



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL Y ANOVA APLICADOS A LA  
IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL ABSORBENTE ACÚSTICO MÁS EFICIENTE DE UN  
SISTEMA MASA-MUELLE-MASA PARA LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES  
OCUPACIONALES PROVOCADAS POR EL RUIDO.**

**Jonathan Efren Alvarez Cacacho**

Asesorado por el Msc. Ing. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco

Guatemala, marzo de 2021



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL Y ANOVA APLICADOS A LA  
IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL ABSORBENTE ACÚSTICO MÁS EFICIENTE DE UN  
SISTEMA MASA-MUELLE-MASA PARA LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES  
OCUPACIONALES PROVOCADAS POR EL RUIDO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JONATHAN EFREN ALVAREZ CACACHO**

ASESORADO POR EL MSC. ING. EDWIN ADALBERTO BRACAMONTE OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO INDUSTRIAL**

GUATEMALA, MARZO DE 2021



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobar Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Selvin Estuardo Joachin Juárez
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Jerez Juárez
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Federico Mijangos Martínez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL Y ANOVA APLICADOS A LA  
IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL ABSORBENTE ACÚSTICO MÁS EFICIENTE DE UN  
SISTEMA MASA-MUELLE-MASA PARA LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES  
OCUPACIONALES PROVOCADAS POR EL RUIDO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 8 de febrero de 2021.

**Jonathan Efren Alvarez Cacacho**





## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por acompañarme siempre, ser mi guía y darme sabiduría.
<b>Mis padres</b>	Douglas Alvarez y Wendy Cacacho por su amor y apoyo incondicional.
<b>Mis abuelos</b>	Por ser parte de mi éxito, especialmente mi abuela Olimpia García (q. d. e. p.).
<b>Mis tíos</b>	Por sus bendiciones y cariño en todo momento.
<b>Mis tías</b>	Por apoyarme, cuidarme y siempre estar conmigo, especialmente mis tías Isabel e Imelda García (q. d. e. p.).



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por brindarme la oportunidad de formarme como un profesional de esta gloriosa casa de estudios.
<b>Escuela de Estudios de Postgrado</b>	Por brindarme el conocimiento y las herramientas profesionales necesarias.
<b>Ing. Edwin Bracamonte</b>	Por apoyarme a seguir una maestría y por su asesoría en este trabajo.
<b>Ing. William Fagiani</b>	Por su importante ayuda y consejos en su experiencia como experimentador.
<b>Mis compañeros de la maestría y licenciatura</b>	Por hacer de estos años, una experiencia amena.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	9
3.1. Contexto general .....	9
3.2. Descripción del problema .....	10
3.3. Formulación del problema .....	10
3.4. Delimitación del problema .....	11
4. JUSTIFICACIÓN .....	13
5. OBJETIVOS .....	15
5.1. General.....	15
5.2. Específicos .....	15
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	17
7. MARCO TEÓRICO.....	19
7.1. Diseño y análisis de experimentos .....	19

7.1.1.	Prueba de hipótesis para datos pareados .....	21
7.1.2.	Análisis de varianza de un único factor .....	22
7.1.3.	Supuestos que debe cumplir un análisis de varianza.....	29
7.1.3.1.	Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov.....	29
7.1.3.2.	Prueba de homocedasticidad de Bartlett.....	31
7.1.4.	Contrastes para las medias de un experimento de un factor .....	32
7.1.4.1.	Método de Tukey.....	33
7.1.4.2.	Método de Duncan .....	33
7.1.4.3.	Método de Hsu .....	34
7.1.5.	Diseños factoriales .....	35
7.1.6.	Análisis de varianza de dos factores .....	36
7.1.7.	Covariables .....	37
7.2.	El ruido.....	39
7.2.1.	Niveles del ruido.....	39
7.2.2.	Medición del ruido .....	40
7.2.3.	Legislación internacional y nacional sobre el ruido .....	42
7.2.4.	Prácticas en el control de ruido en la industria .....	44
7.2.4.1.	Sistemas masa-muelle-masa .....	46
7.2.4.2.	Espuma acústica .....	47
7.2.4.3.	Paneles acústicos .....	48
7.2.5.	Enfermedades ocupacionales causadas por la exposición al ruido.....	48
8.	PROPUESTA ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	51

9.	METODOLOGÍA.....	55
9.1.	Características del estudio .....	55
9.2.	Unidades de análisis .....	56
9.3.	Variables.....	56
9.4.	Fases de estudio .....	58
9.4.1.	Fase 1: revisión de literatura.....	58
9.4.2.	Fase 2: gestión para la recolección de la información .....	58
9.4.3.	Fase 3: recolección de la información .....	60
9.4.4.	Fase 4: análisis de la información.....	62
9.4.5.	Fase 5: interpretación de la información.....	64
9.4.6.	Fase 6: elaboración de informe final.....	64
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	65
11.	CRONOGRAMA.....	69
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	71
12.1.	Recursos financieros y equipo de medición .....	71
12.2.	Instalaciones.....	72
13.	REFERENCIAS.....	73
14.	APÉNDICES.....	77
15.	ANEXOS .....	79





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Modelo general experimental .....	19
2.	Diseño de un análisis de un solo factor .....	23
3.	Criterio de decisión F de fisher.....	27
4.	Zona de aceptación y rechazo Kolmogorov-Smirnov .....	31
5.	Decibelímetro .....	41
6.	Comportamiento del ruido .....	45
7.	Estructura sistema masa-muelle-masa .....	47
8.	Plano de medición.....	61
9.	Cronograma del experimento .....	69

### TABLAS

I.	Resumen análisis de varianza de un factor.....	28
II.	Resumen análisis de varianza de dos factores .....	37
III.	Resumen análisis de covarianza .....	38
IV.	Nivel y tiempo máximo de exposición.....	44
V.	Variables del estudio .....	57
VI.	Diseño factorial.....	61
VII.	Recursos financieros y equipo .....	71



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>dB</b>	Decibeles
<b><math>S_d</math></b>	Desviación estándar muestral
<b><math>\sigma</math></b>	Desviación estándar poblacional
<b><math>\chi_0^2</math></b>	Distribución Chi Cuadrado
<b><math>t_0</math></b>	Distribución t de Student
<b><math>F</math></b>	Distribución F de Fisher
<b><math>\epsilon</math></b>	Espesor
<b><math>v_\epsilon</math></b>	Grados de libertad del error
<b><math>v_T</math></b>	Grados de libertad del fenómeno
<b><math>v_\tau</math></b>	Grados de libertad del tratamiento
<b><math>H_1</math></b>	Hipótesis alterna
<b><math>H_0</math></b>	Hipótesis nula
<b><math>\bar{d}</math></b>	Media muestral
<b><math>\mu</math></b>	Media poblacional
<b>mm</b>	Milímetros
<b><math>L</math></b>	Nivel de exposición al ruido
<b><math>t</math></b>	Niveles del factor
<b><math>r</math></b>	Repeticiones por factor.
<b><math>T</math></b>	Temperatura
<b><math>\Delta t</math></b>	Tiempo máximo de exposición



## GLOSARIO

<b>ANOVA</b>	Análisis de Varianza.
<b>Decibeles</b>	Unidad utilizada para cuantificar la intensidad del ruido.
<b>Efluente</b>	Salida de aguas residuales con desechos sólidos.
<b>Experimento</b>	Cambios en las condiciones de un proceso o sistema para medir el efecto en el resultado.
<b>Factor</b>	Variabes que se investigan en un experimento, con el fin de identificar su influencia en el resultado.
<b>Homocedasticidad</b>	Condición de varianza constante a lo largo del tiempo para todo análisis de varianza.
<b>Kolmogorov</b>	Prueba de bondad para estimar el ajuste a una distribución normal.
<b>Muestra pareada</b>	Muestras que se obtienen por pares y no son independientes.
<b>Nivel</b>	Diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño de experimentos.

<b>Post Hoc</b>	Análisis de Varianza.
<b>Potencia de prueba</b>	Probabilidad de que la hipótesis nula no sea aceptada cuando la hipótesis alternativa es verdadera
<b>Ruido</b>	Sonido inarticulado sin ritmo y genera incomfort.
<b>Tratamiento</b>	Combinación de los niveles de todos los factores estudiados en el experimento.

## RESUMEN

En el presente trabajo se describe la metodología para elaborar un diseño experimental y un análisis de varianza con el fin de identificar qué tipo de material absorbente acústico, es el más eficiente en los sistemas masa-muelle-masa y con ello lograr la prevención de las enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.

En la primera parte del trabajo, se describen los diferentes antecedentes de estudios similares sobre la exposición al ruido y los diseños experimentales, fuentes importantes para el desarrollo del planteamiento del problema. La segunda parte, hace énfasis en la justificación y los objetivos, estos últimos son los que se buscan responder una vez terminado el experimento y el análisis de varianza.

En la siguiente parte de la investigación, se estudian las necesidades a cubrir y el esquema de solución, relacionado con la fuentes encontradas y plasmadas en el marco teórico. En esta sección se analizan y explican las fórmulas de los diferentes modelos a utilizar en el experimento propuesto. Finalmente se detalla la metodología y el cronograma que son la guía fundamental de las fases a desarrollar en conjunto con la factibilidad del estudio.





# 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las enfermedades ocupacionales provocadas por el ruido tienen los mayores índices de presencia en el campo de la industria, esto debido a malas prácticas en la absorción acústica, especialmente al utilizar sistemas masa-muelle-masa.

El muelle lo representa el material absorbente a utilizar, pero muchas veces el material elegido no es el adecuado. Otro problema que ha surgido es el uso erróneo del cartón como un absorbente eficiente. Es por ello por lo que se realizará un diseño experimental, análisis de varianza y pruebas Post Hoc para inferir que tipo de material absorbente funciona como muelle de forma más eficiente, dicho experimento tendrá como factores fijos el espesor y el tipo de material, y la temperatura como una covariable.

Con esto lo que se busca es encontrar el mejor material absorbente entre las espumas, textiles y fibras para ser utilizado como muelle y así presentar una alternativa eficiente que reduzca el índice de las enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.

El informe final del estudio estará estructurado en 4 capítulos, en el primer capítulo se desarrollará el marco referencial donde se explicarán algunos estudios previos relacionados a la mitigación del ruido y a los diseños experimentales en diferentes campos de aplicación. En el segundo capítulo se expondrá todo el marco teórico y estará dividido en dos secciones, la primera sección estará integrada por los conceptos estadísticos referentes al diseño de experimentos y análisis de varianzas. En la segunda sección del capítulo se

desarrollará toda la teoría referente al ruido y enfermedades ocupacionales provocadas por este.

En el tercer capítulo se expondrán los resultados obtenidos de los diseños experimentales, del análisis de varianza, de los contrastes por intervalos y de las pruebas de hipótesis desarrolladas en la investigación. En el cuarto capítulo se hará una discusión de los resultados obtenidos para la elaboración de conclusiones y recomendaciones de la investigación propuesta.

## 2. ANTECEDENTES

El diseño de experimentos hace referencia a la manipulación de un proceso determinado, por medio de la aplicación de una serie de técnicas que buscan proporcionar información, al cambiar las variables de estudio y sus interacciones con ciertos factores controlables y no controlables. A continuación, se analizarán algunos conceptos y estudios enfocados en la aplicación e importancia de los diseños de experimentos, así como recomendaciones metodológicas en este tipo de investigaciones.

Gutiérrez (2012) establece las ventajas de un diseño factorial, ya que estos diseños permiten analizar los efectos individuales y las interacciones con los factores del experimento, además se logra una exploración más completa donde las interpretaciones y el cálculo de los efectos se pueden analizar con aritmética elemental. Montgomery (2004) añade la importancia de las covariables en todo diseño de experimento, puesto que mejora la precisión de este ya que busca determinar el efecto de un factor perturbador no controlable en las corridas del experimento.

Pérez, M., Espinoza, J., Morales, V., López, M., Pérez, J. y Benítez, P. (2014) proponen una metodología eficiente para trabajar un diseño de experimento, dicha metodología la aplicó en su trabajo en el cual buscaba explicar los factores que afectan al rendimiento del requesón en las empresas lácteas. Como primer paso se deben identificar todos los factores que afectan a la variable a estudiar, luego se debe elegir el diseño propio del experimento. Posteriormente se debe planear el experimento definiendo los tratamientos, los factores y los niveles, seguidamente se ejecuta. Finalmente se debe realizar el análisis de varianza y

las pruebas post hoc adecuadas para determinar la significancia de las diferencias entre los niveles de las variables de estudio. Esto se encuentra también respaldado por Hernández (2018) quien enfoca la metodología en los diseños factoriales especificando que se deben plantear los objetivos adecuados para analizar experimentalmente el efecto causado sobre las variables dependientes debido a la manipulación de más de una variable independiente. Con base a esta metodología se trabajará el diseño experimental del proyecto.

Inche, M., Chung, A. y Chia, R. (2010) realizaron un diseño de experimento de diferentes materiales acústicos para inferir que material tiene la mayor absorción acústica. El experimento consistió en diseñar una cámara cúbica rodeada internamente por dos materiales absorbentes acústicos, en el interior colocó una sirena con un nivel de intensidad de 101.9 decibeles. Se trabajaron tres factores el espesor, el tipo de material y la densidad, en conjunto se midieron las intensidades acústicas en decibeles y el estudio concluyó que la lana de roca tiene una mejor tasa de absorción frente al material textil. Este artículo será la base metodológica del experimento, debido a que se replicará el uso de una cámara cúbica rellena internamente por el material absorbente y dentro de ella se colocará una fuente de ruido.

Porras (2015) realizó un estudio con diferentes materiales absorbentes para determinar sus ventajas y desventajas. Algunas de las ventajas evidenciadas en su estudio, para la lana de roca, incluyen el hecho de ser un material económico. Además se evidenció un aumento en la absorción acústica provocado por un incremento en el espesor y por lo tanto en la densidad, pero presenta ciertas desventajas, entre ellas que siempre debe ser usada en un sistema masa-muelle-masa, debido a que requiere protección de las personas pero también se tiene que proteger a la exposición directa pues tiene fibras que al respirarse pueden causar problemas pulmonares, por esta razón siempre debe ir entre dos

materiales de mayor densidad por seguridad. En dicho estudio se determinó que el poliestireno, como aislante acústico es muy pobre y que lamentablemente se sigue utilizando en masa como un material eficiente. Finalmente se determinó, que los materiales porosos son los que evidencian las mejores características absorbentes. Es por esta razón, que dentro de los materiales a contrastar en el diseño de experimentos, se eligió la lana de roca como una fibra porosa y al poliestireno como una espuma.

Tanco, M. y Ilzarbe, L. (2008) establecieron en su estudio referente al uso de diseños experimentales en los procesos de automoción, como debe de planificarse el análisis estadístico para variables continuas y especificaron una metodología propuesta para identificar los factores y niveles del experimento tanto cuantitativos como cualitativos. Esta planificación servirá de criterio para establecer cuáles son los factores y niveles cuantitativos o cualitativos que tengan un efecto en el diseño experimental propuesto.

La Fundación Española Vida Sostenible (2015) realizó un artículo donde expone las aplicaciones de diferentes materiales absorbentes, pero además es uno de los primeros artículos que exhibe al cartón como un material que tiene una capacidad de absorción acústica considerable pero que por sí solo es un material pobre y necesita un refuerzo para lograr la mitigación sonora, además se concluyó que el cartón solo es capaz de absorber eco pero no ruido. Debido a esto se agregó el cartón como otro nivel de comparación entre el factor tipo de material absorbente, para respaldar la conclusión de su limitada capacidad de absorción.

El Centro de Calidad Ambiental Mexicano (1992) publicó la Norma DGN-AA-43-1977, donde se especifica el procedimiento a seguir para la medición del ruido de una fuente fija. Primero se debe tener calibrado el equipo de medición y la

fuente debe de encontrarse como mínimo a 1.20 metros de distancia del suelo. Luego deben hacerse como mínimo 5 mediciones desde diferentes puntos, a un radio de 20 centímetros de la fuente, esto se hace debido a que la fuente sonora se encontrará confinada en una cámara cúbica. Con este procedimiento se buscará aplicar el diseño experimental más conveniente dependiendo del tipo de estudio y de los objetivos que se planteen.

Castellanos, J. y Cortés, S. (2010) especifican ciertas condiciones adecuadas que se deben mantener en la medición del ruido, las más destacadas son las siguientes: primero las mediciones deben realizarse en un entorno libre, un campo libre de reflexiones de otras fuentes sonoras es por ello por lo que se recomienda el ambiente nocturno como el mejor entorno de medición. En este estudio utilizaron la frecuencia de resonancia como un factor único y el uso de resonadores para la medición, a pesar de que la metodología utilizada difiere de la que se propone en el presente estudio, el objetivo es el mismo, pues se busca determinar que material es el más eficiente. El estudio concluyó que los materiales con mayor cantidad de perforaciones (poros) logran absorber de una mejor manera el ruido y esta condición la cumplen mayormente las fibras.

Quispe (2014) en su trabajo sobre un diseño experimental para determinar combinaciones de arcilla como materiales absorbentes en efluentes industriales, utiliza los diseños factoriales y sus respectivas ecuaciones de los modelos para determinar el más adecuado. Además, describe gráficamente la interpretación de estos diseños y establece un procedimiento adecuado para trabajar diseños codificados. Este trabajo es importante para poder representar e interpretar gráficamente el modelo factorial que se desea plantear en el experimento.

Salgado (2011) realizó un diseño experimental basado en el estudio de superficies de respuesta de residuos de madera y de plástico para lograr la

optimización de estos materiales, en su trabajo establece la metodología adecuada para verificar que los supuestos de un Anova se cumplan: los datos deben ser homocedásticos, son poblaciones normales y los tratamientos son independientes. Para la igualdad de varianzas se debe utilizar la prueba de Bartlett y para evaluar la normalidad se puede hacer con una prueba de Kolmogorov, en este trabajo también se enfocan en el método de análisis gráfico para los tres supuestos. Por medio de esta referencia se logrará establecer la metodología adecuada de evaluación para cada uno de los supuestos a verificar.

Villalpando (2001) presentó un artículo donde define las mejores pruebas para hacer un análisis post hoc posterior al análisis de varianza del diseño experimental. Estas pruebas difieren entre ellas, por el fin para el que fueron diseñadas; Tukey, Duncan, Dunnett, Hsu, y Bechhofer. La prueba de Hsu, resultó ser la más robusta, mientras que Dunnett destacó en los experimentos donde se tiene un grupo de control. De todas las opciones antes mencionadas, la prueba de Tukey evidenció ser la más potente. Este artículo busca evidenciar las pruebas post hoc más eficientes para concluir adecuadamente las hipótesis alternativas de diferencias aceptadas. Además, permitió conocer las diferentes bondades y las potencias de cada prueba, identificando la posibilidad de seleccionar la prueba más adecuada al diseño experimental que se llevará a cabo.

Se concluye que un diseño de experimentos tiene una gran aplicación, pues es una fuente de conocimiento eficiente, por medio del cual se puede determinar la relación, efectos y diferencias significativas de las variables de interés y cómo son afectadas al modificar los diferentes factores controlables o no controlables. Es importante el análisis de varianza y de las pruebas post hoc adecuadas para poder interpretar adecuadamente el conocimiento adquirido propio del diseño del experimento y bajo el cual se pretenden explicar los comportamientos de ciertos fenómenos.





### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1. Contexto general**

En la actualidad las enfermedades ocupacionales afectan cada vez más a diferentes sectores laborales, existiendo una gran variedad de estas. Entre las enfermedades más comunes se encuentran: túnel carpiano, pérdida auditiva, fatiga, obesidad, lumbalgia, gastritis, entre otras. El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) de España presentó en el año 2017 un estudio donde las enfermedades ocupacionales que provocan pérdida auditiva debido al ruido en el ambiente ocupan el segundo lugar con un porcentaje del 29.74 %, detrás del túnel carpiano que tiene el primer puesto del estudio.

Muchas empresas por desconocimiento o muchas veces por falta de estudios técnicos adecuados no proveen un ambiente laboral acústicamente ergonómico, desarrollando malas prácticas para mitigar el ruido, principalmente en la elaboración de sistemas masa-muelle-masa. Estos sistemas sirven para encerrar una fuente ruidosa absorbiendo las ondas acústicas por medio de un material denominado muelle. Los materiales más comúnmente usados como muelle son las fibras (lana de roca), las espumas (poliuretano) y los textiles (algodón), pero existe una discrepancia de criterios para determinar cuál material es el más eficiente. En los últimos años también ha surgido un enfoque ecológico que busca utilizar el cartón como muelle, pero industrialmente este material ha sido muy mal criticado. Otro problema que se presenta en la evaluación de estos materiales absorbentes es determinar que tanto efecto tiene el espesor del muelle en la absorción del ruido.

Por esta razón se hace necesario e importante identificar cuales materiales son los más eficientes para usarse en los sistemas de absorción y que efecto tiene el espesor del muelle en la absorción acústica de cada material.

### **3.2. Descripción del problema**

Pequeñas y medianas empresas desconocen algunas prácticas económicamente eficientes en la absorción del ruido de diferentes fuentes, una de las prácticas más comunes son los sistemas masa-muelle-masa. Estos sistemas sirven para encerrar una fuente ruidosa absorbiendo las ondas acústicas por medio de un material denominado muelle. Lamentablemente el material absorbente usado como muelle muchas veces no es el más eficiente y esto provoca un sistema incompleto y deficiente en la absorción acústica. Un ejemplo del uso de materiales deficientes es el actual uso del cartón como muelle absorbente.

Es por ello por lo que se requiere un estudio experimental sobre la eficiencia de las clases de materiales absorbentes, estableciendo estadísticamente los contrastes de comparación de las tasas medias de transmisión acústica, tomando en cuenta el efecto del espesor con el fin de identificar la mejor metodología en la mitigación del ruido por medio de los sistemas masa-muelle-masa y en la búsqueda de la disminución de enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.

### **3.3. Formulación del problema**

En este apartado se planteó la pregunta central de investigación y las preguntas auxiliares que servirán de guía en el diseño del experimento.

## Pregunta central

¿Cuál es el material que presenta la mejor absorción acústica evidenciada en la tasa media de transmisión en un sistema masa-muelle-masa?

## Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es el efecto sobre la tasa media de transmisión acústica provocado por el espesor del material?
- ¿Cuáles son las diferencias significativas entre las tasas de transmisión de ruido entre la lana de roca(fibra), el poliestireno(espuma), el algodón(textil)?
- ¿Cuál es la diferencia significativa en la tasa de transmisión del cartón en forma de huevera frente a los otros materiales?

### **3.4. Delimitación del problema**

El objeto de estudio es un material absorbente acústico con cuatro opciones a evaluar, para las fibras se utilizará la lana de roca, para las espumas el poliestireno, para los textiles el algodón y el cartón como una clase extra. Las condiciones para analizar el problema serán bajo temperatura ambiente y en una jornada nocturna donde el ruido del ambiente sea no significativo.



## 4. JUSTIFICACIÓN

La investigación propuesta se enmarca en el campo del diseño experimental, planteando un diseño de dos factores y una covariable para descubrir la relación que las variables de estudio tienen por medio de análisis de varianzas y pruebas post hoc. El diseño experimental buscará inferir el efecto del tipo de material, del espesor y de la temperatura ambiente sobre la tasa media de absorción acústica.

Este estudio es importante en el ámbito de seguridad industrial porque al determinar el mejor material de absorción acústica se logrará proveer un ambiente ergonómicamente acústico, logrando la disminución de enfermedades ocupacionales causadas por la exposición al ruido. Además, es importante en el ámbito económico pues se busca establecer la eficiencia de los sistemas masa-muelle-masa como una práctica de bajo costo en la mitigación del ruido.

Se espera demostrar cuál es el material más eficiente en la absorción del ruido entre las espumas, textiles y fibras, aportando una solución eficiente y económica para la mejora acústica de las condiciones laborales de los diferentes sectores industriales. Con dicha solución también se buscará la disminución de enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.



## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Determinar cuál material, entre cuatro opciones de mayor aplicación, tiene la mejor absorción acústica estimada a través de la tasa media de transmisión mediante un diseño experimental, análisis de varianza y pruebas post hoc para lograr reducir futuras enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.

### **5.2. Específicos**

- Comparar diferentes niveles del factor espesor mediante un análisis de varianza para inferir si existe un efecto significativo en la tasa media de transmisión de cada material.
- Contrastar las diferencias en las tasas medias de transmisión de la lana de roca, el poliestireno y el algodón mediante un análisis de varianza y pruebas post hoc para identificar cual es el mejor.
- Comparar la tasa media de transmisión del cartón contra los otros materiales evaluados mediante un análisis de varianza y la prueba de Hsu para identificar su funcionalidad limitada.





## **6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

Con base a un diseño experimental de dos factores (tipo de material y espesor) y una covariable (temperatura) se analizarán los datos obtenidos por medio de un Anova de pruebas post hoc, esto con el fin de determinar el material más eficiente en la absorción acústica y cuyo uso en los sistemas masa-muelle-masa es el óptimo para lograr la reducción de enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.

Los niveles del tipo de material serán cuatro y estarán representados de la siguiente manera: lana de roca como una fibra, el poliestireno como una espuma, el algodón como un textil y el cartón como una alternativa a evaluar. Los niveles del espesor serán cuatro y estos irán en aumento basándose en la norma UNE-EN 13162:2002. La única entrada no controlada será la temperatura, con esta covariable se buscará comprobar si tiene algún efecto significativo en este experimento.

Se realizará un Anova para inferir si la diferencia entre las tasas medias de transmisión acústica es significativa entre los primeros tres niveles del tipo de material, el análisis se complementará con las pruebas post hoc para determinar que material entre las fibras, espumas y textiles es el más eficiente. Luego se realizará otro Anova que incluya la evaluación del cartón de huevera y se utilizará la prueba post hoc de Hsu para comparar su tasa media de transmisión contra los otros 3 niveles del tipo de material. Finalmente se busca evaluar si el cartón es un óptimo absorbente acústico y determinar que material es el más adecuado para una eficiente absorción y por lo tanto logre mitigar enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.



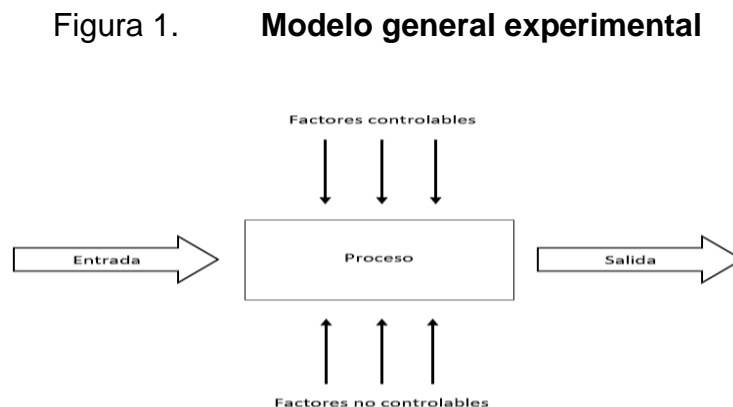
## 7. MARCO TEÓRICO

A continuación, se desarrollan las referencias teóricas estadísticas y del campo de aplicación del estudio:

### 7.1. Diseño y análisis de experimentos

Un experimento según Montgomery (2004), es una prueba o una serie de pruebas donde se deben seleccionar ciertas variables de entrada y se realizan cambios premeditados para determinar el efecto provocado en las variables de salida. Además, por medio de los experimentos se puede generar el conocimiento empírico más confiable. En un experimento interactúan varios factores controlables y no controlables sobre la variable de entrada y el objetivo es determinar la influencia de estos sobre la variable salida.

Con base en la definición del experimento planteado, se logró elaborar el siguiente esquema, presentado en la figura 1.



Fuente: elaboración propia.

Gutiérrez (2008) menciona que los experimentos son analizados intuitivamente a base de ensayos y errores, pero que esta práctica no garantiza la correcta obtención de las respuestas a las diferentes interrogantes planeadas, por esta razón es el diseño estadístico de experimentos la forma más eficaz de análisis y obtención de respuestas. “Un diseño estadístico experimental consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos, que al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas por el experimentador sobre determinada situación.” (Gutiérrez, 2008, p. 5)

En un proceso intervienen los siguientes elementos, como los detalla Gutiérrez (2008) y como se esquematizó en la figura 1:

- Variable de respuesta: es el resultado de cada prueba del experimento, por medio de esta se puede conocer el efecto que existe en la salida.
- Factores controlables: son variables características que se mantienen fijas en un determinado nivel, es decir que el experimentador puede controlar estas variables.
- Factores no controlables: son variables características que no se pueden fijar o controlar, pero pueden tener un efecto significativo en la variable respuesta.
- Niveles y tratamientos: los niveles son los diferentes valores que se asignan al factor a estudiar. Todos los posibles niveles de un factor se les denomina tratamientos.

Es necesario que en un diseño estadístico experimental el efecto de los factores no controlables sea mínimo para que no exista una incorrecta interpretación del efecto en la variable salida y así lograr un proceso robusto. Para lograr esto Montgomery (2004) expone los siguientes enfoques de planificación:

- Enfoque de la mejor conjetura: se basa en la experiencia, la práctica y los conocimientos científicos del experimentador. Este enfoque se basa en el ensayo y error, además en algunos casos puede llegar a ser tedioso la excesiva cantidad de pruebas que se realizan y el experimentador se conforma con el resultado más cercano, pero no la solución óptima. Este enfoque es cuestionado en múltiples ocasiones por Gutiérrez (2008).
- Enfoque de un solo factor a la vez: se basa en el análisis de la variable salida y su efecto al variar un factor en forma aislada y mantener el resto de los factores que afecten el proceso fijo con valores constantes. La desventaja es que no se ponen en evidencia posibles interacciones entre factores.
- Enfoque factorial: es el enfoque de los diseños experimentales por excelencia, los factores se hacen variar en conjunto con todas las posibles combinaciones y así lograr evaluar la interacción entre factores.

#### **7.1.1. Prueba de hipótesis para datos pareados**

Esta prueba se utiliza en los diseños de comparaciones dependientes y los datos obtenidos corresponden a observaciones por pares, los cuales tienen algo en común y tiene como fin, lograr un mejoramiento significativo en la precisión.

Las pruebas de hipótesis a probar para datos pareados basadas en las expresiones de Montgomery (2004) son las siguientes:

$$H_0 : \mu_d = 0$$

$$H_1 : \mu_d \neq 0$$

Las definiciones matemáticas de la media muestral ( $\bar{d}$ ), la desviación estándar ( $S_d$ ) y el estadístico de prueba ( $t_0$ ) de las diferencias de media son las siguientes:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j \quad (\text{Ec. 01})$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2}{n - 1}} \quad (\text{Ec. 02})$$

$$t_0 = \frac{\bar{d}}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} \quad (\text{Ec. 03})$$

### 7.1.2. Análisis de varianza de un único factor

Para un único factor, con una cantidad “ $t$ ” de niveles, “ $r$ ” repeticiones y utilizando la notación de López-Bautista (2008), la esquematización es la siguiente;

Figura 2. **Diseño de un análisis de un solo factor**

Tratamientos	Repeticiones					$y_{i\cdot}$
	1	2	3	...	r	
1	$y_{11}$	$y_{12}$	$y_{13}$	...	$y_{1r}$	$y_{1\cdot}$
2	$y_{21}$	$y_{22}$	$y_{23}$	...	$y_{2r}$	$y_{2\cdot}$
3	$y_{31}$	$y_{32}$	$y_{33}$	...	$y_{3r}$	$y_{3\cdot}$
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
t	$y_{t1}$	$y_{t2}$	$y_{t3}$	...	$y_{tr}$	$y_{t\cdot}$

Fuente: Bautista (2008). *Diseño y análisis de experimentos, fundamentos y aplicación en agronomía*.

Donde:

$$y_{i\cdot} = \sum_{j=1}^r y_{ij} \quad (\text{Ec. 04})$$

$$\bar{y}_i = \frac{y_{i\cdot}}{r} \quad i = 1, 2, 3, \dots, t \quad (\text{Ec. 05})$$

Al esquema anterior se le debe de agregar la suma de la última columna conocida como totales ( $y_{\cdot\cdot}$ ) y también se debe encontrar el promedio por nivel y el promedio total de los niveles ( $\bar{y}_{\cdot\cdot}$ ). Utilizando la misma notación de López-Bautista (2008), tenemos las siguientes ecuaciones:

$$y_{..} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r y_{ij} \quad \bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{R} \quad R = t * r \quad (\text{Ec. 06})$$

El análisis de un factor se basa en un modelo de tipo lineal que puede representarse de dos maneras según Montgomery (2004):

- Modelo representado por las medias: utilizado para predecir cada  $y_{ij}$ , utilizando la media estimada de cada nivel  $\mu_i$ , con su respectivo error aleatorio  $\varepsilon_{ij}$ .

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, t \end{cases} \quad (\text{Ec. 07})$$

- Modelo representado de efectos: este modelo utiliza la media global de los datos como la media de cada nivel  $\mu$  y el efecto del tratamiento  $\tau_i$ .

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, t \end{cases} \quad (\text{Ec. 08})$$

Lo que se busca con el análisis de varianza de un factor es identificar la variación que el factor provoca a través de un posible efecto significativo sobre la variable salida. Las hipótesis que se plantean buscan comprobar que las medias de cada uno de los niveles son iguales o al menos una es distinta. Las hipótesis con enfoque del modelo de medias se presentan de la siguiente manera:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_t$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ por lo menos una media es diferente.}$$



El planteamiento de la hipótesis nula y alternativa con el modelo de los efectos es la siguiente:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_t = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para al menos uno de los niveles.}$$

Ambos planteamientos de hipótesis son equivalentes. Para hacer la respectiva prueba de la hipótesis nula, se debe determinar la variación existente en el experimento. Basado en la secuencia establecida por Walpole y Myers (2007), las fórmulas para analizar el error cuadrático de las mediciones del experimento estarían definidas como:

$$SS_T = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y} \cdot \cdot)^2 \quad (\text{Ec. 09})$$

Del desarrollo de la ecuación anterior, resulta una suma de cuadrados  $SS_T$  la cual se compone por la suma de la variación provocada por el tratamiento  $SS_\tau$  y la variación causada por al error aleatorio  $SS_\varepsilon$ .

$$SS_T = SS_\tau + SS_\varepsilon \quad (\text{Ec. 10})$$

La ecuación anterior se puede descomponer de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y} \cdot \cdot)^2 = r \cdot \sum_{i=1}^t (\bar{y}_{i \cdot} - \bar{y} \cdot \cdot)^2 + \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_{i \cdot})^2 \quad (\text{Ec. 11})$$

Además, cada componente tiene asociado ciertos grados de libertad. Los grados de libertad asignados al tratamiento se representan con  $v_\tau$ , los grados de libertad del error aleatorio se representa como  $v_\epsilon$  y los grados de libertad del fenómeno se representa como  $v_T$ . Las fórmulas son las siguientes:

$$v_T = R - 1 \quad v_\tau = t - 1 \quad v_\epsilon = t \cdot (r - 1) \quad (\text{Ec. 12})$$

Al dividir cada una de las sumas de cuadrados con sus respectivos grados de libertad de la ecuación anterior, se obtienen dos varianzas; la del factor y la del error aleatorio, por lo tanto, los cuadrados medios por comparar son los siguientes:

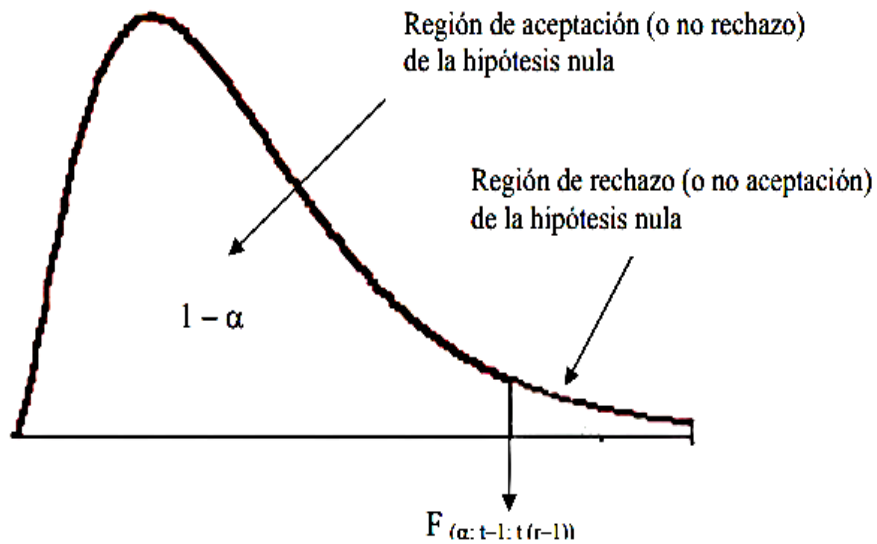
$$MS_\tau = \frac{SS_\tau}{t - 1} \quad MS_\epsilon = \frac{SS_\epsilon}{R - t} \quad (\text{Ec. 13})$$

Si la hipótesis nula planteada se cumple, esto indica que la varianza del tratamiento  $MS_\tau$  es una estimación precisa de la varianza de todos los datos  $\sigma^2$ , esto será igual para la varianza causada por el error aleatorio. Para poder aceptar o rechazar las hipótesis planteadas se utilizará la distribución  $F$  de Fisher y el siguiente estadístico de prueba:

$$F = \frac{MS_\tau}{MS_\epsilon} \quad (\text{Ec. 14})$$

El criterio de aceptación o no aceptación de la hipótesis nula es unilateral, según la siguiente figura:

Figura 3. Criterio de decisión F de Fisher



Fuente: Bautista (2008). *Diseño y análisis de experimentos, fundamentos y aplicación en agronomía*.

Si el estadístico de prueba  $F$  es mayor al valor crítico  $F_{(\alpha; t-1; t(r-1))}$  entonces no se puede aceptar la hipótesis nula de igualdad de medias, lo cual indica que si hay algún efecto en al menos uno de los niveles del tratamiento con una significancia considerable distinta de cero.

Es muy común que los resultados obtenidos de un análisis de varianza se resuman en tablas de análisis que incluyen la sumas de cuadrados y los grados de libertad del factor, del error aleatorio y del total. Este resumen se muestra en la siguiente tabla:

Tabla I. **Resumen análisis de varianza de un factor**

Fuente de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Factor	$r \cdot \sum_{i=1}^t (\bar{y}_i \cdot - \bar{y} \cdot)^2$	$v_{\tau} = t - 1$	$\frac{SS_{\tau}}{t - 1}$	$\frac{MS_{\tau}}{MS_{\epsilon}}$
Error aleatorio	$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_i \cdot)^2$	$v_{\epsilon} = t \cdot (r - 1)$	$\frac{SS_{\epsilon}}{R - t}$	
Total	$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y} \cdot)^2$	$v_T = R - 1$		

Fuente: elaboración propia.

Utilizando la metodología de Walpole y Myers (2007), se pueden calcular los intervalos para cada una de las medias con cierto nivel de confianza por medio de la distribución  $t$  de Student, esto debido a que la varianza poblacional del experimento permanece desconocida. La fórmula del intervalo de confianza utilizando la notación de Bautista (2008) es la siguiente:

$$P \left( \bar{y}_i \cdot - t_{\left(\frac{\alpha}{2}, R-t\right)} \cdot \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{n}} \leq \mu_i \leq \bar{y}_i \cdot + t_{\left(\frac{\alpha}{2}, R-t\right)} \cdot \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{n}} \right) = 1 - \alpha \quad (\text{Ec. 15})$$

Para encontrar el tamaño de muestra recomendado de las repeticiones que se deben hacer en el experimento para cada tratamiento, se usará la ecuación planteada por Gutiérrez (2012):

$$n = \frac{2 * (t_{\left(\frac{\alpha}{2}, t * n_o - t\right)})^2 * \sigma^2}{d^2} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde  $n_o$  es el valor de una propuesta inicial del tamaño de réplicas para cada uno de los tratamientos  $t$ , el valor de  $\sigma^2$  es la varianza intrínseca provocado por factores que no se pueden controlar y el valor  $d^2$  es el cuadrado de la diferencia esperada entre las medias de cada uno de los tratamientos.

### **7.1.3. Supuestos que debe cumplir un análisis de varianza**

Para contrastar con precisión las pruebas de hipótesis del análisis de varianza, el modelo planteado debe satisfacer el supuesto de que los residuales tienen una distribución normal e independiente con una media cero y una varianza poblacional constante pero desconocida. Para encontrar los residuales del experimento se le resta a cada observación el estimador del predicho, la ecuación con la notación de Montgomery (2004) es la siguiente:

$$e_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_i \cdot \quad (\text{Ec. 17})$$

A continuación, se describen algunas pruebas para establecer el cumplimiento de los supuestos sobre los residuales y que Montgomery (2004) las describe como las pruebas más comunes en este tipo de ensayos.

#### **7.1.3.1. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov**

Esta es una prueba muy utilizada en bondad de ajuste, la ventaja que tiene sobre la prueba de ajuste Chi Cuadrado es que no requiere de la agrupación de los datos, la cual puede provocar una pérdida significativa de la información y de su respectiva interpretación.

Esta prueba determina si las puntuaciones en una muestra pueden razonablemente provenir de una población que tiene una distribución teórica. La prueba incluye la especificación de la distribución de frecuencias acumuladas que pudieran ocurrir dada la distribución teórica y la compara con la distribución de frecuencias acumuladas observadas (Siegel, 1990, p. 74).

Para realizar la prueba se deben ordenar los datos y se determina la diferencia entre los valores empíricos  $S_n(x)$  respecto de los valores en este caso de la distribución teórica normal  $N(x)$ . El estadístico de prueba es la diferencia máxima entre ambos valores de las distribuciones:

$$D_n = \max|S_n(x) - N(x)| \quad (\text{Ec. 18})$$

La distribución del estadístico  $D_n$  tendrá una región de densidad probabilística con un nivel de significancia  $\alpha$ , la cual se encuentra definida como:

$$P\left(D_n > \frac{c}{\sqrt{n}}\right) = \alpha \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde el valor de  $c$  es un valor numérico cuya función es cuantificar el estadístico de prueba que definirá si la diferencia máxima es significativa o los valores siguen la distribución teórica establecida. Cuando es menor la diferencia al valor crítico  $\frac{c}{\sqrt{n}}$  entonces los residuos se pueden considerar normales. La decisión gráfica es la siguiente:

Figura 4. Zona de aceptación y rechazo Kolmogorov-Smirnov



Fuente: elaboración propia.

### 7.1.3.2. Prueba de homocedasticidad de Bartlett

Esta prueba busca evaluar si las varianzas de cada nivel del tratamiento son iguales, el cálculo para encontrar el estadístico de prueba se basa en una distribución de muestreo aproximada a la Chi Cuadrado con  $t$  *tratamientos* – 1 grados de libertad. El estadístico de la prueba es el siguiente:

$$\chi_0^2 = 2.3026 * \frac{q}{c} \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde:

$$q = (R - t) * \log_{10} S_p^2 - \sum_{i=1}^t (r_i - 1) * \log_{10} S_i^2 \quad (\text{Ec. 21})$$

$$c = 1 + \frac{1}{3(a+1)} \left( \sum_{i=1}^t ((r_i - 1)^{-1} - (R - t)^{-1}) \right) \quad (\text{Ec. 22})$$

$$S_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^t (r_i - 1) S_i^2}{R - t} \quad (\text{Ec. 23})$$

La regla de decisión para esta prueba es que se no se debe aceptar la igualdad de varianzas si el estadístico de prueba  $\chi_0^2$  es mayor que  $\chi_{\alpha, t-1}^2$ . Es importante mencionar que la prueba de Bartlett es muy sensible al supuesto de la normalidad, por lo tanto, primero se debe hacer la prueba de Kolmogorov-Smirnov y al aceptarse la normalidad se debe utilizar esta prueba, de ser necesario se puede utilizar la prueba de Levene.

#### **7.1.4. Contrastes para las medias de un experimento de un factor**

Cuando en el análisis de varianza se rechaza la hipótesis de igualdad de medias, entonces se acepta que como mínimo una de las medias de los niveles del factor es diferente. Pero la limitante de este análisis es que no se puede establecer las diferencias entre las medias, por ejemplo, estimar cuales medias son mayores o menores que el resto.

Por esta razón surge la importancia de los contrastes de medias, estos permiten estimar con mayor precisión donde se encuentran las diferencias o las igualdades haciendo uso de comparaciones pareadas. Los procedimientos más utilizados como contraste de comparaciones pareadas según Montgomery (2004) se explican a continuación.



#### 7.1.4.1. Método de Tukey

Este método utiliza una distribución  $q$  con  $f$  grados de libertad asociados a  $MS_{\epsilon}$ , esta distribución tiende a generar intervalos más amplios pues se basa en el estadístico del rango estudentizado. El intervalo para tratamientos balanceados y con un  $(1-\alpha)$  % de confianza es:

$$P \left[ \bar{y}_i - \bar{y}_j - q_{\alpha}(t, f) \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{r}} \leq \mu_i - \mu_j \leq \bar{y}_i - \bar{y}_j + q_{\alpha}(t, f) \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{r}} \right] = 1 - \alpha \quad (\text{Ec. 24})$$

Si la diferencia estimada entre  $\mu_i - \mu_j$  incluye el cero, se concluye que son medias iguales, de lo contrario puede que una sea mayor o menor que la otra media.

#### 7.1.4.2. Método de Duncan

Es uno de los procedimientos más utilizados en la comparación de medias, a este método también se le conoce como la prueba del rango múltiple. Para tamaños de muestra iguales, primero se debe calcular error estándar según la siguiente fórmula:

$$S_{\bar{y}_i} = \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{r}} \quad (\text{Ec. 25})$$

Para utilizar este método se tienen una distribución de rangos  $r$ , nuevamente tiene  $f$  grados de libertad que provienen del error del análisis de varianza. Los rangos mínimos de comparación  $R_p$  se calcularán de la siguiente manera:

$$R_p = r_\alpha(p, f)S_{\bar{y}_i} \quad (\text{Ec. 26})$$

Estos valores se comparan ordenando de manera ascendente las medias de los tratamientos y considerando al valor  $p$  como el subconjunto de medias entre el tratamiento 1 al tratamiento  $t$ . Se calculan las diferencias entre todas las medias respetando el orden ascendente, si la diferencia es mayor al rango mínimo de comparación se concluye que las dos medias contrastadas es significativamente diferente.

#### 7.1.4.3. Método de Hsu

Basado en la explicación expuesta por García-Villalpando et al. (2001), por medio de este método se realizan comparaciones con el nivel que presente la mejor media pero que es desconocido contra el resto de las medias que pertenecen a los niveles del tratamiento a contrastar. Con este método y con el respectivo nivel de confianza, se logra estimar si el nivel del tratamiento con media muestral  $\bar{y}_i$  difiere significativamente con el nivel con la media más grande  $\text{máx}\{\bar{y}_j\}$ , donde la  $j$  debe ser distinta a la media de  $i$ .

La diferencia poblacional  $\mu_i - \text{máx}\{\mu_j\}$  se estima por medio de la distribución  $D$ , establecida en la metodología de comparación de control de Dunnett. Asociado nuevamente a los grados de libertad del error y baja la condición de que sigue una distribución  $t$  multivariada con correlaciones iguales a  $1/2$ , se obtiene el siguiente intervalo de confianza:

$$\begin{aligned}
P \left[ \min \left\{ \left( \bar{y}_i - \mu_i - \max\{\mu_j\}_{i \neq j} \right) - D_{(t, v_\epsilon, \alpha, \frac{1}{2})} \cdot \sqrt{\frac{2MS_\epsilon}{r_i}}, 0 \right\} \leq \mu_i - \max\{\mu_j\} \right. \\
\left. \leq \max \left\{ \left( \bar{y}_i - \mu_i - \max\{\mu_j\}_{i \neq j} \right) + D_{(t, v_\epsilon, \alpha, \frac{1}{2})} \cdot \sqrt{\frac{2MS_\epsilon}{r_i}}, 0 \right\} \right] & \quad (\text{Ec. 27}) \\
= 1 - \alpha &
\end{aligned}$$

Si el intervalo de confianza contiene el cero entonces no hay diferencia entre las medias. El contraste para comparar es “el valor más bajo es mejor”, por lo tanto, todo el intervalo de confianza debe ser menor a cero.

### 7.1.5. Diseños factoriales

Los diseños factoriales basados en la definición de Montgomery (2004) son los más eficientes cuando en el estudio intervienen dos o más factores. En un diseño factorial se investigan todas las posibles combinaciones entre los posibles niveles de cada factor. Un diseño de dos factores está definido de la siguiente forma, donde  $t$  representa los niveles del primer factor,  $b$  representa los niveles del segundo factor:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + (\tau \cdot \gamma)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (\text{Ec. 28})$$

Además  $\mu$  es la media total,  $\tau_i$  es el efecto del primer factor,  $\gamma_j$  es el efecto del segundo factor y  $\varepsilon_{ijk}$  es el error aleatorio asignada a cada una de las observaciones. Las hipótesis de este tipo de diseño factorial buscan determinar bajo el enfoque de los efectos, si existe algún efecto entre niveles de cada factor o es no significativo.

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_t = 0$$

$H_1: \tau_i \neq 0$  para al menos uno de los niveles.

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_b = 0$$

$H_1: \gamma_j \neq 0$  para al menos uno de los niveles.

La importancia de los diseños factoriales surge debido a que también se plantea una hipótesis para determinar si los factores interactúan significativamente, el planteamiento es el siguiente:

$$H_0: (\tau \cdot \gamma)_{ij} = 0$$

$H_1: (\tau \cdot \gamma)_{ij} \neq 0$  para al menos una de las combinaciones.

#### **7.1.6. Análisis de varianza de dos factores**

Para encontrar el efecto total  $SS_T$  en el cual interactúa el efecto de A ( $SS_A$ ), el efecto de B ( $SS_B$ ) y el efecto de interacción AB ( $SS_{AB}$ ) se tiene la siguiente expresión:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_\epsilon \quad (\text{Ec. 29})$$

La tabla resumen del análisis de varianza para dos factores con efectos fijos y con los contrastes de significancia se basó en Montgomery (2004), esta se muestra a continuación:

Tabla II. **Resumen análisis de varianza de dos factores**

Fuente de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Factor A	$SS_A$	$t - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{t - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_\epsilon}$
Factor B	$SS_B$	$(b - 1)$	$MS_A = \frac{SS_B}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_\epsilon}$
Interacción	$SS_{AB}$	$(t - 1)(b - 1)$	$MS_A = \frac{SS_{AB}}{(t - 1)(b - 1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_\epsilon}$
Error	$SS_\epsilon$	$tb(r - 1)$	$MS_A = \frac{SS_\epsilon}{tb(r - 1)}$	
Total	$SS_T$	$tbr - 1$		

Fuente: elaboración propia.

Si el estadístico de prueba  $F$  es mayor al valor crítico  $F_{(\alpha, \text{grados de libertad})}$  entonces la hipótesis nula debe de rechazarse, lo cual indica que si existe algún efecto entre los niveles del tratamiento o entre la interacción de los tratamientos del estudio.

### 7.1.7. Covariables

Una covariable es aquella variable que no puede ser controlada por el experimentador, pero puede tener un efecto significativo en la variable respuesta, por medio de las covariables se puede lograr un análisis de varianza más preciso. Montgomery (2004) presenta el efecto de la covariable como el siguiente modelo:

$$y_{ij} = \beta_0 + \tau_i + \beta_1 \cdot \bar{x}_{ij} + \epsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases} \quad (\text{Ec. 30})$$

De manera demostrativa y sustituyendo al estimador que está expresado por  $\mu = \beta_0 + \beta_1 \bar{x} \dots$ , se obtiene la forma más común del modelo con covariables:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_1(\bar{x}_{ij} - \bar{x} \cdot \cdot) + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases} \quad (\text{Ec. 31})$$

El efecto de la covariable puede ser evaluado por medio de una prueba de significancia, para establecer si el efecto debe permanecer en el análisis o puede ser despreciable. Para estimar el valor de  $\beta_1$  el cual representa el efecto de la covariable se utiliza la siguiente fórmula de regresión lineal:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r [(x_{ij} - \bar{x}_{i \cdot})(y_{ij} - \bar{y}_{i \cdot})]}{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (x_{ij} - \bar{x}_{i \cdot})^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (\text{Ec. 32})$$

La tabla para aceptar o rechazar la significancia de la covariable se detalla a continuación basado en la metodología de Montgomery (2004):

Tabla III. **Resumen análisis de covarianza**

Fuente de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Regresión	$\frac{S_{xy}^2}{S_{xx}}$	1	-	$\frac{SS_{\epsilon'} - SS_{\epsilon}}{t - 1}$ $MS_{\epsilon}$
Tratamientos	$SS_{\epsilon'} - SS_{\epsilon}$	$t - 1$	$\frac{SS_{\epsilon'} - SS_{\epsilon}}{t - 1}$	
Error	$SS_{\epsilon}$ $= E_{yy} - \frac{E_{xy}^2}{E_{xx}}$	$t(r - 1) - 1$	$MS_{\epsilon}$ $= \frac{SS_{\epsilon}}{t(r - 1) - 1}$	
Total	$S_{yy}$	$tr - 1$		

Fuente: elaboración propia

Si el estadístico de prueba  $F$  es mayor al valor crítico  $F_{(\alpha, \text{grados de libertad})}$  entonces la hipótesis nula no se puede aceptar y el efecto de la covariable es distinto de cero y por lo tanto es significativo. De la tabla anterior el valor de  $SS_{\epsilon}'$  se obtiene como:

$$SS_{\epsilon}' = \frac{S_{yy} - S_{xy}^2}{S_{xx}} \quad (\text{Ec. 33})$$

## 7.2. El ruido

Para poder definir el ruido, primero se debe definir que es el sonido. El sonido no es más que la sensación de un conjunto de vibraciones que se propagan en un medio elástico y que es percibido por el oído. El ruido según Naf-Cortés (2013) es un sonido cuyas vibraciones son nocivas para la salud, provocando pérdida auditiva o interferencias en la realización de tareas cotidianas.

### 7.2.1. Niveles del ruido

Los tipos de ruido más comunes en la industria según Torres (2018) son los siguientes:

- Ruido continuo: es producido debido a equipo o maquinaria cuya operación es ininterrumpida, es común en la industria que este tipo de ruido se refleje en los equipos de bombeo o ventiladores. La medición de este ruido es la más fácil debido a que basta con realizar lecturas en un periodo de tiempo corto para tener el estimado promedio del ruido emitido por la fuente.

- Ruido intermitente: es aquel cuyas vibraciones de alta y baja frecuencia se presentan en ciertos ciclos, es común que en las maquinarias de procesos de producción se evidencien ruidos intermitentes. Es común definir este ruido como un suceso acústico, pues se presenta cada cierto tiempo. La medición de este tipo de ruido puede hacerse como si fuera un ruido continuo, pero debe de especificarse el periodo de tiempo del ciclo.
- Ruido impulsivo: es un ruido breve pero sus niveles son altos, causa una mayor molestia a pesar de ser instantáneo. Su medición se complica por lo que se acostumbra a cuantificar el impulso del ruido, siendo la diferencia entre el evento de respuesta rápida menos el mismo evento en respuesta lenta.
- Ruido ambiente: es aquel donde se encuentran los niveles mínimos de ruido y que no existe alguna perturbación externa como fuente agregada de ruido.

### **7.2.2. Medición del ruido**

La magnitud del ruido se cuantifica por medio de la unidad de medida denominada decibeles y que se abrevia como dB. El equipo más utilizado para la medición del ruido es el decibelímetro o también conocido como sonómetro. Las partes de este equipo se detallan a continuación en base a la descripción de Torres (2018):

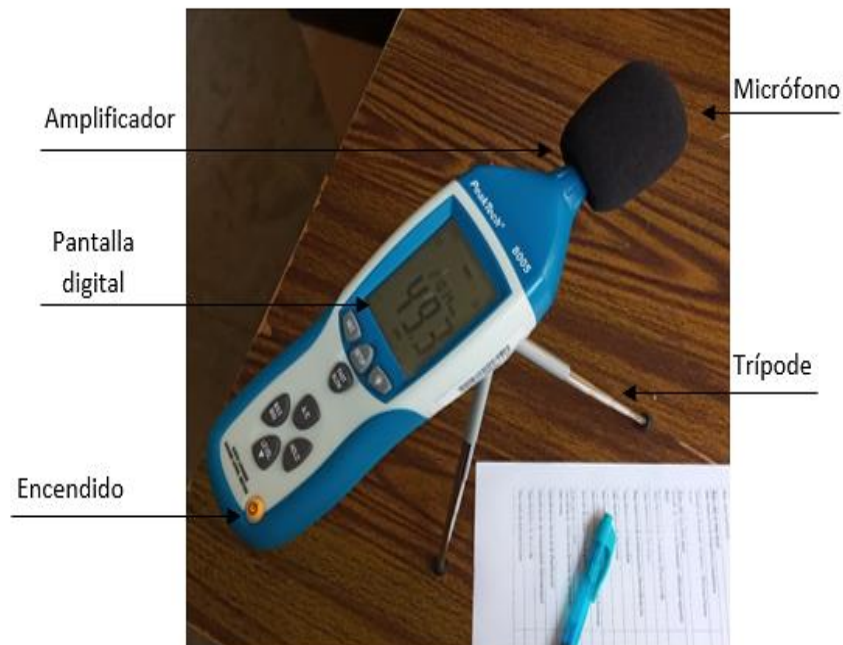
- Micrófono: en unión con un amplificador interno, logra cuantificar la frecuencia del sonido e identifica la magnitud en decibeles.



- Circuito: componentes internos que procesan electrónicamente la señal sonora.
- Entre otras partes se encuentra la pantalla digital, diferentes interruptores integrados y conectores de salida para compartir la información obtenida.

El decibelímetro se muestra a continuación, en la imagen puede apreciarse el micrófono con amplificador digital, un trípode y la pantalla digital que muestra el valor de la magnitud del ruido ambiente, cuyas unidades son los decibeles.

Figura 5. **Decibelímetro**



Fuente: elaboración propia.

### 7.2.3. Legislación internacional y nacional sobre el ruido

Existen diferentes normas a nivel internacional que buscan establecer el tiempo máximo de exposición a ciertos niveles de ruido, a continuación, se mencionan algunas normas:

- Norma ISO 28803:2012. Ergonomía del ambiente físico: esta norma tiene como objetivo la aplicación de un ambiente ergonómico en beneficio del personal con necesidades especiales, su importancia radica en que establece ciertos parámetros para un ambiente ergonómicamente acústico.
- Norma ISO 9612:2009. Acústica: esta norma determina los diferentes niveles de exposición al ruido en los lugares de trabajo por medio de los diferentes métodos de la ingeniería.
- Norma ISO 11690:1997. Acústica: esta norma desarrolla prácticas recomendadas para el diseño de lugares de trabajo que contiene maquinaria.

En general Niebel (2009) establece la siguiente ecuación para cuantificar el tiempo máximo de exposición a un cierto nivel de ruido:

$$\Delta t = \frac{8}{2^{\left(\frac{L-90}{5}\right)}} \quad (\text{Ec. 34})$$

En la ecuación anterior  $L$  representa el nivel de exposición al ruido en decibeles(dB) y  $\Delta t$  el tiempo máximo de exposición en horas, esta cumple con

los parámetros debidamente establecidos por la OSHA. También se debe calcular la dosificación del ruido ( $D$ ) según Niebel (2009), esta se calcula de la siguiente manera:

$$D = 100 * \left( \frac{C1}{T1} + \frac{C2}{T2} + \frac{CN}{TN} \right) \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde  $C1, C2, CN$  representa la exposición de ruido real y  $T1, T2, TN$  representa el tiempo teórico máximo de exposición. Si el valor de la dosificación es mayor o igual a uno, entonces es necesario el uso de equipo de protección, de lo contrario no es necesario, pero es importante evaluar si puede llegar a ser requerido.

Dentro del territorio nacional es el Acuerdo Gubernativo 229-2014 el cual se encarga de establecer los parámetros adecuados del ruido, velando por la integridad y salud del trabajador. En el artículo 182 se define a los centros de trabajo ruidosos como aquellos que tienen una fuente sonora que produce un ruido continuo mayor a los 85 decibeles o los ruidos de impacto de 90 decibeles.

En el artículo 185 se establece que, si alguna fuente sonora sobrepasa los niveles y el tiempo de exposición establecidos, esta fuente debe ser instalada de tal manera que elimine o reduzca el ruido percibido por los trabajadores, así como su propagación al medio interno y externo del centro de trabajo. Los parámetros reglamentados son los siguientes:

Tabla IV. **Nivel y tiempo máximo de exposición**

<b>Niveles de Presión Sonora dB</b>	<b>Tiempo de exposición por jornada</b>
85	8 horas
88	4 horas
91	2 horas
94	1 hora
97	30 minutos
100	15 minutos

Fuente: elaboración propia.

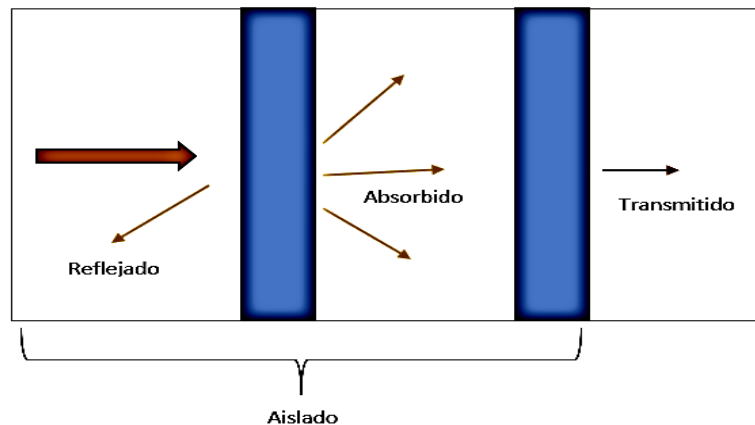
El artículo 192 especifica que todo centro de trabajo clasificado como ruidoso tiene que implementar un programa conservación auditiva a largo plazo para velar por la salud y seguridad ocupacional. Este programa debe de garantizar eficacia en las medidas tomadas, promover medidas de prevención, minimizar la exposición al ruido y llevar un registro de los niveles de ruido a los trabajadores son expuestos y son causados por el ambiente interno y externo.

#### **7.2.4. Prácticas en el control de ruido en la industria**

Para la mitigación del ruido actualmente se utilizan diferentes prácticas eficientes. En el artículo 186 del Acuerdo Gubernativo 229 de Guatemala, se especifica que toda fuente generadora de ruido en los centros de trabajo necesita ser aislada o separada para atenuar su propagación y posibles efectos dañinos en la salud de todos los trabajadores que se desempeñan en el lugar de trabajo. En general en cualquier práctica de mitigación acústica se presentarán los siguientes efectos (ver Figura 6):

- Ruido reflejado: es una porción de energía acústica que regresa como una respuesta hacia la fuente sonora.
- Ruido absorbido: es una porción de la energía acústica que es absorbido por el material empleado en la mitigación del ruido. Los materiales con mayor porosidad son aquellos que tienen una mayor tasa de absorción.
- Ruido transmitido: es una porción de la energía acústica que no fue posible aislar. Se busca que los niveles de transmisión sean los menores, para lograrlo se necesita que los niveles del ruido reflejado y absorbido sean superiores.

Figura 6. **Comportamiento del ruido**



Fuente: elaboración propia.

Al utilizar la subdivisión que realizó Torres (2018) en su libro, se tienen las siguientes prácticas más comunes en el aislamiento del ruido:

#### **7.2.4.1. Sistemas masa-muelle-masa**

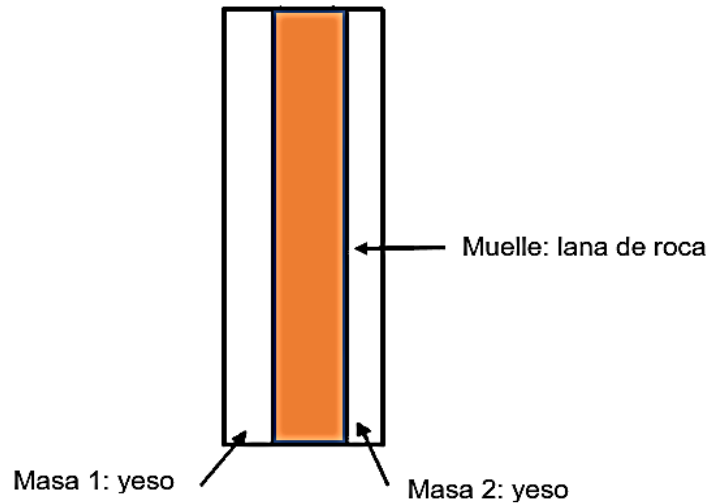
Estos sistemas son definidos por Naf-Cortés (2013) como aquellos que buscan aislar de manera eficiente el ruido, está compuesto por las dos masas que son de un material de alta densidad y entre ambas masas se coloca el muelle, el cual debe ser un material de baja densidad que frene las ondas de la fuente sonora. El fin de estos sistemas es filtrar la onda, para que el ruido transmitido sea del nivel más bajo posible.

Es común que los materiales que se utilicen como masa sean las placas de yeso o cualquier estructura de alta densidad según indica Torres (2018). La clasificación de los materiales más comunes empleados como muelle son los siguientes:

- **Fibras:** estos materiales son los más utilizados debido a su alta porosidad y su absorción eficiente. Algunas de las fibras más utilizadas son la lana de roca y la fibra de vidrio.
- **Espumas:** estos materiales también son utilizados por su adecuada absorción, pero tiene como desventaja sus altos costos. Algunas de las espumas más utilizadas son el poliuretano y el poliestireno.
- **Textiles:** su uso es limitado debido a que son altamente combustibles, sin embargo, uno de los materiales más utilizados como textil es el algodón.

La estructura convencional de un sistema masa-muelle-masa utilizando un material fibroso es la siguiente:

Figura 7. **Estructura sistema masa-muelle-masa**



Fuente: elaboración propia.

#### 7.2.4.2. **Espuma acústica**

Este material basado en la descripción que realiza Torres (2018), es un material flexible de poro abierto que aísla significativamente fuentes ruidosas, esta espuma se puede utilizar colocándola al interior de la fuente ruidosa logrando incluso mitigar vibraciones transmitidas. Otro uso que se le puede dar a la espuma es aplicándola en tablas de respaldo por medio de algún adhesivo, estas tablas se deben usar haciendo un cubículo que encierre la maquinaria o la fuente sonora. El autor resalta que al manipular este tipo de material mineral se debe de tener demasiado cuidado pues produce alergias cutáneas.

### **7.2.4.3. Paneles acústicos**

Este método Torres (2018) lo define como la alternativa óptima cuando aislar a la fuente sonora no es posible debido a las condiciones del proceso o del entorno. El objetivo es colgar sobre la fuente estos paneles formados internamente por materiales absorbentes. El material interno más común utilizado en estos paneles es la fibra de vidrio recubierta por duroport, además las dimensiones de cada panel dependerán de la cantidad de ondas que se buscan absorber y también estará en función de la altura y de las condiciones de trabajo.

### **7.2.5. Enfermedades ocupacionales causadas por la exposición al ruido**

Las enfermedades ocupacionales y lesiones ocasionadas por el ruido en la industria según Naf-Cortés (2013) son las siguientes:

- **Fatiga auditiva:** es una alteración transitoria de la capacidad auditiva provocada por una exposición leve a una fuente ruidosa. No hay lesión y se puede recuperar la capacidad auditiva con el descanso sonoro. El tiempo necesario del descanso dependerá de la intensidad, la duración de la exposición y las recomendaciones médicas.
- **Hipoacusia:** se encuentra catalogada como la enfermedad ocupacional provocada tras una exposición a una intensidad sonora elevada, en cualquier periodo de tiempo. Al inicio, la pérdida de audición no afecta a nivel conversacional, es decir que las frecuencias afectadas se encuentran entre los 4,000 y 6,000 Hz. Torres (2018) comenta que al momento en que un trabajador empieza a hablar con un tono de voz alto a pesar de que las condiciones acústicas son normales, puede ser síntoma de hipoacusia



leve y debe de remitirse al médico. Si el trabajador sigue bajo exposición continúa, la pérdida se extiende a frecuencias más elevadas y posteriormente a frecuencias más bajas provocando sordera.

El autor resalta que la exposición continuada a ruidos con alta intensidad es la causa principal de la hipoacusia en los trabajadores y como se mencionó con anterioridad, esta se encuentra catalogada como enfermedad profesional. Pero en el caso en que el trabajador sufra de una fatiga auditiva, también denominado trauma acústico sonoro se le considerará como un accidente de trabajo.



## 8. PROPUESTA ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Diseño y análisis de experimentos

2.1.1 Prueba de hipótesis para datos pareados

2.1.2 Análisis de varianza de un factor

2.1.3 Supuestos de un análisis de varianza

2.1.3.1 Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

2.1.3.2 Prueba de homocedasticidad de Bartlett

2.1.4 Contrastes para medias en experimentos de un factor

2.1.4.1 Método de Tukey

2.1.4.2 Método de Duncan

2.1.4.3 Método de Hsu

2.1.5 Diseños factoriales

2.1.6 Análisis de varianza para dos factores

- 2.1.7 Covariables
- 2.2 El ruido
  - 2.2.1 Tipos de ruido
  - 2.2.2 Medición del ruido
  - 2.2.3 Legislación internacional y nacional sobre el ruido
  - 2.2.4 Prácticas en el control de ruido en la industria
    - 2.2.4.1 Sistemas masa-muelle-masa
    - 2.2.4.2 Espuma acústica
    - 2.2.4.3 Paneles acústicos
  - 2.2.5 Enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido

### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

- 3.1 Efecto de la cámara acústica
- 3.2 Diseño experimental de la fibra, espuma y textil
  - 3.2.1 Comprobación de supuestos del análisis de varianza
  - 3.2.2 Análisis de varianza de dos factores y una covariable
  - 3.2.3 Contraste de Tukey y Duncan para los tipos de material
- 3.3 Diseño experimental de la fibra, espuma, textil y cartón.
  - 3.3.1 Comprobación de supuestos del análisis de varianza
  - 3.3.2 Análisis de varianza de dos factores y una covariable
  - 3.3.3 Contraste de Hsu para los tipos de material

### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 4.1 Efecto del espesor
- 4.2 Comparación entre los tipos de materiales
- 4.3 Interacción entre el factor espesor y el factor tipo de material
- 4.4 Efecto de la temperatura como una covariable

CONCLUSIONES  
RECOMENDACIONES  
REFERENCIAS  
APÉNDICES  
ANEXOS



## **9. METODOLOGÍA**

A continuación, se especifican las características del estudio cuantitativo, las respectivas unidades y variables de análisis que se estudiarán en el desarrollo del experimento y las fases secuenciales que integrarán al mismo.

### **9.1. Características del estudio**

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo, debido a que las variables que serán medidas tanto las controladas como las no controladas corresponden a magnitudes numéricas. Estas variables se encuentran asociadas al tipo de material acústico, su espesor, la temperatura del ambiente y la tasa media de transmisión acústica.

El alcance es descriptivo y correlacional dado que se analizará el comportamiento de la variable continua tasa media de transmisión acústica según el tipo de material, además se identificará una relación significativa entre el tipo de material, su espesor y la temperatura del ambiente.

El diseño adoptado será experimental debido a que se manipulará el comportamiento de la variable categórica tipo de material y la variable espesor para obtener información de las diferencias significativas entre tipos de materiales. En el experimento se seleccionarán los tratamientos, niveles y repeticiones, en función de los objetivos planteados y del esquema de solución. Además, se identificarán las covariables que pueden tener una correlación significativa con la variable respuesta.

## **9.2. Unidades de análisis**

Cada unidad de análisis consiste en la medición de la tasa de transmisión acústica para cada tipo de material con su respectivo espesor. Debido a que la variable de medición y la covariable del diseño son asociados a los números reales, entonces se asume estadísticamente una población infinita. Aunque el experimento sea aleatorizado siempre existirá un número infinito de posibles resultados.

## **9.3. Variables**

Las variables involucradas en el experimento serán; la tasa media de transmisión acústica, el espesor, la temperatura del ambiente y los diferentes tipos de materiales absorbentes que se contemplarán en el diseño experimental. La tasa media de transmisión acústica y el espesor son variables cuantitativas continuas que poseen un nivel de medición de razón. La temperatura del ambiente es una variable cuantitativa continua pero con un nivel de medición de intervalo. Finalmente los tipos de materiales es una variable cualitativa con un nivel de medición nominal.

En la siguiente tabla se describe la variable de estudio y su respectiva notación en símbolo. Además a cada variable se le agregó su definición teórica y la definición operativa. Esta última es muy importante debido a que establece la forma y la dimensional en que se medirá la variable de estudio.



Tabla V. **Variables del estudio**

<b>Variable</b>	<b>Definición teórica</b>	<b>Definición operativa</b>
Tasa media de transmisión acústica ( $T_a$ )	Variable continua que cuantifica la cantidad de sonido que se transmite de una fuente sonora a un punto en el espacio y que no se ve afectada por la reflexión o absorción acústica.	Medición directa por medio de un decibelímetro. La unidad de medición es el decibel (dB). Número real en la escala de razón.
Espesor ( $\varepsilon$ )	Variable cuantitativa continua que hace referencia a la dimensión más pequeña de un cuerpo en tres dimensiones, un sinónimo es el grosor de un cuerpo.	Medición directa por medio de un Vernier. La unidad de medición es en centímetros (mm). Número real en la escala de razón.
Temperatura del ambiente ( $T$ )	Variable cuantitativa continua que representa el estado del ambiente, que se manifiesta en el aire y se encuentra asociada a la transferencia de calor en los cuerpos. Existen temperaturas que ergonómicamente se prefieren en lugares cerrados.	Medición directa por medio de un termómetro digital. La unidad de medición es en la escala relativa de grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Número real en la escala de intervalo.
Tipos de materiales absorbentes	Evitan la reflexión del sonido que incide sobre estos y dependen de las necesidades presentadas en la mitigación de la contaminación sonora.	Dependerá de las características propias de cada material: fibra, espuma o textil. Escala nominal categórica.

Fuente: elaboración propia.

## **9.4. Fases de estudio**

Las siguiente son las fases de estudio metodológico:

### **9.4.1. Fase 1: revisión de literatura**

- Fundamentos sobre el ruido y enfermedades ocupacionales:

Se explicarán mediante definiciones y estándares determinados en normas internacionales, así como el Acuerdo Gubernativo 229-2014 base legal que regula la salud y seguridad ocupacional en territorio guatemalteco. Además, se detallarán las prácticas más comunes en la mitigación del ruido en la industria y el uso del decibelímetro, termómetro digital y Vernier.

- Fundamentos estadísticos:

Se realizará una revisión de los conceptos y la aplicación de los diferentes diseños experimentales que se pueden aplicar al estudio. Se identificarán los tratamientos, niveles y covariables según lo requieran los objetivos y la aplicación del estudio.

### **9.4.2. Fase 2: Gestión para la recolección de la información**

- Selección de los instrumentos de medición

Considerando el factor económico y la precisión requerida, serán adquiridos un decibelímetro y un termómetro digital. Si ya fueron reanudadas las actividades académicas en la Universidad de San Carlos de Guatemala, por medio de la Unidad de E.P.S se puede solicitar el préstamo del equipo, de lo

contrario se procederá a comprar un equipo económicamente accesible. El Vernier ya fue adquirido.

- Elaboración de la cámara acústica

La cámara acústica se puede realizar manualmente por medio de un material cuya absorción sea no significativa. Esta se realizará con duroport, revisando que no existan aberturas que provoquen filtraciones sonoras.

- Pruebas previas y correcciones

Se realizará por medio de una prueba paramétrica de datos pareados la medición de ruido con el fin de comprobar que la tasa de absorción del duroport elegido en la cámara contenedora es insignificante. No se procederá a evaluar los diferentes tipos de materiales absorbentes hasta que se haya demostrado estadísticamente que el material de la cámara contenedora no tiene un efecto significativo en la absorción acústica.

Para esto se colocará una fuente sonora en el centro de un plano delimitado y se tomarán 10 mediciones acústicas a cierta distancia determinada, estos serán los valores iniciales de la prueba de datos pareados. Posteriormente la fuente sonora se colocará en la cámara contenedora y se volverán a hacer las mediciones acústicas a la misma distancia, estos valores serán la respuesta de la prueba de datos pareados. Se hará el contraste con la prueba de hipótesis:

$$H_0: \mu_{T_{a_0}} = \mu_{T_{a_1}}$$

$$H_a: \mu_{T_{a_0}} \neq \mu_{T_{a_1}}$$

Cuando se determine cierto espesor y características del material de la cámara contenedora que hacen que la hipótesis nula se acepte, se procederá a realizar el diseño experimental.

#### **9.4.3. Fase 3: recolección de la información**

Cuando el efecto de la cámara contenedora sea no significativo, entonces se procederá a realizar el diseño factorial considerando lo siguiente:

- El factor 1 será el tipo de material absorbente acústico, sus niveles serán; la fibra, la espuma y el textil. Para la otra variante del diseño experimental se agregará el cartón como nivel adicional.
- El factor 2 será el espesor del material, este tendrá cuatro niveles: 25, 50, 75 y 100 milímetros. Estos valores fueron seleccionados tomando de referencia la Norma UNE-EN 13162:2002, esta norma establece que el espesor de los materiales que serán sometidos a ensayos acústicos debe estar entre 20 y los 100 milímetros.
- Se identificará algún posible efecto de la temperatura ambiente como una covariable.

La estructura del primer diseño factorial sin incluir el contraste comparativo con el cartón de huevera sería la siguiente:

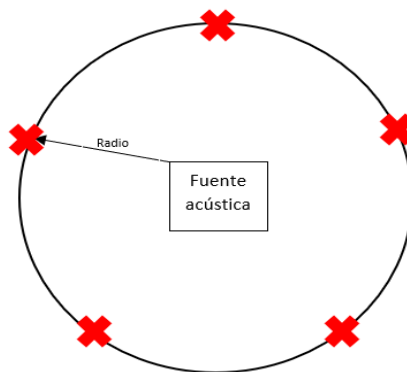
Tabla VI. **Diseño factorial**

Espesor (mm)	Tipo de material		
	Fibra	Espuma	Textil
25	...	...	...
50	...	...	...
75	...	...	...
100	...	...	...

Fuente: elaboración propia.

Se estimará el número de repeticiones (tamaño de muestra) para cada una de las combinaciones de los dos factores. Se procederá a seleccionar los puntos de medición aleatorios dentro de un radio establecido de la cámara contenedora y se medirán con el decibelímetro las tasas de transmisión acústica mientras se varía el tipo de material y su respectivo espesor. El número de puntos será equivalente al número de repeticiones; en la figura 8 se aprecia un posible esquema para un tamaño de muestra de cinco mediciones:

Figura 8. **Plano de medición**



Fuente: elaboración propia.

#### 9.4.4. Fase 4: análisis de la información

Para realizar el análisis de la información se utilizarán diferentes softwares que facilitarán los cálculos estadísticos sobre el análisis de varianza y las respectivas pruebas post hoc.

- Análisis gráfico

Para esto se busca utilizar gráficos que representen el comportamiento de las tasas de transmisión acústica, de ser necesario se utilizarán otro tipo de gráficos como los de dispersión, variabilidad e intervalo.

- Análisis de varianza del diseño factorial y la covariable

Primero se verificarán los supuestos de independencia por medio de la prueba de Kolmogorov-Smirnov y de homocedasticidad en las tasas medias de transmisión acústica por medio de la prueba de Bartlett. Posteriormente mediante el cálculo y comparación de la distribución F de Fisher se someterá a prueba la siguiente hipótesis, esta hipótesis es la misma en los dos diseños factoriales que se buscan plantear a un 95% de confianza:

Ho: el efecto de los diferentes tipos de materiales sobre la tasa de transmisión acústica es significativo.

Ha: el efecto de los diferentes tipos de materiales sobre la tasa de transmisión acústica es insignificante.

Ho: el espesor tiene un efecto significativo en la tasa de transmisión acústica.

Ha: el espesor no tiene un efecto significativo en la tasa de transmisión acústica.

Ho: es significativa la interacción entre el tipo de material y su respectivo espesor.

Ha: no es significativa la interacción entre el tipo de material y su respectivo espesor.

Ho: la temperatura ambiente tiene un efecto significativo sobre la tasa de transmisión acústica.

Ha: el efecto de la temperatura sobre la transmisión acústica no es significativo.

- Pruebas post-hoc para un factor:

Para comparar las diferencias entre los niveles del factor categórico asociado al tipo de materiales se usarán las siguientes pruebas:

- Comparaciones con la prueba de Tukey
- Comparaciones con la prueba de Duncan
- Comparaciones de un nivel contra los demás niveles por medio de la prueba de Hsu.

Se contrastarán los resultados de la prueba de Tukey y la de Duncan, de haber diferencias en ambas pruebas, se usará de referencia la prueba de Tukey debido a que tiene mayor potencia y confiabilidad. Finalmente se estimarán las diferencias significativas entre los diferentes niveles del factor y se determinará el mejor material absorbente del experimento.

#### **9.4.5. Fase 5: interpretación de la información**

Con los resultados que se obtengan, se buscará estimar cuál de los tipos de materiales es el mejor en la absorción acústica, así como la relación del espesor con la tasa de transmisión acústica.

Además, se evaluará si la temperatura ambiente tiene algún efecto significativo no controlado durante la realización del experimento.

#### **9.4.6. Fase 6: elaboración de informe final**

Los resultados serán analizados e interpretados en el informe final, incluyendo los gráficos y la información relevante del diseño experimental.



## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

En el siguiente apartado se presentan las técnicas a emplear para recolectar la información requerida en el experimento y su respectivo análisis de varianza:

- Prueba t de Student para datos pareados: se utilizará esta prueba para inferir si el efecto del material con el que se elaborará la cámara acústica es no significativo, en la medición de la tasa de transmisión del ruido. Se tendrán dos niveles en las muestras pareadas, el primer nivel es la medición de la tasa media de transmisión acústica de la fuente sonora sin la cámara acústica y el segundo nivel será la medición con la fuente sonora dentro de la cámara acústica. Se tiene contemplado usar como material el duroport, variando su espesor y sus dimensiones hasta lograr el efecto no significativo en la tasa de transmisión. La prueba está basada en las ecuaciones 1 a la 3, citadas en el marco teórico.
- Análisis de varianza de dos factores: los dos factores a contrastar son: el tipo de material absorbente y el espesor del material. Por medio de este análisis de varianza que utiliza la prueba F de Fisher, que busca inferir si existe alguna diferencia significativa entre los tipos de material absorbente y entre los espesores. Además, este tipo de análisis de varianza permite evaluar la interacción entre los dos factores y si estos tienen un efecto significativo en el modelo. La ecuación general de este modelo se encuentra resumida en la ecuación 29.

- Análisis de covarianza: se tendrá la temperatura ambiente como variable no controlada. El análisis de covarianza busca inferir si existe algún efecto significativo de esta covariable sobre el tipo de material y el espesor del material. La prueba está basada en las ecuaciones 30 a la 32.
- Gráfico Q-Q Plot: se utilizará este gráfico como un primer acercamiento a la verificación del supuesto de normalidad de los residuos del análisis de varianza, el contraste se realizará por medio de la prueba de Kolmogorov Smirnov.
- Prueba de Kolmogorov-Smirnov: esta prueba se utilizará para verificar el supuesto de normalidad que los residuos del análisis de varianza deben de cumplir y así poder hacer uso de la estadística paramétrica en los posteriores análisis. De rechazarse la normalidad, se probarán transformaciones por anamorfosis que cumplan con el supuesto de normalidad. Si tampoco es una alternativa adecuada y teniendo el suficiente tiempo y recursos, se repetirá la medición, si continúa el mismo patrón entonces se cambiará de enfoque a uno no paramétrico. Para esta prueba se utilizarán las ecuaciones 18 y 19.
- Gráfico de residuales en función de valores ajustados: por medio de este gráfico se puede visualizar si la varianza es constante o tiene algún patrón o comportamiento que afecte el supuesto de homocedasticidad. Para validar la interpretación gráfica, se utilizará la prueba de Bartlett.
- Prueba de Bartlett: esta prueba se utilizará para verificar que los análisis de varianza del estudio cumplan con el supuesto de homocedasticidad. Para poder realizar esta prueba altamente sensible, se debió comprobar

previamente la normalidad de los residuos. La prueba está basada en las ecuaciones 20 a la 23.

- Prueba de Tukey: esta prueba se utilizará para identificar la diferencia por pares de la tasa media de transmisión por tipo de material utilizado y por nivel de espesor. A través de esta prueba se estimará que material tiene la mayor absorción acústica, ya que presentaría la menor tasa de transmisión. Para esta prueba se utilizará la ecuación 24.
- Prueba de Duncan: esta prueba se usará como un contraste comparativo con la prueba de Tukey, debido a que también se utilizará para identificar la diferencia por pares de la tasa media de transmisión por tipo de material utilizado y por el nivel del espesor. Se espera que las estimaciones de ambas pruebas sean similares, de no serlo se tomará la prueba de Tukey como la principal debido a que tiene una mayor potencia. La prueba está basada en las ecuaciones 25 y 26.
- Prueba de Hsu: cuando se identifique por medio de la prueba de Tukey y Duncan cual es el mejor material absorbente, entonces se procederá a utilizar esta prueba para hacer la comparación de este material versus los demás, esto para contrastar los resultados de las pruebas de igualdad de medias utilizadas con anterioridad. Para esta prueba se utilizará la ecuación 27.



## 11. CRONOGRAMA

A continuación, se presenta la distribución por semanas de la metodología propuesta del proyecto:

Figura 9. Cronograma del experimento

FASES	TIEMPO (Semanas)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
FASE 1: Revisión literaria																
FASE 2: Gestión para la recolección de la información																
2.1. Selección de los instrumentos de medición																
2.2. Elaboración de la cámara acústica.																
2.3. Pruebas previas y correcciones a la cámara acústica																
FASE 3: Recolección de la información.																
FASE 4: Análisis de la información																
4.1. Análisis gráfico																
4.2. Análisis de varianza																
4.2. Pruebas Post-hoc																
FASE 5: Interpretación de la información																
FASE 6: Informe Final																
<b>TIEMPO TOTAL:</b>	15 semanas															

Fuente: elaboración propia.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

A continuación, detallan los recursos necesarios para la realización del presente proyecto:

### 12.1. Recursos financieros y equipo de medición

El recurso y equipo se muestra a continuación en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Recursos financieros y equipo**

Elemento	Unidad	Costo Unitario/(Q.)	Cantidad necesaria	Costo /(Q.)
FASE 2: Gestión para la recolección de la información				
Decibelímetro		0.00	1	0.00
Termómetro		0.00	1	0.00
Vernier		0.00	1	0.00
Duroport	Plancha	29.37	2	58.74
Adhesivo líquido		29.99	1	29.99
Cuchilla		19.99	1	19.99
FASE 3: Recolección de la información				
Lana de roca	Plancha	150.00	1	150.00
Algodón	Rollo	37.90	4	151.60
Cartón de huevera	Plancha	0.00	6	0.00
Poliestireno	Plancha	495.00	1	495.00
Fuente acústica		0.00	1	0.00
FASE 4: Análisis de la información				
Software de análisis		0.00	1	0.00

Continuación tabla VII.

FASE 6: Informe Final				
Papel	Resma	25.00	2	50.00
<b>TOTAL</b>				<b>955.32</b>

Fuente: elaboración propia.

## 12.2. Instalaciones

Debido a que se requiere un ambiente cerrado, libre de ruido y disponible en un horario nocturno, se acondicionará una bodega propia para el desarrollo del experimento. Por lo tanto, no habrá asignación de costos por el uso de la instalación, solamente inversión de tiempo y esfuerzo en el acondicionamiento del lugar para cumplir con las condiciones óptimas del experimento.



### 13. REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo de la República de Guatemala número 229-2014. Reglamento General sobre Higiene y Seguridad en el Trabajo. 23 de julio de 2014. Diario de Centroamérica, No. 16, 8 de agosto de 2014.
2. Bautista, E. (2008). *Diseño y análisis de experimentos, fundamentos y aplicación en agronómica*. Guatemala, Guatemala: Editorial Universitaria. Recuperado de [http://cete.fausac.gt/wpcontent/uploads/2020/11/Diseno\\_y\\_Analisis\\_de\\_Experimentos\\_2016a.pdf](http://cete.fausac.gt/wpcontent/uploads/2020/11/Diseno_y_Analisis_de_Experimentos_2016a.pdf)
3. Castellanos, J. y Cortés, S. (2010). *Diseño y construcción de elementos absorbentes selectivos con frecuencia de resonancia variable*. (Tesis de maestría). Universidad de San Buenaventura, Bogotá. Recuperado de <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/59905.pdf>
4. Centro de Calidad Ambiental (1992). *Norma Mexicana DGN-AA-43-1977: Determinación del nivel sonoro emitido por fuentes fijas*; Dirección General de Normas Mexicanas, México. Recuperado de <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa043.pdf>

5. Fundación Vida Sostenible (2015). *Edificación Sostenible: Aislamiento*. Ministerio para la Transición Ecológica; España. Recuperado de <https://tecnohotelnews.com/2020/02/16/edificacion-factor-clave-sostenibilidad/>
6. Gutiérrez, H. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos*. (3ª edición). Estado de México, México: Editorial McGraw-Hill.
7. Hernández, R. (2018). *Metodología de la Investigación*. (6ª edición). Estado de México, México: Editorial McGraw-Hill.
8. Inche, M., Chung, A., y Chia, R. (Enero, 2010). Diseño y desarrollo de nuevos materiales textiles para el aislamiento y acondicionamiento acústico. *Diseño y Tecnología* 13(1), 1-8. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/816/81619989012.pdf>
9. Montgomery, D. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos*. (2ª edición). Estado de México, México: Editorial Limusa-Wiley.
10. Naf-Cortés, R. (2013). *Guía Práctica para el Análisis y la Gestión del Ruido Industrial*. (1ª edición). Madrid, España: Editorial Imagen Artes Gráficas S. A. Recuperado de [http://invassat.gva.es/va/visor-biblioteca/-/asset\\_publisher/LvSYKI0K6pLa/content/naf-cortes-robert-r-2013-guia-practica-para-el-analisis-y-la-gestion-del-ruido-industrial](http://invassat.gva.es/va/visor-biblioteca/-/asset_publisher/LvSYKI0K6pLa/content/naf-cortes-robert-r-2013-guia-practica-para-el-analisis-y-la-gestion-del-ruido-industrial)

11. Niebel, B. (2009). *Ingeniería Industrial, métodos, tiempos y movimientos*. (1ª edición). Estado de México., México: Editorial Alfaomega. Recuperado de [https://www.academia.edu/7731445/Ingenier%C3%ADa\\_Industrial\\_12ma\\_Niebel\\_y\\_Freivalds](https://www.academia.edu/7731445/Ingenier%C3%ADa_Industrial_12ma_Niebel_y_Freivalds)
12. Pérez, M., Espinoza, J., Morales, V., López, M., Pérez, J., y Benítez, P. (2014). *Diseño de experimentos aplicados a proyectos*. Guanajuato; México: ECORFAN. Recuperado de [https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20Naturales%20T-II/Articulo\\_27.pdf](https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20Naturales%20T-II/Articulo_27.pdf)
13. Porras, Y. (2015). *Diseño de Aislamiento y Acondicionamiento Acústico para los estudios de emisión y grabación de la nueva sede de la Emisora Kennedy*. (Tesis de licenciatura) Universidad de San Buenaventura; Bogotá. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/33579/memoria.pdf>.
14. Quispe, C. (2014). *Obtención de arcilla modificada apilarada y su aplicación como material adsorbente en efluentes industriales contaminados con metales pesados*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de San Agustín, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3967>
15. Salgado, J. (2011). *Metodología de superficie de respuesta aplicado a la optimización de propiedades mecánicas de un compuesto de residuos de madera y plástico reciclado*. (Tesis de maestría) Postgrado Institucional Ciencia y Tecnología de México, México. Recuperado de <https://ciatec.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1019/48>

16. Siegel, S. (1990). *Estadística no paramétrica en la conducta científica*. Singapur: McGraw-Hill.
17. Tanco, M., Ilzarbe, L. (Julio, 2008). Aplicación del Diseño de Experimentos para la mejora de procesos de automoción. *Memorias de la universidad de Navarra* 1(6), 3-5. Recuperado de <http://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/265>
18. Torres, S. (2018). *Ingeniería de plantas*. (1ª edición). Guatemala, Guatemala: C. C. DAPAL.
19. Villalpando, J. (2001). Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, Hsu y Bechhofer para selección de medias. *Agrociencia* 35(1), 18-82. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30235107&idp=1&cid=4033501>
20. Walpole, R. y Myers, R. (2007). *Probabilidad y estadística*. (8ª edición). Estado de México, México: McGraw-Hill.

## 14. APÉNDICES

### Apéndice 1. Matriz de coherencia para los objetivos

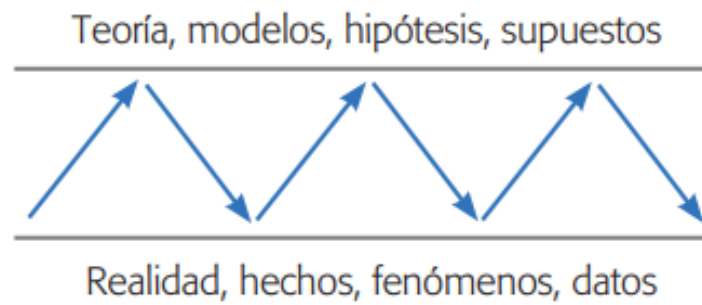
Elementos del problema	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN
01. Se desconoce el efecto que tiene el espesor como una covariable en los tasa media de absorción acústica.	01. ¿Existe algún efecto no controlado en la tasa media de absorción provocado por el espesor del material?
02. Se desconoce si las fibras, las espumas, y los textiles presentan una absorción igual o diferente entre clases de materiales.	02. ¿Qué diferencia hay entre las tasas de absorción de ruido entre la lana de roca(fibra), el poliestireno(espuma), el algodón(textil)?
03. No se cuenta con información técnica del cartón como un eficiente material absorbente ecológico.	03. ¿Cuál es la diferencia en la tasa de absorción del cartón frente a los otros materiales?
Se desconoce cuál es el material absorbente acústico más eficiente en un sistema masa-muelle-masa que logre reducir futuras enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.	¿Cuál es el material que presenta la mejor tasa media de absorción acústica?

Fuente: elaboración propia.



## 15. ANEXOS

### Anexo 1. **Proceso interactivo experimental**



Fuente: Gutiérrez (2012). *Análisis y Diseño Experimental*.