



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

### Propuesta y desarrollo de mejoras en la eficiencia y en las medidas de seguridad de una máquina canteadora en un aserradero.

(Diseño y desarrollo de un simulador basado en el modelado de sondas de intensidad sonora. Predicción de los niveles de potencia acústica emitidos por fuentes de ruido y problemática asociada)

Autor/es

**Raúl Martín Ferrer.**

Director/es

**Pedro Ramos Lorente.**

E.U. Politécnica de Teruel.  
Diciembre de 2017.



# Resumen

Este trabajo fin de grado presenta una herramienta de simulación desarrollada en el entorno MATLAB basada en el modelado de sondas de intensidad sonora.

La aplicación sirve para calcular los niveles de potencia acústica emitidos por una o más fuentes de ruido.

Para determinar la potencia acústica emitida por una fuente se utiliza como dato de partida la medición de la intensidad sonora en la proximidad de la fuente. La intensidad sonora describe la velocidad del flujo de energía a través de una unidad de superficie. La medida de la intensidad sonora presenta ventajas frente a la medida de la presión en aplicaciones como la localización de fuentes o la determinación de la potencia acústica emitida.

La medida de la intensidad acústica implica la determinación simultánea de la presión acústica y la velocidad de la partícula en un mismo punto del campo acústico. El tipo de sonda más frecuentemente usada para medir la intensidad consta de dos micrófonos enfrentados y separados por una pequeña distancia.

Para las pruebas y ensayos llevados a cabo con el simulador programado, contamos con las señales adquiridas con una sonda de intensidad sonora construida en el laboratorio de la EUPT en una fase inicial del proyecto.

Este trabajo incluye la programación de dos métodos diferente de cálculo de la intensidad sonora: (a) en el dominio temporal mediante uso directo de integradores y filtros para llevar a cabo la resolución de la ecuación o, (b) en el dominio frecuencial, mediante el uso de un analizador espectral.

Mediante un sencillo interfaz gráfico, el usuario puede decidir, entre otros parámetros, el emplazamiento de las fuentes de ruido y de las sondas de intensidad, las características de las señales emitidas por las fuentes y las trayectorias y giros que pueden realizar las sondas durante la toma de datos.

El simulador permitirá predecir errores o alteraciones que se produzcan en el proceso de medida por diferentes causas y de este modo detectar en fase de simulación perturbaciones del método de caracterización de la fuente.

## **Abstract**

This final-degree project presents a simulation tool developed in MATLAB based on sound intensity probes modelling.

The application can be used to estimate acoustic power measurements when arbitrary sound fields are emitted by one or more acoustic sources.

In order to estimate the acoustic power emitted by a source, the program takes into account sound intensity measurements in the vicinity of the source. Sound intensity describes the rate of energy flow through a unit area.

Sound intensity also gives a measure of direction as there will be energy flow in some directions but not in others. Therefore sound intensity is a vector quantity as it has both magnitude and direction. On the other hand pressure is a scalar quantity as it has magnitude only.

So as to determine sound intensity it is necessary to obtain simultaneously the acoustic pressure and the particle velocity in the same position. The type of probe more frequently used is known as p-p probe, which is based on two confronted microphones.

A p-p probe has been developed in the EUPT laboratory in order to have work with signals acquired by an intensity probe.

Two different methods of computing sound intensity have been programmed: (a) the direct integration method and (b) the cross spectrum method.

By means of a GUI, the user can choose the location of sources and probes in a 3D scenario as well as the trajectory and rotation of every probe. This tool will be used

to predict mistakes in the measurement process during the simulation stage of the experiments. Therefore, these mistakes can be corrected before carrying out real measurements in a second step.



# Índice general

## Primera parte. LISTADOS

Lista de figuras

## Segunda parte. MEMORIA

1	Justificación del Proyecto .....	1
1.1	Objetivos.....	5
1.1.1	Objetivo General .....	5
1.1.2	Objetivos Específicos.....	5
2	Física del Campo Acústico .....	6
2.1	Variables.....	6
2.2	El Campo Acústico .....	7
2.3	Magnitudes .....	8
2.4	Velocidad del Sonido .....	8
2.5	Dispersión .....	9
2.6	Función de Potencial Acústica y la Ecuación de Onda.....	9
2.7	Propagación de Ondas Planas.....	10
2.8	Propagación de Ondas Esféricas.....	11
3	Intensidad Sonora y Métodos de Medida .....	13
3.1	Intensidad Sonora Instantánea.....	13

3.2	Intensidad Sonora Promedio.....	14
3.3	Métodos de Medida de Intensidad Sonora: Sondas p-p .....	16
3.3.1	Método de Integración directa.....	17
3.3.2	Método del Espectro Cruzado .....	18
4	Programa de Simulación de Sondas p-p. ....	20
4.1	Objetivos de la Aplicación y Recursos Utilizados.....	20
4.1.1	Función “Pos_Micros” .....	23
4.1.2	Función “ConfigurarSimulacion” .....	24
4.1.3	Función “CrearFuentes” .....	26
4.2	Función “CrearSondas” .....	30
4.2.1	Función “CrearSeñales” .....	32
4.2.2	Función “CrearIntensidades” .....	35
4.2.3	Función “RealizarSimulacion” .....	38
5	Conclusiones. ....	39
6	Líneas Abiertas. ....	39
7	Bibliografía. ....	40



**Primera parte.**  
**LISTADOS**



# **Lista de figuras**

<i>Figura 1: Sonda de intensidad construida en la EUPT .....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2: Disposición de micrófonos enfrentados de una sonda p-p .....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3: Diagrama de bloques del método de integración directa.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4: Ejemplo de formulario de configuración de una simulación.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 5: Representación de la ordenación de datos de fuentes “S” .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6: Diagrama de flujo de la función “CrearFuentes” .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7: Representación de la ordenación de datos de sondas “P” .....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 8: Diagrama de flujo de la función “CrearSondas”.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 9: Diagrama de flujo de la función “CrearSeñales” .....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 10: Diagrama de flujo de la función “CrearIntensidades” .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 11: Ejemplo de representación de una simulación.....</i>	<i>38</i>



**Segunda parte.**  
**MEMORIA**



## **1 Justificación del Proyecto**

El origen del presente trabajo fin de grado hay que situarlo en la necesidad real de medir, y eventualmente atenuar, el nivel de potencia sonora emitido por una fuente de ruido. La fuente de ruido es una máquina canteadora ubicada en un aserradero.

Una correcta caracterización de la fuente de ruido – en términos de nivel de potencia emitido, distribución frecuencial del ruido, características de propagación de la vibración y el sonido, etc – es el primer paso para diseñar la mejor estrategia de control del nivel de ruido al que están expuestos los trabajadores de la empresa. Solo conociendo el problema al que nos enfrentamos podremos adoptar medidas correctoras o atenuadoras del ruido que resulten, por un lado, eficaces y por otro, que sean implementables y viables desde el punto de vista funcional y económico. No podemos olvidar que el entorno de trabajo es un aserradero donde varios operarios están expuestos a niveles significativos de ruido durante muchas horas. En este contexto, las fuentes más importantes de ruido son máquinas de grandes dimensiones, que no pueden desplazarse y cuyo cerramiento con material aislante acústicamente presenta dificultades o resulta directamente inviable.

El presente trabajo consiste en una herramienta de simulación desarrollada en el entorno MATLAB basada en el modelado de sondas de intensidad sonora. El simulador ayudará a la toma de decisiones sobre la estrategia más adecuada para el control del ruido.

La aplicación sirve para modelar el proceso de determinación del nivel de potencia acústica emitido *in situ* por una o más fuentes de ruido.

Si centramos nuestra atención en la medida de la potencia de ruido emitida por la fuente, el primer paso es decidir la magnitud a medir para obtener posteriormente la potencia emitida. Existen dos parámetros diferentes que pueden tomarse como referencia: (a) la presión sonora, que tiene carácter escalar y depende tanto de la potencia de la fuente como del medio de propagación y el entorno y (b) la intensidad

sonora, de carácter vectorial, que aporta información de magnitud y dirección acerca el flujo de energía neta que atraviesa un área definida.

La intensidad sonora describe la velocidad del flujo de energía (energía por unidad de tiempo) a través de una unidad de superficie. Así, la unidad de la intensidad sonora es el vatio por metro cuadrado [ $W/m^2$ ].

La intensidad sonora solo depende de la potencia de la fuente, no del entorno, lo que la convierte en una candidata ideal para la caracterización de fuentes de ruido *in situ*. De hecho, ni siquiera supone un problema que existan ruidos producidos por otras fuentes si determinamos correctamente los emplazamientos donde llevamos a cabo las medidas. Desde cualquier punto de vista, resulta más ventajoso poder tomar una medida fiable en la nave, sin alterar el funcionamiento normal de la empresa en una jornada de trabajo que tener que desplazar una máquina a un laboratorio especializado que cuente con una cámara anecoica que anule la reverberación.

Por lo tanto, entre las ventajas que presenta la medición de la intensidad sonora – frente a la medida de la presión – destacamos la capacidad de medir cualquier campo acústico sonoro sin necesidad de asumir ninguna condición especial. Como ya hemos dicho, las mediciones de presión sonora, sin embargo, dependen del entorno, es decir, de las condiciones del campo sonoro presente en el lugar en el cual se desea medir. Debido a esta independencia del entorno que ofrecen las medidas de intensidad sonora, una de las aplicaciones más importantes de la sonda de intensidad es la medida de la potencia acústica de una fuente *in situ*, incluso con otras fuentes emitiendo ruido. Esto es debido a que un ruido de fondo estable no contribuye a la potencia acústica cuando esta medición se realiza a través de intensidad.

Gracias a su carácter vectorial, la determinación de la intensidad acústica presenta otras ventajas frente a la medida de la presión acústica en aplicaciones distintas a la medida de la potencia acústica como por ejemplo la localización de fuentes.



En resumen, los métodos de determinación de la potencia acústica radiada por una fuente basados en medidas de intensidad sonora permiten tomar mediciones y caracterizar fuentes sonoras en su ubicación habitual sin tener que trasladar las máquinas a laboratorios dotados de cámaras anecoicas ni alterar el funcionamiento de otras máquinas de la empresa.

La medida de la intensidad acústica implica la determinación simultánea de la presión acústica y la velocidad de partícula en el mismo punto de un campo acústico. El tipo de sonda más frecuentemente usada consta de dos micrófonos enfrentados separados por una pequeña distancia. Puesto que se mide la presión en dos puntos, se denomina sonda tipo p-p.

En fases previas del proyecto, se ha construido y caracterizado en el laboratorio de la EUPT una sonda de intensidad basada en dos micrófonos GRAS. Para la realización de una sonda de intensidad es necesario que ambos canales, considerando toda la cadena de medida, tengan un comportamiento similar en cuanto a amplitud y fase. Para ello se realizaron mediciones controladas para estudiar el comportamiento de cada elemento.



***Figura 1: Sonda de intensidad construida en la EUPT***

Para algunas de las pruebas y ensayos llevados a cabo con el simulador programado, contamos con las señales adquiridas con nuestra sonda de intensidad.

Adicionalmente, podemos programar la emisión de señales arbitrarias desde cada una de las fuentes del simulador.

Este trabajo incluye la programación de dos métodos diferente de cálculo de la intensidad sonora: el primer método, en el dominio temporal, desarrolla el uso directo de integradores y filtros para llevar a cabo la resolución de la ecuación de cálculo de la intensidad sonora. El segundo método, en el dominio frecuencial, se basa en el uso de un analizador espectral. Este último relaciona la intensidad con la parte imaginaria del espectro cruzado de las dos señales de los micrófonos. Las dos formas son equivalentes y con ambas se obtiene la intensidad sonora con aceptable fiabilidad.

El simulador consta de un sencillo interfaz gráfico desde el cual el usuario puede decidir, entre otros parámetros, el emplazamiento de las fuentes de ruido y de las sondas de intensidad, las características de las señales emitidas por las fuentes (señales grabadas o sintetizadas en MATLAB) y las trayectorias y giros que pueden realizar las sondas durante la toma de datos.

Pretendemos que el simulador permita predecir errores o alteraciones que se produzcan en el proceso de medida por diferentes causas y de este modo detectar en fase de simulación perturbaciones del método de caracterización de la fuente.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

Desarrollar una herramienta de simulación que sirva de predictor de fenómenos que afectan a la toma de medidas de intensidad acústica empleando sondas de intensidad de tipo p-p.

Este objetivo principal puede desglosarse en una serie de:

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

1. Revisar los principios físicos de la propagación de ondas sonoras y analizar las diferentes magnitudes físicas a medir: presión e intensidad acústica, velocidad de la partícula, potencia acústica radiada, etc.
2. Estudiar los principios básicos de una sonda de intensidad acústica de tipo p-p construida con dos micrófonos enfrentados y separados por una pequeña distancia.
3. Construir, evaluar y calibrar una sonda de intensidad acústica de ese tipo.
4. Obtener medidas reales con la sonda de intensidad para crear una base de datos que pueda emplearse en la fase de simulación.
5. Programar dos métodos diferentes de cálculo de la intensidad sonora:
6. El método de integración directa: en el dominio temporal mediante uso directo de integradores y filtros.
7. En el dominiofrecuencial, mediante el uso de un analizador espectral.
8. Comparar, evaluar y validar los dos métodos de cálculo programados.
9. Desarrollarun interfaz gráfico en el que el usuario el usuario pueda decidir, entre otros parámetros, el emplazamiento de varias fuentes de ruido y de

sondas de intensidad, las características de las señales emitidas por las fuentes y las trayectorias y giros que pueden realizar las sondas durante la toma de datos.

10. Desarrollar una herramienta de simulación que realice los cálculos necesarios, esto es:
11. Propagación de las señales.
12. Reflexión en tierra plana.
13. Traslación y rotación de las sondas.
14. Captura de las medidas en los emplazamientos de los micrófonos.
15. Cálculo de la intensidad sonora por los dos métodos.
16. Diseñar experimentos que simulen errores o alteraciones que se pueden producirse en el proceso de medida para poder detectar en fase de simulación perturbaciones del método de caracterización de la fuente. Este apartado queda como línea de trabajo abierta para el futuro.

## **2 Física del Campo Acústico**

### **2.1 Variables**

El sonido es la sensación producida en el oído por variaciones muy pequeñas de presión en el aire. Esas fluctuaciones presentes en el aire constituyen un campo sonoro. Dichas oscilaciones son producidas normalmente por la vibración de una superficie sólida, pero pueden ser generadas por otros medio; por ejemplo, en la mezcla turbulenta de masas de aire en el escape de las turbinas de un avión. Los dientes de sierra moviéndose a alta velocidad ( $60 \text{ ms}^{-1}$ ) producen un fuerte ruido de banda ancha debido a su aerodinámica, que no tiene nada que ver con la vibración de la cinta o del disco de sierra. Las ondas sonoras necesitan un medio elástico para propagarse desde la fuente hasta el oído.

Para un fluido, el campo sonoro queda definido por las variaciones, respecto del estado estable, de las variables presión, velocidad de la partícula, temperatura y densidad. En este sentido, expresaremos cada variable como suma de un valor medio y un valor fluctuante:

Presión:  $P_{tot} = P + p(\bar{r}, t)$  (Pa)

Velocidad de la partícula:  $\bar{U}_{tot} = \bar{U} + \bar{u}(\bar{r}, t)$  (m/s)

Temperatura:  $T_{tot} = T + \tau(\bar{r}, t)$  (°C)

Densidad:  $\rho_{tot} = \rho + \sigma(\bar{r}, t)$  (Kg/m<sup>3</sup>)

Respecto al término “partícula”, hay que decir que hace referencia a una porción muy pequeña del medio continuo y no a las moléculas del medio.

Cualquier variable descrita puede elegirse para definir el campo sonoro, pero es más fácil medir presión en un fluido o aceleración en un sólido, razón por la que son éstas las que se utilizan normalmente para definirlo. Esta elección, como veremos, tiene la ventaja añadida de que el resto de variables pueden derivarse de ellas.

## **2.2 El Campo Acústico**

De la sección anterior podemos asumir que, en un campo acústico, toda perturbación originada en una fuente será propagada con velocidad finita hasta un receptor. Debe entenderse siempre la perturbación como la suma de variaciones periódicas con sus correspondientes frecuencias, amplitudes y fases relativas. Además, como es sabido, el movimiento de las partículas será paralelo a la dirección de propagación de la onda al tratarse de ondas longitudinales.

Para el trabajo que se va a realizar, los efectos de temperatura y viscosidad son insignificantes en cuanto al transporte de energía se refiere, y por lo tanto son despreciados.

## **2.3 Magnitudes**

La mínima presión acústica audible por un joven sano es de aproximadamente  $20 \times 10^{-6}$  Pa, o  $2 \times 10^{-10}$  atmósferas (1 atmósfera =  $101.3 \times 10^3$  Pa). Este límite se da sobre los 4000 Hz y se considera como un límite físico; presiones sonoras menores quedan enmascaradas por el ruido térmico debido al movimiento de las moléculas del aire.

A su vez, un oído normal experimenta dolor con presiones del orden de los 60 Pa o  $6 \times 10^4$  atmósferas.

## **2.4 Velocidad del Sonido**

Consideraremos que las ondas sonoras se transmiten en un medio sin límites, o dicho de otra forma en “campo libre”. Esta consideración se refiere a que las ondas longitudinales están lo suficientemente separadas de fronteras que puedan influir sobre ellas.

La velocidad de propagación de ondas longitudinales, a través de un medio sólido, líquido o gaseoso, es normalmente independiente de la frecuencia de la perturbación, siendo únicamente función de la rigidez,  $D$ , y la densidad,  $\rho$ , del medio según la forma genérica:

$$c = \sqrt{\frac{D}{\rho}} \quad (m/s) \quad (2.1)$$

Para líquidos y gases la rigidez,  $D_F$ , viene dada por la expresión:

$$D_F = -V \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)^{-1} = \rho \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right) \quad (Pa) \quad (2.2)$$

Para el caso de los gases, que es el medio acústico de interés para este trabajo, la velocidad de propagación del sonido se obtiene de las Ecuaciones (2.1) y (2.2), donde se considera el proceso de compresión como adiabático (por lo que  $D=\gamma P$ ) y el gas como ideal, resultando:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (m/s) \quad (2.3)$$

siendo  $\gamma$  el índice adiabático del gas ideal (1.4 para el aire),  $T$  la temperatura en grados Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $R$  la constante universal de los gases cuyo valor es  $8.314 \text{ Jmol}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}$ , y  $M$  la masa molecular, que para el aire toma el valor de  $0.029 \text{ Kg mol}^{-1}$ .

## **2.5 Dispersión**

La Ecuación general (2.1) de velocidad de propagación del sonido, depende de la rigidez,  $D$ , la cual puede ser constante o dependiente de la frecuencia de la perturbación. Para el desarrollo de este trabajo consideraremos la rigidez,  $D$ , del medio constante, lo que se traduce en que toda perturbación se propagará desde la fuente hasta el receptor con la misma velocidad, es decir, sin dispersión.

## **2.6 Función de Potencial Acústica y la Ecuación de Onda**

Las ecuaciones que describen las propiedades acústicas son bastante complicadas, pero afortunadamente es posible encontrar ecuaciones relativamente simples al tratarse la acústica de un fenómeno asociado a perturbaciones muy pequeñas. Se denomina entonces como acústica lineal aquella que considera que los fenómenos sonoros responden a ecuaciones lineales. Por el contrario, existen situaciones en las que el campo acústico presenta no linealidades, produciéndose esta circunstancia, por ejemplo, cuando existen niveles de sonido que exceden los 130 dB.

En general, para la acústica lineal, las pérdidas asociadas con un campo acústico son bastante pequeñas, por lo que éste puede tratarse como un campo conservativo en el que la disipación de energía es insignificante. En estas circunstancias, es posible definir una función de potencial que es solución de la ecuación de onda (Pierce, 1981). La función de potencial,  $\varphi$ , también llamada función de onda, permite obtener tanto la presión como la velocidad de la partícula en un campo sonoro. La velocidad de la partícula se define como el gradiente negativo de esta función  $\varphi$ :

$$\bar{u} = -\nabla\varphi \quad (2.4)$$

Para el caso en el que la velocidad media de la partícula,  $\bar{U}$ , es pequeña, despreciable o nula, la presión acústica se define como:

$$p = \rho \frac{\partial\varphi}{\partial t} \quad (2.5)$$

Tomando el gradiente de la Ecuación (2.5), intercambiando el orden de integración del lado derecho de la nueva ecuación e introduciendo la Ecuación (2.4) obtenemos la ecuación de Euler para el movimiento de una unidad de volumen de fluido sometido a un gradiente de presiones:

$$\rho \frac{\partial\bar{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (2.6)$$

La conocida ecuación de onda lineal expresada en función del potencial,  $\varphi$ , es:

$$\nabla^2\varphi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

## **2.7 Propagación de Ondas Planas**

Para el caso de propagación de ondas planas, el campo acústico sólo necesita de una dimensión espacial para ser descrito. Este es el caso, por ejemplo, de la propagación del sonido por el interior de un tubo de paredes rígidas en su dirección axial. Considerando que la onda se desplaza en la dirección del eje x, la Ecuación (2.7) se reduce a:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Una solución de la Ecuación (2.8), que se puede verificar por simple sustitución, es:



$$\varphi = f(ct \mp x) \quad (2.9)$$

En este punto, no nos centraremos en la obtención de los parámetros bien conocidos de una onda armónica como el *periodo, frecuencia, longitud de onda, número de onda o impedancia característica* y sus relaciones, sino que simplemente destacaremos que la función  $f(ct \mp x)$  representa cualquier función que viaja con velocidad,  $c$ , hacia la derecha de las  $x$ , si se considera el signo “-” o hacia la izquierda si se considera el signo “+”. Bajo esta consideración de onda viajera, podemos afirmar que una función temporal,  $f(t)$ , considerada como fuente o foco en la posición  $x_f$ , llegará hasta cualquier destino,  $x_d$ , haciendo que la onda temporal en este punto sea  $d(t)$ . La relación entre ambas funciones temporales será:

$$d(t) = f(t - t_d) \quad : \quad t_d = \frac{|x_f - x_d|}{c}; \quad t > 0 \quad (2.10)$$

## 2.8 Propagación de Ondas Esféricas

Este trabajo está basado en la propagación del sonido, originado en una fuente puntual, en campo libre y en forma de onda esférica.

Esta situación hace que la Ecuación (2.7), expresada en coordenadas esféricas y dependiente únicamente del radio toma la forma:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

Desarrollando la derivada del lado derecho de la Ecuación (2.11):

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] = \frac{2}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \varphi + r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (r\varphi)}{\partial r^2} \quad (2.12)$$

La ecuación de onda se reescribe como:

$$\frac{\partial^2(r\varphi)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(r\varphi)}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Viendo la semejanza entre las Ecuaciones (2.8) y (2.13) podemos afirmar que la expresión  $r\varphi = f(ct \mp r)$  es solución de la Ecuación (2.13), donde la fuente está localizada en el origen.

De esta manera la función de onda queda de la forma:

$$\varphi = \frac{f(ct \mp r)}{r} \quad (2.14)$$

Al igual que en el título anterior, la función de onda,  $\varphi$ , representa una onda viajera en la dirección que une la fuente con el punto destino, el cual será cualquier punto alrededor de la fuente que diste un valor  $r$  de la misma. A diferencia de lo que ocurría para una onda plana, en este caso se observa que la amplitud de la onda es inversamente proporcional a la distancia entre la fuente y el destino, pudiendo expresarse la relación entre la función temporal de la onda generada en la fuente puntual,  $f(t)$ , y la que llega al destino,  $d(t)$  según la expresión:

$$d(t) = \frac{f(t - t_d)}{r} : t_d = \frac{r}{c}; \quad t \geq 0 \quad (2.15)$$

Esta circunstancia se explica en términos energéticos, en que la energía de la fuente tiene que perturbar cada vez una superficie mayor del medio conforme se aleja de la misma.

### **3 Intensidad Sonora y Métodos de Medida**

#### **3.1 Intensidad Sonora Instantánea**

La intensidad sonora es una magnitud vectorial que describe la cantidad y la dirección del flujo neto de energía en un punto de una superficie determinada. Este vector es perpendicular a dicha superficie.

Sea un diferencial de superficie en un campo acústico,  $d\bar{S}$ , sobre la que actúa una fuerza uniformemente distribuida de valor  $p(t)d\bar{S}$  y sea  $\bar{u}(t)$  la velocidad de la partícula en dicha superficie. La potencia instantánea diferencial será:

$$dw(t) = p(t)\bar{u}(t) \cdot d\bar{S} \quad (W) \quad (3.1)$$

Dividiendo la Ecuación (3.1) por,  $|d\bar{S}|$ , la potencia sonora diferencial por unidad de área se obtiene como:

$$d\bar{i}(t) = p(t)\bar{u}(t) \cdot \frac{d\bar{S}}{|d\bar{S}|} \quad (W/m^2) \quad (3.2)$$

donde  $d\bar{i}(t)$  es la diferencial de intensidad sonora instantánea en un punto de la superficie y  $d\bar{S}/|d\bar{S}|$  es el vector unitario perpendicular a la superficie diferencial que llamaremos  $d\bar{n}$ . Integrando la Ecuación (3.2) podemos obtener la intensidad instantánea resultante,  $\bar{i}_r(t)$ , en una superficie cualquiera como:

$$\bar{i}_r(t) = \int_S p(t)\bar{u}(t) \cdot d\bar{n} \quad (W/m^2) \quad (3.3)$$

donde podemos observar que en el cálculo solo se tiene en cuenta la componente de la velocidad de la partícula que es perpendicular, en cada punto, a la superficie. La intensidad instantánea en un punto en la dirección  $\bar{n}$  podremos expresarla como

$$i_n(t) = p(t)u_n(t) \quad (W/m^2) \quad (3.4)$$

en la que  $u_n(t)$  es la componente de la velocidad en a la dirección de  $\bar{n}$ .

Para el caso de una onda sinusoidal en la que tanto la presión como la velocidad de la partícula permanecen constantes en toda la superficie y además la velocidad de la partícula es perpendicular a dicha superficie, siendo la presión:

$$p(t) = P \cos(2\pi ft) \quad (Pa) \quad (3.5)$$

y la velocidad de la partícula:

$$u_n(t) = V \cos(2\pi ft + \theta) \quad (m/s) \quad (3.6)$$

$i_n(t)$  se obtiene como:

$$i_n(t) = \frac{PV}{2} [\cos\theta + \cos(4\pi ft + \theta)] \quad (W/m^2) \quad (3.7)$$

donde  $P$  y  $V$  son las amplitudes de la presión y de la velocidad de la partícula, respectivamente,  $f$  es la frecuencia, y  $\theta$  es el desfase entre presión y velocidad. Se observa que la intensidad instantánea de una onda sinusoidal está compuesta por un término fijo función del desfase  $\theta$  y otro oscilante con una frecuencia doble. Esta naturaleza oscilante de la intensidad instantánea, hace que no se utilice en aplicaciones reales.

### **3.2 Intensidad Sonora Promedio**

En sistemas eléctricos o mecánicos de ingeniería, el término “potencia” se utiliza normalmente para referirse a un valor promedio de la potencia en vez de referirse a la potencia instantánea. De la misma forma en acústica, cuando nos referimos a la intensidad, estamos hablando de un valor promedio, en la dirección  $\bar{n}$ , cuya expresión puede ser de la forma:

$$I_n = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T i_n(t) dt \quad (W/m^2) \quad (3.8)$$

Para una onda sinusoidal, la intensidad promedio,  $I$ , será el primer término de la Ecuación (3.7):

$$I = \frac{1}{2} PV \cos \theta \quad (W/m^2) \quad (3.9)$$

Para un proceso aleatorio estacionario, la función de correlación cruzada de las señales  $p(t)$  y  $u_n(t)$  es independiente del tiempo quedando como:

$$R_{pu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p^*(t) u_n(t + \tau) dt \quad (3.10)$$

indicando el carácter,  $*$ , el complejo conjugado. Si definimos el espectro cruzado (de potencia) como:

$$S_{pu}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left[ \frac{P^*(f) U_n(f)}{T} \right] \quad (3.11)$$

entonces la función de correlación cruzada viene expresada como:

$$R_{pu}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{pu}(f) e^{j2\pi f \tau} df \quad (3.12)$$

Introduciendo la Ecuación (3.4) en la Ecuación (3.8), vemos que ésta es igual que la Ecuación (3.10) con  $\tau = 0$  al ser  $p(t)$  y  $u_n(t)$  reales. Entonces la intensidad sonora promedio puede calcularse como la inversa de la transformada de Fourier del espectro cruzado entre  $p(t)$  y  $u_n(t)$ ,  $S_{pu}(f)$ , como:

$$I_n = \int_{-\infty}^{\infty} S_{pu}(f) df \quad (W/m^2) \quad (3.13)$$

### **3.3 Métodos de Medida de Intensidad Sonora: Sondas p-p**

Tal y como hemos deducido, para obtener la intensidad sonora es necesario conocer las magnitudes físicas de presión y velocidad de la partícula en un mismo punto. Estas magnitudes pueden obtenerse directa o indirectamente. La presión se puede obtener fácilmente mediante la utilización de micrófonos, siendo más complicado la obtención de la velocidad de la partícula con una precisión aceptable. Obtendremos tanto la presión como la velocidad de la partícula en un mismo punto de forma indirecta a través de dos micrófonos separados una distancia fija tal y como se representa en la Figura 2. Con esta configuración, podemos expresar la presión en el centro de los micrófonos por

$$p(t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \quad (Pa) \quad (3.14)$$

o en el dominio de la frecuencia,

$$P(f) = \frac{P_1(f) + P_2(f)}{2} \quad (Pa/Hz) \quad (3.15)$$

donde  $p_1(t)$  y  $p_2(t)$  son las salidas de los correspondiente micrófonos  $m_1$  y  $m_2$ , y  $P(f)$  es la transformada de Fourier de  $p(t)$ . La relación entre la componente de velocidad de la partícula en la dirección que une los centros de los micrófonos,  $u_n(t)$ , y la presión sonora,  $p(t)$  se obtiene de integrar la Ecuación (2.6) obteniéndose que

$$u_n(t) = -\frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(t')}{\partial n} dt' \quad (m/s) \quad (3.16)$$

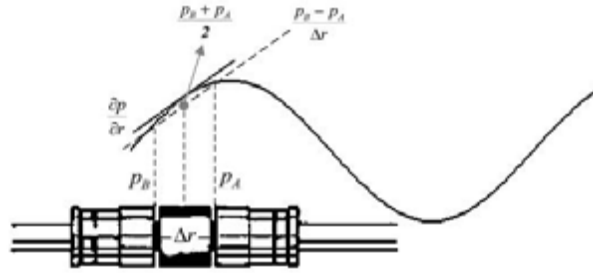
donde  $\rho$  es la densidad del aire. Aproximando el gradiente de presiones en la dirección  $\bar{n}$  como la diferencia de presiones en los micrófonos, podemos reescribirla como

$$u_n(t) = -\frac{1}{\rho d} \int_{-\infty}^t [p_2(t') - p_1(t')] dt' \quad (m/s) \quad (3.17)$$

siendo  $d$  la separación fija entre micrófonos. En el dominio de la frecuencia vendrá expresada como

$$U_n(f) = -\frac{P_2(f) - P_1(f)}{j2\pi f p d} \quad \left(\frac{m}{s \cdot Hz}\right) \quad (3.18)$$

donde  $c$  es la velocidad del sonido.



**Figura 2: Disposición de micrófonos enfrentados de una sonda p-p**

La obtención de la intensidad sonora a través de las Ecuaciones (3.14) y (3.17) o de las Ecuaciones (3.15) y (3.18) se conoce como el método de los dos micrófonos. La disposición de dos micrófonos separados una distancia fija con la que poder medir la intensidad del campo acústico en la dirección que une los centros de dichos micrófonos se llama sonda p-p.

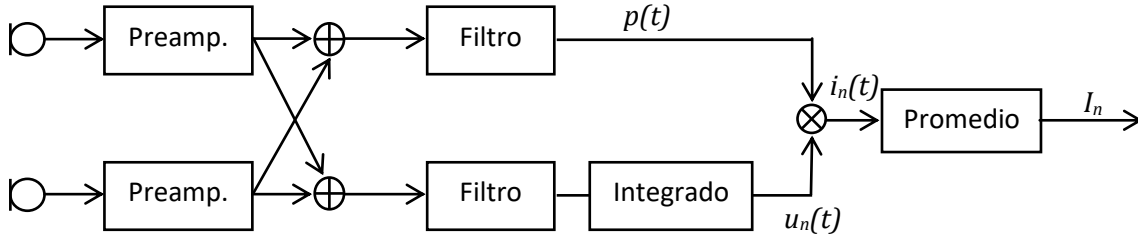
### 3.3.1 Método de Integración directa

Introduciendo en la Ecuación (3.4) las Ecuaciones (3.14) y (3.17), y sustituyendo el resultado en la Ecuación (3.8), obtenemos la intensidad promedio para un intervalo de tiempo  $[t - T, t]$ , como

$$I_n = \frac{1}{2\rho dT} \int_{t-T}^t \left\{ [p_1(t') + p_2(t')] \left( \int_{-\infty}^{t'} [p_2(t'') - p_1(t'')] dt'' \right) \right\} dt' \quad (W/m^2) \quad (3.19)$$

El sufijo  $n$  indica la dirección de la medida que para la sonda p-p será la que une los centros de los micrófonos. Si se necesita limitar la intensidad a una banda de frecuencias concreta, será necesario filtrar previamente las señales  $p_1(t')$  y  $p_2(t')$  para

luego aplicar la Ecuación(3.19). Este es el método de integración directa cuyo diagrama se muestra en la Figura 3. El tiempo de promediado,  $T$  puede variarse dependiendo del propósito de la medida. El inconveniente de esta técnica es la necesidad de utilizar muchos filtros simultáneos si se quiere obtener la medida de diferentes bandas, como es el caso de querer obtener la intensidad por bandas de tercio de octava.



**Figura 3: Diagrama de bloques del método de integración directa**

### 3.3.2 Método del Espectro Cruzado

Otra forma de obtener la intensidad promedio es utilizando la Ecuación (3.13). Sustituyendo las Ecuaciones (3.15) y (3.18) en la Ecuación (3.11) obtenemos

$$\begin{aligned}
 S_{pu}(f) &= \lim_{T \rightarrow \infty} E \left[ \frac{P^*(f)U_n(f)}{T} \right] \\
 &= -\frac{1}{4j\pi f \rho d} \cdot \lim_{T \rightarrow \infty} E \left[ \frac{\{P_2^*(f) + P_1^*(f)\}\{P_2(f) - P_1(f)\}}{T} \right] \quad ( \\
 &= \left\{ -\frac{1}{2\pi f \rho d} \text{Im}[S_{p_1 p_2}(f)] \right\} + j \left\{ \frac{1}{4\pi f \rho d} [S_{p_2 p_2}(f) - S_{p_1 p_1}(f)] \right\} \quad \left( \frac{W}{m^2 \cdot Hz} \right) \quad 3.20)
 \end{aligned}$$

siendo las operaciones realizadas para su obtención las siguientes:

- Producto de los términos de la segunda igualdad
- Aplicación de la definición de espectro cruzado a cada sumando obtenido
- $p_1(t)$  y  $p_2(t)$  son reales  $\rightarrow S_{p_1 p_2}(f) = S_{p_2 p_1}(-f) = S_{p_2 p_1}^*(f)$
- $z - \bar{z} = 2 \cdot j \cdot \text{Im}(z)$



El espectro cruzado  $S_{pu}(f)$  es una función compleja de variable real, por lo que podemos expresar la Ecuación (3.13) como:

$$I_n = \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}[S_{pu}(f)]df + j \int_{-\infty}^{\infty} \text{Im}[S_{pu}(f)]df \quad (W/m^2) \quad (3.21)$$

Aplicando las siguientes propiedades del espectro cruzado en el que  $p_1(t)$  y  $p_2(t)$  son reales, en la Ecuación (4.4)

- $\text{Im}[S_{p_1p_2}(f)]$  es impar  $\rightarrow \frac{\text{Im}[S_{p_1p_2}(f)]}{f}$  es par
- $S_{p_2p_2}(f)$  y  $S_{p_1p_1}(f)$  son reales y pares  $\rightarrow \frac{S_{p_2p_2}(f) - S_{p_1p_1}(f)}{f}$  es impar

obtenemos que la parte real del espectro cruzado,  $\text{Re}[S_{pu}(f)]$ , es par mientras que la parte imaginaria,  $\text{Im}[S_{pu}(f)]$ , es impar. Esto significa que la integral, para todas las frecuencias, de la parte imaginaria del espectro cruzado de la Ecuación (3.21) se anula, pudiendo reescribir dicha ecuación como

$$I_n = \int_0^{\infty} 2\text{Re}[S_{pu}(f)]df = -\frac{1}{2\pi\rho d} \int_0^{\infty} \frac{\text{Im}[G_{p_1p_2}(f)]}{f} df \quad (W/m^2) \quad (3.22)$$

siendo  $G_{p_1p_2}(f)$  el espectro cruzado a un lado de las señales  $p_1(t)$  y  $p_2(t)$ .

La Ecuación (4.7) discretizada se convierte en:

$$I_n = -\frac{1}{2\pi\rho d} \sum_{n=1}^{N_{FFT}/2} \frac{\text{Im}[G_{p_1p_2}(n\Delta f)]}{n\Delta f} \Delta f \quad (W/m^2) \quad (3.23)$$

en la que la variable independiente,  $f$ , pasa a ser  $n\Delta f$ , (siendo  $\Delta f$  el intervalo entre frecuencias representadas), la integral se transforma en un sumatorio del semiperiodo de  $G_{p_1p_2}(n\Delta f)$  y  $d(f)$  es simplemente  $\Delta f$ . La utilización de la Ecuación (4.7) para determinar la intensidad sonora se conoce como método del espectro cruzado. Este método requiere el cálculo de la FFT de las señales de los dos micrófonos lo que limita

su uso en aplicaciones en tiempo real. La ventaja de este método con respecto al de integración directa es su mejor resolución en frecuencia.

## **4 Programa de Simulación de Sondas p-p.**

### **4.1 Objetivos de la Aplicación y Recursos Utilizados.**

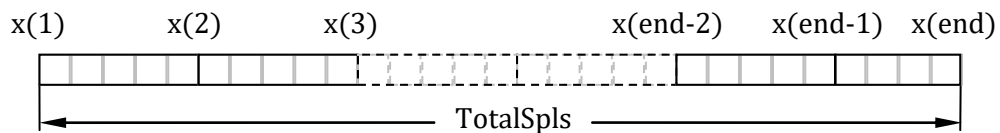
La aplicación programada consiste en la determinación de la intensidad sonora existente en un campo acústico generado por fuentes de ruido puntuales cuyas perturbaciones se propagan libremente en forma de onda esférica, incluyendo las reflexiones en el suelo. Los valores que proporciona son los niveles de intensidad (dB) por tercios de octava calculados mediante los métodos de integración directa y del espectro cruzado, cuyas ecuaciones se han descrito en los títulos anteriores.

Para conseguir que esta herramienta software resulte útil en la detección de errores o alteraciones que se dan en una medición real, debemos dotarla de la flexibilidad suficiente que permita modelar el mayor número posible de situaciones reales. Esta condición se logra en principio, haciendo que el campo acústico sea el generado por un “número ilimitado” de fuentes ubicadas en distintas posiciones. También contempla la posibilidad de medir los niveles de intensidad en un “número ilimitado” de posiciones y en la dirección y sentido que se desee. La versatilidad expuesta, mejora notablemente, dotando de movimiento tanto a las fuentes de ruido como a las sondas. Esto se consigue creando una dependencia temporal de las posiciones de fuentes y sondas y de las orientaciones de las sondas.

El programa de simulación desarrollado está escrito en MATLAB versión 8.2.0.701 (R2013b), utilizando el entorno GUIDE para desarrollar su interfaz gráfica.

Ese “número ilimitado” a que se hacía referencia en los párrafos anteriores, en realidad estará acotado por la memoria física del ordenador, puesto que todos los datos relevantes son guardados en un archivo (“tmpMatFile.mat”).

A efectos prácticos, el tamaño de los datos, que es necesario guardar y procesar, dependen del número de fuentes y sondas, de la duración de la simulación y de la frecuencia de muestreo utilizada. Este hecho hace necesario trocear las señales a tamaños manejables por el procesador y guardar los resultados obtenidos de cada trozo, concatenándolos en un archivo. Para poder realizar esta tarea es necesaria la utilización de la función *"matfile.m"*, con la que se crea un objeto que sirve como conector o enlace entre un archivo *\*.mat* y las variables del espacio de trabajo. Con este conector podemos guardar y cargar partes de variables en un archivo *\*.mat*. La forma utilizada para *"trocear"* una señal temporal de *"TotalSpls"* muestras es utilizando un vector, *"x"*, cuyos valores son las muestras por las que se trocea, de manera que un *"trozo"* de tiempo, *"vector t"*, se corresponda con las muestras, *"vector n"* de tamaño *"LimitSpls"* (excepto el último trozo), comprendidas entre la muestra *"x(i)+1"* y la muestra *"x(i+1)"*. La relación entre *"t"* y *"n"* es que  $t = (n-1)/F_m$ . Se utilizad el *"vector k"* para hacer referencia a muestras de un *"trozo"*, correspondiendo a las muestras *"1"* a *"x(i+1)-x(i)"*.



Otro aspecto importante, en lo que a velocidad de procesamiento se refiere, es la utilización de las funciones vectorizadas que proporciona Matlab en lugar de utilizar bucles para recorrer vectores. Esta técnica de programación, junto con la preasignación de memoria, reduce considerablemente el tiempo que tarda en ejecutarse cada simulación.

Los apartados siguientes describen las funciones que constituyen el programa de simulación de sondas p-p desarrollado. La secuencia, junto con una breve descripción de cada función, es la siguiente:

- **ConfigurarSimulacion:** es la aplicación principal y está desarrollada con GUIDE. Sirve básicamente para introducir las señales y posiciones de cada fuente, las posiciones y orientaciones de cada sonda y la duración y

frecuencia de muestreo de la simulación. Una vez introducidos todos esos datos llamará al resto de funciones pasándoles la información correspondiente en forma de parámetros.

- **CrearFuentes:** su finalidad es crear una matriz de tres dimensiones ("*S*") que contenga la información, correspondiente a las fuentes de ruido, que se describe en la Figura 5 a partir de las expresiones temporales de señal y posición que se le pasan como parámetros.
- **CrearSondas:** al igual que la función anterior, genera una matriz de tres dimensiones ("*P*") con la información descrita en la Figura 7 a partir de las expresiones temporales de posición y orientación de las sondas que se le pasan como parámetros.
- **CrearSeñales:** de las matrices tridimensionales de fuentes y sondas creadas con las funciones anteriores, se registra la señal que llega a los dos micrófonos de cada sonda resultante del rayo directo y reflejado, en el suelo, de cada fuente. Esta información es guardada también en una matriz de tres dimensiones ("*SM*")
- **CrearIntensidades:** obtiene los niveles de intensidad promedio de cada sonda por tercios de octava a partir de las señales generadas con la función anterior. El tiempo de promediado se introduce como suma de un intervalo más un solape. Los niveles de intensidad son calculados tanto por el método de integración directa como por el método del espectro cruzado.
- **ReallizarSimulación:** esta aplicación está desarrollada con GUIDE. Por un lado modela un espacio en campo libre, con suelo, en el que se representa cada una de las fuentes como una esfera creciente y cada una de las sondas como dos cilindros separados. Por otro lado muestra los niveles de intensidad por tercios de octava.

#### **4.1.1 Función "Pos\_Micros"**

Hemos indicado que podemos simular sondas cuya posición y orientación varíen con el tiempo. Para conseguir este efecto, utilizamos matrices de transformación homogénea.

Para un espacio tridimensional, una matriz de transformación homogénea  $T$  es una matriz de dimensión  $4 \times 4$  que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas ( $r(x,y,z) \rightarrow r(x,y,z,1)$ ) de un sistema de coordenadas a otro.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Estas matrices están compuestas por cuatro submatrices de distinto tamaño: una submatriz  $R_{3 \times 3}$  que corresponde a una matriz de rotación; una submatriz  $p_{3 \times 1}$  que corresponde a un vector de traslación; una submatriz  $f_{1 \times 3}$  que representa una transformación de perspectiva y una submatriz  $w_{1 \times 1}$  que representa un escalado global. Para este trabajo solo interesa conocer el valor de  $R_{3 \times 3}$  y de  $p_{3 \times 1}$ , considerándose las componentes de  $f_{1 \times 3}$  nulas y la de  $w_{1 \times 1}$  la unidad.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Esta matriz sirve para expresar la rotación y traslación de un vector de un sistema de referencia fijo OXYZ, de tal manera que un vector  $r_{xyz}$  rotado según  $R_{3 \times 3}$  y después trasladado según  $p_{3 \times 1}$  se convierte en el vector  $r'_{xyz}$  dado por:

$$\begin{bmatrix} r'_x \\ r'_y \\ r'_z \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Esta función, "Pos\_Micros", interpreta, cada vez que se utiliza, que el centro de la sonda se encuentra inicialmente en el origen de coordenadas y orientada en el eje OZ (micro A a  $0.5 \cdot \text{Espaciador}$  y micro B a  $-0.5 \cdot \text{Espaciador}$ ), de manera que primero se

orienta la sonda y después se traslada. Para orientarla se utiliza la composición de matrices básicas de rotación según la siguiente expresión:

$$R(x, giroX)R(y, giroY) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & CgX & -SgX \\ 0 & SgX & CgX \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CgY & 0 & SgY \\ 0 & 1 & 0 \\ -SgY & 0 & CgY \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

que se puede interpretar como un *giroY* respecto del eje fijo OY seguido de un *giroX* respecto del eje fijo OX, o bien como un *giroX* respecto del eje solidario a la sonda OU seguido de un *giroY* respecto del nuevo eje OV (ejes solidarios a la sonda son el sistema coordinado OUVW, sonda inicialmente orientada en el eje OW). Esta forma de orientar la sonda en cualquier dirección del espacio requiere la definición únicamente de dos tipos de giro, *giroX* y *giroY*, pero será necesario tener en cuenta cómo se van a interpretar los giros para no cometer errores. Las expresiones  $CgX$ ,  $SgX$ ,  $CgY$  y  $SgY$  equivalen a  $\cos(giroX)$ ,  $\sin(giroX)$ ,  $\cos(giroY)$  y  $\sin(giroY)$  respectivamente, considerando los giros en grados.

Introduciendo en el vector  $p_{3 \times 1}$  y en la matriz  $R_{3 \times 3}$  de la Ecuación (4.2) las coordenadas de posición de la sonda y la matriz de rotación de la Ecuación (4.4) respectivamente, obtendremos la matriz de transformación homogénea con la que poder obtener las coordenadas, respecto al sistema de referencia fijo OXYZ, de cada uno de los micrófonos de la sonda.

#### **4.1.2 Función "ConfigurarSimulacion"**

Consiste en una aplicación GUI sencilla estilo formulario que facilita la configuración de la simulación que se desea realizar. Con ella podemos crear nuevas simulaciones desde cero, guardarlas y abrirlas para poder modificarlas. Este programa se ha desarrollado con GUIDE de Matlab.

Para crear una nueva simulación, pulsamos el botón "*Nueva Simulación*" y aparece un formulario que permite definir la duración, la frecuencia de muestreo y las expresiones temporales tanto de las señales como de la posición de cada fuente de ruido. Podremos definir una trayectoria para cada fuente utilizando expresiones

dependientes de “*t*” para cada una de las coordenadas X, Y, Z. Para definir las señales de ruido, podremos utilizar funciones periódicas dependientes de “*t*” para simular señales simples o indicar el nombre de un archivo existente “*\*.wav*” para introducir ruidos más complejos o reales. Una vez rellenados todos los campos, pulsando el botón “**V**”, se guardan los datos en un vector de tipo celda, “*cellS*”, cuyos elementos, para la fuente “*iS*”, son estructuras, “*stS*”, de forma que:

- “*cellS {iS}.expVal*” contendrá la función de ruido o el nombre del archivo “*\*.wav*”
- “*cellS {iS}.posX*” contendrá la función de la coordenada X de posición de la fuente
- “*cellS {iS}.posY*” contendrá la función de la coordenada Y de posición de la fuente
- “*cellS {iS}.posZ*” contendrá la función de la coordenada Z de posición de la fuente
- “*cellS {iS}.Tipo*” indicará si la señal de ruido es una función o un archivo de audio
- “*cellS {iS}.ok*” indicará que los datos de la estructura son válidos

Pulsando el botón “**+**” se añade a la celda “*cellS*” una nueva estructura vacía “*stS*” en la que poder introducir una nueva fuente de ruido. Una vez definidas las fuentes de ruido, se pueden modificar accediendo a ellas utilizando los botones “**+**” y “**-**” y pulsando “**V**”, o bien eliminarlas pulsando “**X**”. Cada vez que se valida o elimina una fuente se muestra en el panel “*Parámetros de las fuentes de ruido*”, las configuraciones de todas las fuentes.

Con una sola fuente de ruido validada, se habilita el botón “*Configurar Sondas*”. Pulsando dicho botón se modifica el formulario para poder introducir los parámetros de las sondas de forma análoga a como se hace con las fuentes. En este caso, los datos se guardan en una celda, “*cellP*”, cuyos elementos, para la sonda “*iP*”, son estructuras, “*stP*”, de manera que:

- “*cellP {iP}.posX*” contendrá la función de la coordenada X de posición de la sonda
- “*cellP {iP}.posY*” contendrá la función de la coordenada Y de posición de la sonda
- “*cellP {iP}.posZ*” contendrá la función de la coordenada Z de posición de la sonda
- “*cellP {iP}.giroX*” contendrá la función del giro con respecto al eje X de orientación de la sonda

- “cellP {iP}.giroY” contendrá la función del giro con respecto al eje Y de orientación de la sonda
- “cellP {iP}.spacer” contendrá la distancia del espaciador de la sonda
- “cellP {iP}.ok” indicará que los datos de la estructura son válidos

Un ejemplo de configuración de dos fuentes de ruido y dos sondas se muestra en la Figura 4.

The screenshot shows a software window titled "ConfigurarSimulacion". It contains three main panels:

- Configuración de sondas:** Includes input fields for "Duración" (10 seg), "Muestreo" (51200 Hz), and a set of buttons (-, +, 2, X, V). Below these are input fields for "posX (t)", "posY (t)", "posZ (t)", "giroX (t)", "giroY (t)", and "Espaciad", with values 5, 1, 1,  $360 / 10 * t$ , 0, and 0.012 respectively. At the bottom are buttons "Configurar Ruido", "Configurar Sondas", and a large blue "CALCULAR SIMULACIÓN" button.
- Parámetros de las fuentes de ruido:** Contains text for two noise sources. Source 1: "Fuente de ruido nº 1: expVal = sin (2 \* pi \* 1000 \* t), posX = 1, posY = 1, posZ = 1". Source 2: "Fuente de ruido nº 2: expVal = desfa009.wav, posX = 9 - 3 / 10 \* t, posY = 1, posZ = 1".
- Parámetros de las sondas:** Contains text for two sensors. Sensor 1: "Sonda nº 1 con espaciador de 0.012 m: posX = 5, posY = 1, posZ = 1, giroX = 0, giroY = 360 / 10 \* t". Sensor 2: "Sonda nº 2 con espaciador de 0.012 m: posX = 5, posY = 1, posZ = 1, giroX = 360 / 10 \* t, giroY = 0".

**Figura 4:** Ejemplo de formulario de configuración de una simulación

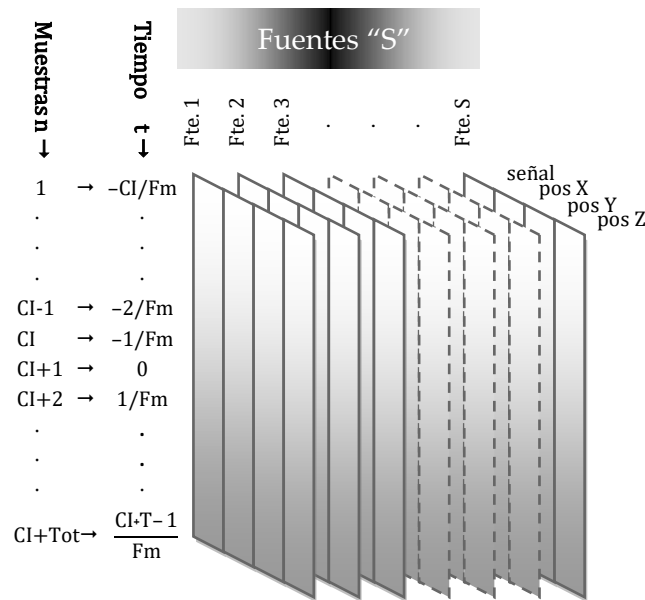
#### 4.1.3 Función “CrearFuentes”

A esta función se le pasa como parámetros el conector “matIO”, la frecuencia de muestreo, “Fm”, la duración de la simulación, “Duration” y la celda de estructuras “stS”, “cellS”, que se han obtenido mediante la aplicación “ConfigurarSimulacion”.

El producto de la frecuencia de muestreo, “Fm”, por la duración de la simulación, “Duration”, determina el número de muestras, “TotalSpls”, que tendrán las señales de ruido producidas por cada fuente, las posiciones de cada fuente y sonda y las orientaciones de cada sonda.



Para obtener dichas señales temporales, se utilizará la función “eval”, que proporciona Matlab, sobre los campos de las estructuras de la celda “cellS”. Los vectores de “TotalSpls” muestras obtenidos, se agrupan en una matriz de tres dimensiones, “S”, en la que las filas se corresponden con cada muestra y las columnas hacen referencia a cada fuente. Así, la tercera dimensión contendrá en la primera rebanada las señales de ruido de todas las fuentes y, de la segunda a la cuarta rebanada, las posiciones X, Y, Z respectivamente. Tal y como se muestra en la Figura 5, también se pueden identificar las rebanadas con las señales de ruido y de posición de cada fuente



**Figura 5: Representación de la ordenación de datos de fuentes “S”**

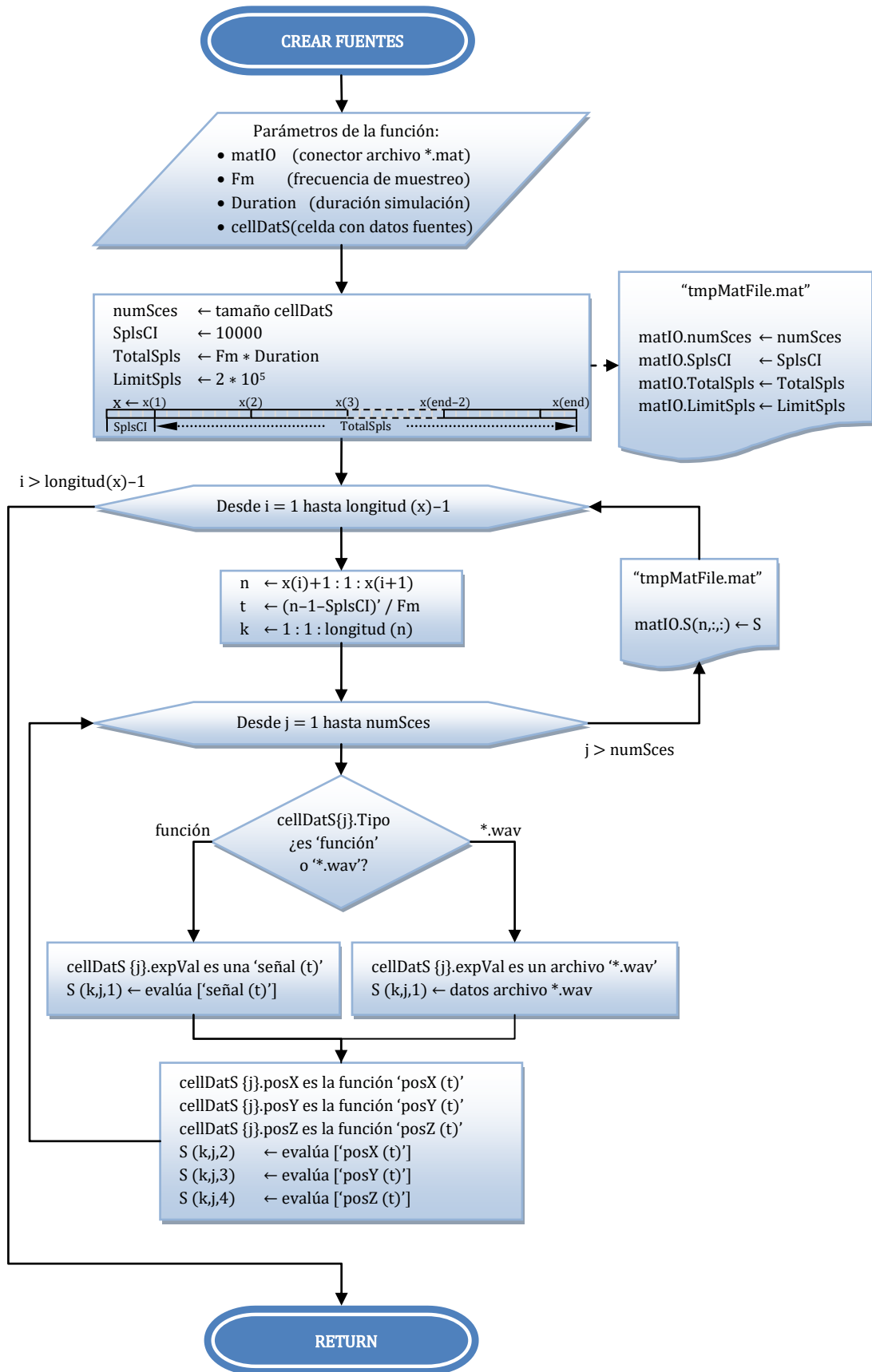
El término “CI” que aparece tanto en “Muestras n”, como en “Tiempo t” son muestras de condiciones iniciales. Éstas surgen de la necesidad de conocer valores de la señal de ruido para tiempos anteriores al inicio de la simulación. Como se ha explicado, la señal de ruido simula una perturbación de presión que se propaga como una onda a la velocidad del sonido,  $c$ , por lo tanto, interpretando la Ecuación (2.15), la presión de ruido que llegue a uno de los micrófono de una sonda,  $p_p(t_n)$ , correspondiente a una fuente de ruido cuyo rayo diste  $r$ , será la señal de la fuente en el

instante  $p_n(t_n - R)$  atenuada, siendo  $R$  el retardo o tiempo que tarda en llegar la perturbación de la fuente al micrófono de la sonda.

$$p_p(t_n) = \frac{p_s(t_n - R)}{r} : R = \frac{r}{c}; \quad t_n \geq 0 \quad (Pa) \quad (4.5)$$

Este parámetro, que hemos llamado en los programas "*SplsCI*", va a limitar la máxima distancia de separación, durante toda la simulación, entre cualquier fuente y cualquier sonda. Por ejemplo, 10.000 muestras de "*SplsCI*" y una "*Fm*" de 51200 Hz, suponen una distancia máxima, " $R \cdot c$ ", de unos 66 metros.

El diagrama de flujo de la función "*CrearFuentes*", se muestra en la Figura 6 donde se puede apreciar el troceado de la señal y el almacenamiento en disco de los datos calculados.

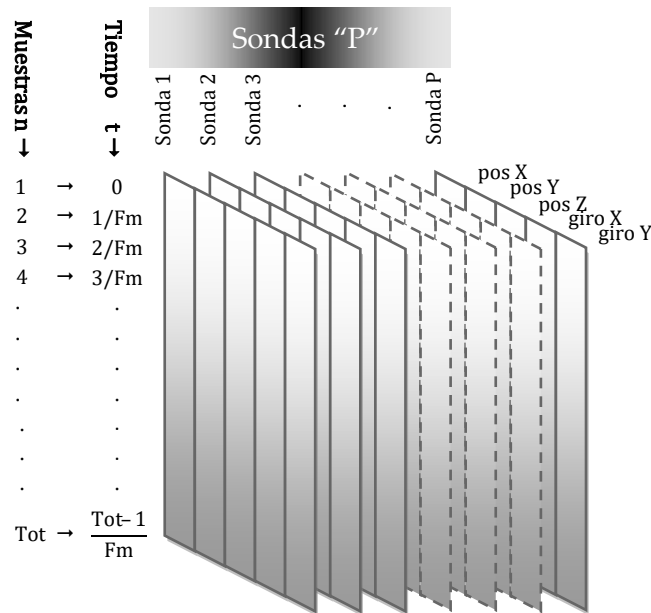


**Figura 6: Diagrama de flujo de la función “CrearFuentes”**

## 4.2 Función “CrearSondas”

Los parámetros de esta función son el conector “matIO” y la celda de estructuras “stP”, “cellP” obtenidas por la aplicación “ConfigurarSimulacion”.

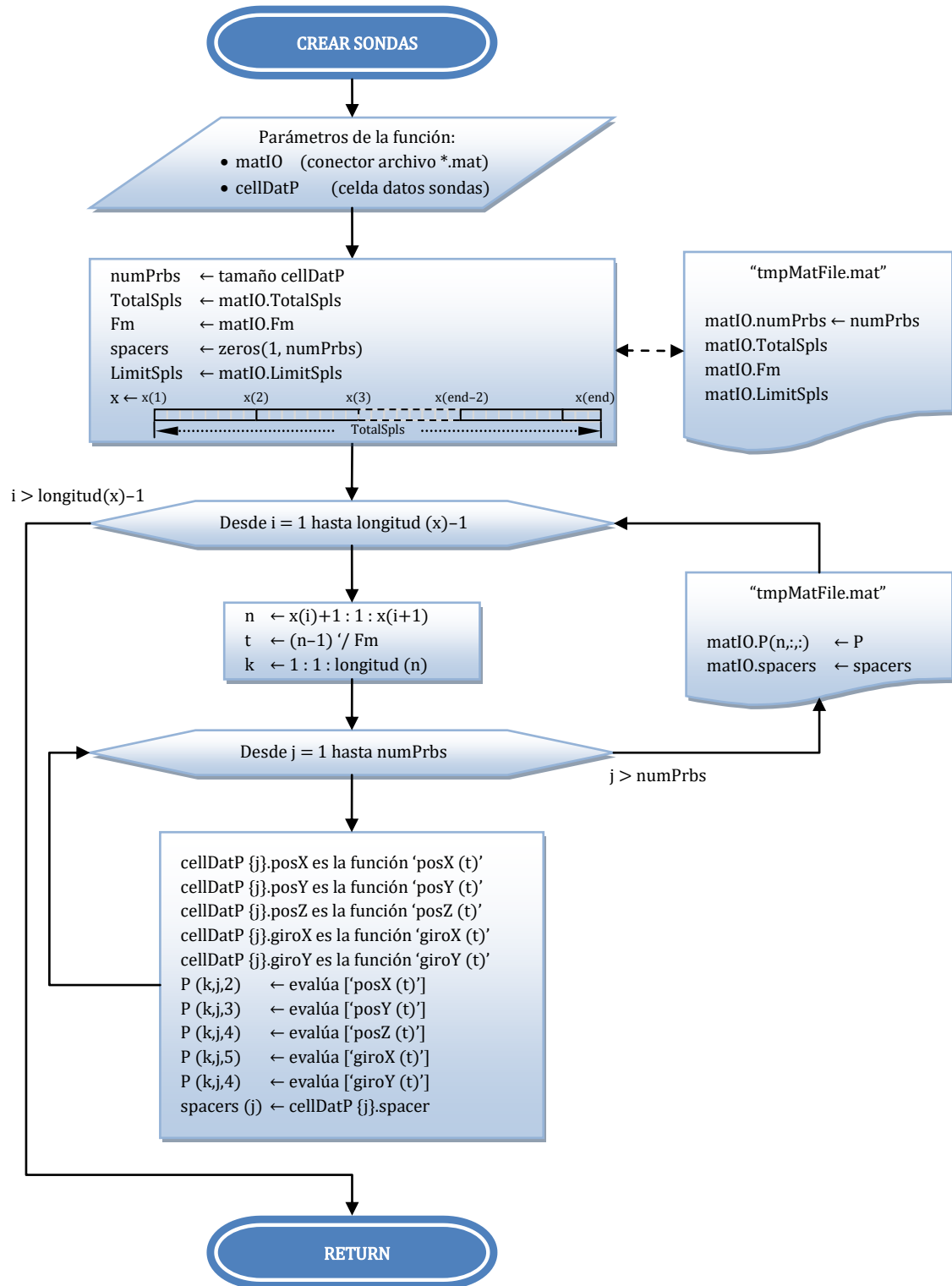
Al igual que la función “CrearFuentes”, esta función creará los vectores de “TotalSpls” muestras, resultantes de evaluar las expresiones de los campos de la estructura “stP” que contiene cada uno de los elementos de la celda “cellP”. Estos vectores se organizarán en la matriz de tres dimensiones “P” tal y como se ilustra en la Figura 7.



**Figura 7: Representación de la ordenación de datos de sondas “P”**

Puesto que el espaciador de una sonda no puede cambiar con el tiempo, se crea un nuevo vector, “spacers”, cuyo tamaño será el número de sondas configuradas, y que guardará los valores del espaciador de cada sonda.

El diagrama de flujo de la función “CrearSondas” es el representado en la Figura 1, en el que también se refleja el troceado de las muestras y el almacenamiento en archivo “tmpMatFile.mat” de los datos procesados.



**Figura 8: Diagrama de flujo de la función "CrearSondas"**

#### **4.2.1 Función "CrearSeñales"**

A esta función únicamente se le pasa el conector a archivos *"\*.mat"*, *"matIO"*, puesto que toda la información necesaria está guardada en el archivo al que está ligado, *"tmpMatFile.mat"*.

Es la función fundamental para lograr el objetivo de simular sondas p-p, puesto que se encarga de calcular el valor total de señal que llega al micrófono de cada sonda procedente del campo acústico generado por los rayos directos y reflejados de todas y cada una de las fuentes.

En un entorno de trabajo continuo, simplemente sería aplicar la Ecuación (4.5); calcular las distancias entre las fuentes y micrófonos, obtener el retardo correspondiente, tomar el valor de la señal de la fuente retardada y así ir sumando el efecto que cada fuente genera en cada micrófono. Sin embargo, la información que disponemos de las fuentes es discreta, lo que supone, siguiendo un razonamiento similar al que se realizó para determinar la separación máxima entre fuente y sonda, una discretización del espacio.

Para un correcto funcionamiento de la simulación, es imprescindible que todas las medidas se realicen en los mismos instantes de tiempo. Esta condición de muestreo aplicada a la obtención de la señal que llega a cada micrófono de las sondas se puede representar matemáticamente según la siguiente ecuación:

$$p_p(n) = \frac{p_s(n - R_e)}{R_e c / F_m} : R_e = \text{round}\left(\frac{r}{c} F_m\right); \quad n \in \mathbb{Z}^+ \quad (Pa) \quad (4.6)$$

que no es más que la discretización de la Ecuación (4.5) expresada en función del número de muestra  $n$ . En ella se aproxima el valor del número de muestras de retardo,  $R_e$ , como el entero más próximo del retardo  $R$  y se ha sustituido el valor de  $r$  por el que le correspondería al retardo entero,  $R_e$

Para el caso de una  $F_m$  de 51200 Hz las posiciones del espacio en las que conocemos el valor de las perturbaciones de la fuente, se reduce a las superficies de

esfera de radio 6.66 mm, considerando una velocidad del sonido de 341 m/s. Con esta información resulta imposible realizar ningún cálculo fiable.

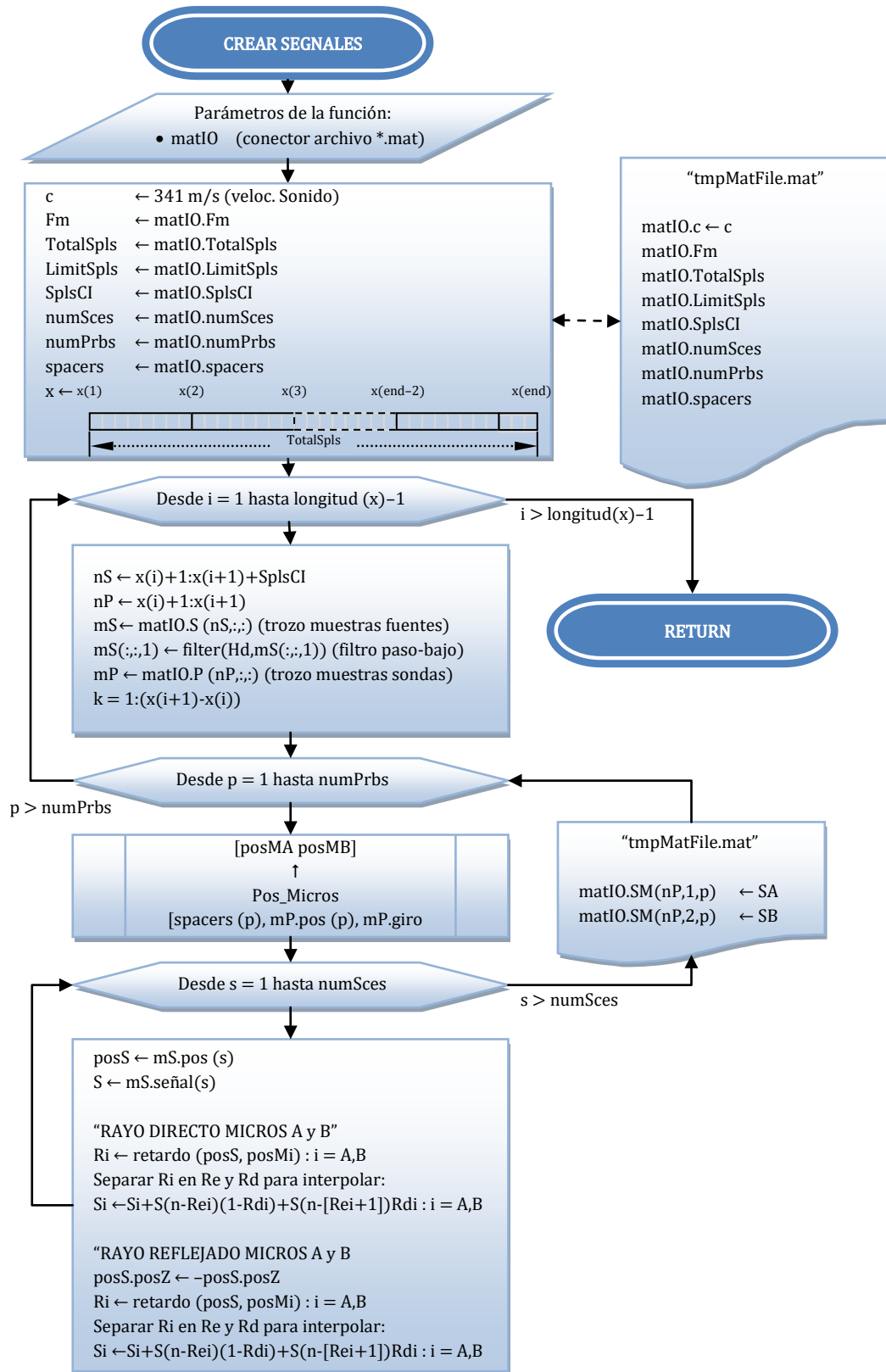
Para conocer el valor de la señal de ruido emitida por una fuente en cualquier punto del espacio, se va a utilizar tanto la parte entera como decimal del retardo  $R$ . Esto se consigue suponiendo que la variación de las señales entre muestras consecutivas se realiza de forma lineal, por lo que el valor de la señal para un retardo arbitrario  $R$ , será el que resulte de evaluar esa aproximación lineal en la muestra  $n - R$ . La expresión que representa el planteamiento descrito es:

$$\begin{aligned} p_p(n) &= \frac{1}{r} \{ p_s(n - R_e) + \langle p_s(n - [R_e + 1]) - p_s(n - R_e) \rangle R_d \} \\ &= \frac{1}{r} \{ p_s(n - R_e)(1 - R_d) + p_s(n - [R_e + 1])R_d \} \end{aligned} \quad (Pa) \quad (4.7)$$

que determina el valor de señal que llega al micrófono de una sonda en cada instante de muestreo,  $p_p(n)$ , como la suma de un término de la señal de la fuente retardada un número entero de muestras,  $p_s(n - R_e)$ , y una aproximación lineal del valor entre muestras dependiente de la parte decimal del retardo  $R$ ,  $R_d$ .

Esta ecuación en diferencias representaría un filtro paso-bajo de la señal, considerando como entrada  $p_s(n)$  y como salida  $p_p(n)$ .

El siguiente diagrama de flujo de la función “*CrearSeñales*”, muestra como se obtienen las señales en los micrófonos A y B de cada sonda procedente de todas las fuentes. Éste, se caracteriza por tres bucles “*for*” en el que el primero trocea las señales contenidas en el fichero “*tmpMatFile.mat*” a tamaños procesables, el segundo sirve para obtener la posición de cada micrófono a partir de la posición del centro de la sonda utilizando de la función ya descrita “*Pos\_Micros*” y el tercero calcula el valor de la señal en los micrófonos, utilizando la Ecuación (4.7), a partir del retardo entero,  $R_e$ , y decimal,  $R_d$ , que dependen de la distancia entre fuentes y micrófonos.



**Figura 9: Diagrama de flujo de la función “CrearSegnales”**



Los datos de señal en cada micrófono calculados, “SA” y “SB”, son guardados en el archivo “*tmpMatFile.mat*” en la variable “SM” que es una matriz de tres dimensiones, representando las filas las “TotalSpls” muestras, las dos columnas a los micrófonos A y B, y cada rebanada a cada sonda.

#### **4.2.2 Función “CrearIntensidades”**

Esta función va a proporcionar los niveles de intensidad acústica promedio recogidos por cada sonda correspondiente a la superficie perpendicular a la dirección que va desde el micrófono A (rojo) hasta el B (azul). Para los cálculos, es necesario determinar cada cuanto tiempo se desea que se proporcione el nivel de intensidad, que corresponde con el parámetro de entrada a la función “Inc”, así como si se desea que el tiempo de promediado contenga además, tiempos anteriores a “Inc”, proporcionado dicho valor con la variable de entrada “Overlap”. El tercer parámetro necesario vuelve a ser, al igual que en las demás funciones, el conector al archivo “*tmpMatFile.mat*”, “matIO”.

El cálculo de dichos niveles de intensidad, promediados en “Inc” más “Overlap” segundos, se va a realizar utilizando las Ecuaciones (3.19) y (3.23) correspondientes al cálculo por el método de integración directa y del espectro cruzado respectivamente. Estos cálculos se realizan a partir de las señales que llegan a cada micrófono de la sonda, “SM”, que se han obtenido con la función “CrearSeñales”. Los valores del nivel de intensidad de cada sonda, y para cada método, se guardan en “*tmpMatFile.mat*” dentro de las variables “ITM” e “IFM” respectivamente. Cada variable consiste en una matriz de tres dimensiones en las que las filas corresponden con los intervalos “Inc”, las columnas con el valor para cada filtro de tercio de octava, y cada rebanada representa a cada sonda.

La secuencia de operaciones simplificadas que se realizan en esta función, se detallan en el diagrama de flujo de la Figura 10, explicándose a continuación los aspectos más importantes:

- Cálculo de la respuesta impulsional, "*H3sos*", y de la matriz selectora de bandas de frecuencia de tercios de octava, "*H3frec*", necesarios para determinar los niveles de intensidad por tercios de octava para los métodos de integración directa y del espectro cruzado respectivamente.
- Troceado de las "*TotalSpls*" muestras a valores procesables múltiplos de "*Inc \* Fm*".
- Para cada filtro de tercio de octava se filtran las señales de cada micrófono de la sonda con "*H3sos*" y se calcula, a partir de las señales resultantes, las variables temporales presión, velocidad de la partícula e intensidad,  $p(t)$ ,  $u_n(t)$  e  $i_n(t)$ , estimadas en el centro de la sonda, utilizando las Ecuaciones (3.14), (3.17) y (3.4) respectivamente.
- Cálculo del nivel de intensidad para el método de integración directa, como el valor de  $i_n(t)$  promediado para cada intervalo "*Inc*" mas "*Overlap*", tal y como se indica en la Ecuación (3.19).
- Cálculo directo del nivel de intensidad, método frecuencial, para cada intervalo "*Inc*", a través del espectro cruzado de presiones de los micrófonos de cada sonda, separándolos por tercios de octava a través de la matriz "*H3frec*". Se ha utilizado una ventana hann en el cálculo del espectro cruzado para disminuir los valores de señal en las bandas de frecuencia donde no existe ruido. Para ello se ha utilizado la función de Matlab "*cpsd*" que aplica dicha ventana y devuelve directamente la densidad del espectro cruzado a un lado, "*Gab*", si las señales son reales.

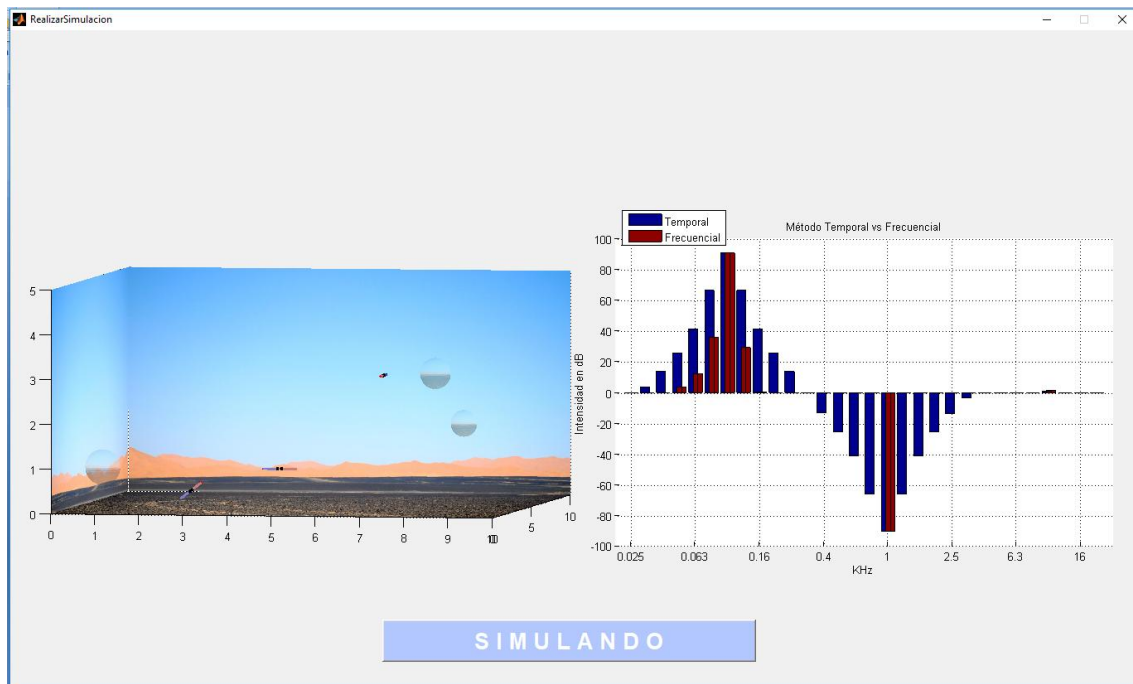


### 4.2.3 Función "RealizarSimulacion"

Al igual que la función "ConfigurarSimulación", se trata de una aplicación GUI desarrollada con GUIDE de Matlab.

En un lado de la ventana se representa, gráficamente, tanto la evolución temporal de la posición de las fuentes de ruido configuradas, como la posición y orientación de cada una de las sondas. Las fuentes de ruido se grafican en forma de esferas transparentes que varían su diámetro conforme avanza la representación. Las sondas son representadas por dos cilindros alineados y separados una distancia proporcional al espaciador, uno de color rojo para el micrófono A y otro azul para el micrófono B.

En el otro lado, se muestra mediante un diagrama de barras, los niveles de intensidad de las sondas, pudiendo elegirse, modificando el código, la representación comparada del método temporal frente al frecuencial para una sonda, la intensidad de dos sondas distintas calculadas por el método de integración directa o la intensidad de dos sondas distintas calculadas por el método del espectro cruzado.



*Figura 11: Ejemplo de representación de una simulación*

La Figura 11 corresponde a un instante de simulación de distintas fuentes de ruido con distintas sondas, en la que se grafican los niveles de intensidad de una de las sondas comparando los métodos de cálculo.

## **5 Conclusiones.**

Se ha conseguido aplicar correctamente las ecuaciones teóricas que rigen el cálculo de intensidad sonora, tanto por el método de integración directa como por el método del espectro cruzado. Con ambos métodos se consiguen los mismos resultados, corroborando las afirmaciones que se realizan en los textos.

Se ha creado una herramienta software flexible y ampliable, para comprender mejor la técnica de medición de intensidad acústica mediante sondas p-p.

Se ha adquirido la destreza suficiente para poder afrontar la utilización de la sonda creada en la EUPT para determinar la intensidad en una aplicación real. En principio, con las aplicaciones programadas, se dispone de un punto de partida importante para poder utilizar dicha sonda, aunque quedan muchos detalles que hay que solucionar como por ejemplo el problema del desfase entre los micrófonos utilizados, siendo este uno de los inconvenientes principales.

## **6 Líneas Abiertas.**

Ampliar el contexto de trabajo a una situación de campo reverberante incluyendo el efecto de múltiples reflexiones en los límites del recinto.

Predecir la influencia en el proceso de medida de errores como la incorrecta orientación de las sondas, diferencias de amplitud o fase entre los micrófonos que forman las sondas, etc.

Simular mediciones de la potencia emitida por una fuente y comprobar lo insensible que es el método ante perturbaciones de ruidos externos a los de la fuente que se desee medir.

Realizar medidas de potencia de fuentes ruidosas por el método de barrido o de puntos fijos.

## **7 Bibliografía.**

Acevedo Álvarez, S. A. (2006). Desarrollo de un sistema de medición de intensidad acústica con fines didácticos. Valvidia, Chile.

Bies, D. A., & Hansen, C. H. (2003). *Engineering noise control. Theory and Practice*. London & New York: Spon Press.

Brüel & Kjaer. (1993). *Sound intensity*. Naerum: Brüel & Kjaer.

Fahy, F. (2001). *Foundations of engineering acoustics*. Academic Press.

Fahy, F. (1995). *Sound intensity* (Second ed.). London: E&FN Spon.

Jacobsen, F. (2005). *Sound intensity and its measurements and applications*. Lyngby: Technical University of Denmark.

Pierce, A. (1981). *Acoustic: An Introduction to its Physical Principles and Applications*. New York: McGraw Hill, Capítulo 5.

Tohyama, M., Suzuki, H., & Ando, Y. (1995). *The nature and technology of acoustic space*. San Diego: Academic press limited.