



TELECOMUNICACIÓN

Campus Sur  
POLITÉCNICA

# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

## PROYECTO FIN DE GRADO

**TÍTULO:** *Desarrollo de un Laboratorio Virtual para la realización de e-comparisons en los ensayos de aislamiento acústico de fachadas según UNE-EN ISO 140-5*

**AUTOR:** Luis Gascó Sánchez

**TITULACIÓN:** Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen

**TUTOR (o Director en su caso):** César Asensio Rivera

**DEPARTAMENTO:** SEC

VºBº

**Miembros del Tribunal Calificador:**

**PRESIDENTE:** Juan José Gómez Alfageme

**VOCAL:** Mariano Ruiz González

**SECRETARIO:** Juan Manuel López Navarro

**Fecha de lectura:**

**Calificación:**

El Secretario,



## AGRADECIMIENTOS

*Quisiera dedicar este PFG a mis padres y hermanas, por haberme apoyado durante estos cuatro años y haberme aguantado en momentos difíciles.*

*A Rocío, por estos siete años, y por tu paciencia infinita durante los últimos cuatro.*

*A mis amigos de Guadalajara, de Madrid y de la Escuela, con los que he pasado y espero seguir pasando grandes momentos en el futuro.*

*Por otra parte me gustaría expresar mi agradecimiento a todos los trabajadores del Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada y LABENAC, que me han tratado como uno más desde el primer momento, facilitando mi integración, consiguiendo que mi primera experiencia profesional haya sido excelente.*

*Concretamente me gustaría agradecer a Cesar Asensio el haberme dado la oportunidad de desarrollar este proyecto, así como de haberse preocupado desde un primer momento de mejorar mi formación para los próximos pasos en mi carrera.*





## Resumen

Actualmente son una práctica común los procesos de normalización de métodos de ensayo y acreditación de laboratorios, ya que permiten una evaluación de los procedimientos llevados a cabo por profesionales de un sector tecnológico y además permiten asegurar unos mínimos de calidad en los resultados finales.

En el caso de los laboratorios de acústica, para conseguir y mantener la acreditación de un laboratorio es necesario participar activamente en ejercicios de intercomparación, utilizados para asegurar la calidad de los métodos empleados. El inconveniente de estos ensayos es el gran coste que suponen para los laboratorios, siendo en ocasiones inasumible por estos teniendo que renunciar a la acreditación.

Este Proyecto Fin de Grado se centrará en el desarrollo de un Laboratorio Virtual implementado mediante una herramienta software que servirá para realizar ejercicios de intercomparación no presenciales, ampliando de ese modo el concepto **e-comparison** y abriendo las bases a que en un futuro este tipo de ejercicios no presenciales puedan llegar a sustituir a los llevados a cabo actualmente.

En el informe primero se hará una pequeña introducción, donde se expondrá la evolución y la importancia de los procedimientos de calidad acústica en la sociedad actual.

A continuación se comentará las normativas internacionales en las que se soportará el proyecto, la norma ISO 145-5, así como los métodos matemáticos utilizados en su implementación, los métodos estadísticos de propagación de incertidumbres especificados por la JCGM (*Joint Committee for Guides in Metrology*).

Después, se hablará sobre la estructura del proyecto, tanto del tipo de programación utilizada en su desarrollo como la metodología de cálculo utilizada para conseguir que todas las funcionalidades requeridas en este tipo de ensayo estén correctamente implementadas.

Posteriormente se llevará a cabo una validación estadística basada en la comparación de unos datos generados por el programa, procesados utilizando la simulación de Montecarlo, y unos cálculos analíticos, que permita comprobar que el programa funciona tal y como se ha previsto en la fase de estudio teórico.

También se realizará una prueba del programa, similar a la que efectuaría un técnico de laboratorio, en la que se evaluará la incertidumbre de la medida calculándola mediante el método tradicional, pudiendo comparar los datos obtenidos con los que deberían obtenerse.

Por último, se comentarán las conclusiones obtenidas con el desarrollo y pruebas del Laboratorio Virtual, y se propondrán nuevas líneas de investigación futuras relacionadas con el concepto e-comparison y la implementación de mejoras al Laboratorio Virtual.



## Resumen



## Abstract

Nowadays it is common practise to make procedures to normalise trials methods standards and laboratory accreditations, as they allow for the evaluation of the procedures made by professionals from a particular technological sector in addition to ensuring a minimum quality in the results.

In order for an acoustics laboratory to achieve and maintain the accreditation it is necessary to actively participate in the intercomparison exercises, since these are used to assure the quality of the methods used by the technicians. Unfortunately, the high cost of these trials is unaffordable for many laboratories, which then have to renounce to having the accreditation.

This Final Project is focused on the development of a Virtual Laboratory implemented by a software tool that it will be used for making non-attendance intercomparison trials, widening the concept of e-comparison and opening the possibility for using this type of non-attendance trials instead of the current ones.

First, as a short introduction, I show the evolution and the importance today of acoustic quality procedures.

Second, I will discuss the international standards, such as ISO 145-5, as well the mathematic and statistical methods of uncertainty propagation specified by the Joint Committee for Guides in Metrology, that are used in the Project.

Third, I speak about the structure of the Project, as well as the programming language structure and the methodology used to get the different features needed in this acoustic trial.

Later, a statistical validation will be carried out, based on comparison of data generated by the program, processed using a Montecarlo simulation, and analytical calculations to verify that the program works as planned in the theoretical study.

There will also be a test of the program, similar to one that a laboratory technician would carry out, by which the uncertainty in the measurement will be compared to a traditional calculation method so as to compare the results.

Finally, the conclusions obtained with the development and testing of the Virtual Laboratory will be discussed, new research paths related to e-comparison definition and the improvements for the Laboratory will be proposed.



## Abstract





## Índice de contenidos

Resumen.....	1
Abstract .....	3
Lista de acrónimos .....	11
1. Introducción .....	13
1.1. Marco Tecnológico.....	13
1.2. Objetivos .....	14
1.3. Estructura de la memoria.....	14
1.4. Normativa UNE-EN ISO 140-5 .....	15
1.4.1. Definiciones.....	15
1.4.2. Requisitos para la medición .....	16
1.5. Evaluación de incertidumbre .....	18
1.5.1. Método clásico de determinación de incertidumbres.....	19
1.5.2. Ley de propagación de las distribuciones. Método de Montecarlo.....	22
1.5.3. Validación del método tradicional utilizando el método de Montecarlo.....	27
2. Metodología .....	29
2.1. Base de funcionamiento.....	29
2.2. Metodología de medida en el exterior de la fachada .....	30
2.3. Metodología de medida en el interior de la fachada.....	32
2.3.1. Medida de nivel en el interior.....	32
2.3.2. Medida del tiempo de reverberación .....	35
2.3.3. Estimación del ruido de fondo. ....	36
2.3.4. Verificación de la calibración del micrófono.....	37
2.4. Modelo temporal y funcionamiento de las condiciones ambientales.....	38
3. Estructura del programa .....	41
3.1. LabVIEW .....	41
3.2. Estructura del programa .....	42
3.2.1. Flujo de programa .....	42
3.2.2. Manejo de datos .....	43
3.3. Interfaz gráfica .....	46
3.3.1. Colocación de los puntos de medida así como de la fuente y ajuste de su nivel de emisión	47
3.3.2. Exportación de las medidas.....	48



## Índice de contenidos

3.3.3.	Representación gráfica de las medidas realizadas .....	49
3.3.4.	Representar en un plano esquemático los puntos de medida.....	50
4.	Resultados .....	51
4.1.	Nivel de presión sonora $L_1$ .....	51
4.2.	Nivel de presión sonora $L_2$ .....	53
4.3.	Tiempo de reverberación .....	54
4.4.	Ruido de fondo .....	55
4.5.	Diferencia de niveles estandarizada .....	56
5.	Prueba del Laboratorio Virtual .....	59
5.1.	Altavoz .....	59
5.2.	Nivel de presión sonora $L_1$ .....	60
5.3.	Ruido de fondo .....	62
5.4.	Tiempo de reverberación .....	63
5.5.	Nivel de presión sonora $L_2$ .....	64
5.6.	Aislamiento de la fachada .....	66
6.	Conclusiones y futuro .....	69
6.1.	Conclusiones.....	69
6.2.	Trabajos en el futuro .....	70
	Referencias .....	71
	ANEXO A: Esquema de relaciones entre VIs.....	73
	ANEXO B: Definiciones.....	75
	ANEXO C: Manual de instalación y uso.....	77
	ANEXO D: Estructura de datos detallada.....	83



## Índice de figuras

Figura 1. Geometría de colocación del altavoz en el método global .....	17
Figura 2. Esquema de la simulación de Montecarlo. ....	25
Figura 3. Gráfica explicativa de la elección del intervalo de cobertura. ....	26
Figura 4. Esquema del método tradicional de evaluación de incertidumbre .....	26
Figura 5. Diagrama de bloques con uno de los posibles procedimientos llevados a cabo en el ensayo de aislamiento acústico de fachadas .....	29
Figura 6. Diagrama de bloques del aleatorizador utilizado en el modelo.....	30
Figura 7. Diagrama de bloques del cálculo de nivel de presión sonora en el exterior de la fachada .....	30
Figura 8. Cálculo del 99% de confianza de una distribución normal.....	31
Figura 9. a- Gráfica de caída de presión sonora que representa la planta superior del recinto b-c-d- Gráficas de caída de presión debida a la atenuación del recinto receptor en el ensayo de aislamiento...34	
Figura 10. Diagrama de bloques para calcular el nivel de presión sonora en el recinto. ....	34
Figura 11. Representación gráfica de las constantes del tiempo de reverberación utilizadas en el programa.....	35
Figura 12. Esquema del cálculo del tiempo de reverberación en el Laboratorio Virtual.....	35
Figura 13. Diagrama de bloques para la generación de muestras de ruido de fondo. ....	37
Figura 14. Proceso de verificación del micrófono en el Laboratorio Virtual.....	38
Figura 15. Diagrama de bloques sobre el uso del tiempo transcurrido para la elección de constantes medioambientales.....	39
Figura 16. Logo del entorno de programación gráfica LabVIEW.....	41
Figura 17. Relación de algunos objetos gráficos con su visualización en el Diagrama de Bloques .....	41
Figura 18. Visión gráfica de las estructuras de programación gráficas utilizadas en LabVIEW .....	42
Figura 19. Estructura Productor-Consumidor basada en eventos utilizada en el programa.....	43
Figura 20. Esquema del cluster utilizado en el programa, indicando el tipo de dato de cada elemento..	44
Figura 21. Capturas de la sección superior de la interfaz gráfica utilizada en el programa .....	46
Figura 22. Capturas de la sección inferior de la interfaz gráfica utilizada en el programa .....	47
Figura 23. Esquema sobre cómo añade puntos de medida el Laboratorio Virtual.....	48
Figura 24. Algoritmo utilizado para mostrar las gráficas en el Laboratorio.....	49
Figura 25. Plano esquemático del recinto del cual se va a calcular el aislamiento.....	50
Figura 26. Distribución estadística obtenida tras el método de Montecarlo para una única posición de micrófono .....	51
Figura 27. Densidad de probabilidad de los valores del MCM.....	52
Figura 28. Esquema explicativo sobre la coincidencia de valores entre el cálculo analítico y el cálculo MCM.....	53
Figura 29. Ventanas de resultado del script RFintento.m.....	55
Figura 30. Mapa de los recintos de posición con las posiciones de los puntos elegidas. ....	59
Figura 31. Esquema trigonométrico para el cálculo del posicionamiento del altavoz y captura de la pestaña configuración del altavoz del programa.....	59
Figura 32. Gráfico relacionando los valores máximos y mínimos del intervalo del aislamiento obtenido con las constantes de aislamiento elegidas para realizar los cálculos dentro del programa. ....	67
Figura 33. Estructura de carpetas donde se encuentran las distintas opciones del programa .....	77



## Índice de figuras

Figura 34. Ventana de instalación del software que permite seleccionar el lugar del disco duro donde va a realizar la instalación. ....	78
Figura 35. Para realizar la instalación debe aceptar los términos de licencia de National Instruments...	78
Figura 36. Pantalla principal del Laboratorio Virtual IsolationTrialsLab.....	79
Figura 37. Sección superior, pestaña Plano, que muestra el plano del recinto donde se realiza el ensayo.....	79
Figura 38. Sección superior. Pestaña Gráficas, donde se visualiza las medidas realizadas durante el ensayo.....	80
Figura 39. Opciones de exportación del Laboratorio Virtual.....	80
Figura 40. Tabla utilizada para mostrar los resultados de las medidas del Laboratorio. ....	80
Figura 41. Ventana emergente utilizada para medir en un punto elegido por el usuario. ....	81
Figura 42. Sección inferior. Pestaña Configuración, permite calibrar el micrófono y configurar el altavoz.....	81



## Índice de tablas

Tabla 1. Constantes utilizadas en el aislamiento de la fachada del programa, así como las constantes del altavoz con su variabilidad .....	32
Tabla 2. Constantes y desviación típica del tiempo de reverberación extraídas de las investigaciones de Pedrero y Díaz. ....	36
Tabla 3. Constantes utilizadas como condiciones ambientales tanto en el exterior como en el interior..	39
Tabla 4. VIs secundarios utilizados en el programa del Laboratorio Virtual.....	44
Tabla 5. Estructura de datos con las que se extraen las mediciones del Laboratorio Virtual. ....	48
Tabla 6. Valores estimados del mensurando y evaluación de la incertidumbre obtenidos tras la implementación del MCM y el cálculo analítico en las medidas de L1 .....	52
Tabla 7. Valores estimados del mensurando y evaluación de la incertidumbre obtenidos tras la implementación del MCM y el cálculo analítico en las medidas de L2.....	54
Tabla 8. Valores del tiempo de reverberación obtenidos tras la simulación de Montecarlo.....	55
Tabla 9.. Resultados obtenidos de la diferencia de niveles estandarizada y de su incertidumbre a partir de las muestras del programa.....	56
Tabla 10. Tabla comparativa de las constantes de aislamiento con los intervalos de confianza de la diferencia de niveles estandarizada.....	57
Tabla 11. Muestras de L1 obtenidas en el Laboratorio Virtual y su valor medio.....	60
Tabla 12. Desviación típica de las muestras obtenidas en la medición y su incertidumbre tipo A asociada para la medición de L1. ....	60
Tabla 13. Cálculo de la incertidumbre tipo B .....	61
Tabla 14. Incertidumbre combinada por banda de frecuencia para la medida de L1. ....	61
Tabla 15. Medidas de ruido de fondo obtenidas en el ensayo. ....	62
Tabla 16. Muestras de TR obtenidas en el Laboratorio Virtual y su valor medio .....	63
Tabla 17. Cálculo de la incertidumbre combinada y expandida de las muestras del TR. ....	64
Tabla 18. Muestras de L2 obtenidas en el Laboratorio Virtual .....	65
Tabla 19. Muestras de L2 tras su corrección de ruido de fondo y el valor medio de todas ellas. ....	65
Tabla 20. Desviación de las muestras de L2 y cálculo de su incertidumbre tipo A.....	66
Tabla 21. Cálculo de la incertidumbre tipo B asociada a L2.....	66
Tabla 22. Incertidumbre combinada por banda de frecuencia para la medida de L2. ....	66
Tabla 23. Diferencia de niveles estandarizada, incertidumbre combinada y expandida del ensayo realizado.....	67
Tabla 24. Comparación de los límites del ensayo realizado con la constante de aislamiento utilizada en el Laboratorio Virtual para los cálculos matemáticos.....	68



## Índice de figuras



## Lista de acrónimos

JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
UNE	<i>Una Norma Española</i>
CTE	<i>Código Técnico de la Edificación</i>
ILAC	<i>International Laboratory Accreditation Cooperation</i>
ENAC	<i>Entidad Nacional de Acreditación</i>
GUM	<i>Guide of Uncertainty Measurement</i>
VIM	<i>International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology</i>
NI	<i>National Instruments</i>
VI	<i>Virtual Instruments</i>
JASA	<i>The Journal of the Acoustical Society of America</i>
AENOR	<i>Asociación Española de Normalización y Certificación</i>
ENAC	<i>Entidad Nacional de Acreditación</i>
MCM	<i>Monte Carlo Method</i>



## Lista de acrónimos





## 1. Introducción

Esta memoria describe el trabajo realizado en el Proyecto Fin de Grado del Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen, en el que se ha desarrollado un Laboratorio Virtual que permite la simulación de ensayos acústicos de aislamiento de fachadas según la norma UNE-EN ISO 140-5 [1]. Las actividades realizadas en el proyecto se enmarcan dentro de las líneas de investigación del *Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada* (I2A2), grupo de investigación adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial y reconocido por la Universidad Politécnica de Madrid.

### 1.1. Marco Tecnológico

La contaminación acústica es reconocida por la Organización Mundial de la Salud como uno de los mayores problemas que afecta la calidad de vida de las personas en zonas urbanas [2]. Este tipo de contaminación, provocada mayoritariamente por los medios de transporte y las actividades industriales y recreativas, ocasiona trastornos en los ciclos del sueño así como un aumento del estrés en las personas que puede desencadenar otros problemas de salud [3], [4], [5], [6], [7]. Por esa razón se han aprobado disposiciones legislativas a nivel comunitario para evaluar, regular y controlar el ruido ambiental llevando a cabo diferentes actividades como planificaciones acústicas como la Directiva 2002/49/CE [8] en las que se contempla la reducción del ruido mediante aislamiento acústico. Por ejemplo, en España se establecen unas exigencias mínimas en la construcción de edificios en el Código Técnico de la Edificación (CTE) [9], especificando también las condiciones acústicas, como el aislamiento, que éstas tienen que cumplir para poder ser consideradas habitables.

Se entiende como aislamiento a “la capacidad de una estructura o material para impedir que el sonido se transmita por él” [10]. Existe un tipo de ensayo para cuantificar la capacidad aislante de los diferentes materiales. Los ensayos de aislamiento son generalmente llevados a cabo por laboratorio especializados en la realización de ensayos acústicos. Pero, de alguna manera, es necesario garantizar la calidad de los ensayos efectuados, sobre todo, si se tiene en consideración que existen aspectos legales que haya que tener en cuenta. Para evitar que los ensayos de aislamiento puedan ser llevados a cabo por personal no cualificado con el instrumental necesario, sin que el cliente tenga la certeza de que los resultados sean correctos, la *International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)* [11] recomienda la acreditación por ser una manera de certificar la competencia técnica de los laboratorios en la realización de distintos tipos de ensayos. Existen diferentes organizaciones que se encargan de la acreditación en cada país, en España la encargada de esta función es la Entidad Nacional de Acreditación [12]. Existen diferentes requisitos para la obtención de la acreditación de un laboratorio, uno de ellos es la participación activa en ejercicios de intercomparación, tal y como marca la normativa internacional ISO/IEC 17025 [13], que persigue el aseguramiento de la calidad de los métodos y los ensayos realizados.

Los ejercicios de intercomparación, definidos por la ISO/IEC 17043 como la “*evaluación mediante mediciones o ensayos sobre el mismo ítem o ítems similares por dos o más laboratorios de acuerdo con condiciones predeterminadas*” [14] son una práctica común entre los laboratorios que permiten evaluar sus procedimientos de análisis para tomar medidas correctoras en el caso de que fueran necesarias. Además, mediante estos ejercicios los laboratorios pueden comparar su metodología con otros y



comprobar las diferencias existentes entre los procedimientos analíticos utilizados y así mejorar la calidad de sus técnicas.

El inconveniente existente en la realización de dichos ejercicios es el alto coste económico que acarrea la ejecución y participación en estos ensayos de manera presencial ya que generan muchos costes directos debidos al transporte del personal, costes de las dietas de los técnicos, así como gastos indirectos ya que esos técnicos no podrán realizar tareas que reporten beneficios económicos al laboratorio. Además la existencia de ensayos destructivos condiciona la precisión de estas prácticas, ocurriendo esto, por ejemplo, en ensayos de ruido ambiental en los que no existe repetibilidad por la naturaleza de las fuentes.

Como respuesta a esta problemática en [15] se introduce el concepto de **e-comparison** como el desarrollo de una intercomparación realizada de forma no presencial en la que el técnico no tiene que tomar medidas de campo. Hasta ahora ese nuevo tipo de práctica sólo había sido utilizada en medidas de ruido producida por aeronaves, mediante registros ya predefinidos e idénticos para todos los laboratorios realizados previamente por el organizador de la intercomparación, de este modo presentándose varios registros con distintas situaciones de ruido de fondo los participantes deben dar sus resultados de acuerdo la norma ISO 20906, para que el organizador obtenga conclusiones del ejercicio. Este tipo de técnica ha permitido realizar ejercicios de intercomparación a nivel internacional a un coste mucho menor que utilizando a técnicos para tomar las distintas medidas *in situ*.

### 1.2. Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo principal el desarrollo de una herramienta software en forma de Laboratorio Virtual, que permita la simulación de ensayos acústicos de aislamiento de fachadas según la norma UNE-EN ISO 140-5 y que permita ampliar el concepto de e-comparisons, así como su uso en este tipo de ensayos. En el programa se reproducirán las condiciones reales de los ensayos y se obtendrán mediciones similares a las que los técnicos registrarían durante el desarrollo de un ensayo *insitu*.

También se establece como objetivo la validación del Laboratorio Virtual mediante la utilización del método de Monte Carlo [16] y su comparación con la incertidumbre analítica calculada según los métodos tradicionales indicados en la *Guide of Uncertainty Measurement (GUM)* [17]

Por último también se realizará un ensayo simulado con el programa y se procederá al cálculo de incertidumbres de medida para verificar otra vez más el correcto funcionamiento de éste.

### 1.3. Estructura de la memoria

A continuación se describen brevemente los contenidos de cada uno de los capítulos que componen la memoria del proyecto.

En el capítulo 1, **Introducción**, se expone el contexto de desarrollo del proyecto, así como los principales objetivos a conseguir, además se presenta un resumen sobre la normativa UNE-EN ISO 145-5 y sobre la propagación de incertidumbres en los que se sostiene el Laboratorio Virtual.

En el capítulo 2, **Metodología**, se explica teóricamente la metodología de cálculo utilizada en el Laboratorio Virtual para realizar las medidas en el exterior de la fachada, así como en el interior del recinto, utilizando explicaciones matemáticas y diagramas de bloques.



En el capítulo 3, **Estructura del programa**, se aborda el motivo de utilizar un lenguaje de programación gráfico, así como el tipo de programación y las estructuras utilizadas en el programa. Además, también se mostrará la interfaz de usuario diseñada para que el uso del programa sea lo más natural posible.

En el capítulo 5, **Resultados**, se describe el procedimiento para la realización de una verificación matemática del programa, comparando resultados teóricos con los resultados obtenidos por el programa a partir de un gran número de muestras.

En el capítulo 6, **Prueba del programa**, se realiza un ensayo utilizando el programa realizado, calculando el valor del aislamiento de fachadas así como evaluando la incertidumbre de las distintas medidas realizadas.

En el capítulo 7, **Conclusiones**, se explica que conclusiones se sacan del trabajo realizado, así como posibles líneas futuras de trabajo, ya sea mejorando el programa o realizando proyectos similares.

#### 1.4. Normativa UNE-EN ISO 140-5

La norma UNE-EN ISO 140-5, *Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 5: Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y fachadas*, especifica dos métodos distintos para la medición del aislamiento a ruido aéreo, uno para elementos de fachada como por ejemplo una ventana, y otro denominado método global utilizado para medir el aislamiento acústico de la fachada completa, siendo este el último el que se utilizará en el proyecto.

El método global se utiliza para cuantificar la diferencia de nivel de presión sonora existente entre el exterior y el interior de la fachada. Este método puede ponerse en práctica utilizando como fuente el ruido aéreo del exterior, ya sea de tráfico, trenes o aeronaves o, tal y como se contempla en el Laboratorio Virtual, con un altavoz.

El resultado del método global es el índice de reducción sonora de una fachada, en relación a una posición de 2 metros frente a ésta. La ventaja de utilizar altavoces radica en la naturaleza no destructiva de la fuente ya que se pueden repetir ensayos con una variabilidad menor que con la fuente de ruido de tráfico, proporcionado por lo tanto un control de la fuente emisora de ruido y asegurando la repetibilidad del ensayo.

##### 1.4.1. Definiciones

La norma UNE-EN ISO 140-5 define los siguientes parámetros que serán utilizados a lo largo de este informe:

- **Nivel medio de presión sonora en una superficie,  $L_1$ :** *Es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la media, temporal y espacial, de los cuadrados de las presiones en la superficie y el cuadrado de la presión de referencia. La media espacial debe comprender la totalidad de la superficie en ensayo, incluyendo los efectos de reflexiones de la muestra y fachada.*
- **Nivel medio de presión sonora en una habitación o local,  $L_2$ :** *Es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la media, temporal y espacial, de los cuadrados de las presiones en la superficie y el cuadrado de la presión de referencia.*



$$L_2 = 10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10}\right) \quad (1)$$

- **Diferencia de niveles,  $D_{2m}$ :** Es la diferencia de niveles, en decibelios, entre el nivel de presión sonora exterior a 2m frente a la fachada y el valor medio espacio-temporal del nivel de presión sonora en el interior del local de recepción:

$$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2 \quad (2)$$

Donde:

$L_{1,2m}$  Es el nivel de presión acústica medio en el recinto emisor, a dos metros de la fachada.

$L_2$  Es el nivel de presión acústica medio en el recinto receptor.

- **Diferencia de niveles estandarizada,  $D_{2m,nT}$ :** Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un valor de referencia del tiempo de reverberación en el local de recepción:

$$D_{2m,nT} = D_{2m} + 10 * \log\left(\frac{T}{T_0}\right) dB \quad (3)$$

Donde  $T_0 = 0.5$  s

#### 1.4.2. Requisitos para la medición

La norma contempla las siguientes condiciones y parámetros para la realización de ensayos acústicos de aislamiento:

- **Generación del campo sonoro:** Es necesario generar un campo sonoro uniforme en el rango de frecuencias considerado en el cálculo del aislamiento. Como mínimo el ancho de banda del ruido tiene que abarcar los tercios de octava desde 100 Hz hasta 3150 Hz, aunque se recomienda desde 50 Hz hasta 5000 Hz. Además la directividad del altavoz tiene que asegurar que las diferencias de nivel de presión sonora en la superficie de la fachada sean menores de 5dB.  
Por otra parte, en las bandas de frecuencia relevantes, el nivel de potencia sonora generado por la fuente de ruido debe ser lo suficientemente alto para que el nivel de presión sonora en el interior de la fachada sea 6dB mayor que el ruido de fondo.
- **Posición del altavoz:** La posición del altavoz elegida debe situarse a una distancia  $d$  de la fachada de forma que el nivel de presión sonora sobre ésta sea lo más uniforme posible. Esto se conseguirá colocando la fuente sonora en el suelo o tan alto como sea posible.  
Además en el método global, la distancia entre la fuente y el centro de la fachada, distancia  $r$ , ha de ser como mínimo de 7 metros manteniendo una distancia mínima en el plano horizontal de 5 metros. Tal y como se puede ver en la figura 1, basada en la que aparece en la normativa.

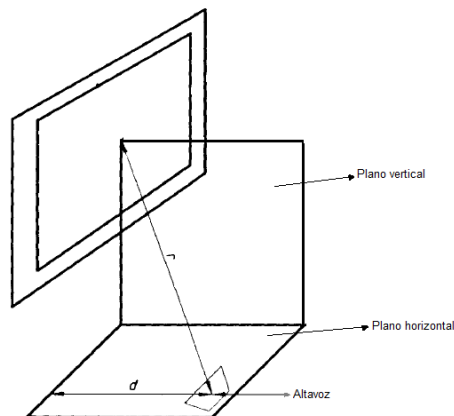


Figura 1. Geometría de colocación del altavoz en el método global

- **Posiciones de micrófono:** En el interior del recinto se tienen que realizar como mínimo medidas en cinco posiciones de micrófono diferentes, efectuando dos repeticiones en cada punto. Los puntos deben colocarse distribuidamente alrededor de todo el recinto para así poder calcular el nivel de presión sonora medio en cada lado de la fachada. Además se deben cumplir los siguientes requisitos entre cada una de las posiciones de micrófono:
  - 0.7 metros entre posiciones de micrófonos.
  - 0.5 metros entre la posición del micrófono y una superficie límite.
  - 1.0 metros entre la posición del micrófono y la fuente de ruido.

Por otra parte es importante mencionar que en las medidas en la zona exterior del recinto el micrófono se colocará a  $(2.0 \pm 0.2)$  m desde el plano de la fachada y a una altura de 1.5 m, realizando tres repeticiones en esa posición.

- **Correcciones por ruido de fondo:** Es necesario medir el ruido de fondo para comprobar que en la medida del local de recepción no afectan ruidos ajenos a la fuente. Dependiendo de la diferencia de niveles entre el ruido de fondo y el nivel  $L_2$  se realizará una corrección u otra. De este modo si la diferencia es mayor de 10 dB no se realiza ningún tipo de corrección, puesto que se considera que el ruido de fondo no afecta a la medida, si esta diferencia está entre 6dB y 10 dB se corregiría siguiendo la ecuación 4 y si la diferencia es menor de 6 dB se calcularía la corrección con la ecuación 5, aunque en este caso habría que informar al receptor del informe que el valor indicado es el límite de la medición.

$$L = 10 * \log \left( 10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

$$L = L_{sb} + 1.3 \text{ dB} \quad (5)$$

Donde:

- L es el nivel corregido de la señal
- $L_{sb}$  es el nivel  $L_2$  medido.
- $L_b$  es el nivel del ruido de fondo medido.



- **Tiempo de reverberación:** El tiempo de reverberación de la sala de recepción se medirá a partir de lo establecido en la Norma ISO 354. Utilizando para ello la gráfica de caída de niveles a lo largo del tiempo.

Esta norma específica que para medir el tiempo de reverberación es necesario realizar medidas en tres puntos del recinto, cumpliendo las restricciones de separación de micrófonos de la norma ISO 145-5 que han sido determinadas anteriormente, efectuando dos repeticiones en cada punto.

## 1.5. Evaluación de incertidumbre

La Real Academia Española define incertidumbre como “*Falta de conocimiento seguro y claro de algo*” [18]. Por lo tanto en términos metrológicos la “incertidumbre de medida” se puede considerar como la falta de seguridad en la validez del resultado de una medición.

La *International Vocabulary Of Basic And General Terms in Metrology (VIM)* [19] define incertidumbre de medida como:

*“El parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando”.*

Para entender la anterior definición es importante conocer el significado del término *mensurando*. El **mensurando** es una magnitud particular sometida a medición. Por lo tanto la incertidumbre es el intervalo de valores que junto con el valor medido del mensurando dan una información certera sobre la medida. Esto quiere decir, que cuando obtenemos el resultado de una medición, solo obtenemos una estimación del valor del mensurando, y el resultado sólo será completo cuando esté acompañado de la incertidumbre.

El análisis de incertidumbre surge por la existencia de errores en los resultados de la medida y por el creciente interés en los laboratorios de aumentar sus procesos de calidad.

Estos errores están constituidos por dos componentes, una componente aleatoria y una componente sistemática:

- El **error aleatorio** procede de las magnitudes temporales y espaciales que afectan a la medida, como por ejemplo las condiciones ambientales, que provocan que varíe aleatoriamente el mensurando tras la repetición de las medidas. Este error es imposible de compensar, aunque se puede disminuir su efecto incrementando el número de observaciones.
- El **error sistemático** tampoco puede ser eliminado, pero si reducido. Ya que una vez que ha sido cuantificado puede aplicarse una corrección para que la esperanza matemática del efecto sistemático sea cero.

Además, en la práctica existen numerosas causas de incertidumbre, relacionadas con los errores anteriormente mencionados, entre ellas están:

- Definición incompleta del mensurando.
- Lectura sesgada de instrumentos analógicos.
- Resolución finita del instrumento de medida.



- Variaciones en las observaciones repetidas del mensurando, en condiciones aparentemente idénticas.

La *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (Guide Uncertainty Measurement, GUM)* [17], desarrolla dos métodos para el cálculo de incertidumbres, el método clásico de determinación de incertidumbres y el método Monte Carlo.

### 1.5.1. Método clásico de determinación de incertidumbres

En la mayoría de las situaciones, el mesurando no se mide de una forma inmediata, si no que se determina a partir de otro número de magnitudes por medio de una relación como la de la ecuación 6.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (6)$$

Las magnitudes  $X_1, X_2, \dots, X_n$  pueden ser tanto como otros mensurandos dependientes de otras magnitudes, magnitudes conocidas y determinadas matemáticamente o medidas de las cuales no se conoce su valor real y por tanto se tratarán como variables aleatorias, siendo estas últimas el caso más común.

Las ventajas de tomar estas magnitudes como variables aleatorias es que éstas se asocian a una distribución de probabilidad, de forma que pueden tomar un valor aleatorio entre un intervalo de valores.

La estimación del mesurando  $Y$ , se puede obtener utilizando la ecuación 6 con variables de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , siendo éstas las estimaciones de las magnitudes de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , tal y como se muestra en la expresión 7. Además la estimación del mesurando  $y$ , se podría calcular a partir de la media aritmética de  $i$  cálculos independientes de  $Y$ , como se ve en la ecuación 8.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7)$$

$$y = \bar{Y} = \frac{1}{i} \sum_{n=1}^i Y_n \quad (8)$$

La desviación típica asociada a la estimación de salida “ $y$ ” será la **incertidumbre típica combinada**, que se determina a partir de las desviaciones típicas de cada una de las variables de entrada, llamadas **incertidumbres típicas**.

$$u_c^2 = u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2 \quad (9)$$

Dependiendo de la naturaleza de las magnitudes de entrada existirán dos tipos de evaluaciones, la evaluación tipo A y la evaluación tipo B.

#### *Evaluación tipo A.*

Este tipo de evaluación es utilizada cuando se realiza un número de observaciones independientes entre sí bajo las mismas condiciones de medida para una de las magnitudes de entrada  $X_i$ .



Suponiendo que esa magnitud de entrada  $X_i$  estimada a partir de  $n$  observaciones repetidas e independientes es la magnitud  $Q^1$ . El valor estimado de la magnitud “ $q$ ” será el promedio de los valores medidos en cada una de las observaciones, definido en la ecuación 10.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (10)$$

La incertidumbre de medida asociada al valor estimado  $q$  se pueden evaluar por uno de los siguientes métodos:

- A partir de la **desviación típica experimental**, calculada a partir de la expresión 11:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (11)$$

Donde la mejor estimación de la varianza de la media aritmética  $q$  es la varianza experimental de la media aritmética que viene dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (12)$$

La incertidumbre típica asociada a la entrada  $q$  es la desviación típica experimental de la media.

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (13)$$

Cuando el número de repeticiones es pequeño ( $n < 10$ ) la incertidumbre calculada con este método suele no ser fiable. Por lo que en esos casos es recomendable el segundo método.

- Cuando estamos ante una medición bien diseñada y bajo control estadístico, puede existir una estimación de la varianza debida a un conjunto previo de resultados. Estando en ese caso, el valor de la estimación de la magnitud de entrada  $Q$ , también se calcularía mediante la media aritmética de un número pequeño de observaciones, y la varianza de la media aritmética podrá calcularse utilizando la expresión 14, y posteriormente se calcularía la incertidumbre, definida en la ecuación 13.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{n} \quad (14)$$

### Evaluación tipo B.

Para obtener la estimación de la incertidumbre de una magnitud de entrada  $X_i$  no obtenida a partir de observaciones repetidas, la incertidumbre típica asociada se establece mediante un estudio científico basado en la posible variabilidad de dicha magnitud. El conjunto de la información sobre esas magnitudes puede comprender:

- Resultados de mediciones anteriores.

---

<sup>1</sup> Las magnitudes se expresan con letras mayúsculas mientras que las estimaciones estadísticas de una magnitud en letras minúsculas.





- Experiencia o conocimientos sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos utilizados.
- Especificaciones del fabricante.
- Datos suministrados por certificados de calibración.
- Incertidumbres asignadas a valores de referencia procedentes de libros y manuales.

Cuando no existe un conocimiento o experiencia sobre el comportamiento de la magnitud de entrada  $X_i$  y solo se conocen los límites de variabilidad de dicha magnitud, la distribución que se ha de utilizar preferiblemente es la rectangular, ya que en esta distribución todos los valores entre los límites establecidos pueden suceder con la misma probabilidad [20]. En cambio, si además del intervalo se conoce la existencia de una zona de valores que es más probable que ocurran se ha de utilizar una distribución normal [21]. En ambos casos, la incertidumbre típica será calculada a partir del valor de la desviación típica de la función de distribución que se ha elegido para modelizar los resultados de las observaciones de la magnitud de entrada.

#### Cálculo de la incertidumbre típica combinada

En este sub-apartado se va a tratar el cálculo de la incertidumbre típica combinada cuando cada una de las magnitudes de entrada son independientes entre sí.

La incertidumbre típica combinada es la incertidumbre típica correspondiente a la estimación del mensurando  $Y$ , denotado como se ha visto anteriormente por  $y$ . Esta incertidumbre se corresponderá a la composición de las incertidumbres típicas calculadas de cada una de las estimaciones de las magnitudes de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . La incertidumbre típica combinada se calculará como en la expresión 15, donde cada valor de  $u_j(y)$  corresponde a la contribución a la incertidumbre típica combinada de cada una de las estimaciones de las magnitudes de entrada  $X_i$ .

$$u_c = \sqrt{\sum_{j=1}^N u_j^2(y)} \quad (15)$$

En la ecuación anterior la magnitud  $u_j(y)$  se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$u_j^2(y) = c_j^2 * u^2(y) \quad (16)$$

En la que el valor de  $u^2(y)$  se ha calculado mediante uno de los métodos de evaluación de incertidumbre vistos anteriormente y  $c_j^2$  se corresponde con el coeficiente de sensibilidad asociada a la estimación de una magnitud de entrada  $X_i$ .

El coeficiente de sensibilidad describe como varía la estimación de salida  $y$ , en función de las variaciones en los valores de las estimaciones de las magnitudes de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Estos coeficientes pueden ser calculados utilizando la ecuación 17 o utilizando métodos empíricos, midiendo la variación de  $Y$  producida por una variación de una magnitud de entrada  $X$  dada, y manteniendo constantes las demás.



$$c_j = \frac{\partial f}{\partial x_j} = \frac{\partial f}{\partial X_j} \Big|_{x_1, x_2, \dots, x_N} \quad (17)$$

En el caso de que las magnitudes de entrada no fueran independientes entre sí el método explicado no tendría validez, y se tendría que calcular mediante otros métodos que no se tratarán en este documento.

### Cálculo de la incertidumbre expandida

Aunque la incertidumbre combinada puede ser utilizada universalmente para expresar la incertidumbre de un resultado de medida, en ciertas aplicaciones, como por ejemplo en acústica, es necesario dar una medida de la incertidumbre que defina alrededor del resultado de medida un intervalo de confianza en el que se puedan encontrar la gran mayoría de los posibles valores de fluctuación del mensurando [22].

Esta expresión de la incertidumbre es llamada *incertidumbre expandida*, está representada por la letra  $U$  y se calcula multiplicando la incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  por un factor de cobertura  $k$ :

$$U = k * u_c(y) \quad (18)$$

El factor de cobertura generalmente corresponde a un intervalo con un nivel de confianza determinado (generalmente del 95%) según una **distribución *t* de Student**, en la que se obtiene el valor de  $k$  a partir de los *grados efectivos de libertad* calculados a partir de la expresión 19 de *Weich-Satterthwaite*, de forma que a mayor grados de libertad la estimación de la incertidumbre será más fiable, por acercarse en mayor medida al nivel de confianza requerido.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (19)$$

Debe considerarse de que el hecho de multiplicar el valor de la incertidumbre combinada por una constante no añade información nueva a la incertidumbre, sino que sólo cambia la forma de presentar la información disponible. Aunque también tiene que tenerse en cuenta que en muchos de los casos la información relativa al nivel de confianza será impreciso, ya que el conocimiento sobre la distribución estadística de la incertidumbre combinada es limitado.

Al final el resultado de la incertidumbre deberá expresarse con la forma  $Y = y \pm U$  o en forma de intervalo como  $[y-U, y+U]$ , en ambos casos con un nivel de confianza del 95%.

### 1.5.2. Ley de propagación de las distribuciones. Método de Montecarlo

El concepto de propagación de distribuciones de probabilidad a través de un modelo de medición como base para la evaluación de la incertidumbre, y su implementación práctica mediante una simulación de Montecarlo es tratado en el suplemento 1 de la GUM [23]

Este suplemento proporciona una aproximación numérica, basada en los principios de la GUM, para el cálculo de las incertidumbres de medida. Esta aproximación se aplica a un modelo que tiene un número de magnitudes de entrada y una única magnitud de salida. La función de densidad de la probabilidad para la magnitud de salida permitirá tanto la obtención de la estimación de la magnitud de salida, como la



incertidumbre típica asociada a esa estimación y un intervalo de cobertura para dicha magnitud, a la que le corresponderá también una probabilidad de cobertura.

La ley de propagación de las distribuciones es una generalización de la ley de propagación de las incertidumbres explicada en la GUM. En esta ley se trabaja con información más correcta que la obtenida solamente por las mejores estimaciones e incertidumbres típicas asociadas.

### Aplicación

Este método proporciona una solución para evaluar la incertidumbre de medida en situaciones en las que la ley de propagación de las incertidumbres no puede utilizarse, o en la que debido a la complejidad del modelo no sea recomendable utilizarlo.

En este modelo la función de densidad de probabilidad de la magnitud de salida dependerá de la aproximación de las funciones de densidad de probabilidad para las magnitudes de entrada, por esa razón este método se le llama *Método de propagación de incertidumbres*.

Una vez que se ha obtenido la función de densidad de probabilidad para la magnitud de salida, su media se tomará como la estimación de la magnitud de salida, su desviación típica como su incertidumbre típica asociada, y tomando un intervalo de cobertura del 95% se obtendrá el valor de la incertidumbre expandida. Es destacable mencionar que debido a que la densidad de probabilidad de la magnitud de salida no tiene por qué ser simétrica el valor del intervalo de cobertura no tiene por qué estar centrado en el valor de la estimación de la magnitud de salida.

Existen una serie de casos típicos en los que se puede aplicar este método:

- Aquellos en los que las contribuciones a la incertidumbre asociadas a la estimación de la magnitud de salida no son comparables en magnitud.
- Aquellos en los que es difícil el cálculo de las derivadas parciales del modelo, según se propone en la ley de la propagación de la incertidumbre.
- Aquellos en la que función de densidad de probabilidad para la magnitud de salida no es Gaussiana.
- Aquellos en los que aparecen distribuciones asimétricas de las magnitudes de las magnitudes de entrada.
- Aquellos en los que los modelos aleatorios son complicados en cálculo.

También se puede utilizar para validar el funcionamiento del método expuesto en la GUM, ya que el suplemento proporciona un procedimiento de validación entre los dos métodos.

A continuación se muestran los principios básicos para la determinación de una estimación de la magnitud de salida, de la incertidumbre típica asociada, y de un intervalo de cobertura para dicha magnitud de salida:

- Definir la magnitud de salida, es decir la magnitud que va a ser determinada.
- Establecer las magnitudes de entrada de las que dependerá la magnitud de salida.
- Desarrollar un modelo que relaciones las magnitudes de entrada con la de salida,
- Utilizando el conocimiento disponible sobre las magnitudes de entrada, asignar una función de distribución de probabilidad a cada una de dichas magnitudes.



- Propagar las funciones de distribución de probabilidad de cada una de las magnitudes de entrada por el modelo para obtener la función de distribución de probabilidad de la magnitud de salida.
- Utilizar la función de densidad de probabilidad de la magnitud de salida para obtener:
  1. La media, utilizada como la estimación de la magnitud de salida.
  2. La desviación típica, utilizada como la incertidumbre típica asociada a la estimación de la magnitud de salida.
  3. Un intervalo que contenga el valor estimado de la magnitud de salida con una probabilidad especificada (la *probabilidad de cobertura*).

### *Implementación de la propagación de distribuciones*

La propagación de distribuciones puede ser implementada utilizando distintos métodos:

- **Métodos analíticos**, que corresponderían a una forma ideal, ya que no introducen ninguna aproximación y solo son aplicables en casos simples.
- Propagación de incertidumbre basada en el remplazo de un modelo por la aproximación a las series de Taylor de primer orden. Tal y como se hace en la Ley de propagación de incertidumbre.
- Como el anterior, pero teniendo en cuenta los órdenes mayores que el primero para aproximaciones a series de Taylor.
- Métodos numéricos que implementan la propagación de distribuciones, como las **simulaciones de Montecarlo**.

El método expuesto basado en la propagación de distribuciones es general y se puede utilizar en todos los casos, ya que la aproximación con la ley de propagación de incertidumbre sólo se producen resultados consistentes cuando se utilizan modelos lineales y magnitudes de entrada con funciones de distribución normales.

### *Cálculo mediante la simulación de Montecarlo.*

En el método de Montecarlo se presenta una aproximación numérica de la función de distribución para el valor de la magnitud de salida  $Y=f(X)$ .

Este método está basado en la generación de una función de distribución de probabilidad siguiendo los siguientes pasos:

- Generar una muestra de tamaño  $N$  con un muestreo aleatorio de la función de densidad de probabilidad para  $X_i, i=1, \dots, N$ . Repetir ese procedimiento  $M$  veces, para obtener  $M$  muestras independientes de tamaño  $N$  del sistema de magnitudes de entrada. Para cada muestra independiente de tamaño  $N$  calcular el resultado de  $M$  mediante el modelo, obteniendo  $M$  valores de  $Y$ .
- Utilizar esos  $M$  valores de  $Y$  para obtener una aproximación de la función de distribución de  $Y$ .
- De esa distribución se obtiene la estimación y para el valor de la magnitud de salida, la desviación típica, y dos valores que caracterizan los límites del intervalo de cobertura.

Por lo tanto, los datos de entrada para la realización del método son:

- La función del modelo matemático,  $Y=f(X)$ .



- Las funciones de densidad de probabilidad de las magnitudes de entrada,  $X$ .
- La probabilidad de cobertura necesaria.
- El número  $M$  de ensayos de Montecarlo.

La figura 2 muestra el diagrama de bloques con los pasos a seguir para realizar la simulación de Montecarlo:

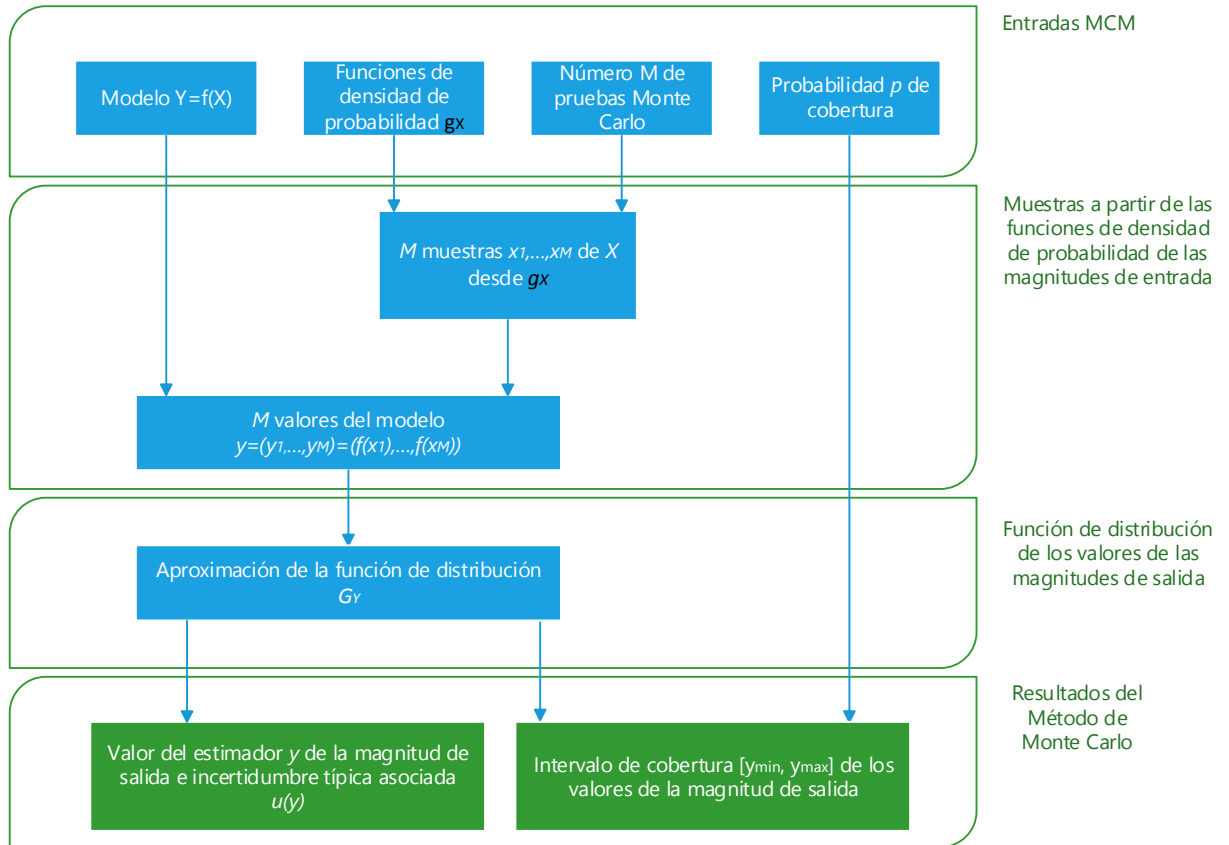


Figura 2. Esquema de la simulación de Montecarlo.

Donde el número  $M$  de ensayos de Montecarlo a realizar puede ser elegido a priori, sin que tengamos conocimiento sobre el nivel de aproximación entregado por la simulación, esto ocurre porque el número necesario para proporcionar un grado de aproximación dependerá del tipo de función de distribución de probabilidad de la magnitud de salida y de la probabilidad de cobertura requerida. Aunque generalmente, con una valor de  $M=10^6$  se consigue un intervalo de cobertura del 95% con una aproximación de uno o dos decimales significativos para el valor de la magnitud de salida.

El intervalo de cobertura para la magnitud de salida  $Y$  puede ser calculado a partir de los valores de la función de densidad de probabilidad  $G$  obtenida con los  $M$  ensayos de Montecarlo. Este intervalo  $[y_{min}, y_{max}]$  depende del nivel de confianza de cobertura que se quiera calcular. De este modo si el número de ensayos realizados de Montecarlo es  $M$ , y el nivel de cobertura establecido es  $p$ , el intervalo de cobertura para la magnitud de salida será el menor intervalo, es decir en el que la resta  $y_{max}-y_{min}$  sea menor, de los  $M-(M \cdot p)$  posibles intervalos. Este proceso se muestra de manera esquemática en la figura 3.



## Introducción

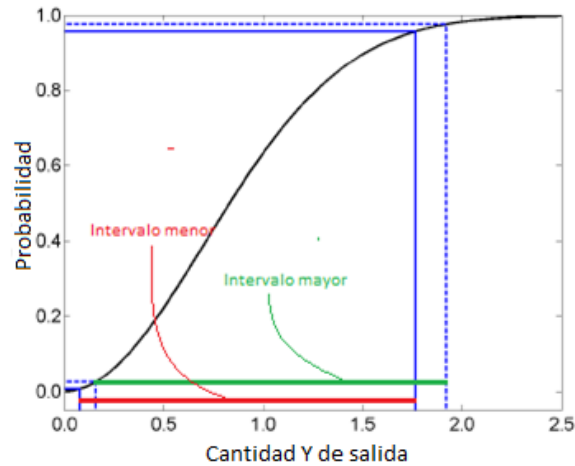


Figura 3. Gráfica explicativa de la elección del intervalo de cobertura.

Comparando la figura 2 respecto al proceso de cálculo de incertidumbre tradicional de la figura 4, puede verse una notoria diferencia frente al proceso de cálculo tradicional, ya que debido al gran número de muestras que utiliza Montecarlo convierte al método mucho más complejo computacionalmente hablando. De hecho, hasta que la potencia de cálculo de los dispositivos informáticos su simulación estaba restringida a centros que tuvieran aparatos suficientemente potentes para su cálculo en un tiempo razonable.

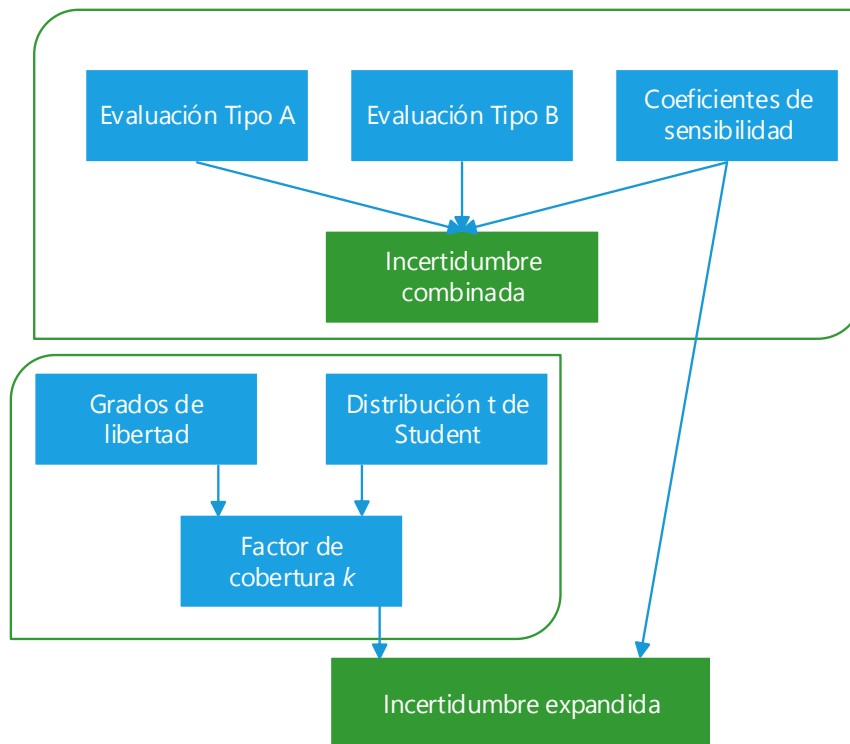


Figura 4. Esquema del método tradicional de evaluación de incertidumbre



### 1.5.3. Validación del método tradicional utilizando el método de Montecarlo.

Como se ha dicho anteriormente el método tradicional de evaluación de la incertidumbre puede funcionar bien en muchas circunstancias, pero no siempre funciona como debiera en la totalidad de ellas.

Puesto que el método de Montecarlo es válido en la totalidad de las situaciones es recomendable que los resultados de ambos métodos sean comparados siempre que sea posible. Si la comparación es satisfactoria el método tradicional podrá ser utilizado sin problemas en el futuro. En el caso de que los resultados no sean favorables se tendrá que dar el resultado obtenido utilizando el método de Montecarlo o utilizar otra aproximación.

Los pasos a realizar para la validación serán los siguientes:

- Aplicar el método tradicional con porcentaje de cobertura del  $100p\%$  para obtener un intervalo de cobertura  $y \pm U_p$  para la magnitud de salida, donde  $p$  es la probabilidad de cobertura
- Aplicar la simulación de Montecarlo en el que se obtenga el intervalo de cobertura  $[y_{min} y_{max}]$  utilizando el método anteriormente explicado.

El procedimiento específico a realizar para comparar los resultados son los siguientes:

- a) Constituir una tolerancia  $\delta$  asociada a la incertidumbre típica calculada mediante el método tradicional, donde  $\delta$  tiene el valor de la fórmula 20:

$$\delta = \frac{1}{2} 10^l \quad (20)$$

Donde  $l$  es el número del exponente de la notación científica de la incertidumbre asociada.

- b) Comparar los intervalos de cobertura obtenidos mediante el método tradicional y el de Montecarlo para determinar si el número de dígitos decimales obtenidos mediante el método tradicional son los correctos. Concretamente se calcula:
- c)

$$d_{low} = |y - U_p - y_{low}| \quad (21)$$

$$d_{high} = |y + U_p - y_{high}| \quad (22)$$

Si la diferencia entre  $d_{low}$  y  $d_{high}$  es menor que  $\delta$ , la comparación es favorable y se podrá utilizar el resultado obtenido en el método tradicional







## 2. Metodología

Como ya se ha dicho anteriormente, el Laboratorio Virtual es una herramienta software para la realización de e-comparisons en ensayos de aislamiento acústico de fachadas.

Por su naturaleza de herramienta utilizada para la intercomparación el técnico tendrá libertad completa para realizar el ensayo tal y como considere, teniendo en cuenta que tendrá que llevar determinadas acciones previas a la medición, que por otra parte también realizaría en un ensayo presencial, como por ejemplo colocar la fuente de ruido antes de realizar la medida. A modo de ejemplo, uno de los procedimientos de este tipo de ensayo se muestra en la figura 5, aunque como se ha dicho el Laboratorio Virtual no impone esta sucesión de acciones.

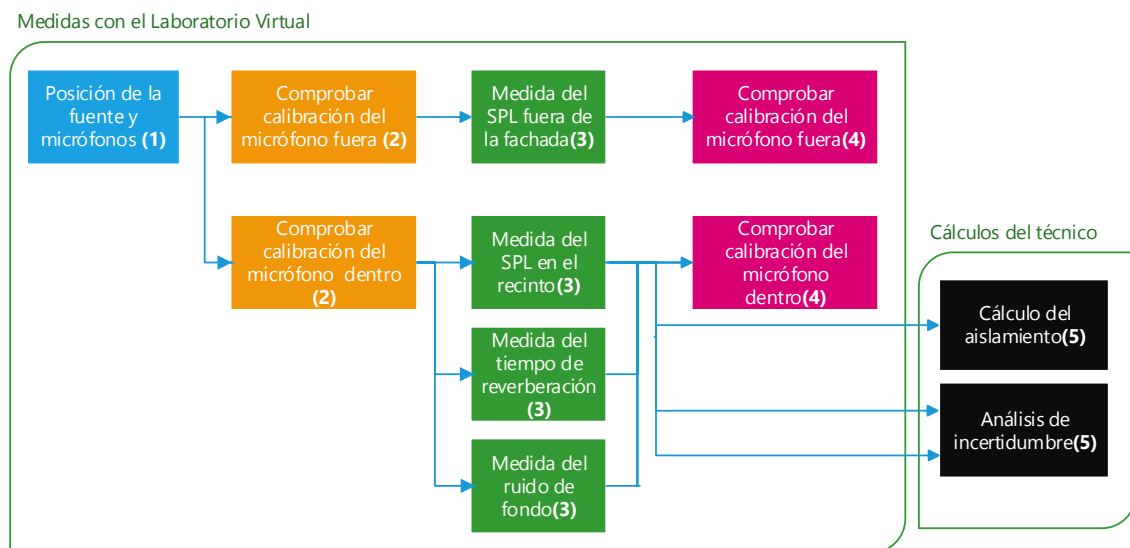


Figura 5. Diagrama de bloques con uno de los posibles procedimientos llevados a cabo en el ensayo de aislamiento acústico de fachadas

El Laboratorio Virtual puede llevar a cabo las siguientes funciones:

- Realizar medidas del nivel en el exterior de la fachada,  $L_1$ .
- Realizar medidas en el interior del recinto,  $L_2$ .
- Realizar medidas del tiempo de reverberación del recinto,  $RT$ .
- Realizar medidas del ruido de fondo,  $BN$ .
- Calibración de la calibración del micrófono.

### 2.1. Base de funcionamiento

Los cálculos utilizados para obtener las diferentes medidas están basados en modelos de propagación de las incertidumbres existentes por la naturaleza imperfecta de la instrumentación. Para ello se han generado muestras aleatorias con una media de valor constante y mediante un modelo estadístico-matemático se han calculado los resultados de las medidas mostradas al usuario, que podrán ser utilizadas para dar un valor del aislamiento de la fachada dentro de unos márgenes de incertidumbre. Además,



también se usa un modelo basado en la posición que permite la simulación del recinto donde se realiza la medición.

Como se ha dicho, la base de funcionamiento del programa son las variables aleatorias, por ello se ha definido el concepto de **aleatorizador** como un sistema de generación de muestras aleatorias de media constante  $\mu$  y desviación típica  $\sigma$  que puede seguir una distribución uniforme o normal dependiendo de la magnitud calculada. El diagrama de bloques de este aleatorizador se puede ver en la figura 6, donde la variable *Entrada* se corresponde con la media  $\mu$  y la *Desviación* con la desviación típica  $\sigma$ .

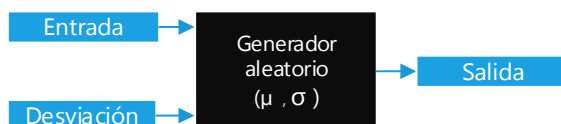


Figura 6. Diagrama de bloques del aleatorizador utilizado en el modelo

## 2.2. Metodología de medida en el exterior de la fachada

La metodología de medida del nivel en el exterior de la fachada está esquematizada en el diagrama de bloques de la figura 7. Se puede ver que está basado en un sistema de propagación estadística de incertidumbres, en el que las variables aleatorias se corresponderían con el nivel del altavoz y el efecto de las condiciones ambientales en el micrófono de recepción.

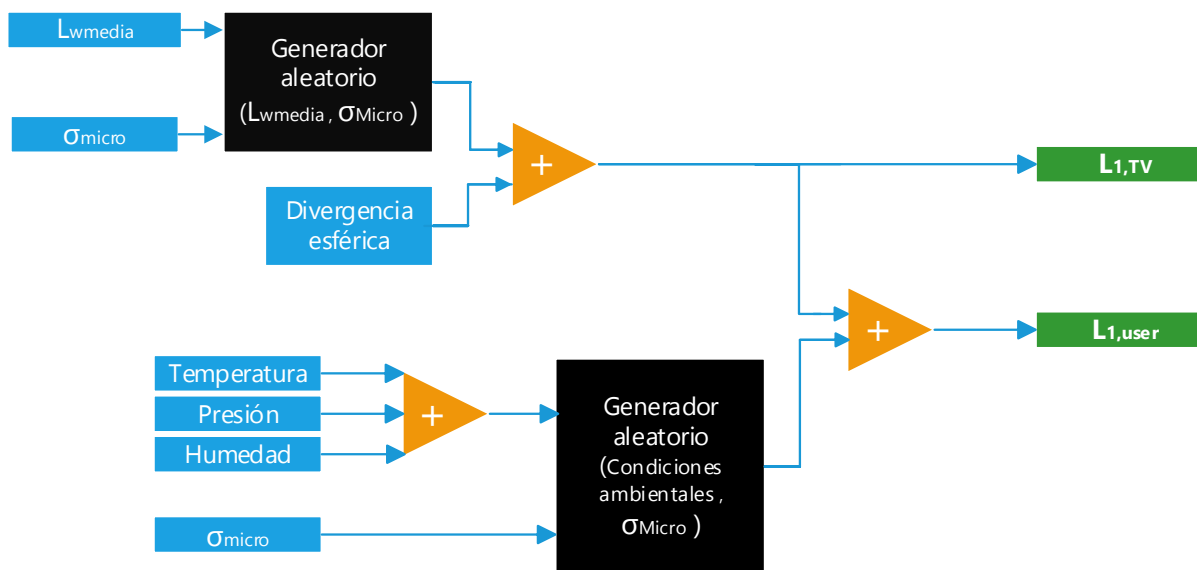


Figura 7. Diagrama de bloques del cálculo de nivel de presión sonora en el exterior de la fachada

Debida a la naturaleza del altavoz éste nunca emite de una forma exactamente igual, sino que hay una variabilidad en su emisión por distintos factores como pueden ser la presión atmosférica o la tensión de la membrana. Por ello en el modelo se considera el nivel del altavoz como una variable aleatoria calculada a partir de un aleatorizador que sigue una distribución Gaussiana, con medias las constantes del nivel del altavoz y con una desviación típica que abarque esa posible variabilidad. Al final se puede considerar que



al valor del altavoz se le ha sumado una constante de valor  $k$  de naturaleza aleatoria, como se muestra en la expresión 23.

$$L_w = L_{wmean} + k \quad (23)$$

Para la simulación de los niveles en el exterior de la fachada se ha hecho uso del modelo mostrado en la expresión 24, donde el término  $20\log(r)$  es el utilizado para calcular las pérdidas por divergencia esférica debidas a la distancia existente entre la fuente y el micrófono. El término  $L_w$  corresponde con el nivel de potencia entregado por el altavoz en cada banda de frecuencia.

$$L_{1TV} = L_w - 20 \log(r) \quad (24)$$

Los valores de las constantes de nivel y desviación típica del altavoz se pueden ver en la tabla 1. Estos datos han sido proporcionados por el Grupo de Investigación y fueron calculados en ensayos de variabilidad de una fuente sonora estándar.

Por otra parte, como se ha dicho anteriormente, si los resultados de las medidas virtuales se van a mostrar al usuario por pantalla en vez de ser utilizadas para cálculos internos, se tiene que tener en cuenta el efecto de variabilidad que producen las condiciones ambientales en la instrumentación de medición, por ello en vez de mostrar al usuario el valor verdadero o *true value* del nivel de presión sonora ( $L_{1TV}$ ), se le muestra esa información sumándole un valor aleatorio obtenido a partir de un aleatorizador que sigue una distribución Gaussiana y que utiliza como media la suma obtenida de  $\delta_{Temperatura} + \delta_{presion} + \delta_{humedad}$  y como desviación típica la desviación del micrófono  $\sigma_{micrófono}$ . Tal y como se puede ver en la expresión 25 que caracteriza el modelo.

$$L_{1,user} = L_{1,TV} + k \quad (25)$$

Para la elección de la desviación típica del micrófono se ha utilizado el documento de características técnicas del micrófono del sonómetro *Bruel&Kjaer 2270*, en la que aparece que en la banda de frecuencias 3.6 Hz – 15kHz las medidas tendrán una fiabilidad de  $\pm 1$  dB. Eso significa que a partir de un valor medio, las medidas tendrán un 99% de probabilidad de estar entre el rango  $[\mu-1 \mu+1]$ . Por lo que la desviación típica utilizada para el micrófono será de  $\sigma=0.3333$ . En la figura 8 se explica mediante un diagrama a que corresponde el 99% de confianza.

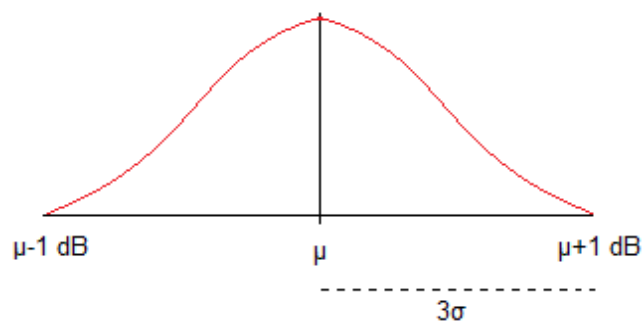


Figura 8. Cálculo del 99% de confianza de una distribución normal



### 2.3. Metodología de medida en el interior de la fachada

#### 2.3.1. Medida de nivel en el interior

Para el cálculo del nivel existente en el interior de la sala se han utilizado modelos matemáticos basados en la expresión de la diferencia de niveles estandarizada de la norma ISO 145-5, mostrada en la ecuación 3, y donde se asume la existencia de un campo difuso.

En dicha ecuación el valor de  $D_{2m,nT}$  es el valor del aislamiento conocido sólo por el organizador de la comparación, en el caso del Laboratorio Virtual se han incluido el resultado del aislamiento acústico de un ensayo realizado por el laboratorio LABENAC en el año 2013 cuyos valores se pueden ver en la Tabla 1. En la fórmula 3, la letra T corresponde al tiempo de reverberación de la sala y  $T_0$  un valor de referencia dado por la normativa (0.5 s).

Tabla 1. Constantes utilizadas en el aislamiento de la fachada del programa, así como las constantes del altavoz con su variabilidad

Aislamiento de fachadas		Altavoz		
Frecuencia	Aislamiento (dB)		Lw(dB)	Desviación
50	25,3	50	63,2	0,845
63	26,5	63	65,2	0,91
80	27,6	80	67,6	0,898
100	27,2	100	67,9	0,881
125	28,4	125	70,2	0,447
160	27,6	160	77,3	0,348
200	31,5	200	83,5	0,308
250	30,7	250	85,2	0,335
315	26,6	315	80,7	0,473
400	28,8	400	82,3	0,245
500	27,7	500	82,1	0,275
630	27,5	630	79,8	0,164
800	30,7	800	78,5	0,171
1000	30,8	1000	78,1	0,196
1125	29,5	1125	77,3	0,15
1600	26,5	1600	77,9	0,122
2000	29,0	2000	79,7	0,099
2500	32,9	2500	76,7	0,113
3150	31,8	3150	73	0,129
4000	32,1	4000	69,8	0,16
5000	32,9	5000	68,8	0,165

Despejando la fórmula 3 se obtiene la expresión matemática utilizada para calcular el valor verdadero del nivel en el interior del recinto:

$$L_{2TV} = L_{1TV,2m} - D_{2m,nT} + 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right) + Att. Model_{room} \quad (26)$$

Dónde el término  $L_{1TV,2m}$  hace referencia al nivel verdadero existente en el exterior de la fachada y a dos metros de ésta.

Observando la anterior fórmula se puede ver que se ha añadido la variable  $Att. Model_{room}$  calculada a partir de un modelo bidimensional basado en la posición ocupada por el micrófono en la sala. Se podría haber elegido cualquier modelo matemático pero se ha elegido uno sencillo para simplificar el Laboratorio Virtual, ya que lo que se pretende es que el usuario obtenga L2 distintos para posiciones diferentes y se mantenga la condición de campo difuso. Este modelo calcula un valor de atenuación dependiendo de la



posición del micrófono respecto de la fachada, así el nivel será mayor en zonas cercanas a la pared e ira disminuyendo gradualmente según se posicione más lejos.

El modelo de atenuación de la sala por lo tanto está basado en las coordenadas x e y del micrófono y siguen una relación dadas por las fórmulas 27, 28, 29, 30 y 31. En las que *Att.Model* se calcula a partir de la suma del nivel de presión sonora en el interior de la fachada sin tener en cuenta el modelo de la sala y la suma logarítmica de cada una de las variables 27, 28, 29 y 30, calculadas a partir de un valor constante y la distancia del micrófono respecto de las distintas paredes.

$$fachada = K_{fachada} * 10\log(d_{fachada}) \quad (27)$$

$$paredizq = K_{paredizq} * 10\log(d_{paredizq}) \quad (28)$$

$$paredder = K_{paredder} * 10\log(d_{paredder}) \quad (29)$$

$$paredtras = K_{paredtras} * 10\log(d_{paredtras}) \quad (30)$$

$$Att.Model_{room} = L_{2TV,sinAttmodel} + 10 * \log\left(\left(10^{\frac{fachada}{10}} + 10^{\frac{paredizq}{10}} + 10^{\frac{paredder}{10}} + 10^{\frac{paredtras}{10}}\right) * 0.25\right) \quad (31)$$

Los valores de las constantes son:

$$K_{fachada}=K_{paredizq}=K_{paredder}=0.0005$$

$$K_{fondo}=9$$

Al final el diagrama de niveles del modelo queda como al de la figura 9, mostrado en la página siguiente, obtenido tras representar gráficamente las medidas obtenidas del modelo de la sala utilizando para ello una modificación del Laboratorio Virtual.

Además de igual manera que ocurría con el nivel en el exterior, cuando se muestra al usuario la medida se tiene en cuenta la variabilidad de las condiciones ambientales y la propia incertidumbre del micrófono, se muestra en la expresión 32:

$$L_{2,user} = L_{2,TV} + k \quad (32)$$

Donde *k* vuelve a ser un valor producido por un aleatorizador que sigue una distribución Gaussiana con media  $\delta_{temperatura} + \delta_{presion} + \delta_{humedad}$  .calculado con las condiciones ambientales del interior de la sala, y una desviación estándar  $\sigma_{microfono}$ .

El diagrama de bloques de la figura 10, que se encuentra también en la página siguiente, muestra esquemáticamente el anterior proceso.



## Metodología

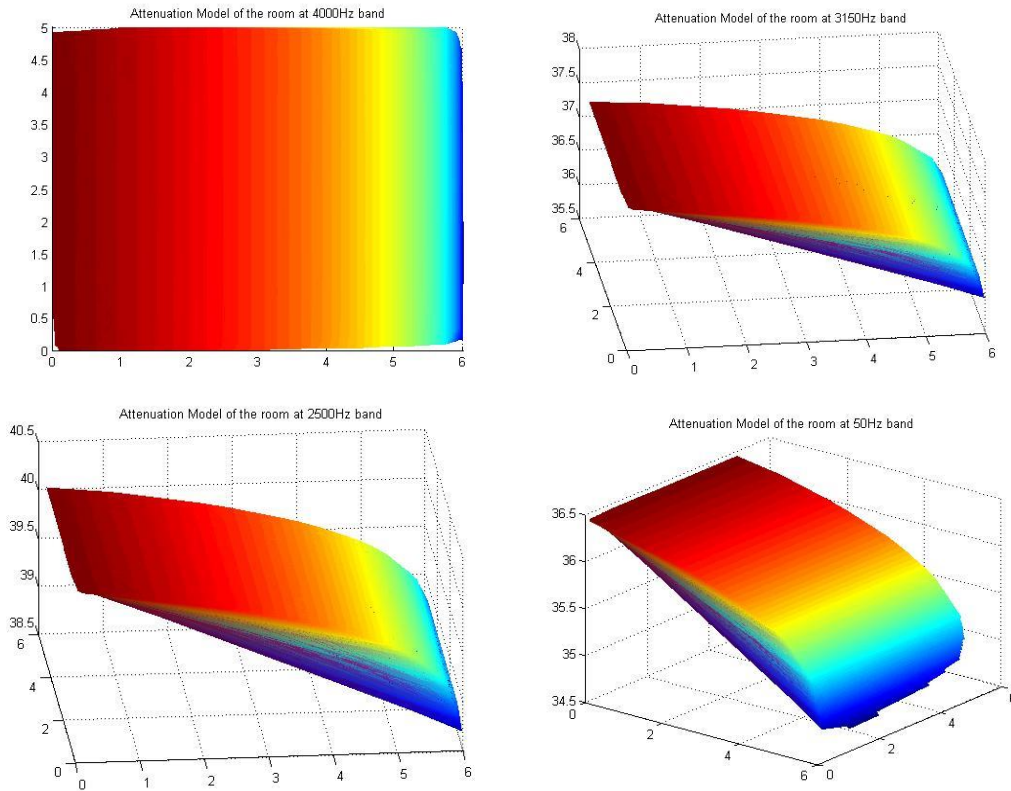


Figura 9. a- Gráfica de caída de presión sonora que representa la planta superior del recinto b-c-d- Gráficas de caída de presión debida a la atenuación del recinto receptor en el ensayo de aislamiento.

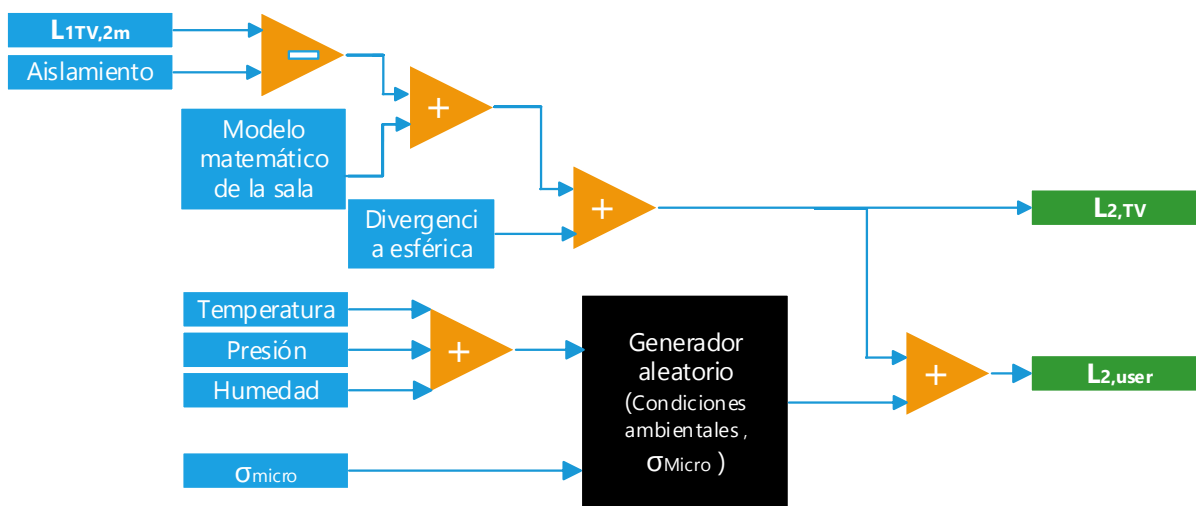


Figura 10. Diagrama de bloques para calcular el nivel de presión sonora en el recinto.



2.3.2. Medida del tiempo de reverberación

Como se ha mostrado en el apartado de *Medida de nivel en el exterior* el tiempo de reverberación es un parámetro indispensable en el cálculo del aislamiento acústico de fachada de un recinto. El modelo empleado para el tiempo de reverberación ha consistido en utilizar un valor constante y unas desviaciones típicas basadas en los estudios realizados por C.Díaz y A.Pedrero en [24], en vez de aplicar las expresiones teóricas especificadas en la norma, que hacen uso de los valores de absorción de la sala y las gráficas de caída de presión sonora.

Se ha optado por utilizar el modelo basado en medias y desviaciones para seguir basando el Laboratorio Virtual en un modelo completamente estadístico, y evitar así el diseño de un modelo de caídas de nivel para la medida de tiempo de reverberación en nuestra sala.

En [24] se calcularon valores medios y desviaciones típicas de tiempos de reverberación de recintos a partir de muchos ensayos y se clasificaron en función de su volumen y de si contaban o no con mobiliario. De este modo como el recinto utilizado, por tener unas dimensiones de 5 x 6 x 3 m, tiene un volumen de 90 m<sup>3</sup>, se han utilizado las medidas de tiempo de reverberación para recintos amueblados con volumen entre 80 y 90 m<sup>3</sup>, cuyos valores se representan y muestran en la figura 11 y la tabla 2.

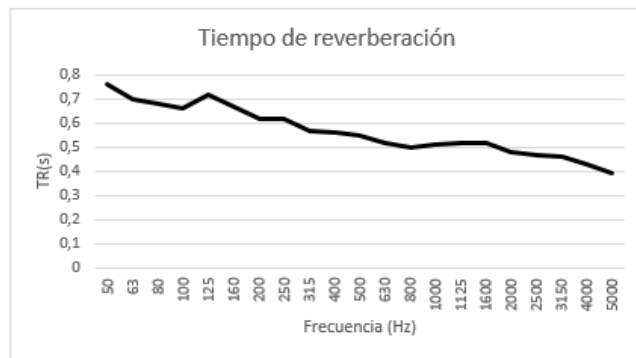


Figura 11. Representación gráfica de las constantes del tiempo de reverberación utilizadas en el programa

Como anteriormente si el tiempo de reverberación es utilizado para cálculos internos como el de L<sub>2</sub> se utilizará el valor verdadero, es decir las constantes establecidas para la sala RT<sup>2</sup><sub>TV</sub>, mostradas en la tabla 2, y si es utilizado para mostrar la medida al usuario, como se ha hecho con los otros tipos de medidas se aleatorizarán los valores siguiendo una distribución Gaussiana usando los valores de desviación típica establecidos como constantes del programa tal y como se muestra esquemáticamente en la figura 12.

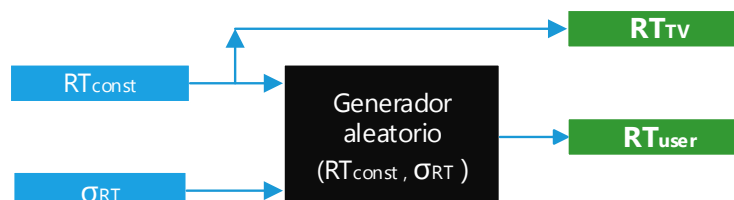


Figura 12. Esquema del cálculo del tiempo de reverberación en el Laboratorio Virtual

<sup>2</sup> A lo largo del proyecto se utiliza T y RT para nombrar el tiempo de reverberación sin ningún tipo de diferenciación.



## Metodología

Tabla 2. Constantes y desviación típica del tiempo de reverberación extraídas de las investigaciones de Pedrero y Díaz.

Frecuencia (Hz)	Tiempo Reverberación(s)	Desviación Típica
50	0,76	0,26
63	0,7	0,22
80	0,68	0,23
100	0,66	0,24
125	0,72	0,22
160	0,67	0,2
200	0,62	0,18
250	0,62	0,15
315	0,57	0,14
400	0,56	0,135
500	0,55	0,13
630	0,52	0,13
800	0,5	0,14
1000	0,51	0,14
1125	0,52	0,13
1600	0,52	0,135
2000	0,48	0,12
2500	0,47	0,11
3150	0,46	0,1
4000	0,43	0,09
5000	0,39	0,07

### 2.3.3. Estimación del ruido de fondo.

En un Laboratorio Virtual que va a ser utilizado para e-comparisons han de contemplarse todas las situaciones adversas que pueden ocurrir en un ensayo presencial. Una de las más importantes es la presencia de ruido de fondo, puesto que si no se realizan correcciones de ruido de fondo en las medidas del ensayo se pueden llegar a obtener resultados erróneos.

Como esas correcciones no siempre son necesarias en un ensayo presencia, se ha optado por implementar otro modelo probabilístico que sigue una distribución binomial, que será el encargado de seleccionar por cada banda de frecuencia el nivel de ruido de fondo producido por dos generadores de naturaleza aleatoria.

El primer generador tiene un nivel de presión sonora muy bajo, en torno a 25 dB, de forma que la diferencia de nivel existente entre  $L_2$  y éste sea muy grande por lo que el técnico no tendrá que hacer ningún tipo de corrección.

El segundo generador toma el valor del nivel de  $L_{2,TV}$  que existiría en el mismo punto donde se está calculando el ruido de fondo y le resta un valor constante en todas las bandas de frecuencia, consiguiendo que la diferencia de niveles entre este generador y  $L_2$  sea pequeña o que el nivel de generador supere a la medida de  $L_2$ , teniendo el técnico que realizar correcciones o desechar la medida.

Los valores de los dos generadores pasan por una función de distribución binomial con una confianza del 95%. Este selector hace que de los valores entrantes el 95% correspondan a valores calculados por el generador de ruido de fondo de bajo nivel, y el 5% restante al otro generador, consiguiendo de esta forma que el técnico tenga que realizar correcciones de ruido de fondo aunque aumente el nivel de la fuente.





Al utilizar esta técnica de los dos generadores se consigue que, aunque el técnico suba el nivel del altavoz sigan apareciendo niveles problemáticos de ruido de fondo, y tenga que realizar correcciones al procesar los datos.

En la figura 13 se puede ver el diagrama de bloques simplificado para este proceso, añadiendo los bloques correspondientes por el efecto de las condiciones ambientales y la deriva del micrófono cuando se muestra al usuario.

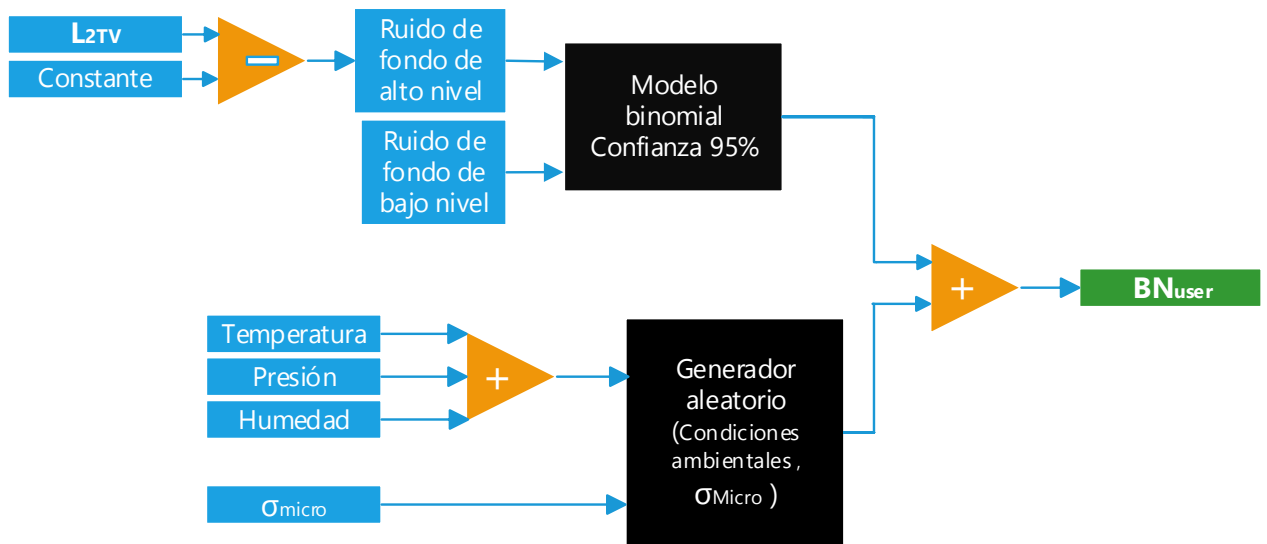


Figura 13. Diagrama de bloques para la generación de muestras de ruido de fondo.

#### 2.3.4. Verificación de la calibración del micrófono

La comprobación de la calibración de los instrumentos de medida en acústica y otras disciplinas es muy importante, ya que para que exista un consenso entre diferentes laboratorios es necesario referenciar las medidas a un nivel patrón.

En el caso del Laboratorio Virtual desarrollado, el calibrador también está incluido y aunque en la realidad este calibrador podría aportar resultados negativos, por simplificar el programa se han utilizado unas constantes que den siempre resultados aceptables de forma que el desajuste de la calibración no influya en los resultados finales.

Una vez más el modelo está basado en variables aleatorias, en las que al valor de 94 dB, que es el valor correcto de la calibración de un micrófono a 1kHz, se le suma la influencia de las condiciones ambientales y se utiliza ese valor como media de un aleatorizador que sigue una distribución normal con un valor de desviación típica. En nuestro Laboratorio Virtual se ha propuesto una desviación típica de 0.001.

El diagrama del proceso se encuentra en la figura 14 donde se puede ver que habrá que elegir en que recinto estamos para que se tomen unas condiciones ambientales u otras.



## Metodología

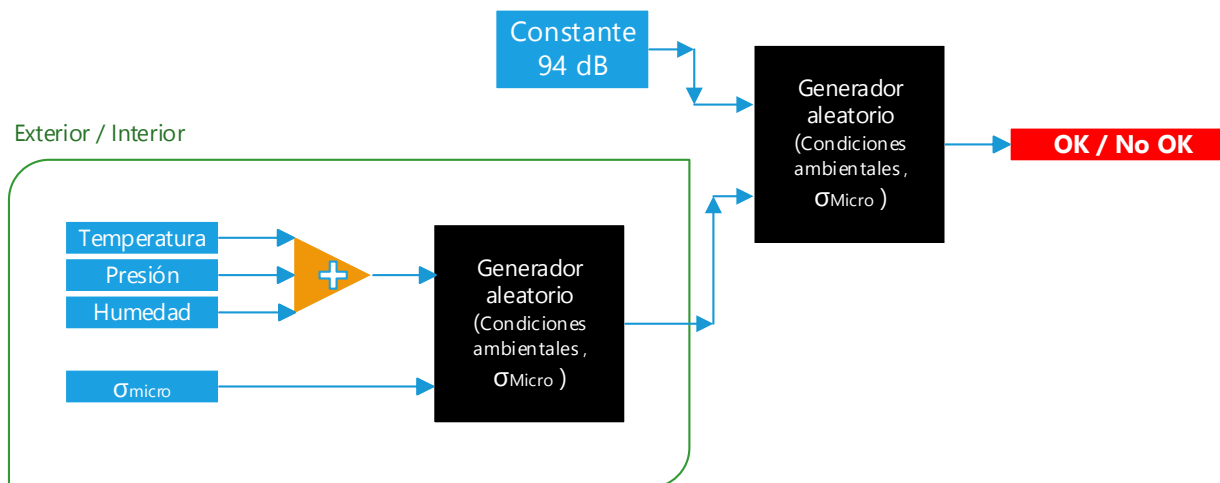


Figura 14. Proceso de verificación del micrófono en el Laboratorio Virtual

### 2.4. Modelo temporal y funcionamiento de las condiciones ambientales

Las condiciones atmosféricas utilizadas en los cálculos del Laboratorio Virtual son unos valores predeterminados y constantes que van cambiando cada hora transcurrida. Sin embargo, las condiciones atmosféricas leídas por los instrumentos virtuales no son exactamente esos valores debido a los problemas de incertidumbre existentes en la instrumentación utilizada para registrar las condiciones ambientales. Se utilizan esos valores constantes como entrada a un aleatorizador que sigue una distribución uniforme, de forma que si se repitiera la medida muchas veces los valores resultantes tuvieran como media el valor de esa constante.

El efecto de cada una de las condiciones atmosféricas en el momento de la medición de nivel de presión sonora se calcula a partir de las fórmulas denotadas en las fórmulas 33, 34 y 35. Donde  $T_{trial}$ ,  $p_{trial}$  y  $RH_{trial}$  se corresponden con el valor de las constantes en el momento de la medición y los demás términos son constantes.

$$\delta_{temperatura} = (T_{trial} - T_{calibration}) * CoeficienteTemperatura \quad (33)$$

$$\delta_{presion} = (p_{trial} - p_{calibration}) * CoeficientePresion \quad (34)$$

$$\delta_{humedad} = (RH_{trial} - RH_{calibration}) * InfluenciaHumedad \quad (35)$$

Los modelos de propagación del sonido utilizados desprecian las condiciones ambientales, a diferencia de los modelos utilizados para la instrumentación meteorológica que sí que lo incorporan. Estos modelos además, contemplan la existencia de diferencias de condiciones atmosféricas entre el interior y el exterior de la fachada, siendo distintas para obtener una medición más acorde con la realidad.

Debido a la duración de un ensayo de aislamiento acústico de fachadas presencial las condiciones ambientales pueden variar a lo largo de la medida. Para recrear esto en el Laboratorio Virtual se ha establecido un modelo temporal consistente en un cambio en la base de tiempos del sistema. El modelo temporal funciona tomando la hora de inicio del Laboratorio Virtual como hora de comienzo del ensayo, a partir de ese momento se empiezan a contabilizar los segundos transcurridos en el programa y en el



momento en el que se realiza una medida se hace la equivalencia de que un segundo transcurrido en la realidad se corresponde con un minuto en el tiempo del ensayo. A continuación se suma al tiempo registrado al comienzo del Laboratorio el transcurrido hasta el momento, y por último, se toma de la tabla el valor correspondiente de esa condición ambiental. Lo explicado se ilustra esquemáticamente en la figura 15:

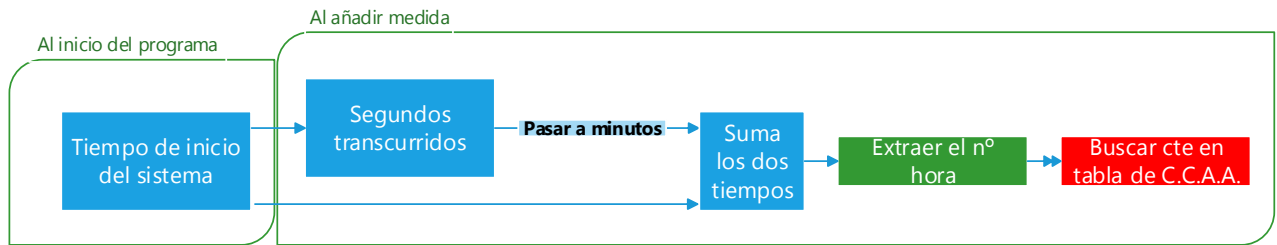


Figura 15. Diagrama de bloques sobre el uso del tiempo transcurrido para la elección de constantes medioambientales

Las constantes elegidas para temperatura y humedad relativa,  $r$  se muestran en la tabla 3, en las que se ha considerado que la presión atmosférica no cambia entre el exterior y el interior, y la humedad relativa es máxima cuando la temperatura es mínima en el exterior y va disminuyendo según aumenta la temperatura.

Tabla 3. Constantes utilizadas como condiciones ambientales tanto en el exterior como en el interior..

Hora	Temperatura(°C)		Presion(kPa)		Humedad Relativa (%)	
	Fuera	Dentro	Fuera	Dentro	Fuera	Dentro
0:00	8	20	93,33	93,33	69,5	38
1:00	7	19,8	93,33	93,33	70	40
2:00	6,5	19,6	93,33	93,33	70,6	42
3:00	6,25	19,6	93,31	93,31	71,5	43
4:00	5,5	19,5	93,31	93,31	72	43
5:00	5,3	19,3	93,27	93,27	72,5	42,5
6:00	5	18,8	93,27	93,27	75	43
7:00	4,8	18,5	93,27	93,27	74	41
8:00	5,5	18,4	93,29	93,29	72	40
9:00	7	18,2	93,29	93,29	70	38
10:00	8,5	18,9	93,37	93,37	68	36
11:00	9	20,3	93,37	93,37	67	35
12:00	10,3	21,3	93,37	93,37	68	34
13:00	11	21,6	93,52	93,52	66	35
14:00	11,5	22	93,48	93,48	64	34
15:00	12	21,9	93,49	93,49	65	35
16:00	11,8	22	93,56	93,56	66	36
17:00	11,2	21,7	93,46	93,46	66	35
18:00	10,5	21,9	93,4	93,4	66	34
19:00	10	21,8	93,35	93,35	67	35
20:00	9,5	22	93,37	93,37	67,6	36
21:00	9	21,5	93,35	93,35	68	37
22:00	8,7	21	93,33	93,33	68,3	36
23:00	8,5	20,5	93,34	93,34	69	37



## Metodología



### 3. Estructura del programa

#### 3.1. LabVIEW

Para el desarrollo del Laboratorio Virtual se ha optado por utilizar el entorno de desarrollo para diseño de sistemas LabVIEW. Este programa, creado por *National Instruments* en el año 1976, utiliza el lenguaje G o lenguaje Gráfico, en el que se sustituyen las líneas de código por iconos gráficos en un diagrama que compila directamente a código máquina de forma que el ordenador pueda ejecutarlo.

Este lenguaje presenta la mayoría de las estructuras de programación encontradas en los lenguajes tradicionales como C, Java o MatLab, como por ejemplo las construcciones típicas como los tipos de datos, bucles de datos, eventos y variables.

Aunque la versión más reciente de este entorno es el LabVIEW 2013 (versión 13.0.0) del año 2013, para la realización del proyecto se ha hecho uso de la versión LabVIEW 2010 SP1 (versión 10.0.1) del año 2010, ya que es la que proporciona la Universidad en estos momentos.



Figura 16. Logo del entorno de programación gráfica LabVIEW

El entorno LabVIEW permite el diseño y personalización de la interfaz de usuario de una forma sencilla y muy eficiente, en parte por la relación existente entre el *Panel Frontal*, que es la interfaz de usuario del programa, y el *Diagrama de Bloques*, el programa propiamente dicho, en la que al añadir un elemento de la interfaz gráfica, como por ejemplo una tabla, aparece únicamente un único icono gráfico en el Diagrama de Bloques.

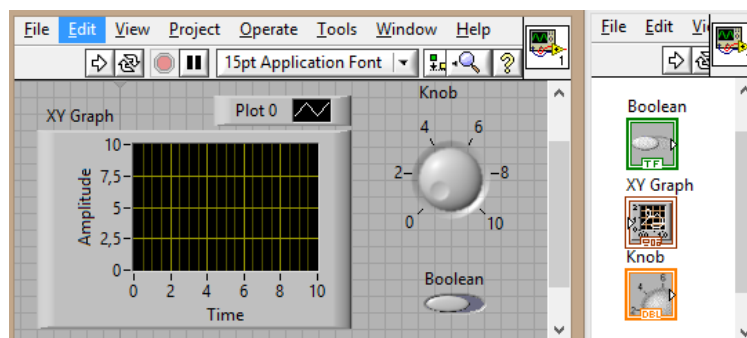


Figura 17. Relación de algunos objetos gráficos con su visualización en el Diagrama de Bloques

Además se ha optado elegir este lenguaje por diferentes ventajas entre las que se encuentran:

- **Programación gráfica intuitiva:** La mayoría de los lenguajes de programación estructurada o por objetos requieren una gran cantidad de tiempo en aprender la sintaxis necesaria del lenguaje. En cambio, con un lenguaje de programación gráfico, mucho más intuitivo por la visualización y la modelización gráfica de las tareas a realizar en estructuras similares a los diagramas de bloques, el tiempo de aprendizaje es mucho menor, pudiendo realizar programas complejos en mucho



## Estructura del programa

menor tiempo. En la figura 18 se muestran algunas de las estructuras de programación típicas en LabVIEW.

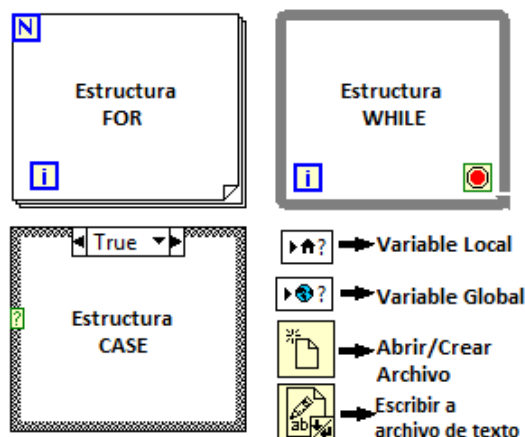


Figura 18. Visión gráfica de las estructuras de programación gráficas utilizadas en LabVIEW

- **Depuración interactiva y visual:** La depuración se puede realizar de manera visual gracias al modo *highlighting* de LabVIEW en la que los valores pasan de una función a otra apareciendo los valores de cada tramo por pantalla. Permitiendo de este modo conocer la evolución de las variables del programa y conocer rápidamente en que punto del programa se está produciendo el error. Además también incluye herramientas similares a los de otros lenguajes de programación como *breakpoints* y ejecuciones paso a paso.
- **Abstracción de tareas de bajo nivel:** El lenguaje Gráfico trata automáticamente otras opciones que habría que realizar manualmente en otros lenguajes, como son el uso de la memoria. Ya que este lenguaje no necesita reservar variables ni asignarles valores, la memoria también se libera automáticamente cuando una variable no vuelve a ser usada. A pesar de ser una gran ventaja, también existe la opción de hacer uso del control de memoria para conseguir mejores rendimientos.

### 3.2. Estructura del programa

#### 3.2.1. Flujo de programa

Como estructura del programa se ha elegido el patrón de diseño Productor/Consumidor en el que dos bucles while se ejecutan independientemente tal y como se ve en la figura 19. En dicho diseño el bucle de la parte superior es el responsable de la producción de datos y el segundo es el encargado de su procesamiento. La ejecución se produce paralelamente de forma que los datos pasan entre los bucles usando colas.

Además en el bucle superior se utiliza una estructura basada en eventos, en la que el bucle superior “duerme” hasta que se produce un evento. En ese momento el bucle superior introduce en la cola del programa una señal que el bucle consumidor interpretará para ejecutar el código asignado a ese evento. Utilizando este tipo de programación se optimiza el programa ya que no se permite que se sobrecargue al procesador, y además no permite la ejecución de dos funciones dependientes entre sí de manera simultánea, puesto que en la estructura sólo existe una función de lectura de eventos de la cola.

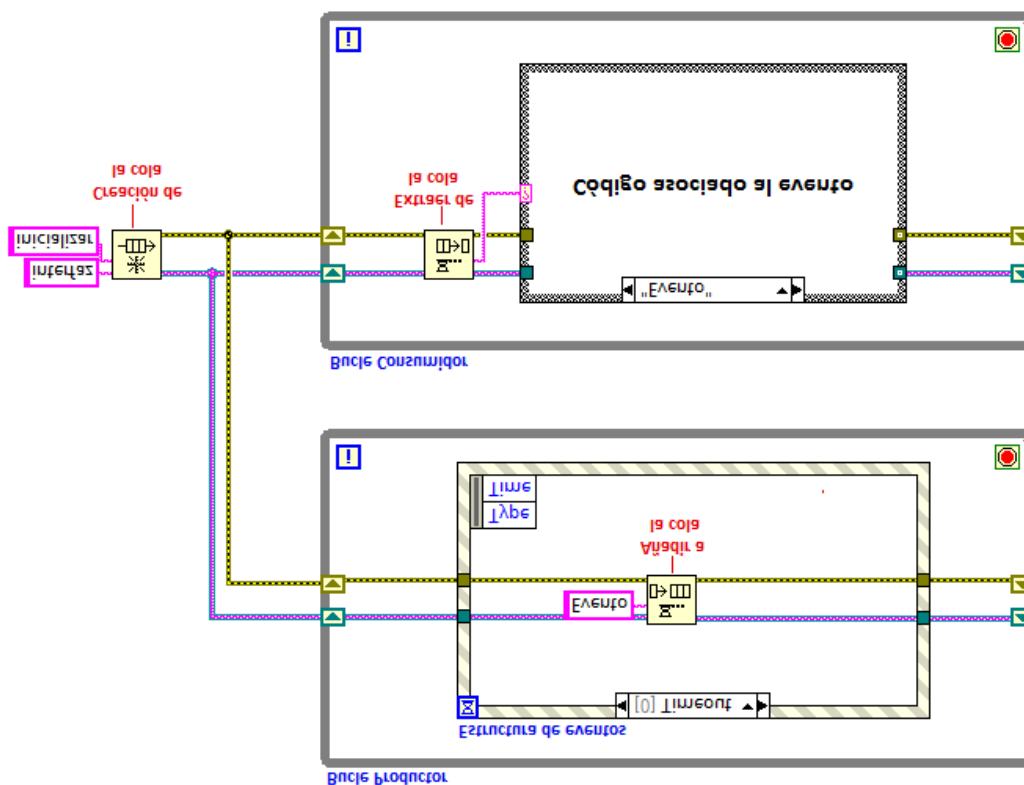


Figura 19. Estructura Productor-Consumidor basada en eventos utilizada en el programa

### 3.2.2. Manejo de datos

Para manejar las distintas variables que se utilizarán en el programa se ha definido un cluster, o bloque de datos, que contiene los diferentes tipos de datos que van a ser utilizados en distintos VIs, simplificando en gran medida el código de la aplicación ya que podrá transportarse la información como una única variable, accediendo a los datos que constituyen al bloque de datos sólo cuando sea necesario.

Como se puede ver en la figura 20 , el cluster está compuesto por los siguientes tipos de variables:

- **Tipo de medida:** De tipo *String*. Esta variable es utilizada para identificar la medición que se está llevando a cabo en el programa.
- **Condiciones ambientales:** De tipo *cluster*. Contiene tres variables correspondientes a las condiciones ambientales en las que se ha llevado la medida determinada por la variable Tipo de variable.
- **Medida:** De tipo *Array de doubles*. Contiene un array de 21 elementos correspondientes a cada una de las bandas de frecuencia de la medición.
- **Altavoz:** De tipo *cluster*. Constituida por una variable de tipo *double* que marca el volumen del altavoz en la medida, y un cluster llamado "Posición" que contiene las coordenadas del altavoz.
- **Micrófono 1 / Micrófono 2:** De tipo *cluster*. Contienen las coordenadas de los micrófonos, en cada uno de los recintos del ensayo. La variable "añadir" se utiliza para añadir una nueva posición de micrófono.



## Estructura del programa

En el anexo D se encuentra una explicación más detallada sobre la estructura de datos utilizada en el programa.

Cluster			
Tipo de medida	String	Microfono1	Cluster
Condiciones Ambientales	Cluster	x	Double
Temperatura	Double	y	Double
Humedad relativa	Double	z	Double
Presión atmosférica	Double	añadir	Boolean
Medida	Array de double	Microfono2	Cluster
Altavoz	Cluster	x	Double
Posición	Cluster	y	Double
x	Double	z	Double
y	Double	añadir	Boolean
z	Double		
añadir	Boolean		
Volumen	Double		

Figura 20. Esquema del cluster utilizado en el programa, indicando el tipo de dato de cada elemento.

Durante el desarrollo de este programa se han programado subVIs para simplificar el código del programa y poder realizar la depuración y futuras modificaciones de una forma más sencilla.

Concretamente se han utilizado 33 subVIs, las más importantes se muestran en la tabla 4, donde se puede ver el icono utilizado en el diagrama de bloques en el entorno de programación, su nombre, una breve descripción de su funcionalidad y en que subVIs es utilizada y que subVIs utiliza. Además el Anexo A se puede ver la relación existente entre cada subVI gráficamente.

Tabla 4. VIs secundarios utilizados en el programa del Laboratorio Virtual.

Icono	Nombre	Llamada por los subVIs:	Llama a los subVIs:	Descripción:
	CalculoTemperatura.vi	CondicionesAtmosfericas.vi	GeneradorAleatorioValores.vi Constantes.vi	Elige la temperatura en el momento de la medición dependiendo del momento de inicio del ensayo.
	TiempoTranscurrido.vi	CondicionesAtmosfericas.vi		Mide el tiempo transcurrido desde que se inicia el programa hasta que se realiza una medida
	GeneradorAleatorioValores.vi	GeneradorDeVectores.vi- Calibracion.vi CalculoHR.vi CalculoPresion.vi CalculoTemperatura.vi TiempoTranscurrido.vi		Genera valores aleatorios independientes siguiendo una distribución normal o una distribución uniforme.
	Calibracion.vi	IsolationTrialsLab.vi (main)	GeneradorAleatorioValores.vi Constantes.vi	Implementa el modelo matemático utilizado para calibrar el sonómetro.
	ImagenSala.vi	IsolationTrialsLab.vi (main)		Muestra el plano esquemático del recinto, así como los diferentes puntos en los que se han colocado altavoces y micrófonos.
	GraficaFinal.vi	IsolationTrialsLab.vi (main)		Muestra las gráficas de las medidas realizadas en el programa.
	ClusterAString.vi	IsolationTrialsLab.vi (main)		Convierte los valores contenidos en un cluster en una cadena de caracteres.
	MostrarTabla.vi	IsolationTrialsLab.vi (main)		A partir de los datos de las medidas los coloca y muestra en forma de tabla
	Constantes.vi			Implementa todas las constantes utilizadas en los distintos modelos del programa.



## Estructura del programa



Icono	Nombre	Llamada por los subVIs:	Llama a los subVIs:	Descripción:
	<b>AñadirMicrofono.vi</b> <b>AñadirReverberación.vi</b> <b>AñadirRuidoFondo.vi</b>	IsolationTrialsLab.vi (main)		Ventana emergente utilizada para insertar las coordenadas de los micrófonos
	<b>SelectorMicro.vi</b>	IsolationTrialsLab.vi (main)		Determina si un micrófono se encuentra en el recinto o en el exterior
	<b>EventoAnadir.vi</b>	IsolationTrialsLab.vi (main)		Establece una relación numérica entre L1, L2, TR y RF con los números 1, 2, 3 y 4.
	<b>ExportarExcel.vi</b>	IsolationTrialsLab.vi (main)	SetCellValue.vi OpenNewWorkSheet.vi OpenNewWorkBook.vi OpenExcelandMakeVisible.vi	Extrae las medidas realizadas hasta el momento en formato MS Excel.
	<b>SetCellValue.vi</b>	ExportarExcel.vi		Designa el valor de una celda Excel a partir del valor de la matriz que se quiere exportar.
	<b>OpenNewWorkSheet.vi</b>	ExportarExcel.vi		Inicializa una nueva hoja de un libro de un archivo Excel.
	<b>OpenNewWorkBook.vi</b>	ExportarExcel.vi		Inicializa un nuevo libro en un archivo Excel.
	<b>OpenExcelandMakeVisible.vi</b>	ExportarExcel.vi		Crea un archivo Excel en la ruta especificada y lo muestra al usuario.
	<b>ExportarTexto.vi</b>	IsolationTrialsLab.vi (main)		Exporta las medidas realizadas hasta el momento a un documento *.txt
	<b>CalculoL1.vi</b>	IsolationTrialsLab.vi (main)	GeneradorDeVectores.vi	Calcula los valores del nivel de presión sonora en el exterior de la fachada.
	<b>CalculoL2.vi</b>	IsolationTrialsLab.vi (main)- CalculoRF.vi	CalculoAislamiento.vi- GeneradorDeVectores.vi CalculoL1.vi	Calcula los valores del nivel de presión sonora en el interior del recinto.
	<b>CalculoTrev.vi</b>	IsolationTrialsLab.vi (main)	GeneradorDeVectores.vi	Calcula los valores del tiempo de reverberación en el interior del recinto.
	<b>CalculoRF.vi</b>	IsolationTrialsLab.vi (main)	SelectorBinomialRF.vi CalculoL2.vi GeneradorDeVectores.vi	Calcula los niveles del ruido de fondo en el interior de recinto.
	<b>GeneradorDeVectores.vi</b>	CalculoL1.vi CalculoL2.vi CalculoTrev.vi CalculoRF.vi	Distancia.vi CondicionesAtmosfericas.vi Constantes.vi GeneradorAleatorioValores.vi	Se encarga de generar los valores aleatorios que serán utilizados por los distintos Vis del programa
	<b>CalculoAislamiento.vi</b>	CalculoL2.vi	CalculoTrev.vi ModeloAtenuacion.vi Constantes.vi	Calcula el aislamiento de la pared, teniendo en cuenta el TR del recinto.
	<b>ModeloAtenuacion.vi</b>	CalculoAislamiento.vi		Implementa el modelo matemático del recinto utilizado
	<b>SelectorBinomialRF.vi</b>	CalculoRF.vi		Utiliza una distribución binomial para seleccionar muestras de dos vectores con valores de ruido de fondo
	<b>Distancia.vi</b>	GeneradorDeVectores.vi		Calcula la distancia existente entre dos coordenadas de micrófono.
	<b>CondicionesAtmosfericas.vi</b>	GeneradorDeVectores.vi Calibracion.vi	CalculoHR.vi CalculoPresion.vi CalculoTemperatura.vi TiempoTranscurrido.vi	Calcula las condiciones ambientales de la medida a partir de la hora de inicio del sistema.
	<b>CalculoHR.vi</b>	CondicionesAtmosfericas.vi	GeneradorAleatorioValores.vi Constantes.vi	Elige la humedad relativa en el momento de la medición dependiendo del momento de inicio del ensayo.
	<b>CalculoPresion.vi</b>	CondicionesAtmosfericas.vi	GeneradorAleatorioValores.vi Constantes.vi	Elige la presión en el momento de la medición dependiendo del momento de inicio del ensayo.



## Estructura del programa

Es importante mencionar que se ha optado por no incluir el código del programa en la memoria, por lo que si el lector tiene interés en visualizarlo lo podrá encontrar en el CD anexo al proyecto.

### 3.3. Interfaz gráfica

Para el diseño de la interfaz de usuario se han barajado diferentes opciones pero finalmente se optó por elegir una interfaz gráfica que cupiera en la mayoría de pantallas y que permitiera individualizar los resultados de las medidas respecto a las gráficas, para poder ver ambas simultáneamente, permitiendo así un uso más cómodo desde el punto de vista de usuario.

La interfaz gráfica está dividida en dos secciones diferenciadas:

- **Sección superior:** Mostrada en la figura 21 el objetivo de esta zona de la interfaz es mostrar al usuario mediante un *container* con pestañas las distintas visualizaciones gráficas que ofrece el Laboratorio que son:
  - **Plano:** En el que se muestra la situación de los puntos de medida realizados hasta el momento en un plano del recinto utilizado en el programa de 6mx5m.
  - **Gráficas:** Donde se muestran las gráficas de las medidas realizadas y donde también se pueden configurar las opciones de exportación.

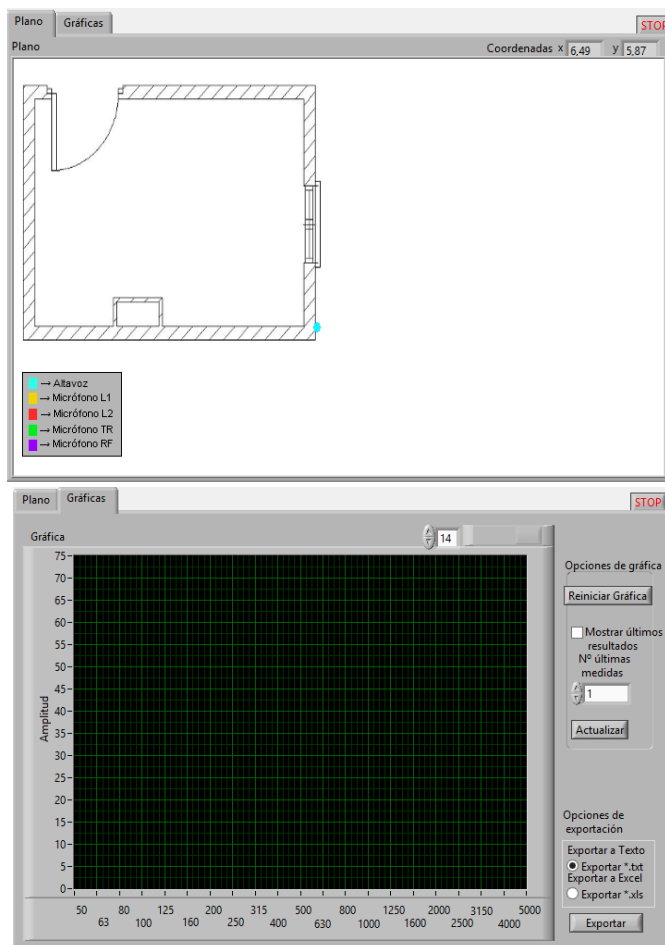


Figura 21. Capturas de la sección superior de la interfaz gráfica utilizada en el programa



- **Sección inferior:** Como se puede ver en la figura 22, esta zona también estructurada mediante pestañas es la encargada de mostrar los resultados de las diferentes magnitudes que se miden en el Laboratorio Virtual, así como de realizar las tareas de configuración. Las pestañas son:
  - **L1, L2, Tiempo de reverberación y Ruido de fondo:** Son 4 pestañas similares compuestas por una tabla tipo Excel que permite visualizar los resultados numéricos y sus respectivos botones para añadir medidas.
  - **Configuración:** Es la utilizada tanto para comprobar la verificación del micrófono como para añadir y ajustar el volumen de las fuentes generadoras de ruido que se usaran en el ensayo.

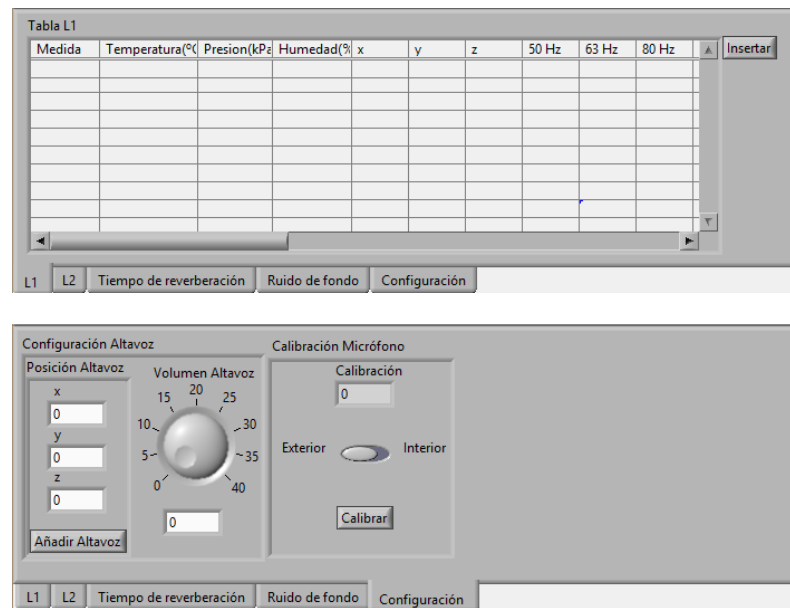


Figura 22. Capturas de la sección inferior de la interfaz gráfica utilizada en el programa

### 3.3.1. Colocación de los puntos de medida así como de la fuente y ajuste de su nivel de emisión

En el Laboratorio Virtual se podrán colocar tanto el número de fuentes generadoras de ruido como de puntos de medición que se consideren necesarios, teniendo como única restricción el que sólo se podrá utilizar una fuente simultáneamente por lo que el modelo usará la última posición de fuente elegida.

#### Altavoz

El altavoz, tanto su posición como su volumen, se añadirá desde la pestaña configuración establecida para tal fin. En ella tras haber decidido y escrito las coordenadas del altavoz, así como su ganancia, se pulsará el botón añadir y el altavoz quedará establecido como la fuente de ruido a considerar para cálculos posteriores.

En el caso que se decida utilizar más de una posición de fuente, la única información que se podría obtener mediante el programa sería la posición relativa en la que se colocó en el mapa.



## Estructura del programa

### Micrófono

Cuando se opta por añadir un punto de medida se ha de pulsar el botón del laboratorio establecido para tal fin. En ese momento aparecerá una ventana emergente, programada en el VI *AñadirMicrofono*, *AñadirReverberación* o *AñadirRuidoFondo*, donde se podrán definir las coordenadas de ese punto de medida. A partir de ese momento los datos introducidos se transportarán hasta el VI *CalculoL1*, *CalculoL2*, *CalculoRF* o *CalculoTR* calculando ahí el resultado de la simulación, utilizando los datos del altavoz colocado anteriormente.

Si se realiza un *click* en una zona del mapa del recinto aparecerá la misma ventana emergente que anteriormente pero con la información de “x” y “y” ya escrita, quedando solo por escribir la coordenada z. El algoritmo explicado se puede ver esquemáticamente en la figura 23.

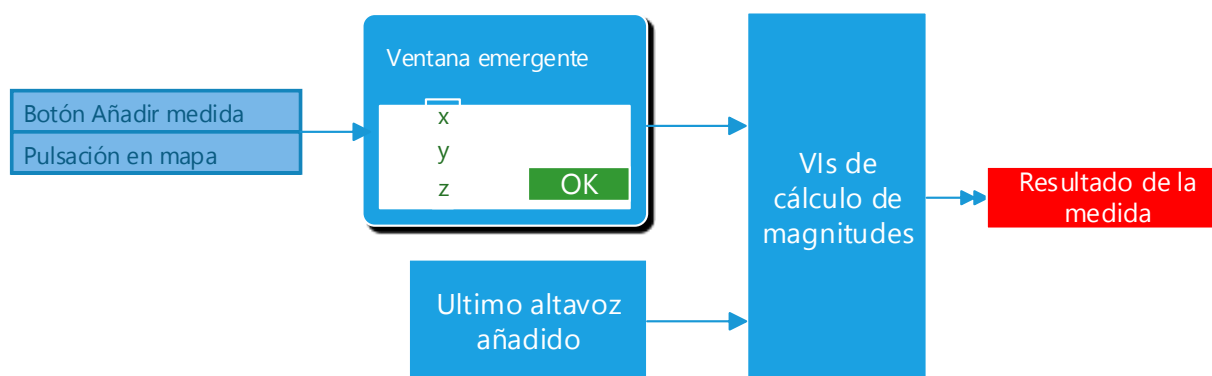


Figura 23. Esquema sobre cómo añade puntos de medida el Laboratorio Virtual.

### 3.3.2. Exportación de las medidas

Uno de los procesos más significativos para el uso de cualquier programa de simulación es la facilidad que tenga para extraer los datos y la forma de visualizarlos una vez exportados.

En el laboratorio virtual se da la opción de extraer los datos en dos formatos distintos, en un documento de texto plano \*.txt o en una tabla para su manipulación mediante programas de tipo Excel \*.xls.

En este Laboratorio Virtual se pueden extraer las medidas de L1, L2, tiempo de reverberación y ruido de fondo. Mostrando los datos una estructura similar a la mostrada en la tabla 5. En la que en Medida aparecerá el tipo de medida realizada, en Temperatura, Presión y Humedad las condiciones ambientales del recinto donde se ha realizado la medida, a continuación las coordenadas del punto de medida y por último los valores de la medición.

Tabla 5. Estructura de datos con las que se extraen las mediciones del Laboratorio Virtual.

Medida	Temperatura	Presión	Humedad	x	y	z	Bandas de frecuencia ( 50Hz-5kHz)

La forma de extraer los datos será seleccionable por el usuario en el menú existente para esta funcionalidad, una vez el usuario toca el botón *exportar* el programa funcionará de una manera u otra dependiendo del formato de salida elegido.



En el caso de que se haya escogido la opción de exportar en tabla Excel, el programa toma las tablas existentes de las cuatro medidas a exportar introduciéndolas en una misma variable y el VI *ExportarExcel.vi* se encargará de detectar las columnas y filas adaptándolas a un archivo formateable en este tipo de programas.

En el caso de que se quiera exportar los datos en texto, se irán insertando las medidas en un array bidimensional de caracteres, de forma que en *ExportarTexto.vi* se guardará dicha información en un archivo de este tipo.

### 3.3.3. Representación gráfica de las medidas realizadas

La representación gráfica de las medidas, como la exportación de éstas, es una funcionalidad importante para la usabilidad del programa ya que al mostrar las gráficas, el usuario puede decidir de una manera más rápida si la medida resultante es la adecuada o no. Por ejemplo, si hace una medida de ruido de fondo en el que la simulación de éste supere el nivel medido de L2, podrá repetir la medida en el momento, sin tener que recurrir de nuevo al programa posteriormente.

El Laboratorio Virtual permite dos opciones al mostrar las gráficas, mostrar todas simultáneamente o mostrar un número determinado de las últimas medidas realizadas.

Para poder realizar esas funcionalidades el programa incorpora un contador, no mostrado al usuario y de valor máximo N medidas, que contiene la información del número de medidas realizadas hasta el momento. De este modo cuando el usuario quiere ver todas las medidas, el VI *GraficaFinal.vi*, recorre todo el array bidimensional mencionado en el apartado anterior desde 0 hasta N tomando como valores para mostrar los valores de los niveles por cada banda de frecuencia, y en el caso de querer mostrar sólo los x últimos empieza a mostrar los datos desde la última fila del array bidimensional con número N, hasta que llegue a la fila N-x, que será la última a mostrar. En la figura 24 se puede visualizar el algoritmo explicado anteriormente.

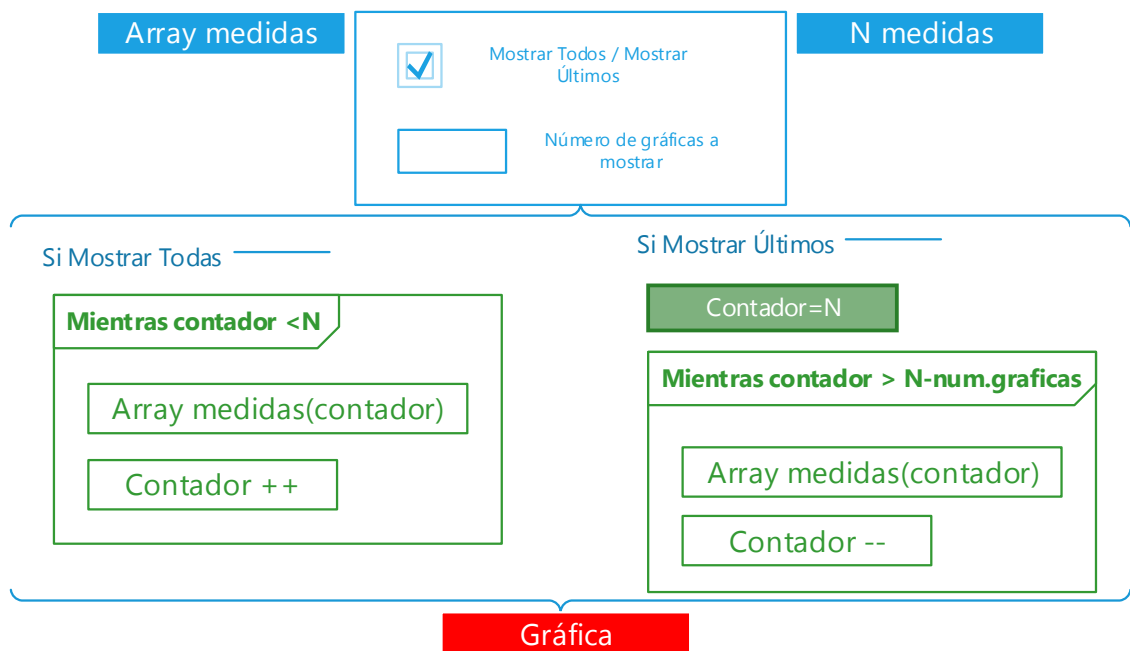


Figura 24. Algoritmo utilizado para mostrar las gráficas en el Laboratorio.



### 3.3.4. Representar en un plano esquemático los puntos de medida

Este Laboratorio Virtual es capaz de mostrar en un mapa esquemático del recinto donde se está realizando el ensayo, como el de la figura 25, los puntos donde se han colocado los micrófonos así como donde se han colocado los altavoces, diferenciando cual es el último elemento colocado.

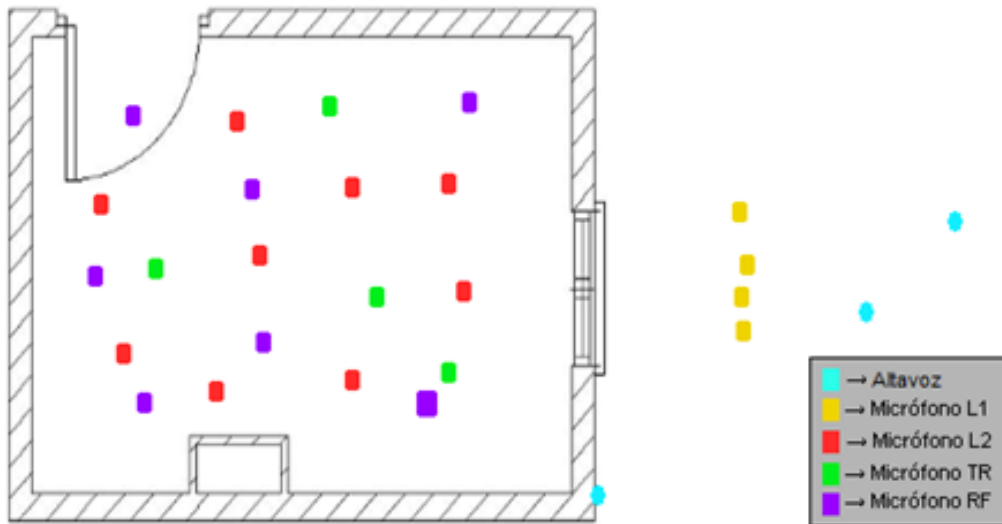


Figura 25. Plano esquemático del recinto del cual se va a calcular el aislamiento.

Este proceso se lleva a cabo en *ImagenSala.vi*, que a partir de una constante del programa que contiene la información relativa al plano de la habitación y las funciones *DrawnRoundRect.vi* y *Drawnoval.vi* se puede modificar esa imagen de forma que el resultado se muestre como en la figura anterior.

El trabajo previo para el correcto funcionamiento de este VI ha sido calcular la posición de los puntos relativos a los micrófonos. Para esto se ha obtenido la colocación de los puntos significativos de la imagen manualmente, que se corresponden con las esquinas del recinto y a partir de estos se calculó una correspondencia entre el número de píxeles y el número de metros de la imagen.

Calculado ese dato, mediante sumas, multiplicaciones y restas se calcula la posición del micrófono en la imagen, a partir de sus coordenadas. Una vez obtenido el pixel del punto de medición se genera una figura geométrica en torno a dicho pixel que será de mayor o menor tamaño dependiendo de si se corresponde con la última medición o no. Añadiéndose esa figura geométrica, que podrá ser un círculo o rectángulo dependiendo de si es un altavoz o un micrófono, con las funciones de tipo *Drawn* especificadas anteriormente.



## 4. Resultados

En este apartado se describe la forma de validar los resultados obtenidos con el programa que permita demostrar que el método de cálculo aplicado en el Laboratorio Virtual funciona correctamente.

Para ello se compararán los resultados obtenidos tras una simulación de Monte Carlo en cada uno de las magnitudes simuladas con los cálculos que se obtienen teóricamente mediante los cálculos analíticos:

El procedimiento que se va a seguir es el siguiente:

1. Modificar el Laboratorio Virtual para que genere medidas sin intervención del usuario.
2. Generación de M medidas de la magnitud a verificar utilizando el Laboratorio Virtual.
3. Aplicar la simulación de Monte Carlo a las muestras generadas para obtener el intervalo de cobertura y el valor medio.
4. Calcular analíticamente el valor esperado de la magnitud a verificar así como el valor de su incertidumbre combinada y expandida.

### 4.1. Nivel de presión sonora $L_1$

El primer paso para aplicar la simulación de Montecarlo es generar M muestras aleatorias con el Laboratorio Virtual. Aunque el suplemento número 1 de la GUM recomienda generar  $10^5$  de cada una de las magnitudes de salida para conseguir una cobertura del 95% utilizando dos decimales en este caso se han generado tan solo 60000 muestras debido a que para esta verificación no se necesita tanto nivel de precisión.

Una vez que se han generado las muestras, utilizando el *script* de MatLab, adjunto en el CD de este informe, se procesan esas medidas siguiendo los pasos explicados en el punto 1.5.2 de este informe.

Al final se han generado para todas las bandas de frecuencia una función de distribución de probabilidad y otra función de densidad de probabilidad como las de la figura 26 y figura 27. Con los datos de la distribución de probabilidad se calcula el valor medio de esa banda de frecuencia, en este caso 63 Hz y mediante la función de densidad de probabilidad se calcula el intervalo de cobertura de dicha banda

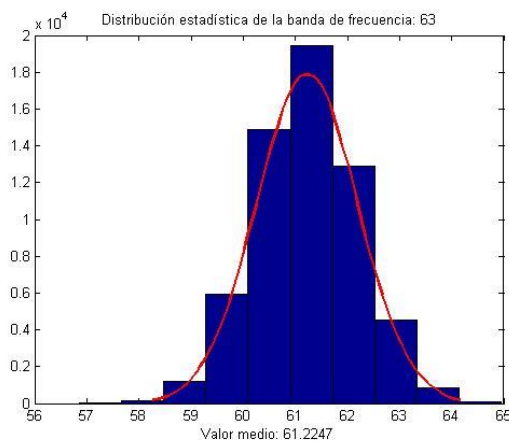


Figura 26. Distribución estadística obtenida tras el método de Montecarlo para una única posición de micrófono



## Resultados

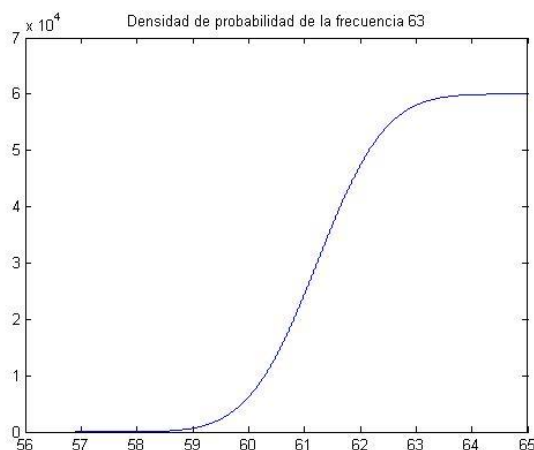


Figura 27. Densidad de probabilidad de los valores del MCM

Además, en dicho script se calculan simultáneamente los valores analíticos del nivel L1 y su desviación típica utilizando para ello los valores de las constantes mostrados en el punto en el punto 2.2 y 2.3, de modo que la desviación típica analítica sea  $\sigma_{analitica} = \sqrt{\sigma_{micro}^2 + \sigma_{altavoz}^2}$ . Si además se considera la situación más desfavorable existirán infinitos grados de libertad y por lo tanto el factor de cobertura  $k$  será igual a dos, por lo que la incertidumbre expandida analítica será  $U_{analitica} = k * \sigma_{analitica}$ .

Cuando se aplica este proceso a todas las bandas de frecuencia se obtiene un resultado como el de la tabla 6.

Tabla 6. Valores estimados del mensurando y evaluación de la incertidumbre obtenidos tras la implementación del MCM y el cálculo analítico en las medidas de L1.

Frecuencia (Hz)	$N_{analitico}$	$N_{analitico} - U_{exp}$	$N_{analitico} + U_{exp}$	$\overline{\mu}_{MCM}$	$\mu_{MCMmin}$	$\mu_{MCM}$
50	59,2	57,4	61,0	59,2	55,9	62,5
63	61,2	59,3	63,2	61,2	58,3	64,2
80	63,6	61,7	65,5	63,6	60,5	66,8
100	63,9	62,0	65,8	63,9	61,2	66,6
125	66,2	65,1	67,3	66,2	64,5	67,9
160	73,3	72,4	74,3	73,3	71,8	74,8
200	79,5	78,6	80,4	79,5	78,2	80,8
250	81,2	80,3	82,2	81,2	79,8	82,6
315	76,7	75,6	77,9	76,7	74,5	78,9
400	78,3	77,5	79,1	78,3	77,0	79,7
500	78,1	77,3	79,0	78,1	76,9	79,4
630	75,8	75,1	76,6	75,8	74,6	77,1
800	74,5	73,8	75,3	74,5	73,3	75,8
1000	74,1	73,3	74,9	74,1	72,7	75,6
1125	73,3	72,6	74,1	73,3	72,1	74,6
1600	73,9	73,2	74,6	73,9	72,7	75,1
2000	75,7	75,0	76,4	75,7	74,7	76,7
2500	72,7	72,0	73,4	72,7	71,6	73,9
3150	69,0	68,3	69,7	69,0	68,0	70,1
4000	65,8	65,1	66,6	65,8	64,7	66,9
5000	64,8	64,1	65,6	64,8	63,6	66,0





Como es lógico las medias en los dos procedimientos son similares. Se supone que para que el sistema quedara validado el intervalo de confianza analítico debería estar contenido en el intervalo de cobertura calculado mediante el método de Montecarlo. Mirando la tabla 6 se puede comprobar que en este caso no se cumple, ya que el intervalo calculado mediante el método de Montecarlo está ligeramente desplazado a la derecha respecto al analítico. Esto es debido al intervalo de cobertura que se ha elegido a la hora de aplicar el método de Montecarlo, porque debido a que dicho intervalo es del 95%, un 5% de las medidas estarán fuera de los límites marcados por los cálculos analíticos, existiendo una pequeña diferencia entre los resultados teóricos y los prácticos, la figura 28 ilustra esquemáticamente este suceso, en el existe un 95 % de valores del método de Montecarlo que están dentro del intervalo analítico calculado.

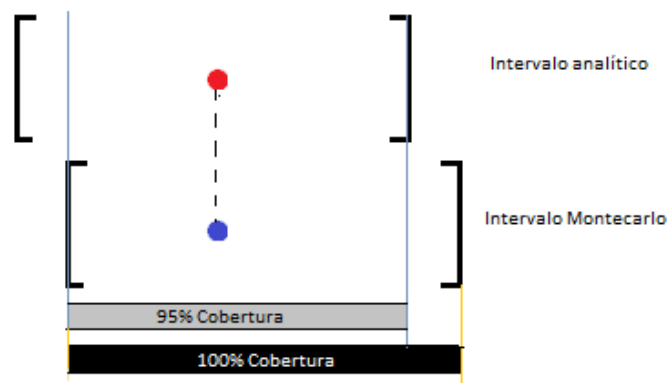


Figura 28. Esquema explicativo sobre la coincidencia de valores entre el cálculo analítico y el cálculo MCM

#### 4.2. Nivel de presión sonora $L_2$

Para la simulación de Montecarlo de esta magnitud se han generado otras 60000 muestras, y como anteriormente se hizo, mediante el *script* de Matlab *L2intento.m*, las figuras resultantes de este proceso no se muestran por ser muy similares a las de la figura 26 y 27.

También se han calculado los valores analíticos del nivel  $L_2$  para cada banda de frecuencia, teniendo en cuenta que en esos cálculos se supuso que los valores del nivel  $L_{1TV}$  y del tiempo de reverberación son *true value*, tal como indica la fórmula 36, es decir que se les considera constantes reales para el cálculo de incertidumbre.

$$L_{2TV} = L_{1TV,2m} - D_{2m,nT} + 10 \log \left( \frac{T_{tv}}{T_0} \right) + Att. Model_{room} \quad (36)$$

Tal y como se hizo en el apartado anterior, observando la tabla 7 se ve que vuelve a ocurrir lo anteriormente explicado, el intervalo de confianza del cálculo analítico no está contenido dentro del intervalo de cobertura de la simulación de Montecarlo debido al intervalo de cobertura del 95 % elegido para la simulación de Montecarlo. Lo que no significa que el Laboratorio Virtual funcione erróneamente sino que existirá en cada medida un 5% de posibilidades de que el valor obtenido esté fuera del nivel de confianza analítico.



## Resultados

Tabla 7. Valores estimados del mensurando y evaluación de la incertidumbre obtenidos tras la implementación del MCM y el cálculo analítico en las medidas de L2.

FRECUENCIA (Hz)	$\overline{\mu}_{analitico}$	$\overline{\mu}_{analitico} - U_{exp}$	$\overline{\mu}_{analitico} + U_{exp}$	$\overline{\mu}_{MCM}$	$Y_{MCMmin}$	$Y_{MCMmax}$
50	37,3	36,6	37,9	36,1	33,1	39,2
63	37,7	37,0	38,4	36,6	33,4	39,7
80	38,9	38,2	39,6	37,8	34,3	41,2
100	39,5	38,8	40,1	38,3	35,4	41,3
125	40,9	40,3	41,6	39,8	37,9	41,7
160	48,5	47,9	49,2	47,4	45,6	49,2
200	50,5	49,8	51,2	49,4	48,0	50,7
250	53,0	52,3	53,7	51,9	50,3	53,4
315	52,2	51,6	52,9	51,1	49,4	52,8
400	51,5	50,9	52,2	50,4	49,2	51,6
500	52,4	51,7	53,0	51,2	49,9	52,6
630	50,0	49,4	50,7	48,9	47,8	50,0
800	45,3	44,7	46,0	44,2	43,1	45,3
1000	44,9	44,3	45,6	43,8	42,4	45,2
1125	45,5	44,9	46,2	44,4	43,3	45,5
1600	49,1	48,5	49,8	48,0	46,8	49,2
2000	48,1	47,4	48,7	46,9	45,9	48,0
2500	41,1	40,4	41,7	40,0	38,9	41,0
3150	38,4	37,7	39,1	37,3	36,1	38,4
4000	34,6	33,9	35,3	33,5	32,3	34,6
5000	32,4	31,7	33,0	31,2	30,0	32,5

### 4.3. Tiempo de reverberación

En la simulación de Montecarlo del tiempo de reverberación se han generado 71000 muestras. El proceso para realizar la simulación sigue siendo similar, realizándose mediante el *script TRintento.m*.

La comparación que se ha realizado en esta magnitud es distinta que en los anteriores casos, ya que, al generarse muestras de tiempo de reverberación a partir tan solo de constantes en segundos y desviaciones típicas, lo que se va a verificar en esta ocasión será que el valor medio calculado a partir de la función de distribución de probabilidad generada en la simulación de Montecarlo es igual que la constante utilizada y la desviación estándar de dicha distribución a la desviación del tiempo de reverberación.

La tabla 8 muestra el resultado. Se confirma que el cálculo de tiempo de reverberación funciona correctamente debido a que los valores medios y las incertidumbres son iguales incluso hasta redondeando al segundo decimal.



Tabla 8. Valores del tiempo de reverberación obtenidos tras la simulación de Montecarlo.

FRECUENCIA (HZ)	$\overline{TR}_{cte}$	$\overline{\sigma}_{cte}$	$\overline{TR}_{MCM}$	$\overline{\sigma}_{MCM}$
50	0,76	0,26	0,76	0,26
63	0,70	0,22	0,70	0,22
80	0,68	0,23	0,68	0,23
100	0,66	0,24	0,66	0,24
125	0,72	0,22	0,72	0,22
160	0,67	0,20	0,67	0,20
200	0,62	0,18	0,62	0,18
250	0,62	0,15	0,62	0,15
315	0,57	0,14	0,57	0,14
400	0,56	0,14	0,56	0,14
500	0,55	0,13	0,55	0,13
630	0,52	0,13	0,52	0,13
800	0,50	0,14	0,50	0,14
1000	0,51	0,14	0,51	0,14
1125	0,52	0,13	0,52	0,13
1600	0,52	0,14	0,52	0,14
2000	0,48	0,12	0,48	0,12
2500	0,47	0,11	0,47	0,11
3150	0,46	0,10	0,46	0,10
4000	0,43	0,09	0,43	0,09
5000	0,39	0,07	0,39	0,07

#### 4.4. Ruido de fondo

Para el ruido de fondo se va a verificar que se cumple el modelo binomial impuesto en la fase de diseño para que aparecieran muestras con niveles más altas que las demás.

Para ello se han extraído 14000 muestras, y utilizando el *script RFintento.m* se van a recorrer todas las bandas de frecuencia de todas las muestras, señalando las que están por encima de un umbral definido en la función. De ese modo, conociendo las muestras que están por encima del umbral, es obvio que las demás están por debajo y se podrá definir un porcentaje de muestras con nivel alto y otro con nivel bajo.

En la figura 29 se puede ver el resultado del programa, que verifica que el modelo binomial está funcionando correctamente.



Figura 29. Ventanas de resultado del *script RFintento.m*



#### 4.5. Diferencia de niveles estandarizada

Por último se ha realizado una comparación de la diferencia de niveles estandarizada obtenida utilizando los resultados de incertidumbre y nivel medio de los apartados 4.1, 4.2 y 4.3, con las constantes de aislamiento de la fachada utilizadas para el cálculo del nivel L2 en el Laboratorio Virtual.

Mediante el script de Matlab *DnTintento.m* se han cargado de un archivo Excel los valores de nivel medio y de incertidumbre combinada calculados mediante la simulación de Montecarlo, entonces mediante la expresión 3 se ha calculado la diferencia de niveles estandarizada por banda de frecuencia a partir de las M muestras generadas por el programa y mediante la expresión  $u_c = \sqrt{u_{c1} + u_{c2} + u_{c3} + \dots}$  se ha calculado la incertidumbre combinada del sistema y multiplicándolo por un factor de sensibilidad  $k=2$ , que se corresponde con el peor de los casos, se ha obtenido al final los resultados mostrados en la tabla 9:

Tabla 9.. Resultados obtenidos de la diferencia de niveles estandarizada y de su incertidumbre a partir de las muestras del programa.

Frecuencia	$D_{2m,nT MC}$	$U_{exp,MCM}$
50	27,3	4,6
63	28,0	4,4
80	28,9	4,7
100	28,4	4,1
125	30,0	2,6
160	28,9	2,4
200	32,3	2,0
250	31,5	2,2
315	26,9	2,8
400	29,0	1,8
500	27,8	1,9
630	27,3	1,7
800	30,3	1,7
1000	30,5	2,0
1125	29,3	1,7
1600	26,3	1,7
2000	28,4	1,5
2500	32,1	1,6
3150	30,9	1,6
4000	30,8	1,6
5000	31,1	1,8

Viendo los resultados, se puede observar que la incertidumbre debida al aislamiento es muy elevada. Esto es debido a que para obtener la incertidumbre de la magnitud final hay que tener en cuenta la existencia de tres incertidumbres distintas, las debidas al nivel L1, L2 y el tiempo de reverberación, provocando que aumente la incertidumbre de medida del aislamiento de la fachada.

Si comparamos el intervalo de valores en los que debería estar el aislamiento  $[D_{nTmin} D_{nTmax}]$  con las constantes de aislamiento utilizadas, como muestra la tabla 10, como cabía esperar los valores de las constantes de aislamiento utilizados en el Laboratorio Virtual se encuentran dentro de los intervalos de valores de diferencia de niveles estandarizada calculados.

## Resultados



Tabla 10. Tabla comparativa de las constantes de aislamiento con los intervalos de confianza de la diferencia de niveles estandarizada.

<b>Frecuencia</b>	<b>D<sub>nTmin</sub></b>	<b>Cte.Aislamiento</b>	<b>D<sub>nTmax</sub></b>
50	22,7	25,3	31,8
63	23,6	26,5	32,4
80	24,2	27,6	33,7
100	24,3	27,2	32,4
125	27,4	28,4	32,7
160	26,5	27,6	31,3
200	30,4	31,5	34,3
250	29,3	30,7	33,7
315	24,1	26,6	29,8
400	27,2	28,8	30,9
500	25,9	27,7	29,7
630	25,6	27,5	29,0
800	28,6	30,7	32,0
1000	28,5	30,8	32,6
1125	27,6	29,8	31,0
1600	24,6	26,8	28,0
2000	26,9	29	29,9
2500	30,6	32,9	33,7
3150	29,4	31,8	32,5
4000	29,2	32,1	32,5
5000	29,3	32,9	32,9



## Resultados



## 5. Prueba del Laboratorio Virtual

Por último, se va a realizar una prueba de ejecución del Laboratorio para mostrar su correcto funcionamiento y se va a calcular el aislamiento de la fachada y la incertidumbre de la medida a partir de las medidas exportadas de éste, tal y como lo haría un usuario final.

Los puntos donde se han colocado los micrófonos se muestran en la figura 30. Se ha elegido un punto de L1 donde se realizarán tres repeticiones, cinco puntos de L2 realizando dos repeticiones en cada punto, tres puntos de TR repitiendo cada medida dos veces por punto y cuatro puntos de RF también con dos repeticiones por punto.

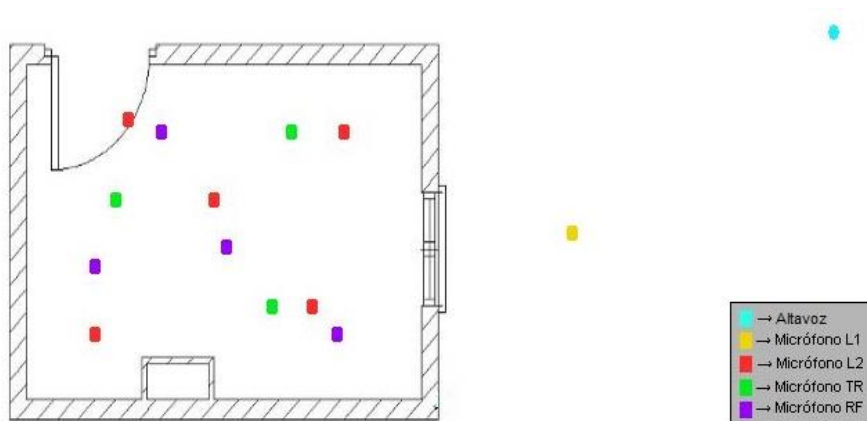


Figura 30. Mapa de los recintos de posición con las posiciones de los puntos elegidas.

### 5.1. Altavoz

El altavoz se ha posicionado de forma que cumpla las especificaciones de cobertura de la norma. De este modo se ha colocado apoyado sobre el suelo y en las coordenadas (6, 5.5, 0), como se puede observar en la figura 31. Realizando dos simples relaciones trigonométricas se puede comprobar que cumple las condiciones de ángulo de cobertura y de distancia a la red, ya que el ángulo  $\alpha = \arctg(6/5) = 47.49^\circ$  y la distancia del altavoz al centro de la fachada es  $d = \text{raíz}(5.5^2 + 6^2) = 8.13$  m, estando en el intervalo que marca la normativa de  $45^\circ \pm 5^\circ$  y los 7 m establecidos como mínimo.

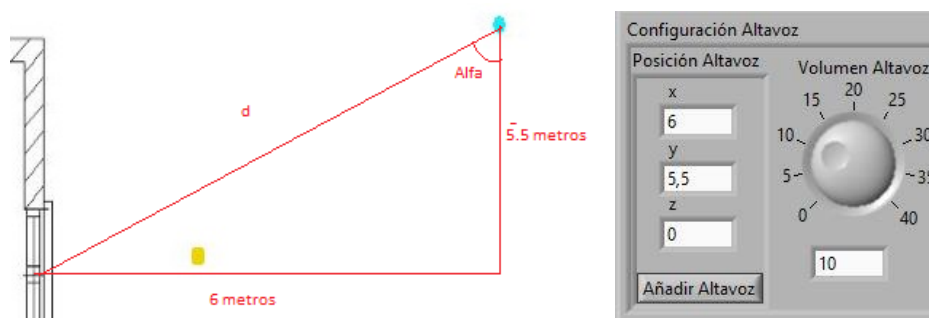


Figura 31. Esquema trigonométrico para el cálculo del posicionamiento del altavoz y captura de la pestaña configuración del altavoz del programa.



## 5.2. Nivel de presión sonora L1

La norma ISO 145-5 especifica que en las medidas en el exterior de la fachada el micrófono se ha de colocar en el centro geométrico de la fachada y a dos metros de distancia respecto a ésta. El centro geométrico de la fachada se encuentra en las coordenadas  $(y, z) = (2.5, 1.5)$  y como ha de estar separado dos metros el valor de la coordenada  $x=2$ .

Una vez colocado el micrófono se realizan tres medidas en esa misma posición obteniendo como resultado las muestras que aparecen en la tabla 11. Para el procesado de esos datos se ha calculado la media logarítmica obteniéndose de este modo el nivel  $L_{1\text{medio}}$ .

Tabla 11. Muestras de L1 obtenidas en el Laboratorio Virtual y su valor medio.

MEDIDA	L1	L1	L1	L1MEDIO
Temperatura(°C)	10,7	10,7	11,0	10,8
Presión (kPa)	93,2	93,4	93,4	93,3
Humedad(%)	33,6	33,8	34,8	34,0
x	2,0	2,0	2,0	2,0
y	2,5	2,5	2,5	2,5
z	1,5	1,5	1,5	1,5
50 Hz	59,2	58,7	57,9	58,6
63 Hz	59,7	60,5	60,8	60,4
80 Hz	63,5	64,5	61,6	63,4
100 Hz	62,4	64,3	63,4	63,4
125 Hz	65,8	66,7	66,0	66,1
160 Hz	72,7	73,6	73,4	73,2
200 Hz	78,9	79,3	79,2	79,1
250 Hz	81,4	80,3	80,7	80,8
315 Hz	76,4	77,3	76,1	76,6
400 Hz	77,7	78,0	77,5	77,7
500 Hz	77,9	77,5	78,2	77,9
630 Hz	75,8	75,1	76,2	75,7
800 Hz	74,5	74,2	73,8	74,2
1000 Hz	73,9	73,9	73,7	73,8
1250 Hz	72,9	73,1	72,6	72,9
1600 Hz	72,6	73,7	73,7	73,4
2000 Hz	75,1	75,5	75,7	75,4
2500 Hz	71,8	72,7	72,3	72,3

Para la evaluación de la incertidumbre combinada se ha calculado la incertidumbre tipo A y tipo B:

- **Incertidumbre tipo A**

Utilizando la desviación típica entre las muestras, el número de muestras y la expresión 13 se obtienen los resultados de incertidumbre mostrados en la tabla 12.

Tabla 12. Desviación típica de las muestras obtenidas en la medición y su incertidumbre tipo A asociada para la medición de L1.

Frecuencia	50 HZ	63 HZ	80 HZ	100 HZ	125 HZ	160 HZ	200 HZ	250 HZ	315 HZ	400 HZ	500 HZ
s	0,66	0,58	1,50	0,93	0,47	0,47	0,23	0,54	0,67	0,27	0,34
$u_A$	0,38	0,33	0,87	0,53	0,27	0,27	0,13	0,31	0,39	0,15	0,20
Frecuencia	630 HZ	800 HZ	1000 HZ	1250 HZ	1600 HZ	2000 HZ	2500 HZ	3150 HZ	4000 HZ	5000 HZ	
s	0,56	0,39	0,12	0,26	0,63	0,29	0,44	0,41	0,82	0,55	
$u_A$	0,33	0,23	0,07	0,15	0,37	0,17	0,26	0,24	0,47	0,32	





• **Incertidumbre tipo B**

Para el cálculo de la incertidumbre tipo B se tienen en cuenta la incertidumbre debida a cada uno de las condiciones ambientales consideradas y la incertidumbre debida a deriva del sonómetro. Para calcular la influencia de la contribución de cada uno de esos factores en este tipo de incertidumbre se utilizan las fórmulas (37), (38), (39) y (40) . Entonces realizando la suma cuadrática con cada una de las contribuciones se obtiene el valor resultante (41). Los resultados se muestran en la tabla 13.

$$u_{temp} = \frac{\delta_{t^{a}max} - \delta_{t^{a}min}}{2\sqrt{3}} \quad (37)$$

$$u_{pres} = \frac{\delta_{pres.max} - \delta_{pres.min}}{2\sqrt{3}} \quad (38)$$

$$u_{hum} = \frac{\delta_{HRmax} - \delta_{HRmin}}{2\sqrt{3}} \quad (39)$$

$$u_{cal} = \frac{\delta_{cal}}{2\sqrt{3}} \quad (40)$$

$$u_{tipoB} = \sqrt{u_{temp}^2 + u_{pres}^2 + u_{hum}^2 + u_{cal}^2} \quad (41)$$

Tabla 13. Cálculo de la incertidumbre tipo B

INCERTIDUMBRE TIPO B	
	Incertidumbre
<b>Utemp</b>	0,002
<b>Upres</b>	0,002
<b>Uhum</b>	0,001
<b>Uderiva</b>	0,095
<b>UB</b>	<b>0,095</b>

En este caso el coeficiente de sensibilidad será la unidad, y por ello para el cálculo de la **incertidumbre combinada** sólo habrá que realizar otra suma cuadrática como la de (41), obteniendo los resultados de la Tabla 14.

$$u_{combinada} = \sqrt{u_{tipoA}^2 + u_{tipoB}^2} \quad (42)$$

Tabla 14. Incertidumbre combinada por banda de frecuencia para la medida de L1.

Frecuencia	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz
<b>Ucombinada</b>	0,39	0,35	0,87	0,54	0,29	0,29	0,16	0,33	0,40	0,18	0,22
Frecuencia	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	
<b>Ucombinada</b>	0,34	0,25	0,12	0,18	0,38	0,19	0,27	0,26	0,48	0,33	



### 5.3. Ruido de fondo

Una vez exportados los valores del ruido de fondo se procesan para poder utilizarlos posteriormente en las correcciones de L2. Los valores de la Tabla 15 muestran los resultados. Al haber realizado dos repeticiones de ruido de fondo en cada punto, se pueden eliminar las muestras que contienen en alguna de sus bandas de frecuencia un nivel mucho mayor que el de las bandas adyacentes y que la misma banda en la repetición de la medida en el mismo punto.

Estas muestras han sido ocasionadas por el generador binomial del ruido de fondo y el objetivo de nuestro modelo es éste, que el técnico detecte las muestras no válidas y las deseche a la hora de hacer cálculos.

Una vez desechadas las muestras se procede a calcular el nivel de ruido de fondo de las muestras restantes mediante una media logarítmica similar utilizando la fórmula 1:

Tabla 15. Medidas de ruido de fondo obtenidas en el ensayo.

RUIDO DE FONDO									
x	5,00	5,00	4,00	4,00	3,00	3,00	1,30	1,30	
y	2,00	2,00	4,00	4,00	2,30	2,30	1,00	1,00	
z	1,50	1,50	1,30	1,30	1,40	1,40	1,50	1,50	RFMEDIO
50 Hz	23,8	26,0	24,3	23,9	25,2	24,4	25,1	25,9	25,0
63 Hz	26,0	25,8	23,7	23,6	25,5	27,1	23,2	25,9	25,3
80 Hz	24,6	26,0	23,3	26,2	25,1	24,0	25,5	26,0	24,9
100 Hz	23,3	23,5	24,3	24,7	25,2	24,9	25,0	24,2	24,6
125 Hz	38,6	23,5	26,0	43,1	26,1	25,4	24,8	24,1	25,3
160 Hz	52,7	23,5	26,4	24,7	23,6	24,4	23,8	25,5	24,5
200 Hz	24,0	25,1	26,4	24,8	27,3	26,2	24,5	24,5	26,0
250 Hz	24,5	26,0	25,9	26,5	26,2	24,7	25,9	24,0	25,8
315 Hz	56,5	26,1	25,8	23,9	26,5	26,9	24,0	51,8	25,9
400 Hz	25,5	24,2	25,6	25,5	23,7	26,3	25,5	26,9	25,2
500 Hz	25,7	23,8	24,3	25,4	24,8	25,7	23,0	23,5	24,4
630 Hz	26,3	24,8	25,9	57,6	25,0	23,5	24,5	26,0	24,8
800 Hz	24,2	25,0	25,4	24,8	24,2	24,1	24,9	23,7	24,8
1000 Hz	25,6	24,6	23,9	26,2	25,5	25,9	25,0	23,0	25,0
1250 Hz	27,1	25,9	25,6	23,7	25,0	24,9	24,7	26,7	25,2
1600 Hz	24,1	25,7	23,2	26,6	25,5	25,8	24,6	23,0	25,1
2000 Hz	24,1	23,9	24,4	23,6	24,1	24,1	24,7	25,2	24,3
2500 Hz	24,5	24,4	25,4	27,2	24,2	24,5	26,1	26,1	25,0
3150 Hz	25,9	26,1	25,6	23,6	24,4	24,1	25,9	23,7	25,3
4000 Hz	23,7	24,3	22,9	24,6	25,3	24,3	24,5	23,7	24,3
5000 Hz	24,6	24,9	26,2	25,7	25,7	23,4	26,2	26,0	25,4



### 5.4. Tiempo de reverberación

Siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 354, se han elegido tres posiciones de micrófono en puntos diferentes de la sala con coordenadas (4.7, 3, 1.5), (2.3, 1.4, 1.5) y (2, 4, 1.5) realizando dos repeticiones en cada punto. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Muestras de TR obtenidas en el Laboratorio Virtual y su valor medio

Datos	Tiempo de Reverberación	Tiempo de Reverberación	Tiempo de Reverberación	Tiempo de Reverberación	Tiempo de Reverberación	Tiempo de Reverberación	TR medio
x	4,70	4,70	2,30	2,30	2,00	2,00	
y	3,00	3,00	1,40	1,40	4,00	4,00	
z	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	
50 Hz	0,81	0,78	0,51	1,26	0,84	0,85	0,84
63 Hz	0,65	0,66	0,81	0,57	0,64	0,78	0,69
80 Hz	0,61	0,67	0,6	0,31	0,98	0,52	0,62
100 Hz	0,64	1,03	0,71	0,59	1,01	0,36	0,72
125 Hz	0,88	0,64	0,9	0,27	0,58	0,74	0,67
160 Hz	0,57	0,48	0,57	0,6	0,68	0,81	0,62
200 Hz	0,58	0,46	0,45	0,84	0,58	0,37	0,55
250 Hz	0,5	0,7	0,65	0,51	0,75	0,55	0,61
315 Hz	0,58	0,5	0,58	0,62	0,69	0,48	0,58
400 Hz	0,64	0,45	0,67	0,54	0,44	0,9	0,61
500 Hz	0,78	0,69	0,61	0,42	0,51	0,54	0,59
630 Hz	0,55	0,45	0,57	0,5	0,67	0,51	0,54
800 Hz	0,49	0,44	0,48	0,24	0,54	0,56	0,46
1000 Hz	0,78	0,28	0,51	0,54	0,52	0,37	0,50
1250 Hz	0,34	0,63	0,34	0,58	0,38	0,5	0,46
1600 Hz	0,63	0,49	0,61	0,53	0,65	0,49	0,57
2000 Hz	0,43	0,61	0,6	0,62	0,44	0,33	0,51
2500 Hz	0,62	0,38	0,45	0,5	0,56	0,32	0,47
3150 Hz	0,69	0,45	0,37	0,59	0,65	0,37	0,52
4000 Hz	0,39	0,23	0,38	0,35	0,36	0,31	0,34
5000 Hz	0,38	0,46	0,35	0,35	0,31	0,48	0,39

Para el cálculo de la incertidumbre asociada al tiempo de reverberación nuestro modelo no ha tenido en cuenta la incertidumbre de tipo B es por eso por lo que no se ha calculado, por lo tanto se calcula la incertidumbre tipo A como en apartados anteriores pero en el momento de calcular la incertidumbre combinada hay que tener en cuenta que el coeficiente de sensibilidad en este caso no es cero, ya que:

$$c_j = \frac{\partial f}{\partial x_j} = \frac{\partial(10 * \log(\frac{T}{0.5}))}{\partial T} = \frac{10}{T * \ln(10)} \quad (43)$$

De forma que la incertidumbre combinada del tiempo de reverberación se calcule como:

$$u_{combinada} = \sqrt{c_{TR}^2 u_{tipoB}^2} \quad (44)$$



Tabla 17. Cálculo de la incertidumbre combinada y expandida de las muestras del TR.

Frecuencia	Desviación	$u_A$	$C_i$	$u_c$
50 Hz	0,24	0,10	5,16	0,51
63 Hz	0,09	0,04	6,34	0,24
80 Hz	0,22	0,09	7,06	0,63
100 Hz	0,26	0,11	6,00	0,63
125 Hz	0,23	0,10	6,50	0,62
160 Hz	0,11	0,05	7,02	0,33
200 Hz	0,17	0,07	7,94	0,54
250 Hz	0,10	0,04	7,12	0,30
315 Hz	0,08	0,03	7,55	0,24
400 Hz	0,17	0,07	7,16	0,50
500 Hz	0,13	0,05	7,34	0,39
630 Hz	0,08	0,03	8,02	0,25
800 Hz	0,12	0,05	9,48	0,45
1000 Hz	0,17	0,07	8,69	0,61
1250 Hz	0,13	0,05	9,41	0,49
1600 Hz	0,07	0,03	7,66	0,23
2000 Hz	0,12	0,05	8,60	0,43
2500 Hz	0,11	0,05	9,21	0,42
3150 Hz	0,14	0,06	8,35	0,48
4000 Hz	0,06	0,02	12,90	0,31
5000 Hz	0,07	0,03	11,18	0,31

### 5.5. Nivel de presión sonora L2

Para la medida del nivel de presión sonora se han elegido cinco puntos de medición en el recinto realizándose dos repeticiones por punto. Tal y como se efectúa en los ensayos presenciales los puntos elegidos no son simétricos, para poder desechar medidas en el caso de que hubiera presencia de ondas estacionarias y se colocaran micrófonos en puntos de máximos de amplitud.

Al extraer las muestras generadas se obtienen las medidas de la Tabla 18, que serán corregidas utilizando las expresiones 4 o 5 y con el ruido de fondo medio calculado en el apartado 5.3, de este modo se obtiene la información del nivel L2 corregido con las que se calculará el L2medio, tal y como se muestra en la Tabla 19.

En la evaluación de la incertidumbre combinada se ha seguido un proceso análogo al mostrado en el apartado 5.2, calculando primero la incertidumbre tipo A utilizando la desviación típica entre las muestras, el número de muestras y la expresión 13, posteriormente la incertidumbre tipo B, dependiente de la instrumentación y por último calculando la incertidumbre combinada utilizando la fórmula 15, obteniendo como resultado la información contenida en las Tablas 20, 21 y 22.



Tabla 18. Muestras de L2 obtenidas en el Laboratorio Virtual

MEDIDA	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2
Temperatura(°C)	21,52	21,54	21,32	21,35	21,88	21,25	21,78	21,60	21,80	21,69
Presión(kPa)	93,43	93,69	93,65	93,24	93,81	93,39	93,19	93,76	93,07	93,83
Humedad(%)	35,14	34,82	34,81	35,18	34,65	35,13	34,37	33,78	33,73	33,83
x	4,50	4,50	1,20	1,20	3,20	3,20	5,00	5,00	1,70	1,70
y	4,20	4,20	4,00	4,00	3,00	3,00	1,00	1,00	1,40	1,40
z	1,50	1,50	1,20	1,20	1,40	1,40	1,30	1,30	1,50	1,50
50 Hz	35,38	36,00	35,03	35,87	35,98	35,86	35,37	35,16	37,68	34,07
63 Hz	36,06	36,65	35,22	36,39	36,94	36,04	35,54	34,22	34,19	35,90
80 Hz	37,09	35,15	39,20	38,95	36,69	36,80	37,71	36,51	35,63	38,42
100 Hz	37,46	37,44	38,73	39,17	37,59	38,59	38,67	36,56	38,15	39,23
125 Hz	38,82	39,20	39,85	39,93	39,71	39,93	38,67	39,21	40,20	39,51
160 Hz	48,20	46,43	47,69	47,17	46,77	47,37	45,72	46,86	47,08	47,19
200 Hz	48,69	48,54	48,93	49,18	48,94	49,60	47,97	48,81	49,44	48,52
250 Hz	51,19	50,78	52,38	52,18	50,54	52,02	50,40	50,97	50,52	51,24
315 Hz	51,34	49,75	51,29	51,58	50,96	51,66	49,65	51,47	50,75	51,20
400 Hz	50,10	49,49	50,55	50,63	50,29	50,27	48,71	49,87	50,25	50,54
500 Hz	50,32	50,60	52,09	51,65	51,06	51,37	50,32	50,92	51,32	51,53
630 Hz	48,63	48,63	48,98	48,78	48,54	49,13	47,43	47,63	49,49	48,26
800 Hz	43,60	43,78	43,81	43,36	43,89	43,61	42,74	42,80	44,59	44,52
1000 Hz	43,05	43,38	44,42	43,94	42,39	43,51	43,13	42,82	43,30	43,47
1250 Hz	43,67	43,98	44,70	44,09	44,29	44,20	44,12	43,52	44,18	43,98
1600 Hz	47,28	47,79	48,07	47,22	47,97	47,43	47,53	47,28	47,41	48,24
2000 Hz	46,05	45,75	46,26	46,68	46,78	46,66	46,26	45,47	46,22	46,34
2500 Hz	39,33	39,49	39,74	39,15	39,52	39,29	38,76	39,06	40,09	39,47
3150 Hz	36,76	37,37	37,62	36,90	36,98	37,37	36,65	36,21	36,84	37,59
4000 Hz	32,86	32,92	33,64	32,56	32,76	32,67	32,50	32,42	33,64	33,32
5000 Hz	31,04	30,59	30,61	30,96	31,01	31,05	30,91	30,73	31,28	31,11

Tabla 19. Muestras de L2 tras su corrección de ruido de fondo y el valor medio de todas ellas.

MEDIDA	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2MEDIO
Temperatura(°C)	21,52	21,54	21,32	21,35	21,88	21,25	21,78	21,60	21,80	21,69	21,57
Presión(kPa)	93,43	93,69	93,65	93,24	93,81	93,39	93,19	93,76	93,07	93,83	93,51
Humedad(%)	35,14	34,82	34,81	35,18	34,65	35,13	34,37	33,78	33,73	33,83	34,54
50 Hz	35,38	36,00	35,03	35,87	35,98	35,86	35,37	35,16	37,68	33,49	35,70
63 Hz	36,06	36,65	34,78	36,39	36,94	36,04	35,54	33,66	33,63	35,90	35,69
80 Hz	37,09	35,15	39,20	38,95	36,69	36,80	37,71	36,51	35,63	38,42	37,40
100 Hz	37,46	37,44	38,73	39,17	37,59	38,59	38,67	36,56	38,15	39,23	38,24
125 Hz	38,82	39,20	39,85	39,93	39,71	39,93	38,67	39,21	40,20	39,51	39,53
160 Hz	48,20	46,43	47,69	47,17	46,77	47,37	45,72	46,86	47,08	47,19	47,09
200 Hz	48,69	48,54	48,93	49,18	48,94	49,60	47,97	48,81	49,44	48,52	48,89
250 Hz	51,19	50,78	52,38	52,18	50,54	52,02	50,40	50,97	50,52	51,24	51,28
315 Hz	51,34	49,75	51,29	51,58	50,96	51,66	49,65	51,47	50,75	51,20	51,02
400 Hz	50,10	49,49	50,55	50,63	50,29	50,27	48,71	49,87	50,25	50,54	50,10
500 Hz	50,32	50,60	52,09	51,65	51,06	51,37	50,32	50,92	51,32	51,53	51,15
630 Hz	48,63	48,63	48,98	48,78	48,54	49,13	47,43	47,63	49,49	48,26	48,59
800 Hz	43,60	43,78	43,81	43,36	43,89	43,61	42,74	42,80	44,59	44,52	43,71
1000 Hz	43,05	43,38	44,42	43,94	42,39	43,51	43,13	42,82	43,30	43,47	43,37
1250 Hz	43,67	43,98	44,70	44,09	44,29	44,20	44,12	43,52	44,18	43,98	44,08
1600 Hz	47,28	47,79	48,07	47,22	47,97	47,43	47,53	47,28	47,41	48,24	47,64
2000 Hz	46,05	45,75	46,26	46,68	46,78	46,66	46,26	45,47	46,22	46,34	46,26
2500 Hz	39,33	39,49	39,74	39,15	39,52	39,29	38,76	39,06	40,09	39,47	39,40
3150 Hz	36,76	37,37	37,62	36,90	36,98	37,37	36,65	36,21	36,84	37,59	37,05
4000 Hz	32,08	32,15	33,00	31,72	31,96	31,85	31,64	31,55	33,00	32,62	32,19
5000 Hz	29,74	29,29	29,31	29,66	29,71	29,75	29,61	29,43	29,98	29,81	29,63



## Prueba del Laboratorio Virtual

Tabla 20. Desviación de las muestras de L2 y cálculo de su incertidumbre tipo A.

Frecuencia	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz
s	1,05	1,17	1,35	0,87	0,51	0,68	0,48	0,73	0,72	0,59	0,59
$u_A$	0,33	0,68	0,78	0,50	0,30	0,39	0,27	0,42	0,42	0,34	0,34
Frecuencia	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	
s	0,64	0,61	0,57	0,33	0,37	0,41	0,37	0,45	0,54	0,22	
$u_A$	0,37	0,35	0,33	0,19	0,21	0,24	0,21	0,26	0,31	0,13	

Tabla 21. Cálculo de la incertidumbre tipo B asociada a L2.

INCERTIDUMBRE TIPO B	
	Incertidumbre
$u_{temp}$	0,003
$u_{pres}$	0,007
$u_{hum}$	0,001
$u_{cal}$	0,095
$u_B$	0,096

Tabla 22. Incertidumbre combinada por banda de frecuencia para la medida de L2.

Frecuencia	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz
$u_c$	0,34	0,68	0,78	0,51	0,31	0,40	0,29	0,43	0,43	0,35	0,35
Frecuencia	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	
$u_c$	0,38	0,37	0,34	0,21	0,23	0,26	0,23	0,28	0,32	0,16	

### 5.6. Aislamiento de la fachada

El cálculo del aislamiento de fachada se llevará a cabo haciendo uso de la expresión (4), correspondiente a la diferencia de niveles estandarizada.

Para los cálculos del mensurando se utilizan los valores medios calculados de cada una de las magnitudes medidas, es decir L1, L2 y TR. Ese valor vendrá acompañado de una incertidumbre combinada total, calculada a partir de las incertidumbres combinadas de cada una de las medidas como se muestra en la fórmula (43), y de una incertidumbre expandida, calculada suponiendo que existen infinitos grados de libertad, y por tanto con un valor de factor de cobertura de dos, como se ve en la fórmula 46.

$$u_{comb,aislamiento} = \sqrt{u_{comb,TR}^2 + u_{comb,L1}^2 + u_{comb,L2}^2} \quad (45)$$

$$u_{E,aislamiento} = k * u_{comb,aislamiento} = 2 * u_{comb,aislamiento} \quad (46)$$

Al final se obtienen como resultado la Tabla 23



Tabla 23. Diferencia de niveles estandarizada, incertidumbre combinada y expandida del ensayo realizado.

DIFERENCIA DE NIVELES ESTANDARIZADA			
Frecuencia	$D_{2m,T}$	$u_{C,aislamiento}$	$U_{E,aislamiento}(dB)$
50 Hz	25,21	0,73	1,45
63 Hz	26,03	0,80	1,60
80 Hz	26,85	1,33	2,66
100 Hz	26,80	0,98	1,96
125 Hz	27,87	0,75	1,50
160 Hz	27,07	0,59	1,19
200 Hz	30,64	0,63	1,26
250 Hz	30,41	0,62	1,24
315 Hz	26,21	0,63	1,26
400 Hz	28,45	0,64	1,28
500 Hz	27,46	0,57	1,14
630 Hz	27,49	0,57	1,13
800 Hz	30,09	0,63	1,25
1000 Hz	30,43	0,70	1,41
1250 Hz	28,46	0,56	1,12
1600 Hz	26,29	0,50	0,99
2000 Hz	29,20	0,53	1,07
2500 Hz	32,64	0,55	1,11
3150 Hz	31,58	0,61	1,23
4000 Hz	31,93	0,66	1,32
5000 Hz	34,12	0,59	1,18

Si calculamos los valores máximos y mínimos del aislamiento obtenido, sumando y restando su incertidumbre expandida, y los comparamos con las constantes utilizadas se comprueba que las constantes elegidas como aislamiento de la fachada están dentro de los márgenes de incertidumbre calculados con las medidas del programa., como se puede ver en le figura 32.

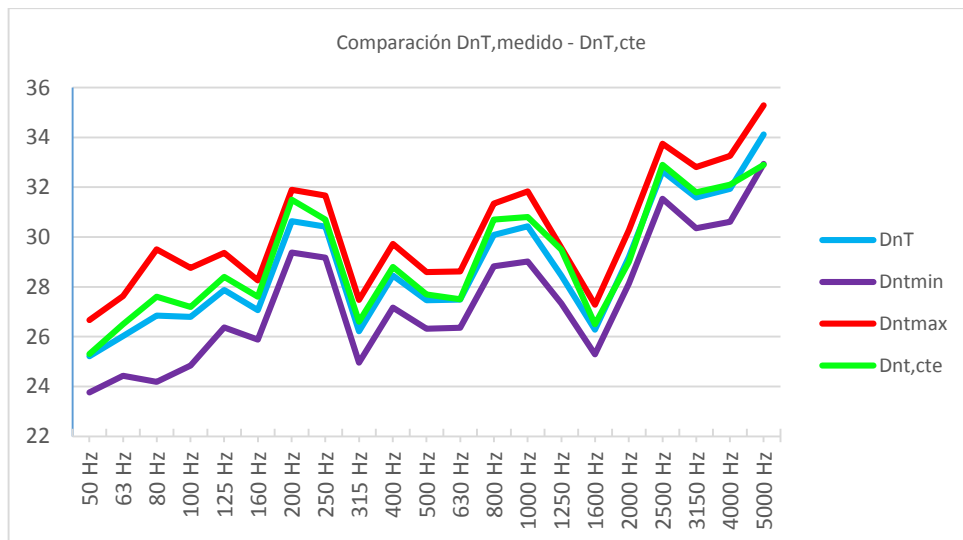


Figura 32. Gráfico relacionando los valores máximos y mínimos del intervalo del aislamiento obtenido con las constantes de aislamiento elegidas para realizar los cálculos dentro del programa.



## Prueba del Laboratorio Virtual

Hay que tener en cuenta que aunque el resultado completo de la diferencia de niveles estandarizada concuerda con los valores de aislamiento utilizados en el programa, existe una pequeña posibilidad de que alguna de las bandas de frecuencia no concuerden al final con el resultado debido a la naturaleza aleatoria del Laboratorio, ya que en nuestros cálculos se ha supuesto un 95 % de confianza.

Tabla 24. Comparación de los límites del ensayo realizado con la constante de aislamiento utilizada en el Laboratorio Virtual para los cálculos matemáticos.

Frecuencia	$D_{2m,Tmin}$	Ctes.Aislamiento	$D_{2m,Tmax}$
50 Hz	23,8	25,3	26,7
63 Hz	24,4	26,5	27,6
80 Hz	24,2	27,6	29,5
100 Hz	24,8	27,2	28,8
125 Hz	26,4	28,4	29,4
160 Hz	25,9	27,6	28,3
200 Hz	29,4	31,5	31,9
250 Hz	29,2	30,7	31,7
315 Hz	25,0	26,6	27,5
400 Hz	27,2	28,8	29,7
500 Hz	26,3	27,7	28,6
630 Hz	26,4	27,5	28,6
800 Hz	28,8	30,7	31,3
1000 Hz	29,0	30,8	31,8
1250 Hz	27,3	29,5	29,6
1600 Hz	25,3	26,5	27,3
2000 Hz	28,1	29,0	30,3
2500 Hz	31,5	32,9	33,7
3150 Hz	30,4	31,8	32,8
4000 Hz	30,6	32,1	33,3
5000 Hz	32,9	32,9	35,3





## 6. Conclusiones y futuro

### 6.1. Conclusiones

En este proyecto se ha desarrollado un Laboratorio Virtual que permite la simulación de ensayos acústicos de aislamiento de fachadas según la norma UNE-EN ISO 145-5. Para su implementación se ha utilizado el entorno de programación gráfica LabVIEW por su relativa sencillez.

El objetivo principal del proyecto era implementar una herramienta funcional en la que existiera una reproducción relativamente realista de las condiciones de un ensayo acústico presencial, para comprobar si el Laboratorio cumplía esos requisitos se propusieron los siguientes objetivos:

- **Condiciones del ensayo:** Aunque el programa no tiene en cuenta todas las posibles situaciones de un ensayo presencial, puesto que la modelización matemática de éstas puede ser una tarea muy compleja. Se han tenido en cuenta las condiciones atmosféricas del ensayo, la atenuación en el exterior y la atenuación en el interior. Y gracias a que el programa está basado en métodos numéricos de carácter aleatorio, se han podido implementar otras situaciones como muestras de ruido de fondo que son necesario rechazar por su alto nivel o muestras en las que algunas bandas de frecuencia mostraban un nivel anómalo, algo que ocurre en los ensayos presenciales.
- **Comprobación de resultados del programa:** El Laboratorio ha quedado adecuadamente validado estadísticamente gracias a la comparación de cálculos analíticos, que salían realizando un estudio teórico, con los resultados de una simulación de Montecarlo que aunque a priori no concordaban, tras un estudio de las suposiciones no del todo correctas que se habían realizado en un primer momento y su corrección, finalmente sí que fue satisfactorio.
- **Prueba del programa:** Se ha realizado un ensayo virtual para demostrar lo que se obtiene del programa, y los cálculos que se pueden realizar con esos datos. Se ha hecho una evaluación de la incertidumbre de las medidas mediante el método tradicional, y se ha demostrado una vez más que el programa se comporta como se pretendía en su fase de diseño obteniendo los resultados esperados.

A tenor de los resultados del programa queda demostrado que el uso de este tipo de software puede llegar a ser un complemento, o incluso una opción independiente en el futuro, para llevar a cabo los ejercicios de intercomparación permitiendo de este modo rebajar los costes que generan este tipo de ensayos a los laboratorios. Además un laboratorio similar a este podría llegar a ser realmente útil para la docencia, ya que ayudaría a los alumnos a interpretar las distintas normas técnicas de medición acústica, así como el aprendizaje en el muestreo de los resultados de las medidas y el cálculo de las incertidumbres. Por otra parte, este Laboratorio Virtual podría utilizarse para verificar y evaluar las competencias técnico-prácticas de los futuros técnicos de laboratorios de ensayos acústicos, así como para determinar el grado de conocimiento en técnicas de medida de los estudiantes universitarios de la rama de ingeniería acústica.

Debido a la novedad de un Laboratorio Virtual para realizar e-comparisons tanto a nivel profesional como educativo, están en proceso de escritura dos artículos orientados al ámbito académico y al ámbito profesional. Teniendo la intención de que se publique el primero de ellos en la edición de *The Journal of the Acoustical Society of America (JASA)* orientado a la educación.



## Conclusiones

En la realización de las pruebas se han encontrado defectos que deberían ser subsanados en el futuro para que el programa diera resultados completamente comparables con los obtenidos en un ensayo presencial:

- **Ruido de fondo:** Aunque el modelo binomial implementado para la generación de medidas de ruido de fondo funciona correctamente, sería conveniente realizar un estudio estadístico más profundo sobre muestras de ensayos presenciales, de forma que se pueda proponer un porcentaje de cobertura óptimo y así tener un generador de muestras de ruido de fondo que se corresponda en mayor nivel a la realidad.
- **Calibración:** Se podría implementar otra funcionalidad que en el caso de que el proceso de verificación de la calibración no fuera el correcto las medidas presentarían una incertidumbre mucho mayor. Es decir, que en el programa el proceso de calibración tuviera más peso.

### 6.2. Trabajos en el futuro

En este apartado se presentan las futuras líneas de trabajo propuestas para seguir desarrollando el concepto de e-comparison, así como la mejora de este programa:

- **Orientación educativa:** Debido los impedimentos que suele encontrar el alumno universitario para el uso de instrumentación acústica y manejo de la normativa internacional, sería interesante la reorientación de este programa al ámbito educativo. De forma que el alumno pueda utilizar el programa como apoyo al aprendizaje adquirido en las clases teóricas y prácticas de la titulación y de este modo prepararse en materia práctica a un nivel de competencia suficiente para incorporarse al mercado laboral.
- **Ampliación del concepto e-comparison:** Ampliar el concepto de intercomparación virtual llevándolo a otros tipos de ensayos acústicos como el tiempo de reverberación de un recinto, aislamiento entre locales o aislamiento al ruido de impacto.
- **Aumentar la versatilidad del programa:** Puede ser interesante aumentar la versatilidad del programa añadiendo diversas opciones que van desde poder guardar las gráficas representadas o mejorar la interfaz de usuario, a una versatilidad profesional mayor, permitiendo que el futuro organizador de la intercomparación elija el mapa a utilizar y automáticamente se reajusten los parámetros relativos a las distancias del programa.
- **Mejoras técnicas del programa:** Se propone como futura implementación para este programa mejorar el modelo de ruido de fondo elegido, de forma que además de generar muestras defectuosas el ruido de fondo tenga efecto en el nivel de presión sonora presente dentro de la sala y aparezcan muestras no válidas. También se propone implementar nuevas funcionalidades al calibrador, de forma que en el caso de realizar la calibración si esta no es correcta aparezcan altas incertidumbres si no se reinicia el laboratorio.
- **Implementación a otras plataformas:** Debido a que la idea de una e-comparison, es ahorrar costes y dinero, es interesante la implementación del Laboratorio Virtual a un navegador web, de este modo podría enviarse el enlace web a los técnicos de laboratorio y ellos realizar el ensayo desde su lugar de trabajo.
- **Actualizar programa con futuras normativas:** Debido a que actualmente se está revisando la normativa ISO 140-x, podría ser interesante actualizar el programa con la futura normativa que está proyectando AENOR con nombre *PNE-prEN ISO 1683-1*.



## Referencias

- [1] AENOR, "UNE-EN ISO 145-5." 1999.
- [2] W. H. Organization, *NIGHT NOISE GUIDELINES FOR EUROPE*. Denmark, 2009.
- [3] M. M. P. S. SA, "Noise pollution: non-auditory effects on health," *Brit Med Bull*, vol. 68, pp. 243–257, 2003.
- [4] S. Pirrera, E. De Valck, and R. Cluydts, "Nocturnal road traffic noise: A review on its assessment and consequences on sleep and health," *Environment international*, vol. 36, no. 5, pp. 492–498, 2010.
- [5] P. Tassi, O. Rohmer, S. Schimchowitsch, A. Eschenlauer, A. Bonnefond, F. Margiocchi, F. Poisson, and A. Muzet, "Living alongside railway tracks: Long-term effects of nocturnal noise on sleep and cardiovascular reactivity as a function of age," *Environment international*, vol. 36, no. 7, pp. 683–689, 2010.
- [6] E.-M. Elmenhorst, S. Pennig, V. Rolny, J. Quehl, U. Mueller, H. Maaß, and M. Basner, "Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: Sleep, psychomotor performance, and annoyance," *Science of The Total Environment*, vol. 424, no. 0, pp. 48–56, 2012.
- [7] D. A. Black, J. A. Black, T. Issarayangyun, and S. E. Samuels, "Aircraft noise exposure and resident's stress and hypertension: A public health perspective for airport environmental management," *Journal of Air Transport Management*, vol. 13, no. 5, pp. 264–276, 2007.
- [8] "DIRECTIVE 2002/49/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL." 2002.
- [9] M. de Fomento - Gobierno de España, *Documento Básico HR - Protección frente al ruido*. 2009.
- [10] M. Recuero López, *Acústica Arquitectónica Aplicada*. Paraninfo Edirorial, 2002, p. 792.
- [11] "ILAC - Home," vol. 2013, no. 7/22/2013. .
- [12] "Entidad Nacional de Acreditación ENAC," vol. 2013, no. 24/07/2013. 2013.
- [13] "ISO/IEC 17025 -General requirements for the competence of testing and calibration laboratories." 2005.
- [14] "ISO/IEC 17043:2010 - Conformity assessment. General requirements for proficiency testing." 2010.
- [15] R. P. C. Asensio I. Pavón, "E-Comparisons: A new approach to Round Robin Tests for environmental noise assessment in transport infrastructures." 2011.
- [16] JCGM, "JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the ' Guide to the expression of uncertainty in measurement' - Propagation of distributions using a Monte Carlo method."2008.



## Referencias

- [17] JCGM, "JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement." 2008.
- [18] R. A. Española, *Diccionario de la Lengua Española*, 22ª ed. Espasa Libros, 2001, p. 2448.
- [19] R. Of, T. Draft, A. R. E. Invited, T. O. Submit, W. T. Comments, N. Of, A. N. Y. Relevant, P. Rights, O. F. Which, T. A. R. E. Aware, I. N. Addition, T. O. Their, E. As, B. Acceptable, F. O. R. Industrial, U. Purposes, D. Guides, M. A. Y. On, O. Have, T. O. Be, C. In, T. H. E. Light, O. F. Their, P. To, B. Documents, and T. O. Which, "International vocabulary of basic and general terms in metrology ( VIM )," no. Dguide 99999, 2004.
- [20] Epidat 4, "Ayuda de distribuciones de probabilidad," 2013. [Online]. Available: [http://www.sergas.es/gal/documentacionTecnica/docs/SaudePublica/Apli/Epidat4/Ayuda/Distribuciones de probabilidad.pdf](http://www.sergas.es/gal/documentacionTecnica/docs/SaudePublica/Apli/Epidat4/Ayuda/Distribuciones%20de%20probabilidad.pdf).
- [21] D. S. Moore, "Estadística aplicada básica," in in *The Basic Practice of Statistics*, 2ª ed., A. Bosch, Ed. 2005, p. 874.
- [22] CIPM, "Recomendación INC-1." 1980.
- [23] M. Carlo, "JCGM 101 : 2008 Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the ' Guide to the expression of uncertainty in measurement ' — Propagation of distributions using a Monte Carlo method," 2008.
- [24] C. Díaz and A. Pedrero, "The reverberation time of furnished rooms in dwellings," *Applied Acoustics*, vol. 66, no. 8, pp. 945–956, Aug. 2005.







## ANEXO B: Definiciones

### Metrología

A continuación se definen las definiciones básicas de metrología extraídos de la VIM:

- **Valor verdadero:** *Valor compatible con la definición de una magnitud particular dada. Se obtendría mediante una medición perfecta, luego es indeterminado por naturaleza.*
- **Mensurando:** *Magnitud sometida a medición.*
- **Repetibilidad:** *Grado de concordancia entre resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando, realizadas bajo las mismas condiciones de medida.*
- **Reproducibilidad:** *Grado de concordancia entre resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando, realizadas bajo diferentes condiciones de medida.*
- **Calibración:** *Conjunto de operaciones que establecen, en unas condiciones determinadas, la relación que existe entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento y los correspondientes realizados por patrones.*
- **Medida:** *Proceso experimental de obtención de información sobre la magnitud de una cantidad.*
- **Intervalo de cobertura:** *Intervalo de valores que pueden ser atribuidos a una cantidad, y basándose en la información disponible, se relacionan con una alta probabilidad.*

### LabVIEW

Se muestran definiciones utilizadas comúnmente en los entornos de programación gráfica y especialmente en el entorno LabVIEW.

- **Cluster:** Son tipos de datos compuestos por varios elementos de distintos tipos. Son lo equivalente a lo que se denomina estructuras en los lenguajes de programación orientada objetos. En LabVIEW se utilizan cuando interesa unir varios tipos de datos bajo el mismo nombre, siendo muy práctico para el transporte de datos en el diagrama.
- **Evento:** Son sucesos destacables y que desencadenan una acción dentro de un programa de LabVIEW, como por ejemplo presionar el ratón, pulsar un botón de la interfaz o pulsar una tecla del teclado.
- **VI:** *Virtual Instrument* o Instrumento Virtual. Continuando con la comparación con los lenguajes de programación orientada a objetos un VI sería comparable a una clase. En este entorno de programación cuando se realiza un programa relativamente complejo, las tareas se subdividen, de forma que cada una de ellas sea realizada por VI independientes.



Anexo B





## ANEXO C: Manual de instalación y uso

### Requisitos mínimos

Los requisitos mínimos para poder ejecutar el programa son los mismos que los requeridos para la instalación del *Run-Time Engine* de LabView, que son:

<b>Procesador:</b>	Pentium III/Celeron 856 MHz
<b>RAM:</b>	256 MB
<b>Resolución:</b>	1024x768 pixeles
<b>Sistema Operativo:</b>	Windows 8/7/Vista Windows XP SP3 Windows Server 2003/2008
<b>Espacio en disco:</b>	353 MB

### Instalación

Existen diferentes dos opciones distintas para la instalación del programa:

- PC con NI LabVIEW 2010 instalado:  
Si su PC ya tiene instalado el entorno de desarrollo LabVIEW existen dos posibles formas de ejecutar el programa, la primera mediante un archivo ejecutable sin necesidad de instalación y, la segunda mediante un proceso de instalación con un archivo de *setup*. Dentro del CD adjunto, dentro de la carpeta *Programa*, puede encontrar una distribución de carpetas similar a la de la figura, en la que se marcan las carpetas en las que debería navegar para ejecutar o instalar el Laboratorio Virtual.

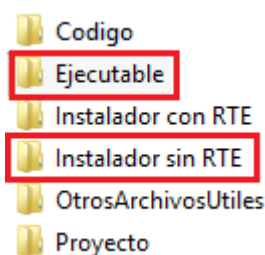


Figura 33. Estructura de carpetas donde se encuentran las distintas opciones del programa

- PC sin NI LabVIEW 2010 no instalado:  
Si su PC no tiene instalado el entorno de desarrollo LabVIEW será necesario realizar la instalación del programa, en el que además de instalar el Laboratorio Virtual se instalará el *Run Time Engine* de LabVIEW, necesario para que programas desarrollados en esta plataforma funcionen en PCs sin LabVIEW instalado. Para la instalación tendrá que ir a la ruta *\*\InstaladorconRTE\SetupWithRTE\Volume\setup.exe* y seguir los pasos para la instalación. En primer lugar se encontrará con una pantalla de bienvenida, en la que una vez pulse siguiente podrá elegir las rutas de instalación del programa y del *RTE*, como se muestra en la figura 34.



## Anexo C

**Destination Directory**  
Select the primary installation directory.

All software will be installed in the following location(s). To install software into a different location(s), click the Browse button and select another directory.

Directory for IsolationTrialsLab  
C:\Program Files (x86)\IsolationTrialsLab\ Browse...

Directory for National Instruments products  
C:\Program Files (x86)\National Instruments\ Browse...

<< Back Next >> Cancel

Figura 34. Ventana de instalación del software que permite seleccionar el lugar del disco duro donde va a realizar la instalación.

A continuación deberá aceptar las licencias de National Instruments para completar la instalación.

**License Agreement**  
You must accept the license(s) displayed below to proceed.

**CONTRATO DE LICENCIA DE SOFTWARE DE NATIONAL INSTRUMENTS**

AVISO DE INSTALACIÓN: EL PRESENTE INSTRUMENTO CONSTITUYE UN CONTRATO. ANTES DE QUE PROCEDA A DESCARGAR EL SOFTWARE Y/O A COMPLETAR LA INSTALACIÓN, ROGAMOS LEA ATENTAMENTE ESTE CONTRATO. AL DESCARGAR EL SOFTWARE Y/O HACER CLIC EN EL BOTÓN CORRESPONDIENTE PARA COMPLETAR EL PROCESO DE INSTALACIÓN, USTED ESTÁ CONFORME CON LOS TÉRMINOS DEL PRESENTE CONTRATO Y CONSIENTE OBLIGARSE POR EL PRESENTE CONTRATO. EN CASO DE QUE NO DESEE CONVERTIRSE EN PARTE DEL PRESENTE CONTRATO NI ESTAR OBLIGADO POR LA TOTALIDAD DE SUS TÉRMINOS Y CONDICIONES, ROGAMOS HAGA CLIC EN EL BOTÓN CORRESPONDIENTE PARA CANCELAR EL PROCESO DE INSTALACIÓN, NO INSTALE NI USE EL SOFTWARE Y DEVUELVA EL SOFTWARE EN EL PLAZO DE TREINTA (30) DÍAS A PARTIR DE LA RECEPCIÓN DEL SOFTWARE (CON TODO EL MATERIAL ESCRITO QUE LO ACOMPAÑA, JUNTO CON SUS ENVOLTORIOS) AL LUGAR EN EL QUE LOS ADQUIRIÓ. TODA DEVOLUCIÓN ESTARÁ SUJETA

I accept the License Agreement.  
 I do not accept the License Agreement.

<< Back Next >> Cancel

Figura 35. Para realizar la instalación debe aceptar los términos de licencia de National Instruments.



## Manual de uso

Una vez que ha ejecutado el software *IsolationTrialsLab* y se ha abierto en su PC podrá observar una pantalla de inicio como la de la figura 36, en la que se pueden distinguir dos zonas diferenciadas de la interfaz estando ambas distribuidas por un mecanismo de pestañas.

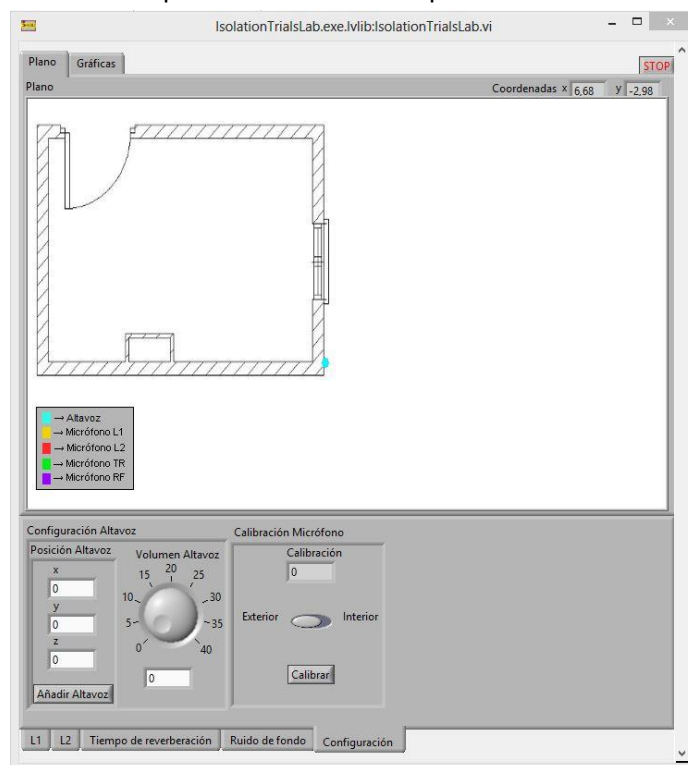


Figura 36. Pantalla principal del Laboratorio Virtual *IsolationTrialsLab*.

La **sección superior** es la zona dedicada a la visualización gráfica de las medidas que se realicen en el programa, de este modo se dispone de una pestaña “*Plano*” mediante la cual se puede visualizar un plano esquemático del recinto donde se muestran los puntos de medición empleados en el ensayo, como se puede ver en la figura 37, y una pestaña “*Gráfica*”, mostrada en la figura 38, en la que puede visualizar en forma de gráfica los niveles y/o tiempos de las medidas realizadas con distintas posibilidades de configuración, como mostrar todas las medidas realizadas hasta el momento, o sólo el último número de ellas que elija el usuario.

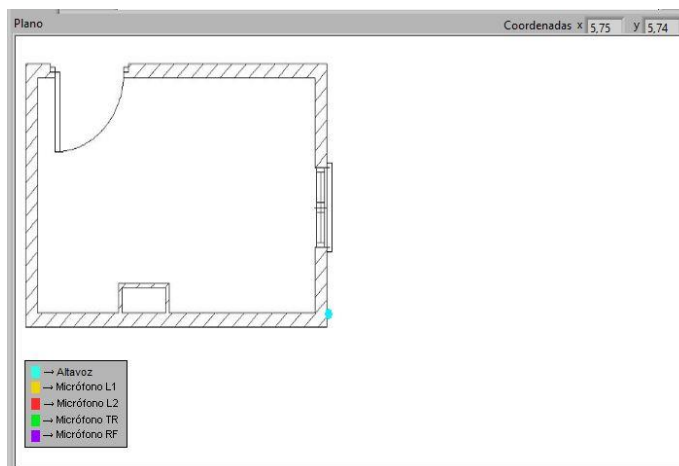


Figura 37. Sección superior, pestaña *Plano*, que muestra el plano del recinto donde se realiza el ensayo.





Para añadir medidas bastará con hacer *click* en el botón insertar o bien pulsar el punto en el que quiere añadir una posición microfónica en el plano del recinto, apareciendo la ventana emergente de la figura 41.

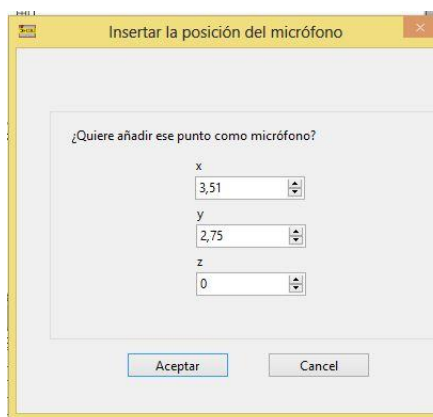


Figura 41. Ventana emergente utilizada para medir en un punto elegido por el usuario.

La pestaña configuración, mostrada en la figura 42, permite añadir nuevas posiciones de altavoz, dando opciones a modificar el volumen que tiene éste. También permite realizar la calibración de los micrófonos a utilizar, diferenciando si se encuentra el técnico en el exterior o en el interior del recinto.



Figura 42. Sección inferior. Pestaña Configuración, permite calibrar el micrófono y configurar el altavoz.



## Anexo C



## ANEXO D: Estructura de datos detallada

En la siguiente tabla se muestra de una forma más detallada la estructura de datos utilizada para transportar la información dentro del Laboratorio Virtual:

Nombre	Tipo de dato	Descripción	Raíz:
<b>Cluster Principal</b>	Cluster	Cluster principal que contiene todos los demás tipos de datos	
<b>Tipo de medida</b>	Cadena de caracteres (String)	Puede tomar el valor L1,L2,TR y RF e indica el tipo de medida contenido en el cluster	Cluster Principal
<b>Condiciones Ambientales</b>	Cluster	Cluster que contiene el valor de las condiciones ambientales de la medida	Cluster Principal
<b>Temperatura</b>	Numérico (double)	Contiene la temperatura de la medida	Condiciones Ambientales
<b>Humedad relativa</b>	Numérico (double)	Contiene la humedad relativa de la medida	Condiciones Ambientales
<b>Presión Atmosférica</b>	Numérico (double)	Contiene la presión atmosférica de la medida	Condiciones Ambientales
<b>Medida</b>	Vector numérico (double array)	Contiene el valor de los niveles de presión de la medida desde 50Hz hasta 5kHz, por lo que tiene 21 elementos.	Cluster Principal
<b>Altavoz</b>	Cluster	Contiene la información relativa al altavoz utilizado en la medida	Cluster Principal
<b>Posición</b>	Cluster	Contiene la posición del altavoz	Altavoz
<b>X</b>	Numérico (double)	Coordenada x	Posición
<b>Y</b>	Numérico (double)	Coordenada y	Posición
<b>Z</b>	Numérico (double)	Coordenada z	Posición
<b>Añadir</b>	Lógico (boolean)	Vale <i>true</i> en el momento de añadir el altavoz, si no <i>false</i>	Posición
<b>Volumen</b>	Numérico (double)	Contiene el valor de la ganancia en dB que se le aplica al altavoz.	Altavoz
<b>Micrófono1</b>	Cluster	Contiene la información de un micrófono si está colocado en el exterior de la fachada.	Cluster Principal
<b>X</b>	Numérico (double)	Coordenada x	Micrófono1
<b>Y</b>	Numérico (double)	Coordenada y	Micrófono1



## Anexo D

<b>Z</b>	Numérico (double)	Coordenada z	Micrófono1
<b>añadir</b>	Lógico (boolean)	Vale <i>true</i> en el momento de añadir la posición de micrófono	Micrófono1
<b>Micrófono2</b>	Cluster	Contiene la información de un micrófono si está colocado en el interior del recinto	Cluster Principal
<b>X</b>	Numérico (double)	Coordenada x	Micrófono2
<b>Y</b>	Numérico (double)	Coordenada y	Micrófono2
<b>Z</b>	Numérico (double)	Coordenada z	Micrófono2
<b>añadir</b>	Lógico (boolean)	Vale <i>true</i> en el momento de añadir la posición de micrófono	Micrófono2