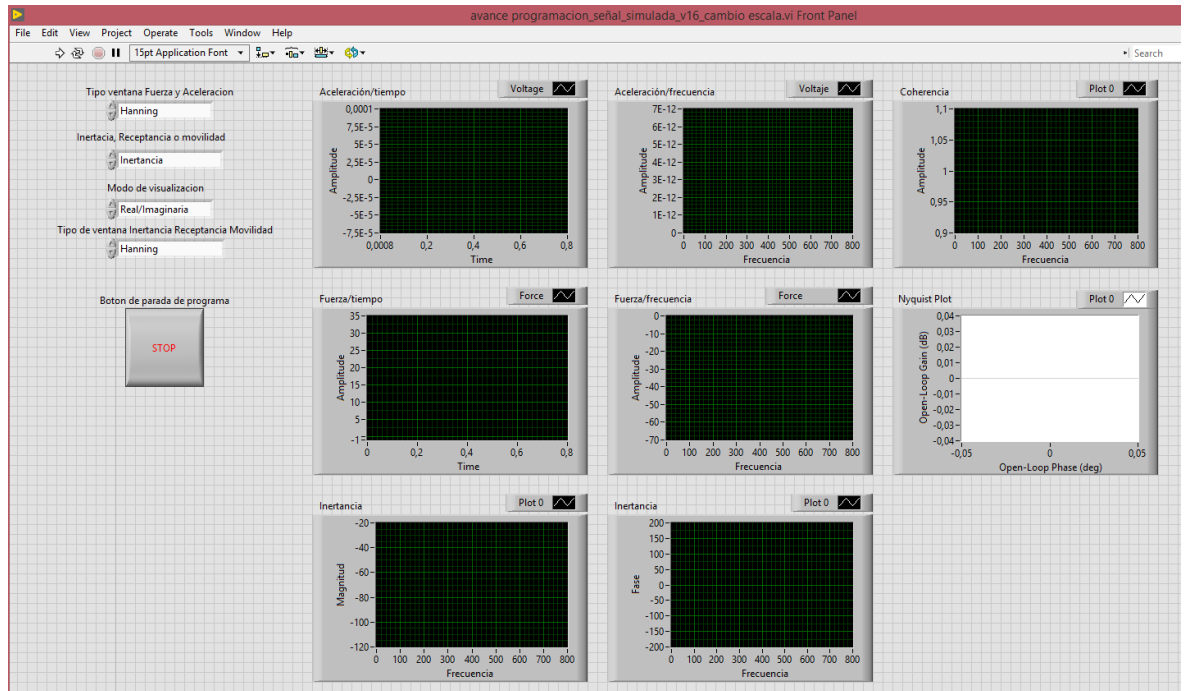


Figura 4.32 Interfaz completa.



5. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURO:

5.1. CONCLUSIONES

Los objetivos que se marcaron a la hora de realizar este TFG, fueron en su mayoría, objetivos prácticos, todos ellos con el objetivo de que los alumnos que utilicen este montaje, puedan asimilar mejor los conceptos teóricos básicos que posee el mundo de las vibraciones. De esta manera se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- 1- El programa es capaz de obtener experimentalmente los espectros en frecuencia de ambas señales aceleración y fuerza. Se ha confirmado su buen funcionamiento, puesto que a la par que el programa analizaba el proceso, el antiguo analizador FFT utilizado en las practicas también lo hacía, obteniendo resultandos análogos para ambos análisis.
- 2- Los resultados se presentan de manera gráfica, tal y como se estipuló al inicio del TFG. Esto gráficos presentan de forma nítida y clara, tanto en el dominio del tiempo como en su espectro en frecuencia, los valores a tener en cuenta en el análisis de vibraciones.
- 3- La interfaz es dinámica, puesto que la elección de criterios de análisis es sencilla y se realiza mediante despleables con los que el usuario puede interactuar de una manera visual e intuitiva, sin necesidad de comprometer el funcionamiento del programa.
- 4- En la elección del tipo de ventana, el usuario puede ver los resultados de seleccionar diferentes tipos de ventanas en las magnitudes analizadas (FRF Inertancia, FRF Movilidad y FRF Receptancia), puesto que no sólo está programado para un tipo, sino para todos. La manera de cambiarlo es sencilla, mediante despleables, y rápida en obtener su resultado. De esta forma se refuerza más el carácter didáctico del programa.
- 5- En el código de este programa se han introducido comentarios aclaratorios en todas las operaciones realizadas, para que, de esta forma, en posibles líneas de trabajo futuro sobre este Trabajo Fin de Grado no se pierda tiempo en analizar el programa en profundidad y se pueda trabajar en la parte concreta asociada a las posibles futuras actualizaciones.
- 6- El manual de usuario de este programa, Anexo A, se la realizado de manera muy gráfica, con imágenes descriptivas, pensando en que el alumno pierda el menor tiempo posible en configurar los diferentes parámetros de dicho programa.
- 7- La realización de este Trabajo Fin de Grado me ha supuesto personalmente, la formación en diferentes áreas, como el análisis modal o la programación gráfica mediante software LabVIEW.





5.2. LINEAS DE TRABAJO FUTURO

Durante la elaboración de este TFG, se han apreciado posibles mejoras o adaptaciones para hacer del programa una herramienta todavía más útil en el aprendizaje y formación de asignaturas relacionadas con las vibraciones. Posibles líneas de mejora o trabajo futuro podrían ser las siguientes:

- 1- Una línea de trabajo futuro en la que puede trabajarse sería la realización de un promediado de los diferentes datos que el programa captura cuando el usuario excita a la estructura con un impacto, de esta manera se ganaría precisión, por ejemplo en la gráfica de la coherencia o el diagrama de Nyquist.
- 2- Otra posible mejora que podría realizarse es, el empleo de un trigger, de modo que el programa sea capaz de permanecer a la espera para que la captura se inicie cada vez que el usuario realice una excitación, por ejemplo con el martillo de impactos. En la actualidad el proceso de medida se realiza de manera continua, y de esta manera se ganaría comodidad en su uso.
- 3- Podría trabajarse también sobre este programa, primero comprobando su funcionamiento con una estructura más compleja o adaptándolo si se necesitase, y también sustituyendo el martillo de impactos por un shaker, aparato con el cual el usuario podría elegir la frecuencia de excitación a la estructura.





4- BIBLIOGRAFÍA

- [Balachandran, 2005] Balachandran, B. y Magrab, E. Vibraciones, Thompson, 2005
- [Ewins, 1984] Ewins, D. J. Modal testing: Theory and Practice, Research Studies Pr, 1984
- [Herráez, 1991] Herráez Sánchez, Marta. Análisis modal de una viga en voladizo, 1991
- [Lajara, 2011] Lajara Vizcaino, J. Rafael. y Pelegrí Sebastiá, J. LabVIEW Entorno gráfico de programación, Marcombo, 2011
- [Lyon, 1986] Lyon, Richard H. Machinery Noise and Diagnostics, Butterworths, 1986
- [Maraver, 1997] Maraver Valverde, Raul. Análisis modal de la puerta de un automóvil, 1997.
- [Newland, 1975] Newland, D. E. Vibraciones aleatorias y análisis espectral, AC-Longman Group Limited, 1975
- [Oppenheim, 2011] Oppenheim, Alan V. y Schafer, Ronald W. Tratamiento de señales en tiempo discreto, Pearson, 2011.
- [Sanz, 2005] Sanz Pinyol, Gloria. Comunicación efectiva en el aula. Técnicas de expresión oral para docentes, Grao, 2005.
- [Wowk, 1991] Wowk, V. Machinery Vibration, McGraw-Hill, 1991
- [Brüel 1, 1998] Structural Testing Part 1: Mechanical Mobility Measurements, Brüel & Kjaer
- [Brüel 2, 1998] Structural Testing Part 2: Modal Analysis and Simulation, Brüel & Kjaer
- [Web 1] Explicación término octava (último acceso Abril 2021)
<https://topaudioprofesional.blogspot.com/2012/04/que-es-una-octava-media-octava-y-tercio.html>
- [Web 2] Imagen explicación error aliasing (último acceso Abril 2021):
https://www.researchgate.net/figure/An-example-of-aliasing-in-the-time-domain-The-two-signals-have-the-same-values-at-the_fig6_28359715



- [Web 3] Manual de usuario martillo de impactos PCB 086C03 (último acceso Abril 2021):
<http://www.pcb.com/Products/model/086C03>
- [Web 4] Manual de usuario acelerómetro B&K 4393 (último acceso Abril 2021):
<https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2043.ashx>
- [Web 5] Explicación tecnología IEPE (último acceso Abril 2021):
<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/70480B2FE2994EDB86257ED60058E8D6>
- [Web 6] Manual de usuario tarjeta adquisición NI 9234 (último acceso Abril 2021):
http://www.ni.com/pdf/manuals/374238a_02.pdf
- [Web 7] Manual de usuario chasis NI 9174 (último acceso Abril 2021):
<http://www.ni.com/pdf/manuals/374045a.pdf>



ANEXO A: MANUAL DE USUARIO

1. Cómo conectar todos los elementos de la cadena de medida.
 - a. Señal excitación.
 - b. Señal respuesta.
 - c. Conexión a red y conexión al ordenador.
2. Puesta en marcha y configuración de parámetros en el programa.
 - a. Señal excitación.
 - b. Señal respuesta.
3. Configuración de canales en la tarjeta de medida.
4. Creación de una nueva tarea dentro del programa.
5. Manejo de la interfaz.

1. CÓMO CONECTAR TODOS LOS ELEMENTOS DE LA CADENA DE MEDIDA:

La primera parte del manual de usuario va a mostrar cómo se deben conectar todos los elementos de la cadena de medida utilizada para las mediciones que se realicen con este programa.

La cadena de medida es la siguiente:

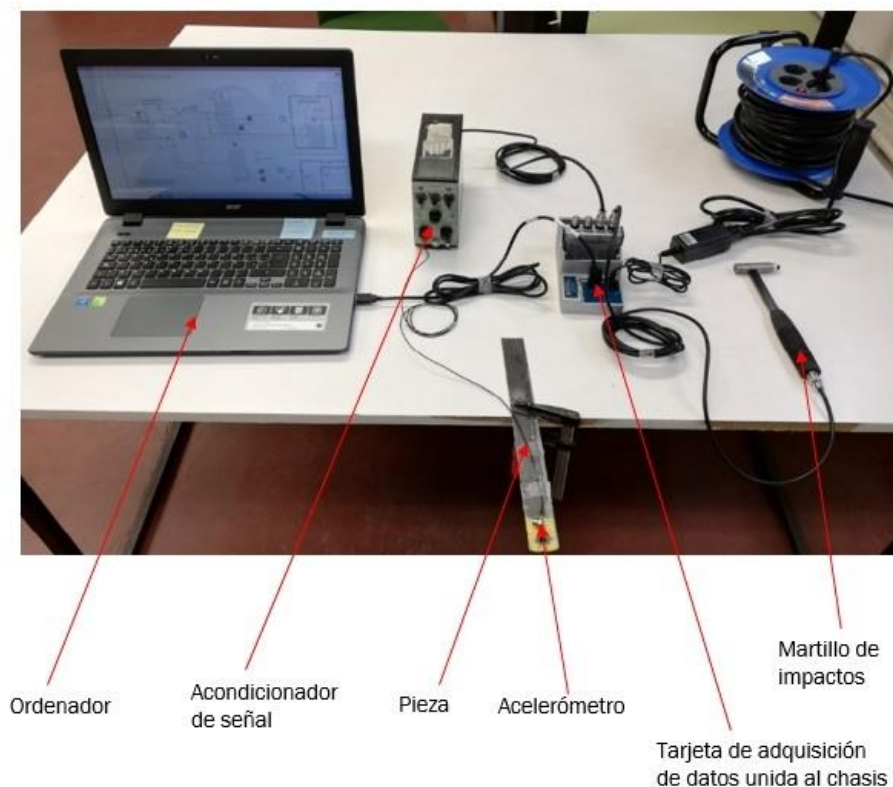


Figura A.1 esquema general de la cadena de medida.

a. SEÑAL DE EXCITACION

Se empezará a explicar cómo se conecta la parte de la cadena que medirá la señal de excitación, en este caso el martillo de impactos.

El martillo de impactos, como se puede ver en la Figura A.2, posee varias partes.

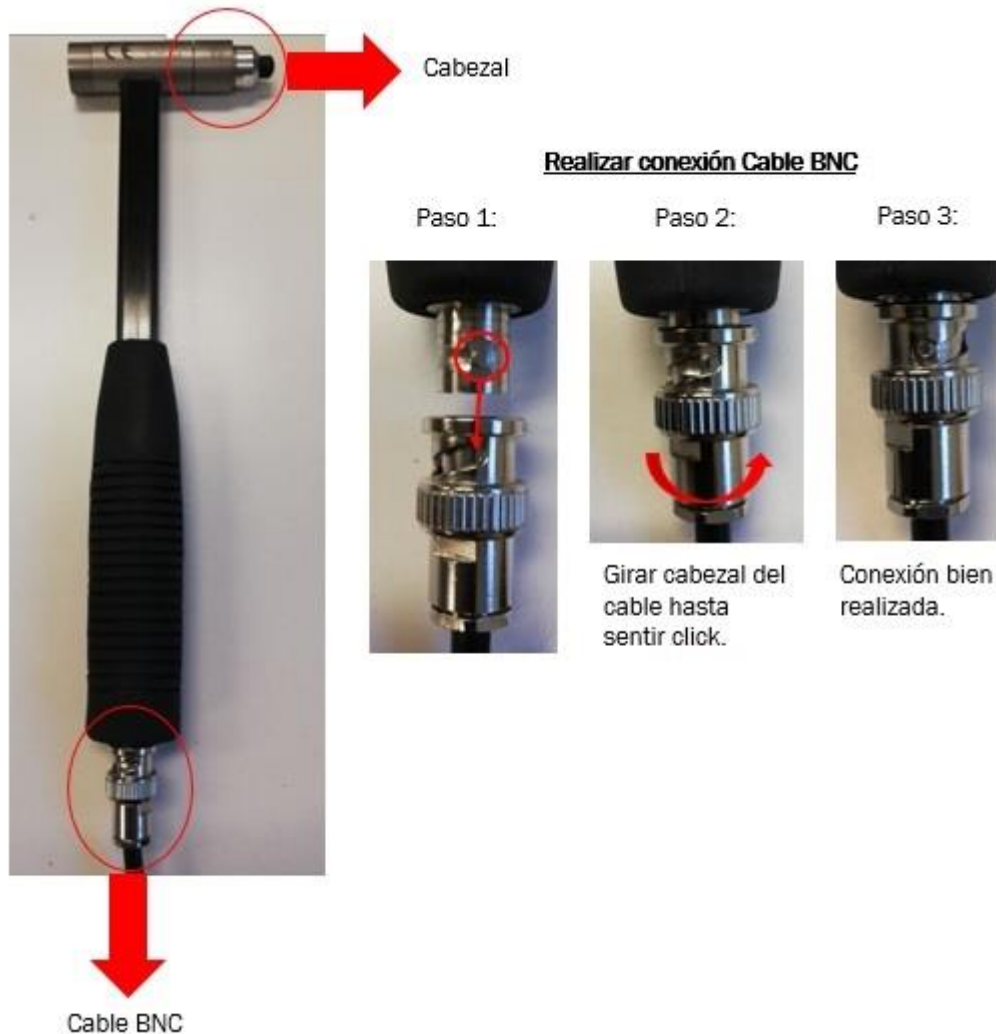


Figura A.2 Esquema conexión martillo de impactos.

El cabezal del martillo puede tener diferentes puntas de distintos materiales, asociadas éstas a diferentes durezas. Estos cabezales son intercambiables de manera sencilla, enroscándose y desenroscándose simplemente como si de una tuerca se tratase. Los diferentes cabezales permiten modificar el rango de frecuencia de excitación, a más dureza del cabezal o punta, más rango de frecuencias de excitación.

Una vez se tiene el martillo conectado al cable BNC, se tendrá que conectar éste a la tarjeta de adquisición de datos. La manera de conectar el

cable a la tarjeta es la misma que se ha visto para el martillo, sólo se debe tener en cuenta el número de canal de la tarjeta al que se conecta, la Figura A.3 explica el proceso.

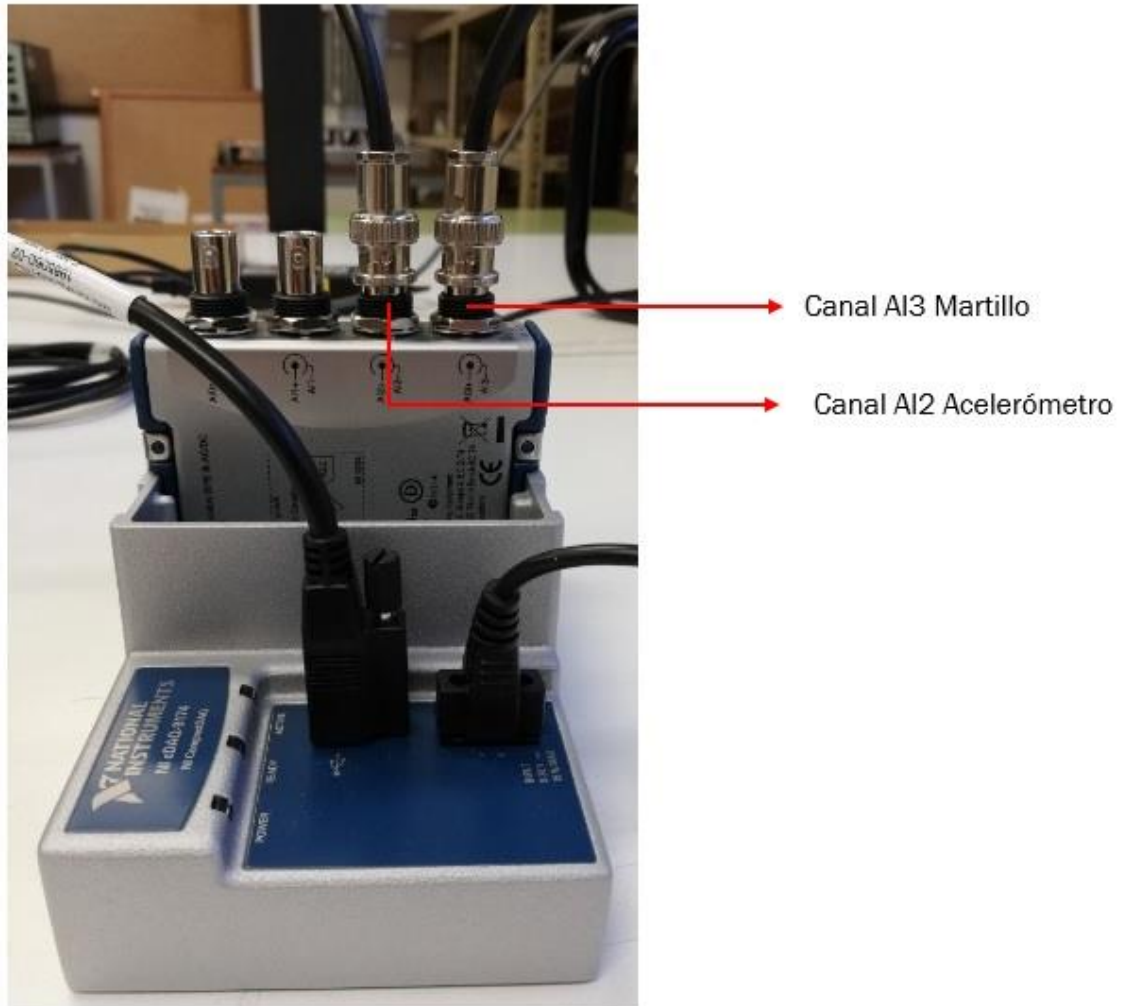


Figura A.3 Conexión del cable Martillo a la Tarjeta.

Este número de canal es configurable y se puede cambiar desde el programa, tal y como se explicará en el punto 3 de este manual.

b. SEÑAL RESPUESTA:

La descripción de la obtención de la señal de respuesta consta de dos partes:

- Fijación del acelerómetro y conexión de éste al acondicionador.
- Fijación del cable de salida del acondicionador a la tarjeta de adquisición.

La primera parte se va a realizar de manera sencilla, utilizando cera de abeja que actuará como fijador del acelerómetro a la pieza sobre la que necesitamos medir.



Cera de montaje

Figura A.4 montaje del acelerómetro sobre la pieza.

Una vez se tiene fijado el acelerómetro, se va a proceder a realizar la conexión con el acondicionador de señal (Figura A.5). Ésta se realiza mediante una conexión *microdot* en el input del acondicionador.



Figura A.5 conexión del acelerómetro al acondicionador.

Cuando el acelerómetro está conectado de manera correcta al acondicionador, el siguiente paso será conectar éste a la tarjeta de adquisición.

Para ello se dispone de un cable BNC, como el utilizado en la señal excitación, el cual se conectará de la misma manera, sólo teniendo en cuenta que debe salir del conector nombrado como *output* en el reverso del acondicionador, tal y como se muestra en la Figura A.6, y debe ir al *canal AI2* de la tarjeta de adquisición, tal y como se mostraba en la Figura A.3.



Figura A.6 Reverso acondicionador

Si en un futuro se pasase a utilizar acelerómetros con tecnología IEPE, el paso de la instalación de este elemento, no debería de realizarse, conectando el acelerómetro directamente a la tarjeta sería suficiente.

c. CONEXIÓN A RED Y AL ORDENADOR.

Una vez se tiene conectadas, tanto la parte asociada de la cadena de medida a la señal excitación, como la parte asociada a la señal respuesta, sólo queda conectar la tarjeta a la fuente de alimentación y dicha tarjeta al

ordenador a emplear. Esta conexión al ordenador se realizará mediante un simple puerto USB (Figura A.7).

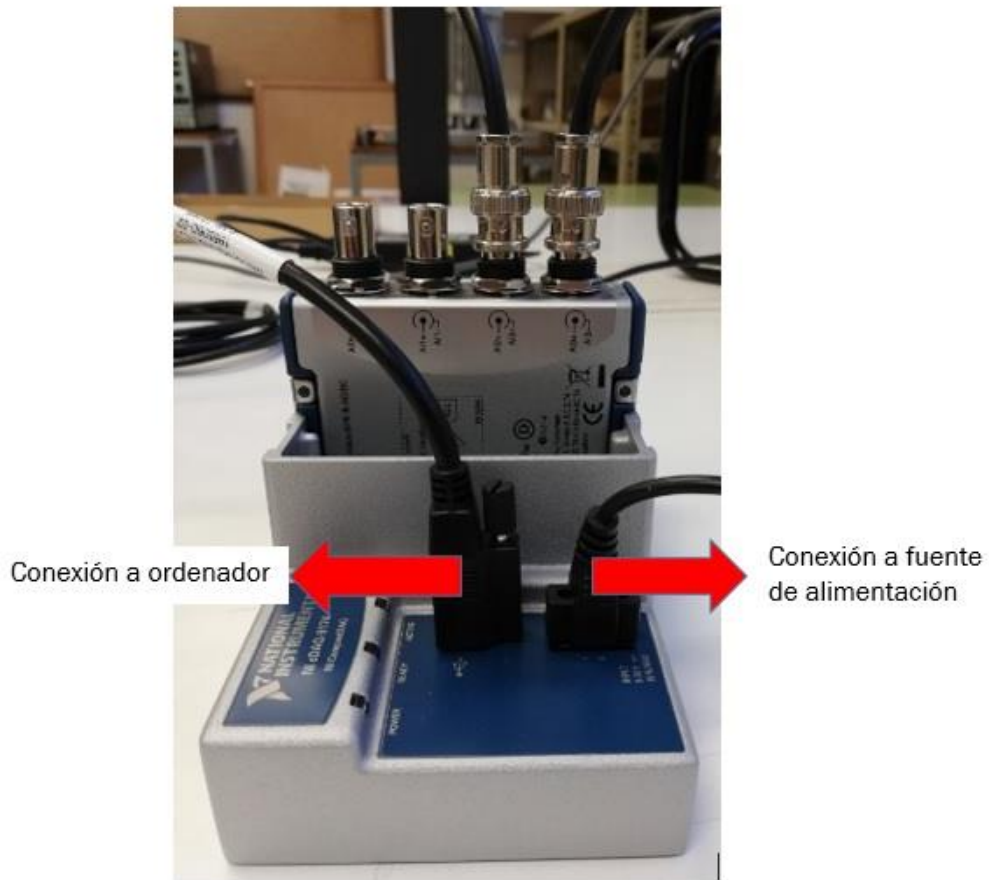


Figura A.7 Conexión tarjeta ordenador.

Con la parte de la cadena de medida ensamblada, el siguiente paso será arrancar el programa y configurar los parámetros necesarios.

2. PUESTA EN MARCHA Y CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS EN EL PROGRAMA:

La puesta en marcha de este programa LabVIEW se realiza de manera sencilla. El usuario hará doble clic sobre el icono de inicio de LabVIEW, y desde *File_Open* podrá seleccionar dicho programa según la ruta donde esté guardado. En el momento en el que el programa arranque se podrá visualizar la siguiente interfaz de usuario, mostrada en la Figura A.8.



Figura A.8 Interfaz de usuario

Ahora que el programa está en funcionamiento, el usuario debe empezar a introducir los parámetros de los transductores de medida.

a. SEÑAL DE EXCITACIÓN:

Se empezará por el transductor de fuerza, los parámetros que se deben introducir son la sensibilidad y la frecuencia de muestreo a la que queremos que actúe el programa. Para ello el usuario debe hacer visible el diagrama de bloques del programa. Esto se realiza presionando *Ctrl+t*, una vez se haya presionado aparecerá en la pantalla el correspondiente diagrama de bloques. La parte que interesa del diagrama de bloques es la que se puede visualizar en la Figura A.9 y se identifica como *Función 1*.

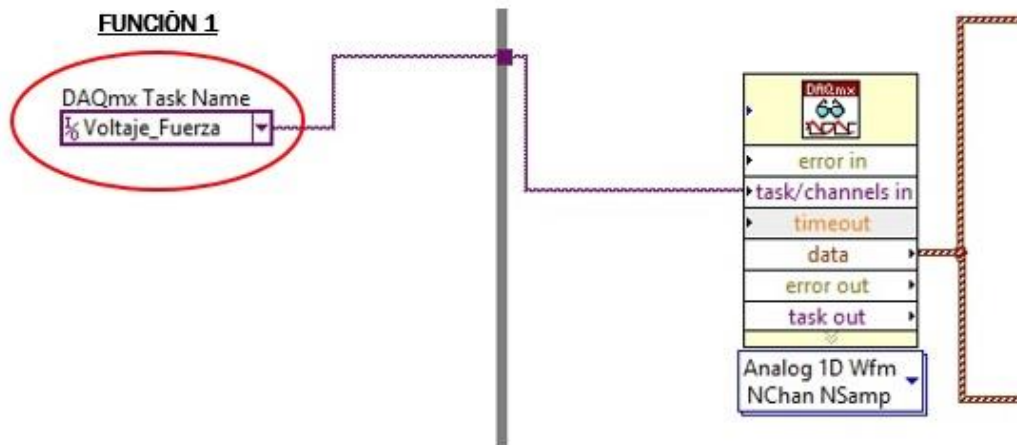


Figura A.9 Diagrama de bloques. Introducción de parámetros.

Para introducir la sensibilidad debe ir con el ratón sobre el icono resaltado en rojo en la Figura A.9 y hacer *click* con el botón derecho para que aparezca el desplegable que se muestra en la Figura A.10.

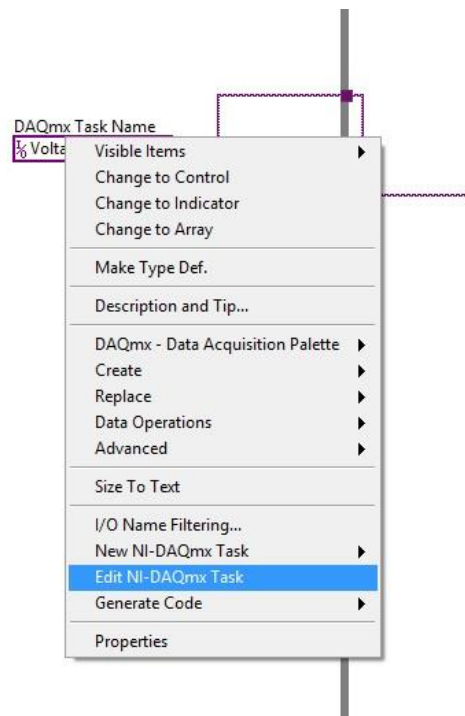


Figura A.10 desplegable para introducción de sensibilidad.

Una vez es visible el desplegable, se selecciona con el botón izquierdo *Edit NI-DAQmx Task*. Al hacer esto aparecerá por pantalla el menú sobre el cual podremos introducir los parámetros (Figura A.11). El usuario debe elegir la opción *Force*, y una vez ahí se pueden introducir tanto la sensibilidad como la frecuencia de muestreo en las casillas resaltadas en rojo y azul

respectivamente en la Figura A.11. Al número de muestras, casilla resaltada en verde, el programa asociará por defecto el mismo valor que la frecuencia de muestreo.

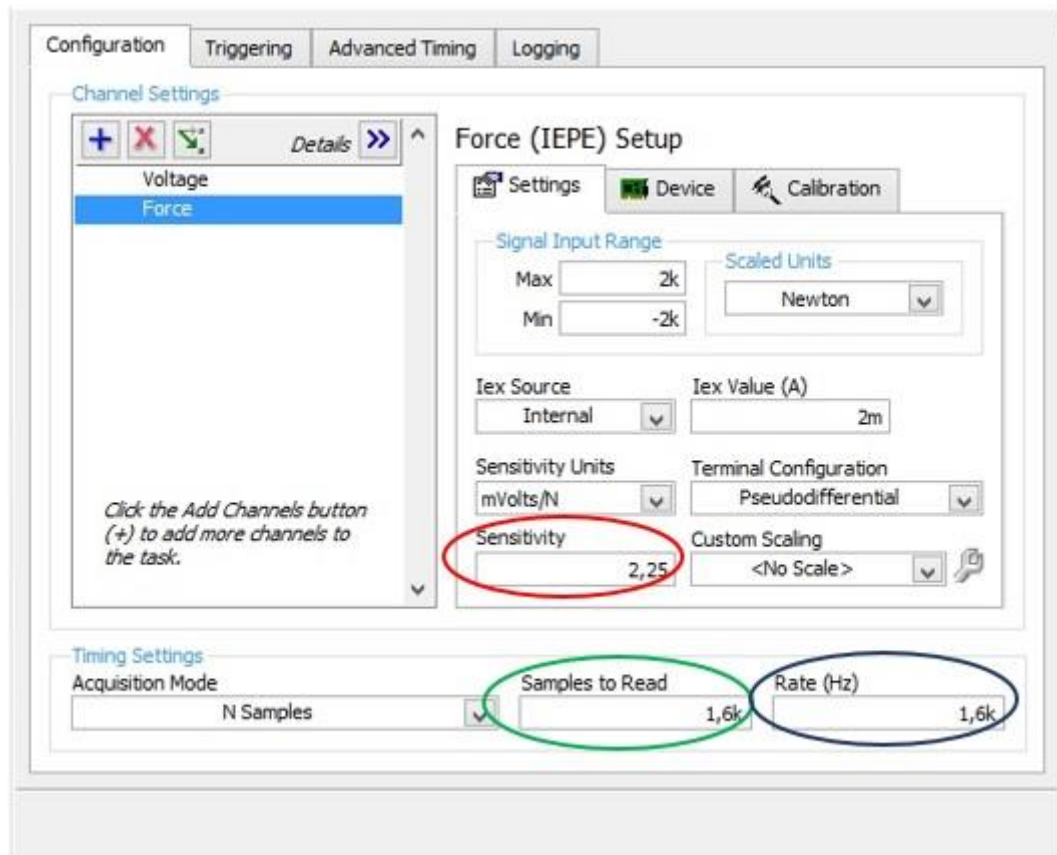


Figura A.11 Menú de introducción de parámetros señal de excitación.

Se presiona OK, y quedan memorizados ambos parámetros.

b. SEÑAL DE RESPUESTA

Para la señal respuesta, el proceso para introducir la frecuencia de muestreo es el mismo, la única diferencia es que debemos elegir la opción *Voltage* en el menú de introducción. Hecho esto el programa mostrará lo que puede verse en la Figura A.12

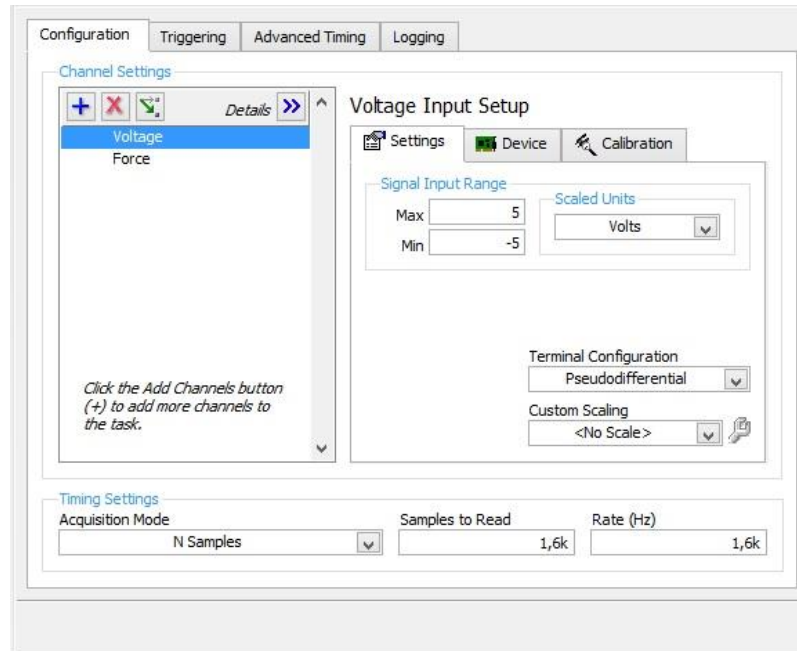


Figura A.12 Menú introducción de parámetros señal respuesta.

En este caso, la sensibilidad del transductor [$\mu\text{C}/\text{ms}^{-2}$] se introduce en el acondicionador, a través de indicaciones mostradas en la Figura A.13. Y la ganancia seleccionada en el acondicionador [mV/ms^{-2}], se introduce en el programa.



Figura A.13 Introducción de la sensibilidad acelerómetro.

Una vez se han introducido todos los parámetros de la cadena de medida en el programa, este está listo para funcionar.

3. CONFIGURACION DE CANALES DE LA TARJETA DE MEDIDA.

Los canales a los que se conectan tanto el acelerómetro (A/2), como el martillo de impactos (A/3) de la cadena de medida, están configurados inicialmente para que éstos procesen tanto fuerza como aceleración, respectivamente. Estos canales pueden cambiar de número si así le interesa al usuario. La manera de hacerlo sería la siguiente.

Abrir el diagrama de bloques del programa mediante *Ctrl+t*, tal y como se ha explicado previamente, buscar la *Función 1* que se ve en la Figura A.9. Una vez ahí, haga *click* con el botón derecho encima de la parte resaltada en rojo en la misma figura, aparecerá el desplegable de la Figura A.10, y seleccionamos *Edit NI-DAQmx*. Al hacer esto aparecerá en la pantalla el menú que se ve en la Figura A.11.

Cuando el usuario haya llegado hasta este menú, para cambiar de canal debe seleccionar la magnitud que desea cambiar, *Voltage* o *Force*, simplemente haciendo *click* con el botón izquierdo del ratón sobre la magnitud deseada.

Una vez seleccionada la magnitud que se quiere modificar, se deberá hacer *click* con el botón derecho del ratón sobre esta magnitud, y aparecerá el desplegable que puede verse en la Figura A.14.

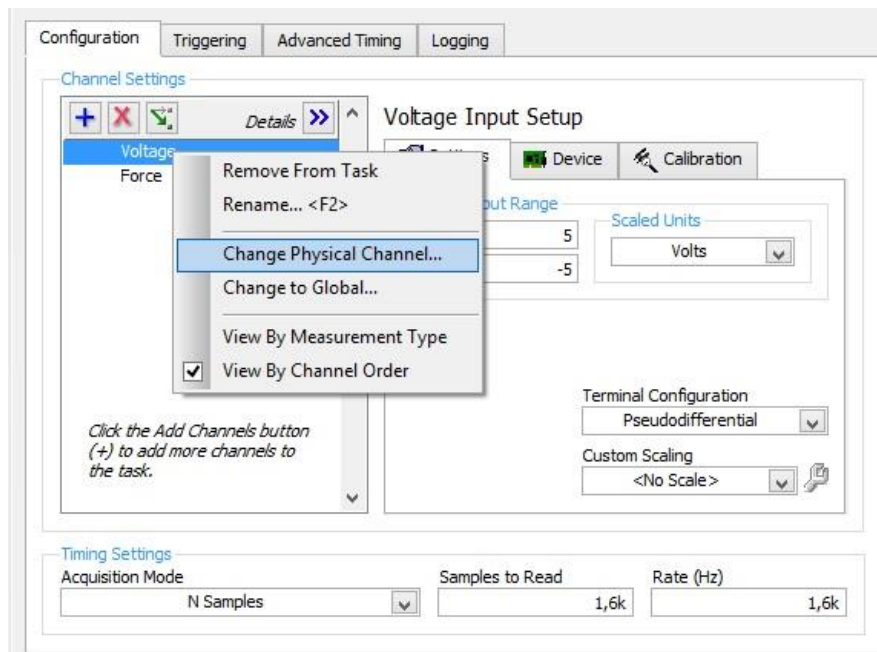


Figura A.14 Cambio de canal.

En este desplegable el usuario deberá elegir la opción *Change Physical Channel*. Una vez se seleccione esta opción, el programa mediante un

submenú (Figura A.15), dará la opción al usuario de elegir el canal deseado, para después confirmar con la tecla OK.

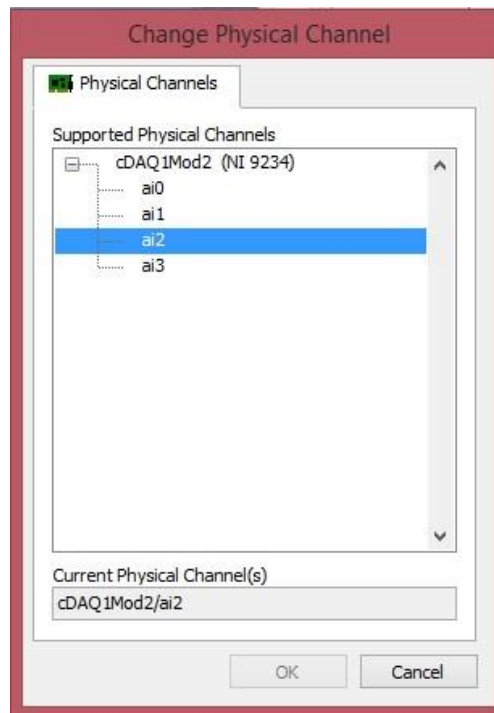


Figura A.15 Submenú elección de canal.

4. CREACIÓN DE UNA NUEVA TAREA DENTRO DEL PROGRAMA.

Se llama “creación de una nueva tarea” a asociar a la tarjeta de memoria una nueva magnitud que el usuario desea medir. Para ello el usuario deberá volver a abrir el diagrama de bloques del programa como ya se ha visto previamente, posicionarse en la *Función 1* resaltada en rojo de la Figura A.9 y una vez ahí, deberá abrir con el botón derecho el desplegable que aparece en la Figura A.16.

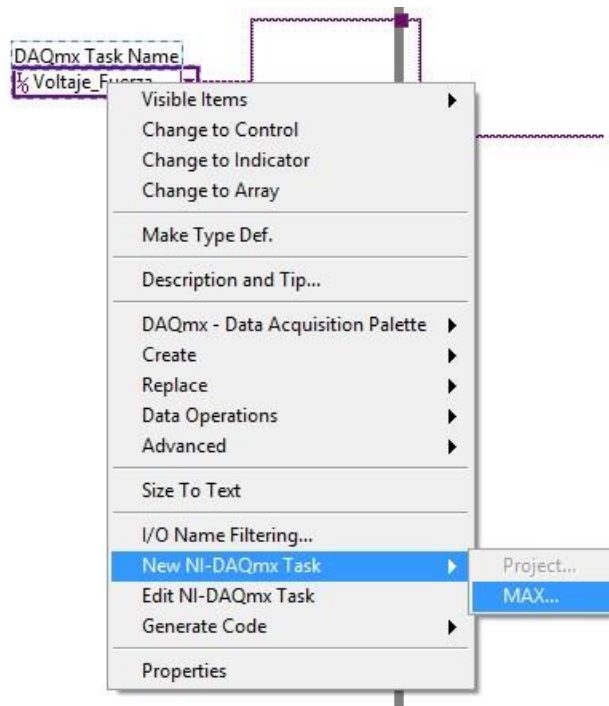


Figura A.16 Desplegable para creación de nuevas tareas.

Cuando el desplegable esté abierto, el usuario seleccionará la opción que aparece resaltada en azul en la Figura A.16. Una vez haya sido seleccionada esta opción, aparecerá por pantalla un submenú como el de la Figura A.17.

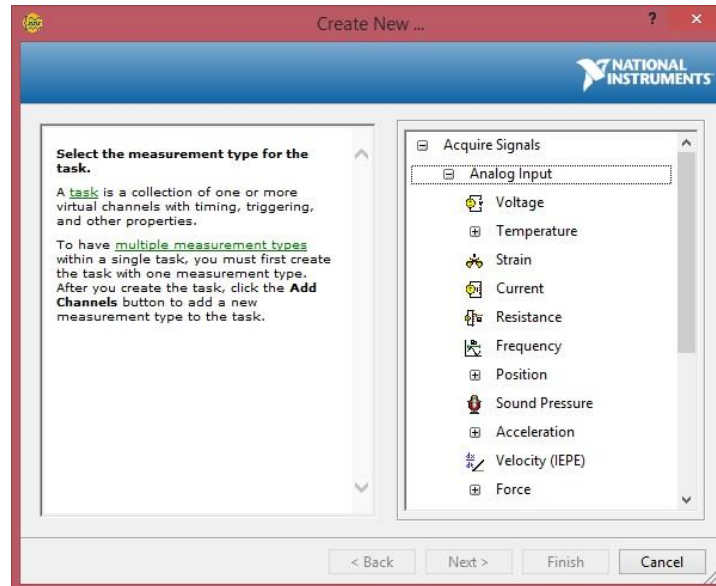


Figura A.17 Selección del tipo de señal dentro de la tarea.

En este submenú, el usuario deberá elegir qué tipo de señal desea medir. Cuando ésta esté confirmada, simplemente hay que seleccionarla con el ratón y confirmar dentro del submenú. El usuario deberá asociar la señal seleccionada a un canal, a través del submenú que se muestra en la Figura A.18.

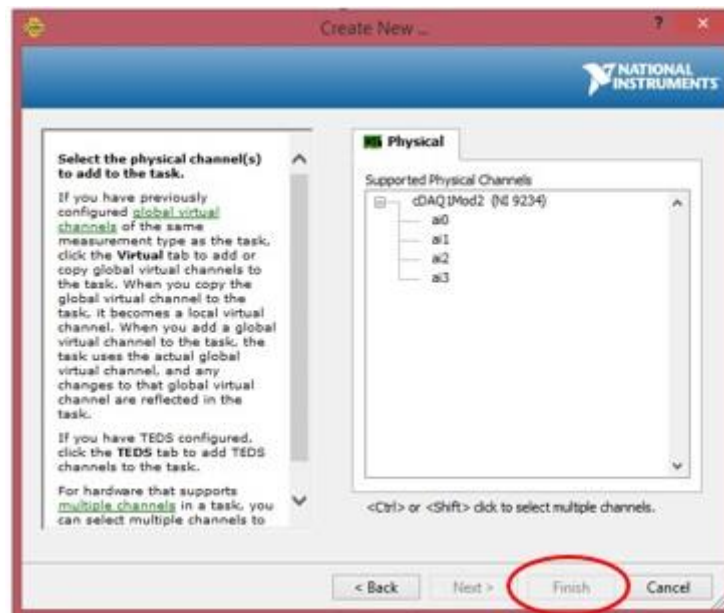


Figura A.18 Asociación de un canal a la tarea.

Cuando se confirme qué canal de la tarjeta desea utilizarse, el usuario confirmará la selección con *Finish* y el proceso habría terminado.

5. INTERFAZ DE USUARIO.

El manejo de ésta es sencillo. El proceso es el siguiente:

- El usuario arranca el programa desde la interfaz de usuario.

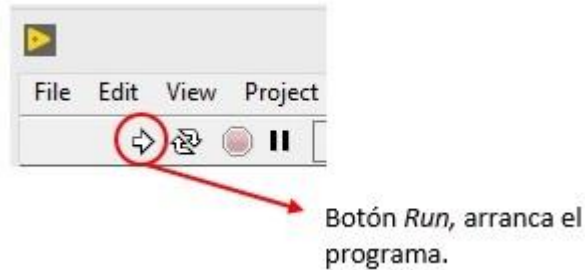
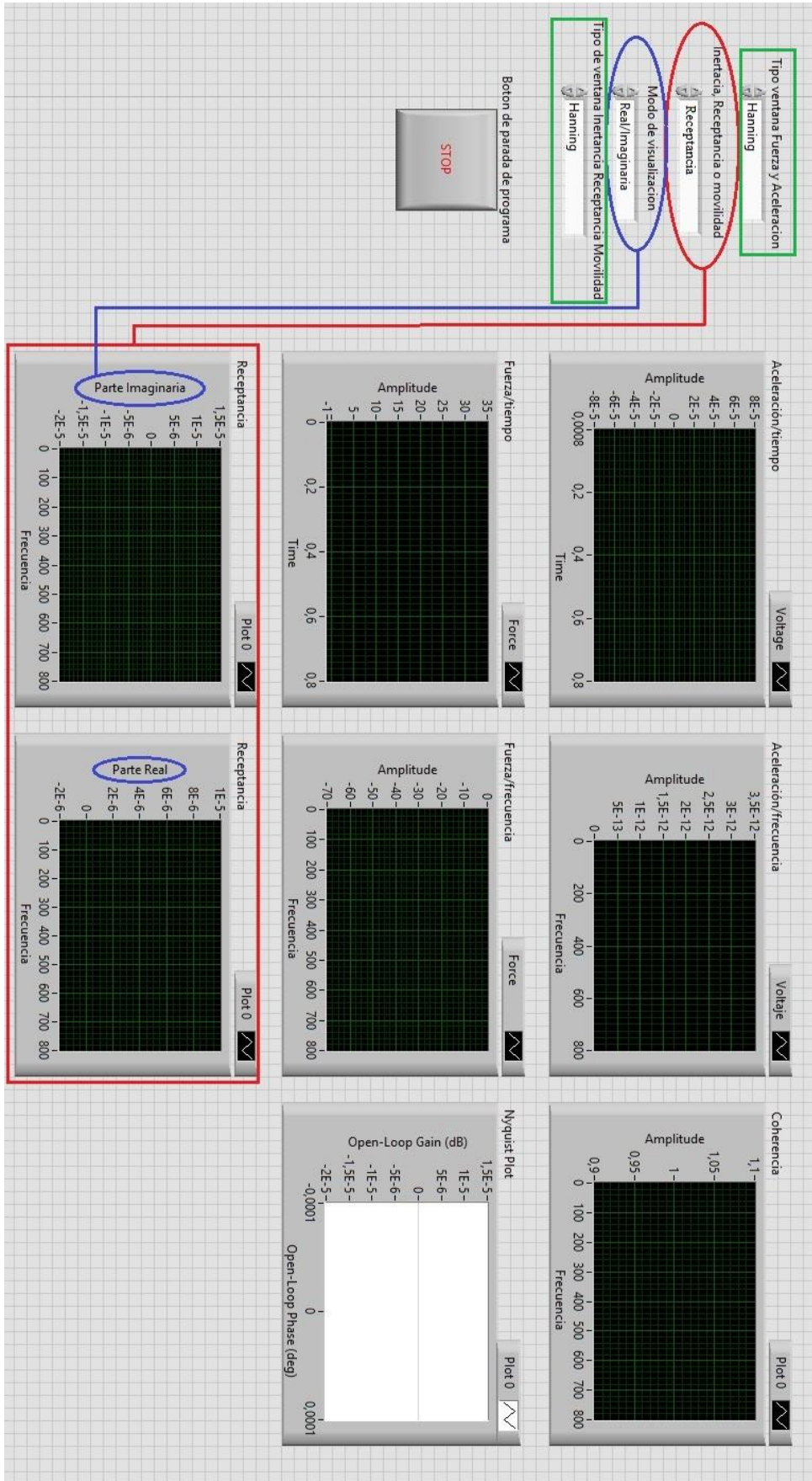


Figura A.19 arranque de programa

- Una vez el programa está en marcha, se efectuarán los impactos en las zonas de interés del usuario y se cambiarán las opciones del programa (Funciones de respuesta en frecuencia, ventanas...) a través de los desplegables que pueden verse en la Figura A.20 o en el anexo C.2, donde se encuentra la interfaz de usuario completa.



ANEXO B: COMPARATIVA DE VENTANAS

En este anexo se ha realizado una comparativa entre todas las ventanas que posee el programa LabVIEW con la ventana que el programa utiliza por defecto (*Hanning*), para que así el usuario pueda comprobar el resultado de cada una de ellas.

La señal que se ha utilizado como ejemplo, es una señal fruto de la superposición de dos señales tipo seno de frecuencias de 60 y 80 Hz respectivamente.

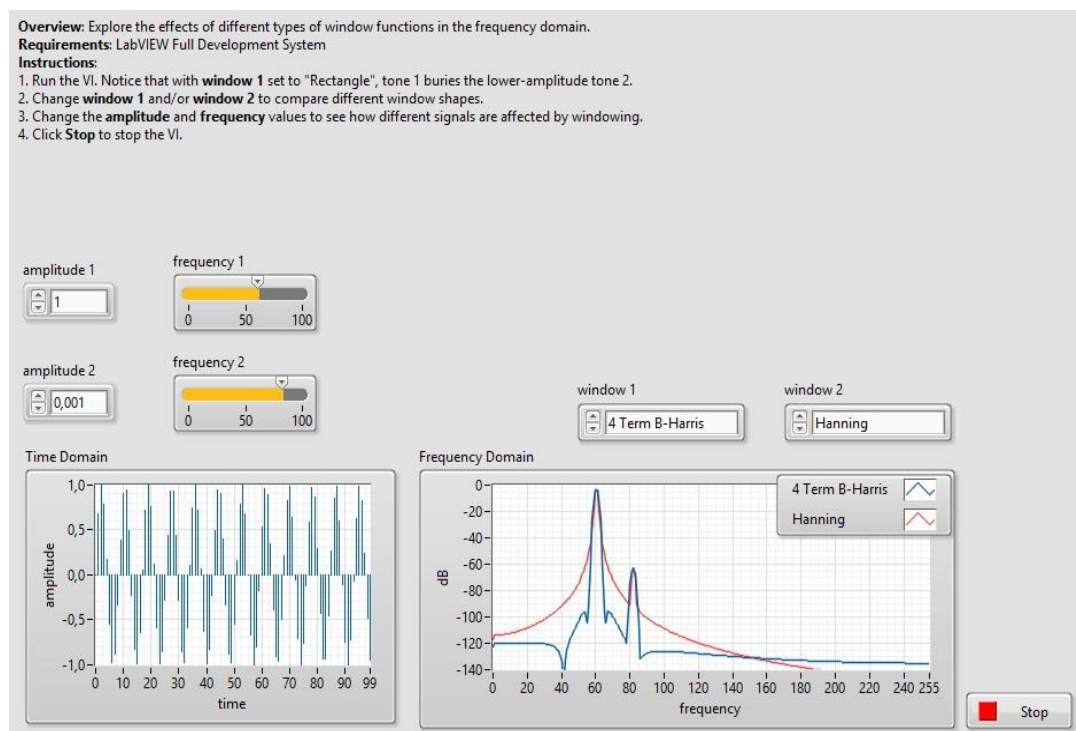


Figura B.1 Comparativa Hanning / 4 Term B-Harris

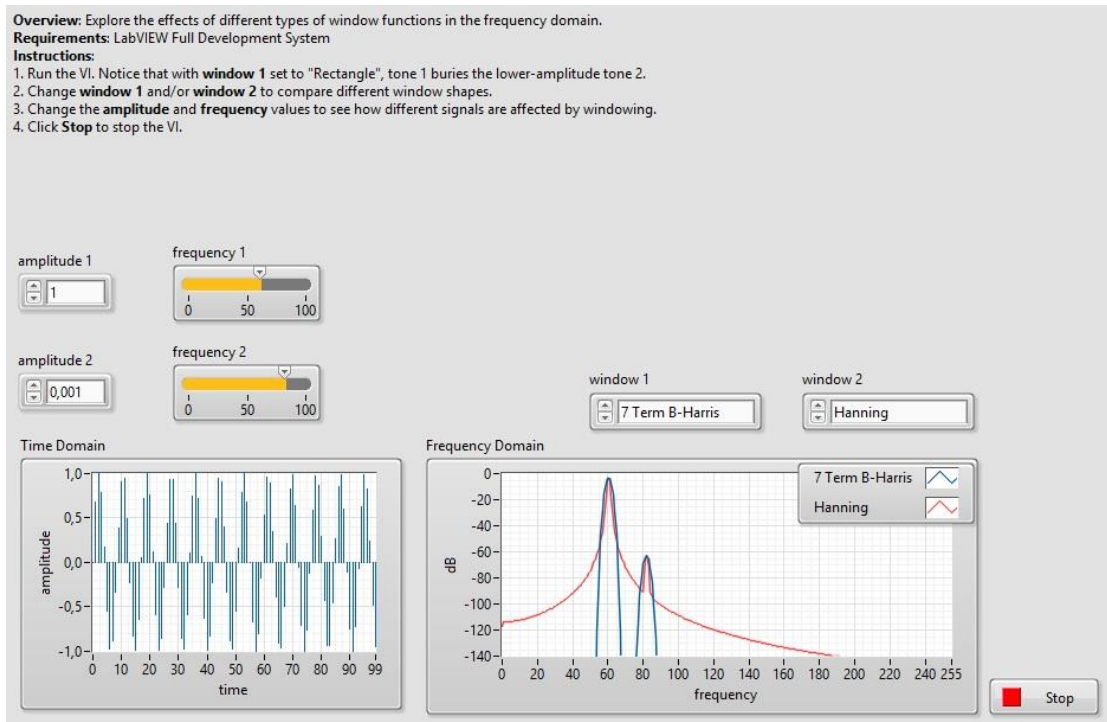


Figura B.2 Comparativa Hanning / 7 Term B-Harris

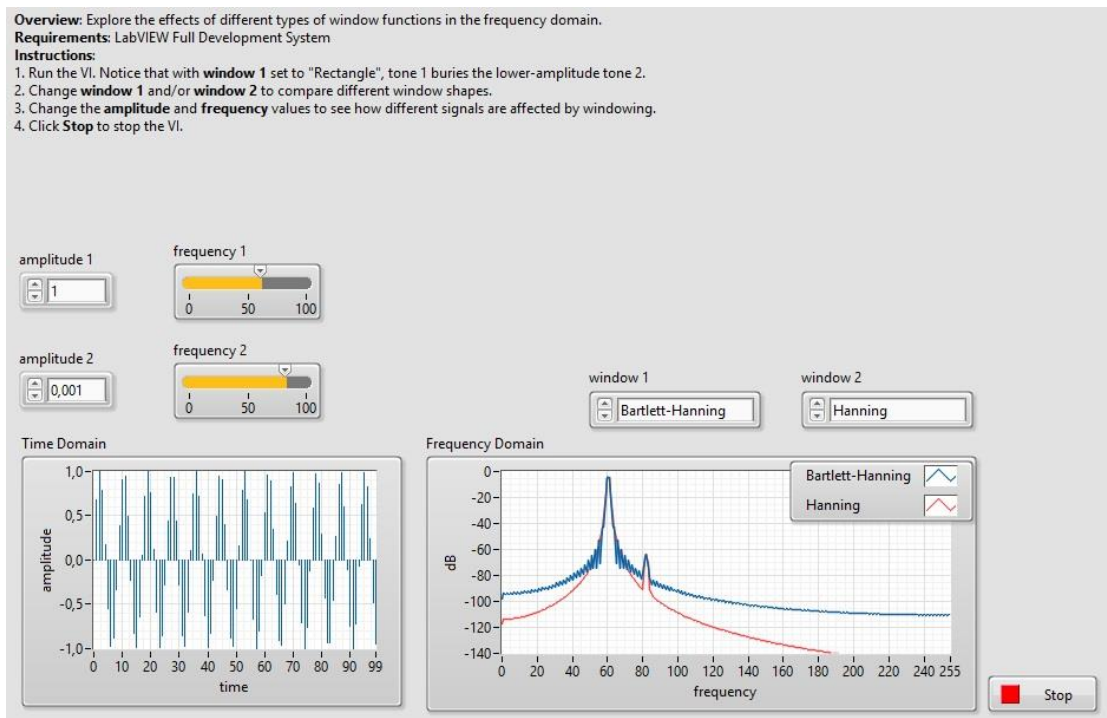


Figura B.3 Comparativa Hanning / Bartlett-Hanning

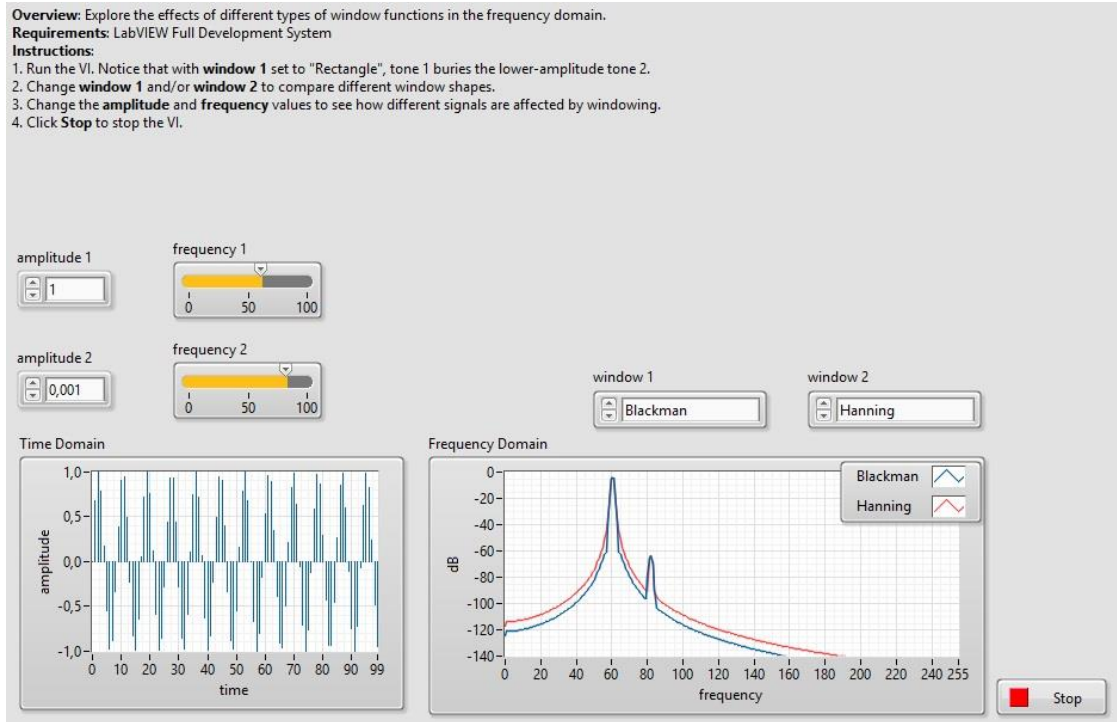


Figura B.4 Comparativa Hanning / Blackman

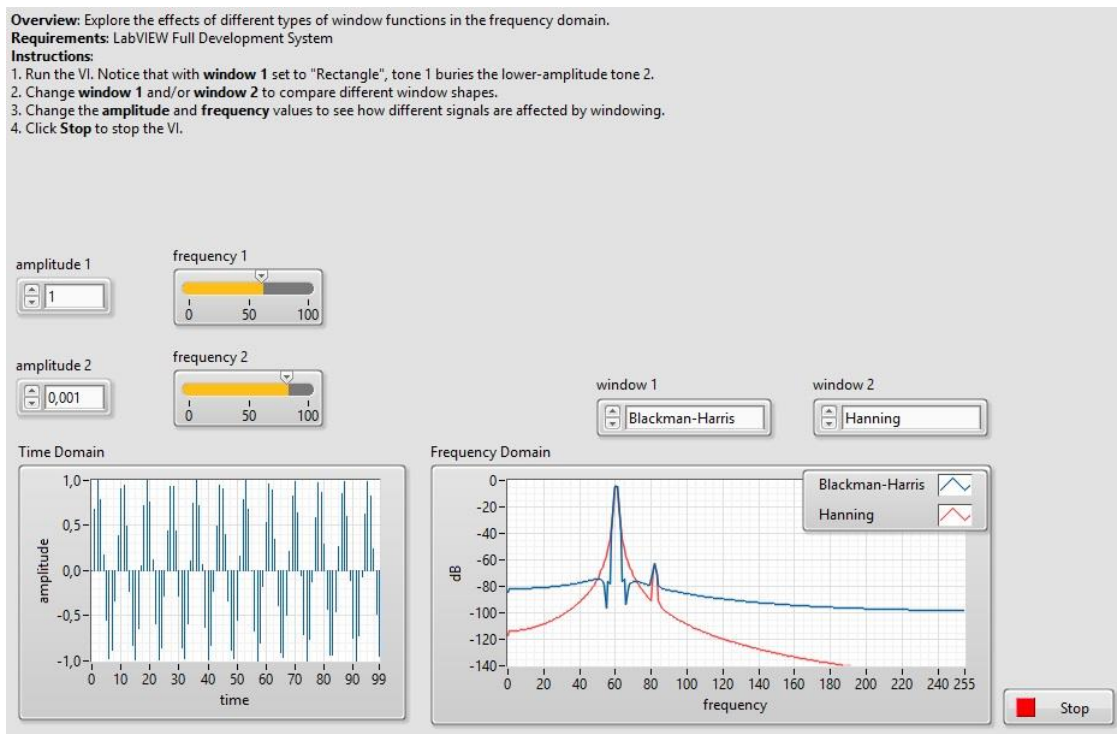


Figura B.5 Comparativa Hanning / Blackman-Harris

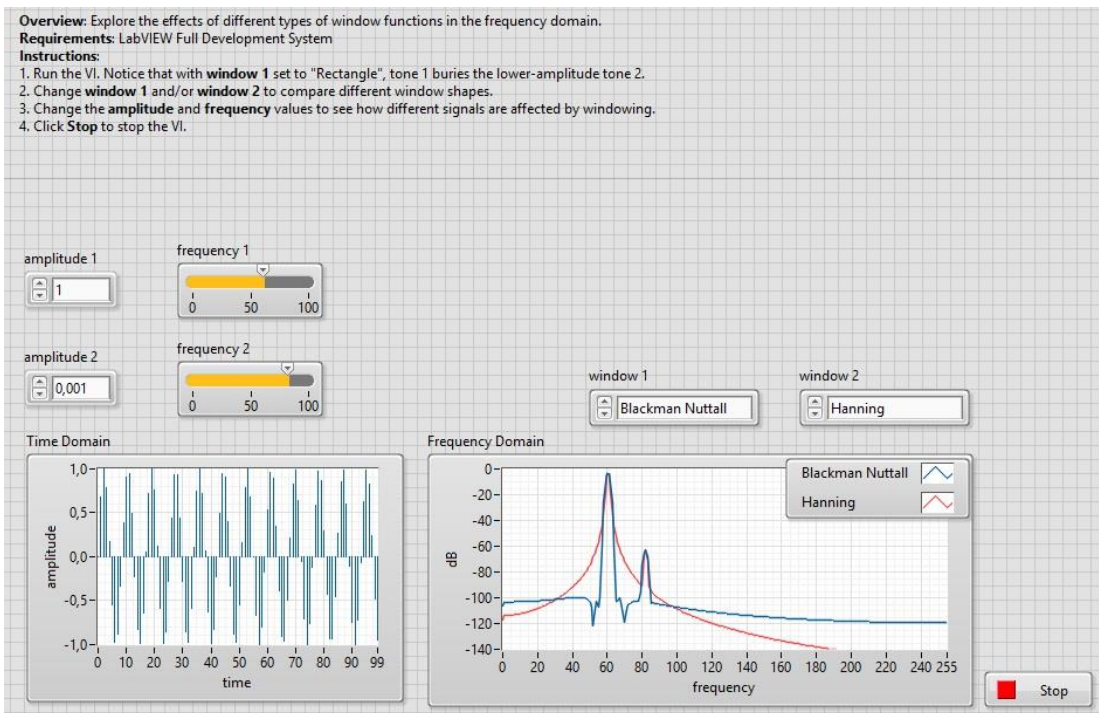


Figura B.6 Comparativa Hanning / Blackman-Nuttall

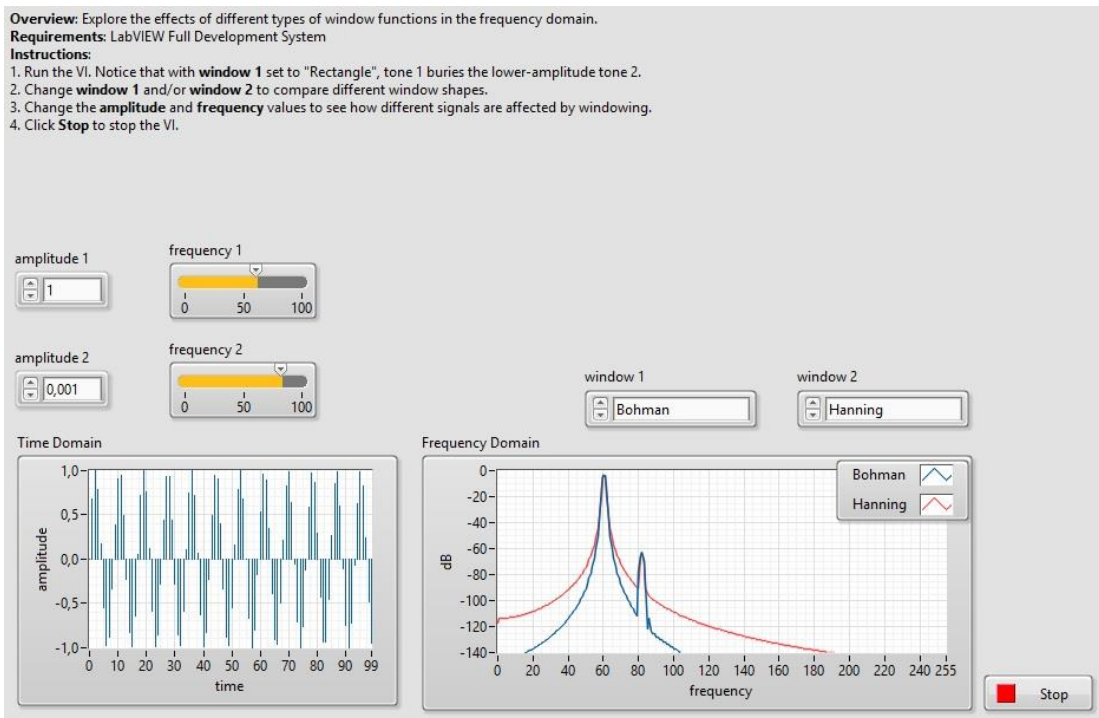


Figura B.7 Comparativa Hanning / Bohman

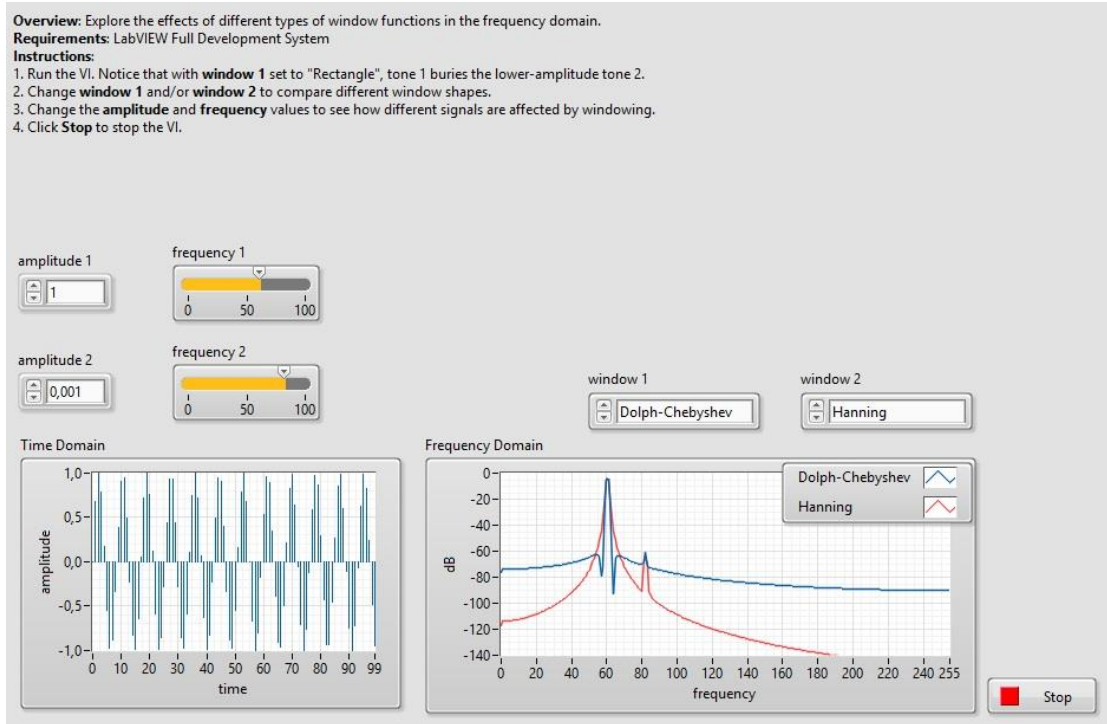


Figura B.8 Comparativa Hanning / Dolph-Chebyshev

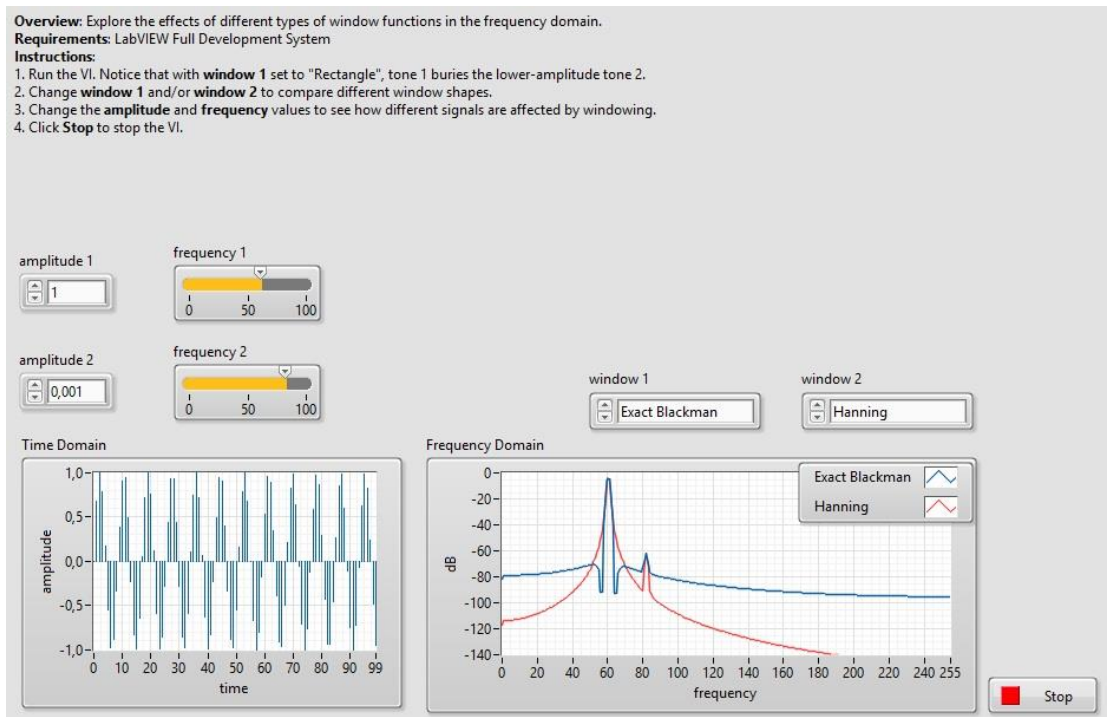


Figura B.9 Comparativa Hanning / Exact-Blackman

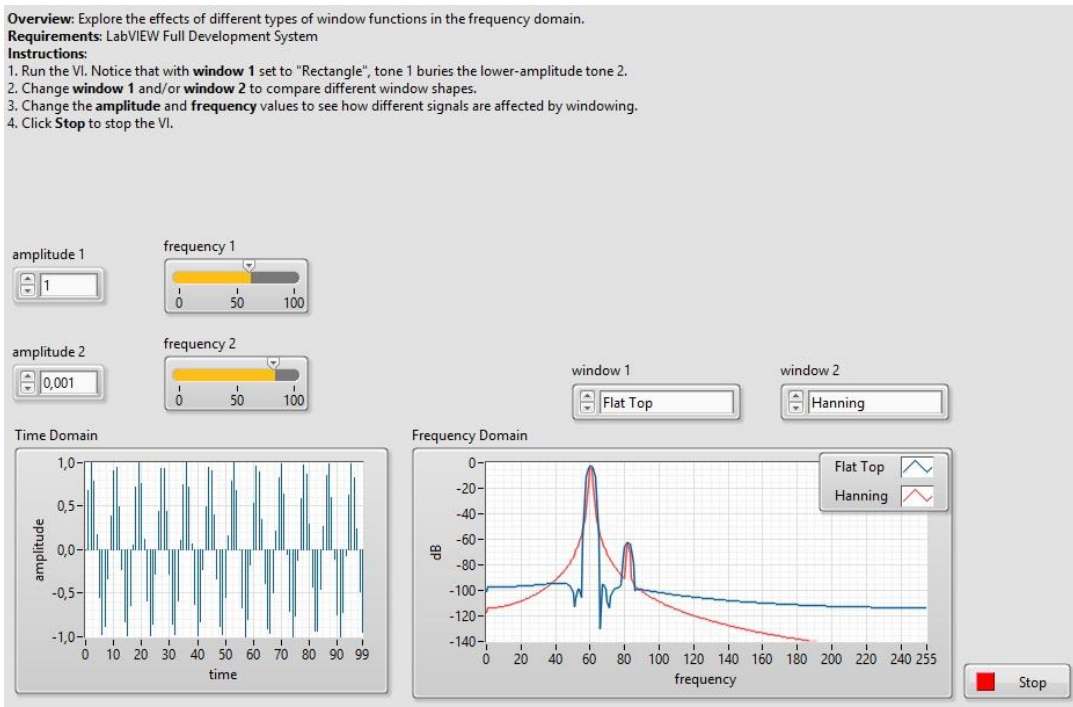


Figura B.10 Comparativa Hanning / Flat Top

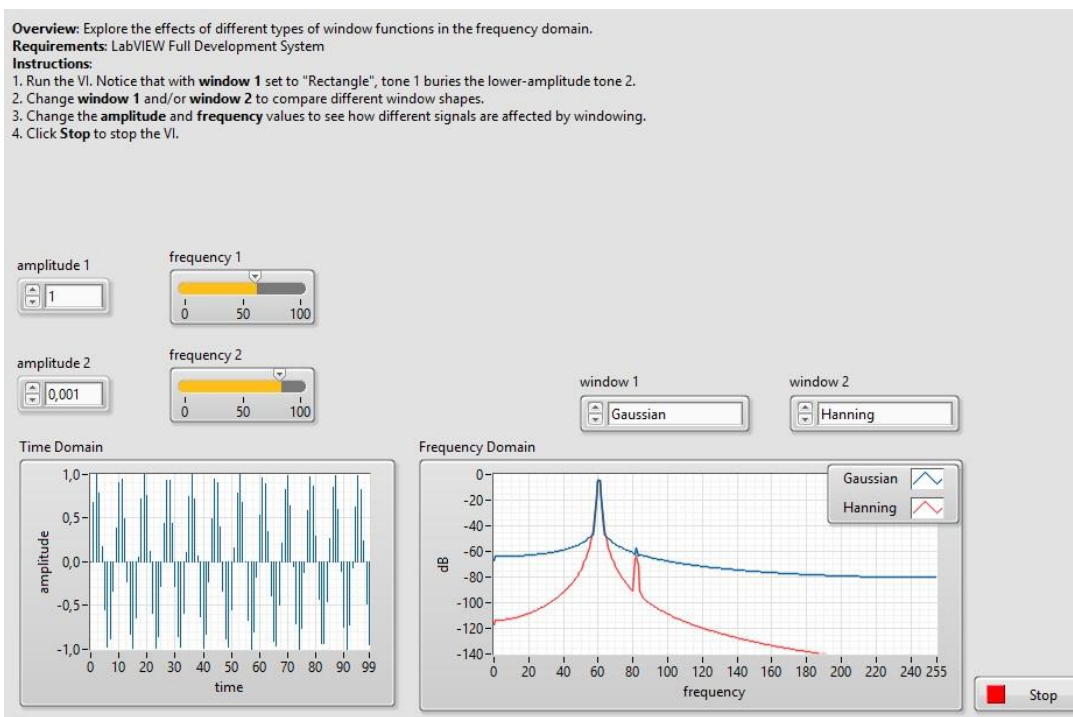


Figura B.11 Comparativa Hanning / Gaussian

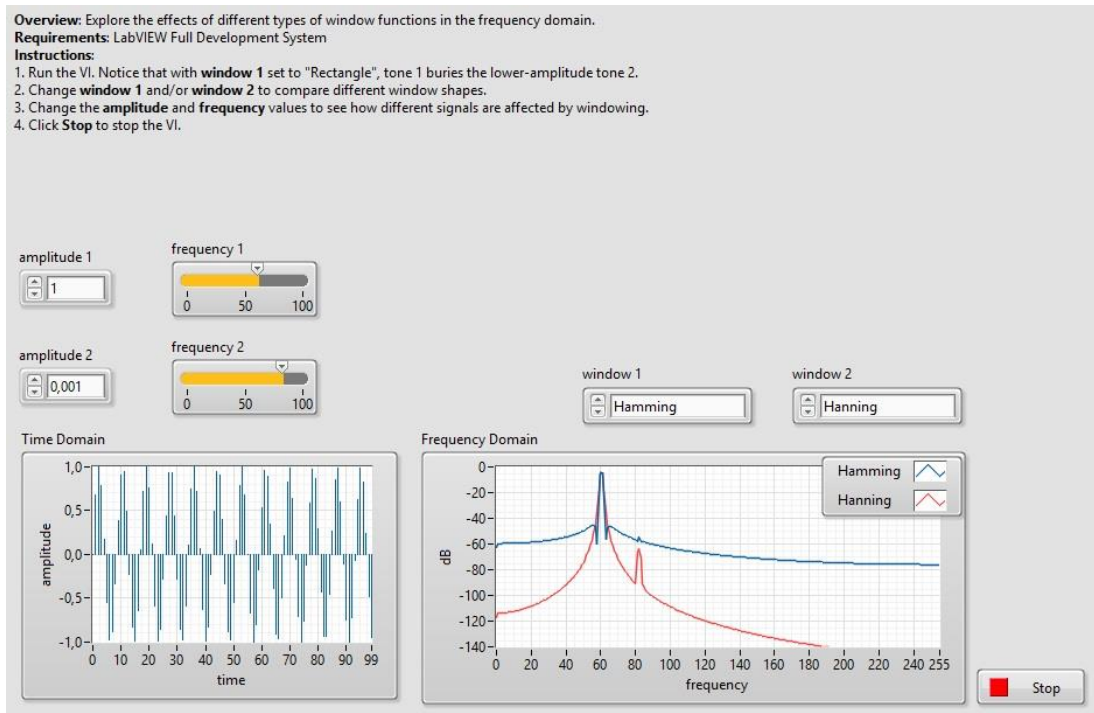


Figura B.12 Comparativa Hanning / Hamming

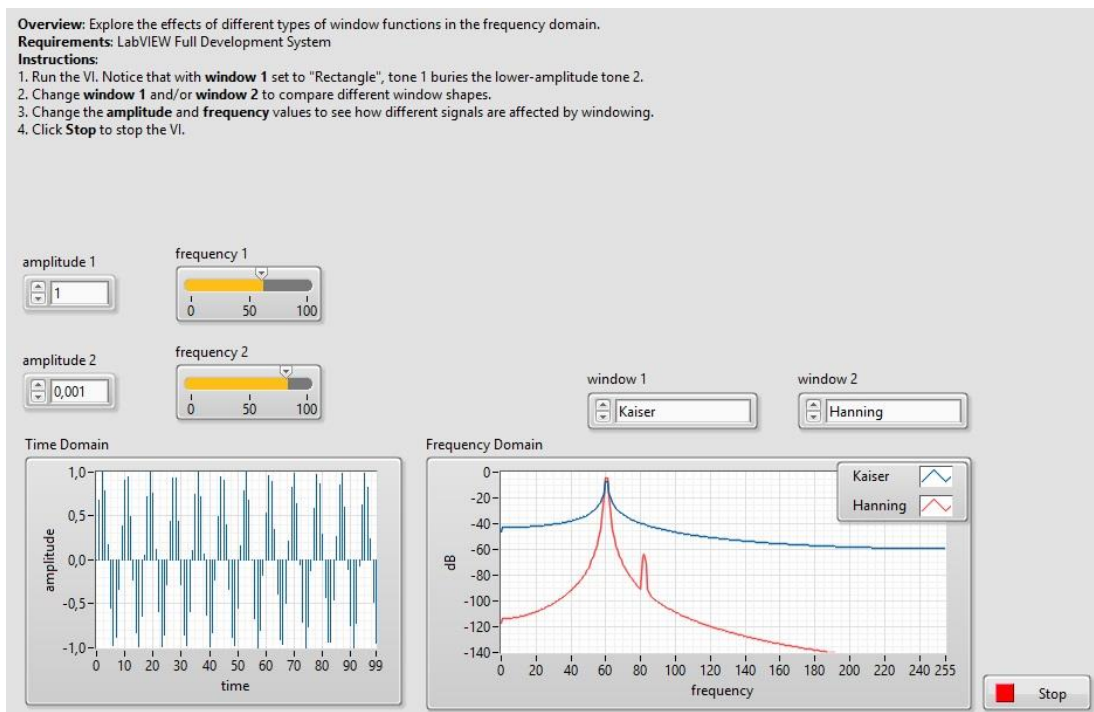


Figura B.13 Comparativa Hanning / Kaiser

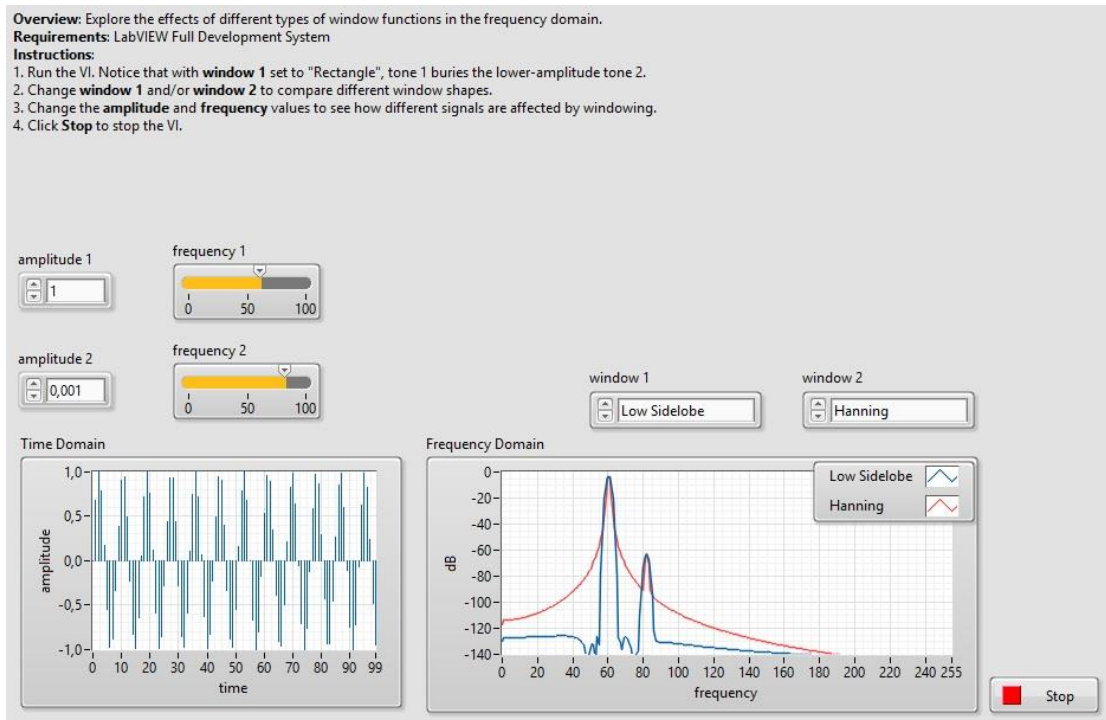


Figura B.14 Comparativa Hanning / Low Sidelobe

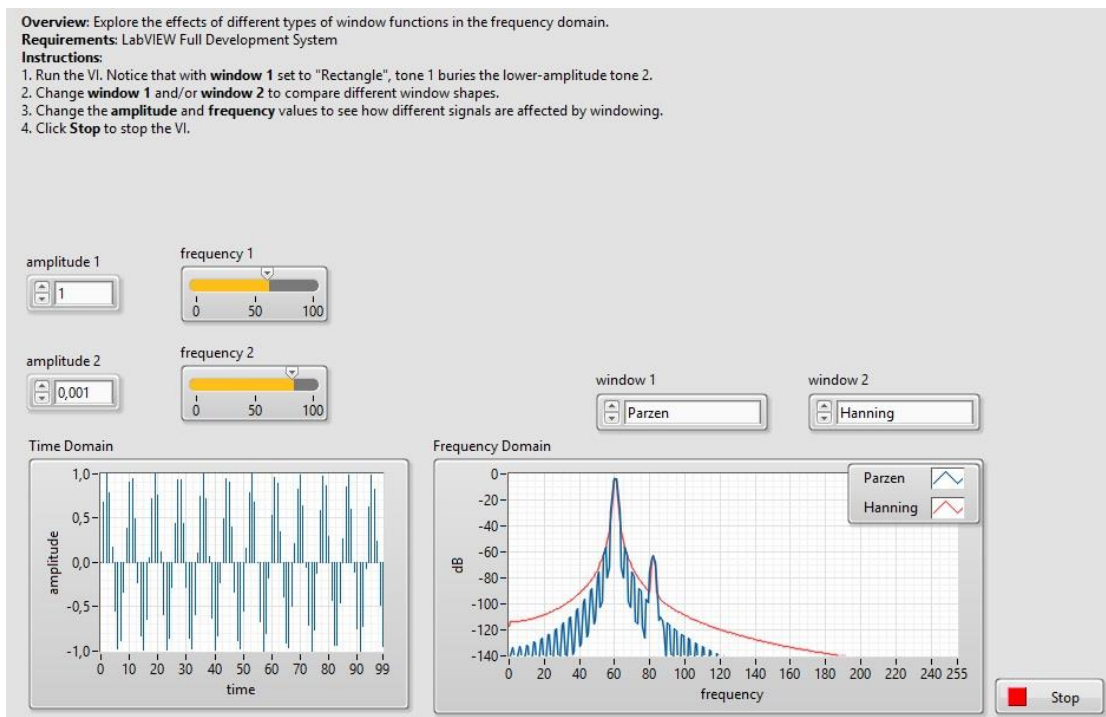


Figura B.15 Comparativa Hanning / Parzen

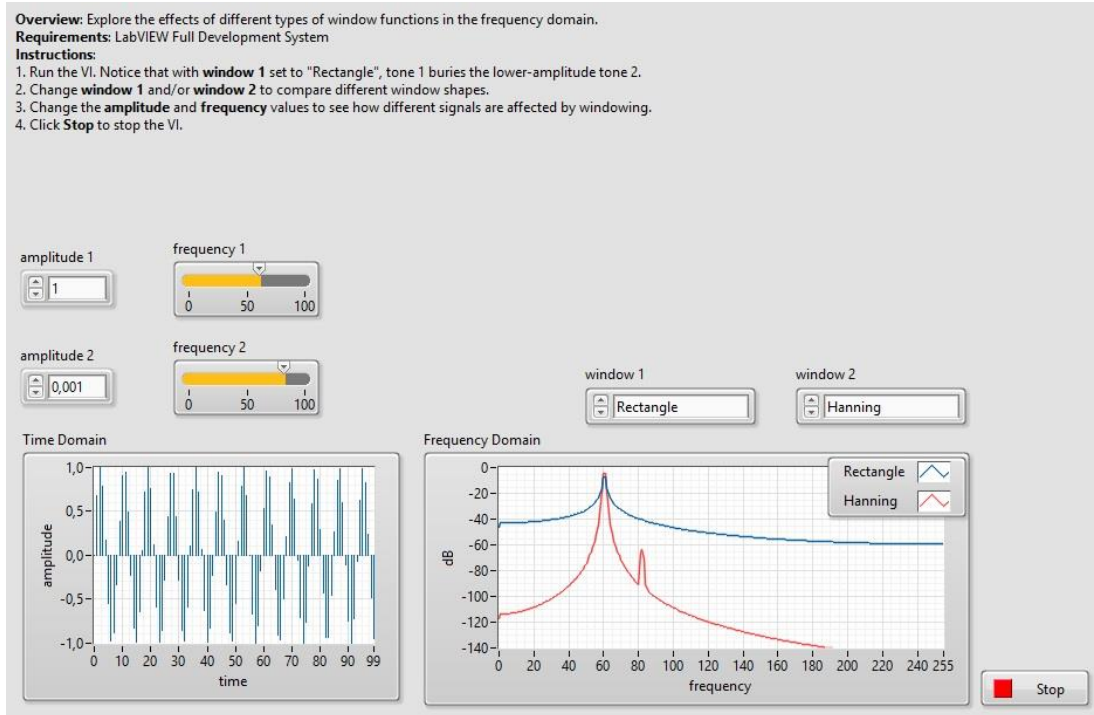


Figura B.16 Comparativa Hanning / Rectangle

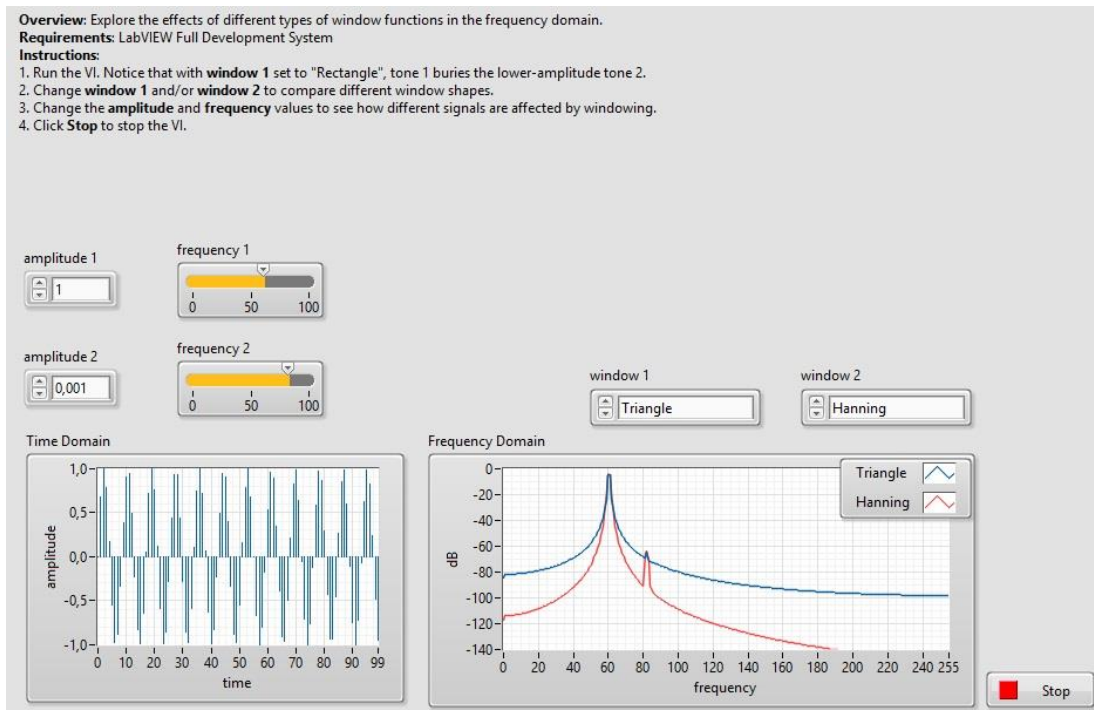


Figura B.17 Comparativa Hanning / Triangle

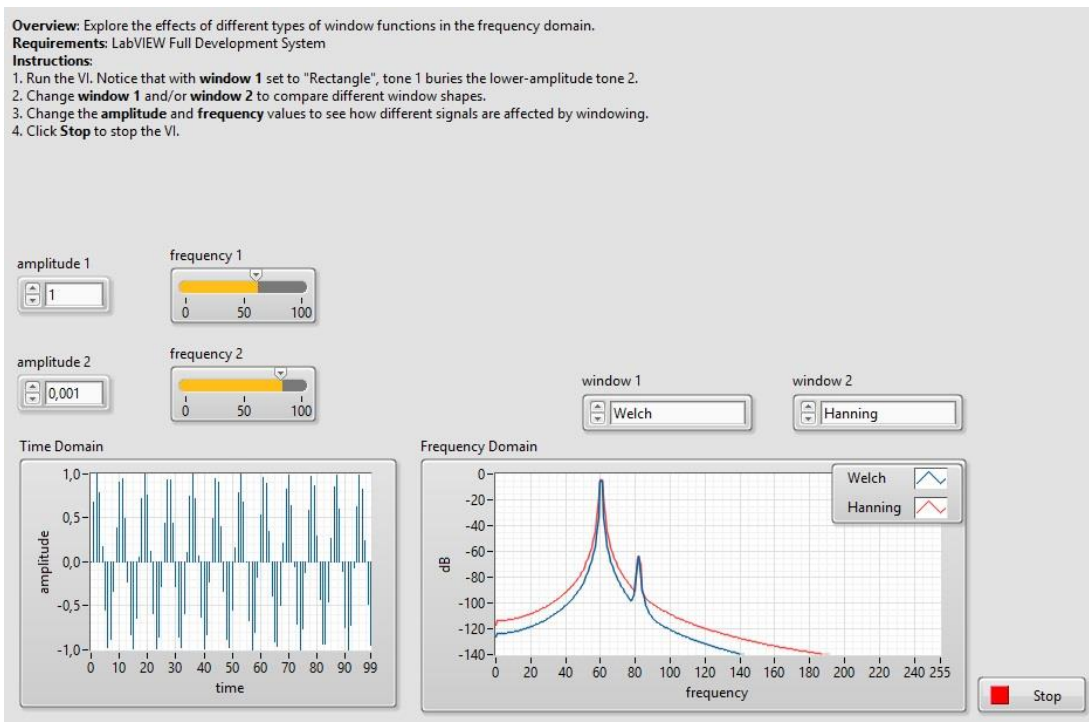
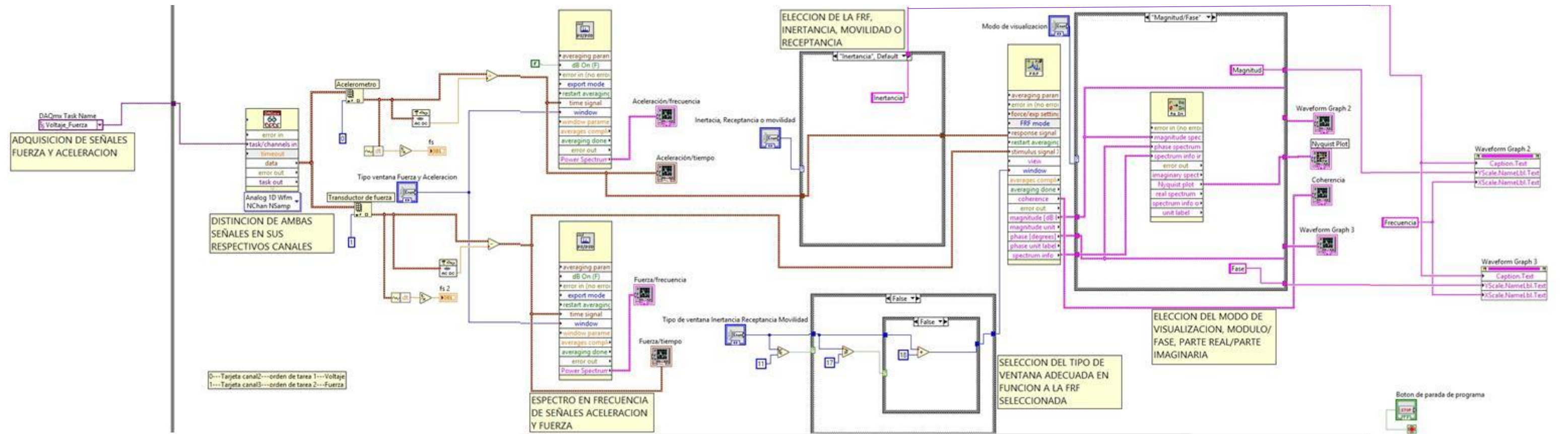


Figura B.18 Comparativa Hanning / Welch

ANEXO C: PROGRAMA COMPLETO

C.1 DIAGRAMA DE BLOQUES.



C.2 PANEL DE CONTROL.

