



**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO – ECUADOR**

**UNIVERSIDAD DE HUELVA – ESPAÑA**

**Colegio de Posgrados**

**Desarrollo de un software para análisis de bandas de octava, que permita calcular los niveles efectivos de presión sonora ponderados A. Aplicado a la selección de protectores auditivos**

**Daniel Alejandro Vaca Cañas**

**Jorge Alfredo Álava Moncada, MSc.**  
Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Magister en Seguridad, Salud y Ambiente, con menciones en: Seguridad en el Trabajo e Higiene Industrial

Quito, marzo de 2015

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO – ECUADOR****Colegio de Posgrados****HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Desarrollo de un software para análisis de bandas de octava, que permita calcular los niveles efectivos de presión sonora ponderados A. Aplicado a la selección de protectores auditivos**

**Daniel Alejandro Vaca Cañas**

Jorge Álava, MSc  
Director de trabajo de Titulación

---

Carlos Ruiz Frutos, PhD  
Miembro Comité de trabajo de Titulación

---

José Garrido, Ing. MSc.  
Miembro Comité de trabajo de Titulación

---

Luis Vásquez Zamora, MSc-ESP-DPLO-FPh.D  
Director de la Maestría en Seguridad, Salud y Ambiente de la Universidad San Francisco de Quito y Jurado de Titulación

---

Fernando Ortega, MD., MA., Ph.D.  
Decano de la Escuela de Salud Pública

---

Gonzalo Mantilla, MD-MEd-FAAP  
Decano de Colegio de Ciencias de la Salud

---

Victor Viteri, Ph.D.  
Decano del Colegio de Postgrados

---

Quito, marzo de 2015

**© DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

-----

Nombre: Daniel Alejandro Vaca Cañas

C. I.: 1718722869

Fecha: marzo de 2015

## DEDICATORIA

Dios gracias por brindarme la oportunidad de llegar hasta este momento, cuando muchas veces pensé que lo mejor era buscar un camino más fácil. Gracias porque me has dado fuerza espiritual y sabiduría y gracias porque me has regalado una gran familia y salud para disfrutarla.

A mi Abuelita Elena porque siempre tuvo para mí un sabio consejo, que me sirvió para tomar las mejores decisiones, porque dedicó sus mejores años para cuidarme y verme crecer, porque cuando estuve enfermo de salud o de espíritu tuvo siempre un remedio que me hizo mejorar y porque el simple hecho de tenerla a mi lado hace que me sienta agradecido con Dios por permitirme disfrutar de su compañía

A mi Papá René, porque ha dedicado su vida y su esfuerzo para lograr que nosotros, sus hijos, tengamos un norte y un camino guiado por valores y basado en principios. Porque nos enseñó el valor de las verdaderas cosas, aquellas que perduran cuando otras triviales se han extinguido y porque siempre me apoyó en todo lo que le pedí, aun cuando hacerlo ya no era su obligación.

A mi Mama, Betty, por su infinito amor y comprensión, porque estuvo siempre a mi lado ayudándome a madurar, porque a pesar de que no siempre fui el mejor hijo, ella nunca dejó de ser la mejor madre, porque a través del tiempo ha puesto en mis manos todas las herramientas que pude haber necesitado para seguir adelante.

A mi Tía Isabel, que es como una segunda madre para mí, porque me ha enseñado que por mucho que desee las cosas nunca van a llegar si no lucho por ellas, porque me enseñó que si no doy el primer paso y empiezo a caminar nadie lo va a hacer por mí.

A mi Tío Gonzalo y a mi Tía Rosita, porque siempre fueron un ejemplo a seguir y porque siempre me encanto e intenté aprender la forma inteligente con que manejan y resuelven las cosas.

A mis hermanos, David y Diana, porque con sus ánimos, buenos deseos y bromas he llegado a alcanzar muchas de las cosas por las cuales me esforcé.

## **AGRADECIMIENTO**

Dedico esta tesis al esfuerzo, a la perseverancia en general, no solo mías, sino de todos aquellos que lucharon y lo consiguieron, dedico esta tesis a mi novia Wendy ya que a pesar de que no podía ayudarme directamente con ella, sus palabras, sus elogios, y su apoyo incondicional fueron siempre la mejor ayuda, porque me dio su palabra y la mantuvo, pero principalmente dedico esta tesis a mis hermanos porque quiero que cuando les toque su turno de hacer lo que tengan que hacer lo hagan mejor que yo.

## RESUMEN

El propósito de este trabajo de tesis es proveer de herramientas objetivas para la correcta selección de elementos de protección auditiva y para el reconocimiento e identificación de ruido ocupacional en los puestos de trabajo de la empresa Franz Viegner. La necesidad de esta investigación partió de las estadísticas de morbilidad de hipoacusia presentados en la empresa, las cuales muestran una tendencia ascendente en los tipos moderada y severa. El presente proyecto también es aplicable a industrias ecuatorianas de tipo manufactureras, ingeniería, petróleo, minería y energía, ya que está basado en normas INEN, ANSI e IEC.

El análisis de los niveles reales de presión sonora está basado en la metodología de bandas de octava, conforme a la norma NTE INEN ISO 4869-2 y la estrategia de medición para la determinación de la exposición a ruido ocupacional, está basada en el puesto de trabajo, conforme a la norma NTE INEN ISO 9612

El sistema desarrollado en esta tesis puede ser aplicado antes o después de la implementación de elementos de protección auditiva. Por una parte, si la utilización es antes de la implementación, las empresas podrán seleccionar de manera adecuada los equipos de protección; y por otra parte, si la aplicación es después de la implementación, se podrá calcular los niveles reales de presión sonora, con el objetivo de conocer si las medidas adoptadas se encuentran dentro de lo estipulado en la legislación nacional de seguridad y e higiene del trabajo.

El equipo desarrollado tendrá dos características; será un analizador de bandas de octava y sonómetro integrador promediador en tiempo real. Podrá ser utilizado como instrumento de reconocimiento para la identificación de ruido ocupacional ya que será un equipo de Clase III.

## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to give objective tools to the suitable selection of elements for hearing protection and for recognition and identification of occupational noise in different work spaces of the company Franz Viegner. The need of this investigation started from the statistic of hearing impairment morbidity in the company, which shows a tendency in moderate and strict kinds. This project is also applicable to Ecuadorian industries such as manufacturing, engineering, petroleum, mining and energy, because it is based in the INEN, ANSI and IEC regulations

The analysis of the real sound pressure levels is based on the methodology of octave bands, under NTE INEN ISO 4869-2 regulation, and the measurement strategy to the determination of exposure to occupational noise is based on the job, under NTE INEN ISO 9612 regulation.

The developed system in this thesis can be applied before or after the implementation of hearing protection elements. In one hand, if it is used before the implementation, the companies could choose the equipment of protection correctly, in the other hand, if it is used after the implementation, it will be possible to calculate the real sound pressure level, being the objective knowing if this is according with the national legislation of safety and occupational health

The created equipment will have two characteristics; it will be an analyzer of octave band and an integrating sound level meter, both in real time. It may be used as a recognized device for the identification of occupational noise, because it will be Type III.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA.....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. Descripción de la empresa o área de trabajo .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2. Problema que se pretende abordar .....</b>	<b>20</b>
1.2.1. Preguntas de investigación.....	21
1.2.2. Sub preguntas de investigación.....	21
<b>1.3. Justificación del estudio .....</b>	<b>22</b>
<b>1.4. Revisión de la literatura, antecedentes o fundamentos teóricos.....</b>	<b>26</b>
1.4.1. Frecuencia.....	27
1.4.2. Amplitud .....	27
1.4.3. Nivel de presión sonora .....	28
1.4.4. Análisis espectral del ruido.....	29
1.4.5. Escalas de ponderación.....	32
1.4.6. Ruido ocupacional .....	37
1.4.7. Dosis de ruido .....	41
1.4.8. Características de los equipos de medición .....	45
1.4.9. Software de programación LabVIEW .....	48
<b>CAPÍTULO II: OBJETIVOS .....</b>	<b>51</b>
<b>2.1. Objetivos generales .....</b>	<b>51</b>
<b>2.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>51</b>
<b>2.3. Objetivos colaterales.....</b>	<b>51</b>

<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....</b>	<b>53</b>
<b>3.1. Población y muestra.....</b>	<b>54</b>
<b>3.2. Tipo de estudio y de diseño .....</b>	<b>55</b>
<b>3.3. Instrumentos, equipos y materiales.....</b>	<b>56</b>
3.3.1. Análisis de la norma NTE INEN ISO 4869-2 2014 .....	57
3.3.2. Desarrollo del analizador de bandas de octava.....	61
<b>3.4. Fases de estudio.....</b>	<b>79</b>
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1. Calibración de campo del analizador de bandas de octava .....</b>	<b>84</b>
<b>4.2. Análisis del puesto de trabajo en donde se realizarán las pruebas .....</b>	<b>86</b>
<b>4.3. Medición de ruido basado en la estrategia del puesto de trabajo .....</b>	<b>91</b>
4.3.2. Incertidumbre para la medición basada en el puesto de trabajo .....	97
<b>4.4. Selección de elementos de protección auditiva.....</b>	<b>100</b>
<b>CAPÍTULO V: DISCUSIÓN .....</b>	<b>103</b>
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....</b>	<b>106</b>
<b>CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES .....</b>	<b>110</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>115</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procesos de producción de la Empresa Franz Viegener. ....	19
Figura 2. Estadística de hipoacusia en la empresa Franz Viegener.....	25
Figura 3. Esquema representativo de dos tipos de frecuencias .....	27
Figura 4. Esquema representativo de dos amplitudes distintas .....	28
Figura 5. Representación gráfica de una octava .....	30
Figura 6. Suma de los NPS contenidos entre los límites de la frecuencia central de 1000 Hz 31	
Figura 7. Contornos de Fletcher y Munson (1933) y Robinson y Dadson (1956) .....	32
Figura 8. Simulación de las escalas de ponderación A, B y C en el Software Matlab .....	37
Figura 9. a) Variación de Presión sonora vs. Tiempo de un clarinete, b) Contenido armónico del sonido del clarinete .....	38
Figura 10. Nivel de presión sonora continua equivalente ( $L_{Aeq,T}$ ) y nivel de presión sonora (NPS).....	40
Figura 11. Panel frontal de LabVIEW, es el interfaz con el usuario .....	49
Figura 12. Diagrama de bloques, es la programación del sistema .....	50
Figura 13. Datos de atenuación del protector auditivo 3M <sup>TM</sup> Peltor <sup>TM</sup> X3A.....	59
Figura 14. Diagrama de bloques de la construcción del equipo .....	61
Figura 15. Esquema de una tarjeta de sonido .....	62
Figura 16. Efecto aliasing. ....	63
Figura 17. Comparación entre una señal sin ponderación, y la misma señal con ponderación A.....	66
Figura 18. Medias de ponderación temporal .....	67
Figura 19. Relación de medidas SEL y $L_{Aeq}$ .....	68

Figura 20. A la izquierda un filtro pasa alto, a la derecha un filtro pasa bajo y en la parte inferior el ancho de banda (bandwidth) resultante.....	71
Figura 21. Pantallas de visualización para bandas de octava y $\frac{1}{3}$ de octava con ponderación A.....	73
Figura 22. Tiempo de estabilización del sistema (settling time) .....	74
Figura 23. Gráficas y tablas para la presentación de resultados .....	76
Figura 24. Respuesta en frecuencia del micrófono.....	77
Figura 25. Parámetros de calibración del micrófono.....	79
Figura 26. Panel de usuario del analizador de bandas de octava desarrollado .....	82
Figura 27. Código de programación del analizador de bandas de octava desarrollado.....	83
Figura 28. Calibrador marca 3M modelo QC-20 .....	84
Figura 29. Puesto de máquinas de alta presión.....	86
Figura 30. Desmolde de piezas, a la izquierda el pistón neumático y a la derecha el transporte.....	88
Figura 31. Lavado de piezas, a la izquierda turno de la mañana y a la derecha turno de la tarde.....	89
Figura 32. Acopio de piezas .....	90
Figura 33. Distribución normal con un intervalo de confianza unilateral del 95%.....	98
Figura 34. Descripción del protector auditivo E-A-R <sup>TM</sup> Express <sup>TM</sup> de 3M .....	100
Figura 35. Características técnicas del protector auditivo E-A-R <sup>TM</sup> Express <sup>TM</sup> de 3M .....	101
Figura 36. Distribución normal con un intervalo de confianza bilateral de 95% .....	105

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Frecuencias centrales para bandas de octava y tercios de octava.....	31
Tabla 2. Frecuencia inferior, central y superior de la banda de octava .....	31
Tabla 3. Tiempo permitido de exposición en función del nivel sonoro. ....	42
Tabla 4. Normas técnicas acerca del hardware y software de los equipos de medición de ruido .....	45
Tabla 5. Clasificación y uso de los sonómetros de acuerdo a su exactitud, conforme a IEC 60651.....	47
Tabla 6. Comparación de tolerancia entre sonómetros y calibradores según la norma IEC 60651.....	47
Tabla 7. Características de la población de estudio.....	54
Tabla 8. Comparación de los métodos de estimación de los niveles efectivos .....	58
Tabla 9. Valor de $\alpha$ en función del porcentaje de eficacia .....	60
Tabla 10. Estructuras de programación para la adquisición de datos.....	65
Tabla 11. Estructuras de programación para calcular las escalas de ponderación .....	66
Tabla 12. Estructuras de programación para el cálculo de las medias de ponderación temporal .....	70
Tabla 13. Estructuras de programación para desarrollar los filtros de bandas de octava y $1/3$ de octava. ....	75
Tabla 14. Estructuras de programación creadas para presentación de resultados .....	76
Tabla 15. Características del micrófono marca Shure modelo SV100.....	77
Tabla 16. Estructura de programación creada para la calibración del micrófono .....	79
Tabla 17. Diagrama de Gantt en el cual se muestran las fases de estudio.....	80
Tabla 18. Calibración del analizador de bandas de octava.....	85

Tabla 19. Horarios de trabajo en Franz Viegener.....	91
Tabla 20. Planificación de las mediciones.....	93
Tabla 21. Método de muestreo simple sin reposición .....	93
Tabla 22. Parámetros de configuración para la medición de ruido ocupacional .....	94
Tabla 23. Resultado de las mediciones con el analizador desarrollado.....	95
Tabla 24. Resultado de las mediciones con el sonómetro integrador de 3M modelo SoundPro Clase I.....	95
Tabla 25. Valores para calcular la incertidumbre típica combinada u. ....	98
Tabla 26. Nivel efectivo de presión sonora con los datos del analizador desarrollado .....	101
Tabla 27. Nivel efectivo de presión sonora con los datos del sonómetro del 3M .....	102
Tabla 28. Características del analizador de bandas desarrollado .....	107

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Nivel de presión sonora .....	28
Ecuación 2. Intensidad de una onda sonora.....	29
Ecuación 3. Nivel de intensidad sonora, donde: $I_{ref} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ .....	29
Ecuación 4. Estado estacionario de la escala de ponderación A .....	33
Ecuación 5. Ecuación de la escala de ponderación A.....	33
Ecuación 6. Ecuación resumida de la escala de ponderación A .....	34
Ecuación 7. Estado estacionario de la escala de ponderación C .....	34
Ecuación 8. Ecuación de la escala de ponderación C.....	34
Ecuación 9. Ecuación resumida de la escala de ponderación C .....	35
Ecuación 10. Estado estacionario de la escala de ponderación B .....	35
Ecuación 11. Ecuación de la escala de ponderación B.....	35
Ecuación 12. Ecuación resumida de la escala de ponderación B .....	36
Ecuación 13. Nivel de presión sonora continua equivalente ponderado A .....	39
Ecuación 14. Nivel de presión sonora continua equivalente ponderado A .....	39
Ecuación 15. Nivel de exposición diario equivalente.....	40
Ecuación 16. Nivel semanal equivalente .....	41
Ecuación 17. Nivel pico.....	41
Ecuación 18. Tiempo permitido de exposición a ruido ocupacional.....	42
Ecuación 19. Dosis diaria .....	43
Ecuación 20. Ecuación de dosis diaria simplificada.....	44
Ecuación 21. Nivel equivalente en función de la dosis diaria .....	44
Ecuación 22. Protección asumida.....	60
Ecuación 23. Teorema de muestreo de Nyquist y Shanon .....	62

Ecuación 24. Ecuación del número de muestras .....	64
Ecuación 25. Nivel de presión sonora de tiempo promedio exponencial.....	69
Ecuación 26. Ecuación para hallar las frecuencias centrales de banda de octava .....	72
Ecuación 27. Ecuación para hallar las frecuencias centrales de $\frac{1}{3}$ de octava.....	72
Ecuación 28. Ecuaciones de los límites inferior y superior para bandas de octava .....	72
Ecuación 29. Ecuaciones de los límites inferior y superior para bandas de $\frac{1}{3}$ de octava.....	73
Ecuación 30. Tiempo de estabilización del sistema (settling time).....	74
Ecuación 31. Ecuación para transformar la sensibilidad de un micrófono de $\frac{mV}{Pa}$ a $\frac{dBV}{Pa}$ ..	78
Ecuación 32. Ecuación de trabajo semi manual .....	90
Ecuación 33. Tiempo mínimo de medición, si el GEH está conformado entre $5 < n_G \leq 15$ ...	92
Ecuación 34. Incertidumbre típica combinada .....	97
Ecuación 35. Incertidumbre expandida .....	99

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA**

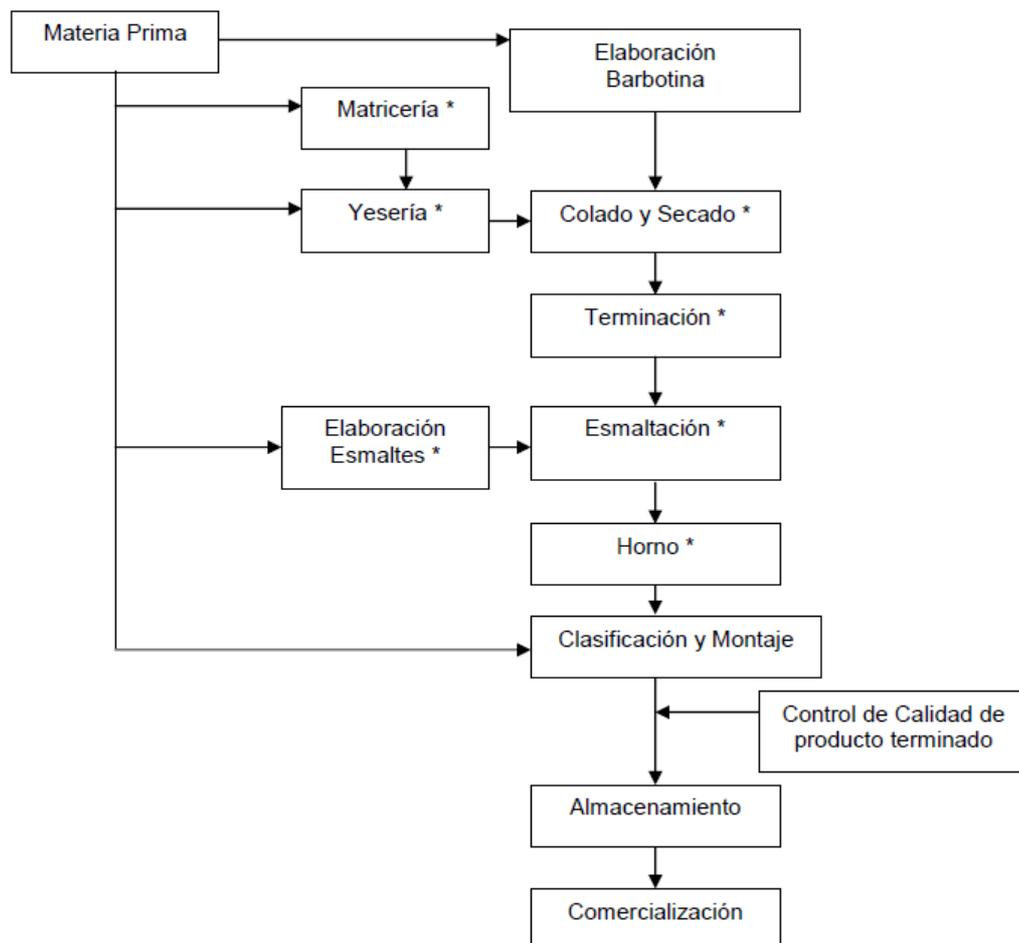
### **1.1. Descripción de la empresa o área de trabajo**

La historia de la empresa se remonta a finales del siglo XIX, cuando se fundó la primera empresa FV.- Franz Viegener, en Alemania. Se dedica a la fabricación y comercialización de grifería, sanitarios, y complementos para baños, cocinas e instalaciones sanitarias. Por su permanente capacitación, innovación tecnológica, sistemas propios y monitoreo constante del mercado, es considerada como una empresa líder del sector en Ecuador y Latinoamérica.

Busca brindar a sus clientes bienestar y comodidad, a través de sus productos, para lo que cuenta con un riguroso control de calidad, que garantiza un rendimiento óptimo y el uso de los productos por tiempo indefinido. FV.- Área Andina busca una evolución constante dentro del mercado, de la mano de sus valores corporativos y humanos, capacidad tecnológica y de compromiso con sus clientes. (Franz Viegener, 2014).

La producción cuenta con diferentes procesos: materia prima, elaboración de barbotina, preparación de esmaltes, matricería, yesería, colado y secado, terminación y esmaltación, hornos y clasificación. Adicional a estas secciones, se debe mencionar también a control de calidad y a programación de producción. El esquema del proceso de producción se muestra en la Figura 1.

Cualquier producto defectuoso puede ser recuperado hasta antes de la sección de hornos. Una vez salido el producto de ahí, si tuviese algún problema crítico, es imposible recuperarlo. Debido a esto, los productos una vez salidos de la Sección Hornos son clasificados de acuerdo a cinco calidades. La calidad I tiene una o algunas fallas de textura, por ejemplo uniformidad de color, esta calidad generalmente se dona (junto con la mano de obra y el transporte) a ancianatos u orfanatos. En la calidad V el producto tiene una falla mecánica, por lo que se lo desecha. Generalmente los desechos de la cerámica sanitaria sirven para rellenos de construcción.



**Figura 1.** Procesos de producción de la Empresa Franz Viegener.

**Fuente.** (Arhivo interno del SGC de FV, 2012)

## **1.2. Problema que se pretende abordar**

El ruido es el agente físico más común en el ámbito laboral y produce una serie de trastornos psíquicos como cansancio mental y estrés, pero también produce hipoacusia que es una enfermedad crónica e irreversible. Ninguno de los factores de riesgo para la salud que concurren en un ambiente laboral, lo hace tan reiteradamente como el ruido (Fundación MAPFRE, 1996)

Países en la región, como es el caso de Chile y Argentina, manejan desde hace algunos años programas encaminados a la prevención de daño auditivo en el trabajo (Chávez Miranda, 2006). Estados Unidos y España dedican mucho esfuerzo a través de sus organizaciones NIOSH e INSHT respectivamente, a disminuir la incidencia de trastornos acústicos y a prevenir la ocurrencia de enfermedades profesionales.

A pesar de que el ruido está casi siempre presente en cualquier ambiente laboral, en el Ecuador los criterios para control y vigilancia son escasos, tanto es así que la única directiva acerca del ruido ocupacional, era lo citado en el artículo 55 del Decreto Ejecutivo 2393. Este ha sido uno de los inconvenientes para desarrollar programas de control y prevención sobre ruido ocupacional a nivel nacional.

En el año 2014, el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) adoptó algunas normas ISO de diferentes temas, entre aquellas normas algunas referentes a Acústica y otras más específicamente a ruido ocupacional. Es bajo la metodología de estas normas

que se pretende dar solución al problema de la correcta selección de un elemento de protección acústica en un ambiente laboral determinado.

Dos ruidos con igual nivel sonoro podrían ser completamente distintos, debido a sus características intrínsecas, como por ejemplo la frecuencia de cada uno de ellos y la distorsión armónica. En el caso particular de este proyecto de investigación, se busca solucionar una problemática a nivel general, que es la correcta selección de un elemento de protección auditiva.

La necesidad de este trabajo se origina de dos problemas, por una parte, la falta de un criterio concluyente para la selección de protección auditiva; y por otra parte, la subjetividad que existe cuando se trata de identificar ruido ocupacional en el ambiente laboral. Este proyecto de investigación proporcionará una herramienta para seleccionar de manera adecuada un equipo de protección acústica y brindar una herramienta objetiva para la identificación de ruido ocupacional.

### **1.2.1. Preguntas de investigación**

- ¿Cuál es la metodología reconocida a nivel nacional o internacional que se debe aplicar para el reconocimiento e identificación de ruido ocupacional?

### **1.2.2. Sub preguntas de investigación**

- ¿Cuál es el criterio más apropiado para seleccionar de manera correcta la implementación de protectores auditivos?
- ¿Cuál es el nivel de presión sonora real en un ambiente ruidoso, después de que se han implementado protectores auditivos?
- ¿Cuál es el error que se comete al realizar una medición de ruido ocupacional con el equipo desarrollado?
- ¿Cuáles son los criterios técnicos nacionales e internacionales, para prevenir enfermedades profesionales producidas por ruido ocupacional?

### **1.3. Justificación del estudio**

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2012), 300 millones de personas se ven afectadas por ruido ocupacional. De esa cantidad un 20% ya presentan problemas auditivos. La normativa nacional sobre ruido indica que durante 8 horas de trabajo una persona puede estar expuesta hasta 85 dBA, aunque en otros países se toma como referencia 80 dBA. Por encima de esa dosis se entiende que se generarán problemas auditivos. Tomando como referencia estos datos, El Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de EEUU, ha establecido que se producirán pérdidas auditivas después de 20 años de trabajo.

El ruido ocupacional es el segundo factor, después del envejecimiento natural, de pérdidas auditivas (Organización Internacional del Trabajo, 1998). Según la Nota Técnica de Prevención *Evaluación del ruido en ergonomía*, que menciona a la Organización Mundial de la Salud, a 50 dBA ya se comienza a percibir discomfort acústico. Es fácil sobrepasar los 50 dBA en un ambiente laboral tranquilo y aislado, pero es más fácil aún sobrepasar la barrera de los 85 dBA en un ambiente laboral ruidoso (Chávez Miranda, 2006). Por esta razón la exposición a ruido ocupacional está presente en casi todos los ambientes laborales.

Según Bárbara A. (1996), para estudios audiométricos se debe considerar que existe una tasa de disminución auditiva en las personas dependiendo de la edad. Así pues un hombre de 20 años presenta pérdidas de audición para las frecuencias de 5, 3, 4, 5 y 8 dB para las frecuencias de 1000, 2000, 3000, 4000 y 6000 Hz respectivamente, mientras que un hombre de 50 años presenta pérdidas de 9, 9, 16, 22 y 27 dB en las mismas frecuencias.

El criterio mencionado anteriormente hace suponer que la pérdida auditiva del ser humano no solo depende de la intensidad del ruido, sino que también de la frecuencia. Así por ejemplo, una persona que escuche dos o más horas diarias de música con audífonos intrauriculares, tiene más riesgo de pérdida auditiva en las frecuencias altas (9000 a 16000Hz) (Salazar & Vásquez, 2006)

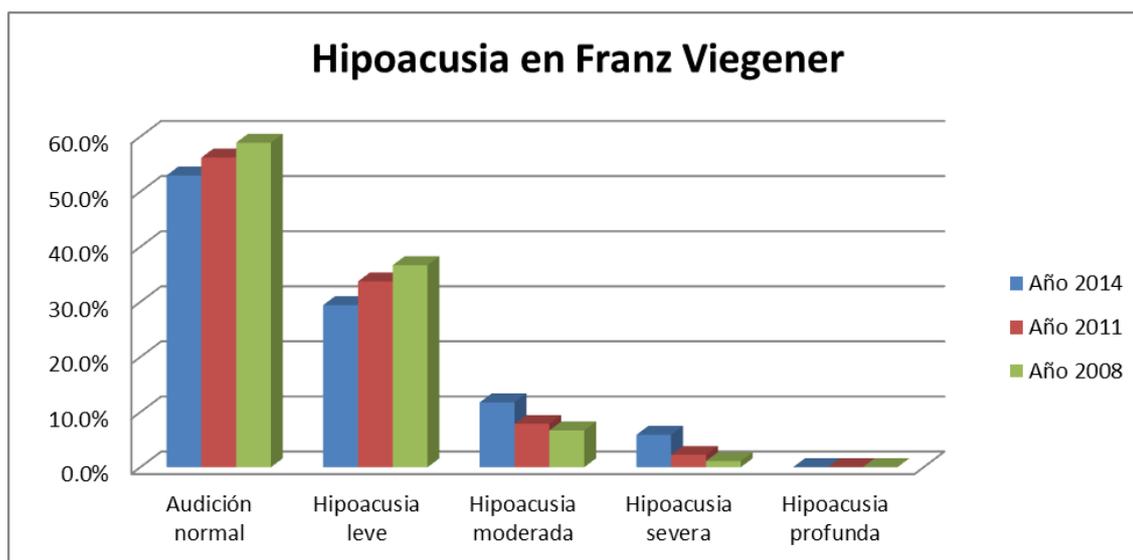
Entonces es lógico suponer que al igual que los contaminantes de ruido, los elementos de protección acústica tienen características de atenuación no solo en intensidad, sino más bien divididos por frecuencia. Es así que un modelo de protección auditiva tipo tapón, por ejemplo el modelo 1291 de 3M, no tiene las mismas características de

atenuación que una oreja modelo H9 de 3M, aunque ambos tienen un NRR (nivel de reducción de ruido) de 25 dB (3m, 2007). Esta diferencia se debe a las características de atenuación por frecuencias de cada uno de ellos. De esta manera se entendería que el nivel de reducción de ruido de un protector auditivo, aunque es un método rápido y fácil de aplicar, no ofrece todos los detalles que deben considerarse para la selección de protección auditiva.

Dado que, El literal c) del artículo 11) del Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo, dice "...el empleador deberá proporcionar, sin costo alguno para el trabajador, las ropas y los equipos de protección individual adecuados". El literal 5) del artículo 11) del Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo, dice "El empleador deberá entregar gratuitamente a sus trabajadores vestido adecuado para el trabajo y los medios de protección personal y colectiva necesarios". El numeral 4.7) artículo 9 del Reglamento para el Sistema de Auditorías de Riesgos del Trabajo, al referirse a los equipos de protección individual, dice "Se tiene un programa técnicamente idóneo para selección...". Se deberán entender entonces que los elementos de protección auditiva deben ser seleccionados adecuadamente. Es por ello que la metodología para desarrollar esta tesis está basado en bandas de octava, que aunque es un procedimiento más largo y complejo que el NRR, ofrece toda la información necesaria para la selección de protección auditiva (Kotarbińska & Kozłowski, 2006).

A continuación se presentan estadísticas internas del Departamento de Salud Ocupacional de la empresa Franz Viegner. El eje horizontal corresponde a los tipos de hipoacusia presentados en la empresa y el eje vertical corresponde al número porcentual de

caso desde el año 2008. Se puede observar como los casos de audición normal e hipoacusia leve han ido disminuyendo a través del tiempo, pero los casos de hipoacusia moderada y severa han aumentado y no se han presentado casos de hipoacusia profunda. Como resultado de estas estadísticas, es claro que debe implementarse una política para la prevención de hipoacusia. Parte de esa política, y el objeto estudio de esta tesis, es la correcta selección de elementos de protección auditiva.



**Figura 2.** Estadística de hipoacusia en la empresa Franz Viegener

**Fuente.** (Archivo interno del departamento de salud ocupacional, 2014)

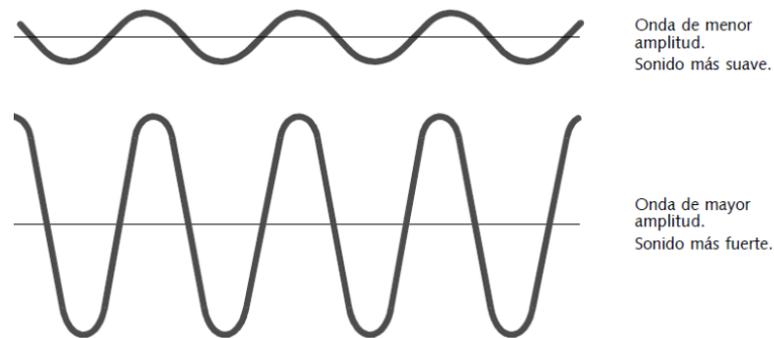
En donde, audición normal: la persona puede oír sonidos suaves por encima de 20 dBHL, hipoacusia leve: pérdida no superior a 40 dB para las frecuencias centrales, hipoacusia moderada: pérdida comprendida entre 50 dB y 70 dB, hipoacusia grave: pérdida comprendida entre 70 dB y 90 dB, hipoacusia profunda: pérdida superior a 90 dB (Chávez Miranda, 2006).

Dado que, el literal b) del artículo 11 del Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo dice, “El empleador deberá identificar y evaluar los riesgos, en forma inicial y periódicamente, con la finalidad de planificar adecuadamente las acciones preventivas...” y que el Reglamento para el Sistema de Auditorías de Riesgos del Trabajo, establece en su artículo 9) numeral 2.1) “Se han identificado las categorías de factores de riesgo ocupacional de todos los puestos de trabajo, utilizando procedimientos reconocidos en el ámbito nacional, o internacional en ausencia de los primeros”. Entonces se concluye que, debido a que el ruido ocupacional es un factor de riesgo físico, es necesario aplicar una metodología reconocida para su identificación en el ambiente laboral. Según la norma IEC 60651, la identificación de este factor de riesgo debe hacerse con un sonómetro de reconocimiento (Clase III) (Ménendez Díez , 2009)

#### **1.4. Revisión de la literatura, antecedentes o fundamentos teóricos**

Se realizará la revisión de la literatura comenzando por un estudio general y básico de acústica, para pasar al estudio del ruido y sus características. Se revisará criterios técnicos nacionales e internaciones para prevención de patologías causadas por ruido ocupacional. Finalmente se analizarán las normas de referencia para equipos de medición y control de ruido.





**Figura 4.** Esquema representativo de dos amplitudes distintas

La amplitud se mide en [dB]. La escala auditiva varía entre 0 [dB] y 120 [dB]. Los sonidos superiores a 110 [dB] producen sensación dolorosa y la exposición permanente a esos niveles provoca la disminución de la capacidad auditiva. (Organización Internacional del Trabajo, 1998)

### 1.4.3. Nivel de presión sonora

Si se denomina  $P_{ref}$  (presión de referencia) a la presión de un tono en el umbral de audición ( $P_{ref} = 2 \times 10^{-5}$  Pa) y  $P$  a la presión sonora, podemos definir el nivel de presión sonora como  $L_p$ , también llamado NPS (nivel de presión sonora) o SPL (sound pressure level) por otros autores (Crocker, 1998).

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} [dB]$$

**Ecuación 1.** Nivel de presión sonora

Tomando en cuenta que:

$$I = \frac{P^2}{\delta v}$$

**Ecuación 2.** Intensidad de una onda sonora

Donde:

I = Intensidad de una onda sonora

$\delta$  = Densidad del medio de transmisión, para el caso del aire: 1.2 Kg/m<sup>3</sup>

v = Rapidez del sonido en el medio de transmisión, para el caso del aire: 344 m/seg

Reemplazando los datos anteriores en la Ecuación 2, y despejando P:

$$P = 20.32\sqrt{I}$$

Reemplazando en la Ecuación 1:

$$L_p = 10 \log \frac{I}{I_{ref}}$$

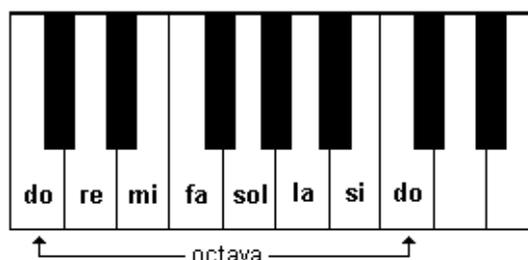
**Ecuación 3.** Nivel de intensidad sonora, donde:  $I_{ref} = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>

#### 1.4.4 Análisis espectral del ruido

Dada la amplia banda o gama de frecuencias audibles, para realizar estudios de ruido no es posible analizarlas una a una, por lo que ha sido dividida dicha banda en 10 bandas más pequeñas denominadas octavas, las cuales se conocen por su frecuencias centrales. Para estudios de mayor precisión, se definen bandas de menor ancho, denominadas tercios de octava o incluso sextos de octava.

#### 1.4.4.1. Octava.

Hay muchas situaciones donde se requiere de un análisis de frecuencia. Un ejemplo de esto es el análisis del ruido industrial, donde se estudia el índice de molestia o de riesgo físico a un ser humano. El mecanismo de audición humano es sensible a proporciones de frecuencias más que a frecuencias. La frecuencia de un sonido determinará su altura, y una proporción de 2:1 de una frecuencia se escucha como un cambio de altura de una octava, sin que importe cuales fueran las frecuencias (Giménez de Paz, 2007). Se denomina octava al intervalo de ocho grados entre dos notas de la escala musical, así por ejemplo: si se enumeramos los sonidos musicales siguiendo la secuencia, do—re—mi—fa—sol—la—si~do, como se muestra en la Figura 5, se observa que del primer do<sub>1</sub> (agudo) al segundo do<sub>8</sub> (grave) existen ocho posiciones, y si la frecuencia correspondiente al sonido do<sub>1</sub> es  $f_1$ , y la frecuencia correspondiente al sonido do<sub>8</sub> es  $f_8$ , entonces se cumple que:  $f_8 = 2f_1$ . Si por ejemplo se sube un sonido de 100 Hz a 200 Hz, su altura se subirá una octava. Las frecuencias centrales o preferentes para bandas de octava y  $1/3$  de octava según la norma ANSI S1.11 2004 *Specification for octave-band and fractional-octave-band analog and digital filters*, se muestran en la Tabla 1. Las frecuencias centrales, inferiores y superiores para bandas de octava se pueden apreciar en la Tabla 2.



**Figura 5.** Representación gráfica de una octava

**Tabla 1.** Frecuencias centrales para bandas de octava y tercios de octava

OCTAVA (Hz)	125			250			500			1000			2000			4000			8000		
1/3 OCTAVA (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000

**Fuente.** (American National Standard Institute, 2004)

**Tabla 2.** Frecuencia inferior, central y superior de la banda de octava

FRECUENCIA INFERIOR (Hz)	FRECUENCIA CENTRAL (Hz)	FRECUENCIA SUPERIOR (Hz)
22	31,5	44
44	63	88
88	125	177
177	250	355
355	500	710
710	1.000	1.420
1.420	2.000	2.840
2.840	4.000	5.680
5.680	8.000	11.360

**Fuente:** (Fundación MAPFRE, 1996, p. 434)

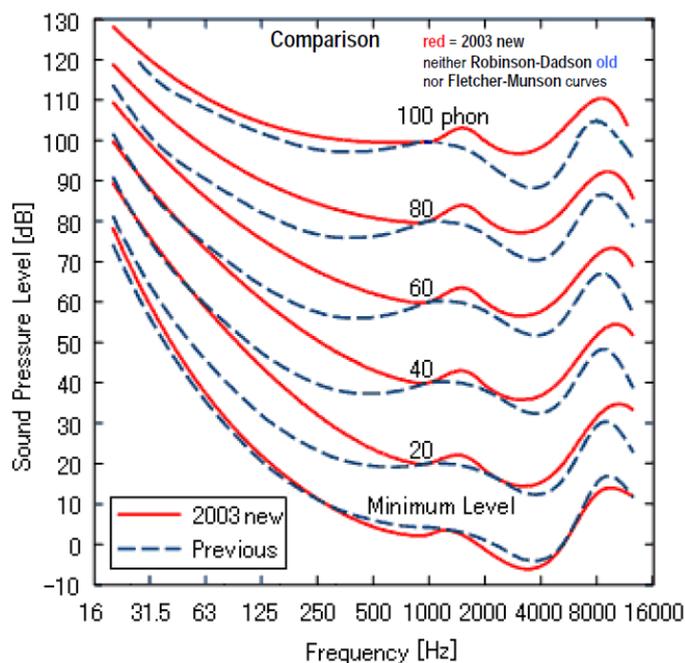
A la frecuencia central de cada banda se le asigna el nivel resultante de componer los niveles de todas las frecuencias contenidas entre los límites superior e inferior del intervalo, como se muestra en la Figura 6.

Ejemplo: Composición de niveles			
$f_{1/3 \text{ OCT}}$	NPS (dBA)	$f_{\text{OCT}}$	NPS (dBA)
800 Hz	55 dBA	1000 Hz	<b>64,3 dBA</b>
1000 Hz	56 dBA		
1250 Hz	63 dBA		

$$\text{NPS}_{\text{Total } 1000\text{Hz}} = 10 \cdot \log \left( \sum_{i=1}^3 10^{\frac{\text{NPS}_i}{10}} \right) = 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{55}{10}} + 10^{\frac{56}{10}} + 10^{\frac{63}{10}} \right) = 64,3 \text{ dBA}$$
**Figura 6.** Suma de los NPS contenidos entre los límites de la frecuencia central de 1000 Hz

### 1.4.5. Escalas de ponderación

El nivel de presión sonora es un parámetro de la intensidad del sonido, pero por sí solo no es un indicador de la sensación percibida por el oído humano. Para lograr un mejor indicador de la percepción humana del sonido, se recurre a las curvas isofónicas obtenidas en 1933 por Fletcher y Munson, las cuales indican una gráfica  $L_p = f$  (frecuencia). Posteriormente fueron reemplazadas por las de Robinson y Dadson, determinadas nuevamente en condiciones más controladas. Actualmente están normalizadas en norma ISO 226:2003 *Acústica. Líneas isofónicas normales*. Las curvas de Fletcher y Munson vs. Las de Robinson y Dadson se pueden apreciar en la Figura 7.



**Figura 7.** Contornos de Fletcher y Munson (1933) y Robinson y Dadson (1956)

**Fuente:** (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2003)

Observando las curvas, y tomando como frecuencia de referencia 1000 Hz, el comportamiento de oído humano, responde a las siguientes características: de 20 a 1000 Hz es la zona de atenuación, de 1000 a 5000 Hz es la zona de amplificación y de 5000 Hz en adelante zona de atenuación. Como ejemplo de las curvas isofónicas, un nivel de presión sonora de 20 dB a 1000 Hz, es equivalente a 60 dB a una frecuencia de 60 Hz y a 15 dB a 3000 Hz. El comportamiento del oído, basándose en las curvas isofónicas dio como resultado cuatro escalas de ponderación para evaluación del ruido en las personas: A, B, C, D.

La escala A está diseñada para simular la respuesta del oído, cuando soporta niveles de presión sonora bajos a distintas frecuencias. Basado en la norma ANSI S1.42-2001 *Design Response of Weighting Networks for Acoustical Measurements*, la cual describe las ecuaciones del filtro A. La expresión para la escala de ponderación A es:

$$P_A(f) = \frac{12200^2 \times f^4}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12200^2)\sqrt{f^2 + 107.7^2}\sqrt{f^2 + 737.9^2}}$$

**Ecuación 4.** Estado estacionario de la escala de ponderación A

Los valores que se obtienen de la Ecuación 4, son valores lineales, pero es necesaria que la escala de ponderación A, sea expresada en dB, por lo que aplicando la Ecuación 1.

$$dB_A = 20 \times \log \frac{P_A(f)}{P_A(f_{ref})} [dB]$$

**Ecuación 5.** Ecuación de la escala de ponderación A

Donde:

$dB_A$ : Nivel de atenuación de la escala de ponderación A

$P_A(f)$ : Presión de la escala de ponderación A

$P_A(f_{ref})$ : Presión de referencia de la escala de ponderación A, referida a  $f = 1000$  Hz

$$P_A(f_{ref}) = \frac{12200^2 \times 1000^4}{(1000^2 + 20.6^2)(1000^2 + 12200^2)\sqrt{1000^2 + 107.7^2}\sqrt{1000^2 + 737.9^2}}$$

$$P_A(f_{ref}) = 0.794 \dots Pa$$

$$dB_A = 20 \times \log \frac{P_A(f)}{0.794}$$

**Ecuación 6.** Ecuación resumida de la escala de ponderación A

La escala C está diseñada para simular la respuesta del oído, cuando soporta niveles de presión sonora altos a distintas frecuencias. Basado en la misma norma ANSI S1.42-2001, la expresión para la escala de ponderación C es:

$$P_C(f) = \frac{12200^2 \times f^2}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12200^2)}$$

**Ecuación 7.** Estado estacionario de la escala de ponderación C

Al igual que el caso anterior, los valores que se obtienen de la Ecuación 7, son valores lineales, pero es necesaria que la escala de ponderación C, sea expresada en dB, por lo que aplicando la Ecuación 1.

$$dB_C = 20 \times \log \frac{P_C(f)}{P_C(f_{ref})} [dB]$$

**Ecuación 8.** Ecuación de la escala de ponderación C

Donde:

$P_c(f_{ref})$ : Presión de referencia de la escala de ponderación C, referida a  $f = 1000$  Hz

$$P_c(f_{ref}) = \frac{12200^2 \times 1000^2}{(1000^2 + 20.6^2)(1000^2 + 12200^2)}$$

$$P_c(f_{ref}) = 0.993 \dots Pa$$

$$dB_C = 20 \times \log \frac{P_c(f)}{0.993}$$

**Ecuación 9.** Ecuación resumida de la escala de ponderación C

La escala B está diseñada para simular la respuesta del oído, cuando soporta niveles medios de presión sonora a distintas frecuencias. Basado en la misma norma ANSI S1.42-2001, la expresión para la escala de ponderación B es:

$$P_B(f) = \frac{12200^2 \times f^3}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12200^2)\sqrt{f^2 + 158.5^2}}$$

**Ecuación 10.** Estado estacionario de la escala de ponderación B

Al igual que el caso anterior, los valores que se obtienen de la Ecuación 10, son valores lineales, pero es necesaria que la escala de ponderación B, sea expresada en dB, por lo que aplicando la Ecuación 1.

$$dB_B = 20 \times \log \frac{P_B(f)}{P_B(f_{ref})} [dB]$$

**Ecuación 11.** Ecuación de la escala de ponderación B

Donde:

$P_B(f_{ref})$ : Presión de referencia de la escala de ponderación B, referida a  $f = 1000$  Hz

$$P_B(f_{ref}) = \frac{12200^2 \times 1000^3}{(1000^2 + 20.6^2)(1000^2 + 12200^2)\sqrt{1000^2 + 158.5^2}}$$

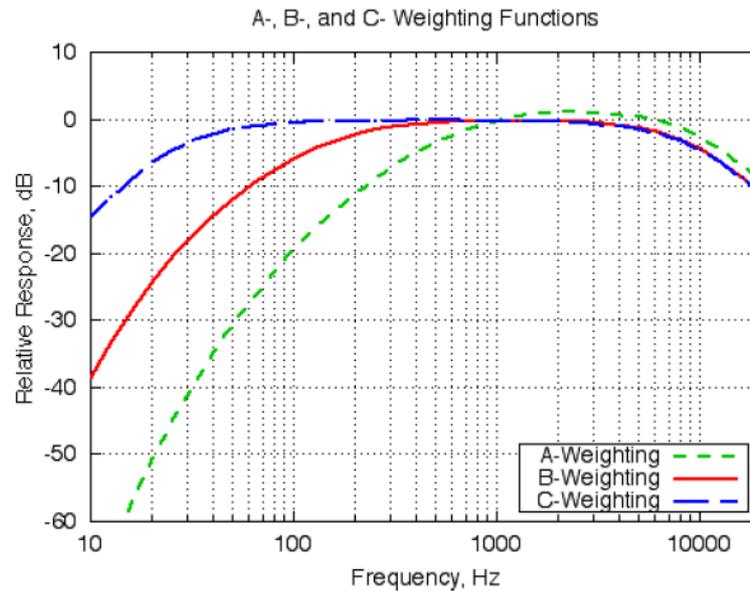
$$P_B(f_{ref}) = 0.981 \dots Pa$$

$$dB_B = 20 \times \log \frac{P_B(f)}{0.981}$$

**Ecuación 12.** Ecuación resumida de la escala de ponderación B

Aplicando las Ecuaciones 6, 9 y 12, se puede obtener la curva y las atenuaciones de las escalas de ponderación A, B y C, como se muestra en la Figura 8. La escala D está desarrollada para niveles muy altos de presión sonora, por arriba de los 120 dB, como el ruido proveniente de los aviones, por tal motivo la escala D no forma parte de análisis en el presente trabajo de investigación.

Aunque la escala A es la más utilizada para efectuar mediciones higiénicas, los intervalos de presión sonora en los que la respuesta se adapta más a la realidad son los siguientes: Escala A < 55 dB, escala B 55 – 85 dB y escala C > 85 dB



**Figura 8.** Simulación de las escalas de ponderación A, B y C en el Software Matlab

**Fuente.** Creación propia del autor

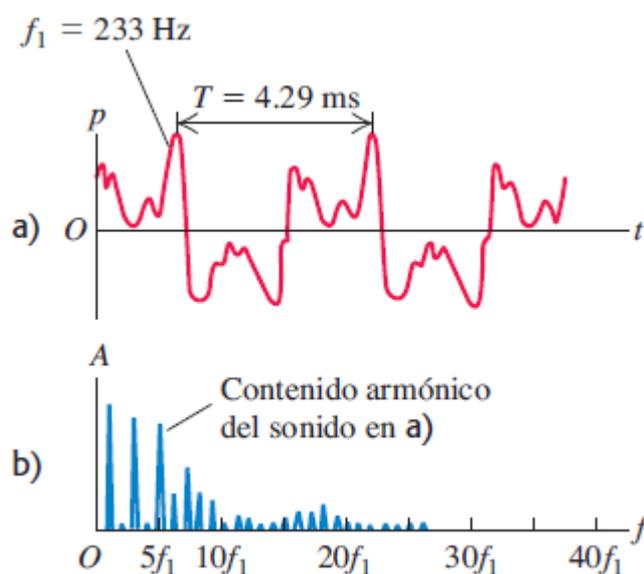
#### 1.4.6. Ruido ocupacional

La frecuencia de una onda sonora es el factor primordial que determina el tono de un sonido, lo que permite clasificarlo como “agudo” o “grave”. Dos sonidos producidos por diferentes instrumentos musicales podrían tener la misma frecuencia fundamental (y por lo tanto el mismo tono), pero sonar distinto por la presencia de diferentes armónicos (y por lo tanto diferente timbre) (Sears & Zemansky, 1970).

Cualquier onda periódica puede ser representada como la suma de una serie de armónicos, es decir la suma de una serie de funciones senoidales cuyas frecuencias son:  $f_1$ ,  $2f_1$ ,  $3f_1$ ,  $4f_1$ ,  $5f_1$ , etc, donde  $f_1$  es la frecuencia fundamental. Por ejemplo, la nota *LA* cuya frecuencia fundamental es de  $f_1 = 440$  Hz, contiene armónicos de frecuencias de 440 Hz, 880 Hz, 1320 Hz, 1760 Hz, 2200 Hz, etc. (Nótese que estas frecuencias son múltiplos

enteros de la fundamental). La diferencia entre el sonido y el ruido, consiste en que el ruido es una combinación de todas las frecuencias, no sólo las que son múltiplos enteros de una fundamental, como en el caso del sonido.

En la Figura 9.a, se muestra la variación de presión sonora producida por un clarinete. El patrón es complejo porque el sonido vibra con una frecuencia fundamental y muchos armónicos al mismo tiempo. La Figura 9.b, muestra el contenido armónico del sonido del clarinete. La herramienta matemática para descomponer una señal periódica que originalmente se encuentra en el dominio del tiempo (Figura 9.a), en armónicos (Figura 9.b) se llama *Series de Fourier* (Spiegel, Schaum's Outline of Fourier Analysis, 1974).



**Figura 9.** a) Variación de Presión sonora vs. Tiempo de un clarinete, b) Contenido armónico del sonido del clarinete

**Fuente:** (Young & Freedman, 2009, p. 532)

### 1.4.6.1. Índices de valoración de ruido ocupacional

**Nivel de presión sonora continua equivalente ponderado A.** Es el nivel de ruido constante, que posee la misma energía que un ruido variable en un determinado período de tiempo. En la Figura 10 se muestra la definición gráfica. La norma NTE INEN-ISO 9612:2014 *Determinación de la exposición a ruido laboral*, define el nivel de presión sonora continua equivalente ( $L_{Aeq,T}$  ó  $L_{AT}$ ) según la Ecuación 13.

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{P_A}{P_{ref}} \right)^2 dt \right]$$

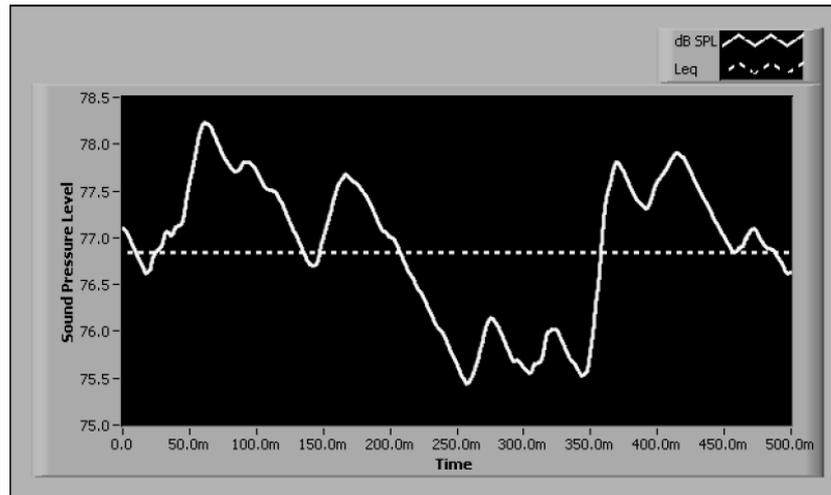
**Ecuación 13.** Nivel de presión sonora continua equivalente ponderado A

Para el caso en el que  $L_{dBA}$  sea una variable discreta medida cada  $t_i$  segundos, por ejemplo: durante la jornada laboral un trabajador puede estar expuesto a diferentes tipos de ruido. Cada uno de esos  $N$  ruidos deberán ser evaluados separadamente y el nivel equivalente ponderado A será calculado según la Ecuación 14. Donde  $L_{dBAi}$  es el nivel de presión sonora en cada intervalo  $t_i$ ,  $T$  es el tiempo total de exposición y  $N$  es el número de intervalos en los que se subdivide  $T$ .

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N t_i \times 10^{\frac{L_{dBAi}}{10}}$$

**Ecuación 14.** Nivel de presión sonora continua equivalente ponderado A

**Fuente.** (Giménez de Paz, 2007)



**Figura 10.** Nivel de presión sonora continua equivalente ( $L_{Aeq,T}$ ) y nivel de presión sonora (NPS)

**Fuente.** (National Instruments, 2007)

**Nivel de exposición diario equivalente.** Definido en la norma La norma NTE INEN-ISO 9612:2014 en su numeral 3.2), como el nivel de exposición sonora normalizado a ocho horas. Este parámetro representa un ruido continuo y constante a lo largo de 8 h que contiene la misma energía (ponderada por el filtro A) que el ruido real.

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \log \frac{T}{8}$$

**Ecuación 15.** Nivel de exposición diario equivalente

Donde  $L_{Aeq,T}$  es el nivel equivalente debido a la exposición durante T horas y T es la duración real de la jornada laboral. Si la duración real de la jornada es  $T = 8$  h, entonces

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T}$$

**Nivel semanal equivalente.** Se define como la media en dB de las exposiciones diarias  $L_{Aeq,di}$  de cada uno de los cinco días de la semana laboral.

$$L_{Aeq,s} = 10 \log \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 10^{\frac{L_{Aeq,di}}{10}}$$

**Ecuación 16.** Nivel semanal equivalente

**Fuente.** (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo, 2006, p. 42)

**Nivel pico.** También definido en la norma NTE INEN-ISO 9612:2014 en su numeral 3.4). Es diez veces el logaritmo en base 10 entre el cuadrado de la presión sonora pico con ponderación C ( $P_{C,pico}$ ) y el cuadrado de un valor de referencia,  $P_o$ , expresada en decibelios

$$L_{C,pico} = 10 \log \left( \frac{P_{C,pico}}{P_o} \right)^2$$

**Ecuación 17.** Nivel pico

#### 1.4.7. Dosis de ruido

En aquellos casos en que la exposición no pueda describirse con precisión, por ejemplo en el caso de un supervisor que visita en forma aleatoria o según requerimientos diferentes sectores de una planta industrial, suele ser recomendable utilizar dosímetros personales. Un dosímetro calcula la dosis diaria de energía sonora al que está expuesto el usuario.

El *Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo*, que fue publicado en el Registro Oficial No. 249 del año 1988, tomó como referencia la publicación *Criteria for a Recommended Standard: Occupational*

*Exposure to Noise* realizada por NIOSH (National Institute Occupational Safety and Health) de 1972. En dicha publicación se consideraron tres factores base:

REL: Recommended exposure limit = 85 dBA

TWA: Time-weighted average = 8 h

ER: Exchange rate = 5 dBA

**Exchange rate.** Basado en la publicación de NIOSH de 1972, si el nivel de ruido se incrementa en 5 dBA, la cantidad de tiempo que una persona puede estar expuesta para recibir la misma dosis, debe reducirse a la mitad.

La fórmula para obtener el tiempo permitido de exposición en función del nivel sonoro, medido en decibeles con el filtro de ponderación A se expresa en la Ecuación 18. Si se reemplazan los valores REL, TWA y ER en la Ecuación 21, se obtiene la Tabla 3, la cual se encuentra en el numeral 7) del artículo 55) del Decreto Ejecutivo 2393

$$T_p = \frac{TWA}{2^{\frac{L_{dBA} - REL}{ER}}}$$

**Ecuación 18.** Tiempo permitido de exposición a ruido ocupacional

**Fuente.** (National Institute for Occupational Safety and Health, 1998, p. 1)

**Tabla 3.** Tiempo permitido de exposición en función del nivel sonoro.

Nivel de presión sonora ponderado A	Tiempo de exposición	
	Horas	minutos
L <sub>Aeq</sub> 85	8	
90	4	
95	2	
100	1	

110		30
115		15

**Fuente.** Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo, Registro Oficial 249, Febrero de 1988

En junio de 1998, NIOSH publicó nuevos criterios para ruido ocupacional, en los cuales los valores de REL y TWA se mantienen, pero el parámetro ER fue cambiado de 5 a 3 dBA. “NIOSH previously recommended an exchange rate of 5dB for the calculation of time-weighted average (TWA) exposures to noise. However, NIOSH now recommends a 3 dB exchange rate, which is more firmly supported by scientific evidence...” (National Institute for Occupational Safety and Health, 1998, p. iii).

El mismo criterio de ER (3dBA) es aplicado por la ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), y en el Real Decreto 286/2006, *Sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido*.

Cuando la exposición diaria consiste en periodos de diferente nivel de ruido, la dosis diaria no deberá exceder de 1, calculado de acuerdo a la siguiente Ecuación 19:

$$D = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^N \left[ 10^{\frac{L_{dBAi}-85}{10}} \times t_i \right]$$

**Ecuación 19.** Dosis diaria

**Fuente.** (Giménez de Paz, 2007, p. 57)

Donde  $L_{dBAi}$  es el nivel ponderado A en cada intervalo  $t_i$ . La Ecuación 19 puede simplificarse, de acuerdo a NIOSH en su publicación *Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Noise* de 1998, que es la misma ecuación que está descrita en *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents* de la ACGIH y en el numeral 7) del artículo 55) del Decreto Ejecutivo 2393:

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{T_i}$$

**Ecuación 20.** Ecuación de dosis diaria simplificada

**Fuente.** (National Institute for Occupational Safety and Health, 1998, p. 2)

Donde:  $C_i$  es el tiempo de exposición a un nivel sonoro específico y  $T_i$  es el tiempo permitido de ese nivel sonoro.  $T_i$  puede obtenerse a partir de la Ecuación 18.

También puede usarse la dosis diaria  $D$  para calcular  $L_{Aeq,T}$ , según la Ecuación 21. Donde  $T$  es la duración real de la jornada laboral. Si la duración real de la jornada es  $T = 8$  h, entonces  $L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T}$ .

$$L_{Aeq,T} = 85 + 10 \log \left( D \times \frac{8}{T} \right)$$

**Ecuación 21.** Nivel equivalente en función de la dosis diaria

**Fuente.** (Giménez de Paz, 2007, p. 57)

Queda claro que lo que debe evaluarse es la dosis  $D$  o el Nivel de presión sonora continua equivalente  $L_{Aeq,T}$  y no solo los niveles instantáneos de nivel sonoro  $L_{dBA}$ .

### 1.4.8. Características de los equipos de medición

Existen en la actualidad algunas normas que buscan regular y dar especificaciones técnicas acerca del hardware y software de los equipos de medición para ruido, conocidos como sonómetros, sonómetros integradores y dosímetros. En la Tabla 4 se detalla un resumen de las normas.

**Tabla 4.** Normas técnicas acerca del hardware y software de los equipos de medición de ruido

<b>CÓDIGO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>DETALLE</b>
IEC 61672-1	Electroacústica. Sonómetros parte 1: Especificaciones.	Este es el más reciente estándar para sonómetros. Reemplaza a las normas IEC 60651 e IEC 60804. Especifica las características de: sonómetros convencionales, sonómetros integradores promediadores y sonómetro integrador
IEC 60651	Sonómetros. Especificaciones	Esta norma ha sido sustituida por la norma IEC 61672. Los dos grados principales de sonómetros son: Tipo 1 y Tipo 2 o Clase 1 y Clase 2
IEC 60804	Sonómetros. Integradores- promediadores.	Esta norma ha sido sustituida por la norma IEC 61672. Extiende el alcance de IEC 60651 y describe el desempeño de sonómetros integradores promediadores
IEC 61252	Electroacústica. Especificaciones para medidores personales de exposición sonora.	Se publicó esta norma con el objeto de facilitar las comparaciones internacionales entre valores numéricos de amplitud de las exposiciones a ruido registradas convenientemente.
ANSI S1.4	Electroacoustics - Sound Level Meters - Part 1: Specifications	El estándar americano para el funcionamiento del sonómetro, similar a la norma IEC 60651. Las exactitudes del instrumento son de tipo 1 y tipo 2

ANSI S1.43	Standard for integrating sound level meters	El estándar americano para sonómetros integradores. Similar a la norma IEC 60804.
ANSI S1.25	Specification for personal noise dosimeters	El estándar americano para dosímetros. Similar a la norma IEC 61252, maneja exchange rate de 3, 4 y 5 dB
IEC 61260-1	Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava	Define las bandas de octava, tercera banda de octava y otros filtros de octavas parciales. Consta de 3 partes, la 1ra. Parte es Especificaciones
ANSI S1.11	Specification for octave-band and fractional-octave-band	Estándar americano que define las bandas de octava, tercera banda de octava y otros filtros de octavas parciales. Similar a la norma IEC 61260.
ANSI S1.42	Design Response of Weighting Networks for Acoustical Measurements	Standard Americano que establece las funciones de transferencia para diseñar las escalas de ponderación A, B, C

**Fuente.** Creación propia del autor

#### ***1.4.8.1. Sonómetros***

Es un dispositivo que mide la presión acústica en cada momento, por lo tanto podrán emplearse para la medición del nivel de presión acústica ponderado A (LpA) del ruido estable. Las mediciones de ruido laboral deben hacerse en la característica *slow*, con la escala de ponderación A, a unos 10 cm del pabellón auditivo del trabajador. En la Tabla 5 se muestra la tolerancia de los sonómetros a modo de resumen (porque depende de la frecuencia), según la norma IEC 60651. En la Tabla 6 se muestra una comparación de las tolerancias permitidas por la norma IEC 60651 para calibradores y sonómetros.

**Tabla 5.** Clasificación y uso de los sonómetros de acuerdo a su exactitud, conforme a IEC 60651

SONOMETRO CLASE	EXACTITUD	USO
0	$\pm 0,4$ dB	Como patrón de referencia en laboratorios
1	$\pm 0,7$ dB	Para laboratorios o en campo donde el ambiente acústico puede especificarse o controlarse de manera precisa
2	$\pm 1,0$ dB	Aplicaciones generales
3	$\pm 1,5$ dB	Aplicaciones de reconocimiento de los niveles sonoros para determinar si se han violado los límites de ruido establecidos

**Fuente.** (Narang & Bell, 2008)

**Tabla 6.** Comparación de tolerancia entre sonómetros y calibradores según la norma IEC 60651

Tolerancias permitidas para los distintos tipos o clases definidas por la IEC 60651. Todas las tolerancias se expresan en decibelios (dB)		
Clase	Calibradores	Sonómetros
0	+/- 0.15	+/- 0.4
1	+/- 0.3	+/- 0.7
2	+/- 0.5	+/- 1.0
3 (eliminada por la IEC 61672)		+/- 1.5

**Fuente.** (Narang & Bell, 2008)

Los parámetros de medida determinan los tipos de mediciones que pueden hacerse con el instrumento. La norma IEC 61672-1 considera tres tipos de ponderaciones de frecuencia: A, C y opcionalmente Z (escala lineal) y cuatro ponderaciones de tiempo:

**S (slow):** El instrumento responde lentamente ante los eventos sonoros. El promedio efectivo de tiempo es de aproximadamente un segundo.

**F (fast):** Brinda una respuesta al estímulo sonoro más rápida. La constante de tiempo es menor (0.125 segundos) y por tanto, puede reflejar fluctuaciones poco sensibles a la ponderación anterior.

**I (impulse):** Tiene una constante de tiempo muy pequeña. Se emplea para juzgar cómo influye, en el oído humano, la intensidad de sonidos de corta duración. Tiene una constante de tiempo de 35 ms si la señal está subiendo y 1.5 ms si la señal está cayendo.

**Peak (pico):** Permite cuantificar niveles picos de presión sonora de extremadamente corta duración (50 microsegundos). Se utiliza para medir ruidos de impacto

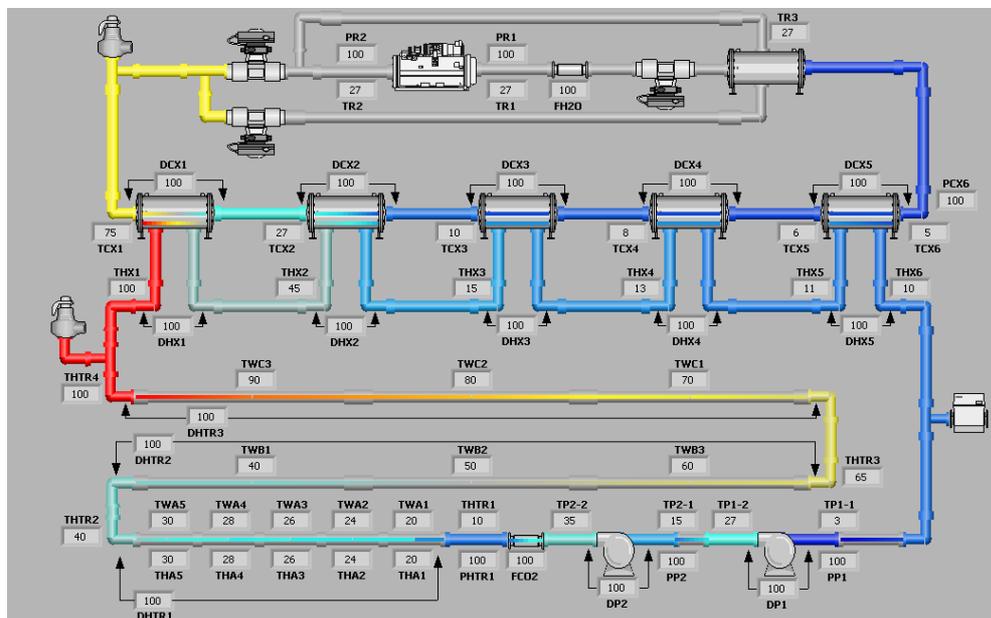
#### 1.4.9. Software de programación LabVIEW

El software en el cual se va a desarrollar la aplicación es LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) de National Instruments. Es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. LabVIEW permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basado en software. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza lenguaje gráfico (National Instruments, 2014).

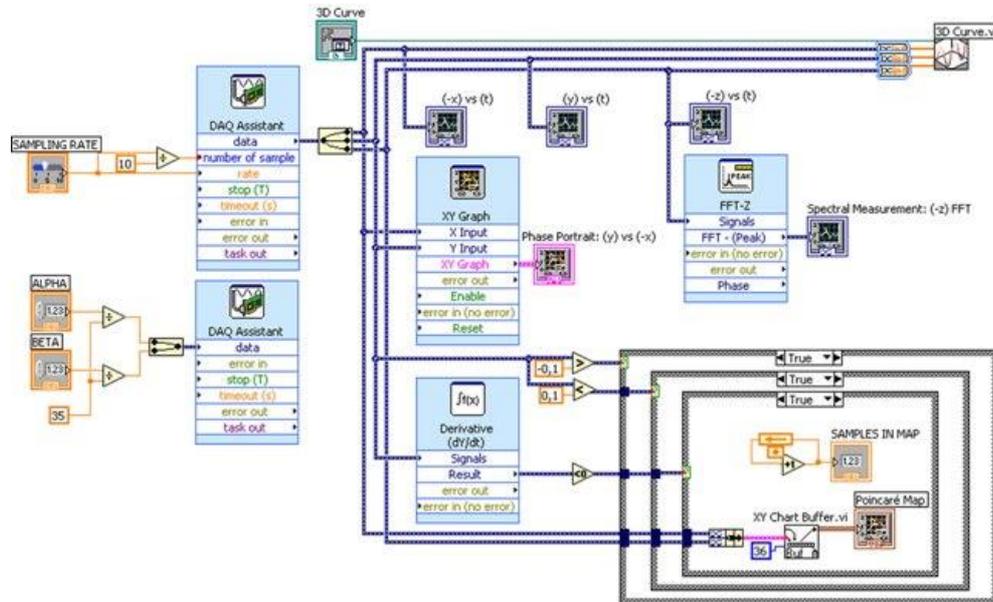
Los programas no se escriben como comúnmente se hace en lenguaje C (comandos) sino que se dibujan (Lenguaje G). Las aplicaciones creadas en LabVIEW se llaman Virtual Instruments (VI). Un VI puede funcionar como osciloscopio, multímetro, calculadora gráfica, medidor de estrés térmico o como analizador de bandas de octava, para el caso de esta tesis. El ambiente de LabVIEW consta de dos partes. La primera parte es llamada *Diagrama de Bloques* y es donde el programador diseña y construye la aplicación, el usuario final no tiene acceso a esta parte. La segunda parte se llama *Panel Frontal* y es la ventana de interacción con el usuario. El panel frontal y el diagrama de bloques se explican a continuación.

**Panel Frontal:** Es la interfaz con el usuario. Se utiliza para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. Los usuarios podrán observar los datos del programa actualizados en tiempo real. En esta interfaz se definen los controles como: botones, pulsadores, interruptores, pantallas de visualización, alarmas, indicadores, etc. En la Figura 11 se muestra un ejemplo del panel frontal para control de procesos industriales

**Diagrama de Bloques:** Es donde se desarrolla el programa, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan íconos que realizan una determinada función y se interconectan. En la Figura 12 se muestra el diagrama de bloques:



**Figura 11.** Panel frontal de LabVIEW, es el interfaz con el usuario



**Figura 12.** Diagrama de bloques, es la programación del sistema

Se utilizará este software ya que tiene la ventaja de permitir una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de adquisición de datos. En el caso de esta tesis se aprovechará la tarjeta de sonido que incorpora el computador. LabVIEW permite crear estructuras avanzadas de programación como escalas de ponderación, filtros de frecuencia y análisis de banda de octava, etc. Además National Instruments ha creado su sistema bajo las normas ANSI e IEC (National Instruments, 2014), de tal manera que el dispositivo creado para este proyecto cumplirá con las normas de la Tabla 4.

## **CAPÍTULO II: OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos generales**

- Desarrollar un sonómetro integrador Clase III que facilite de manera objetiva el reconocimiento e identificación de ruido ocupacional.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Desarrollar un analizador de bandas de octava para calcular los niveles efectivos de presión sonora cuando se utilizan protectores auditivos.
- Realizar una evaluación de ruido ocupacional antes y después de la implementación de protectores auditivos, para calcular los niveles efectivos de presión sonora.
- Realizar una evaluación de ruido ocupacional, con el dispositivo desarrollado y con un sonómetro integrador promediador 3M modelo SoundPro Clase I, para determinar el error.

### **2.3. Objetivos colaterales**

- Comparar técnicamente los criterios nacionales de exposición a ruido ocupacional, con criterios internacionales.

### CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

Conforme a lo expuesto en el Capítulo 2, se describirá la metodología para cada uno de los objetivos planteados.

El procedimiento para implementar el objetivo general está basado en la Norma IEC 60651, la cual establece 4 clases de equipos de medición. La clase III está diseñada para equipos de reconocimiento y permite determinar si es necesario un estudio con mayor detalle. El diseño de las escalas de ponderación estará basado en la función de transferencia dada en la norma ANSI S1.42.

La metodología para desarrollar el primer objetivo específico, estará basada en las Normas IEC 61260-1 *Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava* y ANSI S1.11 *Specification for octave-band and fractional-octave-band analog and digital filters*, las cuales especifican los criterios para el diseño de los filtros y las frecuencias centrales.

El procedimiento para implementar el segundo objetivo específico está basado en la Norma NTE INEN ISO 4869-2 *Estimación de los niveles efectivos de presión sonora ponderados A, cuando se utilizan protectores auditivos* y la metodología utilizada será la de bandas de octava, ya que tiene la ventaja de poder analizar el ruido en cada una sus componentes frecuenciales.

El procedimiento para realizar la evaluación de ruido ocupacional, está basado en la norma NTE INEN-ISO 9612 *Determinación de la exposición al ruido en el trabajo*, y la estrategia de medición está basada en el puesto de trabajo, conformando grupos de exposición homogénea al ruido. Para determinar el error cometido se aplicará la curva de distribución normal conforme la norma antes mencionada.

Finalmente, la metodología para comparar técnicamente los criterios nacionales de exposición con criterios internacionales, está basada en la investigación documental de publicaciones de NIOSH y ACGIH de Estados Unidos e INSHT en España, para relacionarlos con lo expuesto en el artículo 55) del Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo

### 3.1. Población y muestra

La población de estudio pertenece al puesto de trabajo denominado *máquinas de alta presión*. Está conformada por diez individuos, divididos en dos grupos de cinco trabajadores cada uno (mañana y tarde). Las características de la población se muestran en la Tabla 7, estas particularidades hacen que se pueda considerar a este conjunto como un grupo de exposición homogénea al ruido (GEH).

**Tabla 7.** Características de la población de estudio

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Puesto de trabajo	Máquinas de alta presión

Lugar de trabajo	Área de colado
Tipo de maquinaria que manejan	Neumática
Tipo de producción	Porcelana sanitaria
Rango de edades	31 - 36 años

**Fuente.** Creación propia del autor

Se tomarán dos muestras de cuatro trabajadores cada una (mañana y tarde) y el método de muestreo será aleatorio simple sin reposición. Esto significa que cada uno de los individuos será tomado en cuenta una sola vez, que cada uno tiene 10% de probabilidad y 80% de esperanza matemática de ser elegido para el estudio, este criterio de segmentación está basado en el Capítulo 7.2 de la norma NTE INEN ISO 9612. Los criterios de incursión y excursión consisten en medir ruido ocupacional durante una hora en ocho de los diez puestos de trabajo, acompañando al trabajador en todas las actividades que realice durante ese periodo de tiempo. Los criterios de segmentación, incursión y excursión serán analizados en el numeral 4.3) del Capítulo IV.

### **3.2. Tipo de estudio y de diseño**

De manera global y debido a su finalidad, el presente trabajo de tesis corresponde a una investigación aplicada, ya que se busca dar solución a problemas concretos (Landeau, 2007). Por una parte, la correcta selección de elementos de protección auditiva; y por otra, la identificación de ruido ocupacional en el ambiente laboral. Se propone aplicar el

conocimiento adquirido para solucionar los dos problemas planteados. El resultado supone el beneficio de la sociedad al prevenir trastornos causados por ruido ocupacional.

Si se considera su marco geográfico y debido a su carácter, el presente trabajo es de tipo exploratorio, debido a que en el Ecuador este tema ha sido poco estudiado. El resultado de esta investigación servirá para dos propósitos. Por una parte, ayudará a evitar pérdidas de audición en trabajadores de industrias manufactureras, de ingeniería, de petróleo, minería y energía; y por otro lado, servirá de base para futuros trabajos de investigación, especialmente en la estimación del riesgo a largo plazo de la pérdida de audición inducida por ruido.

Debido a las fuentes de información esta investigación es de tipo documental, ya que está basada en información científica, proveniente en su mayoría de fuentes escritas como libros, trabajos científicos, revistas y publicaciones. Se analizará la información a nivel internacional y se comparará con la existente a nivel nacional, para determinar oportunidades de mejora. En la parte final de este proyecto se hará una comprobación de campo para verificar el funcionamiento del equipo desarrollado, por lo que este trabajo también puede ser catalogado como una investigación combinada; documental y de campo (Muñoz & Benassini, 1998).

### **3.3. Instrumentos, equipos y materiales**

Los instrumentos, equipos y materiales utilizados para la presente tesis se detallan a continuación:

- Norma NTE INEN ISO 4869-2 *Estimación de los niveles efectivos de presión sonora ponderados A, cuando se utilizan protectores auditivos*
- Norma NTE INEN ISO 4869-1 *Método subjetivo para la medición de la atenuación de ruido*
- Norma NTE INEN ISO 9612 *Determinación de la exposición al ruido en el trabajo. Método de ingeniería*
- Software de desarrollo LabVIEW versión 2010 de National Instruments
- Micrófono marca Shure modelo SV100
- Tarjeta de sonido, integrada en el computador
- Sonómetro integrador promediador 3M modelo SoundPro y calibrador QC-20 Clase I

### **3.3.1. Análisis de la norma NTE INEN ISO 4869-2 2014**

La norma NTE INEN ISO 4869-2, publicada por el INEN en enero del 2014, explica tres métodos distintos para calcular los niveles efectivos de presión sonora, como se muestra en la Tabla 8. El presente trabajo de investigación se basará en la metodología de *Bandas de Octava*. Adicionalmente, existe otro método muy extendido, el NRR (Noise Reduction Rating) contemplado en la Ley de los Estados Unidos 29 CFR 1910.95 App B - *Methods for estimating the adequacy of hearing protector attenuation* (Occupational Safety & Health Administration, 2015). Sin embargo los métodos NRR, SNR y HML no serán motivo de análisis del presente trabajo.

**Tabla 8.** Comparación de los métodos de estimación de los niveles efectivos

Norma NTE INEN- ISO 4869-2		Fiabilidad		
		Menor	Media	Mayor
Dificultad	Mayor			Método de bandas de octava
	Media		Método HML	
	Menor	Método SNR		

**Fuente.** (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014)

### ***3.3.1.1. Método de bandas de octava***

Cuando un protector auditivo es utilizado en un ambiente ruidoso, la estimación de los niveles efectivos de presión sonora, debe hacerse sobre las siguientes consideraciones:

- 1) Los datos de la atenuación sonora en bandas de octava del protector auditivo y
- 2) Los niveles de presión sonora en bandas de octava del ruido.

A continuación se describirá la metodología para calcular los datos de la atenuación sonora en bandas de octava del protector auditivo, y como establecer el nivel de eficacia. Seguidamente se explicará el desarrollo del dispositivo que analizará los niveles de presión sonora en bandas de octava del ruido.

### 3.3.1.1.1. Atenuación sonora en bandas de octava del protector auditivo

En Estados Unidos mediante la ley 40 CFR 211 Subpart B *Noise Labeling Standards for Hearing Protection Devices*, se obliga a que todo fabricante de elementos de protección auditiva cumpla con el estándar ANSI S3.19 (Cornell University Law School, 2015). En Europa y en Ecuador se cumple la norma ISO 4869-1. Sea cual fuere la norma adoptada, todo protector auditivo debe contener una etiqueta de características de atenuación, como se puede observar en la Figura 13.

#### 3M™ Peltor™ X3A

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Atenuación media (dB)	21.5	22.8	25.1	27.0	40.0	35.8	38.5	38.9
Desviación normal (dB)	3.0	2.1	3.1	1.7	2.8	2.2	2.7	2.9
Atenuación esperada (dB)	18.4	20.7	22.0	25.4	37.2	33.6	35.8	35.9

SNR=33db H=35db M=30db L=25db

**Figura 13.** Datos de atenuación del protector auditivo 3M™ Peltor™ X3A

**Fuente:** (3m, 2015)

Los datos de atenuación se representan en una matriz en la cual se especifica: la atenuación media, la desviación típica y la atenuación asumida. Estos valores están ordenados por bandas de octava. Los datos de la atenuación media y desviación típica son datos estadísticos proporcionados por el fabricante, pero para el caso de la protección asumida, es posible elegir un porcentaje de eficacia y conforme a ese valor, calcular la protección asumida, como se muestra en la Ecuación 22. La Tabla 9 muestra los valores de  $\alpha$  en función del porcentaje de eficacia

$$APV_f = m_f - \alpha \times \sigma_f$$

**Ecuación 22.** Protección asumida

**Fuente.** (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014)

Donde:

$APV_f$  Protección asumida por banda de octava

$m_f$  Atenuación media por banda de octava

$\alpha$  Es una constante que depende del porcentaje de eficacia

$\sigma_f$  Es la desviación típica

**Tabla 9.** Valor de  $\alpha$  en función del porcentaje de eficacia

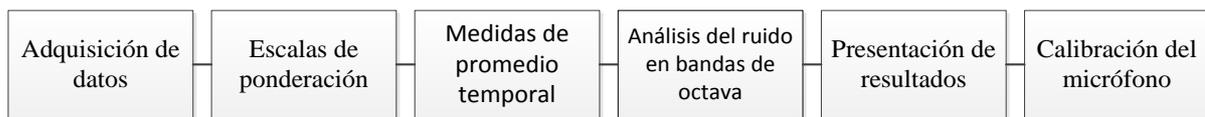
Porcentaje de eficacia	Valor de $\alpha$
75	0.67
80	0.84
84	1
85	1.04
90	1.28
95	1.64
99.5	2.58

**Fuente.** (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014)

El porcentaje de eficacia por defecto es 84%, con lo que  $\alpha = 1$ . Si se reemplaza el valor de  $\alpha = 1$ , en la Ecuación 22 se obtienen los resultados de la Figura 13. Los valores de atenuación para la banda de 63 dB son opcionales (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014).

### 3.3.2. Desarrollo del analizador de bandas de octava

Para poder estimar los niveles efectivos de presión sonora, es necesario analizar los niveles de presión sonora en bandas de octava del ruido. Para ello, se construirá un dispositivo que cumpla tal función. El diagrama de bloques de la construcción del equipo se muestra en la Figura 14.



**Figura 14.** Diagrama de bloques de la construcción del equipo

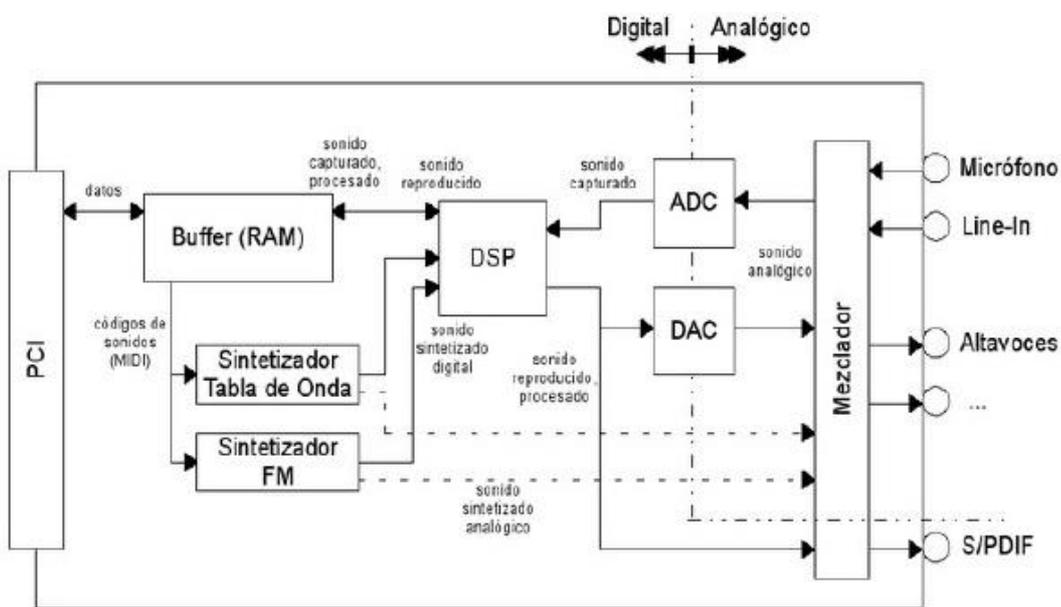
**Fuente.** Creación propia del autor

A continuación se describirá cada uno de los seis elementos que conforman el analizador de bandas de octava. Sin embargo, la calibración del instrumento será detallada al final. Cada uno de los seis elementos será explicado con fundamentos técnicos y se mostrará paulatinamente el diseño y desarrollo del software, para finalmente mostrar el proyecto total.

#### 3.3.2.1. *Adquisición de datos*

Para estudiar y analizar una señal analógica, por ejemplo ruido, es necesario digitalizar esa señal. Este proceso se llama conversión análoga digital (A/D). Para la conversión de la señal analógica del ruido, se aprovechará la tarjeta de sonido, la cual

viene integrada en el computador. Este componente electrónico permite entre otras cosas, reproducir o grabar sonidos, pero la aplicación de este dispositivo en el presente proyecto será solamente la de conversión A/D. En la Figura 15, se muestra el esquema de una tarjeta de sonido.



**Figura 15.** Esquema de una tarjeta de sonido

**Fuente.** (Creus, 1997)

Los parámetros para establecer una adecuada conversión A/D son: la frecuencia de muestreo (sample rate) y el número de muestras (number of samples). Para el cálculo de la frecuencia de muestreo se aplica el Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon. Este teorema dice que, para construir con exactitud una forma de onda, es necesario que la frecuencia de muestreo (sample rate) sea mayor o igual al doble de la frecuencia máxima a muestrear ( $f_{Nyquist}$ ) (Ogata, 2006), como muestra la Ecuación 23.

$$f_{muestreo} \geq 2 \times f_{Nyquist}$$

**Ecuación 23.** Teorema de muestreo de Nyquist y Shanon

Si se toma en consideración que el espectro de audición es de 20 Hz – 20 KHz, entonces la frecuencia máxima a muestrear es 20 KHz. Adicionalmente, en la práctica lo que se hace es dejar un margen de error del 10% para evitar el efecto aliasing, con lo que la frecuencia de muestreo para el espectro de audición humana queda de la siguiente manera:

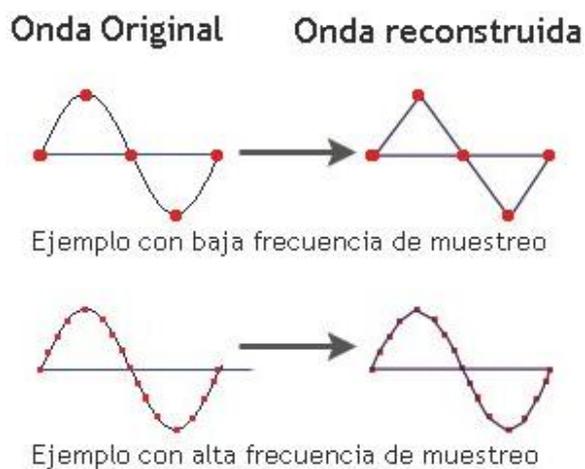
$$f_{muestreo} \geq 2 \times 20 \text{ KHz}$$

$$f_{muestreo} \geq 40 \text{ KHz}$$

$$f_{muestreo} = 40 \text{ KHz} + 10\%$$

$$f_{muestreo} = 44 \text{ KHz}$$

El efecto aliasing provoca que un conversor A/D no pueda reconstruir completamente la señal original (señal analógica). Este fenómeno se debe a que la  $f_{muestreo}$  es demasiado baja. En la Figura 16, se muestra la descripción del efecto aliasing. El programa tiene diez frecuencias de muestreo desde 20 kHz hasta 96 KHz, la frecuencia por defecto es 44.1 KHz. Además, el programa cuenta con una alarma visual, la cual se activa cuando existe efecto aliasing.



**Figura 16.** Efecto aliasing.

**Fuente.** (National Instruments, 2007)

El número de muestras está relacionado directamente con el tiempo de muestreo y la frecuencia de muestreo, como se muestra en la Ecuación 24.

$$N_{muestras} = t_{muestreo} \times f_{muestreo}$$

**Ecuación 24.** Ecuación del número de muestras

**Fuente.** (National Instruments, 2007)

De tal manera que si se requiere por ejemplo, una medición por el lapso de una hora, y teniendo en cuenta que para el espectro de audición humana, la frecuencia de muestreo es de 44.1 KHz, el número de muestras se calcula de la siguiente manera.

$$N_{muestras} = 3600 \text{ s} \times 44100 \text{ Hz}$$

$$N_{muestras} = 158760000$$

En la Tabla 10, se muestran las estructuras de programación creadas para la adquisición de datos

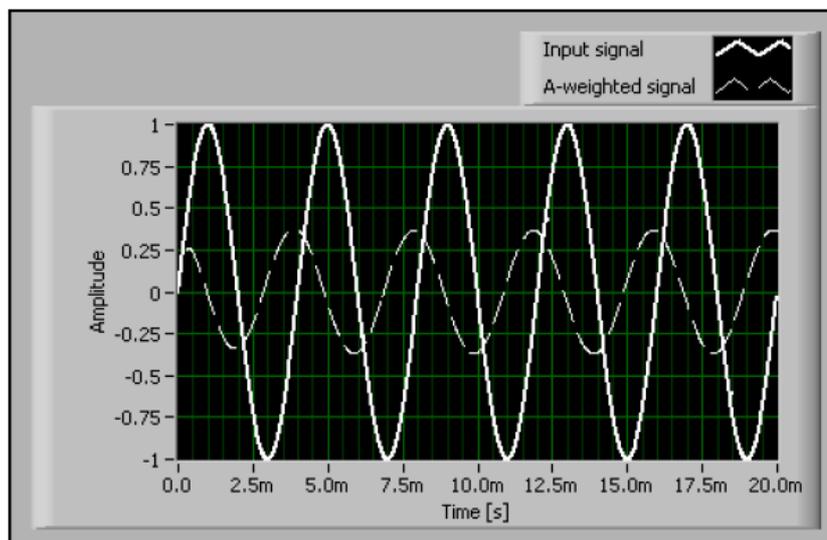
**Tabla 10.** Estructuras de programación para la adquisición de datos

Estructura de programación	Función
	<p>Configura la tarjeta de sonido para adquirir datos y envía los datos a la memoria temporal (buffer)</p>
	<p>Lee los datos almacenados en la memoria temporal (buffer)</p>
	<p>Detiene la adquisición de datos, borra el buffer y deja la aplicación lista para ser ejecutada nuevamente</p>
	<p>Calcula la frecuencia máxima en base a la frecuencia de muestreo, de acuerdo a la norma IEC 61672</p>

**Fuente.** Creación propia del autor

### 3.3.2.2. Escalas de ponderación

Como se estudió en el numeral 1.4.5) del Capítulo I, las escalas de ponderación han sido desarrolladas bajo la norma ANSI S1.42 2001. La norma IEC 61672-1 publicada en el año 2002, eliminó la escala de ponderación B, e introdujo la escala de ponderación Z o escala lineal, lo que quiere decir que no se aplica ningún factor de corrección. Sin embargo para la presente tesis se ha diseñado la escala de ponderación B, para dar cumplimiento a la norma ANSI S1.4. En la Figura 17 se puede observar una señal sinusoidal (línea continua) y la señal sinusoidal ponderada con la escala A (línea entre cortada). La Tabla 11 muestra las estructuras de programación creadas para calcular las escalas de ponderación.



**Figura 17.** Comparación entre una señal sin ponderación, y la misma señal con ponderación A

**Fuente.** (National Instruments, 2007)

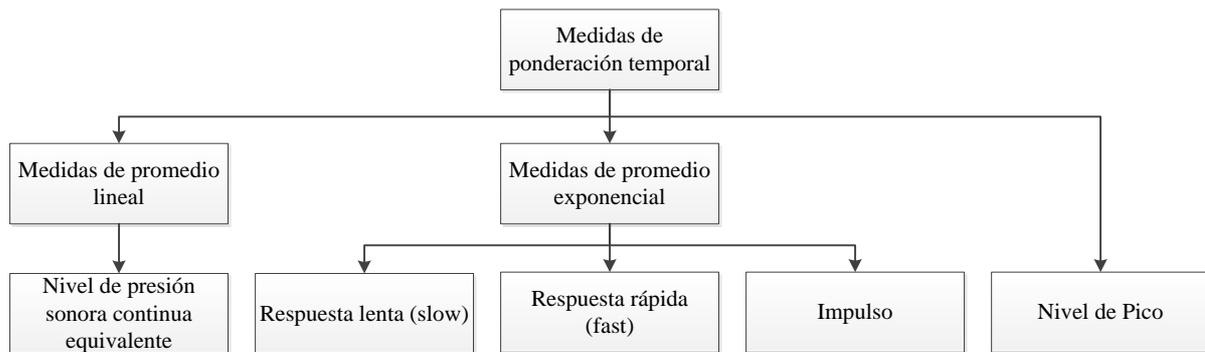
**Tabla 11.** Estructuras de programación para calcular las escalas de ponderación

Estructura de programación	Función
	Calcula las escalas de ponderación A, B, C y Z (escala lineal), conforme a la norma ANSI S1.4

**Fuente.** Creación propia del autor

### 3.3.2.3. Medidas de ponderación temporal

Para analizar el ruido ocupacional y ambiental, los sonómetros utilizan las ponderaciones temporales. Las ponderaciones temporales se dividen como se muestra en la Figura 18.

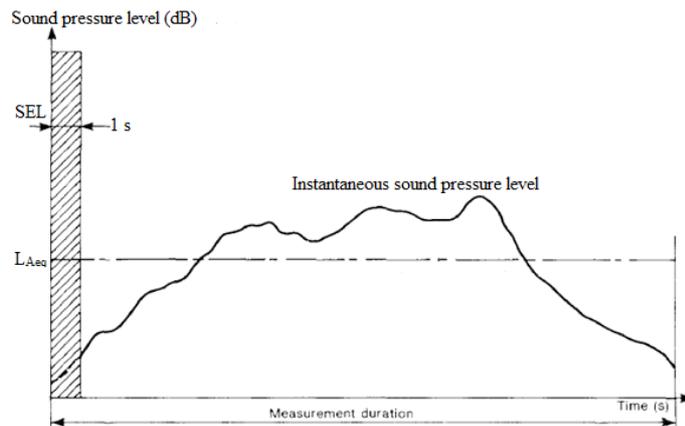


**Figura 18.** Medias de ponderación temporal

**Fuente.** Creación propia del autor

### 3.3.2.3.1. Medidas de promedio lineal

El promedio lineal corresponde al parámetro llamado *Nivel de presión sonora continua equivalente*, estudiado en la sección 1.4.6.2) del Capítulo I, conocido por sus siglas  $L_{Aeq}$  ó  $L_{AT}$ . Existe otra medida de promedio lineal, es el *nivel de exposición sonora*, conocido por sus siglas en inglés como SEL (sound exposure level) o  $L_E$ . Esta medida se define como el nivel de presión sonora en un segundo, que contiene la misma cantidad de energía que la señal original (Bernard, 2003). Sin embargo, esta medida SEL ( $L_E$ ), no será considerada en esta tesis. En la Figura 19 se muestra gráficamente la definición de SEL y  $L_{Aeq}$ . El nivel de presión sonora continua equivalente se calcula a partir de la Ecuación 13.



**Figura 19.** Relación de medidas SEL y  $L_{Aeq}$

**Fuente.** (Bernard, 2003)

### 3.3.2.3.2. Medidas de promedio exponencial

El promedio exponencial corresponde al parámetro llamado *Nivel de presión sonora de tiempo promedio exponencial*. La definición de esta variable es idéntica a la del nivel de presión sonora continua equivalente, pero en este caso a diferencia del anterior, los datos actuales y los datos pasados son ponderados de diferente manera. La cantidad de ponderación dada a los datos del pasado, en comparación a los datos actuales, depende de una constante de tiempo exponencial ( $\xi$ ). Conforme se estudió en el apartado 1.4.8.1) del Capítulo I, el dispositivo desarrollado en este proyecto de investigación, contempla las ponderaciones de tiempo: lento (slow), rápido (fast) e impulso (impulse). La ecuación para las medidas de promedio exponencial, se presenta a continuación. El sistema también cuenta con una ponderación personalizada (custom), la cual permite programar una constante de tiempo diferente de las mencionadas anteriormente.

$$L_{Aeq,\tau} = 10 \log \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t \frac{P_A^2(\xi)}{P_o^2} e^{-\frac{(t-\xi)}{\tau}} d\xi$$

**Ecuación 25.** Nivel de presión sonora de tiempo promedio exponencial

**Fuente.** (American National Standards Institute, 1983)

Donde:

$\tau$  Es la constante de tiempo en segundos para las ponderaciones F, S e I

$\xi$  Es una variable de tiempo de integración desde  $-\infty$  hasta  $t$

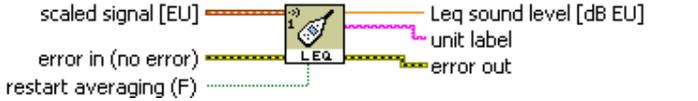
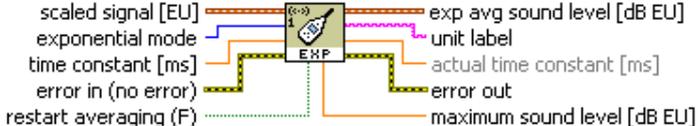
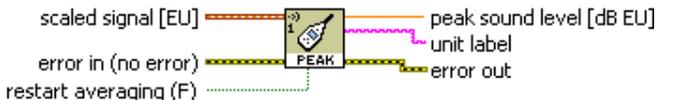
$P_A(\xi)$  Es la presión sonora instantánea con ponderación A

$P_o$  Es la presión de referencia

#### 3.3.2.3.3. Nivel Pico

Este parámetro sigue la señal mucho más rápido que las anteriores ponderaciones exponenciales, ya que la constante de tiempo es de 50  $\mu$ s. Se aplica sobre los valores instantáneos, no sobre los valores RMS como en el caso anterior. El dispositivo retiene la lectura del máximo nivel de presión sonora, hasta que se produzca otra lectura de mayor nivel. Este dato permite evaluar riesgos de daño en el oído humano ante un impulso de muy corto tiempo pero muy intenso (Ménendez Díez , 2009). La Ecuación 17 muestra la forma de calcular el nivel de pico ( $L_{C,pico}$ ). La Tabla 12 muestra las estructuras de programación creadas para calcular las medidas de ponderación temporal.

**Tabla 12.** Estructuras de programación para el cálculo de las medias de ponderación temporal

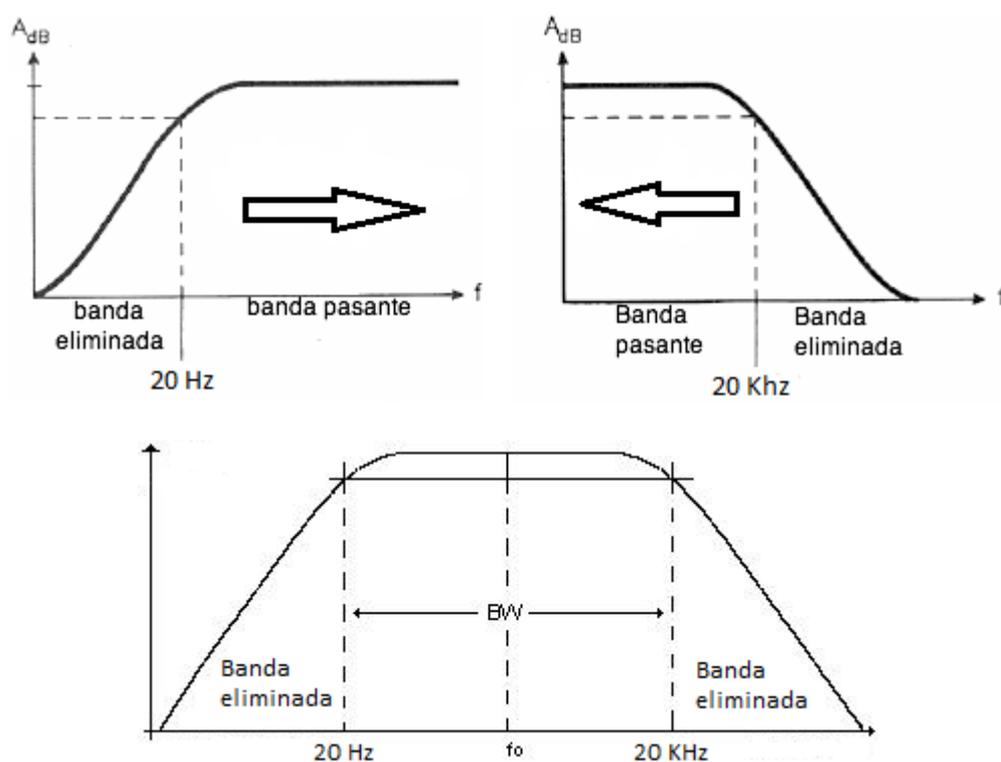
Estructura de programación	Función
 <p>scaled signal [EU] error in (no error) restart averaging (F)</p> <p>Leq sound level [dB EU] unit label error out</p>	Calcula el nivel de presión sonora continua equivalente
 <p>scaled signal [EU] exponential mode time constant [ms] error in (no error) restart averaging (F)</p> <p>exp avg sound level [dB EU] unit label actual time constant [ms] error out maximum sound level [dB EU]</p>	Calcula el nivel de presión sonora de tiempo promedio exponencial, basado en las constantes de tiempo: slow, fast e impulse
 <p>scaled signal [EU] error in (no error) restart averaging (F)</p> <p>peak sound level [dB EU] unit label error out</p>	Calcula y retiene en la memoria, el nivel de presión sonora, hasta que se produzca otra lectura de mayor nivel

**Fuente.** Creación propia del autor

### 3.3.2.4. Análisis del ruido en bandas de octava

El análisis del ruido en bandas de octava es la parte más importante del dispositivo, ya que con los datos obtenidos aquí, se complementará el estudio de la estimación de los niveles efectivos de presión sonora al utilizar protectores auditivos. Para el análisis en bandas de octava se aplicará la *Transformada de Fourier*. La Transformada de Fourier es una herramienta matemática, la cual transforma una función que originalmente se encuentra en el dominio del tiempo, obteniéndose una representación en el dominio de la frecuencia. La Transformada de Fourier es el espectro de frecuencias de una función (Spiegel, Schaum's Outline of Fourier Analysis, 1974). Un ejemplo de esto es lo que hace el oído humano, ya que recibe una onda sonora y la descompone en distintas frecuencias, que es lo que finalmente se escucha (Véase Figura 9).

Como se ha mencionado anteriormente, el espectro de audición humana es de 20 Hz a 20 KHz, pero las ondas de ruido se presentan generalmente con frecuencias que van más allá de estos límites, por eso es necesario diseñar filtros que solo dejen pasar frecuencias más altas que 20 Hz (filtros pasa altos) y filtros que solo dejen pasar frecuencias más bajas que 20 KHz (filtro pasa bajos), de tal manera que el ancho de banda (bandwidth) que pasará el filtro está comprendido entre 20 Hz a 20 KHz, como se muestra en la Figura 20. El sistema permite programar cualquier otro ancho de banda. Sin embargo, se activará una alarma visual, para avisar que el ancho de banda seleccionado está fuera de los límites de audición humana.



**Figura 20.** A la izquierda un filtro pasa alto, a la derecha un filtro pasa bajo y en la parte inferior el ancho de banda (bandwidth) resultante

**Fuente.** (Coughlin & Driscoll, 1993)

Las Ecuaciones 26 y 27 muestran el procedimiento de cálculo para bandas de octava y  $1/3$  de octava dentro de los límites de audición humana, conforme a la norma ANSI S1.11. En la Figura 21 se muestra las pantallas de visualización del programa para bandas de octava y  $1/3$  de octava con ponderación A.

$$f_c = 10^{\frac{15+3X_1}{10}}$$

**Ecuación 26.** Ecuación para hallar las frecuencias centrales de banda de octava

$$f_c = 10^{\frac{14+X_2}{10}}$$

**Ecuación 27.** Ecuación para hallar las frecuencias centrales de  $1/3$  de octava

**Fuente.** (American National Standard Institute, 2004)

Donde:

$f_c$  es la frecuencia central

$X_1$  es un número entero que va desde cero hasta nueve para el caso de octava

$X_2$  es un número entero que va desde cero hasta 29 para el caso de  $1/3$  de octava

Una vez que se conocen las frecuencias centrales de octava y  $1/3$  de octava, es necesario calcular los límites inferior y superior de cada banda. Las Ecuaciones 31 muestran la forma de cálculo para los límites superior e inferior en bandas de octava y las Ecuaciones 32 muestran el método para calcular los límites superior e inferior en bandas de  $1/3$  de octava.

$$f_i = \frac{f_c}{\sqrt{2}} \qquad f_s = f_c \sqrt{2}$$

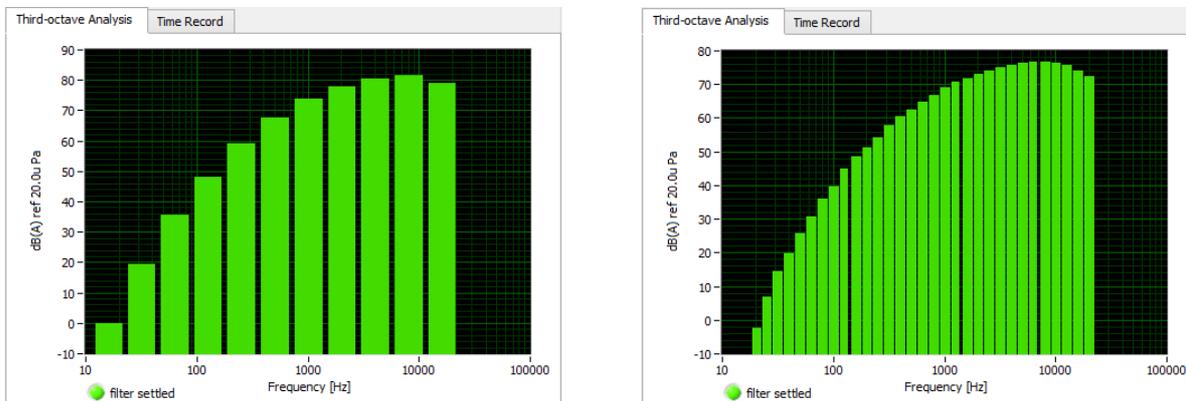
**Ecuación 28.** Ecuaciones de los límites inferior y superior para bandas de octava

$$f_i = \frac{f_c}{\sqrt[6]{2}}$$

$$f_s = f_c \sqrt[6]{2}$$

**Ecuación 29.** Ecuaciones de los límites inferior y superior para bandas de  $1/3$  de octava

**Fuente.** (Fundación MAPFRE, 1996)



**Figura 21.** Pantallas de visualización para bandas de octava y  $1/3$  de octava con ponderación A

Al igual que las medidas de ponderación temporal, el análisis en bandas de octava también tiene promedios lineales, exponenciales y pico. El control para escoger un promedio en el análisis de bandas de octava, es independiente del control de las medidas de ponderación temporal.

Cuando el filtro es reseteado o iniciado por primera vez, se requiere de un tiempo de estabilización (settling time). En este caso, el tiempo de estabilización es aquel necesario para que el filtro de bandas de octava o de  $1/3$  de octava abarque toda la señal, el sistema se estabilice y se mantenga estable. La Figura 22 muestra gráficamente la definición del tiempo de estabilización. El sistema cuenta con una alarma visual, que se enciende para avisar al usuario que el sistema es estable. En la Figura 21 puede observarse la alarma visual en la esquina inferior izquierda. El tiempo de estabilización se calcula a

partir de la Ecuación 30. En la Tabla 13 se muestra las estructuras de programación creadas para desarrollar los filtros de bandas de octava y  $1/3$  de octava.

$$t_s = \frac{5}{f_{s,min} - f_{i,min}}$$

**Ecuación 30.** Tiempo de estabilización del sistema (settling time)

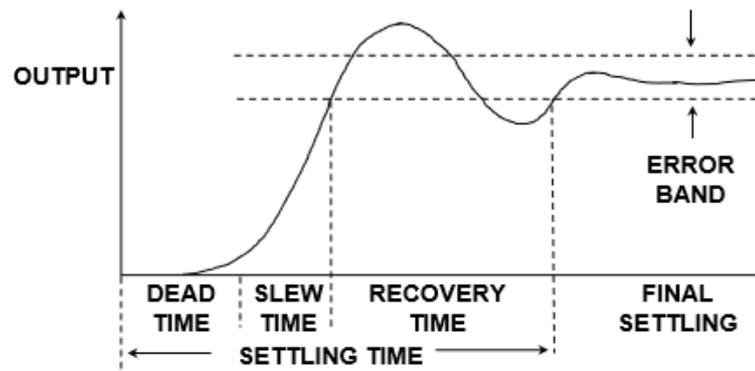
**Fuente.** (National Instruments, 2007)

Donde:

$T_s$  Es el tiempo de estabilización (settling time)

$f_{s,min}$  Es el límite superior de la  $f_c$  más baja usando el filtro de octava o  $1/3$  de octava

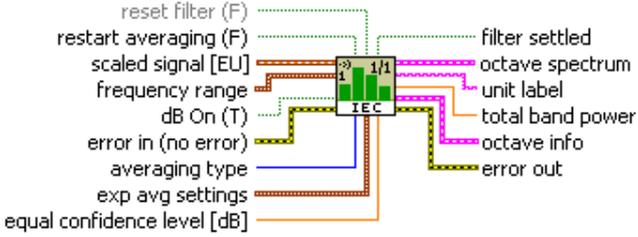
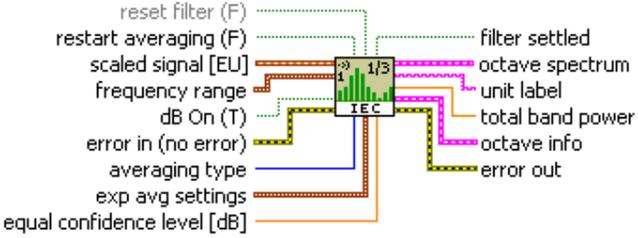
$f_{i,min}$  Es el límite inferior de la  $f_c$  más baja usando el filtro de octava o  $1/3$  de octava



**Figura 22.** Tiempo de estabilización del sistema (settling time)

**Fuente.** (Ogata, 2006)

**Tabla 13.** Estructuras de programación para desarrollar los filtros de bandas de octava y  $1/3$  de octava.

Estructura de programación	Función
	<p>Aplica la Transformada de Fourier a la señal que originalmente se encuentra en el dominio del tiempo y realiza el análisis en bandas de octava, con base en el ancho de banda y en la ponderación temporal que se ha programado</p>
	<p>Aplica la Transformada de Fourier a la señal que originalmente se encuentra en el dominio del tiempo y realiza el análisis en tercios de octava, con base en el ancho de banda y en la ponderación temporal que se ha programado</p>

**Fuente.** Creación propia del autor

### 3.3.2.5. Presentación de resultados

Una vez que se han analizado los niveles de presión sonora en bandas de octava del ruido, es necesario presentar la información obtenida, a fin de que el usuario final pueda procesarla. Para la presentación de resultados se desarrolló gráficas y tablas como se muestra en las Figura 23. En la Tabla 14 se muestran las estructuras de programación creadas para presentar resultados

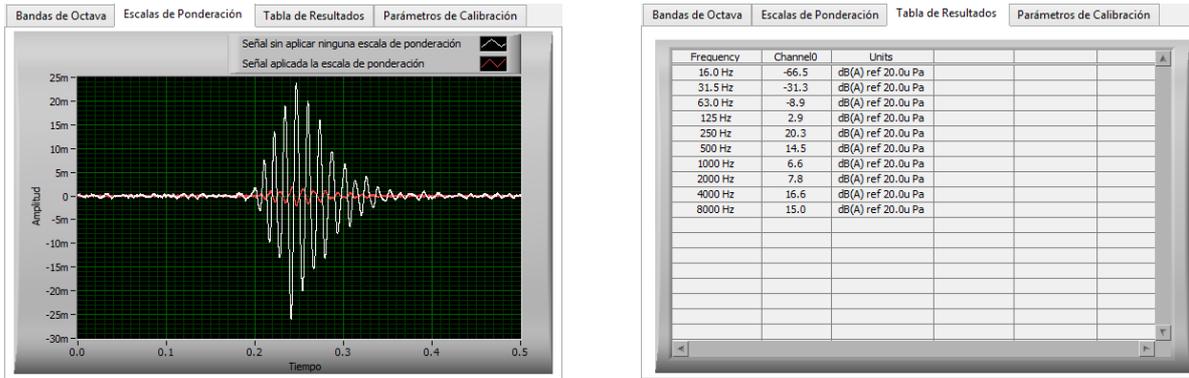


Figura 23. Gráficas y tablas para la presentación de resultados

Tabla 14. Estructuras de programación creadas para presentación de resultados

Estructura de programación	Función
	<p>Calcula el nivel de presión sonora, de un rango de frecuencias de octava o tercios de octava</p>
	<p>Muestra en forma de matriz el Leq de cada una de las bandas de octava o tercios de octava</p>
	<p>Muestra en forma gráfica el Leq de cada una de las bandas de octava o tercios de octava</p>
	<p>Muestra en forma gráfica el nivel de presión sonora promedio exponencial y el nivel de presión sonora continua equivalente</p>
	<p>Calcula la hora y la fecha del sistema para realizar el control por tiempo</p>

Fuente. Creación propia del autor

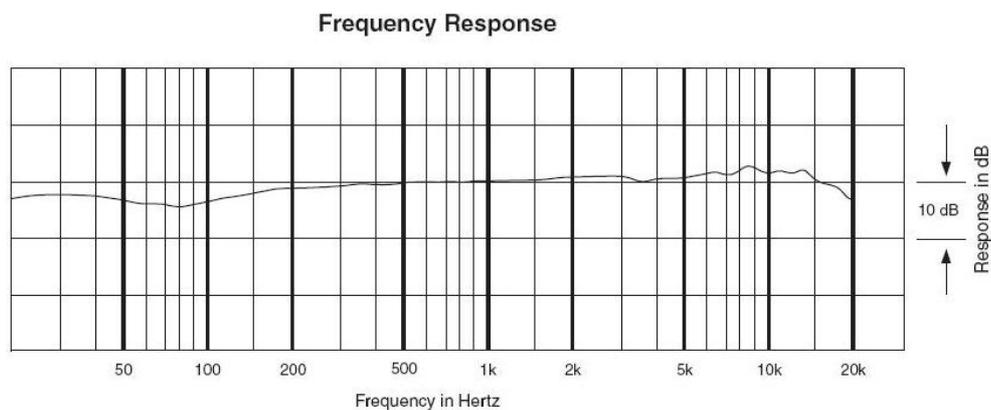
### 3.3.2.6. Calibración del equipo

Un micrófono es un transductor, capta una señal del mundo real de presión sonora (generalmente en pascales Pa) y la transforma en voltaje. Esta última variable puede ser leída por una tarjeta de sonido. La sensibilidad de micrófono es la capacidad de transformar la señal de presión sonora en voltaje. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó un micrófono marca Shure modelo SV100, cuyas características se observan en la Tabla 15. La respuesta de frecuencia del micrófono se muestra en la Figura 24.

**Tabla 15.** Características del micrófono marca Shure modelo SV100

<b>Tipo</b>	Condensador
<b>Respuesta de frecuencia</b>	20 a 20000 Hz
<b>Patrón polar</b>	Omnidireccional
<b>Sensibilidad</b> (a 1 KHz en circuito abierto)	-52 dBV/Pa (2,5 mV/Pa) 1 Pascal = 94 dB SPL

**Fuente.** (Shure, 2010)



**Figura 24.** Respuesta en frecuencia del micrófono

**Fuente.** (Shure, 2010)

Según las características de este micrófono, la sensibilidad puede ser interpretada en términos de voltaje o en términos de decibelios. La sensibilidad en términos de voltaje indica que al aplicar una presión sonora de 1 Pascal (94 dB, véase Ecuación 1) y 1000 Hz, la respuesta del micrófono es de 2,5 mV. La sensibilidad en términos de decibelios indica que al aplicar una presión sonora de 1 Pascal y 1000 Hz, la respuesta es de 52 dB, el signo negativo indica que 2,5 mV es menor que 1 V. El cambio de unidades entre términos de voltaje y términos de decibelios ( $\text{mV}/\text{Pa}$  a  $\text{dBV}/\text{Pa}$ ) puede hacerse a través de la Ecuación 31.

$$S_{\text{dBV}/\text{Pa}} = 20 \log \left( \frac{S_{\text{mV}/\text{Pa}}}{R_{\text{mV}/\text{Pa}}} \right)$$

**Ecuación 31.** Ecuación para transformar la sensibilidad de un micrófono de  $\text{mV}/\text{Pa}$  a  $\text{dBV}/\text{Pa}$

**Fuente.** (Crocker, 1998)

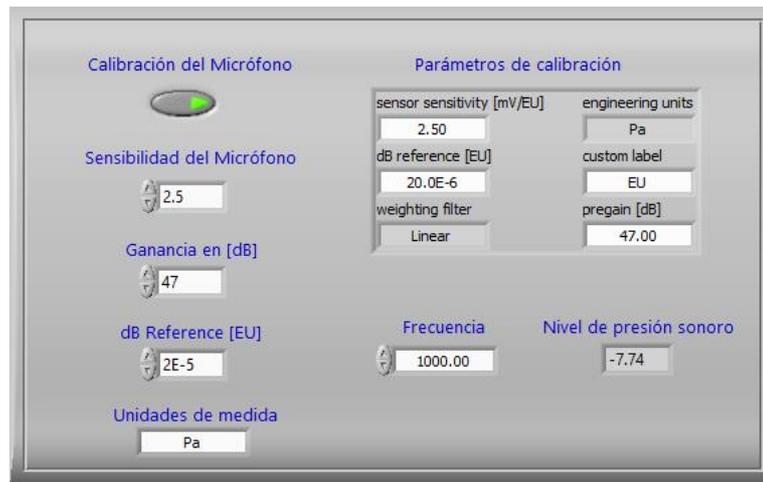
Donde:

$S_{\text{mV}/\text{Pa}}$  Sensibilidad del micrófono en  $\text{mV}/\text{Pa}$

$R_{\text{mV}/\text{Pa}}$  Referencia = 1000  $\text{mV}/\text{Pa}$

$S_{\text{dBV}/\text{Pa}}$  Sensibilidad del micrófono en  $\text{dBV}/\text{Pa}$

La pantalla de calibración del micrófono se muestra en la Figura 25. Las estructuras de programación creadas para la calibración del micrófono se muestran en la Tabla 16.



**Figura 25.** Parámetros de calibración del micrófono

**Tabla 16.** Estructura de programación creada para la calibración del micrófono

Estructura de programación	Función
	<p>Establece los parámetros de calibración del micrófono, la sensibilidad, la ganancia, la referencia y las unidades de medida</p>
	<p>Calcula en nivel de presión sonora de una frecuencia específica. Sirve para verificar la calibración del equipo en cualquier frecuencia</p>

**Fuente.** Creación propia del autor

### 3.4. Fases de estudio

Las fases de estudio para el desarrollo de la presente tesis, se muestran en el siguiente Diagrama de Gantt.

**Tabla 17.** Diagrama de Gantt en el cual se muestran las fases de estudio

Actividades	2014					2015
	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
Descripción de la Empresa	X					
Problema que se pretende abordar	X					
Justificación del estudio	X					
Revisión de la literatura		X				
Objetivo general			X			
Objetivos específicos			X			
Objetivos colaterales			X			
Población y Muestra			X			
Tipo de Estudio y de diseño			X			
Material				X		
Fases del estudio				X		
Resultados					X	
Discusión						X
Conclusiones						X
Recomendaciones						X

**Fuente.** Creación propia del autor

## **CAPÍTULO IV: RESULTADOS**

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos con el analizador de bandas de octava desarrollado, al cual se lo graduará con un calibrador acústico marca 3M modelo QC-20 Clase I. Se realizará la determinación de la exposición al ruido en el trabajo, conforme a la norma NTE INEN-ISO 9612 y se compararán los resultados con un sonómetro integrador marca 3M modelo SoundPro Clase I.

El software desarrollado se muestra en las Figuras 26 y 27. La Figura 26 muestra el panel de usuario, en el cual se puede configurar los parámetros como por ejemplo: escalas de ponderación, constante de tiempo, rango de frecuencias, etc. La Figura 27 muestra el código de programación creado.

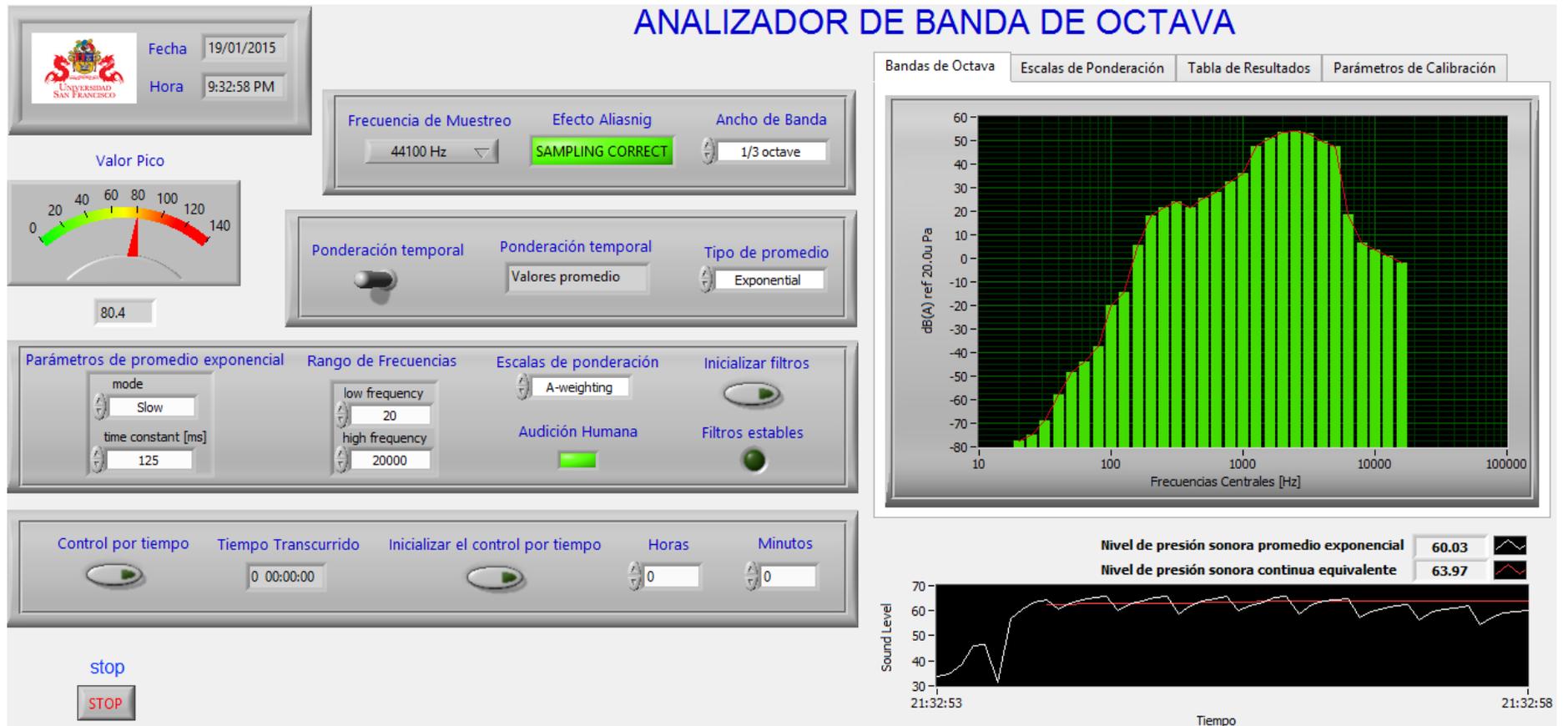


Figura 26. Panel de usuario del analizador de bandas de octava desarrollado

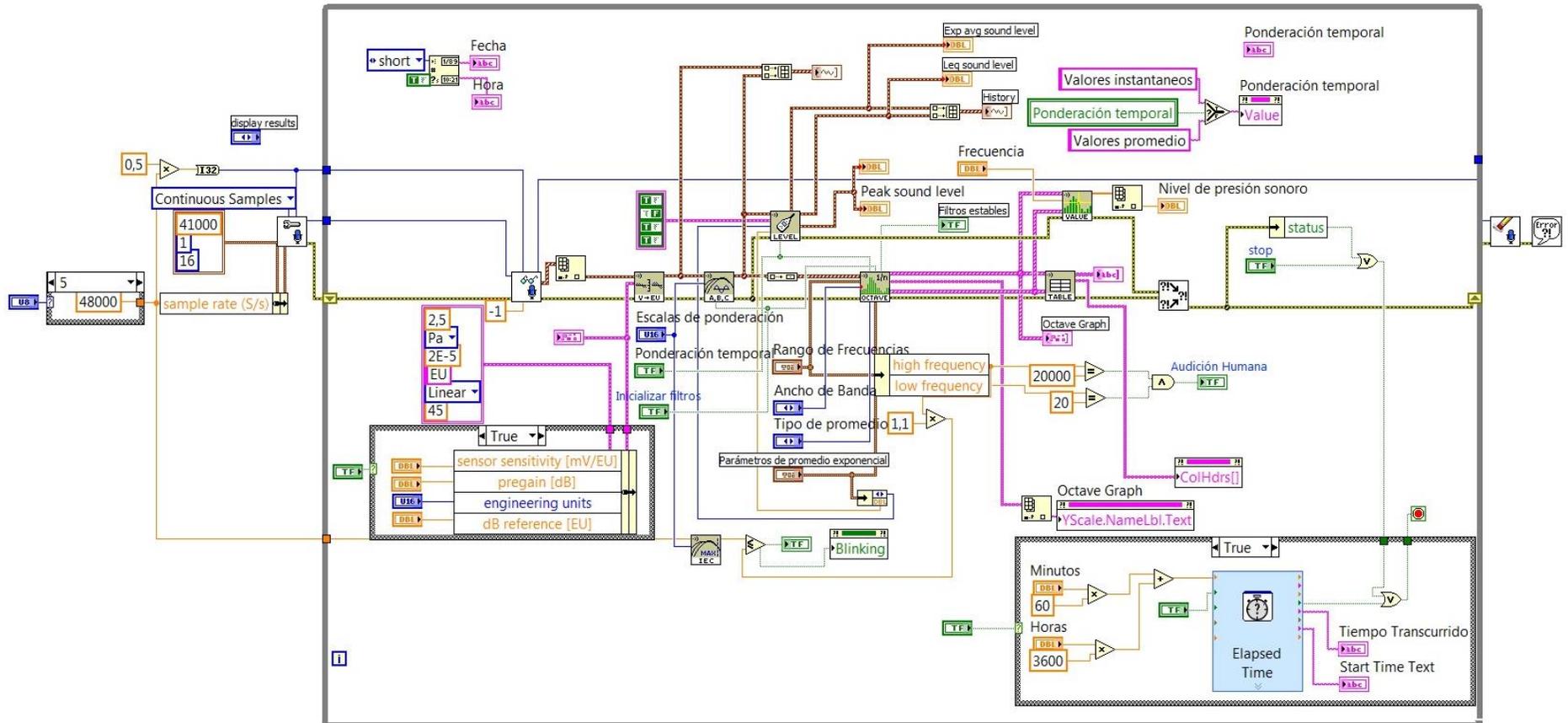


Figura 27. Código de programación del analizador de bandas de octava desarrollado

#### 4.1. Calibración de campo del analizador de bandas de octava

Para la graduación del analizador de bandas de octava se utilizó un calibrador acústico QC-20 de 3M Clase I según las normas ANSI S1.40 *Specification for acoustical calibrators*, e IEC 60942 *Sound calibrators*. El calibrador posee dos niveles de presión sonora: 94 y 114 dB; y dos frecuencias: 250 y 1000 Hz, como se muestra en la Figura 28. Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 18.



**Figura 28.** Calibrador marca 3M modelo QC-20

Como se puede observar en la Tabla 18, los errores varían entre (-0.98 y 1.25). Tomando en cuenta que el error del calibrador es de  $\pm 0.3$  dB (3m, 2015) (veáse Tabla 6), entonces el error total varía entre (-1.28 y 1.55), por lo que aproximadamente el error total es de  $\pm 1.5$  dB. Por lo tanto, basado en los errores máximos permitidos para cada una de las

clases de instrumentos (Véase Tabla 5), se concluye que el equipo desarrollado es de Clase III

**Tabla 18.** Calibración del analizador de bandas de octava

Frecuencia Hz	Nivel de presión sonora dB	Hora de la medición am	Resultado de la medición dB	Error	Clase del instrumento
250	94	8:30	93.67	-0.33	I
		8:32	95.07	1.07	II
		8:34	93.74	-0.26	I
		8:36	93.86	-0.14	I
		8:38	94.04	0.04	I
		8:40	93.17	-0.83	I
		8:42	94.19	0.19	I
		8:44	94.36	0.36	I
	114	8:46	114.66	0.66	I
		8:48	113.96	-0.04	I
		8:50	114.56	0.56	I
		8:52	114.24	0.24	I
		8:54	113.02	-0.98	I
		8:56	114.19	0.19	I
		8:58	113.30	-0.70	I
		9:00	114.44	0.44	I
1000	94	9:02	93.75	-0.25	I
		9:04	93.44	-0.56	I
		9:06	94.45	0.45	I
		9:08	93.37	-0.63	I
		9:10	95.09	1.09	II
		9:12	94.43	0.43	I
		9:14	94.58	0.58	I
		9:16	94.72	0.72	I
	114	9:18	113.76	-0.24	I
		9:20	114.29	0.29	I
		9:22	113.53	-0.47	I
		9:24	113.93	-0.07	I
		9:26	115.25	1.25	II
		9:28	114.74	0.74	I
		9:30	113.57	-0.43	I
		9:32	114.41	0.41	I

**Fuente.** Creación propia del autor

## 4.2. Análisis del puesto de trabajo en donde se realizarán las pruebas

Como se explicó en el numeral 1.1) del Capítulo I, Franz Viegner es una empresa que se dedica a la fabricación y venta de productos para baños. Dentro del proceso de colado y secado (Véase Figura 1), se encuentra el puesto de trabajo de máquinas de alta presión, es aquí donde se realizarán las pruebas de funcionamiento del equipo desarrollado. Conforme a la metodología explicada en el Capítulo 7 de la norma NTE INEN ISO 9612, el primer paso consiste en un análisis del trabajo.

En el puesto de máquinas de alta presión se fabrica porcelana sanitaria de diferentes tipos y tamaños, entre ellos: depósitos para inodoros, inodoros, lavabos, bidés y accesorios. La máquina puede realizar todos esos productos cambiando el molde y ajustando los parámetros en el tablero de control, como se muestra en las Figuras 29.



Figura 29. Puesto de máquinas de alta presión.

Dado que en este puesto de trabajo se elaboran una variedad de productos, es difícil dividir el trabajo en actividades y tiempos definidos. Las actividades y el tiempo depende del tipo de lote que se esté procesando, por ejemplo el tiempo para producir un inodoro es mucho mayor que el de una jabonera; así mismo mientras que en la máquina se produce un inodoro a la vez; por otro lado, se pueden procesar hasta seis moldes de jaboneras en la misma máquina.

El tipo de producto en este puesto de trabajo es de lujo, y la mayor parte de la fabricación es bajo demanda para clientes como Uribe & Schwarzkopf y Naranjo Ordoñez, por lo tanto las ordenes de trabajo son controladas por el departamento de control de producción.

Las máquinas de alta presión, fueron construidas por el departamento de mantenimiento de la empresa, por lo cual no cuentan con especificaciones técnicas. Funcionan con tecnología Siemens en la parte de control y con tecnología Festo en la parte de fuerza. Las máquinas utilizan energía neumática proveniente de una red de aire comprimido, esta energía sirve para alimentar a las bombas neumáticas (de allí el nombre de máquina de alta presión). Estas particularidades hacen necesario una evaluación de ruido ocupacional para posteriormente implementar los controles necesarios, si fuera el caso.

Aunque no es posible definir con detalle las actividades y tiempos, se hará un estudio generalizado de las tareas más representativas. Para el análisis de las actividades desarrolladas se las ha dividido en cuatro fases: preparación de la máquina, desmolde de piezas, lavado de piezas y acopio de piezas.

La preparación de la máquina consiste en configurar los controles para elaborar un producto específico y cambiar los moldes respectivos. Para el caso de este estudio se fabricaron depósitos para inodoros, código DRM, los cuales pesan 9.38 Kg cada uno. Esta actividad se la hace al inicio de la jornada o cuando se requiere cambiar de producto.

El desmolde de piezas, consiste en sacar el producto semielaborado de la máquina y transportarlo hasta la mesa de trabajo. Esta actividad es crítica para la producción debido a que la barbotina está fresca todavía, por esa razón los trabajadores se ayudan de un pistón neumático calibrado mediante un estrangulador, para evitar los movimientos bruscos. Para el caso de los depósitos DRM se extrae un producto a la vez, pero para el caso de jaboneras se pueden extraer hasta seis artículos, como se explicó anteriormente. El desmolde de piezas se puede observar en las Figuras 30.



**Figura 30.** Desmolde de piezas, a la izquierda el pistón neumático y a la derecha el transporte.

El lavado de piezas consiste en limpiar cualquier aspereza del producto. Es una actividad completamente manual y dado que la barbotina aún está fresca, esta actividad debe hacerse con esponjas suaves y en una sola dirección, para que la uniformidad de las paredes de la pieza no se vea afectada. El lavado de piezas se puede observar en las Figuras 31.



**Figura 31.** Lavado de piezas, a la izquierda turno de la mañana y a la derecha turno de la tarde

El acopio de piezas consiste en almacenarlas en un coche transportador, el cual irá al siguiente proceso, el secado. Este coche contiene tres pisos con diferentes alturas dependiendo del tipo de producto. Para esta tarea el artículo ya se ha secado un poco y es más fácil y menos crítica la movilidad de la pieza. En las Figuras 32, se pueden observar el acopio de las piezas.



**Figura 32.** Acopio de piezas

Una vez hecho el acopio de piezas, el proceso vuelve a repetirse desde la actividad de desmolde de piezas. Para el caso específicamente de este producto, la máquina toma 20 minutos en fabricar un depósito, por lo que teóricamente en ocho horas de trabajo se podrían realizar aproximadamente 24 depósitos, sin embargo hay que tener en cuenta que el trabajo no es automatizado, es semi manual, por lo que es necesario aplicar un factor de corrección, como se muestra en la Ecuación 32.

$$P_r = k \times P_t$$

**Ecuación 32.** Ecuación de trabajo semi manual

**Fuente.** (Niegel & Freivalds, 2009, p. 255)

Donde:

$P_r$  Producción real

$P_t$  Producción teórica

k Factor de corrección, de 0.95 para trabajos semi manuales.

Aplicando el factor de corrección, el número total de piezas que debe esperarse es de 23. En este valor no se consideran problemas de desperfectos de la maquinaria, problemas de calidad del producto, ni retrasos en la entrega de materia prima (Niebel & Freivalds, 2009)

#### 4.3. Medición de ruido basado en la estrategia del puesto de trabajo

En el puesto descrito existen cinco máquinas y trabajan diez operarios, divididos en dos grupos, cinco personas en el turno de la mañana y las cinco restantes en el turno de la tarde. Los trabajadores cumplen la jornada de trabajo mostrada en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Horarios de trabajo en Franz Viegner

	Turno de la mañana			Turno de la tarde		
	Inicio	Fin	Duración	Inicio	Fin	Duración
<b>Trabajo</b>	6:30	8:30	2:00	15:30	17:30	2:00
<b>Pausas pasivas y desayuno</b>	8:30	8:45	0:15	17:30	17:45	0:15
<b>Trabajo</b>	8:45	10:45	2:00	17:45	19:45	2:00
<b>Almuerzo</b>	10:45	11:15	0:30	19:45	20:15	0:30
<b>Trabajo</b>	11:15	13:15	2:00	20:15	22:15	2:00
<b>Pausas pasivas y refrigerio</b>	13:15	13:30	0:15	22:15	22:30	0:15
<b>Trabajo</b>	13:30	15:30	2:00	22:30	0:30	2:00
<b>TOTAL</b>			9:00			9:00

**Fuente.** (Archivo interno del departamento de control y programación de producción, 2014)

Como se puede ver, existen tres períodos de descanso con una duración total de una hora y cuatro períodos de trabajo con una duración total de ocho horas. Se consideró al puesto de trabajo como un grupo de exposición homogénea al ruido (GEH), conforme lo descrito en el apartado 3.1) del Capítulo III, debido a que las diez personas realizan el mismo trabajo, se encuentran en el mismo espacio físico, manejan el mismo tipo de maquinaria y el rango de edades oscila entre de 31 a 36 años.

Una vez que se ha definido el GEH, es necesario calcular el tiempo mínimo de muestreo en base al número de trabajadores y planificar las mediciones. El tiempo mínimo se calcula a partir de la Ecuación 33.

$$T_{min} = 5 + \frac{n_G - 5}{2}$$

**Ecuación 33.** Tiempo mínimo de medición, si el GEH está conformado entre  $5 < n_G \leq 15$

**Fuente.** (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014)

$$T_{min} = 5 + \frac{10 - 5}{2}$$

$$T_{min} = 7.5 \text{ horas}$$

El tiempo mínimo de muestreo es de al menos 7.5 horas, por lo que la medición se efectuará durante ocho horas, este tiempo estará dividido en ocho períodos de una hora cada uno (cuatro horas en el turno de la mañana y cuatro horas en el turno de la tarde), como se muestra en la Tabla 20. Los puestos de trabajo evaluados fueron seleccionados por muestreo aleatorio simple sin reposición, como se muestra en la Tabla 21.

**Tabla 20.** Planificación de las mediciones

Número de mediciones	Dia 1		Dia 2		Duración
	Inicio de la medición	Fin de la medición	Inicio de la medición	Fin de la medición	
1	7:00	8:00			1:00
2	9:15	10:15			1:00
3	11:45	12:45			1:00
4	14:00	15:00			1:00
5			16:00	17:00	1:00
6			18:15	19:15	1:00
7			20:45	21:45	1:00
8			23:00	0:00	1:00
<b>TOTAL</b>					8:00

**Fuente.** Creación propia del autor

**Tabla 21.** Método de muestreo simple sin reposición

Numeración de las máquinas	Dia 1		Dia 2	
	Inicio de la medición	Fin de la medición	Inicio de la medición	Fin de la medición
MAP 1	7:00	8:00	16:00	17:00
MAP 2	9:15	10:15		
MAP 3	11:45	12:45	18:15	19:15
MAP 4			20:45	21:45
MAP 5	14:00	15:00	23:00	0:00

**Fuente.** Creación propia del autor

Los parámetros de configuración para la medición pueden verse en la Tabla 22. La exposición a ruido ocupacional se midió con el sonómetro integrador de 3M modelo SoundPro Clase I y con el analizador de bandas desarrollado. Los resultados de las mediciones pueden observarse en la Tablas 23 y 24.

**Tabla 22.** Parámetros de configuración para la medición de ruido ocupacional

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
Altura de los micrófonos	1.6	Metros
Inclinación de los micrófonos	75	Grados
Frecuencia de muestreo	44100	Hertzios
Ancho de banda	Octava	
Tipo de promedio	Exponencial	
Constante de tiempo	Slow	
Rango de Frecuencias	20 - 20000	Hertzios
Escala de ponderación	A	
Tiempo de grabación	1	Hora

**Fuente.** Creación propia del autor

Tabla 23. Resultado de las mediciones con el analizador desarrollado

	Frecuencias de octava de banda								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	LeqA
Medición 1	7.2	39.1	66.5	70.3	86.8	95.3	99.7	81.2	101.3
Medición 2	18.3	39.0	65.1	70.1	85.4	94.2	102.8	81.9	103.5
Medición 3	4.8	35.4	68.9	82.8	89.3	99.4	91.2	69.1	100.4
Medición 4	7.5	41.7	68.1	71.7	80.8	92.3	92.1	68.1	95.4
Medición 5	6.8	33.1	61.5	65.0	77.0	92.4	97.3	78.1	98.6
Medición 6	5.4	36.1	64.4	71.0	77.9	90.8	94.4	75.4	96.1
Medición 7	15.3	31.1	61.0	67.6	86.1	96.5	95.8	72.2	99.4
Medición 8	7.8	33.8	63.5	69.9	79.8	90.6	94.5	75.1	96.1
<b>TOTAL</b>	12.1	37.4	65.7	75.1	84.8	94.9	97.6	77.5	99.7

Fuente. Creación propia del autor

Tabla 24. Resultado de las mediciones con el sonómetro integrador de 3M modelo SoundPro Clase

I

	Frecuencias de octava de banda								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	LeqA
Medición 1	-2.0	30.5	55.3	62.2	72.3	88.9	95.2	74.4	96.2
Medición 2	6.0	34.9	60.9	70.3	83.9	96.3	96.6	78.0	99.6
Medición 3	13.8	35.7	62.3	64.6	83.5	86.1	92.3	74.6	93.7
Medición 4	7.2	33.5	60.3	65.8	83.0	90.2	100.5	80.2	101.0
Medición 5	2.8	39.1	58.9	69.0	84.3	90.5	96.1	77.1	97.4
Medición 6	4.6	36.2	61.9	64.8	79.1	92.8	93.5	75.1	96.3
Medición 7	18.5	35.5	56.3	67.0	81.5	92.7	95.3	72.0	97.3
Medición 8	6.8	27.9	61.4	67.9	86.4	96.6	95.8	72.3	99.5
<b>TOTAL</b>	11.5	35.2	60.2	67.1	83.0	93.0	96.3	76.3	98.2

Fuente. Creación propia del autor

Las Tablas 23 y 24 muestran los resultados de los ocho muestreos, cada uno de ellos está dividido en bandas de octava. La última fila llamada *total*, es el promedio de las ocho mediciones y se calcula a partir de la Ecuación 14. La última columna llamada  $L_{Aeq}$ , es el nivel de presión sonora de cada una de los ocho muestreos y se calcula a partir de la Figura 6.

El nivel de presión sonora continua equivalente  $L_{Aeq}$  es de 98.2 dBA con el sonómetro integrador de 3M, y de 99.7 dBA con el analizador de bandas desarrollado. La diferencia de lectura entre los dos equipos es de 1.5 dBA, esto se debe a que el analizador de bandas es de Clase III, por lo que tiene un error de  $\pm 1.5$  dB, como se explicó en el numeral 4.1) de este capítulo.

El siguiente paso consiste en calcular el nivel de exposición diario equivalente  $L_{Aeq,d}$ , él se determina a partir de la Ecuación 15.

$L_{Aeq,d}$  para el equipo desarrollado

$$L_{Aeq,d} = 99.7 \text{ dBA}$$

$L_{Aeq,d}$  para el sonómetro de 3M

$$L_{Aeq,d} = 98.2 \text{ dBA}$$

Como se puede observar el nivel de exposición diario equivalente es igual al nivel de presión sonora continua equivalente, esto se debe a que el periodo total de muestreo es de ocho horas y la jornada nominal también es de ocho horas

### 4.3.2. Incertidumbre para la medición basada en el puesto de trabajo

Las mediciones realizadas en el apartado anterior se ven afectadas por fuentes de error como por ejemplo: la posición del micrófono, la clase de instrumento utilizado, las contribuciones falsas, golpes involuntarios en el micrófono, etc. Estas fuentes de incertidumbre han sido consideradas de acuerdo al Anexo C.3 de la norma NTE INEN ISO 9612. Para estimar el error cometido se calculó la incertidumbre típica combinada  $u$  y la incertidumbre expandida  $U$ . La Ecuación 34 sirve para determinar la incertidumbre típica combinada  $u$ . La Tabla 25 muestra los valores para calcular la incertidumbre típica combinada  $u$ .

$$u^2 = c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2$$

**Ecuación 34.** Incertidumbre típica combinada

Donde:

$u$  incertidumbre típica combinada

$u_1$  incertidumbre típica debido a las mediciones

$c_1$  coeficiente de sensibilidad debido a las mediciones

$u_2$  incertidumbre típica debido al equipo utilizado

$c_2$  coeficiente de sensibilidad debido al equipo utilizado

$u_3$  incertidumbre típica debido a la posición del micrófono

$c_3$  coeficiente de sensibilidad debido a la posición del micrófono

**Tabla 25.** Valores para calcular la incertidumbre típica combinada  $u$ .

Coeficientes	Equipo desarrollado	Sonómetro 3M
$u_1$	2.9	2.3
$c_1 * u_1$	1.7	1.3
$u_2$	2	0.7
$c_2$	1	1
$u_3$	1	1
$c_3$	1	1

**Fuente.** Creación propia del autor

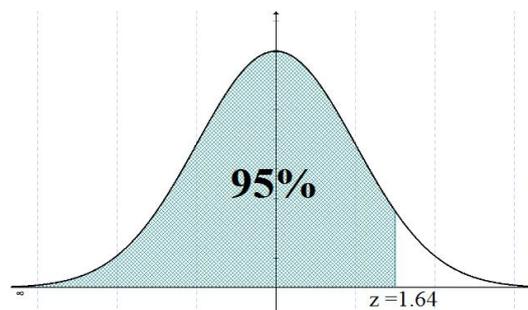
$u$  para el equipo desarrollado

$$u = 2.8 \text{ dB}$$

$u$  para el sonómetro de 3M

$$u = 1.8 \text{ dB}$$

La incertidumbre expandida  $U$  es calculada mediante la distribución normal, con un intervalo de confianza unilateral de 95%, como se muestra en la Figura 33. Aunque estadísticamente es posible elegir otro valor para el intervalo de confianza, la norma recomienda 95%. La Ecuación 35 como calcular la incertidumbre expandida  $U$



**Figura 33.** Distribución normal con un intervalo de confianza unilateral del 95%

**Fuente.** (Spiegel, Estadística, 1997)

$$U = z \times u$$

**Ecuación 35.** Incertidumbre expandida

U para el equipo desarrollado

$$U = 4.7 \text{ dB}$$

U para el sonómetro de 3M

$$U = 2.9 \text{ dB}$$

El resultado total de la medición consiste en adicionar la incertidumbre expandida U, al nivel de exposición diario equivalente  $L_{Aeq,d}$ . Los resultados obtenidos muestran que para el caso del equipo desarrollado existe un nivel de confianza del 95% de que los trabajadores estén sometidos a un nivel de exposición diario equivalente de  $99.7 + 4.7$  dBA. Para el caso del sonómetro SoundPro Clase I existe un nivel de confianza del 95% de que los operarios estén sometidos a un nivel de exposición diario equivalente de  $98.2 + 2.9$  dBA.

$L_{Aeq,d}$  para el equipo desarrollado

$$L_{Aeq,d} = 99.7 + 4.7 \text{ dBA}$$

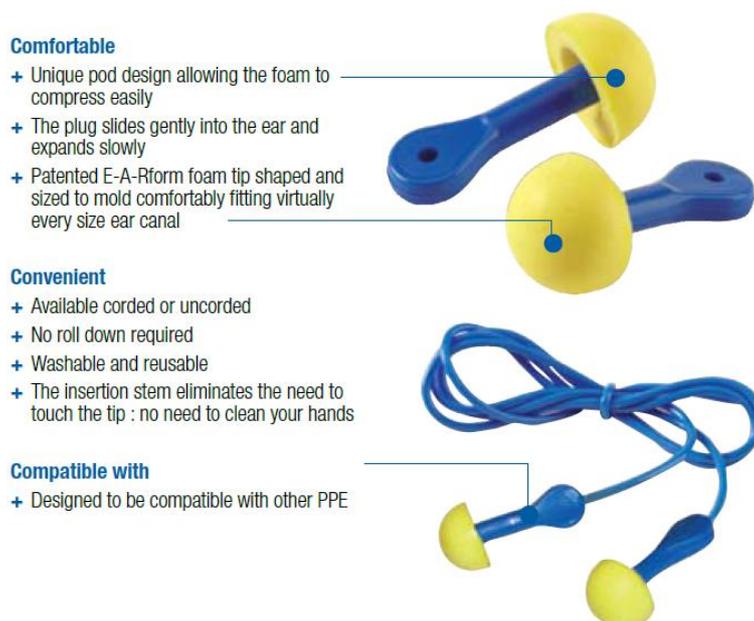
$L_{Aeq,d}$  para el sonómetro de 3M

$$L_{Aeq,d} = 98.2 + 2.9 \text{ dBA}$$

Comparando con el numeral 7) artículo 55) del Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo “Se fija como límite máximo de presión sonora el de 85 decibeles escala A del sonómetro, medidos en el lugar en donde el trabajador mantiene habitualmente la cabeza, para el caso de ruido continuo con 8 horas de trabajo...”, ambos dispositivos indican que se supera el límite máximo del nivel de exposición diario equivalente, por lo que es necesario tomar algún tipo de medidas correctivas. Para el caso de esta investigación se procederá a seleccionar elementos de protección auditiva.

#### 4.4. Selección de elementos de protección auditiva

Para la selección de los protectores auditivos se procedió con el método de bandas de octava. No se evaluó ningún protector auditivo tipo orejera, porque el ambiente térmico en el puesto de trabajo de máquinas de alta presión es caluroso y húmedo, debido a que esas son las características ideales para el pre secado de la porcelana sanitaria. El protector auditivo evaluado fue el E-A-R™ Express™ de 3M, cuya descripción y características técnicas pueden observarse en las Figuras 34 y 35 respectivamente.



**Figura 34.** Descripción del protector auditivo E-A-R™ Express™ de 3M

**Fuente.** (3m, 2015)

**EXPRESS™**

Frequency (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Mean Attenuation (dB)	27.8	26.0	24.9	25.2	29.4	34.9	37.0	35.9
Standard Deviation (dB)	5.4	4.5	3.3	5.0	4.2	4.1	5.2	3.7
Assumed Protection (dB)	22.4	21.5	21.5	20.2	25.2	30.8	31.8	32.2

**Figura 35.** Características técnicas del protector auditivo E-A-R™ Express™ de 3M**Fuente.** (3m, 2015)

Conforme a lo expuesto en el numeral 3.3.1.1.1) del Capítulo III, se procedió a realizar la evaluación de protector. Se realizaron dos evaluaciones, la primera con los datos obtenidos con el equipo desarrollado y la segunda con los datos del sonómetro de 3M Clase I, los resultados se muestran en las Tablas 26 y 27 respectivamente.

**Tabla 26.** Nivel efectivo de presión sonora con los datos del analizador desarrollado

	Frecuencias de octava de banda								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Total
Nivel de presión sonora medido	12.1	37.4	65.7	75.1	84.8	94.9	97.6	77.5	99.7
Atenuación media	27.8	26.0	24.9	25.2	29.4	34.9	37.0	35.9	
Desviación típica	5.4	4.5	3.3	5.0	4.2	4.1	5.2	3.7	
Protección asumida	22.4	21.5	21.6	20.2	25.2	30.8	31.8	32.2	
Nivel efectivo de presión sonora	-10.3	15.9	44.1	54.9	59.6	64.1	65.8	45.3	68.8

**Fuente.** Creación propia del autor

**Tabla 27.** Nivel efectivo de presión sonora con los datos del sonómetro del 3M

 FRANZ VIEGENER	Frecuencias de octava de banda								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Total
<b>Nivel de presión sonora medido</b>	11.5	35.2	60.2	67.1	83.0	93.0	96.3	76.3	98.2
<b>Atenuación media</b>	27.8	26.0	24.9	25.2	29.4	34.9	37.0	35.9	
<b>Desviación típica</b>	5.4	4.5	3.3	5.0	4.2	4.1	5.2	3.7	
<b>Protección asumida</b>	22.4	21.5	21.6	20.2	25.2	30.8	31.8	32.2	
<b>Nivel efectivo de presión sonora</b>	-10.9	13.7	38.6	46.9	57.8	62.2	64.5	44.1	67.1

**Fuente.** Creación propia del autor

La última fila llamada *nivel efectivo de presión sonora*, es la diferencia entre el nivel de presión sonora de las mediciones y la protección asumida del protector auditivo. Se puede concluir que con el protector auditivo seleccionado, el nivel efectivo de presión sonora será de 68.8 dBA con los datos del analizador desarrollado y será de 67.1 dBA con los datos del sonómetro de 3M, ambos en el 84% de las ocasiones. Siempre y cuando las personas utilicen adecuadamente el protector.

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

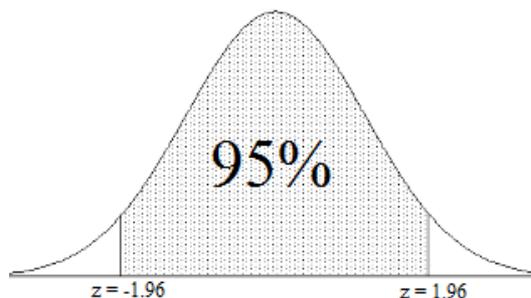
La empresa no cuenta con evaluaciones de ruido ocupacional, lo que dispone son mediciones de ruido basado en la metodología de mapas de ruido, que se construyen en base a sonometrías. Los mapas de ruido son una metodología para valoración de ruido ambiental contemplados en la norma NTE INEN ISO 1996-2 *Medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: Determinación de los niveles de ruido ambiental*. La compañía cuenta con programas de vigilancia de la salud de los trabajadores, incluso tiene su propia sala de audiometría con los equipos necesarios, sin embargo la organización no cuenta con programas de vigilancia ambiental para ruido ocupacional.

La empresa no tiene una identificación de ruido ocupacional, la cual esté basada en procedimientos reconocidos en el ámbito nacional o internacional. Lo que dispone es una identificación subjetiva basada en la antigua e inconsistente metodología de triple criterio (PGV) del Ministerio de Relaciones Laborales. Con el desarrollo del analizador de bandas de octava se hará la identificación de ruido ocupacional conforme a la norma INE INEN ISO 9612, ya que el equipo es de Clase III.

La publicación de la norma IEC 61672-1 en el año 2002, reemplazó a las normas IEC 60651 e IEC 60804 y con ello se eliminó la escala de ponderación B y la Clase III para equipos de medición. Sin embargo en este proyecto se incluyó la escala de ponderación B y se desarrolló equipo Clase III conforme con la norma IEC 60651.

La parte más delicada del equipo es el micrófono, debido a sus datos técnicos y a su calibración. Debe tenerse especial cuidado en la selección de cualquier otro micrófono ya que este debe tener un patrón polar de tipo omnidireccional, una respuesta plana en frecuencia de 20 a 20 KHz o lo más cercano posible a esos valores y se debe conocer su sensibilidad para poder calibrarlo. Por lo tanto no todos los micrófonos son compatibles con la aplicación desarrollada, ya que los micrófonos generalmente están diseñados para amplificar la voz humana y por eso tienen un patrón polar cardiode y una respuesta en frecuencia entre 80 a 1000 Hz (Crocker, 1998).

La medición de ruido se realizó durante ocho horas, este tiempo estuvo dividido en ocho períodos de una hora cada uno (cuatro horas en el turno de la mañana y cuatro horas en el turno de la tarde). La norma NTE INEN ISO 9612 no hace distinción en el cálculo de la incertidumbre de la medición, la norma considera que la distribución de los datos se asemeja a la curva normal, pero este supuesto se cumple siempre y cuando el número de datos sea mayor igual a 30. Para el caso de pequeñas muestras como en esta tesis, es más conveniente aplicar la distribución t de Student, la cual es específicamente para muestras pequeñas (Spiegel, Estadística, 1997). La norma en mención también define al error como un límite unilateral, sin embargo es más didáctico definirlo como un límite bilateral. Asumiendo que las muestras se distribuyen de acuerdo a la curva normal y con un intervalo de confianza bilateral de 95%, como se muestra en la Figura 36. Entonces la incertidumbre expandida U se calcula a partir de la Ecuación 35 y los resultados de las mediciones quedan de la siguiente manera.



**Figura 36.** Distribución normal con un intervalo de confianza bilateral de 95%

**Fuente.** (Spiegel, Estadística, 1997)

$L_{Aeq,d}$  para el equipo desarrollado

$$L_{Aeq,d} = 99.7 \pm 5.5 \text{ dBA}$$

$L_{Aeq,d}$  para el sonómetro de 3M

$$L_{Aeq,d} = 98.2 \pm 3.5 \text{ dBA}$$

Los valores de eficacia de protección auditiva solo serán válidos si se cumplen los siguientes tres principios:

1. Los protectores auditivos son usados correctamente y de la misma manera en que han sido usados por las personas de estudio en la norma ISO 4869-1 o en la norma ANSI S3.19.
2. Los protectores auditivos tienen un mantenimiento adecuado.
3. Las características anatómicas de las personas sometidas al ensayo de las normas mencionadas son una muestra representativa de la población de los usuarios reales.

De este modo, las principales fuentes de error para el cálculo de los niveles efectivos de presión sonora son las diferencias entre las personas sometidas que participaron en el estudio de las normas y los usuarios reales (Kotarbińska & Kozłowski, 2006)

En lo posterior si se desea profundizar en la determinación de la exposición al ruido ocupacional y estimación de la pérdida de audición inducida por el ruido, se recomienda la aplicación de la norma ISO 1999:2013.

## CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

Con referencia al objetivo general: *Desarrollar un sonómetro integrador Clase III que facilite de manera objetiva el reconocimiento e identificación de ruido ocupacional.*

La graduación del micrófono Shure V100 se la realizó con un calibrador acústico QC-20 de 3M Clase I. Los resultados de la calibración mostraron que el rango de error está entre (-1.28 y 1.55) (en estos resultados ya está considerado la incertidumbre propia del calibrador), por lo que aproximadamente el error total varía entre  $\pm 1.5$  dB. A este nivel de incertidumbre corresponde la de un equipo de Clase III, según la norma IEC 60651. El dispositivo responsable de tal error es el micrófono. Por lo tanto, el analizador desarrollado puede llegar a ser un equipo de Clase I, si se acopla un micrófono de tales características. National Instruments, quien es la empresa desarrolladora del software LabVIEW, recomienda el uso de *Micrófonos de Medidas NI IEPE*, los cuales son equipos de Clase I. Sin embargo el precio de estos instrumentos va desde los \$560 hasta los \$2045 dependiendo de su sensibilidad y respuesta de frecuencia (National Instruments, 2014).

Con referencia al primer objetivo específico: *Desarrollar un analizador de bandas de octava para calcular los niveles efectivos de presión sonora cuando se utilizan protectores auditivos.* Se construyó un equipo capaz de analizar ruido ocupacional en el dominio de la frecuencia mediante bandas de octava,  $1/3$  de octava,  $1/6$  de octava,  $1/12$  de octava y  $1/24$  de octava. El dispositivo también puede hacer análisis de ruido en el dominio del tiempo, posee control por tiempo, entre otras utilidades. Las características del equipo se detallan en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Características del analizador de bandas desarrollado

Parámetros	Valores			
Frecuencias de muestreo	20 KHz, 22.05 KHz, 25.6 KHz, 40 KHz, 44.1 KHz, 48 KHz, 50 KHz, 51.2 KHz, 80 KHz, 96 KHz			
Ancho de banda	Bandas de octava, 1/3 de octava, 1/6 de octava, 1/12 de octava y 1/24 de octava			
Tipo de promedio	Linear	Exponential	Peak	Equal confidence
Constante de tiempo	Slow	Fast	Impulse	Custom
Rango de frecuencias	20 - 20000 KHz			
Escala de ponderación	A	B	C	Z
Lecturas	Nivel de presión sonora promedio exponencial Nivel de presión sonora continua equivalente			

**Fuente.** Creación propia del autor

Con referencia al segundo objetivo específico: *Realizar una evaluación de ruido ocupacional antes y después de la implementación de protectores auditivos, para calcular los niveles efectivos de presión sonora.* Se desarrolló un equipo capaz de analizar ruido en bandas de octava, cuyas frecuencias centrales van desde 31.5 Hz a 16000 Hz. Aunque la metodología de bandas de octava utiliza solo el rango desde 63 Hz a 8000 Hz, se diseñó el equipo de esta manera para abarcar la mayor parte del rango de audición humana (20 a 20000 Hz). Se analizó la implementación de los protectores auditivos E-A-R™ Express™ de 3M y se concluyó que en el 84% de las ocasiones, el nivel efectivo de presión sonora será de 68.8 dBA con los datos del analizador desarrollado y será de 67.1 dBA con los datos del sonómetro de 3M. Sea cual fuere la referencia que se tome, ambos equipos indicaron que con el protector auditivo seleccionado, el nivel efectivo de presión sonora se encuentra dentro de los límites de exposición a ruido enmarcados en la legislación nacional de seguridad e higiene del trabajo.

Con referencia al tercer objetivo específico: *Realizar una evaluación de ruido ocupacional, con el dispositivo desarrollado y con un sonómetro integrador promediador 3M modelo SoundPro Clase I, para determinar el error.* Se realizaron mediciones en el puesto de trabajo llamado *máquinas de alta presión*, se tomaron dos muestras de cuatro individuos cada una, de una población de diez elementos, considerada como grupo de exposición homogénea al ruido. Los resultados mostraron un nivel diario equivalente de  $L_{Aeq,d} = 99.7 \pm 5.5$  dBA y  $L_{Aeq,d} = 98.2 \pm 3.5$  dBA para el quipo desarrollado y el sonómetro integrador Clase I respectivamente. Según esto, ambos equipos detectaron un exceso de ruido en el puesto de trabajo.

Con referencia al objetivo colateral: *Comparar técnicamente los criterios nacionales de exposición a ruido ocupacional, con criterios internacionales.* El país tiene escasa regulaciones referentes a ruido ocupacional, lo que se traduce en una pobre protección a los trabajadores, tanto es así que todo lo que se debe aplicar para cumplir con la legislación en materia de ruido ocupacional es el artículo 55) del Decreto Ejecutivo 2393, el cual está basado en un estudio de NIOSH de 1972. El propio Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de los EE.UU. en 1998 actualizó su estudio y estableció nuevas recomendaciones referentes al tiempo de exposición en función del nivel de presión sonora. Estas nuevas recomendaciones han sido comprobadas y respaldadas por estudios de instituciones como el INSHT en su *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con la exposición de los trabajadores al ruido* y la ACGIH en su publicación *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents*. Sin embargo el Ecuador sigue retrasado en esta materia y aún se manejan los antiguos parámetros. El Instituto Ecuatoriano de Normalización en enero del 2014 adoptó algunas normas ISO referentes a ruido ocupacional y en agosto del mismo año publicó el

Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN 215 *Protectores anti ruido*, documentos en los cuales se basó este trabajo de investigación.

## CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

Con referencia al objetivo general: Se recomienda certificar al equipo desarrollado conforme las normas IEC 61672. El certificado de examen de modelo es un método con el que un laboratorio de calidad como Applus, PTB (Alemania) o LNE (Francia) testa un instrumento con una serie de ensayos eléctricos y acústicos. Para ello es necesario mejorar la clase del instrumento mediante *Micrófonos de Medidas NI IEPE* y desarrollar un sistema robusto contra interferencias eléctricas.

Con referencia al primer objetivo específico: Se recomienda evaluar otros protectores auditivos con otras características y de otras marcas, ya que se pueden encontrar varias alternativas en el mercado. Se deben tomar precauciones para evitar la selección de protectores auditivos que proporcionen innecesariamente altas atenuaciones, ya que estos protectores pueden causar dificultades de comunicación o ser menos confortables y por lo tanto susceptibles de quitárselos.

Para que las características de atenuación de los protectores auditivos se adapten a la realidad, los usuarios deben usar el equipo de protección de la misma manera como lo hicieron las personas sometidas al ensayo (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014). Se recomienda seguir los Capítulos 6 y 7) de la norma UNE-EN 458 *Protectores auditivos. Recomendaciones relativas a la selección, uso, precauciones de empleo y mantenimiento.*

Con referencia al segundo objetivo específico: Se recomienda realizar la identificación de ruido ocupacional en todas las áreas de la empresa. Si las tareas de los

trabajadores son repetitivas y homogéneas se recomienda usar la estrategia de medición basada en la tarea o basada en el puesto de trabajo. Si las funciones de los trabajadores no son fácilmente analizables, como por ejemplo los trabajadores del departamento de mantenimiento, se recomienda la estrategia de la jornada completa. Si la identificación muestra que el nivel de ruido sobre pasa los límites de exposición permitidos o si existen dudas en el nivel de ruido, se debe realizar una medición con un equipo certificado. Para evitar las fuentes de incertidumbre el técnico debería estar presente durante todo el tiempo que duren las mediciones, si esto no es posible se debe usar la función de grabación del dispositivo y revisar después el archivo, para desechar cualquier fuente de error como por ejemplo la alarma contra incendios o música en los alto parlantes.

Con referencia al tercer objetivo específico: Se recomienda adquirir los *Micrófonos de Medidas NI IEPE* para mejorar la exactitud de las mediciones. La clase y la respuesta en frecuencia del equipo dependerán del micrófono utilizado, por ello es importante seleccionar un instrumento con amplio rango de respuesta en frecuencia y que sea de tipo omnidireccional. Antes de cada serie de mediciones y al final de cada serie de mediciones se debe realizar una calibración de campo, para ello se utilizará la función de calibración del equipo desarrollado.

Con referencia al objetivo colateral: Se recomienda seguir los criterios internacionales de NIOSH y de la ACGIH para la evaluación de ruido, ya que los criterios del D.E. 2393 brindan menos protección a los trabajadores. Es importante que en el país exista un instituto dedicado a la investigación de seguridad e higiene del trabajo, ese instituto debería ser el Comité Interinstitucional de Seguridad e Higiene del Trabajo, con ello podría mejorarse la protección a los trabajadores no solo en cuanto a ruido

ocupacional sino también por ejemplo en el aspecto ergonómico (manipulación manual de carga) ya que el numeral 4) del artículo 128 del mismo reglamento está desactualizado o también en el aspecto de radiaciones ionizantes ya que la dosis máxima permitida desde 1990 es de 20 mili sievert al año pero la legislación nacional de seguridad e higiene del trabajo aún maneja la antigua recomendación de 50 mili sievert al año. El CISHT debe ser en el encargado de realizar actualizaciones a la legislación nacional de seguridad e higiene del trabajo, como se describe en el literal c) del artículo 2) del D.E. 2393.

## BIBLIOGRAFÍA

- 3m. (2007). Technical Information for Occupational Health and Safety Professionals. *JobHealth Highlights*, 15.
- 3m. (2015, 01 06). 3m. Retrieved from 3M Personal Protective Equipment (PPE) Safety Solutions: [http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en\\_US/3M-PPE-Safety-Solutions/Personal-Protective-Equipment/?WT.mc\\_id=www.3M.com/OccSafety](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/3M-PPE-Safety-Solutions/Personal-Protective-Equipment/?WT.mc_id=www.3M.com/OccSafety)
- American National Standard Institute. (2004). *ansi.ANSI S1.11 Specification for octave-band and fractional-octave-band analog and digital filters*. New York: Acoustical Society of America.
- American National Standards Institute. (1983). *Specification for sound level meters*. New York: Acoustical Society of America.
- American National Standards Institute. (1998, 03 10). *ANSI S1.43: Specifications for Integrating-Averaging Sound Level Meters*. New York: Acoustical Society of America. Retrieved 12 13, 2014, from American National Standards Institute: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/ansi.s1.43.1997.pdf>
- Bernard, P. (2003). Leq, SEL, What? Why? When? *Brüel & Kjør Sound & Vibration Measurement*, 8.
- Chávez Miranda, J. R. (2006). Ruido: Efectos Sobre la Salud y Criterio de su Evaluación. *Ciencia y Trabajo*, 92.
- Cornell University Law School. (2015, 01 11). *Legal Information Institute*. Retrieved from Noise Labeling Standards for Hearing Protection Devices: <http://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-211/subpart-B>
- Coughlin, R., & Driscoll, F. (1993). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* (4 ed.). (E. M. Alatorre, Trans.) México DF: Prentice Hall Hispanoamerica.
- Creus, A. (1997). *Instrumentación Industrial* (6 ed.). Barcelona: Alfa Omega.
- Crocker, M. (1998). *Handbook of Acoustics*. Canadá: John Wiley & Sons. Inc.
- Fundación MAPFRE. (1996). *Manual de Higiene Industrial* (4 ed.). Madrid: MAPFRE S.A.
- Giménez de Paz, J. C. (2007). *Ruido para posgrados en higiene y seguridad industrial* (1 ed.). Buenos Aires: Nobuko.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *NTE INEN ISO 9612 Determinación de la exposición al ruido laboral* (1 ed.). Quito: INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *NTE INEN-ISO 4869-1 Protectores auditivos parte 1: Método subjetivo para la medición de la atenuación de sonido*. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *NTE INEN-ISO 4869-2 Estimación de los niveles efectivos de presión sonora ponderados A cuando se utilizan protectores auditivos* (1 ed.). Quito: INEN.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo. (2006). *Exposición de los trabajadores al ruido*. Barcelona: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo.
- Karwowski, W., & Steven, W. (1998). *The Occupational Ergonomics Handbook*. United States of América: CRC Press LLC.

- Kotarbińska, E., & Kozłowski, E. (2006). Measurement of Effective Noise Exposure of Workers Wearing Ear-Muffs. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 193.
- Landeau, R. (2007). *Elaboración de trabajos de investigación* (1 ed.). Caracas: Alfa.
- Ménendez Díez, F. (2009). *Higiene Industrial, Manual para la formación del especialista* (9 ed.). Valladolid: Lex Nova S.A.
- Muñoz, C., & Benassini, M. (1998). *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis* (1 ed.). México D.F.: Prentice Hall Hispanoamérica S.A.
- Narang, P., & Bell, T. (2008, 10 26-29). New IEC Standards and Periodic Testing of Sound Level Meters. *37th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 15.
- National Institute for Occupational Safety and Health. (1998). *Criteria for a recommended standard: Occupational noise exposure* (2 ed.). Ohio: U.S. Department of Health and Human Services.
- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. (2003, 11 21). *Full Revision of International Standards for Equal-Loudness Level Contours (ISO 226)*. Retrieved 12 13, 2014, from National Institute of Advanced Industrial Science and Technology:  
[http://www.aist.go.jp/aist\\_e/latest\\_research/2003/20031114/20031114.html](http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2003/20031114/20031114.html)
- National Instruments. (2007). *LabVIEW Sound and Vibration Analysis User Manual*. Austin, Texas 78759-3504: National Instruments.
- National Instruments. (2014, 12 30). *National Instruments*. Retrieved from NI LabVIEW:  
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210764>
- Niebel, B., & Freivalds, A. (2009). *Ingeniería Industrial. Métodos, estándares y diseño de trabajo* (12 ed.). México D.F.: McGraw Hill.
- Occupational Safety & Health Administration. (2015, 01 11). *Occupational Safety & Health Administration*. Retrieved from Regulations (Standards - 29 CFR):  
[https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owasrch.search\\_form?p\\_doc\\_type=STANDARD&p\\_toc\\_level=1&p\\_keyvalue=1910](https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owasrch.search_form?p_doc_type=STANDARD&p_toc_level=1&p_keyvalue=1910)
- Ogata, K. (2006). *Ingeniería de control moderna* (4 ed.). (S. Dormido, & R. Dormido, Trans.) Madrid: Prentice Hall.
- Organización Internacional del Trabajo. (1998). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (Vol. 1). Ginebra: Organización Internacional del Trabajo.
- Rohen, J., Yokochi, C., & Lütjen-Drecoll, E. (2003). *Atlas de anatomía humana* (5 ed.). (N. Cegarra, Trans.) Barcelona: Elsevier Science.
- Rubio, J. C. (2005). *Manual para la formación de nivel superior en prevención de riesgos laborales*. Barcelona: Diaz de Santos.
- Salazar, A. M., & Vásquez, L. (2006). Ciencia y Trabajo. *Efecto del Personal Estéreo en la Audición para las Altas*, 92.
- Sears, F., & Zemansky, M. (1970). *Física General* (5 ed.). (A. Y. Almarza, Trans.) Madrid: Aguilar.
- Spiegel, M. (1974). *Schaum's Outline of Fourier Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Spiegel, M. (1997). *Estadística* (2 ed.). (R. Hernández, Trans.) Madrid: McGraw-Hill.
- Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física universitaria* (12 ed., Vol. 1). México D.F.: Pearson.

**ANEXOS**