

Dispositivo para el control automático del nivel de presión sonora en un establecimiento  
comercial de Medellín según la normativa colombiana

Juan Diego Montoya Lopera, ✉ [juan.montoyal@tau.usbmed.edu.co](mailto:juan.montoyal@tau.usbmed.edu.co)

Santiago Ramírez Sánchez, ✉ [santiago.ramirezs@tau.usbmed.edu.co](mailto:santiago.ramirezs@tau.usbmed.edu.co)

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero de Sonido

Asesor: Anderson Ladino Velásquez, Magíster (MSc) en Ingeniería Acústica.



Universidad de San Buenaventura Colombia

Facultad de Ingenierías

Ingeniería de Sonido

Medellín, Colombia

2019

---

Citar/How to cite [1]

Referencia/Reference [1] J. D. Montoya Lopera, S. Ramírez Sánchez, “Dispositivo para el control automático del nivel de presión sonora en establecimientos comerciales de Medellín según la normativa colombiana”, Trabajo de grado Ingeniería de Sonido, Universidad de San Buenaventura Medellín, Facultad de Ingenierías, 2019.

Estilo/Style:  
IEEE (2014)



### **Bibliotecas Universidad de San Buenaventura**



Biblioteca Digital (Repositorio)  
<http://bibliotecadigital.usb.edu.co>

- Biblioteca Fray Alberto Montealegre OFM - Bogotá.
- Biblioteca Fray Arturo Calle Restrepo OFM - Medellín, Bello, Armenia, Ibagué.
- Departamento de Biblioteca - Cali.
- Biblioteca Central Fray Antonio de Marchena – Cartagena.

### **Universidad de San Buenaventura Colombia**

Universidad de San Buenaventura Colombia - <http://www.usb.edu.co/>

Bogotá - <http://www.usbbog.edu.co>

Medellín - <http://www.usbmed.edu.co>

Cali - <http://www.usbcali.edu.co>

Cartagena - <http://www.usbctg.edu.co>

Editorial Bonaventuriana - <http://www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co/>

Revistas - <http://revistas.usb.edu.co/>

## **Dedicatoria**

Dedicado a nuestras familias, pilares de nuestra formación humana y apoyo incondicional durante este proceso de profesionalización; a nuestros amigos, compañeros y futuros colegas, quienes nos han ayudado a superar cada obstáculo que pudo presentarse a lo largo de este arduo proceso de aprendizaje, no sólo desde un ámbito académico sino también moral.

## **Agradecimientos**

A nuestros asesores Anderson Ladino Velásquez y Cristian Hernández, quienes estuvieron siempre atentos ante cualquier duda que pudiese surgir durante el desarrollo de este proyecto, aportando significativamente a nuestro proceso de investigación desde sus conocimientos y experiencias para la evaluación de nuestro proyecto de grado para aspirar al título como ingenieros de sonido.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	12
ABSTRACT .....	13
I. INTRODUCCIÓN .....	14
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
A. Antecedentes .....	16
III. JUSTIFICACIÓN .....	24
IV. OBJETIVOS .....	25
A. Objetivo general .....	25
B. Objetivos específicos .....	25
V. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	26
A. Alcances .....	26
B. Limitaciones .....	26
VI. HIPÓTESIS .....	28
VII. MARCO TEÓRICO .....	29
A. Parámetros conmensurables del sonido .....	29
1) Nivel de presión sonora .....	29
B. El ruido y la exposición sonora .....	30
1) El ruido .....	30
a) Ruido ambiental .....	31
b) Ruido de fondo .....	33
c) Ruido específico .....	33
d) Ruido residual .....	34
2) Exposición sonora .....	34
3) Mapa de ruido .....	34

C. Mediciones acústicas: síntesis de datos y herramientas .....	34
1) Síntesis de datos.....	35
a) Suma energética .....	35
b) Desviación estándar .....	35
c) Función de transferencia .....	35
d) Respuesta transitoria y errores de estado estacionario.....	36
2) Herramientas.....	36
a) Sonómetro .....	36
D. Sistemas limitadores para establecimientos comerciales .....	37
1) Sistema.....	38
2) Limitador .....	38
a) Limitadores para insonorización .....	39
b) Reflectores de sonido .....	39
c) Cancelación de ruido por interferencia .....	39
E. Diseño de un sistema limitador acústico de control automático.....	40
1) Control automático .....	41
2) Control PID.....	42
3) Control integral.....	42
4) Control automático de ganancia .....	43
F. Diseño electrónico del dispositivo .....	45
1) Microcontrolador .....	45
2) Arduino .....	46
a) Estructura del Arduino IDE .....	46
b) Funciones .....	48
c) Variables .....	51

d) Tipos de datos y operaciones .....	51
VIII. METODOLOGÍA .....	53
A. Material y equipamiento.....	54
IX. RESULTADOS.....	55
A. Diagnóstico del sector con mayor problemática .....	55
1) Análisis de los datos de mapas de ruido de Medellín en su última versión .....	55
2) Definición del establecimiento comercial para la implementación del dispositivo .....	58
3) Planos del recinto con la distribución del sonido .....	61
4) Diagrama de flujo de la cadena electroacústica.....	62
5) Valoración de niveles de presión sonora en el bar .....	62
a) Croquis de las mediciones.....	63
B. Diseño del sistema de control automático utilizando Arduino.....	66
1) Parametrización del voltaje en un amplificador de potencia.....	67
2) Obtención de los parámetros de control .....	69
3) Diseño del sistema de control integral.....	74
4) Prueba de funcionamiento del control integral con la plataforma Arduino .....	79
C. Implementación del dispositivo en el establecimiento comercial .....	82
1) Construcción del prototipo de control automático .....	83
2) Ajuste de sensibilidad de acuerdo a las características de atenuación deseadas .....	85
3) Diagrama de flujo de la cadena electroacústica con el prototipo limitador.....	86
4) Instalación del prototipo .....	86
D. Validación de los niveles de presión sonora después de la implementación del dispositivo	87
1) Medición en fachada según la Resolución 0627 con el dispositivo en funcionamiento ....	88
2) Comparación de los niveles permitidos por la Resolución y los niveles de la medición ...	91
3) Diagnostico del funcionamiento del prototipo .....	93

X. DISCUSIÓN.....	96
XI. CONCLUSIONES .....	97
XII. RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS .....	101
ANEXOS.....	105

## LISTA DE TABLAS

TABLA I. FACTORES DE CASA QUE CASUAN MOLESTIA EN EL VECINDARIO.....	19
TABLA II. AFECTACIÓN DEL RUIDO DE DIVERSAS FUENTES.....	20
TABLA III. AFECTACIÓN DEL RUIDO EN VARIOS MOMENTOS.....	21
TABLA IV. ESTÁNDARES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN DE RUIDO EN COLOMBIA.....	32
TABLA V. NIVELES SONOROS MÁXIMOS PERMISIBLES EN COLOMBIA.....	33
TABLA VI. OPERACIONES ASIGNADAS EN ARDUINO.....	52
TABLA VII. REGISTROS DE LAS MEDICIONES ACÚSTICAS REALIZADAS EN LA ZONA DE EVALUACIÓN COMPLEMENTARIA POR EL ÁREA METROPOLITANA .....	56
TABLA VIII. FICHA DE INFORMACIÓN DE LAS MEDICIONES.....	64
TABLA IX. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE POTENCIA DEL AMPLIFICADOR CROWN 5000.....	67
TABLA X. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DEL SENSOR DE SONIDO ANÁLOGO DFR0034 .....	71
TABLA XI. FICHA DE INFORMACIÓN DE LA MEDICIÓN ACÚSTICA USANDO EL DISPOSITIVO .....	89

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Mapa de ruido de la zona Sur – Occidental de la ciudad en la jornada nocturna realizado por el Área Metropolitana.....	18
Fig. 2. Sensor de sonido análogo DFR0034.....	22
Fig. 3. Limitadores de sonido comerciales.....	22
Fig. 4. Controlador de volumen electrónico PT2256.....	23
Fig. 5. Amplificador de audio PAM8403 clase D de 3W. ....	23
Fig. 6. Diagrama de flujo de señal del sonómetro.....	37
Fig. 7. Diagrama de instalación de un limitador de sonido.....	39
Fig. 8. Diagrama de bloques de un sistema de control industrial.....	41
Fig. 9. Diagrama de bloques de un sistema de control PID de un objeto. ....	42
Fig. 10. Diagrama de bloques de un sistema con control integral. ....	43
Fig. 11. Compresión del rango dinámico vs. Control automático de ganancia.....	43
Fig. 12. Control automático de ganancia de alimentación directa. ....	44
Fig. 13. Control automático de ganancia de realimentación. ....	44
Fig. 14. Apariencia de una placa de Arduino. ....	46
Fig. 15. Entorno de desarrollo integrado de Arduino.....	47
Fig. 16. Función <i>setup</i> . ....	47
Fig. 17. Función <i>loop</i> . ....	48
Fig. 18. Funciones de usuario.....	48
Fig. 19. Función <i>delayVal</i> ()......	49
Fig. 20. Variables globales en Arduino.....	51
Fig. 21. Manejo de datos en Arduino. ....	51
Fig. 22. Mapa conceptual de la metodología desarrollada. ....	53
Fig. 23. Diagrama de barras de los registros de las mediciones acústicas. ....	57
Fig. 24. Diagrama de barras para la representación del promedio y la desviación estándar de las mediciones complementarias. ....	58
Fig. 25. Ubicación geográfica del establecimiento comercial en la zona de estudio de la Av. 33.....	59
Fig. 26. Fuentes sonoras del establecimiento comercial para aplicación del dispositivo. ....	60
Fig. 27. Emisión del ruido del tráfico vehicular.....	60

Fig. 28. Vista de planta con las dimensiones del establecimiento comercial.....	61
Fig. 29. Diagrama del flujo de la cadena electroacústica del bar.....	62
Fig. 30. Croquis de los puntos de medición realizados en el bar. ....	63
Fig. 31. Diagrama de bloques de la conexión de los elementos para la realización del experimento de potencia.....	68
Fig. 32. Respuesta de la función de transferencia del amplificador de audio .....	69
Fig. 33. Diagrama de flujo de conexión para el ajuste de sensibilidad del sensor DFR0034. ....	70
Fig. 34. Diagrama de bloques de la disposición de los elementos usados para la caracterización del sensor.....	71
Fig. 35. Resultados obtenidos en la caracterización del sensor para la correlación entre las variables de niveles de presión sonora, resolución en bits y el voltaje.....	72
Fig. 36. Uso de la herramienta ident en Matlab para obtener la función de transferencia. ....	73
Fig. 37. Respuesta de la función de transferencia del sensor.....	74
Fig. 38. Representación del sistema completo en Simulink.....	75
Fig. 39. Comportamiento no útil del sistema con el actuador por control PID.....	76
Fig. 40. Sintonización del control integral con la herramienta Tune. ....	77
Fig. 41. Función de transferencia total del dispositivo de control. ....	77
Fig. 42. Respuesta transitoria de la función de transferencia total.....	78
Fig. 43. Cálculos en Matlab para hallar la función de transferencia total.....	78
Fig. 44. Montaje experimental del sistema de control Integral. ....	79
Fig. 45. Flujo en pseudocódigo del control programado en la plataforma de Arduino. ....	80
Fig. 46. Respuesta de funcionamiento del sistema con una señal de música.....	81
Fig. 47. Respuesta de funcionamiento del sistema con una señal de ruido rosa. ....	82
Fig. 48. Diagrama de los componentes del prototipo.....	83
Fig. 49. Pistas del flujo de señal en la tarjeta PCB.....	84
Fig. 50. Impresión en la placa virgen de fibra de vidrio. ....	84
Fig. 51. Modelo del prototipo.....	85
Fig. 52. Potenciómetro para ajustar la sensibilidad del limitador. ....	86
Fig. 53. Diagrama del flujo de la cadena electroacústica del bar con la inclusión del dispositivo limitador. ....	86

Fig. 54. Registro fotográfico de la implementación del dispositivo en el establecimiento comercial.  
.....87

Fig. 55. Medición final como verificación del funcionamiento del limitador. ....88

Fig. 56. Gráfico de los resultados de las mediciones en el establecimiento comercial con el control  
apagado.....91

Fig. 57. Gráfico de los resultados de las mediciones en el establecimiento comercial con el control  
encendido. ....92

Fig. 58. Análisis del funcionamiento del controlador en el tiempo. ....93

Fig. 59 Comportamiento del NPS vs la frecuencia de las mediciones.....94

Fig. 60 Dispersión de los valores de la medición con respecto al valor de referencia.....94

## RESUMEN

Teniendo en cuenta la problemática debida al ruido que se presenta en inmediaciones y áreas colindantes de la avenida 33 en Medellín-Colombia, y con el fin de mitigar las afecciones que ésta puede acarrear, se decide hacer frente a un proyecto mediante el cual se pueda realizar un control automatizado para los niveles de presión sonora emitidos por uno de los locales comerciales involucrados en dicha problemática, este establecimiento comercial, de nombre “Aky Nos Vemos”, está ubicado en la avenida 33.

Para tratar el conflicto generado debido a los altos niveles de presión sonora emitidos por el establecimiento, previamente evidenciados por medio de mediciones acústicas, se decide proyectar una solución mediante un prototipo para la automatización de niveles de presión sonora, de tal manera que cuando los niveles máximos permisibles, dictados en la resolución 0627 de 2006, sean superados, dicho prototipo realice un control automático y mantenga los niveles dentro de los permitidos para la zona más restrictiva.

El prototipo limitador para control automático de los niveles de presión sonora se implementó mediante una plataforma de desarrollo Arduino, la cual fue programada para que controle los niveles de presión sonora y mantenerlos dentro de los límites permisibles; sin embargo, al momento de la implementación del prototipo en el establecimiento comercial, se presentaron irregularidades en su funcionamiento, debidas principalmente a los altos niveles de potencia a los cuales fue sometido el prototipo.

**Palabras clave:** Limitador, Control automático de ganancia, Nivel de presión sonora, Ruido, Micro controlador.

## ABSTRACT

Taking into account the problem due to the noise that occurs in the immediate vicinity and adjacent areas of the 33rd avenue in Medellin-Colombia, and in order to mitigate the conditions that this may cause, it is decided to face a project to control automatically the high sound pressure levels that are emitted by a commercial establishment, this commercial establishment, named “Aky Nos Vemos”, is located on 33.

In order to deal with the conflict generated due to the high levels of sound pressure emitted by the establishment, previously evidenced by means of acoustic measurements, it is decided to project a solution by means of a prototype for the automation of sound pressure levels, so that when the maximum levels permissible, dictated in resolution 0627 of 2006, are exceeded, said prototype performs an automatic control and maintains the levels within those allowed for the most restrictive zone.

The limiter prototype for automatic control of sound pressure levels was implemented through an Arduino development platform, which was programmed to control sound pressure levels and keep them within the permissible limits; However, at the time of the implementation of the prototype in the commercial establishment, there were irregularities in its operation, mainly due to the high levels of power to which the prototype was subjected.

**Keywords:** Limiter, Automatic gain control, Sound pressure levels, Noise, Micro controller.

## I. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de ruido, se hace alusión a todo sonido no deseado que puede ser percibido y que lleva consigo una problemática social y de salubridad; la problemática de la contaminación auditiva debida al ruido, está en auge y resulta cada vez más común escuchar acerca de ella; sus causas posibles son muchas, tales como la industrialización y el desarrollo tecnológico. Es importante resaltar que la contaminación auditiva ha sido declarada por la organización mundial de la salud (OMS) como un factor de impacto, debido al sinnúmero de afecciones que dicha problemática puede causar sobre los seres humanos.

Debido a este impacto, el ruido se ha convertido en una problemática que compete tanto a los sectores ambientales, sociales, psicológicos y de salubridad; es por esto que cada vez resulta más común, que las entidades encargadas busquen soluciones para mitigar las afecciones que trae consigo.

Teniendo en cuenta el hecho de que los establecimientos comerciales de ocio y recreación aportan significativamente a la contaminación auditiva, se ha planteado como una de las soluciones para mitigación, implementar dispositivos que ejerzan control sobre los niveles de presión sonora que son emitidos por dichos establecimientos comerciales. Este dispositivo de control basa su funcionamiento en la utilización de un limitador acústico automatizado, de tal manera que por medio de un sensor y un circuito integrado se logra establecer el cumplimiento de los valores máximos permitidos en la resolución, en caso de que se estén sobrepasando dichos niveles.

Para el caso específico de Colombia, se estipularon niveles máximos permisibles para diferentes zonas (residenciales, de ocio, de calma, etc.), esto, mediante la resolución 0627 del año 2006, por lo cual, el dispositivo de control implementado en el establecimiento comercial debe acogerse a esta normativa nacional.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación auditiva es una problemática en auge que cada vez compete más a los sectores socio-ambientales y de salud. Los agentes y cambios del ambiente acústico en las ciudades, las malas aplicaciones de la tecnología y el creciente índice de contaminación sonora, son causa de las principales afectaciones que recibe el ser humano. De acuerdo con la *OMS*, existen cerca 300 millones de personas afectadas por este tipo de contaminación, mientras que la Unión Europea estima unos cerca de 100 millones de personas afectadas por el ruido [1].

Las cifras hablan por sí solas y pueden vislumbrar el trasfondo que lleva consigo la contaminación auditiva, es por esto que diferentes organizaciones han mostrado su preocupación, principalmente por las afecciones auditivas que puede traer esta problemática sobre los seres humanos. El problema en los países en vía de desarrollo parece ser peor, ya que en muchos de estos no se cuenta con una normativa y un control eficaz.

Es claro que la contaminación auditiva puede provocar diversos tipos de afectaciones a la salud, pero no se limita sólo a eso, ya que además puede producir algunos líos jurídicos y por ende económicos para los establecimientos en los cuales se compruebe el no acato a los niveles máximos permisibles por la normatividad nacional, todo esto, debido a la gran cantidad de derechos de petición que establecen algunas personas quienes consideran estar siendo afectados por uno o varios establecimientos [2].

En problemas más directos sobre el órgano auditivo existen diferentes afecciones generadas por los altos niveles de ruido, tales como trastornos del sueño y del descanso, trastornos de la salud mental, déficit de rendimiento laboral, interferencia de la comunicación oral y de las actividades necesarias de las personas. Dichas afecciones se generan principalmente en un rango de frecuencias entre los 3000 y 6000 Hz, siendo 4000 Hz la banda más crítica [3]. Los problemas auditivos a causa del ruido ocupacional son en su mayoría problemas irreversibles, dependiendo del grado de exposición al cual está sometida una persona, al número de años expuestos al ruido y a la sensibilidad auditiva, es por esto que los empleados de los establecimientos comerciales que emiten altos niveles de presión sonora son más vulnerables y por ende más propensos a padecer afecciones

auditivas agudas; los niveles de presión sonora permitidos en Colombia para los trabajadores están expuestos en la Resolución 1792 de 1990, la cual establece los valores de presión sonora en decibeles ponderados “A” permitidos, de acuerdo a la cantidad de horas a las que este expuesto un trabajador; y para los niveles de ruido urbano, se presentan los niveles permitidos en la Resolución 0627 de 2006 de Ministerio de Ambiente de la República de Colombia.

La comunicación, los procesos de aprendizaje, el sueño y el reposo son algunos de los factores más relevantes que se ven afectados por la contaminación auditiva; se dice que a partir de los 35 dB(A) de ruido de fondo se empiezan a presentar dificultades para la comunicación, mientras que para el sueño y el reposo estos valores deben estar entre los 30 y los 45 dB(A) [3].

### ***A. Antecedentes***

Las emisiones acústicas en la ciudad de Medellín van en crecimiento, así lo demuestra un estudio realizado por la Subsecretaría de Gobierno local, el cual constató que, de 104 mediciones de ruido realizadas en la ciudad, 77 de ellas estaban por encima de los límites permitidos; lo que indica que de un 100% de las emisiones acústicas generadas en Medellín, un 74% están excediendo la norma. En lo que va del año 2018 se reportó que de cada tres mediciones en establecimientos comerciales que generan emisiones sonoras, dos están sobrepasando los límites permitidos por la norma 0627 de 2006 [4].

El sector que presentó mayor problemática de ruido fue el Poblado durante las mediciones realizadas en el 2017, con un promedio de 78.6 dB durante el día y 73.9 durante la noche, estableciendo un sobrepaso de los límites puestos por la norma de 13.6 dB para el periodo diurno y de 18.9 para el periodo nocturno; lo que indica la problemática que se vive en la noche producto de múltiples fuentes sonoras nocturnas, en especial de fuentes como bares y discotecas que ocupan un segundo lugar como generadores de ruido en la ciudad, debido a que este es su horario habitual de funcionamiento. El laboratorio GIGA (Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental), entidad que mide el ruido de los establecimientos comerciales en Medellín, manifiesta que los viernes y sábados son los días donde más se reportan quejas y a pesar de la Resolución 0627 de 2006 es lo suficientemente restrictiva, los establecimientos comerciales son quienes más

la incumplen, sin hablar de la Resolución 1792 de 1990, la cual también están incumpliendo al exponer sus empleados a niveles de presión sonora mayores a los permitidos [4].

De acuerdo con estudios realizados en 2014 por la Universidad de San Buenaventura para la Alcaldía de Medellín, se encontraron indicadores que demuestran que existe una relación entre el ruido y la calidad del sueño de las personas de la ciudad. De acuerdo con los registros de mediciones realizadas dentro de las viviendas, se encontró que se incumplía la norma en un 5% para el horario diurno y un 91% para el horario nocturno. Los sectores medidos fueron: El Poblado (Parque Lleras), Belén (La 33), Castilla (Carrera 68), Aranjuez y Laureles.

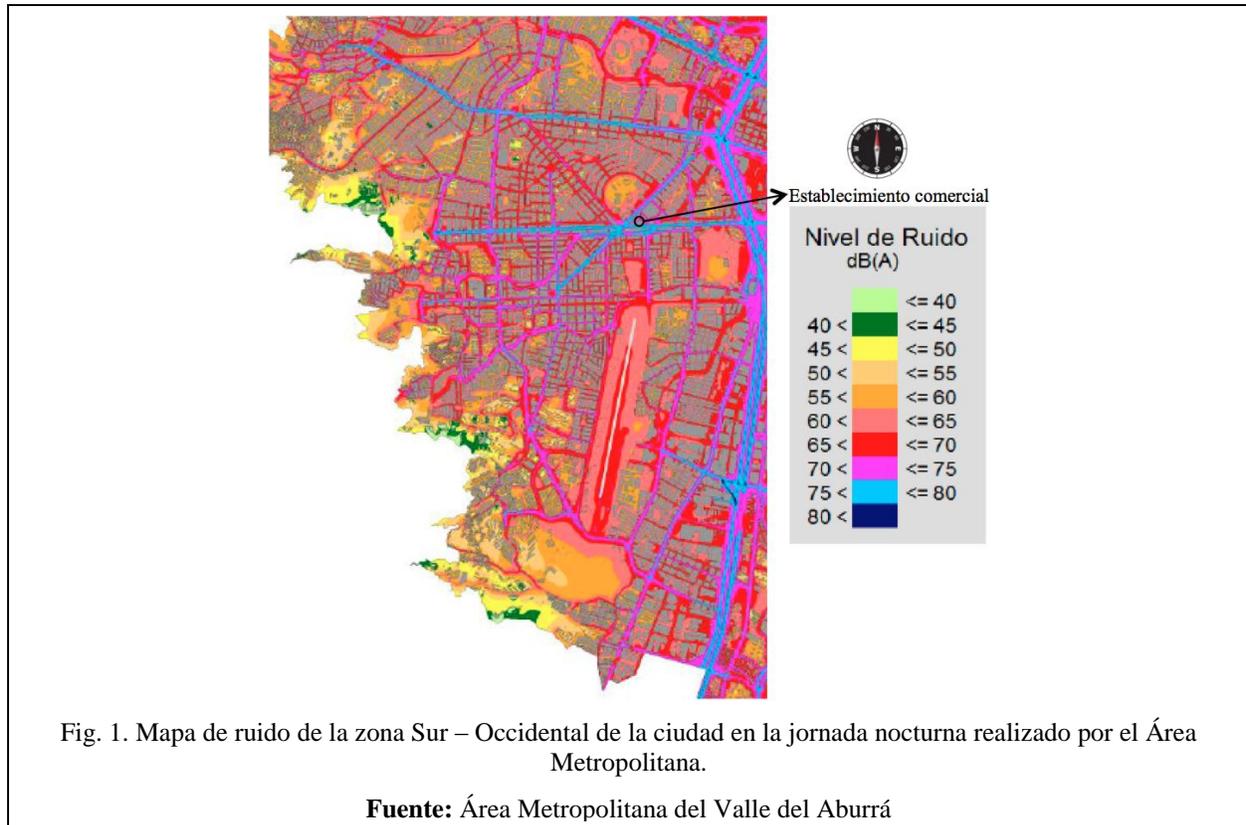
El creciente exceso de ruido en las ciudades y países en vía de desarrollo ha sido un tema de gran importancia para las autoridades ambientales. Esta problemática surge principalmente de las actividades humanas realizadas en establecimientos que prestan sus servicios al público y tienen como objetivo entretener por medio de la reproducción de música, de la amplificación de instrumentos musicales o de algún otro dispositivo musical electrónico.

Los mapas de ruido (Fig. 1) fueron obtenidos por medio de métodos de modelación acústica, aplicando algoritmos de propagación del sonido y atendiendo a los criterios de cálculo según las características del terreno, los edificios u otros obstáculos que afecten la propagación del ruido entre fuentes o receptores posicionados en el área de estudio. Además, la emisión puede obtenerse para cada tipo de foco teniendo en cuenta los parámetros que definen las características del ruido asociadas a su emisión sonora tal como la velocidad, el tránsito, potencia sonora, etc [5].

Los mapas de ruido obtenidos con este tipo de metodología aportan mayor información del ruido ambiental asociada a cada tipo de foco que lo genera, a diferencia de los mapas obtenidos por mediciones. De esta manera el modelo de propagación organiza el cálculo para la evaluación del ruido ambiental teniendo en cuenta una grilla de puntos que se generan sobre el terreno a una altura de cuatro metros, los focos individuales de ruido, la población y/o habitantes afectados por cada edificación.

Establecidas las emisiones de los focos individuales y una vez introducidos adecuadamente en el modelo acústico, todas las variables que representan los elementos requeridos para el cálculo del

comportamiento acústico en la propagación como lo son, las características acústicas del terreno, edificios u otros obstáculos que afecten la propagación, efectos de reflexión y efectos de difracción; se aplican los algoritmos de propagación a partir de la modelación tridimensional en el área de estudio. La calidad de la información suministrada para realizar la modelación por cálculos interfiere directamente con la incertidumbre de los pronósticos de emisión de ruido ambiental.



Un estudio realizado en Nigeria demuestra que, en ciudades con mayores índices de población, sus habitantes presentan más irritación por causa del ruido a raíz de las actividades humanas realizadas allí, las ocho ciudades donde las personas fueron encuestadas, un 27% de esta población está altamente molesta y un 65% estaba siendo perturbada por el ruido de forma moderada o alta, como se muestra en la Tabla I [6].

TABLA I. FACTORES DE CASA QUE CASUAN MOLESTIA EN EL VECINDARIO

CIUDAD	Porcentaje de entrevistados (%)		
	NM	MM	AM
Benín City	34 (30%)	40 (36%)	38 (34%)
Onitsha	28 (24%)	47 (41%)	28 (35%)
Port Hancourt	38 (37%)	43 (42%)	22 (21%)
Ilorin	73 (36%)	70 (35%)	58 (29%)
Lagos	29 (23%)	48 (39%)	47 (38%)
Ibadan	33 (30%)	57 (51%)	21 (19%)
Kano	61 (46%)	49 (37%)	22 (17%)
Kaduna	63 (50%)	34 (27%)	29 (23%)
Promedio	202 (35%)	219 ( <b>38%</b> )	156 ( <b>27%</b> )
		$P_{MM} + P_{AM} = 65\%$	

*Nota:* Fuente, Community attitudinal noise survey and analysis  
of eight Nigerian cities.

Dónde:

NM: No molesto.      MM: Moderadamente molesto.      AM: Altamente molesto.

Un hallazgo importante encontrado en la misma encuesta, revela que las mayores afectaciones sobre las personas a causa del ruido urbano se deben a las propagaciones acústicas de los radios y altavoces que funcionan en dichas ciudades encuestadas, como se muestra en la Tabla II. Con un valor de 39 personas en promedio se sienten afectadas por el ruido generado por radios y altavoces, y en todas las ciudades encuestadas se presenta un valor mayor de personas que se quejan por esta problemática, por lo tanto, este es un valor crítico que representa la molestia de las personas frente al tema del ruido en las ciudades producto de las emisiones de presión sonora de radios y altavoces [6].

TABLA II. AFECTACIÓN DEL RUIDO DE DIVERSAS FUENTES

CIUDAD	Porcentaje de encuestados molestos por el ruido (%)									
	T	TR	PI	EC	H/P	R/A	B/E	NJ	CNV	ANM
Benín City	00	20	11	05	11	38	11	14	23	00
Onitsha	00	25	10	03	02	46	03	10	25	00
Port Hancourt	12	27	04	12	03	54	04	12	25	04
Ilorin	12	27	04	12	03	54	04	12	25	04
Lagos	05	17	08	03	04	55	08	03	34	00
Ibadan	05	25	12	09	25	44	05	21	28	00
Kano	16	11	05	02	07	25	08	19	06	01
Kaduna	06	16	04	10	09	33	04	31	26	01
Promedio	08	19	07	06	11	39	05	05	19	01

*Nota:* Fuente, Community attitudinal noise survey and analysis of eight Nigerian cities.

Dónde:

T: Trenes; TR: Tráfico rodado; PI: Plantas industriales; EC: Equipo de construcción; H/P: Máquina de molienda de harina y pimienta; R/A: Radios y altavoces; B/E: Bailes callejeros y eventos; NJ: Niños jugando; CNV: Conversaciones; ANM: Animales.

Además, esta encuesta demostró que los periodos del día y de la semana tienen un patrón repetitivo de molestia en las personas producto del ruido urbano. Dicho patrón puede analizarse en la Tabla III, en la cual se observa que los períodos con mayor problema son los períodos nocturnos, los de fin de semana y las estaciones secas del año como lo muestra los valores resaltados en rojo en el inferior de la misma [6].

TABLA III. AFECTACIÓN DEL RUIDO EN VARIOS MOMENTOS

CIUDAD	Porcentaje de encuestados molestos por el ruido (%)						
	ES	TL	DL	FS	M	T	N
Benin City	57	45	50	38	25	40	52
Onitsha	65	29	30	48	13	40	41
Port Hancourt	73	58	40	62	52	37	58
Ilorin	45	16	22	44	08	36	44
Lagos	79	39	35	74	26	31	52
Ibadan	77	30	51	68	18	65	68
Kano	64	37	63	40	18	36	37
Kaduna	68	19	50	69	08	25	60
Promedio	<b>64</b>	31	41	<b>54</b>	17	38	<b>50</b>

*Nota:* Fuente, Community attitudinal noise survey and analysis of eight Nigerian cities.

Dónde:

ES: Estación seca; TL: Temporada de lluvias; DL: Días laborales; FS: Fines de semana; M: Mañana; T: Tarde; N: Noche.

Al evidenciarse que la molestia proviene principalmente debido a los sistemas de altavoces en establecimientos, se debe pensar en cómo brindar una solución que le de tranquilidad a la comunidad afectada, pero que a su vez no afecte el normal funcionamiento del establecimiento comercial; es allí cuando resulta de gran utilidad la implementación de sistemas automatizados para control de los niveles de presión sonora.

Cuando se habla de la implementación de un sistema de control automático, se necesita comprender, principalmente, cuáles son las variables que se desean controlar; para este caso en particular son variables eléctricas, tales como el voltaje y la corriente, por ello, es necesario un proceso el cual convierta variables de otra índole, como en este caso lo es la intensidad de sonido,

en variables mensurables por el sistema de control (eléctricas); para esto, se implementan los llamados sensores de sonido [7], los cuales constan de un micrófono de condensador que debe ser



Fig. 2. Sensor de sonido análogo DFR0034.

**Fuente:** <https://goo.gl/Nfy26p>.

alimentado con 5V y de un amplificador operacional para las señales de salida del micrófono (Fig. 2), en el mercado pueden encontrarse una gran variedad de sensores de sonido, como por ejemplo el DFR0034.

Los limitadores de sonido, como la referencia EQ Limit de la marca MRC AUDIO que se visualiza en la parte superior de la Fig. 3, se implementan sobre la cadena electroacústica para controlar los niveles que producen los sistemas de sonido y ajustar la curva de aislamiento del establecimiento comercial en los límites permisibles por las normativas de emisión de ruido; por su parte, en la parte inferior de la figura, se puede observar el limitador de sonido de la marca dB electronics con referencia CAP21 ADVANCED, el cual admite la conexión de dos sensores en los que se pueden registrar los niveles de presión sonora en el interior de dos diferentes recintos [8].



Fig. 3. Limitadores de sonido comerciales.

**Fuente:** <https://goo.gl/Fct1C3> y <https://goo.gl/gbCtiW>.

Los controladores de volumen de equipos de sonido están diseñados con un amplio rango de respuesta en frecuencia y una distorsión armónica total muy baja para garantizar así un rendimiento

altamente efectivo y confiable. En la Fig. 4 se puede visualizar el controlador de 16 pines PT2256 que cuenta con dos canales incorporados, ideal para sonido mono y estéreo [9].

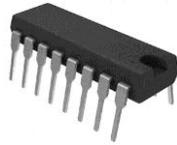


Fig. 4. Controlador de volumen electrónico PT2256.

**Fuente:** <https://goo.gl/uNcgbp>.

El amplificador de audio PAM8403 clase D de 3 Watts (Fig. 5) funciona como un interruptor electrónico para aumentar o disminuir la potencia de corriente eléctrica de la señal inducida y lograr una reproducción de sonido de alta calidad. Este finalmente será implementado la mayor parte del tiempo para disminuirla y mantener una estructura de ganancia adecuada dentro de los circuitos electrónicos para cumplir con las reglamentaciones de la normativa colombiana [10].



Fig. 5. Amplificador de audio PAM8403 clase D de 3W.

**Fuente:** <https://goo.gl/9QEzvZ>.

### III. JUSTIFICACIÓN

Partiendo de la problemática expuesta en secciones anteriores y del sinnúmero de afecciones que trae consigo para los seres humanos, resulta necesario intervenir algunos establecimientos, con el fin de ejercer control sobre los niveles de presión sonora que son emitidos hacia el medio ambiente, esto con el fin, además, de que los encargados de estos establecimientos comprendan y tomen conciencia acerca del trasfondo que trae consigo la contaminación auditiva y las consecuencias que puede tener tanto sobre sus empleados como sobre la comunidad [11].

Es necesario instruir a los encargados de los establecimientos comerciales que existe una solución que no afectará el normal funcionamiento y permitirá el transcurso cotidiano de la vida de las personas que residen cerca a estos negocios de ocio.

Dado a que la población de la ciudad de Medellín se está viendo afectada por las emisiones de altos niveles de presión sonora, las cuales provocan efectos adversos sobre la salud y la convivencia, la implementación de un dispositivo limitador de sonido capaz de mantener un nivel de presión sonora constante, y que a su vez se acoja a los niveles máximos permitidos por la normatividad nacional, tendrá un impacto positivo a nivel social, ambiental y de salud, esto, gracias a la reducción de la contaminación auditiva en la ciudad de Medellín.

El desarrollo de este proyecto beneficiará a corto plazo a los trabajadores, clientes y propietarios de los establecimientos comerciales de bares y discotecas, protegiendo la audición de los usuarios y de las personas que residen en las viviendas aledañas a dichos establecimientos y que se encuentran expuestas durante prolongados periodos de tiempo a altos niveles de presión sonora, además, significará un beneficio para propietarios de establecimientos, puesto que no se le impondrá multas por incumplir las directrices del Código Nacional de Policía y Convivencia; se beneficiarán además a las entidades encargadas del control de emisiones acústicas urbanas de la ciudad, debido a que la cantidad de quejas y reclamos por motivo del ruido se verán disminuidos [12].

## IV. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Desarrollar un dispositivo para el control automático del nivel de presión sonora emitido por un establecimiento comercial, de acuerdo a la Resolución 0627 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial de la República de Colombia.

### *B. Objetivos específicos*

- Determinar un establecimiento comercial con altos niveles de contaminación acústica en la ciudad de Medellín, evaluando los niveles de emisión de ruido por medio de mediciones in situ y análisis de datos de los mapas de ruido realizados por el Área Metropolitana en su última versión.
- Diseñar y construir el limitador de control del nivel de presión sonora utilizando la plataforma de desarrollo Arduino.
- Instalar el limitador en el establecimiento comercial como prueba piloto, considerando el flujo de señal del sistema electroacústico.
- Evaluar el rendimiento y la calidad del limitador por medio de un sonómetro clase 1, calculando la incertidumbre asociada al dispositivo.

## V. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### A. Alcances

- Este proyecto estará dirigido a un sólo sector de la ciudad de Medellín, el cual se determinará una vez se hayan realizado las pertinentes investigaciones en los mapas de ruido que tiene la ciudad, desarrollados por entidades ambientales para diagnosticar el sector con más problemática por emisiones acústicas.
- El dispositivo electrónico estaría diseñado con las características propias de la regulación colombiana para mitigar la molestia que incide en los sectores residenciales y de descanso de la ciudad de Medellín, debido a la contaminación acústica generada por medios electroacústicos en los establecimientos comerciales.
- La variable principal de nuestro estudio es la presión sonora o presión acústica emitida por estos dispositivos identificados con mayor problemática en la ciudad de Medellín. Esta variable es de tipo cuantitativa ya que se puede estimar numéricamente cómo se comportan estos establecimientos como focos de ruido puntual.
- Por medio de un sensor exterior se logra un alcance de tipo correlacional donde se obtiene el valor de una variable o el valor de una constante de ganancia ( $k$ ). De esta manera se podrá explicar parcialmente el fenómeno acústico que se presenta en el área intervenida. Así mismo, esta información determina el rango de amplitud focalizado en variables eléctricas y acústicas para llevar a cabo la siguiente etapa del proceso control.

### B. Limitaciones

- Para lograr eficientes resultados, el prototipo deberá tener alta calidad en diseño y una correcta implementación; pues, de no cumplir estas exigencias, no habrá una adecuada aceptación de los usuarios y empleados de los establecimientos.

- Entender totalmente el fenómeno acústico y comprender las condiciones en que se propaga, debe hacerse con suficiente sentido analítico y crítico para relacionar y describir correctamente el comportamiento de las variables eléctricas del sistema de amplificación del establecimiento comercial y el comportamiento de las variables acústicas del ambiente donde se quieren controlar determinadas ondas.
- Aún calibrado previamente los equipos de medición con las condiciones estipuladas por el estándar internacional, la obtención de las variables independientes a la hora de la recolección de los datos, las condiciones climáticas como la humedad y la temperatura, así como un posible corte eléctrico que interrumpa el funcionamiento de las fuentes fijas, alterarían los resultados finales de una medición ejecutada [12].

## **VI. HIPÓTESIS**

Será posible desarrollar, diseñar, construir e implementar un dispositivo limitador para el control automático del nivel de presión sonora en tiempo real y a bajo costo, basados en el conocimiento de su principio básico de funcionamiento y de las características particulares con las que debe contar; para esto, resulta necesario diagnosticar los diferentes sectores de la ciudad de Medellín con mayor problemática de ruido ambiental producto de los dispositivos electro-acústicos que se encuentran en los establecimientos comerciales, de tal manera que estos puedan ser regulados en concordancia con la Resolución 0627 de 2006 de la República de Colombia y de manera óptima tanto para administradores y usuarios de los establecimientos de la ciudad.

## VII. MARCO TEÓRICO

Con el fin de instruir al investigador acerca del lenguaje técnico utilizado a lo largo de la realización del presente proyecto, se presenta esta sección de marco teórico, en la cual se encuentran todas las bases teóricas necesarias para comprender correctamente los procedimientos llevados a cabo durante la investigación y el desarrollo del prototipo. Primero se expondrán algunas definiciones básicas necesarias para comprender el fenómeno acústico y las herramientas necesarias para caracterizar entornos acústicos por medio de mediciones; posteriormente se muestra con detalle la teoría necesaria para comprender el diseño del dispositivo electroacústico que se quiere implementar.

### *A. Parámetros conmensurables del sonido*

Los parámetros acústicos hacen alusión a aquellas características propias del fenómeno acústico que se pueden medir y que resultan de gran utilidad al momento de caracterizar una escena acústica.

#### *1) Nivel de presión sonora*

“La presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro. La unidad de medida es el Newton/metro<sup>2</sup>  $\left(\frac{N}{m^2}\right)$  o Pascal (Pa)” [13]. Para representar la presión sonora a la que responde el oído humano, se utiliza una escala logarítmica debido a que la respuesta del oído no es lineal por las transducciones en el sistema auditivo y por los procesos de la señal en el cerebro.

Esta escala representa todo el rango audible que tiene el oído humano, desde el umbral de audición que es de  $20 \times 10^{-6}$  Pa, utilizado como presión de referencia ( $P_o$ ), hasta el nivel más alto capaz de causar dolor que es de 20 Pa. Se convierten los valores de presión sonora en decibeles (dB) los cuales reducen el rango dinámico en una escala mucho más corta y de mejor interpretación.

$$NPS(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P^2}{P_0^2} \right) \quad (1)$$

Dónde:

P = Presión sonora eficaz (Pa).

$P_0$  = Presión sonora de referencia (Pa).

### ***B. El ruido y la exposición sonora***

Con el fin de incurrir en una buena práctica, es necesario tener en cuenta durante la realización del presente proyecto, algunas definiciones enfocadas a la problemática que se desea tratar, la cual para este caso es el ruido y las afecciones que el mismo puede traer sobre los seres humanos.

#### ***1) El ruido***

Se define el ruido como todo sonido molesto o no deseado en el que su duración, intensidad y calidad afectan el bienestar de las personas provocando efectos nocivos sobre la salud. Puede ser continuo, intermitente o impulsivo producto de las actividades normales de la sociedad, medido por medio del sonómetro el cual mide el ruido entre [30 – 130] dB entre las frecuencias [20 – 20000] Hz, siendo este un valor cuantificable y verificable.

Así pues, para el cumplimiento de la atenuación de los niveles de ruido producido a niveles menos perjudiciales para las personas, en primera instancia, en Colombia, aunque la problemática es muy amplia, se han realizado estudios en tres frentes a saber: acústica arquitectónica, ocupacional y ambiental. A continuación, se describen brevemente los requerimientos de control de ruido ambiental y ocupacional, establecidos en Colombia, luego de la realización de una investigación, por parte del Ministerio de Medio Ambiente [14].

***a) Ruido ambiental***

De acuerdo con la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de Junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental (artículo 3a) [15], el ruido ambiental es el sonido exterior no deseado o nocivo generado por las actividades humanas, incluido el ruido emitido por los medios de transporte, por el tráfico rodado, ferroviario y aéreo y por emplazamientos de actividades industriales como los descritos en el Anexo I de la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, 24 de Noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación) [16]. En Colombia, a partir de los estudios realizados, se determinan los niveles de ruido permitidos por zonas y por fuentes de emisión en las Tablas IV y V.

TABLA IV. ESTÁNDARES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN DE RUIDO EN COLOMBIA

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en dB(A)		Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental en dB(A)	
		Día	Noche	Día	Noche
Sector A. Tranquilidad y Silencio	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos.	55	50	55	45
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes.	65	55	65	50
	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación.				
	Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre.				
Sector C. Ruido Intermedio Restringido	Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.	75	75	75	70
	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.	70	60	70	55
	Zonas con usos permitidos de oficinas.	65	55	65	50
	Zonas con usos institucionales.				
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre.	80	75	80	70
Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado	Residencial suburbana.	55	50	55	45
	Rural habitada destinada a explotación agropecuaria.				
	Zonas de recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales.				

*Nota:* Fuente, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

TABLA V. NIVELES SONOROS MÁXIMOS PERMISIBLES EN COLOMBIA

Zonas respectivas	Nivel de presión sonora en dB(A)	
	Periodo diurno	Periodo nocturno
Zona residencial	65	45
Zona comercial	70	60
Zona industrial	75	75
Zona de tranquilidad	45	45

### ***b) Ruido de fondo***

El ruido de fondo es un sonido de baja intensidad de todas las fuentes de interferencia en un sistema, generalmente continuo, uniforme e independiente de la presencia de la señal. Este incluye el ruido eléctrico de todos los componentes de los instrumentos de medida y también es expresado como el nivel medido cuando la fuente específica no es audible [17].

### ***c) Ruido específico***

Es el ruido que emite cualquier fuente que es sometida a investigación. Dicho ruido es un componente del ruido ambiental y puede ser identificado y asociado con el foco generador de las molestias ocasionadas en las personas. Los niveles de presión sonora o aporte de las fuentes sonoras ponderado A pueden calcularse como:

$$L_{eq_{emisión}} = 10 \log_{10} \left( 10^{L_{RA_{eq,1h/10}}} - 10^{L_{RA_{eq,1h,residual/10}}} \right) \quad (2)$$

Dónde:

$L_{RA_{eq,1h/10}}$  = Nivel corregido de presión sonora continuo equivalente ponderado A medido en una hora.

$L_{RA_{eq,1h,residual/10}}$  = Nivel corregido de presión sonora residual continuo equivalente ponderado A medido en una hora.

#### ***d) Ruido residual***

El ruido residual suele confundirse con el ruido de fondo, pero este, hace referencia al ruido resultante al ser suspendidos los ruidos específicos en consideración [14].

#### ***2) Exposición sonora***

Cuando se habla de exposición sonora, se hace alusión a la cantidad de energía acústica a la que está expuesto un receptor en un punto determinado durante cierto periodo de tiempo, esta es medida como el producto de la potencia acústica por el tiempo que dura la exposición. Se expresa en Pascales y se da en función del tiempo (un suceso determinado) [18].

#### ***3) Mapa de ruido***

Los mapas de ruido son representaciones gráficas que permiten evaluar los datos de determinada condición acústica debidos a la propagación de distintas fuentes de ruido, indicando en ellos la superación de los valores límites sobre una determinada área de estudio, el número de personas, viviendas u otro tipo de edificios expuestos a ciertos niveles específicos [19].

#### ***C. Mediciones acústicas: síntesis de datos y herramientas***

Una medición es una técnica mediante la cual se asigna un número a una propiedad física para la comparación con un patrón o unidad de referencia. Esta puede verse afectada por diversos factores a la hora de realizarse, por errores del observador y de escala como por errores sistemáticos y aleatorios, los cuales se verán relacionados directamente con la incertidumbre, expresando un intervalo dentro del cual se tiene certeza de un valor verdadero [20]. Existen diferentes procedimientos que se deben realizar posterior a la realización de las mediciones acústicas, esto con el fin de sintetizar los datos obtenidos de manera que puedan procesarse de forma correcta, obteniendo así información oportuna del proceso llevado a cabo.

## 1) Síntesis de datos

### a) Suma energética

Dentro de los procesos posteriores a la medición acústica, se hace necesaria la realización de sumas energéticas con el fin de comprender de mejor manera el comportamiento del sonido a lo largo del espectro de frecuencias. Para pasar un conjunto L de muestras de espectro de tercios a uno de octavas, se suman los niveles en un punto, esta función está dado por la siguiente ecuación: [21]

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \right) \quad (3)$$

### b) Desviación estándar

Esta medida se emplea para establecer un valor de referencia y considerar la alteración aleatoria o natural de un proceso, indicando la dispersión de un conjunto de datos o población como variables de razón y de intervalo, en las que pueden ser cuantitativas o cantidades racionales. Los valores de la desviación estándar tienen la misma proporción que la dispersión de la población [22].

### c) Función de transferencia

La función de transferencia es un modelado matemático que se emplea para caracterizar la relación de las variables de entradas y salidas de componentes o sistemas, descritos mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo con la finalidad de analizar y diseñar dichos sistemas; sin embargo, la función no suministra información de la estructura física del sistema. Esta se define como el cociente entre las transformadas de Laplace de la función de respuesta de la salida y la función de excitación de entrada, suponiendo que las condiciones iniciales son iguales a cero [25].

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (4)$$

Dónde:

$Y(s)$  = Salida del sistema.

$X(s)$  = Entrada del sistema.

#### ***d) Respuesta transitoria y errores de estado estacionario***

La respuesta en el tiempo de control consta de dos partes: la respuesta transitoria y la respuesta en estado estacionario de un sistema. La primera se refiere a la que va del estado inicial al estado final, mientras que por respuesta en estado estacionario se entiende la manera como se comporta la salida del sistema conforme  $t$  tiende a infinito. Por tanto, la respuesta del sistema  $c(t)$  se puede escribir como [25]:

$$c(t) = c_{tr} + c_{ss}(t) \quad (5)$$

Dónde:

$c_{tr}$  = Respuesta transitoria.

$c_{ss}$  = Respuesta en el estado estacionario.

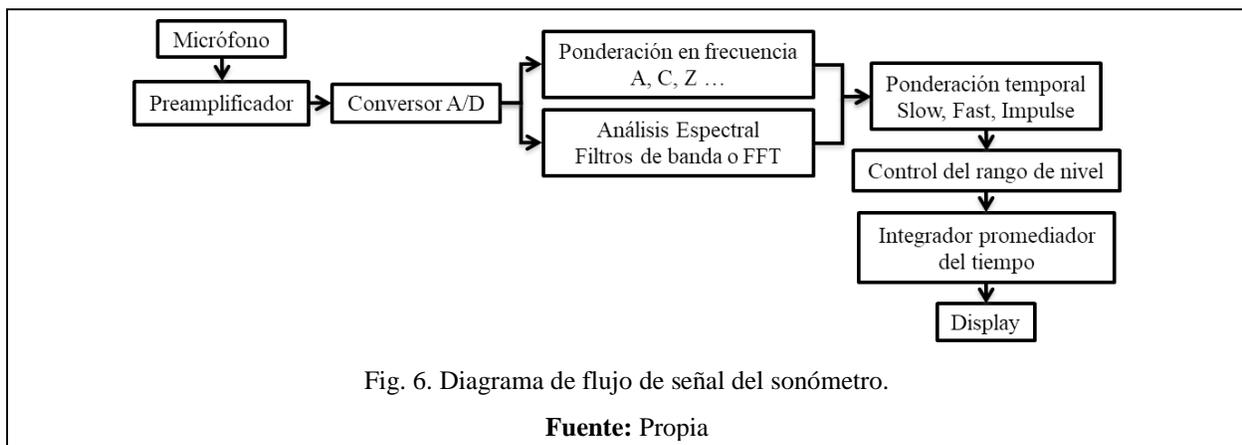
El comportamiento de la respuesta en estado estacionario mejora cuando el valor de la ganancia se intensifica, pero a su vez se puede producir una estabilidad imperfecta en el sistema. Se le llama error en estado estacionario a las respuestas transitorias que muestran las oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar un estado estacionario cuando la señal de salida de un sistema no coincide con la señal de entrada, determinando así la estabilidad de sistemas en lazo cerrado a partir de la respuesta en lazo abierto a entradas sinusoidales en estado estacionario.

## ***2) Herramientas***

### ***a) Sonómetro***

El sonómetro es un instrumento utilizado para medir niveles de presión sonora, este incluye, como se aprecia en la Fig. 6, un micrófono que capta las variaciones de presión generadas por las ondas

acústicas y las convierte en señales eléctricas, debe cumplir con una precisión requerida por estándares internacionales y nacionales. El sonómetro puede ser ponderado en frecuencia, emulando la respuesta del oído humano con respecto al rango audible de frecuencias, y también tiene una ponderación en tiempo que puede integrar por medio de funciones los diferentes valores de señales que vienen por parte del micrófono. El sonómetro permite grabar los resultados en dos modos, el primero es el modo sonómetro que posibilita ver los niveles equivalentes de presión sonora, el segundo es el modo analizador de espectro, el cual analiza los NPS con un espectro de frecuencia separado por un ancho de octava o tercio de octava [24].



#### ***D. Sistemas limitadores para establecimientos comerciales***

Un establecimiento comercial como un bar o una discoteca es un recinto dedicado al esparcimiento y al entretenimiento de las personas, estos, en su mayoría, usan dispositivos electroacústicos para la reproducción de música o de instrumentos en vivo. Hay que tener en cuenta varias consideraciones acerca de estos establecimientos comerciales como lo son el ruido de fondo, la disposición y configuración interna del sistema de sonido y el número de paredes que conforman el establecimiento, ya que la implementación de estos sistemas de sonido puede acarrear consigo una significativa contribución a la contaminación auditiva [25].

Cuando un establecimiento comercial incurre en un desacato sobre los niveles máximos permisibles de presión sonora, se debe atacar su cadena electroacústica para lograr que los niveles de presión sonora que son emitidos por éste, se acojan a la normatividad nacional; es allí cuando entra a jugar un papel fundamental la implementación de sistemas limitadores.

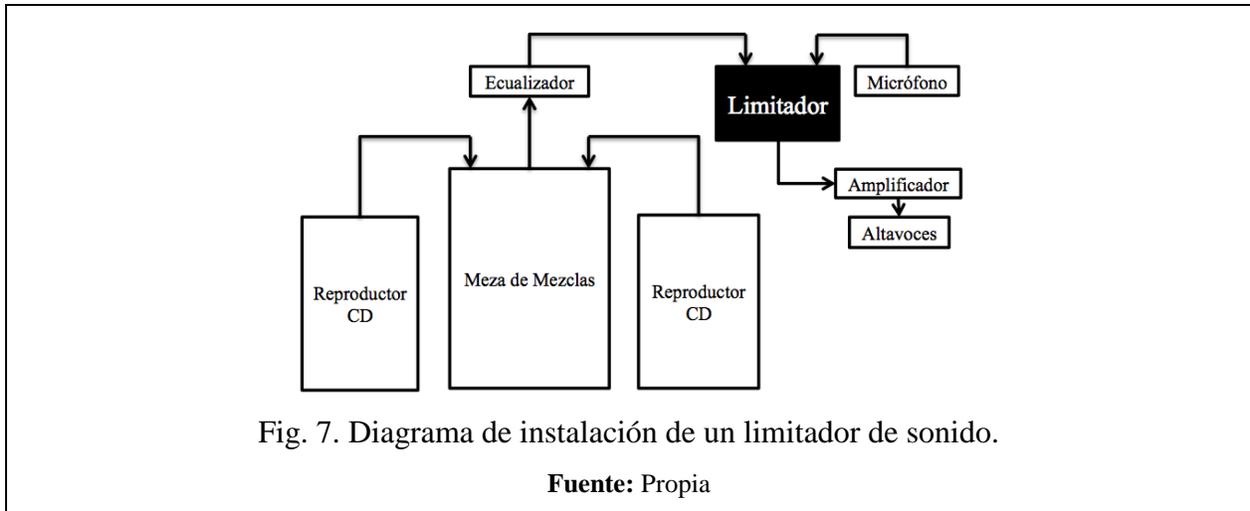
### ***1) Sistema***

Un sistema (físico o no) es un conjunto estructurado en el cual sus componentes tienen una alta relación e interacción para regular su correcto funcionamiento y desarrollar un objetivo específico [25].

### ***2) Limitador***

Un limitador de sonido es un elemento diseñado para optimizar la emisión musical de una actividad, realizando limitación espectral de la señal en tercios de octava que garantiza el máximo nivel musical que cumple con la normativa vigente, interviniendo en la totalidad de la cadena de sonido [26]; éstos se instalan entre la salida del mezclador y las etapas de potencia del equipo de música como se muestra en la Fig. 7, y cuentan con uno o dos micrófonos que miden el nivel de presión sonora en el interior del recinto.

Los limitadores de sonido actúan analizando la señal eléctrica que llega desde la mesa de mezclas y la señal acústica, ajustando el nivel de salida para que no exceda los máximos configurados en el dispositivo [27].



Según las condiciones del establecimiento, se cuenta, a grosso modo, con tres opciones de limitación [28].

#### ***a) Limitadores para insonorización***

Estos limitadores funcionan absorbiendo el ruido al transformar las ondas vibratorias en calor, por medio de la fricción a nivel celular. Para esto se emplean materiales como la melanina o la goma, cuya efectividad depende de la porosidad, densidad y tamaño de los dispositivos.

#### ***b) Reflectores de sonido***

Cuando se tiene acceso a la fuente, se pueden emplear paneles refractarios para apuntar el sonido hacia el cielo y evitar su propagación lateral. Además, como alternativa, se pueden emplear materiales difusores que distribuyen el sonido en todas direcciones, cuando se colocan sobre superficies planas.

#### ***c) Cancelación de ruido por interferencia***

Esta es la última tecnología en limitadores acústicos y se puede usar cuando el ruido que se quiere cancelar tiene frecuencia uniforme. Este limitador funciona grabando el ruido que se quiere cancelar, analizándolo con software especializado y, por último, generando un sonido de polaridad

opuesta que, al ser transmitido, genera un fenómeno llamado como interferencia destructiva y cancela gran parte del ruido original.

Teniendo en cuenta que el sistema que se quiere desarrollar es un limitador de presión sonora en tiempo real, este sistema capta una señal continua (en este caso sobrepresiones correspondientes al sonido) y la compara con una señal de referencia (correspondiente a los valores permitidos por la normativa colombiana), dicho sistema funciona con el principio conocido en la actualidad como el control automático de ganancia o AGC por sus siglas en inglés [29].

Este tipo de control se utiliza por ejemplo en los sensores resonantes, en donde la información se encuentra modulada en la frecuencia como es el caso de la música, en la cual, se modula una cantidad de frecuencias que hacen vibrar el tímpano, el cual, a su vez, transfiere estas vibraciones al fluido contenido en la cóclea (en el oído interno); dentro de la cóclea se encuentran las terminales nerviosas conocidas como células ciliadas. Dichas células, responden a las vibraciones del fluido enviando los impulsos nerviosos al cerebro, que es quien finalmente interpreta los impulsos como sonido o ruido [30].

El control de ruido activo funciona a partir de la lectura de una señal, luego generando la respuesta y volviendo a analizar el sonido, éste funciona a través de lazos de control cerrados, es decir, existe una realimentación entre el nivel de ruido y la onda de cancelación que se requiere generar; por lo tanto, una forma de mejorar dicho sistema, es la intervención en el lazo de realimentación para que éste sea más óptimo.

### ***E. Diseño de un sistema limitador acústico de control automático***

Para la realización de este proyecto, se consideró adecuada la implementación de un sistema de control automático, para lo cual se deben tener en cuenta diferentes características y parámetros a configurar.

### 1) Control automático

Los sistemas de control se diseñan para realizar tareas específicas y son parte fundamental en cualquier operación industrial que requiera de diversas acciones de control en un reducido grupo de elementos como temperatura, humedad, presión del aire, flujo, etc. Con este sistema se predice el comportamiento dinámico para el diseño a partir del conocimiento de los componentes, por consiguiente esta es una parte fundamental y esencial en los avances de la ciencia e ingeniería [25].

El control automático hace la diferencia entre el valor de la salida de un sistema con el valor de entrada de referencia para especificar la desviación del detector de error y producir una señal de control, convirtiendo así la desigualdad a cero o aproximadamente cero. Esta señal generada se denomina acción de control.

La Fig. 8 es un diagrama de bloques de un sistema de control automático industrial el cual contiene un controlador que detecta la señal de error en un nivel de potencia muy bajo para posteriormente amplificarla a un nivel suficientemente alto. La señal de salida se conecta a un dispositivo de potencia que genera la entrada para el objeto físico que se va a controlar con la finalidad de aproximar la señal de entrada a la señal de referencia. El sensor es el dispositivo de medición que convierte la variable de salida en una variable adaptable, como la presión o voltaje, para poder comparar la señal de salida con la señal de entrada de referencia.

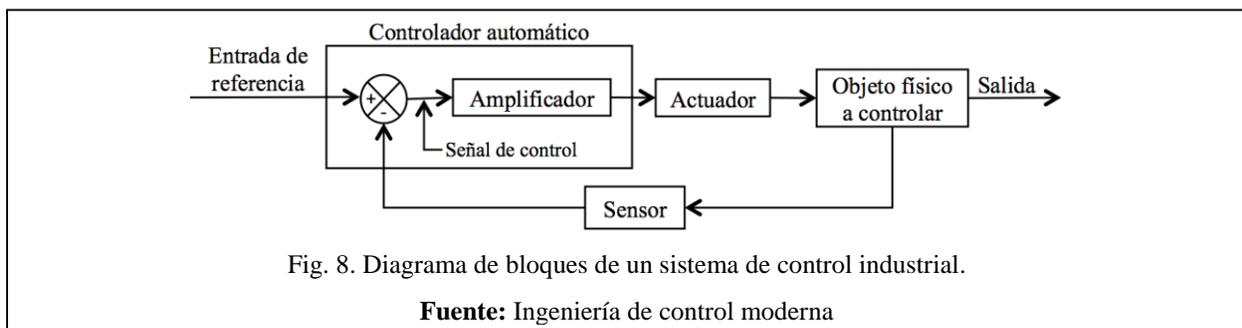


Fig. 8. Diagrama de bloques de un sistema de control industrial.

**Fuente:** Ingeniería de control moderna

## 2) Control PID

En los sistemas de control industriales, son empleados los esquemas de controladores sintonizados PID con varios grados de libertad para el ajuste de control *in situ* de variables como la presión, temperatura, etc. La sintonización de este tipo de control depende de las magnitudes relativas de tres parámetros: ganancia proporcional, ganancia integral y ganancia derivativa, los cuales determinan el comportamiento de los controladores buscando la manera de satisfacer las características de una respuesta transitoria dada [25].

Los controles PID son útiles cuando no se pueden aplicar métodos de diseño analíticos, generalmente son usados cuando el modelo matemático del sistema no se conoce, aunque en ocasiones no aportan un control óptimo en varias situaciones específicas.

La Fig. 9 muestra el diagrama de bloques del sistema proporcional integral derivativo de cualquier objeto físico que se quiera controlar. Por medio de este sistema se puede obtener el modelado matemático de sus componentes para aplicar varias técnicas con la finalidad de determinar los parámetros del controlador y cumplir con las especificaciones de la respuesta transitoria y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado. En algunos casos, se recurre a los procedimientos experimentales como métodos analíticos para sintonizar los sistemas de control PID cuando no es posible obtener el modelado matemático del objeto físico que se va a controlar.

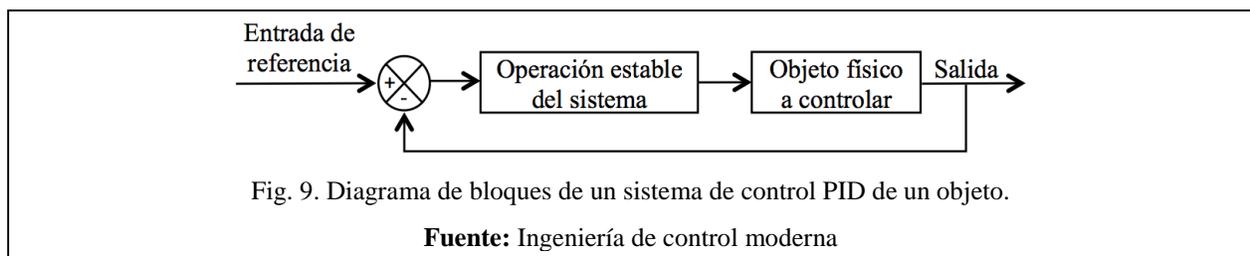


Fig. 9. Diagrama de bloques de un sistema de control PID de un objeto.

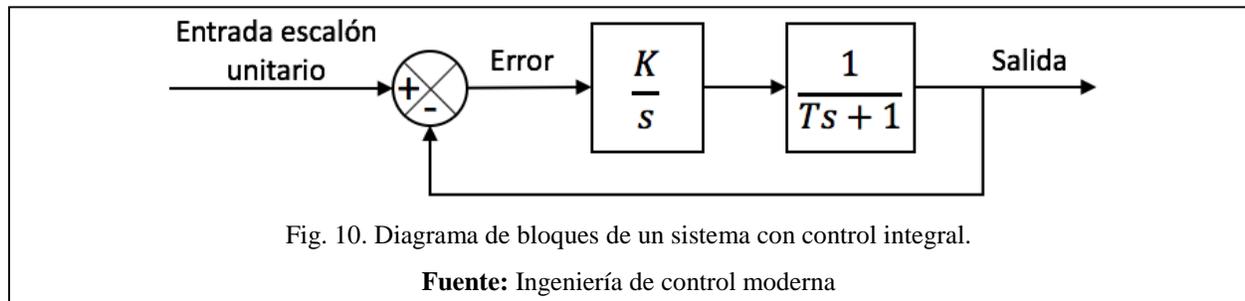
**Fuente:** Ingeniería de control moderna

## 3) Control integral

El control proporcional de un sistema sin un integrador causa un error de estado estacionario, llamado offset, en la respuesta frente una entrada escalón. La acción de control integral en el

controlador adopta una forma tal que elimine lentamente la realimentación que aportó originalmente el controlador proporcional [25].

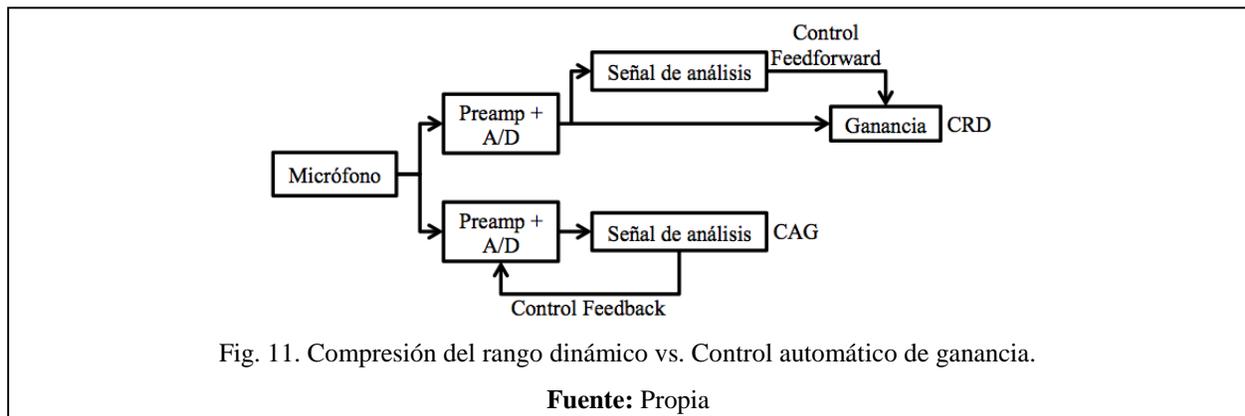
La acción de control proporcional tiende a estabilizar el mismo, mientras que la acción de control integral tiende a eliminar o reducir el error en estado estacionario en respuesta a diversas entradas, como se observa a continuación en la Fig. 10.



#### 4) Control automático de ganancia

El control automático de ganancia (CAG) es utilizado para la grabación en condiciones adversas, ajustando automáticamente la ganancia del preamplificador del micrófono implementando un sensor a distancia, adaptando el volumen del altavoz cuando la distancia del micrófono varía y controlando directamente la ganancia de este.

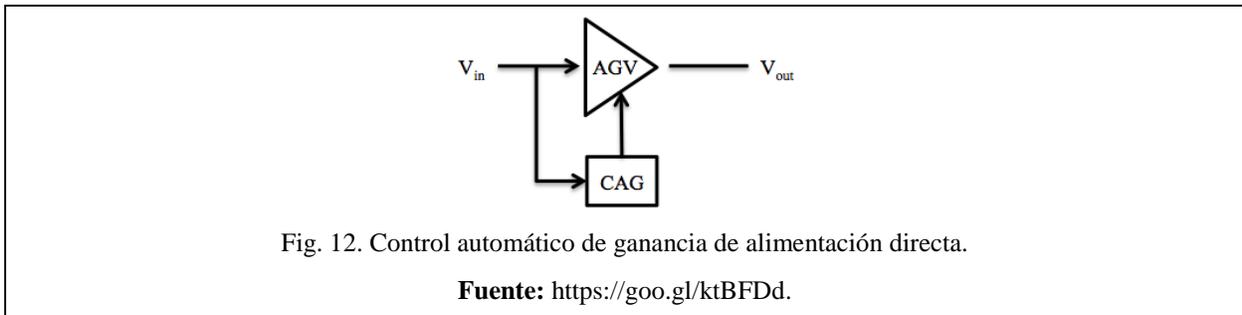
Comúnmente estos requieren de un hardware específico como amplificadores controlados por voltaje, que le agregan ruido y distorsión a la señal, pero que son optimizados por el CAG. También se puede lograr el control de la ganancia por medio de la compresión del rango dinámico (CRD),



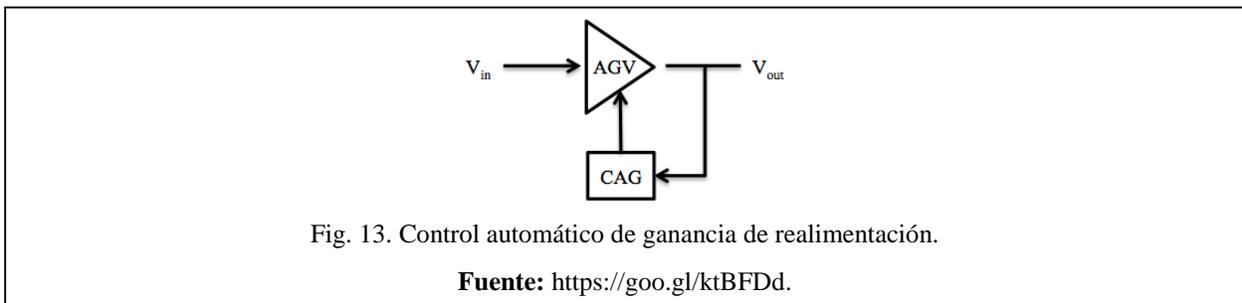
como se evidencia en la Fig. 11, modulando la potencia de la salida con relación a la señal de entrada mediante un esquema de Feed-Forward, agregando una etapa de ganancia en la cadena de grabación y un ruido más alto [31].

El *CAG* deriva la ganancia de la fuente de sonido a la distancia del micrófono debido a que los niveles de salida de este varían inversamente a la distancia a una fuente de sonido esférica [32].

Actualmente, existen dos tipos de circuitos *CAG*: de alimentación directa (feedforward) y de realimentación (feedback). En los primeros, la ganancia del *AGV* depende de la amplitud de la señal de entrada, como se puede observar en la Fig. 12.



Dichos sistemas proporcionan una respuesta más rápida a la amplitud de la señal, pero son también mucho más sensibles a variaciones de los parámetros, por lo que su aplicación suele restringirse al área de comunicaciones. En los lazos *CAG* de realimentación como el que se observa en la Fig. 13, la ganancia del *AGV* se ajusta de acuerdo a la amplitud de la señal detectada en la salida (luego de la etapa de potencia) por lo cual el sistema es más robusto [29].



### ***F. Diseño electrónico del dispositivo***

Para la implementación del dispositivo se hace necesaria la aplicación de teorías y prácticas electrónicas, de tal manera que su utilización permita generar control sobre los niveles de presión sonora de manera automática; para esto, es necesario comprender el funcionamiento de algunos componentes y conocer algunas definiciones básicas de relevancia.

#### ***1) Microcontrolador***

Un microcontrolador es un dispositivo electrónico digital, compuesto principalmente por una Unidad Central de Procesamiento (*CPU*), una memoria con programas controlados que se permiten modificar y puertos de entradas y salidas. Se puede construir un microcontrolador estableciendo las conexiones correctas entre estos componentes y algunos elementos eléctricos comunes como resistencias y condensadores, siendo comúnmente más utilizado el de 8 bits [33].

El sistema de microcontrolador es más ampliamente utilizado en aplicaciones para ciertos fines, como un controlador PID en instrumentación industrial, controlador de comunicación de datos en un sistema de control distribuido, etc.

Estos pueden aplicarse entre los siguientes campos de acción:

- Automotriz: Unidad de control del motor, bolsa de aire, velocímetro y sistema de seguridad de alarma.
- Suministros para el hogar y la oficina: Control remoto, lavadora y microondas.
- Control de equipos en la industria.
- Robótica.

Un microcontrolador puede procesar dos tipos de señales, analógicas y digitales, y se conecta regularmente a lámparas, sensores y motores. La señal analógica es una señal continua en el tiempo,

medida como diferentes voltajes en un intervalo determinado a una determinada frecuencia de muestreo. La señal digital es alta, 1 o baja, 0, y solo existirá en momentos definidos en el tiempo.

## 2) *Arduino*

Es una plataforma de electrónica cuyas especificaciones y diagramas son de acceso público, permite conectar en la placa periféricos a las entradas y salidas de un microcontrolador (Fig. 14), la cual está basada en hardware y software libres, funcionales y fáciles de usar. Arduino ofrece la plataforma Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), que es un entorno de programación con el que cualquiera puede crear aplicaciones para las placas de Arduino transfiriendo los datos por medio de un cable USB, permitiendo a los usuarios construirlos de forma independiente y eventualmente adaptarlos a sus necesidades particulares [34].

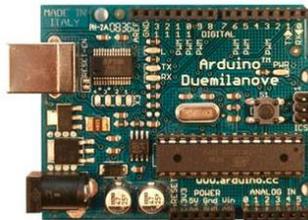


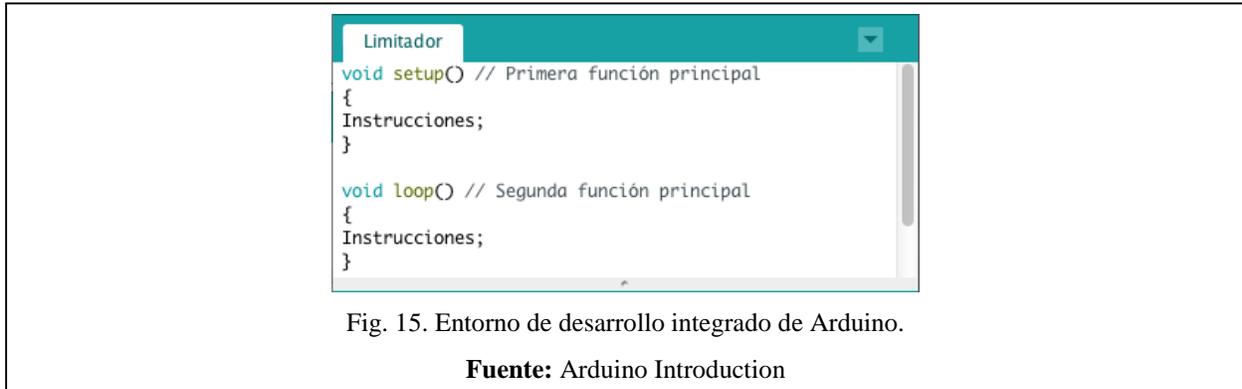
Fig. 14. Apariencia de una placa de Arduino.

**Fuente:** <https://goo.gl/PvUUKP>.

### a) *Estructura del Arduino IDE*

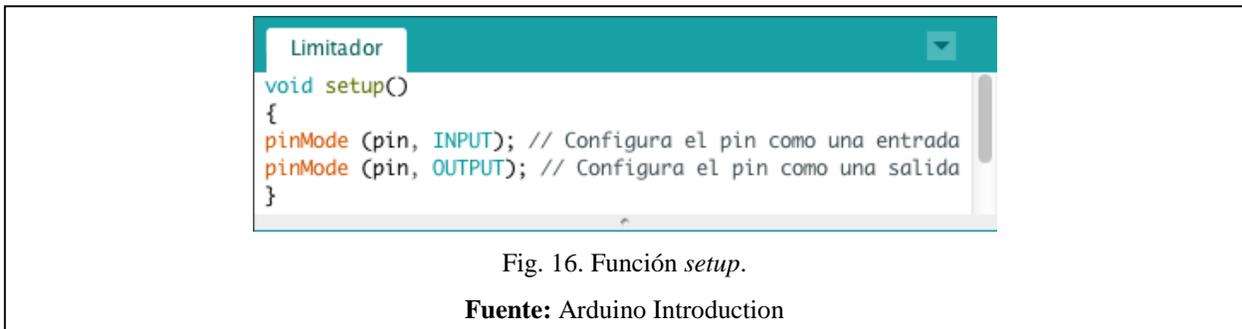
El lenguaje de programación para las placas de Arduino es bastante básico y sencillo, este se constituye de por lo menos dos principales consideraciones para que el programa funcione como se aprecia en la Fig. 15, la primera parte denominada *setup* almacena la preparación del programa, mientras que la función *loop* incluye el programa de ejecución cíclico. Ambas funciones se encierran entre llaves las instrucciones necesarias para que el programa desempeñe las indicaciones dadas, finalizándolas con punto y coma (;) para separar cada instrucción y al final denotando los comentarios con doble backslash (//). Si la función no devuelve ningún valor, entonces se emplea la palabra *void* que traduce función vacía. Este lenguaje permite la ejecución de funciones de

sentencias condicionales similares a los utilizados en programación C, tales como if, if-else, for, while, do-while.



- Setup

En la Fig. 16 se indica la configuración de esta función donde se deben incluir las declaraciones de las variables citándose solamente al inicio de la programación, se utiliza para la configuración de

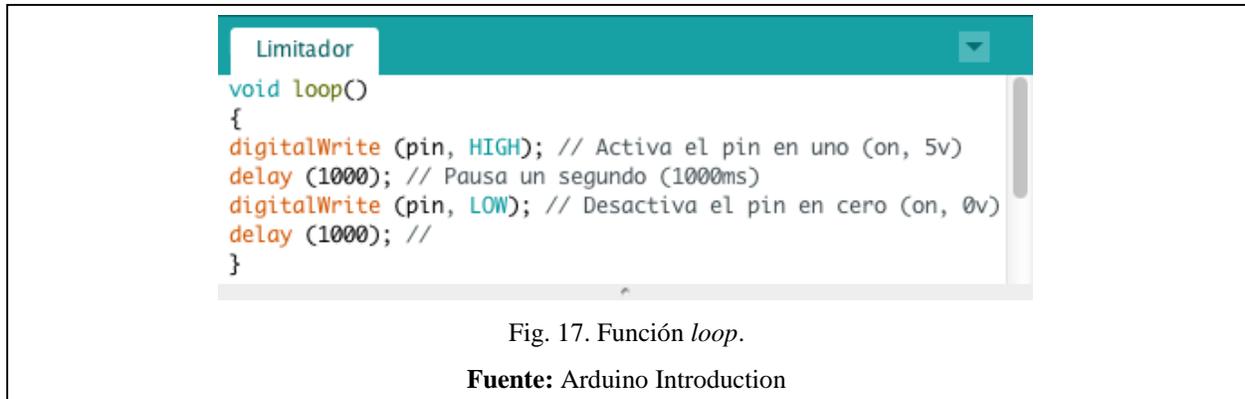


la comunicación de los puertos en serie y para inicializar la variable *pinMode*, encargada del modo de trabajo de los pines de entradas y salidas. Los pines vienen estandarizados como entradas, por lo que no es necesario declararlas como estas.

- Loop

Esta función se ejecuta cíclicamente, como lo indica su nombre, generando que el programa responda ininterrumpidamente a los cambios que se producen en la placa y por ende realizando la

mayor parte del trabajo en los programas de Arduino. La función loop puede programarse como se representa en la Fig. 17.

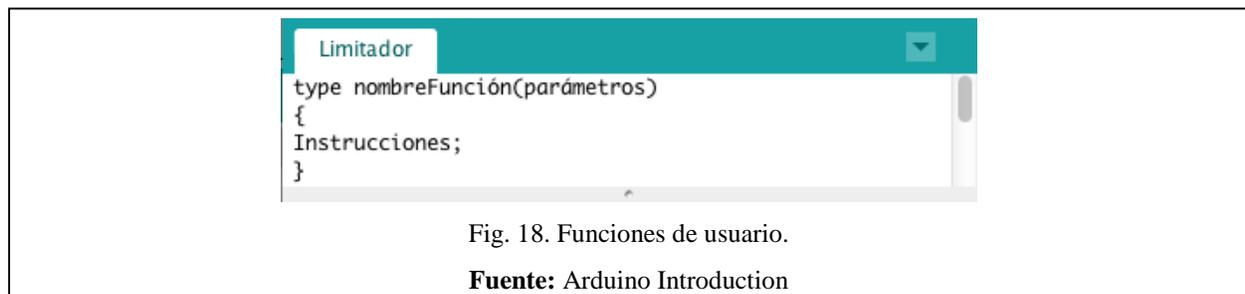


## b) Funciones

- **Usuario**

Las funciones de usuario, las cuales se deben nombrar e inicializar al principio de la programación, contienen un bloque de código donde se ingresan un conjunto de instrucciones que se ejecutan cuando la variable es nombrada. Estas funciones son escritas para realizar las indicaciones repetitivas y así disminuir la extensión del programa.

Se declaran a un tipo de valor *type* (Fig. 18) para devolver el valor a la función, luego se escribe el nombre de la función y entre paréntesis se introducen los parámetros que se deben pasar a la función para lograr ser ejecutada sin error alguno.



*delayVal()* se emplea para poner un valor de retraso en un programa que lee una variable analógica de un potenciómetro conectado a un pin de entrada de la placa de Arduino. Esta función devuelve un número entero, apreciando su programación en la Fig. 19.

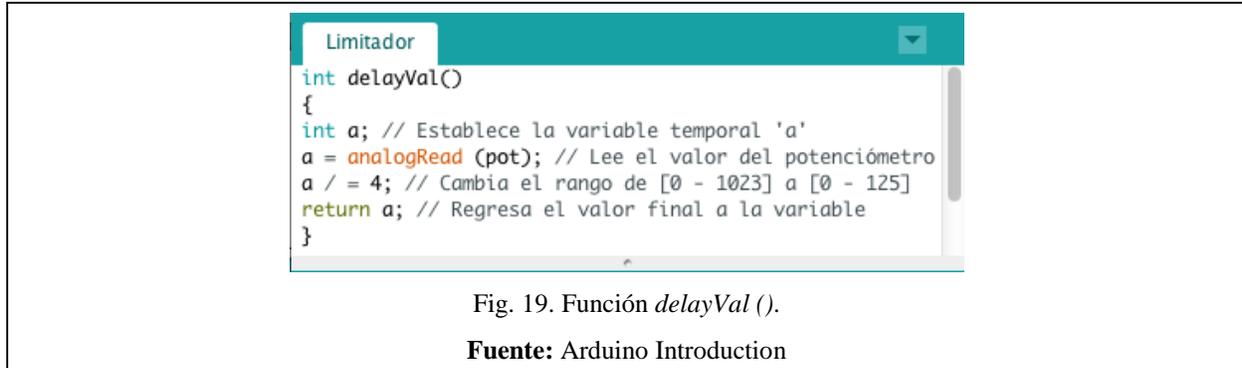


Fig. 19. Función *delayVal()*.

Fuente: Arduino Introduction

- **Generación aleatoria**

Arduino también permite poner en práctica funciones de generación aleatoria como las mostradas a continuación:

***randomSeed(seed)***: Se emplea en la primera función principal (*setup*) para configurar el pin como *INPUT* u *OUTPUT*, aunque los pines vienen estandarizados como entradas, por lo que no es necesario declararlas como entradas.

***digitalRead(pin)***: Lee el valor de un pin digital específico, declarándolo como una constante o una variable y retornando un valor *HIGH* y *LOW*.

- **Entradas y salidas análogas/digitales**

Estas placas poseen las siguientes Entradas/Salidas para la interconexión con el dispositivo:

***pinMode(pin, mode)***: Se emplea en la primera función principal (*setup*) para configurar el pin como *INPUT* u *OUTPUT*.

***digitalRead(pin)***: Lee el valor de un pin digital específico, declarándolo como una constante o una variable y retornando un valor *HIGH* y *LOW*.

***digitalWrite(pin, value)***: Escribe un nivel alto o bajo en el pin especificado, también puede ser una constante o una variable.

***analogRead(pin)***: Lee el valor del pin con una resolución de 10 bits, retornando un valor entre [0 - 1023].

***analogWrite(pin, value)***: Escribe un valor solo en los pines 3, 5, 6, 9, 10, 11, empleando modulación por ancho de pulso en el pin de salida *PWM*. Esta función tiene una asignación numérica entre [0 - 255], generando el primer valor como 0 V y el segundo 5 V. Entre más cercano se encuentre este valor al límite superior, el pin se encontrará más a menudo en *HIGH*, dando como ejemplo el valor de 192, lo cual mantendrá en 0 V una cuarta parte del tiempo y 5 V las tres cuartas partes restantes.

- **Puerto serie**

***Serial.begin(rate)***: Determina la velocidad de transmisión de un puerto serie, siendo 9600 la velocidad relacionada con el computador, aunque el sistema soporta otras velocidades diferentes a esta.

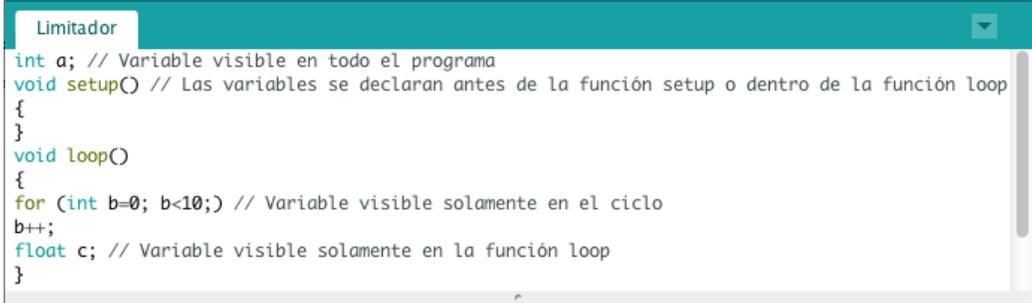
***Serial.println(data)***: Se diferencia de la función *Serial.print()* por el salto de línea al final. La función imprime datos para la depuración del programa y envíos de valores de variables por el puerto serie seguido por un retorno de línea automático.

***digitalWrite(pin, value)***: Escribe un nivel alto o bajo en el pin especificado, también puede ser una constante o una variable.

***analogRead(pin)***: Lee el valor del pin con una resolución de 10 bits, retornando un valor entre [0 - 1023].

### c) Variables

Las variables globales, evidenciadas en la Fig. 20, deben ser declaradas e inicializadas asignándoles un valor de cero o una constante, antes de las principales funciones del programa e indicando el tipo de dato que se va a almacenar en ella.



```
Limitador
int a; // Variable visible en todo el programa
void setup() // Las variables se declaran antes de la función setup o dentro de la función loop
{
}
void loop()
{
  for (int b=0; b<10;) // Variable visible solamente en el ciclo
  {
    b++;
    float c; // Variable visible solamente en la función loop
  }
}
```

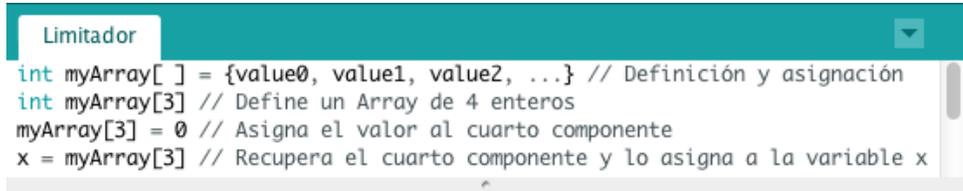
Fig. 20. Variables globales en Arduino.

**Fuente:** Arduino Introduction

### d) Tipos de datos y operaciones

Arduino permite realizar operaciones entre los siguientes tipos de datos, donde su primer índice es cero:

- **Byte:** Almacena un valor numérico de 8 bits.
- **Int:** Almacena un valor entero de 16 bits.
- **Long:** Valor entero almacenado en 32 bits.
- **Float:** Tipo coma flotante almacenado en 32 bits.
- **Arrays:** Se trata de un conjunto de valores a los que se puede acceder con un número de índice como se aprecia en la Fig. 21.



```
Limitador
int myArray[ ] = {value0, value1, value2, ...} // Definición y asignación
int myArray[3] // Define un Array de 4 enteros
myArray[3] = 0 // Asigna el valor al cuarto componente
x = myArray[3] // Recupera el cuarto componente y lo asigna a la variable x
```

Fig. 21. Manejo de datos en Arduino.

**Fuente:** Arduino Introduction

Por medio de las variables, valores constantes o por las componentes de un array, se pueden realizar un conjunto de operaciones o asignaciones como las presentadas en la Tabla VI.

TABLA VI. OPERACIONES ASIGNADAS EN ARDUINO

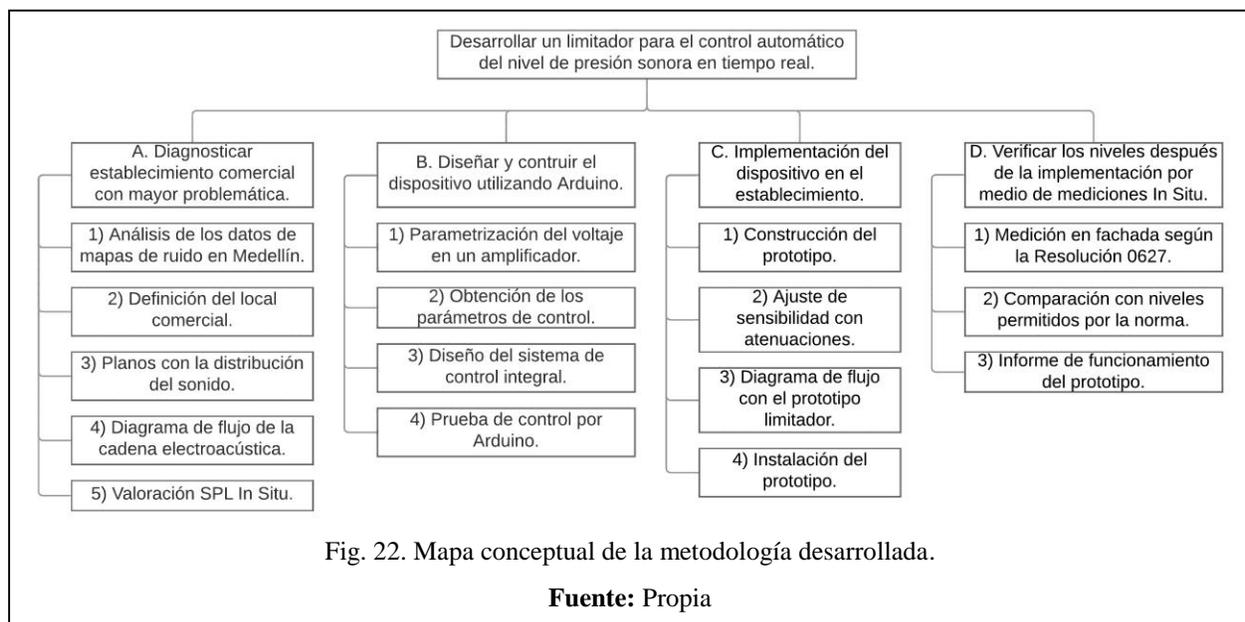
Operadores	Programación	Definición
Aritméticos	<code>a ++</code>	<code>a = a + 1</code>
	<code>a --</code>	<code>a = a - 1</code>
	<code>a += b</code>	<code>a = a + b</code>
	<code>a -= b</code>	<code>a = a - b</code>
	<code>a *= b</code>	<code>a = a * b</code>
	<code>a /= b</code>	<code>a = a / b</code>
Comparación	<code>a == b</code>	<code>a = b</code>
	<code>a != b</code>	<code>a ≠ b</code>
	<code>a &lt; b</code> <code>a &gt; b</code>	a menor que b a mayor que b
	<code>a &lt;= b</code> <code>a &gt;= b</code>	a mayor o igual que b a menor o igual que b
	Lógicos	<code>if (x &gt; 0 &amp; #; # &amp; x &lt; 5)</code>
<code>if (x &gt; 0    y &gt; 0)</code>		Si alguna expresión es cierta
<code>if (!x &gt; 0)</code>		Si alguna expresión es falsa
Constantes predefinidas	<code>TRUE</code>	Cierto
	<code>FALSE</code>	Falso
	<code>HIGH</code> <code>LOW</code>	Alto Bajo
	<code>INPUT</code> <code>OUTPUT</code>	Entrada Salida
Tiempo	<code>delay(ms)</code>	Pausa [1 - 1000] ms
	<code>millis()</code>	Tiempo de ejecución de la placa en ms
	<code>min(x,y)</code> <code>max(x,y)</code>	Mínimo entre sus parámetros Máximo entre sus parámetros

*Nota:* El contador de la placa de Arduino se reinicia después de 9 horas de ejecución, fuente: Arduino Introduction.

## VIII. METODOLOGÍA

En la presente sección se muestra la metodología a la cual obedece el proceso de investigación y desarrollo para el diseño y construcción del prototipo, capaz de controlar automáticamente los niveles de presión sonora emitidos por la cadena electroacústica de un determinado establecimiento comercial; dicha metodología consta de 4 fases, cada una de las cuales cuenta a su vez con diferentes tareas a realizar (Fig. 22).

La primera es una fase de diagnóstico, durante la cual se debe definir el establecimiento que será intervenido; para esto, deberán ser analizados los mapas de ruido de la ciudad, de manera que se pueda evidenciar un sector problemático (acorde a los niveles máximos permisibles estipulados por la resolución 0627 de 2006), y posteriormente se pueda realizar una visita técnica con el fin de individualizar el o los establecimientos que pueden estar provocando dicha problemática. La segunda fase, obedece al proceso de diseño y construcción de un dispositivo para el control automatizado de los niveles de presión sonora emitidos por el o los establecimientos comerciales evidenciados durante la fase de diagnóstico; la tercera y cuarta fase, por su parte, tienen como fin la implementación del dispositivo y la verificación de los niveles de presión sonora emitidos posterior a dicha implementación. El desarrollo de cada una de estas fases se muestra en la sección de resultados.



### ***A. Material y equipamiento***

Para llevar a cabo los procedimientos de medición y experimentación de la metodología, se hizo necesaria la utilización de diferentes herramientas para medición y diagnóstico; en la sección de Anexos se evidencian sus respectivas representaciones gráficas y fichas técnicas.

- Multímetro digital marca Fluke con referencia 117.
- Interfaz marca M-AUDIO con referencia MobilPre USB.
- Sonómetro marca CESVA con referencia SC-310 Clase 1.
- Sensor de sonido análogo con referencia DFR0034.
- Placa de marca Arduino con referencia UNO.
- Cabinas activas marca JBL con referencias SRX722F, EON 15P-1 y PRX512M.
- Amplificador de potencia marca Crown con referencia XLS 5000.

## IX. RESULTADOS

En la presente sección, se muestra paso a paso las tareas ejecutadas con el fin de dar cumplimiento a la metodología de trabajo estipulada para este proyecto de investigación.

### *A. Diagnóstico del sector con mayor problemática*

Con el fin de realizar un minucioso y correcto diagnóstico, se definieron las siguientes tareas a ejecutar:

#### *1) Análisis de los datos de mapas de ruido de Medellín en su última versión*

Para ejecutar esta tarea, se recopilaron los datos de los mapas de ruido realizados por el Área Metropolitana y las empresas Prosoluciones S.A. consultorías y Acústica más lumínica AAC en el año 2015, estos datos que se muestran en la Tabla VII, arrojaron información relevante para determinar los sectores con características de ocio-comercial más problemáticos de la ciudad [5], se puede apreciar que dichos sectores problemáticos son la Avenida 70, la Avenida 33 y la zona de Aranjuez, donde se registraron niveles de 71,2 dB(A), 70,6 dB(A) y 70,2 dB(A) respectivamente para un periodo nocturno en una semana laboral, y unos niveles de 73,1 dB(A), 69,8 dB(A) y 72,6 dB(A) respectivamente en un periodo nocturno del día domingo. Estos resultados se obtuvieron por medio de los modelos de propagación descritos en la Directiva Europea 2002/49/CE, los cuales garantizan un diagnóstico acertado de la problemática por ruido debido a emisiones de presión sonora de un foco puntual, los cuales, para este caso en específico son establecimientos de comerciales de ocio y recreación, tales como bares y/o discotecas; estos modelos de propagación están basados en algoritmos diseñados bajo lo estipulado por el estándar ISO 1996-2.

TABLA VII. REGISTROS DE LAS MEDICIONES ACÚSTICAS REALIZADAS EN LA ZONA DE EVALUACIÓN COMPLEMENTARIA POR EL ÁREA METROPOLITANA

Zona	Laborable		Domingo		Total semanal		Característica
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	
Parque Botero – Carabobo	61,7	55,9	62,6	56,9	61,7	55,9	Comercial
Junín – La Playa	74,2	72,7	72,2	77,2	74,0	73,7	Comercial
Barrio Triste	65,1	57,3	60,2	53,5	64,7	56,9	Talleres
Avenida La 70	69,7	71,2	66,6	73,1	69,4	71,5	Ocio – Comercial
Laureles	57,9	53,5	54,9	52,2	57,6	53,4	Ocio - Tranquilo
Avenida La 33	74,1	70,6	72,4	69,8	74,0	70,5	Ocio – Comercial
Castilla	68,9	60,3	62,9	57,3	68,5	60,0	Ocio – Comercial
Aranjuez	75,1	70,2	73,6	72,6	74,9	70,7	Ocio – Comercial
Las Palmas	56,9	54,9	52,5	54,2	56,5	54,2	Ocio – Comercial
Poblado – Parque Lleras	60,6	63,5	58,8	68,9	60,4	64,8	Ocio – Comercial

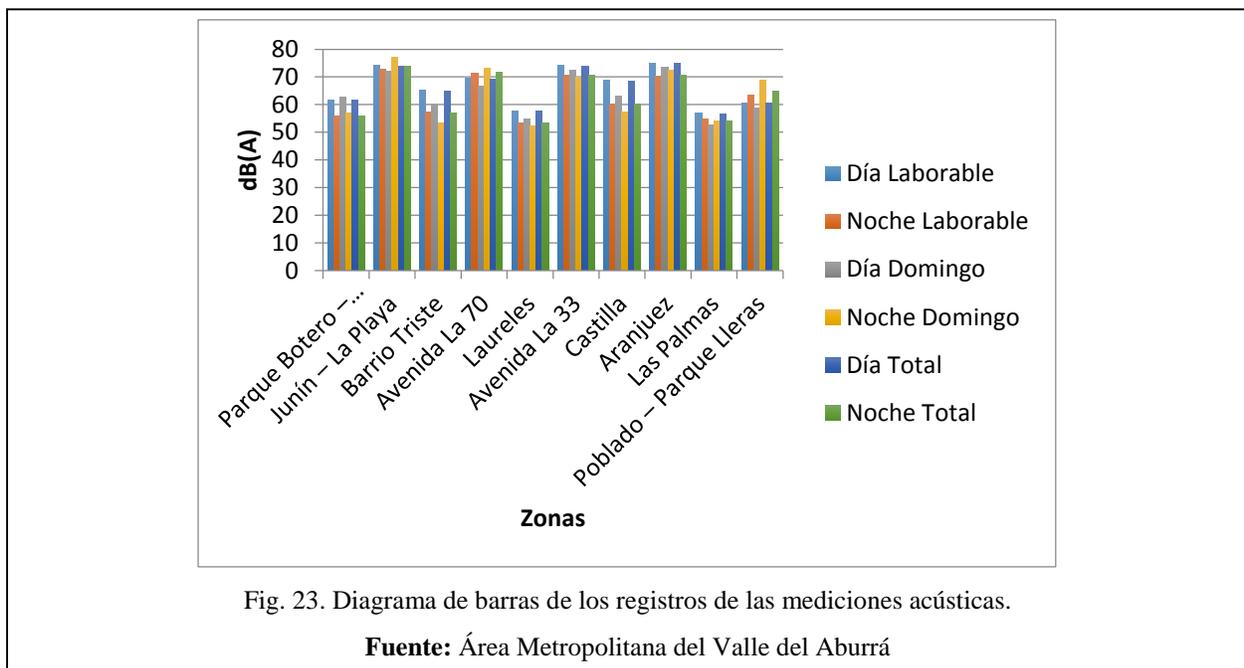
*Nota:* Fuente, Área Metropolitana del Valle del Aburrá.

Con base en la información obtenida, se determinó que el sector más apropiado para llevar a cabo el desarrollo del proyecto es la Avenida 33; esta zona tiene usos mixtos del suelo y debe tratarse de tal manera que se dé cumplimiento a los niveles máximos permisibles para el sector más restrictivo inmerso dentro de esta zona (de acuerdo con la Resolución 0627 de 2006); si se observa la información acerca de los niveles máximos permisibles para cada sector, la cual fue mostrada anteriormente en la Tabla IV, se puede apreciar que para el Sector B (Tranquilidad y Ruido Moderado) los niveles de presión sonora máximos permitidos en el periodo nocturno son 50 dB(A) y para la Sector C (Ruido Intermedio Restringido), destinado a las zonas comerciales, los niveles máximos permitidos son 55dB(A); dicho esto, se observa que el sector de la Avenida 33 está regido por el caso más restrictivo, que en este caso es el Sector B, lo cual demuestra que el nivel máximo permitido para este sector, está siendo rebasado en aproximadamente 20 dB, tanto para el periodo nocturno como el diurno, y que, por consiguiente, este sector evidencia una problemática importante y es propicio para la intervención [5].

Para representar fielmente la problemática acústica existente y evidenciar que el sector elegido fuese el adecuado, se hizo necesario realizar una evaluación complementaria al mapa de ruido

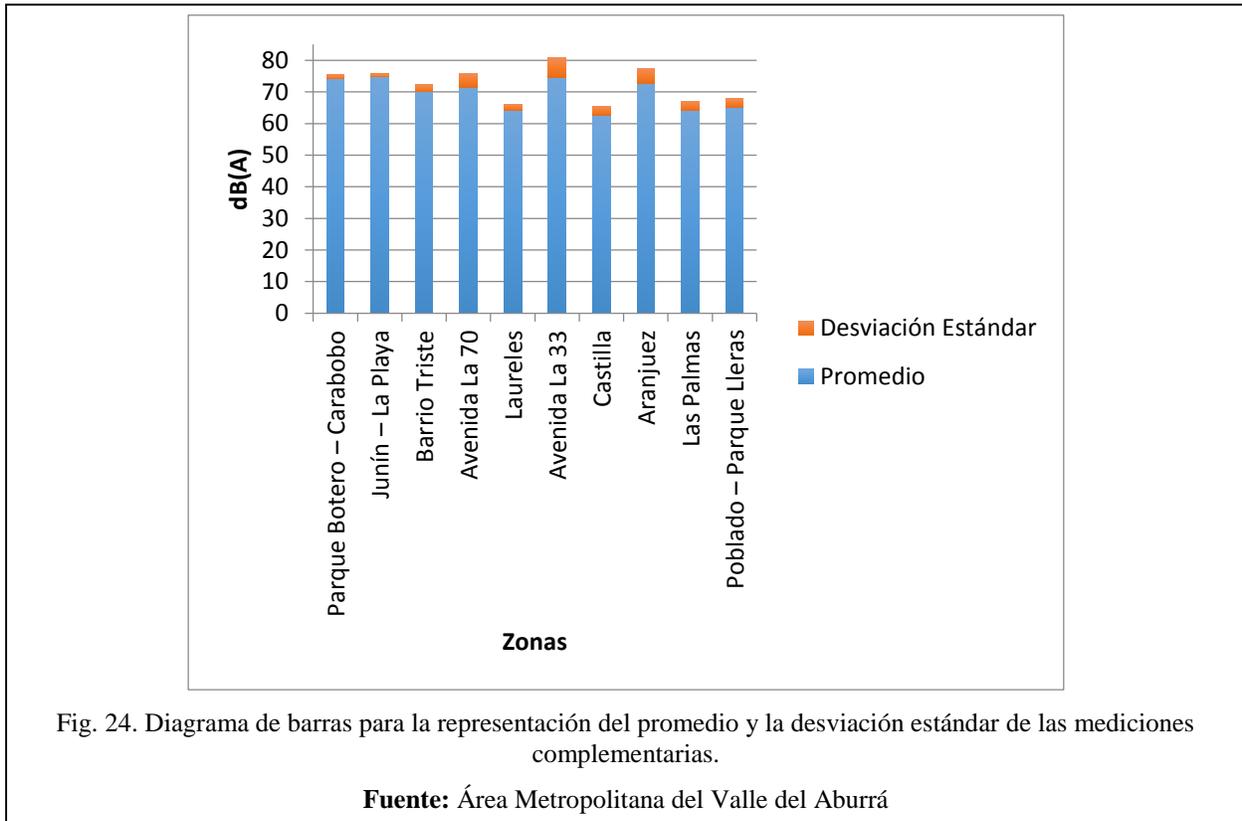
obtenido por modelación, para analizar así la variación de los niveles de presión sonora en el sector; dicha evaluación consistió en la realización de mediciones acústicas de corta duración (aproximadamente 7,5 minutos cada una), dos por la mañana y dos por la tarde, así durante una semana, y con un muestreo espacial sobre una grilla que incluye entre 3 y 5 puntos de muestreo, para obtener un promedio representativo en los diferentes puntos de cada una de las diez zonas escogidas en Medellín para la evaluación complementaria de los mapas de ruido.

Los datos obtenidos en los mapas de ruido evidencian los niveles de ruido ambiental generados en diferentes sectores de la ciudad. En la Fig. 23, la barra de color naranja representa el valor en decibeles ponderados A dB(A) en una noche en semana de la ciudad, y la barra de color morado representa un valor en dB(A) de un domingo en la noche.



Según esto, se deduce entonces que los sectores con mayor problemática debida al ruido son Junín-La Playa, La Avenida 33 y Aranjuez, ya que estos presentan niveles de presión sonora por encima de los 70 dB(A) en la jornada nocturna; la emisión de ruido ambiental de estos sectores se debe en parte a las emisiones generadas por los establecimientos comerciales dedicados al ocio y esparcimiento de las personas.

Con la finalidad de obtener datos y resultados precisos, que puedan desvelar cuál de estos sectores es el que presenta una mayor problemática, se decide realizar un estudio estadístico de desviación estándar sobre los datos mostrados en la figura anterior; los resultados de desviación estándar son mostrados en la Fig. 24.



Se puede observar que la desviación estándar en la Avenida 33 es de aproximadamente 5 dbA, siendo esta la mayor desviación presentada, por lo cual, se confirma como el sector de mayor problemática y más idóneo para la intervención.

## 2) Definición del establecimiento comercial para la implementación del dispositivo

Para definir el establecimiento comercial en el cual se debería llevar a cabo la implementación del dispositivo, se tuvo en cuenta como principal consideración la ubicación del establecimiento, de manera que se evidenciara la ubicación de zonas residenciales aledañas, esto, debido a que es

importante analizar la influencia del dispositivo controlador sobre las viviendas, además de la eficacia en el control de los niveles de presión sonora que inciden sobre ellas.

Después de realizar una visita técnica, y teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas, se establece el local comercial “Aky Nos Vemos” como el establecimiento adecuado para la intervención; en la Fig. 25, se muestra la ubicación geográfica del establecimiento y la ubicación de viviendas aledañas sobre las cuales pueden incidir los altos niveles de presión sonora que son emitidos por el establecimiento comercial.



Fig. 25. Ubicación geográfica del establecimiento comercial en la zona de estudio de la Av. 33.

Fuente: <https://bit.ly/2Zw1Hfp>.

Este establecimiento cuenta con un potente sistema de amplificación sonora, con el agravante de que este está ubicado en dirección hacia la calle (Fig. 26), lo cual conlleva a que los niveles de presión sonora que son emitidos al medio ambiente, sean mayores.



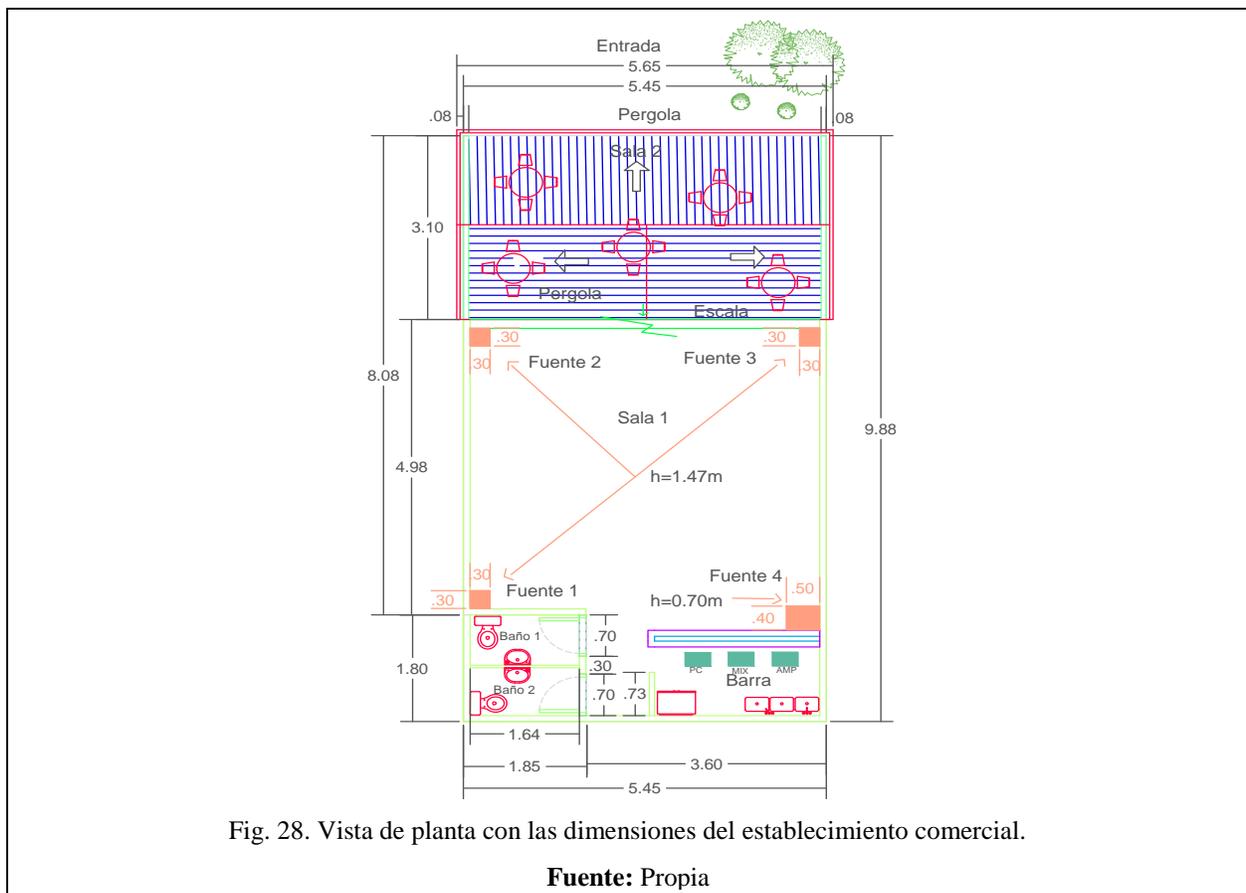
Cabe resaltar, además, que el establecimiento comercial carece de una partición (muro o ventana) que atenúe de manera eficiente la energía de las ondas sonoras (Fig. 27), de manera que la cantidad de energía que se emite hacia el medio ambiente es casi igual a la que es generada dentro del establecimiento.



### 3) Planos del recinto con la distribución del sonido

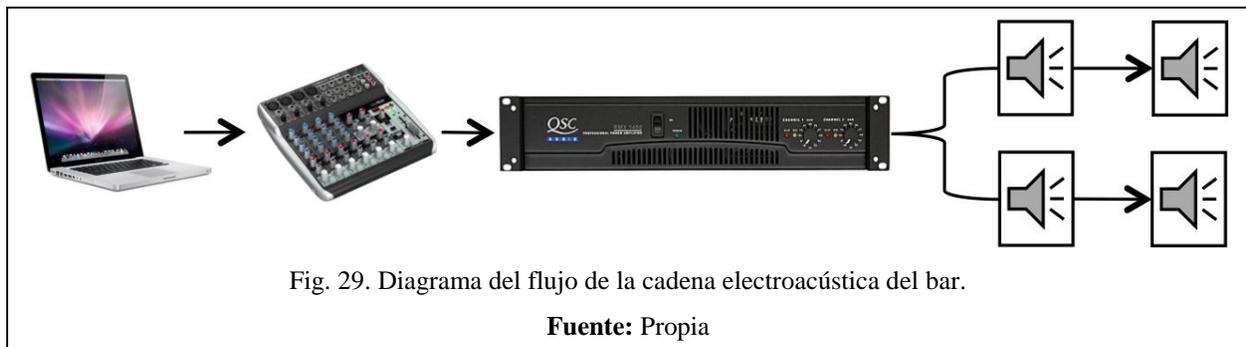
Después de elegir el establecimiento comercial adecuado para la intervención, se pretende conocer diferentes aspectos que puedan contribuir significativamente en los niveles de presión sonora que son emitidos al medio ambiente por el mismo; es por esto que se considera necesaria la realización de un plano bidimensional que muestre la ubicación de las fuentes emisoras del establecimiento.

Utilizando como herramienta de diseño el software AutoCAD, y posterior a la toma de medidas, se realiza un modelo en 2D que muestra la ubicación exacta de cada una de las fuentes emisoras con las que cuenta el establecimiento (Fig. 28); por medio de este plano, se puede comprender de manera más sencilla el comportamiento del sonido dentro del mismo, pero, además, puede también hacerse una idea aproximada de la cantidad de energía sonora que está siendo emitida hacia el exterior del recinto.



#### 4) Diagrama de flujo de la cadena electroacústica

Para comprender el funcionamiento del sistema de sonido, es necesario realizar un diagrama de flujo, mediante el cual se muestre cada uno de los componentes de la cadena electroacústica que lleva consigo la amplificación sonora; es por esto que se decide diagramar cada uno de los componentes que hacen parte del sistema sonoro en el establecimiento *Aky Nos Vemos* (Fig. 29), esperando además poder deducir la manera más eficiente de realizar la inserción del dispositivo que se pretende desarrollar a este sistema ya pre establecido, sin que este pueda modificar la calidad de la señal de audio.



#### 5) Valoración de niveles de presión sonora en el bar

Con el fin de caracterizar el recinto, y para conocer los niveles de presión sonora generados dentro del mismo, se decide realizar mediciones in situ del ruido de fondo y del nivel de presión sonora generado en una noche habitual de funcionamiento, siguiendo los lineamientos de la Resolución 0627 y el estándar internacional ISO 1996-2, el cual precisa las condiciones y exigencias para la realización de mediciones en campo de un foco de ruido puntual.

### a) Croquis de las mediciones

Estas mediciones fueron realizadas el día 28 de septiembre de 2018, en lapsos de tiempo entre las 8 y las 10 de la noche, con el fin de registrar la jornada nocturna, que es principalmente en la que opera este establecimiento; para ello se utilizó un sonómetro clase 1 de marca CESVA en su referencia SC-310, mientras que las alturas y distancias a las cuales se realizaron las mediciones se estipularon de acuerdo con lo dictado por el estándar internacional. En la Fig. 30 se puede observar el esquema que representa la ubicación de cada uno de los puntos de medición, tanto al interior como sobre la fachada del establecimiento.

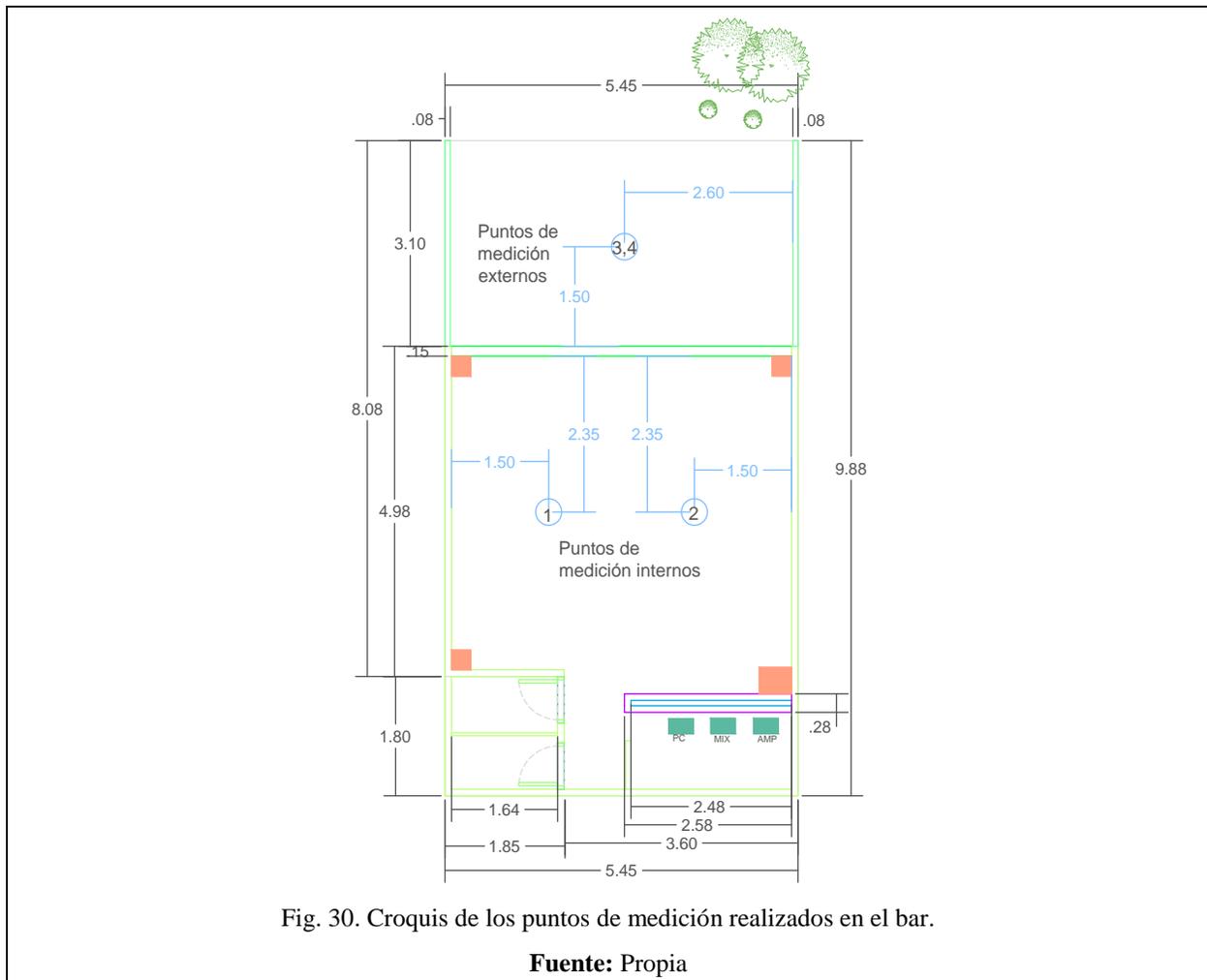


Fig. 30. Croquis de los puntos de medición realizados en el bar.

Fuente: Propia

**b) Ficha de información general de las mediciones de emisión de ruido**

Después de realizar las respectivas mediciones acústicas siguiendo lo estipulado por los estándares internacionales, se puede establecer una ficha técnica completa para caracterizar el recinto en estudio (Tabla VIII).

TABLA VIII. FICHA DE INFORMACIÓN DE LAS MEDICIONES

<b>NOMBRE</b>	Aky Nos Vemos			
<b>DIRECCIÓN</b>	Avenida 33 # 66B – 44			
<b>TELÉFONO</b>	312 215 4967			
<b>ACTIVIDAD</b>	Discoteca			
<b>TIPO DE RUIDO</b>	<b>EST</b>	<b>FLUCT</b>	<b>IMPREV</b>	
<b>RUIDO DE FONDO</b>	<b>ALTERA</b>		<b>NO ALTERA</b>	
<b>TIPO DE RUIDO DE FONDO</b>	Música + Tráfico vehicular			
<b>PRINCIPAL FUENTE DE RUIDO</b>	Sistemas de sonido			
<b>IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN</b>	<b>MARCA</b>	CESVA		
	<b>MODELO</b>	SC 310		
	<b>Nº SERIE</b>	T232231		
<b>TEMPERATURA [°C]</b>	23			
<b>HUMEDAD RELATIVA [%]</b>	65			
<b>FILTRO DE PONDERACIÓN</b>	dB(A)			
<b>RESPUESTA DEL SONÓMETRO</b>	<b>SLOW</b>	<b>FAST</b>	<b>IMPULSE</b>	
<b>CALIBRACIÓN IN SITU</b>	<b>ANTES</b>	<b>DURANTE</b>	<b>DESPUÉS</b>	
<b>NOMBRE DEL OPERADOR</b>	Juan Diego Montoya Lopera Santiago Ramírez Sánchez			
<b>TIPO DE ZONA</b>	<b>RESIDENCIAL</b>			
	<b>COMERCIAL</b>			
	<b>MIXTA</b>			
	<b>INDUSTRIAL</b>			
<b>FECHA DE LAS MEDICIONES</b>	28 / 09 / 2018			
<b>HORA DE INICIO DE LAS MEDICIONES</b>	8:57:21 p.m.	9:19:25 p.m.	9:34:25 p.m.	9:50:39 p.m.
<b>TIPO MEDICION</b>	Nº1 Al interior	Nº2 Al interior	Nº1 A exterior	Nº2 Al exterior
<b>DURACIÓN</b>	15 minutos			
<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b>Nivel [dB]</b>			

20	20,3	23,1	26,5	26,4
25	36,2	37,6	34,2	34,2
31,5	35,9	43,1	39,1	39,1
40	50,2	43,5	47,6	47,6
50	54,6	55,5	59,6	59,0
63	66,5	66,1	68,7	66,2
80	76,1	75,7	77,2	79,4
100	79,9	81,4	78,6	81,1
125	83,0	82,4	78,5	78,5
160	86,4	85,4	77,3	81,2
200	85,6	83,9	78,9	81,2
250	84,3	82,3	80,3	79,2
315	88,7	90,5	85,8	84,5
400	93,6	88,0	88,4	86,4
500	96,0	93,2	89,8	89,7
630	93,2	97,2	92,6	89,7
800	95,6	97,5	90,9	87,8
1000	94,6	94,5	88,6	86,5
1250	94,1	93,0	87,3	86,1
1600	94,7	95,8	90,5	87,2
2000	95,4	96,1	92,3	88,6
2500	93,6	93,0	88,7	85,6
3150	91,7	93,3	85,8	82,6
4000	89,9	89,5	78,6	78,0
5000	77,9	81,7	71,8	71,7
6300	76,4	79,2	69,1	69,0
8000	71,6	71,1	65,2	65,4
10000	65,9	64,9	60,6	61,0
$L_{AeqRTot}$ (dB)	104,9	105,3	100,3	98,2
$L_{Aeqcorregido}$ promedio (dB)	105,1		99,4	

$L_{Aeq_{Residual}}$ (dB)	71	
$L_{Aeq_{emisión}}$ (dB)	105,1 (interior)	99,4 (exterior)

Nota: Fuente, elaboración propia.

### **B. Diseño del sistema de control automático utilizando Arduino**

El desarrollo del segundo objetivo específico del proyecto se elaboró con diferentes procedimientos, con el fin de comprender los parámetros que describen el comportamiento de la variable eléctrica con respecto a la variable acústica, ya que estas variables definen el comportamiento de nuestro sistema a controlar; dichos parámetros como lo son las funciones de transferencia para el sensor y la planta, además de los valores de sintonización del control integral; son necesarios para diseñar el algoritmo el cual se desarrolla en la plataforma Arduino. El sistema de limitación de voltaje es llevado a cabo con un mecanismo de control llamado *control integral*, el cual se expone en la sección del marco teórico. La propiedad integral en este tipo de control fue la que nos permitió encontrar una estabilización más óptima, por lo tanto se descartó el uso del control de tipo PID (proporcional integral derivativo) tal como se muestra en la fig. 39 donde se evidencia un comportamiento oscilatorio en la respuesta total del sistema, lo cual, no es adecuado cuando se trata de la reproducción de música en establecimientos comerciales; ya que estas oscilaciones en la respuesta con este tipo de control, ocasionarían desagrado en los clientes y por ende en el administrador o dueño del establecimiento, Al comprobar que el diseño era más óptimo al usar solo la componente integral del controlador PID tras varias simulaciones realizadas, tal y como se muestra en la fig. 38, se pudo establecer el valor más preciso para estabilizar el sistema en el menor tiempo posible, sin cambios oscilatorios bruscos en la respuesta transitoria y con un procesamiento más rápido en la etapa de control.

Para la realización del diseño del sistema limitador de presión sonora de los niveles de ruido ambiental generados por un establecimiento comercial, se llevaron a cabo las siguientes tareas:

### 1) *Parametrización del voltaje en un amplificador de potencia*

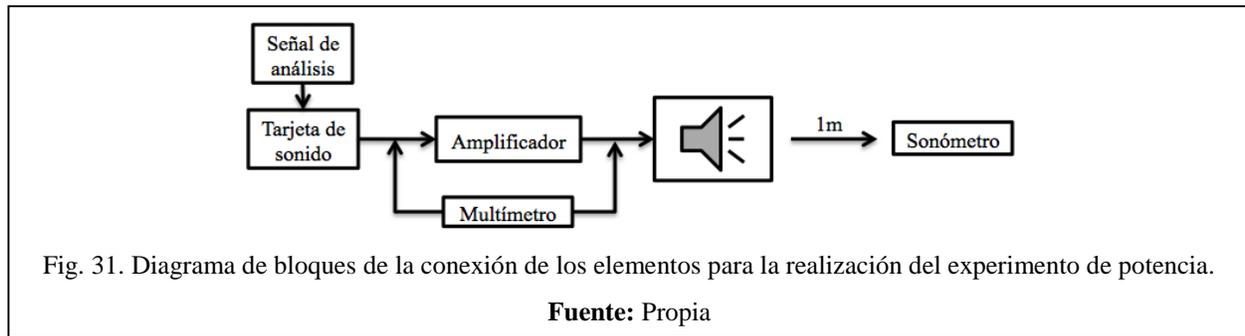
Para el desarrollo de la parametrización fue necesaria la realización de un primer experimento o medición de potencia para determinar la relación entre potencia entregada de un amplificador en voltios y los niveles de presión sonora generados por un tipo de parlante específico en decibeles. Para dicho procedimiento se usó el sonómetro CESVA SC310 Clase 1, el cual cumple con los requerimientos de la norma internacional IEC 61672-1 del 2013; también se utilizó el amplificador de potencia Crown 5000 y el altavoz JBL SRX722F, por medio del multímetro digital se midió el cambio de la sensibilidad de salida de la tarjeta MobilPre USB de M-AUDIO vs el cambio de la salida de voltaje del amplificador de acuerdo a un nivel de presión sonora entregado por el altavoz. Se tomaron medidas de voltaje a la salida del amplificador con el multímetro, manteniendo la sensibilidad de entrada del amplificador a  $\frac{1}{4}$  de la ganancia y variando la sensibilidad de salida de la tarjeta de sonido MobilPre y al mismo tiempo verificando cuanto nivel de presión sonora entregaba el altavoz de acuerdo a ese voltaje de salida del amplificador. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la Tabla IX.

TABLA IX. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE POTENCIA DEL AMPLIFICADOR CROWN 5000

<b>Ganancia</b>	<b>NPS [dB]</b>	<b>Interface [V]</b>	<b>Amplificador [V]</b>
$\frac{1}{4}$	78	0,023	0,24
$\frac{1}{2}$	92,8	0,12	0,6 – 1,5
$\frac{3}{4}$	99,2	0,34	2,4 – 3,8
1	102,4	0,38	2,9 – 4,9

*Nota:* Fuente, elaboración propia.

Además, se creó un diagrama de bloques (Fig. 31), el cual representa la disposición de los elementos usados para esta parametrización del voltaje de un amplificador de potencia; este, es un elemento muy importante dentro de la cadena electroacústica y es usado en todos los establecimientos comerciales de la ciudad para generar la potencia necesaria al momento de una reproducción musical grabada o en vivo.



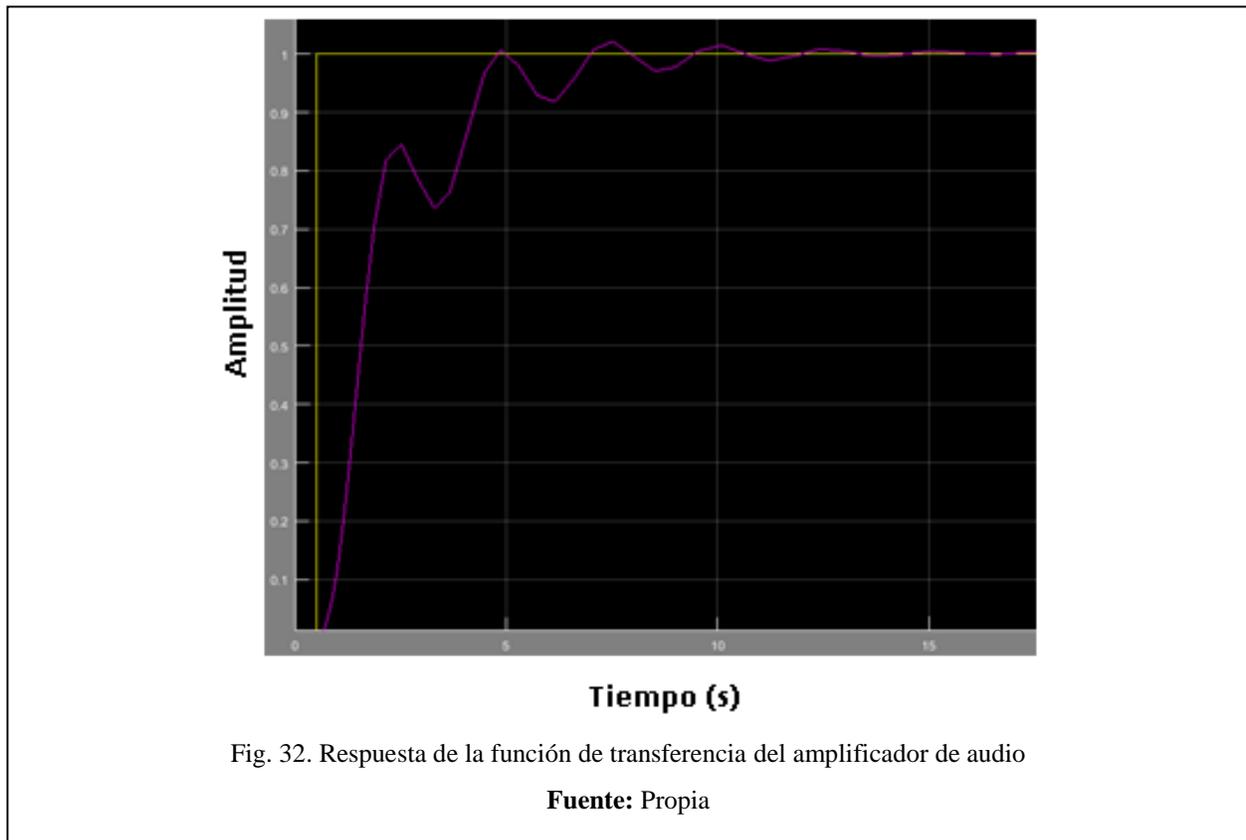
El comportamiento de este amplificador de audio, sirve para determinar cómo deberá ajustarse el control sobre lo que es llamado teóricamente como la planta, la cual en nuestro caso, genera la señal de salida del sistema después de ser controlado. Para obtener unos resultados de laboratorio más acertados del sistema de *control integral* a implementar, fue necesario representar la planta por medio de una función de transferencia que expresa matemáticamente la salida del altavoz en decibeles sobre la entrada al amplificador en voltios, el procedimiento para obtener dicha función se elaboró con la herramienta *ident* del software Matlab, este procedimiento se explica de manera clara en el numeral siguiente, donde se especifica cómo se obtuvo la función de transferencia del sensor (fig. 36) de la misma manera como se halló la de la planta; la función de transferencia obtenida es la siguiente:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.07264s + 0.4087}{s^3 + 1.152s^2 + 6.296s + 3.509} \quad (6)$$

Con los resultados obtenidos de la tabla IX, se deduce que, a medida que aumenta el nivel de presión sonora respecto a la ganancia es inevitable una variación de voltaje tanto en la interfaz como en el amplificador; por ejemplo, podemos observar que a 78 dBA hay una variación de la interfaz de 0,023 a 0,24, esto tiene una relación de ganancia de aproximadamente 10 veces; se

puede observar además, que a medida que la ganancia crece la relación de ganancia entre ambos niveles de voltaje tanto los de la interfaz como los del amplificador mantienen una relación constante de 10 veces el voltaje de entrada, por ende, se determina entonces que existe una relación entre los parámetros eléctricos y acústicos con relación a la ganancia fija que posee el amplificador y la sensibilidad del altavoz, representada para este caso en particular por la función de transferencia expuesta en (6).

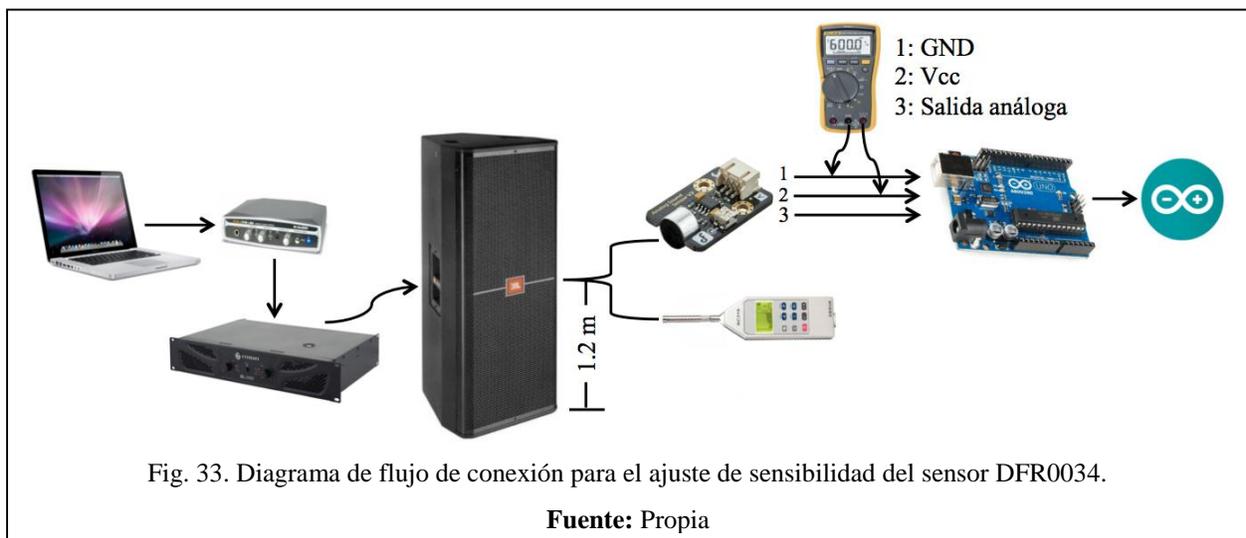
En la Fig. 32, se observa la respuesta de la función de transferencia obtenida para el amplificador de audio ante una entrada escalón, en esta, podemos observar que la línea de color amarillo corresponde al escalón unitario y la línea morada corresponde a la respuesta en el tiempo de este subsistema, considerándolo como un subsistema que tiende a hacer estable a partir de los 13 segundos.



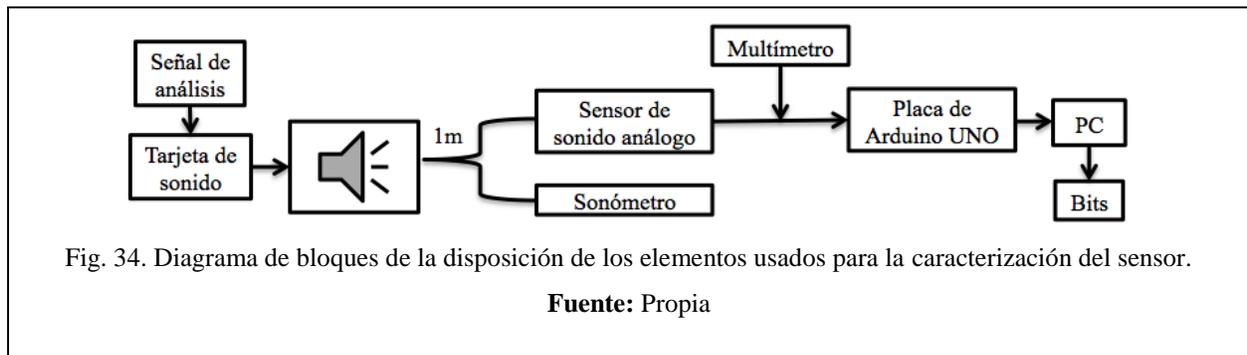
## 2) Obtención de los parámetros de control

Para este procedimiento se ejecutó el experimento número dos, donde se realizó una medición del sensor de sonido análogo DFR0034 conectado con un Arduino UNO, se obtuvieron los datos de la salida del sensor tanto en resolución de bits como en voltios respecto a los decibeles emitidos por el altavoz JBL con referencia PRX512M aplicándose una señal de ruido rosa.

El procedimiento se efectuó ubicando el sonómetro a un metro de distancia del centro acústico del altavoz y justo encima del diafragma del sonómetro se ubicó el sensor de sonido como se muestra en la Fig. 33. Utilizando el multímetro digital Fluke 117 se obtuvieron los valores de voltaje mostrados en la Tabla X, variando los niveles de presión sonora en pasos de 1 dB, y así mismo con el Arduino, se determinó la resolución en bits a la salida del sensor con los cambios en decibeles a los que era sometido este.



La caracterización del sensor análogo de sonido, arrojó como resultado una curva de sensibilidad mostrada en la fig. 35 y permitió estimar una ecuación polinómica de grado tres con un coeficiente de correlación de 0,98; esta ecuación es necesaria al momento de aplicar el control de señales por lazo cerrado, para relacionar la detección de los niveles de presión sonora a la entrada del sensor con la resolución en bits y el voltaje a la salida de este.



Los resultados de este proceso se observan en la Tabla X junto con la ecuación (7) de detección y la fig. 35 la cual nos muestra los puntos de operación en los que el sensor actúa fielmente y el rango de sensibilidad del mismo, en este caso, entre 70 dB y 100 dB para la variable acústica; lo cual es muy útil para la aplicación deseada ya que este rango operan casi siempre los sistemas de sonido de este tipo de establecimientos comerciales, también se encontraron las zonas de saturación del sensor, entre los 50 y 70 dB, y entre los 100 a 120 dB; esto quiere decir que el sensor no responde fielmente ante presiones que se encuentren dentro de esos intervalos de nivel.

$$0,0003x^3 - 0,0019x^2 + 0,4109x + 56,088 \quad (7)$$

TABLA X. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DEL SENSOR DE SONIDO ANÁLOGO DFR0034

NPS [dB]	Voltaje [mV]	Resolución en bits	NPS [dB]	Voltaje [mV]	Resolución en bits
51,6	10,7	2	92,2	801,1	449
53,2	12,6	2	93,2	860,9	462
55,3	14,6	3	94,0	900,3	467
57,2	18,2	7	95,1	932,1	468
59,4	23,3	9	96,5	990,8	469
61,3	28,7	10	97,4	1011,5	474
63,4	33,7	11	98,4	1045,3	477
64,3	39,6	15	99,5	1069,2	480
66,0	47,2	19	100,4	1093,4	481

67,0	54,0	25	101,3	1121,8	483
68,7	65,2	29	102,3	1132,7	483
70,7	85,1	33	103,5	1148,2	487
72,4	100,1	37	104,6	1167,8	489
74,0	115,5	57	105,3	1175,3	490
76,4	163,2	75	106,2	1188,6	491
77,3	175,5	85	107,2	1196,1	491
78,9	236,4	122	108,1	1215,4	491
80,2	301,9	156	108,8	1221,7	492
81,4	349,1	179	109,2	1221,6	492
82,5	468,2	193	110,1	1222,7	492
83,4	513,1	219	111,6	1231,3	492
84,1	536,6	228	112,1	1237,3	492
85,6	446,5	303	113,0	1245,6	493
87,4	550,6	360	114,0	1251,9	494
88,4	591,3	404	115,6	1254,1	494
89,4	651,2	428	116,7	1259,0	494
91,0	735,5	444	117,3	1262,1	500

Nota: Fuente, elaboración propia.

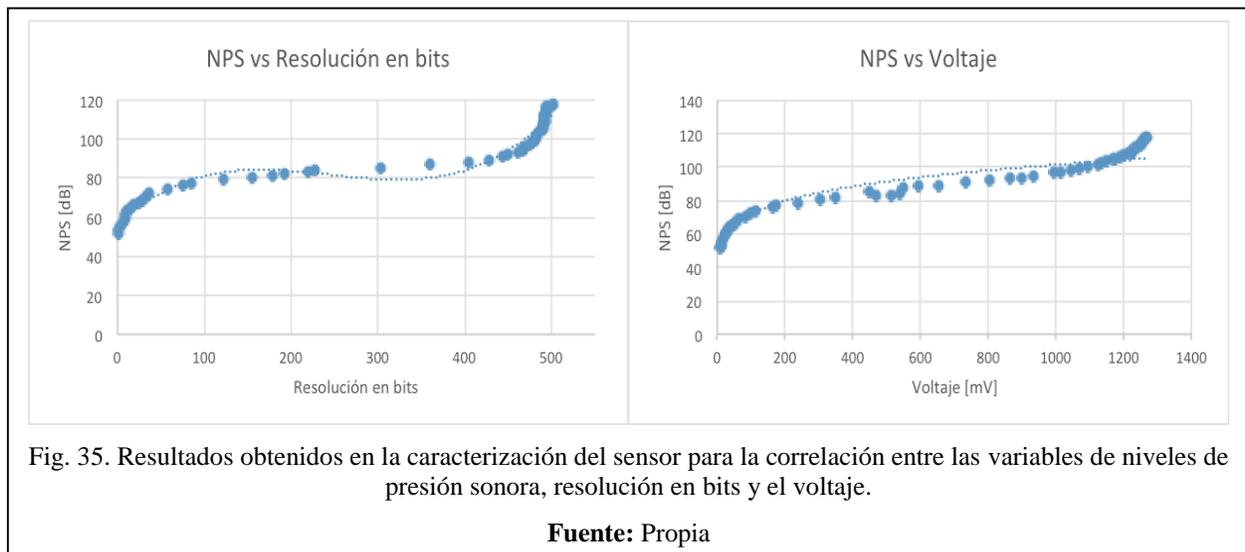
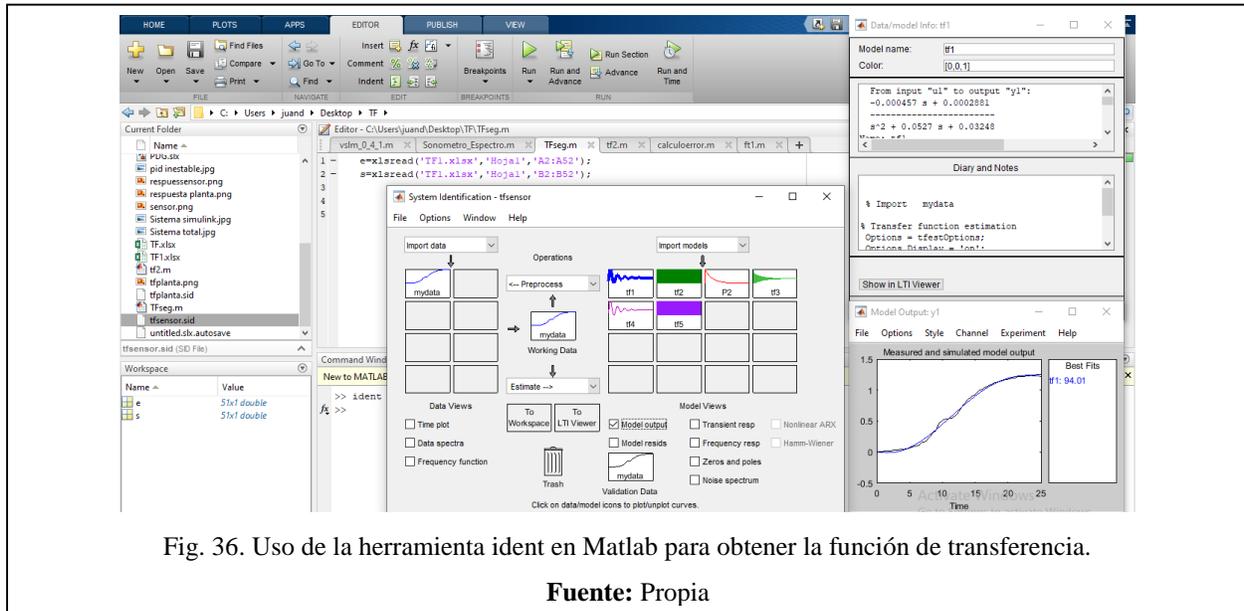


Fig. 35. Resultados obtenidos en la caracterización del sensor para la correlación entre las variables de niveles de presión sonora, resolución en bits y el voltaje.

Fuente: Propia

De acuerdo a estos resultados medidos en laboratorio, se pudo obtener una función de transferencia por medio de la herramienta *ident* e introduciendo la información obtenida de la variable acústica



de entrada  $X(s)$  (Nivel de Presión sonora) frente a la variable eléctrica de salida  $Y(s)$  (Voltios), esta información se almaceno en dos vectores diferentes los cuales son procesados por dicha herramienta en Matlab para calcular la función de transferencia que relacione la salida con la entrada de este subsistema, se configuro para crearla con dos polos y un cero como se puede ver en (8), lo que otorgo una correlación de 94 % como se muestra en el gráfico a la derecha de la Fig. 36; dicha función obtenida es la siguiente:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{-0.000457s + 0.0002881}{s^2 + 0.0527s + 0.03248} \quad (8)$$

La respuesta de esta función de transferencia a una entrada escalón, nos permitió encontrar el tiempo de estabilización y asentamiento a su punto de equilibrio, que en este caso es el valor de uno y le tomó entre los 150 y 200 segundos en estabilizarse, un poco más tardío que el tiempo de estabilización de la planta, como se puede observar en la Fig. 37; lo cual le añade un poco más de complejidad al diseño del sistema total para mantenerlo en un nivel de equilibrio constante.

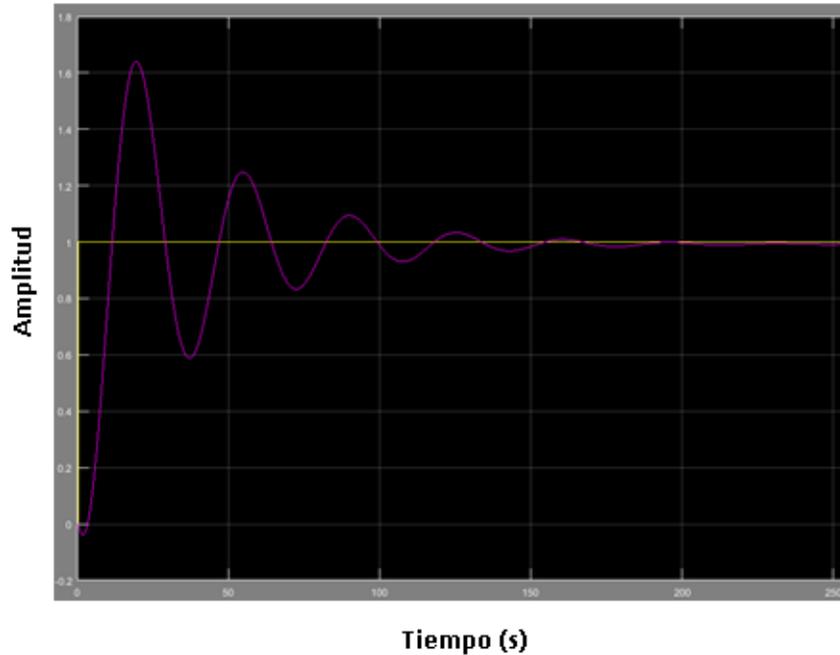


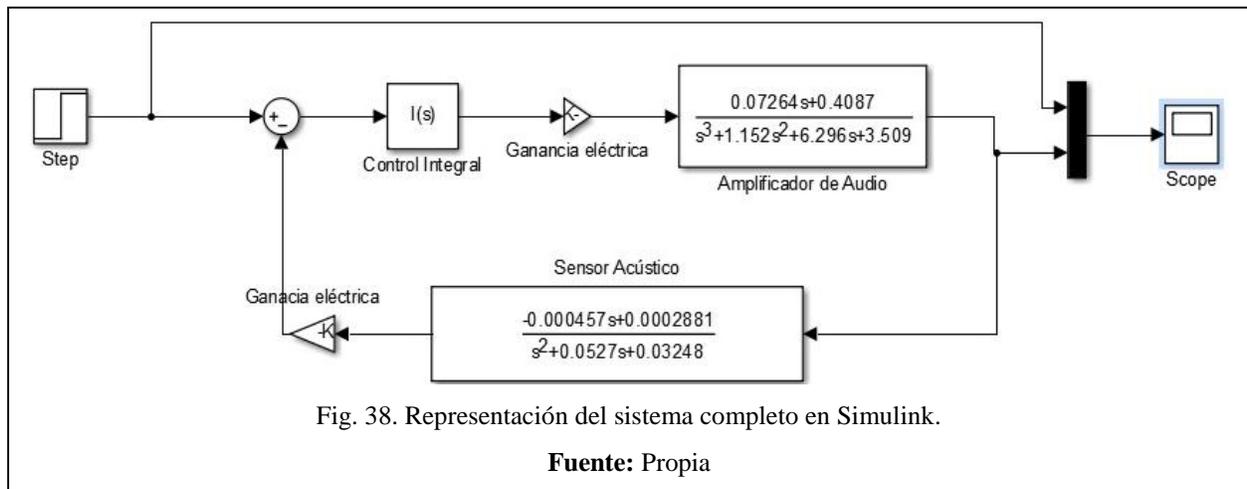
Fig. 37. Respuesta de la función de transferencia del sensor.

Fuente: Propia

### ***3) Diseño del sistema de control integral***

Para llevar a cabo el diseño del sistema, se usaron tecnologías ya existentes en el mercado, las cuales fueron descritas más a fondo en los antecedentes del Capítulo II; microprocesador Arduino, sensor analógico de sonido DFR0034, chip integrado PT2256, amplificador PAM8403 y el algoritmo de detección y control a partir del código que se ejecutara en el microprocesador ATMEGA de Arduino.

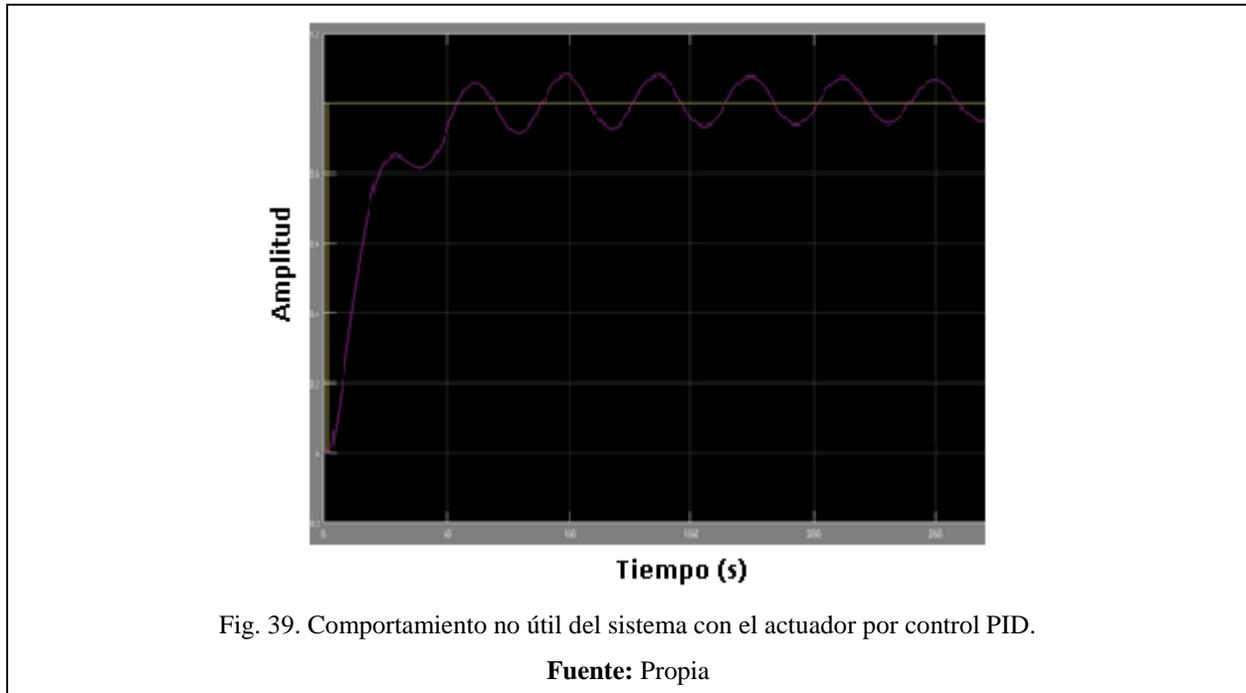
Para crear el diseño del sistema completo, se ejecutó una simulación en el software Matlab con la herramienta *Simulink*, dicha simulación contiene las funciones de transferencia halladas anteriormente, el controlador integral y unos puntos de ganancia para ayudarle a la señal a estabilizarse más rápido debido a la respuesta un poco lenta del sensor. En la Fig. 38 se observa la simulación que representa el sistema que se desea montar de manera física, con el cual se ejecuta la detección de la variable acústica en decibeles y se ejerce el control sobre variable eléctrica en voltaje.



Teniendo el sistema simulado totalmente en el software *Simulink* y tras varios ajustes del controlador por medio de la opción *tune* en la herramienta del *control PID*, como se muestra en la Fig. 39; se llegó a la conclusión de manera experimental que el controlador más óptimo para la estabilización del sistema era un control del tipo integral *I(s)*, ya que con este tipo de control se asegura el menor error entre el punto de estabilidad y la señal de entrada, que para este caso experimental en laboratorio es una función de tipo escalón.

Antes de obtener el valor preciso para sintonizar nuestro control *PID* hicimos varios intentos con diferentes tipos de control en funcionamiento, tanto *P* (proporcional), como *PI* (proporcional integral) y *PD* (proporcional derivativo), y hallamos que con estos era muy complicado llegar a un valor de estabilidad útil y coherente con el tipo de señal que se quiere controlar. En la Fig. 40 podemos observar el comportamiento oscilatorio de la respuesta al sistema ante una entrada de tipo escalón y con unos valores de sintonización que no ajustaban la respuesta de manera correcta;

además se ve como los valores de la línea morada permanecían oscilando por periodos muy largos de tiempo y no se estabilizaban en el punto de referencia de la línea amarilla.

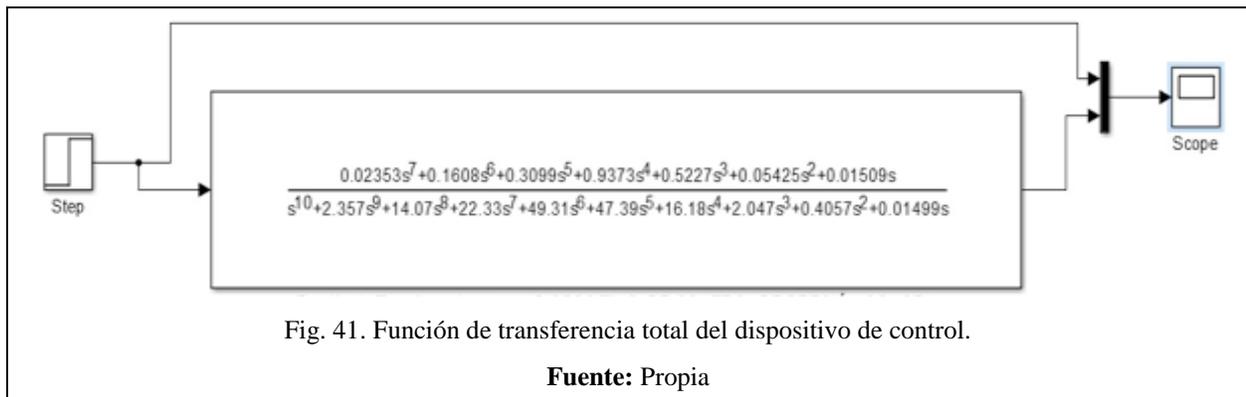


Por esta razón se decide usar el control de tipo solo *Integral I(s)*, ya que este estabiliza el sistema de manera más efectiva y rápida. Dado a que este proyecto en su gran parte es de tipo experimental e investigativo, decidimos en este punto, pasar a la siguiente etapa de acuerdo a los resultados hallados en el laboratorio y al tiempo que se dispuso para la resolución del mismo; en caso de no llegar al resultado más óptimo esperado, se espera otorgar con la culminación del diseño del

prototipo limitador, un avance a los grupos de investigación de la universidad interesados en este tipo de invenciones y en el tema de la mitigación de las emisiones de ruido ambiental de la ciudad.



Al tener la función de transferencia de cada uno de los subsistemas y la función de transferencia del controlador de tipo Integral, se procede a determinar matemáticamente una función de transferencia total mostrada en la Fig. 41 obtenida por medio de unos cálculos realizados en el software Matlab, como se observa en la Fig. 42; dicha función total permitió simular el comportamiento de la respuesta transitoria a la salida del sistema después de haberlo ajustado y diseñado completamente.



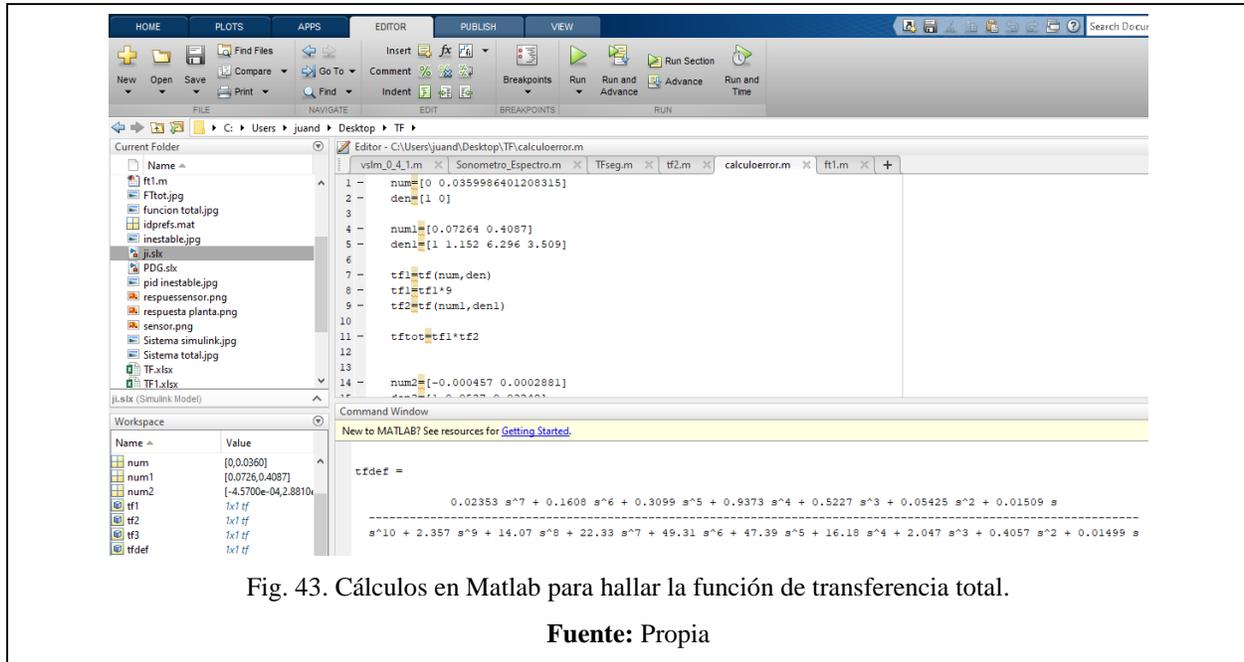


Fig. 43. Cálculos en Matlab para hallar la función de transferencia total.

Fuente: Propia

Al tratarse de un ruido aleatorio como este caso particular, la música, parece haber un panorama poco favorecedor ya que para un sistema de sonido en tiempo real la respuesta transitoria es algo lenta como se observa en la Fig. 43 donde vemos el tiempo que tarda la señal para estabilizarse en el eje X, entre unos 100 a 125 segundos. Además, puede verificarse por medio de esta grafica en el eje Y de amplitud, como el sistema toma casi 50 segundos en llegar a un 80% del nivel de referencia establecido, lo cual, ya es algo un poco más positivo a tener en cuenta, sin embargo, este

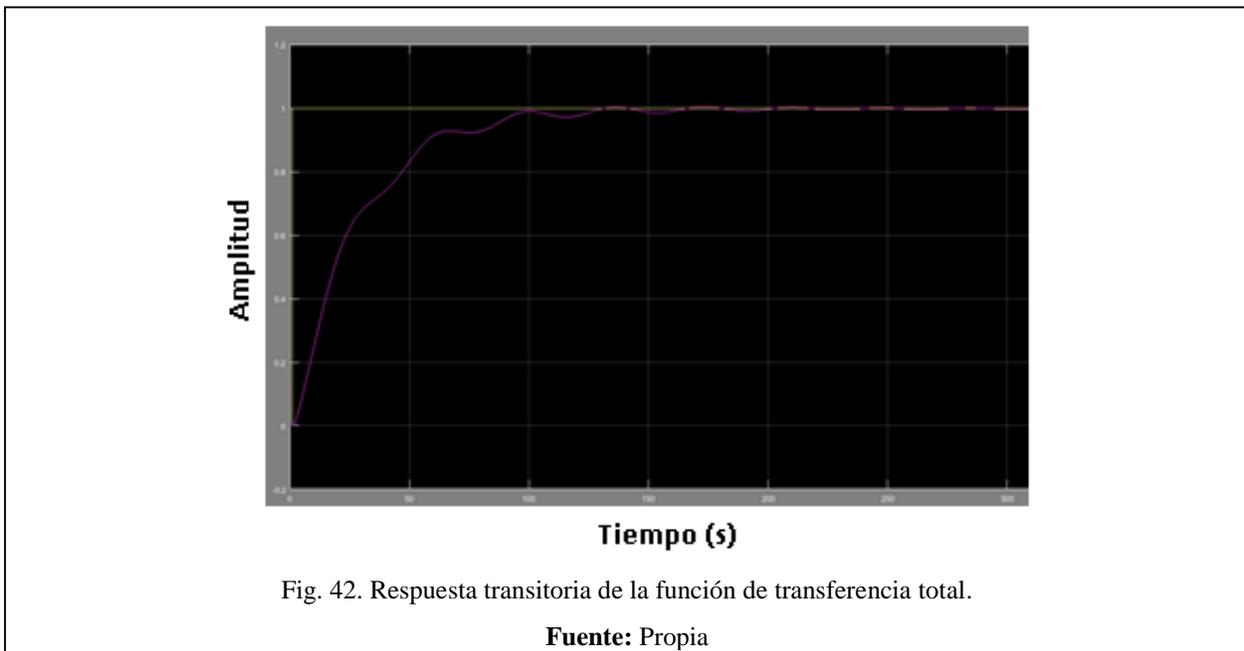


Fig. 42. Respuesta transitoria de la función de transferencia total.

Fuente: Propia

tiempo de estabilización podría mejorarse aún más, aumentando el tiempo promedio de detección que realiza el algoritmo sobre la señal acústica, para que este concuerde con el tiempo de respuesta del sistema y no se haga un diseño inservible por su respuesta algo lenta.

#### ***4) Prueba de funcionamiento del control integral con la plataforma Arduino***

Para la prueba del sistema de control por Arduino, se llevó a cabo el montaje en una board convencional usada para elaborar experimentos con circuitos, como se muestra en Fig. 44, los componentes necesarios para ejercer el control sobre la señal de voltaje son; microprocesador ATMEGA El cual tiene cargado el algoritmo de control diseñado previamente, circuito integrado de control automático de ganancia PT2256 para ajustar el nivel de voltaje de acuerdo a las acciones del algoritmo, un amplificador PAM8403 para mantener la señal a niveles de voltaje trabajable y por el ultimo el sensor DFR0034 el cual tendrá una gran tarea ya que deberá de estar registrando los niveles de presión sonora constantemente y será el encargado de cerrar el lazo del control realimentado.

Posteriormente se definió un nivel de referencia al cual trabajará el sistema de control el cual se basará en los niveles máximos permisibles por la Resolución 0627 para la zona donde se implementará el dispositivo, en este caso la Avenida 33, el valor máximo permitido es de 65 dBA para la jornada diurna en esta zona, en el algoritmo de control se introduce un valor de referencia

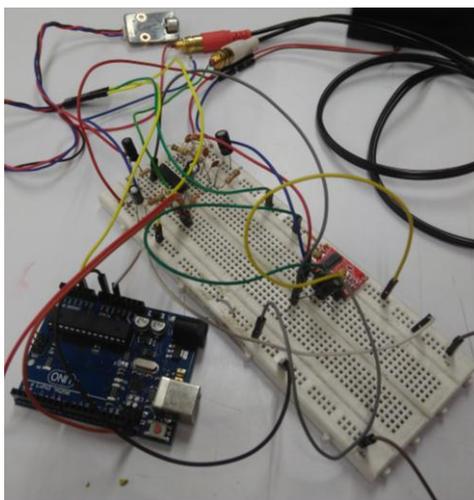


Fig. 44. Montaje experimental del sistema de control Integral.

**Fuente:** Propia

de 70 *dB*A al cual tiene que limitar el dispositivo, esto debido a que el sensor está ubicado dentro del recinto y no afuera al frente de la fachada como especifica la resolución que debe hacerse la toma de datos, por ende, habrá una atenuación por distancia de los niveles de presión sonora después de ser controlados, es por esto que se decide usar este valor de referencia; además de no afectar el confort de los usuarios que desean escuchar la música claramente sin que se afecte por las distorsiones que algún tipo de ruido de fondo pueda causar.

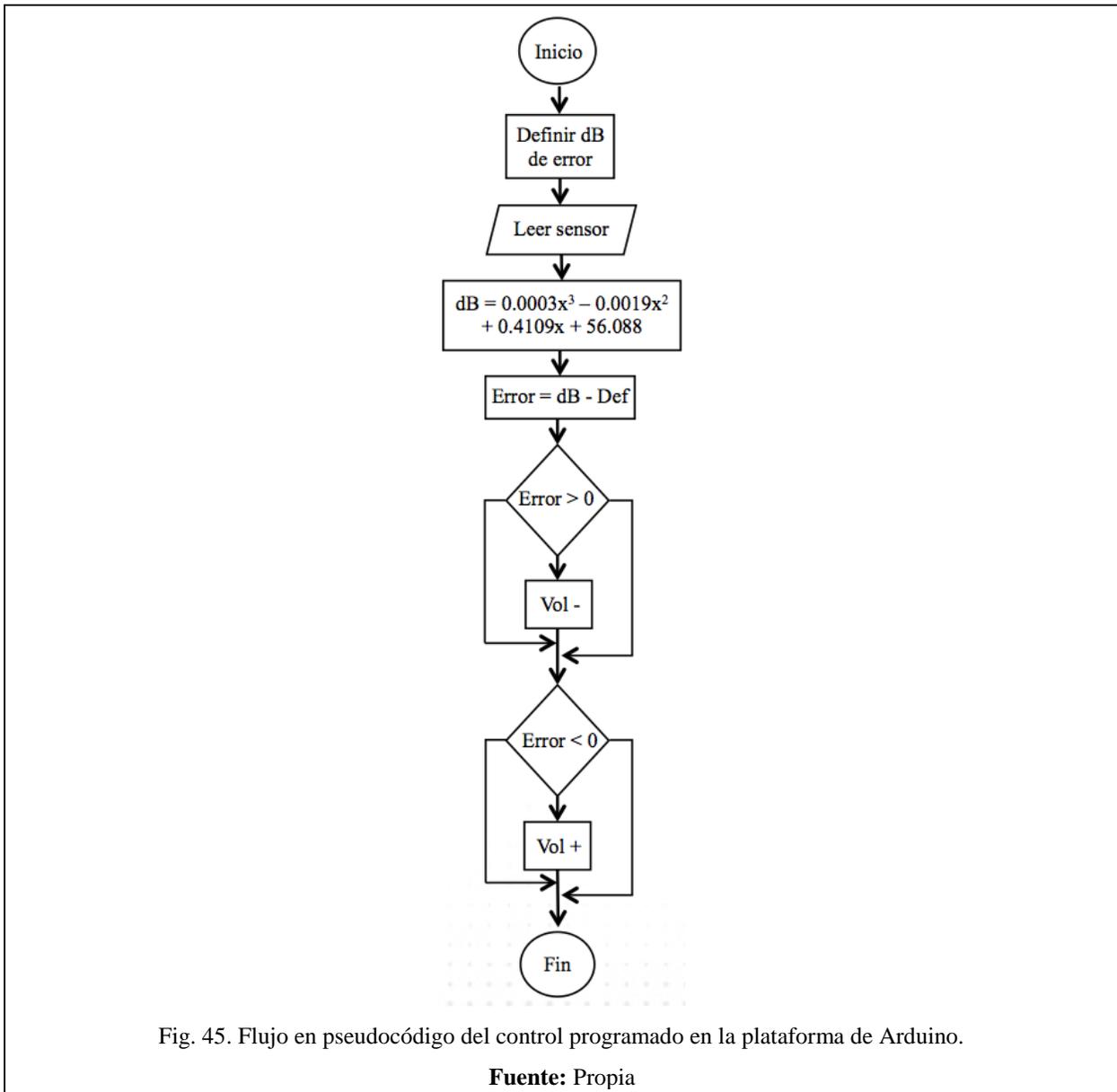


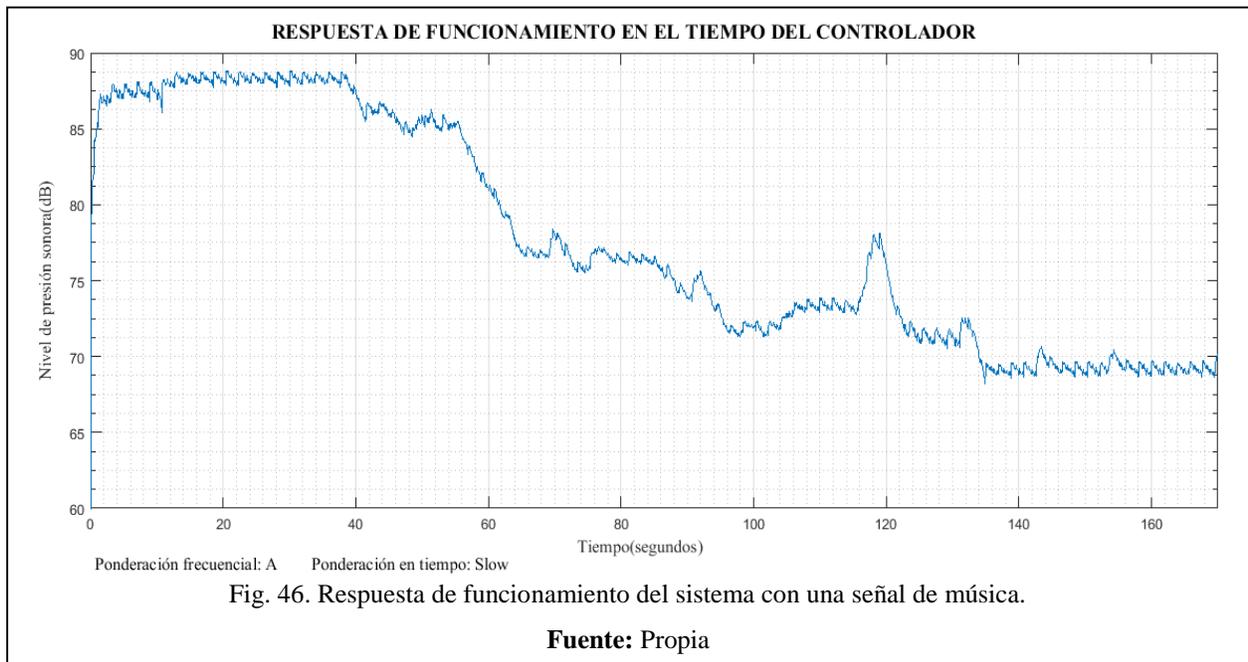
Fig. 45. Flujo en pseudocódigo del control programado en la plataforma de Arduino.

Fuente: Propia

El pseudocódigo de la Fig. 45 describe el flujo en el que el software Arduino genera el algoritmo de control de acuerdo a todos los resultados obtenidos anteriormente de manera experimental y

matemática. La generación de los parámetros de control obtenidos durante el proceso antes visto, son útiles para determinar el correcto funcionamiento del sistema de control a partir de los cambios de voltaje del sensor con respecto al nivel de presión sonora que incide sobre el mismo y limitando los cambios de voltaje a la entrada del amplificador del sistema de sonido que se desea limitar automáticamente.

Para finalizar la etapa de diseño se realizaron dos mediciones con el fin de probar el funcionamiento del dispositivo, con ruido rosa y otra con un tipo aleatorio de música, ambas mediciones se realizaron de la siguiente manera; en un recinto con condiciones parecidas a las del establecimiento comercial donde se empleará el prototipo, se ubicó un micrófono de medición para obtener los valores de presión sonora del sistema de sonido antes, durante y después de la ejecución del controlador automático ya previamente diseñado, los resultados son mostrados en las Fig. 46 y 47.

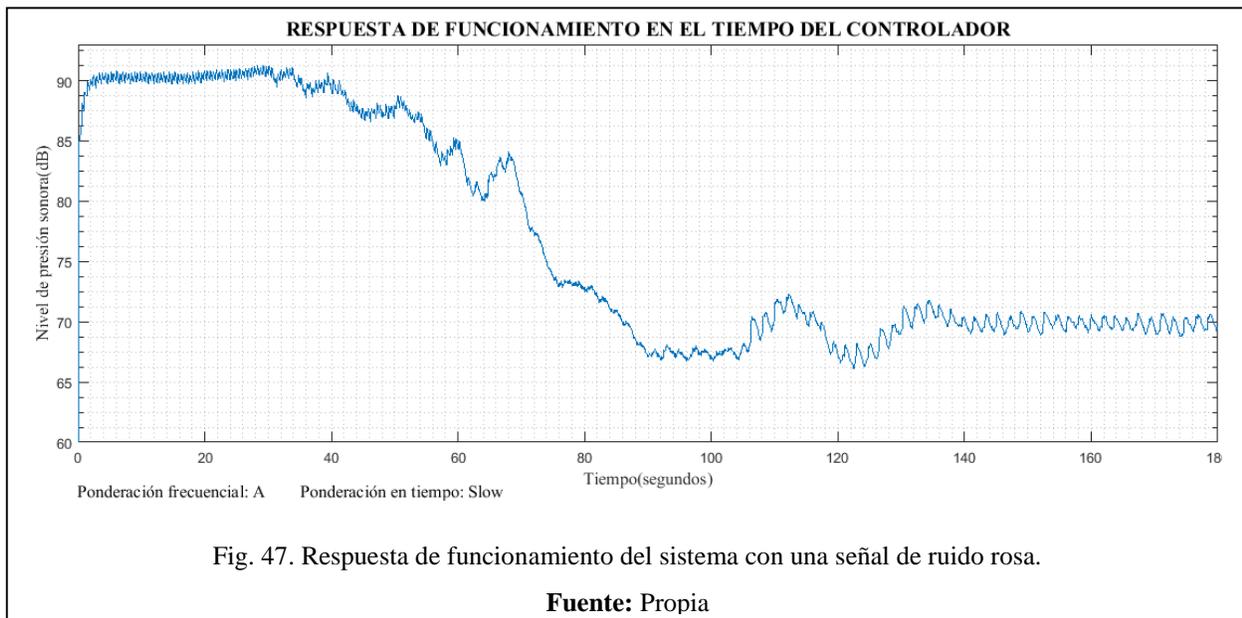


La respuesta del controlador no está muy fuera de los resultados esperados a partir de la simulación, ya que el tiempo de estabilización de la señal fue de aproximadamente 100 segundos, y como puede observarse en la fig. 46 en el transcurso de este tiempo la señal de salida controlada, sufre varias oscilaciones no deseadas, las cuales son molestas al oído del consumidor debido a que estos cambios repentinos en la señal distorsionan la reproducción de la música, sin embargo, cuando la señal logra estabilizarse después de casi 100 segundos, ya no presenta estos cambios tan abruptos

de nivel y puede escucharse de manera clara todo el contenido frecuencial de la música que está siendo limitada por el controlador.

El valor de referencia aplicado para la prueba, fue ajustado en 70 dB, debido a que el sensor no se ubicó afuera del recinto, por lo contrario, se ubicó al interior, cerca al altavoz para tener una mayor sensibilidad, esto también con el fin de tener en cuenta la pérdida por distancia que sufre la señal acústica, como se había explicado anteriormente, desde el momento que se propaga en el altavoz hasta la emisión que se propaga hacia el medio ambiente.

En la fig.47 se observa como la señal acústica de salida en este caso una señal de ruido rosa, se comporta de manera un poco más estable, debido a que, en el lapso de tiempo, mientras que la señal trata de estabilizarse, esta, no sufre tantas oscilaciones como sucede en el caso en que se opera el controlador con música en vez de ruido rosa.



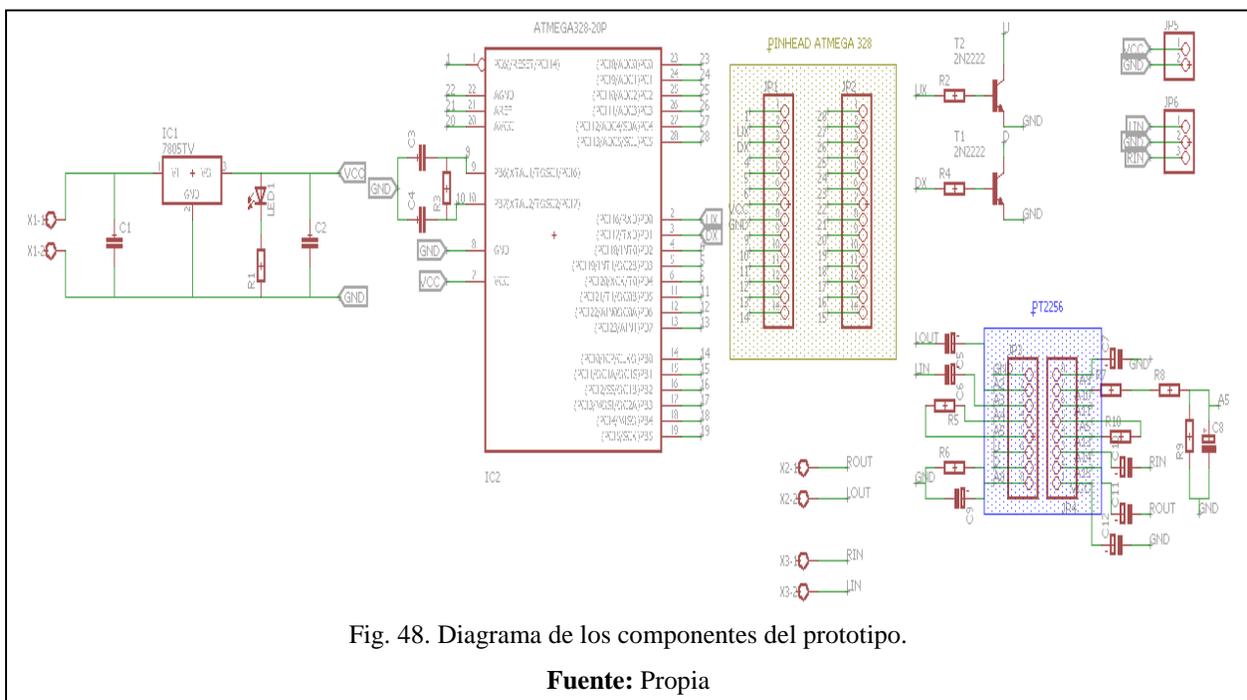
### *C. Implementación del dispositivo en el establecimiento comercial*

Con el fin de dar trámite a la fase 3 de la metodología, inicialmente se diseñó la tarjeta PCB donde se instalaron los componentes del sistema, posteriormente se construye sobre un chasis el prototipo del dispositivo y se realizan pruebas de este en el laboratorio de la universidad para corregir las

anomalías que pueda presentar cuando se esté operando el limitador en condiciones de funcionamiento real, finalmente se establece formalmente con el propietario del establecimiento una fecha exacta para llevar a cabo la instalación del prototipo en el bar. Para la realización de esta etapa se llevaron a cabo las siguientes tareas:

### 1) Construcción del prototipo de control automático

En el software Schematic se realizó el esquema y la simulación del diseño planteado, y con esto se determinó que el montaje del circuito no tenía problemas en cuanto el flujo interno del voltaje sobre los componentes, después se creó el diagrama de los componentes que incluye el prototipo usando las librerías con las que cuenta el software, como se muestra en la Fig. 48, seguido a esto, se realizó la etapa de *Black Board* donde los componentes incluidos por medio de la librería se enrutaban y se ubican de tal forma que el diseño sea lo más pequeño y estético posible.



Posteriormente en el software Eagle se diseña lo que serán las pistas para el flujo de la señal en tarjeta impresa llamada PCB, por las siglas que significan Placa de Circuito Impreso, como se

muestra en la Fig. 49. De esta manera se avanzó en el desarrollo para la construcción electrónica del prototipo de control de la presión sonora.

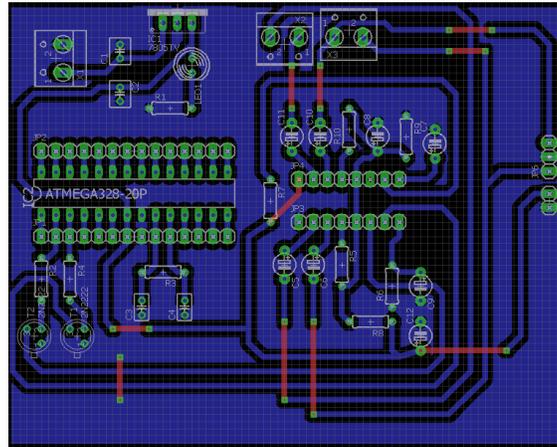


Fig. 49. Pistas del flujo de señal en la tarjeta PCB.

**Fuente:** Propia

Luego de tener un diseño funcional y estético, se lleva a cabo la impresión de la placa virgen de fibra de vidrio y se soldaron todos los componentes que hacen parte del dispositivo. Luego se procede a montar esta placa ya armada sobre un chasis virgen con sus respectivos puertos de entrada y de salida de la señal de audio junto con los tres puertos de entrada para los sensores de presión sonora (Fig. 50).

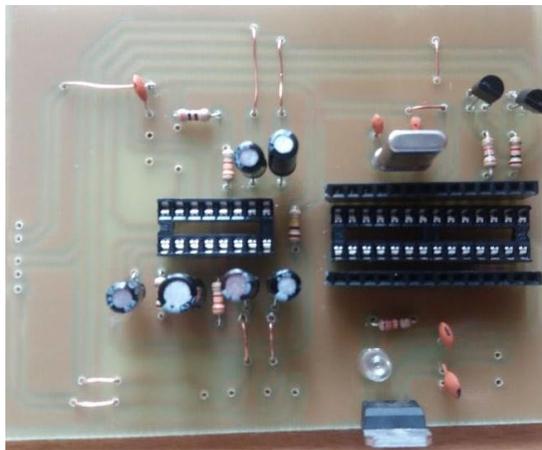


Fig. 50. Impresión en la placa virgen de fibra de vidrio.

**Fuente:** Propia

Finalmente, como se muestra en la Fig. 51, se obtuvo un modelo del prototipo más robusto para poder ser implementado en el establecimiento comercial en el cual se pretende controlar las emisiones de ruido.

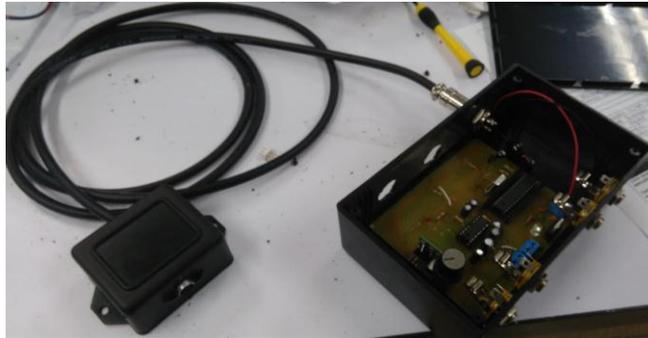


Fig. 51. Modelo del prototipo.

**Fuente:** Propia

Seguido de este proceso, se definió la fecha de prueba del prototipo limitador de presión sonora, bajo una petición formal al dueño del establecimiento, en la cual se le pide de manera muy respetuosa, nos permita usar las instalaciones y sus equipos del sistema de sonido para realizar una prueba en campo del funcionamiento del diseño mostrado anteriormente y tomar todos los datos necesarios para generar un reporte acerca del funcionamiento del limitador.

## ***2) Ajuste de sensibilidad de acuerdo a las características de atenuación deseadas***

El dispositivo cuenta con un potenciómetro, como se muestra en la Fig. 52, el cual gradúa los pasos por porcentaje de la atenuación de los niveles sobrepasados por el sistema de sonido, al efectuarse el control automático. Para realizar dicho ajuste se ubicó el potenciómetro a un porcentaje específico calculado por tanteo en el establecimiento comercial al momento de utilizar el dispositivo, con el fin de que no fuese muy brusco el cambio de los niveles de presión sonora que están siendo atenuados por el dispositivo en acción.

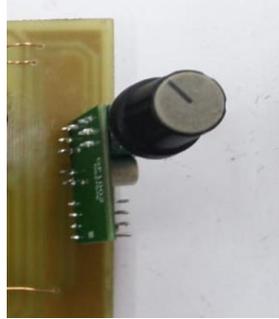


Fig. 52. Potenciómetro para ajustar la sensibilidad del limitador.

**Fuente:** Propia

### 3) Diagrama de flujo de la cadena electroacústica con el prototipo limitador

Al tener construido el prototipo del dispositivo en un modelo más compacto y después haber acordado la fecha de la implementación con el propietario del establecimiento, se procede a construir un diagrama de bloques para especificar en qué etapa de la amplificación del sistema de sonido debe instalarse el limitador (Fig. 53), de tal manera que opere de manera correcta en el establecimiento comercial.

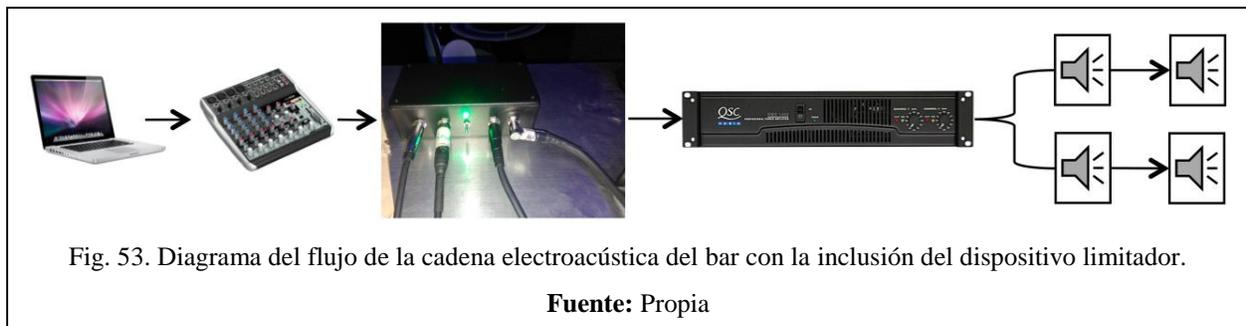


Fig. 53. Diagrama del flujo de la cadena electroacústica del bar con la inclusión del dispositivo limitador.

**Fuente:** Propia

### 4) Instalación del prototipo

Para llevar a cabo la instalación del limitador se usaron cables de tipo TS para el transporte de la señal tanto de entrada como salida dentro de la cadena electroacústica, seguido a esto se instaló el sensor de sonido en el techo del bar como se muestra en la Fig. 54 se ubicó de esta forma debido a la manera en la que se encuentra distribuido el sistema de sonido, con el fin de que este recibiera

de manera correcta la señal acústica producida por los altavoces y para que registrara los niveles de presión sonora de manera correcta dentro del recinto donde se implementó el prototipo.



Fig. 54. Registro fotográfico de la implementación del dispositivo en el establecimiento comercial.

Fuente: Propia

#### ***D. Validación de los niveles de presión sonora después de la implementación del dispositivo***

Para el cumplimiento del cuarto objetivo específico, validación de los niveles de emisión de ruido ambiental después de incorporar el prototipo del dispositivo en el establecimiento comercial, se pretende realizar una comparación entre los niveles máximos permitidos por la Resolución 0627 del 2006 del Ministerio de Ambiente y los niveles medidos in situ por el sonómetros de Clase 1 siguiendo los lineamientos para la medición en campo de un foco de ruido puntual, expuestos por la ISO 1996-2 de 2007. Se presentó el resultado de las mediciones con un nivel energético total  $L_{Aeq}$ , para compararlo con el nivel de referencia al que fue configurado el sistema como punto de limitación y con los valores totales de la medición realizada en la primera etapa de la metodología tanto al interior como al exterior del establecimiento.

### ***1) Medición en fachada según la Resolución 0627 con el dispositivo en funcionamiento***

Al tener el prototipo construido, se procedió a usarse en el establecimiento comercial que presenta problemas de altas emisiones de ruido y que se encuentra en medio de viviendas a las que está perjudicando, estas emisiones son las que se quieren controlar por medio del dispositivo; en la Fig. 55 se observa cómo se realizó la medición acústica en el establecimiento después de implementar el dispositivo y la ubicación final del sensor donde este operaba de la manera más eficiente, esto con el fin de comprobar que el nivel de presión sonora promedio total con el dispositivo en funcionamiento, este bajo el nivel máximo permitido por la norma de emisión de ruido ambiental en Colombia.



Fig. 55. Medición final como verificación del funcionamiento del limitador.

**Fuente:** Propia

Los datos técnicos de la medición realizada se presentan en la Tabla XI mostrada a continuación, al final de esta, pueden verificarse los niveles de presión sonora, en la medición número uno y dos se registran los valores al interior del establecimiento y en la medición número tres y cuatro los niveles de emisión al exterior del establecimiento; las mediciones fueron realizadas de cuatro minutos cada una, justo después del momento es que se estabiliza el controlador, esto con el fin de obtener los datos en los momentos con menos cambios en la señal de salida y por ende obtener la menor dispersión total en los resultados del funcionamiento del prototipo limitador.

TABLA XI. FICHA DE INFORMACIÓN DE LA MEDICIÓN ACÚSTICA USANDO EL DISPOSITIVO

<b>NOMBRE</b>	Aky Nos Vemos			
<b>DIRECCIÓN</b>	Avenida 33 # 66B – 44			
<b>TELÉFONO</b>	312 215 4967			
<b>ACTIVIDAD</b>	Discoteca			
<b>TIPO DE RUIDO</b>	<b>EST</b>	<b>FLUCT</b>	<b>IMPREV</b>	
<b>RUIDO DE FONDO</b>	<b>ALTERA</b>		<b>NO ALTERA</b>	
<b>TIPO DE RUIDO DE FONDO</b>	Música + Tráfico vehicular			
<b>PRINCIPAL FUENTE DE RUIDO</b>	Sistemas de sonido			
<b>IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN</b>	<b>MARCA</b>	CESVA		
	<b>MODELO</b>	SC 310		
	<b>Nº SERIE</b>	T232231		
<b>TEMPERATURA [°C]</b>	26			
<b>HUMEDAD RELATIVA [%]</b>	63			
<b>FILTRO DE PONDERACIÓN</b>	dB(A)			
<b>RESPUESTA DEL SONÓMETRO</b>	<b>SLOW</b>	<b>FAST</b>	<b>IMPULSE</b>	
<b>CALIBRACIÓN IN SITU</b>	<b>ANTES</b>	<b>DURANTE</b>	<b>DESPUÉS</b>	
<b>NOMBRE DEL OPERADOR</b>	Juan Diego Montoya Lopera Santiago Ramírez Sánchez			
<b>TIPO DE ZONA</b>	<b>RESIDENCIAL</b>			
	<b>COMERCIAL</b>			
	<b>MIXTA</b>			
	<b>INDUSTRIAL</b>			
<b>FECHA DE LAS MEDICIONES</b>	24 / 11 / 2018			
<b>HORA DE INICIO DE LAS MEDICIONES</b>	7:30:48 p.m.	7:50:07 p.m.	8:15:37 p.m.	8:40:12 p.m.
<b>TIPO MEDICION</b>	Nº1 Al interior	Nº2 Al interior	Nº1 Al exterior	Nº2 Al exterior
<b>DURACIÓN POR MEDICIÓN</b>	4 minutos			
<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b>Nivel [dB]</b>			
20	18.7	15.4	14.6	16.4
25	20.7	20.5	19.3	18.6
31,5	22.3	28.4	21.5	22.5
40	26.6	32.6	23.7	26.8
50	34.3	38.4	24.8	27.4
63	36.1	49.6	28.7	30.5

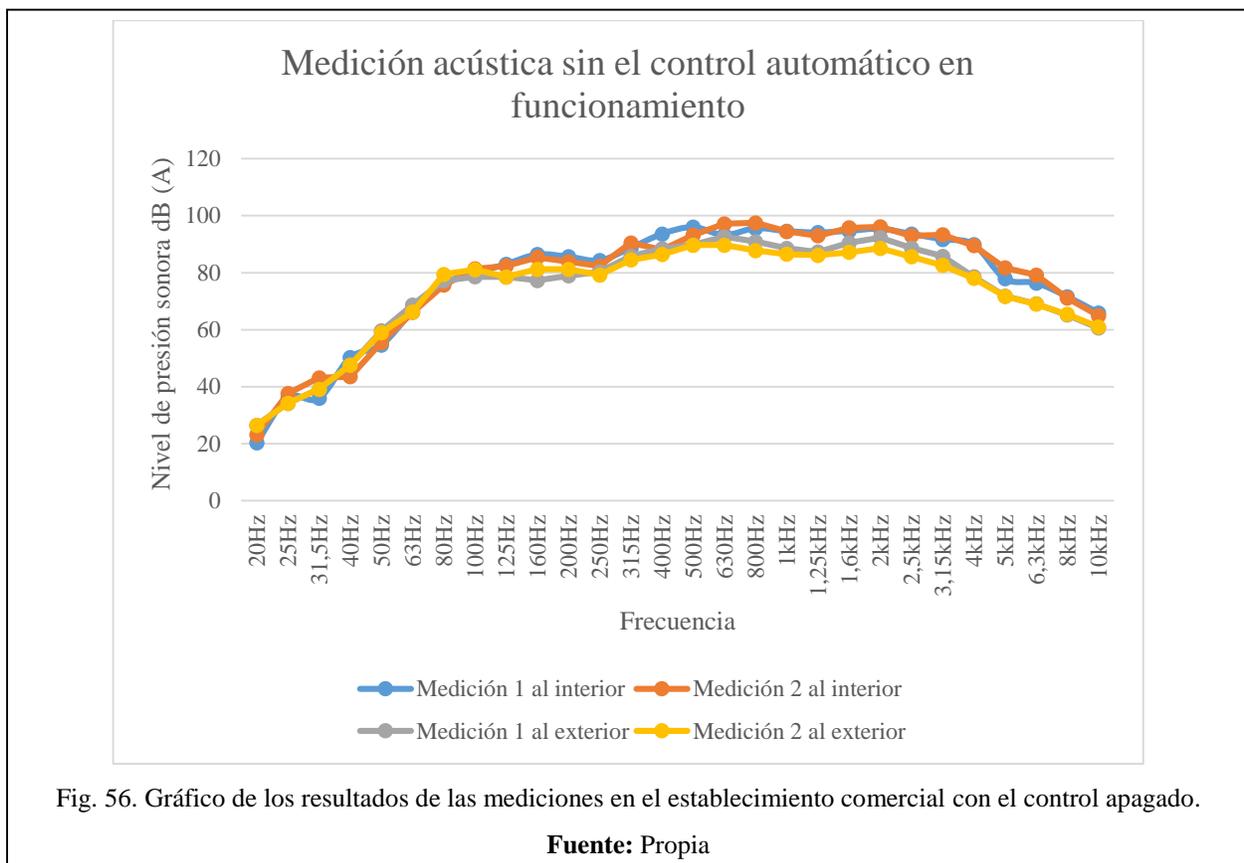
80	37.6	53.5	30.7	35.9
100	38.6	58.2	31.3	40.6
125	40.5	59.7	35.7	41.4
160	44.5	61.2	38.3	45.8
200	53.7	63.7	41.6	44.5
250	61.4	64.9	43.6	46.1
315	57.9	62.8	45.7	49.8
400	63.2	61.4	47.4	52.6
500	64.7	63.2	52.7	54.7
630	62.8	64.3	54.7	55.9
800	65.6	65.7	56.8	58.2
1000	64.8	64.7	57.1	61.3
1250	65.4	66.4	59.4	60.2
1600	67.4	65.7	61.7	62.4
2000	63.8	66.3	63.3	63.7
2500	65.2	65.4	62.9	62.6
3150	67.2	66.4	62.5	61.9
4000	66.3	67.4	63.4	65.7
5000	63.7	65.3	61.2	64.2
6300	64.9	63.6	62.3	61.6
8000	66.2	64.5	61.5	64.5
10000	54.7	51.5	50.1	51.7
$L_{AeqR_{Tot}}$ (dB)	76.9	77.6	72.2	73.5
$L_{Aeq_{corregido}}$ promedio (dB)	77.3		72.9	
$L_{Aeq_{Residual}}$ (dB)	71			
$L_{Aeq_{emisión}}$ (dB)	77.3 (interior)		72.9 (exterior)	

Nota: Fuente, elaboración propia.

## 2) Comparación de los niveles permitidos por la Resolución y los niveles de la medición

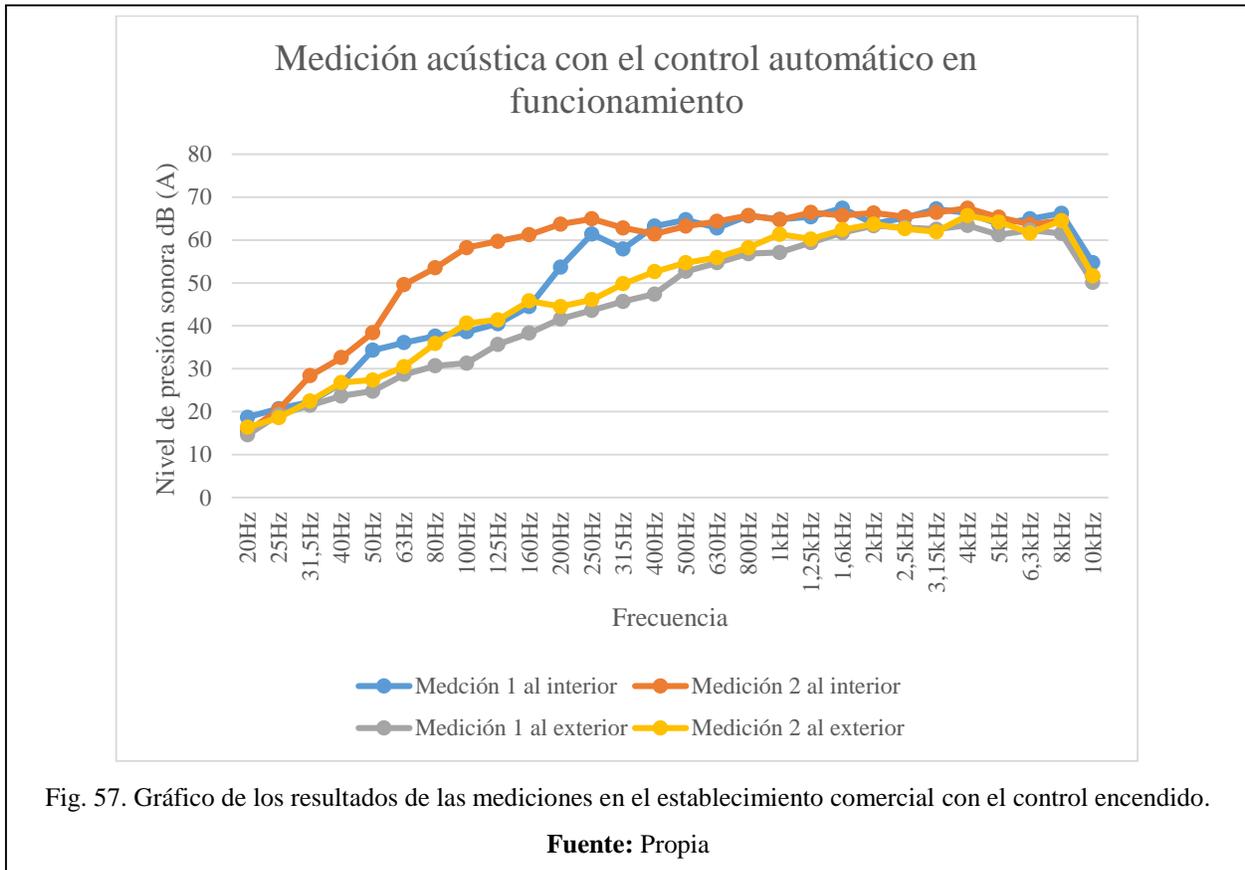
De los resultados obtenidos anteriormente se extrajeron unos valores de comparación entre el nivel permitido por la norma y el nivel registrado en la medición in situ con el dispositivo en funcionamiento, de allí se determinó la precisión con la que opera el control automático de acuerdo a los datos obtenidos tras el funcionamiento del prototipo.

Teniendo en cuenta que el valor de desviación estándar de los resultados obtenidos en los mapas de ruido hechos en el sector de la Avenida 33 y presentados en la primera fase de la metodología es de  $\pm 5 \text{ dB(A)}$ , este deberá ser un margen a tener en cuenta para el análisis de los datos de las mediciones acústicas frente al valor máximo permitido por la norma colombiana y el punto de limitación de las emisiones de presión sonora generadas dentro del establecimiento.



En el gráfico de la fig. 56 se observa la curva de respuesta en decibeles para las cuatro mediciones realizadas antes de la instalación del dispositivo, se realizaron dos mediciones al interior del recinto cada una de quince minutos, lo mismo para las otras dos mediciones al exterior del recinto; en el

grafico vemos claramente como los niveles de las frecuencias desde 100Hz hasta casi los 4000Hz superan los 80 dB en ponderación A, lo que indica que las emisiones antes de instalar el controlador en el establecimiento comercial son altas y están sobrepasando los niveles máximos permisibles en gran parte del componente espectral de las medición realizadas.

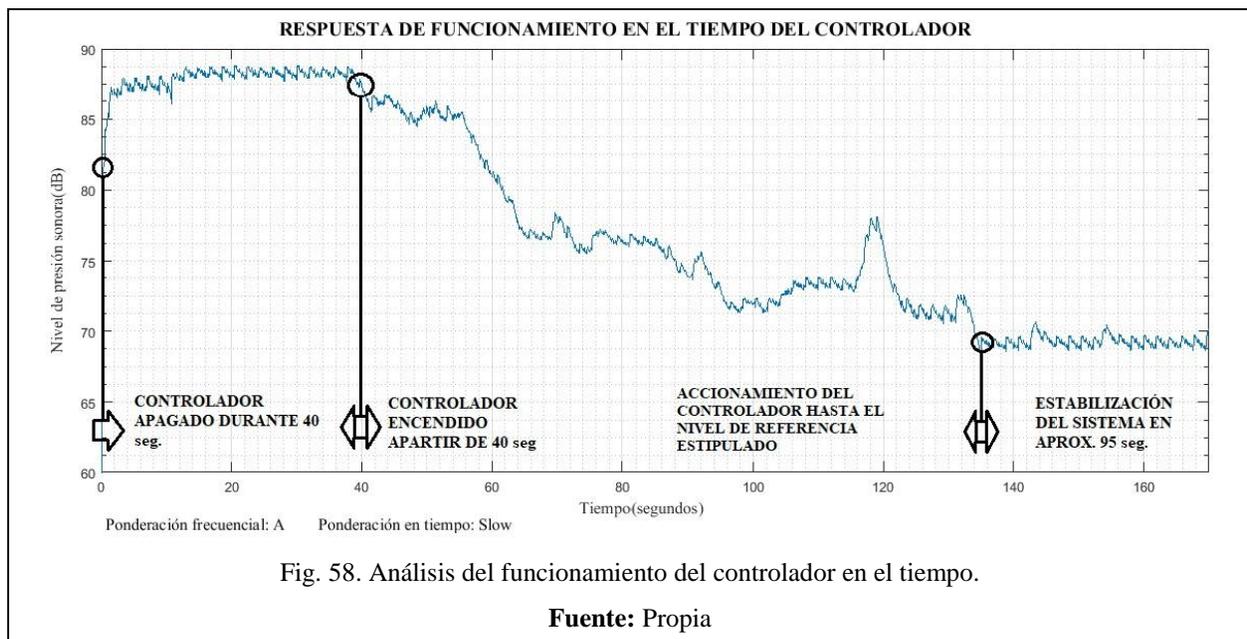


Por el contrario, en el gráfico de la fig. 57, tenemos el comportamiento frecuencial de la medición acústica realizada al momento de probarse el prototipo del dispositivo limitador. Como se observa los niveles en ponderación A, presentan una reducción considerable, logrando una atenuación de casi  $15\text{ dB}$ , después de haber definido  $70\text{ dBA}$ , en el algoritmo de control, como punto de limitación del sistema y dado a que estas mediciones fueron realizadas en el horario diurno y teniendo en cuenta las atenciones por distancia, se considera un resultado bastante útil debido al pequeño margen que existe entre el nivel  $L_{Aeq}$  total medido al exterior del establecimiento, aproximadamente  $72.9\text{ dBA}$  y el valor de referencia al que fue sometido el controlador, esto sin

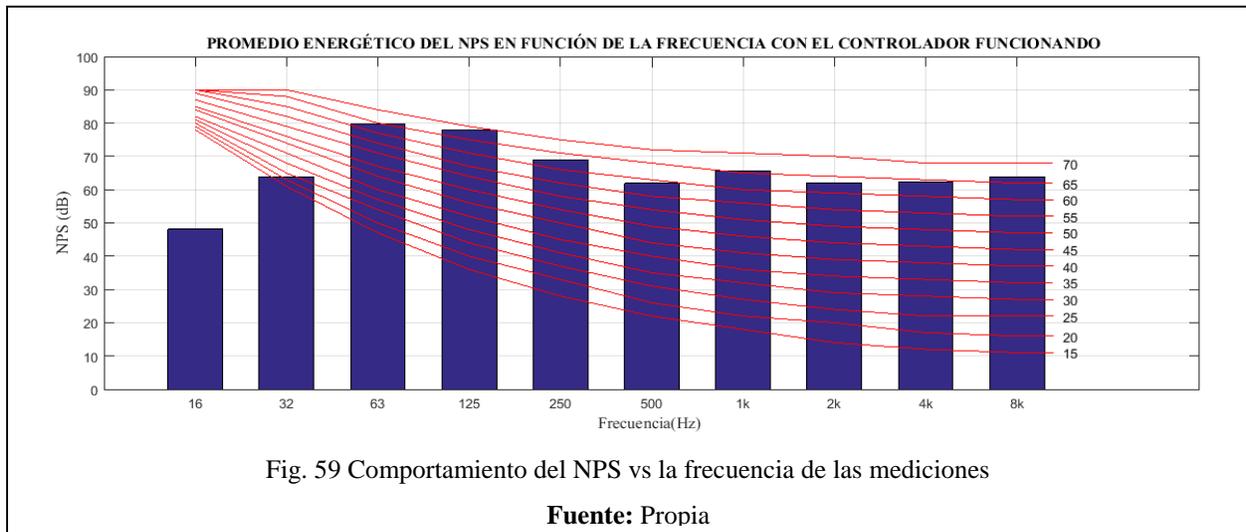
contar con las distorsiones que pudo haber sufrido esta medida, a causa del tráfico o de las conversaciones de las personas que encontraban allí al momento de la toma de los datos.

### 3) Diagnostico del funcionamiento del prototipo

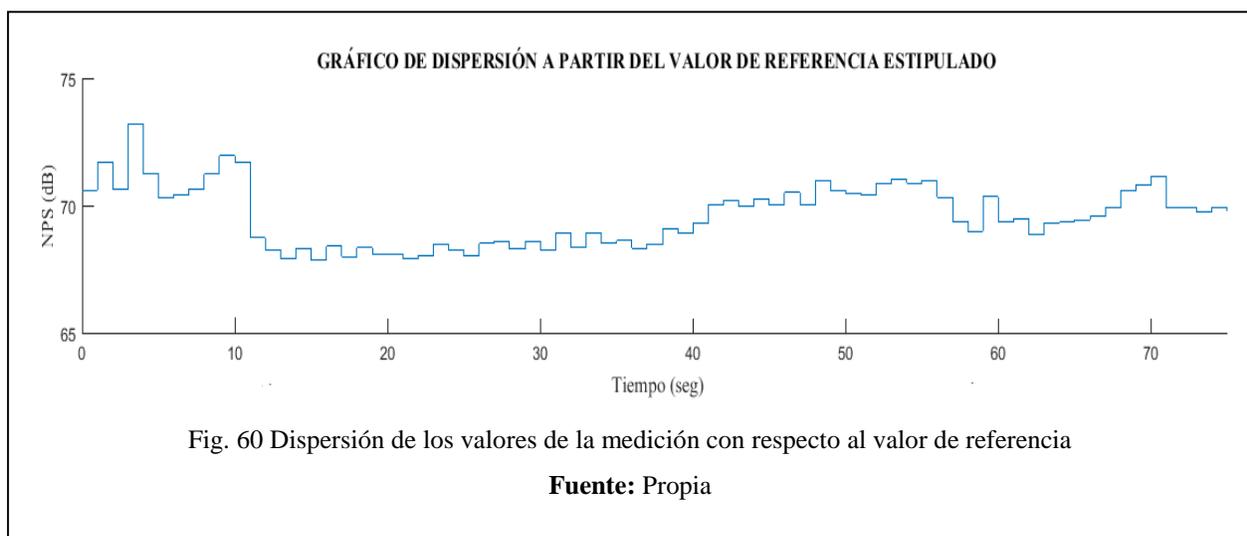
Un diagnóstico acertado del funcionamiento, se estableció presentando unos valores en segundos, estos con el fin de dar una descripción más detallada sobre el comportamiento en la variable acústica a la salida del prototipo ya construido previamente.



Dado a que el prototipo construido al probarse en el establecimiento presento las mismas características de oscilación en la señal acústica de salida que cuando se probó el funcionamiento del diseño por Arduino en el laboratorio, se establecen unos valores que determinan el comportamiento del controlador a partir de la graficas de la fig. 58 y de la fig. 60. El tiempo de estabilización se encuentra aproximadamente entre los 95 y 100 segundos, como se observa en la fig. 58 el controlador se encendió a los 40 segundos y tardo casi hasta los 135 segundos para dejar de oscilar y ubicar la señal acústica en el valor de referencia de estipulado en este caso 70 dB, Sin embargo, también se observó un comportamiento oscilatorio muy pequeño después de estabilizarse a partir de los 135 segundos, pero este comportamiento no afecto de manera audible la señal acústica de salida.



Las cuatro mediciones acústicas realizadas con el controlador funcionando se promediaron energéticamente para dar como resultado el gráfico de la fig. 59, del cual se determinó que la respuesta frecuencial de la señal acústica de salida controlada, se mantiene entre los valores de 65 y 70 dB para las frecuencias a partir de 250 Hz; esto muestra un panorama mucho más alentador con respecto al cumplimiento de los niveles máximos permisibles por la norma se refiere; además este gráfico demuestra que el diseño implementado no ejerce un control muy adecuado sobre las frecuencias bajas, aproximadamente entre los 32 y 125 Hz.



Con los valores obtenidos tras la medición acústica, se creó el gráfico de la fig. 60, el cual contiene los datos de dispersión de dichos valores medidos frente el valor de referencia estipulado en el algoritmo, en este caso 70 dB, por consiguiente, la dispersión de los datos muestreados cada un segundo sobre la señal acústica de salida, permitió determinar que la precisión del funcionamiento del dispositivo es de aproximadamente  $\pm 2.4$  dB; siempre y cuando se tenga en cuenta que este valor fue determinado en el momento justo después en que el controlador se estabiliza y hasta el momento en que tiene que realizar una nueva limitación de los niveles de presión sonora emitidos por el sistema de sonido.

Tras varios minutos de uso del dispositivo y después de realizar las mediciones se dejó por un tiempo más el prototipo instalado para ver como reaccionaba en un tiempo prolongado de uso y se descubrió que el diseño comenzaba a sobrecalentarse de manera anormal, esto podría deberse a la falta de una etapa de regulación de potencia en los niveles de voltaje que ingresan en el controlador.

## X. DISCUSIÓN

Durante el proceso de investigación para el desarrollo del prototipo, se descubrió que la normatividad está siendo violada en cerca de un 91% por los diferentes establecimientos comerciales (bares y restaurantes) de dicho sector, esto, con el agravante de que los entes encargados del gobierno municipal no han ejercido un control eficaz para proteger y garantizar a la comunidad sus derechos frente a la problemática de contaminación auditiva actual.

Este impacto negativo evidenciado durante la investigación, el cual en gran parte es competencia de los estamentos gubernamentales encargados del control, hace que la necesidad de la implementación de prototipos para control automatizado sea mayor, ya que sería una herramienta sumamente útil al momento de garantizar a la población más vulnerable, el respeto hacia sus derechos ambientales y sociales.

A raíz de las dificultades y limitaciones que se tienen al momento de ejercer control sobre las emisiones de ruido dadas por los establecimientos comerciales, podría plantearse como solución, la creación una política pública que vele por la descontaminación y la gestión del ruido debido a los establecimientos comerciales de ocio y recreación, por medio del uso obligatorio de este tipo de tecnologías.

Respondiendo a la hipótesis planteada, si es posible desarrollar este tipo de dispositivos para la mitigación de las emisiones de ruido generadas por los establecimientos comerciales de la ciudad basados en la normatividad del país, la manera de abordar y de intervenir en las variables de detección y control son justificadas por los resultados teóricos y se demostró que la variable de control, *el voltaje*, si puede ser automatizado y estabilizado de acuerdo a ciertos valores de presión sonora que inciden sobre el sensor, pero así mismo, deben de mejorarse y perfeccionarse ciertas etapas dentro del desarrollo de este prototipo para obtener un resultado más óptimo y eficiente, el cual no genere molestias tanto para los administradores como para los usuarios en la reproducción de los diferentes tipos de géneros musicales, los cuales pueden tener transcientes de muy variado comportamiento, por ende, el dispositivo deberá ser capaz de reaccionar ante diferentes cambios de voltaje, automatizarlos y estabilizarlos en el nivel de referencia estipulado por la resolución.

## XI. CONCLUSIONES

El diagnóstico de las condiciones de emisión de ruido en un establecimiento comercial dedicado al ocio y al entretenimiento puede variar debido a múltiples factores que inciden al momento de poner en funcionamiento el sistema de sonido, tales factores dependen de diversas situaciones que se presentan en la atención al público y los cuales pueden distorsionar el resultados de las mediciones que se realicen allí, estos pueden ser, un alto aforo de personas dentro del recinto, un aumento del ruido de fondo debido al alza de los niveles de emisión producidos por el tráfico sobre la avenida 33 o un alza de los niveles de presión acústica por las conversaciones de las personas que se encuentran en el establecimiento, además, de otros como culturales y sociales; todos estos factores, obligan casi siempre a usar el sistema de sonido de un establecimiento por encima de los valores del nivel de emisión permitidos por la Resolución 0627 de la república de Colombia y lo cual hace más complejo el diagnóstico y el control sobre dichas emisiones.

El desarrollo del sistema de control en tiempo continuo, por medio de un sistema analógico-digital que emplea magnitudes con valores continuos; en este caso cantidades físicas como la presión sonora, la amplitud, el voltaje y la potencia, sobre un intervalo ininterrumpido de valores; además, del procesamiento de las señales analógicas y de los componentes electrónicos involucrados son relativamente más simples y económicos que los sistemas que trabajan con señales netamente digitales, debido al bajo costo computacional y al rendimiento dependiente de las características de procesamiento con las que cuenta el ordenador donde se ejecuta un algoritmo de control.

El prototipo desarrollado para controlar los niveles de presión sonora acorde a los niveles permitidos por la resolución 0627 de 2006, demostró ser funcional bajo ciertas condiciones que deben ser tenidas en cuenta para lograr un rendimiento tolerable del controlador como se demostró en la sección de resultados; sin embargo, debe perfeccionarse la respuesta del sistema limitador que fue diseñado en este proyecto, estableciendo unos valores más rápidos de estabilización para la variable acústica, para que su eficiencia al momento de la operación de control no afecte la reproducción normal de la música y por ende, no afecte el confort de los usuarios del establecimiento con estos altibajos que presenta la señal de sonido de salida del dispositivo.

Debido al desacato de los establecimientos comerciales ante los niveles permitidos por la normatividad nacional, resulta de suma utilidad la implementación de un dispositivo limitador de la presión sonora que promueva un fácil y significativo control sobre los niveles de emisión de ruido emitidos por dichos establecimientos, para la disminución de la contaminación auditiva en la ciudad de Medellín; además de brindarle al dueño o al administrado del sitio, un servicio extra, puesto que no tiene que vigilar y/o controlar los niveles de presión sonora emitidos allí, ni tampoco pagarle a un empleado para que lo haga.

Por ciertas razones de índole particular para cada establecimiento, el control de los niveles acústicos producidos por ellos, resulta un tema espinoso y que se suele evadir por parte de los entes competentes; es por esto que más que sanciones, se debe educar, tanto a la comunidad como a los encargados de estos sitios, para que se tome conciencia acerca de la problemática que acarrea este tipo de contaminación y se decidan a usar dispositivos como este, especialmente diseñados para mitigar las consecuencias a la salud que provocan las altas dosis de ruido en las personas.

## XII. RECOMENDACIONES

Para mejorar el funcionamiento del dispositivo se recomienda la implementación del parámetro *release* y *attack* sobre la señal de control con el fin de suavizar los sobresaltos que sufre el voltaje al ser controlados por el prototipo y poder reducir de manera significativa las oscilaciones desmedidas al momento de encenderse el dispositivo.

Hay que tener en cuenta que existen otros tipos de controles automáticos para desarrollar este tipo de dispositivos de control, no solo el control integral o control PID, también es posible implementar otros tipos de controles automáticos más complejos y robustos que permitan un control más perfecto sobre la señal de salida o en la respuesta transitoria del sistema.

El sensor utilizado durante la implementación de un dispositivo para el control automático de los niveles de presión sonora, cumple una función fundamental y debe ser bien seleccionado, debido a que sus zonas de saturación pueden definir el correcto o incorrecto funcionamiento del controlador diseñado, puesto que este es el encargado de la detección precisa en los niveles de la variable acústica.

Los resultados del proyecto apuntan hacia el desarrollo de nuevas líneas de investigación las cuales ayudarán a resolver los problemas que surgieron al momento del diseño e implementación del prototipo de control automático, dichas líneas pueden estar orientadas tanto al desarrollo de proyectos acústicos, como filtros para la protección del sensor o como proyectos electrónicos para la mejora de las etapas de potencia del dispositivo.

El desarrollo de este tipo de dispositivos puede ejecutarse también de manera totalmente digital, por medio de los avances en el tema de procesamiento digital de señales, puede diseñarse un software el cual calcule las diferentes funciones de transferencia de manera automática cada vez que se necesite ajustar o calibrar el sistema, la variable acústica la cual es detectada por el sensor deberá obtenerse con mayor precisión para tener un control más exacto sobre la variable de control, en este caso deberá usarse un micrófono de medición o un micrófono de condensador de alta

precisión, y los niveles de presión sonora en este caso no deberá trabajarse con unidades de dB SPL(Sound Pressure Level) sino bajo las unidades dB FS (Full scale).Hay que tener en cuenta que el dispositivo no fue diseñado con una etapa de regulación de potencia eléctrica, esto debe mejorarse para usar el dispositivo por periodos prolongados de tiempo, sin que este se sobrecaliente a más de las temperaturas soportadas por los componentes que lo conforman; como mínimo un periodo regular de funcionamiento de establecimiento comercial en la ciudad de Medellín.

## REFERENCIAS

- [1] A. Figueroa Montaña, M. G. Orozco Medina y N. E. Preciado Caballero, «Niveles de ruido y su relación con el aprendizaje y la percepción en escuelas primarias de Guadalajara, Jalisco, México,» *Revista Académica de la FI-UADY*, vol. 3, n° 16, pp. 175-181, 2012.
- [2] M. Orozco Medina, A. Figueroa y J. García, «Investigation and analysis of urban noise for sustainability. "Proceedings of Meetings on Acoustics",» *Acoustical Society of America through the American Institute of Physics*, vol. 5, n° 2, pp. 22-46, 2008.
- [3] Suiza. Organización Mundial de la Salud (OMS), Guías para el ruido Urbano, Ginebra: Stockholm University, Karolinska Institute, 1999.
- [4] V. Vogt, «El 80% de las mediciones de ruido en Medellín exceden la norma,» *El Tiempo*, pp. 4-5, 5 Mayo 2018.
- [5] Área Metropolitana del Valle del Aburrá, Actualización de los mapas de ruido de la zona urbana de los municipios de Bello, Itagüi y Medellín, Medellín: Gráficas Alejandra, Febrero de 2015.
- [6] A. A. Saadu, R. O. Onyeonwu, E. O. Ayorinde y F. O. Ogisi, «Community attitudinal noise survey and analysis of eight Nigerian cities,» vol. 49, n° 1, pp. 49-69, 1996.
- [7] Silicio, «Silicio.MX,» Grove - Sensor de intensidad de sonido, 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BoVAP0>.
- [8] dB electronics, «dB electronics,» Limitador de sonido CAP21 Advanced, 2017. [En línea]. Available: <https://goo.gl/gbCtiW>.
- [9] Corporation, Princeton Technology, «Electronic Volume Controller IC,» Septiembre 2000. [En línea]. Available: <https://goo.gl/f9ze4s>.
- [10] D. Incorporated, «PAM8403: Filterless 3W Class-D Stereo Audio Amplifier,» A Product Line of Diodes Incorporated, Noviembre 2012. [En línea]. Available: <https://goo.gl/sLp4iH>.
- [11] D. M. Buitrago Montañez, Protocolo para la valoración de inmisión de ruido en establecimientos públicos [Trabajo de grado Ingeniería de Sonido], Universidad de San Buenaventura Bogotá, Facultad de Ingenierías, 2009.

- [12] M. De Barros Franco, Protocolo de medición para la emisión de ruido generada por fuentes fijas (establecimientos comerciales) [Trabajo de grado Ingeniería de Sonido], Universidad de San Buenaventura Bogotá, Facultad de Ingenierías, 2008.
- [13] A. Carrión Isbert, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Talleres Gráficos Hostench, 1998.
- [14] Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 0627 del 7 de Abril de 2006: por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental, Bogotá: Diario Oficial, 2006.
- [15] Luxemburgo. El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, Directiva 2002/49/CE sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, Luxemburgo: Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2002.
- [16] Francia. El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, Directiva 2010/75/UE sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación), Estrasburgo: Diario Oficial de las Unión Europea, 2010.
- [17] Udemy, «Problemas de audio: ¿Qué es el ruido de fondo?,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://goo.gl/UMqXvP>.
- [18] A. M. David y M. E. Vásquez, Evaluación de la exposición sonora y de su impacto sobre la salud y calidad de vida de la población residente en la zona oeste de la ciudad de Córdoba sobre los accesos principales a la zona central, Córdoba: Subsecretaría de Ambiente - Observatorio Ambiental.
- [19] E. Suárez S., Mapas de Ruido: Importancia y Metodologías, Región de Los Lagos: Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2006.
- [20] España. Asociación Española para la Calidad Acústica (AECOR), Guía y procedimiento de medida del ruido de actividades en el interior de edificios según Anexo IV de Real Decreto 1367/2007, Madrid: AECOR, 2011.
- [21] J. C. Giménez de Paz, Ruido: para los posgrados de higiene y seguridad industrial, Buenos Aires: Nobuko, 2007.
- [22] Minitab, «¿Qué es la desviación estándar?,» 2019. [En línea]. Available: <https://goo.gl/oYRD7b>.

- [23] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, Quinta ed., Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A., 2010, p. 904.
- [24] C. M. Harris, Manual de Medidas Acústicas y Control del Ruido, Tercera ed., vol. 1, McGRAW-HILL/Interamericana de Espana S.A, 1998.
- [25] Generalitat de Catalunya, «¿Qué es un establecimiento comercial?», 05 Marzo 2014. [En línea]. Available: <https://goo.gl/EJ57Gy>.
- [26] Audiotec, «Audiotec,» Limitador de sonido - Limitador acústico, 21 Agosto 2009. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2KYmhdb>.
- [27] R. Montero, «Tecnología DJ,» El limitador de sonido, ese gran desconocido para el DJ, 25 Septiembre 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2wbcr2h>.
- [28] «Iberacústica - Control del Ruido y Vibraciones,» Limitadores acústicos: tipos y características, s.f.. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Ph0tfU>.
- [29] D. Moro Frías, M. T. Sanz Pascual, A. Díaz Sánchez, C. A. de la Cruz Blass y B. Calvo, «Diseño y simulación de un circuito de control automático de ganancia para sistemas de sensores,» *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*, vol. 1, n° 25, pp. 36 - 42, 2012.
- [30] I. Amable Álvarez, J. Méndez Martínez, L. Delgado Pérez, F. Acebo Figueroa, J. de Armas Mestre y M. L. Rivero Llop, «Contaminación ambiental por ruido,» *Revista Médica Electrónica*, vol. 39, n° 3, pp. 10-25, Mayo-Junio 2017.
- [31] N. Sturmel y F. Yu, «Automatic analog preamp gain control using digital command,» vol. II, n° 1, p. 4, 2013.
- [32] W. Etter, «Based automatic gain control with continuous Proximity - Effect compensation,» *Distance*, vol. 1, pp. 5-8, 26-29 Octubre 2012.
- [33] C. y. T. Instituto Federal de Educación, Microcontroladores, Santa Maria: Rede e-Tec Brasi, 2013.
- [34] Arduino, «Arduino Introduction,» ¿What is Arduino?, s.f.. [En línea]. Available: <https://bit.ly/1JMHUoD>.

- [35] España. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), UNE-ISO/IEC Guía 98-3:2008 sobre la Incertidumbre de medida Parte 3: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM: 1995), Madrid: AENOR, 2012.

## ANEXOS



Multímetro digital Fluke 117.

Fuente: <https://goo.gl/JZv2TW>.

Interfaz M-AUDIO MobilePre USB.

Fuente: <https://amzn.to/2N7A4iH>.

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA INTERFAZ M-AUDIO MOBILEPRE USB

Características	Especificación	
Hardware	Entradas	MIC/Línea: 2 MIC XLR: 2 balanceadas con phantom power (+48 V) MIC minijack: Estéreo Línea $\frac{1}{4}$ : 2 balanceados de alta impedancia Control de ganancia de entrada: +40 dB máximo Indicadores LED: Saturación (rojo) y presencia de señal (verde)
	Salidas	No balanceadas $\frac{1}{4}$ : 2 [-10 dBV nominal - +1,7 dBV máximo] Línea estéreo: Minijack [-10 dBV nominal - +1,7 dBV máximo] Auriculares: Minijack estéreo con control de nivel
	Alimentación	USB
Audio	Frecuencia de muestreo [KHz]	8, 9.6, 11.025, 12, 16, 22.05, 24, 32, 44.1 y 48
	Entradas MIC XLR	Rango dinámico: 91 dBA Relación S/R: 91 dBA

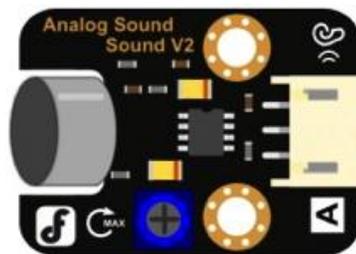
	Salidas jack $\frac{1}{4}$ '' y línea estéreo	Rango dinámico: 91 dBA Relación S/R: 91 dBA Distorsión armónica total (THD): -87 dB
Driver	Resolución	16 bits
	Monitorización	Directa con latencia cero, control de nivel mediante software
	Niveles de salida	Control mediante software +12 a -50 dB en incrementos de 2 dB
	Control de volumen de salida master	Control mediante software +0 a -62 dB en incrementos de 2 dB

Nota: Fuente, <https://amzn.to/2N7A4iH>



Sonómetro CESVA SC-310 Clase 1.

Fuente: <https://goo.gl/iKaA1o>.



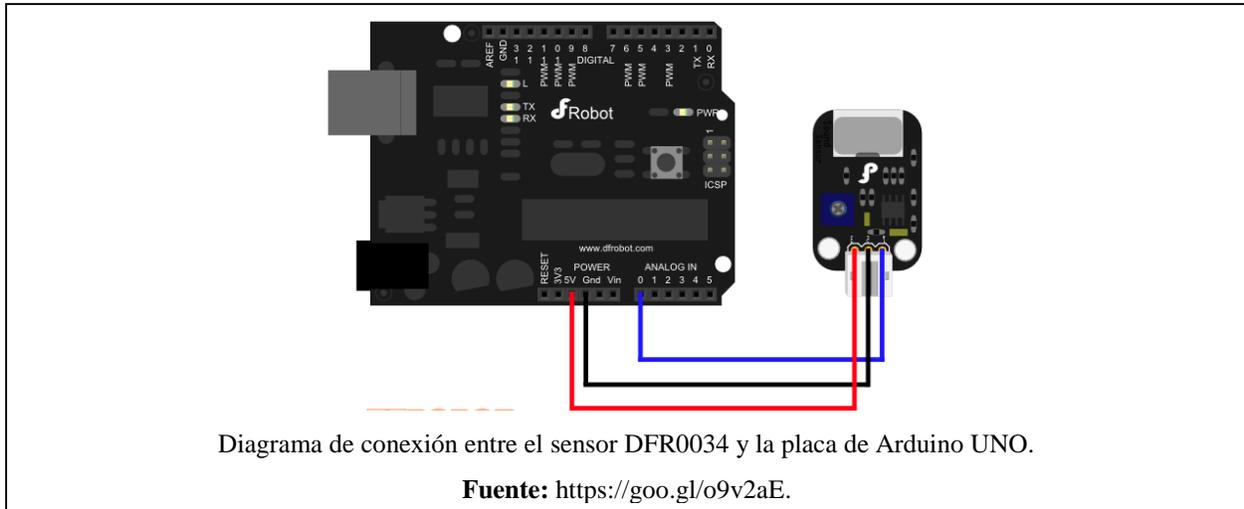
Negro: Tierra

Rojo: VCC.

Azul: Señal de salida analoga.

Sensor de sonido analógico DFR0034.

Fuente: <https://goo.gl/Nfy26p>.



## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL AMPLIFICADOR CROWN XLS5000

Característica	Especificación
Potencia Nominal	1100 W/Canal @ 8 Ohms Stereo 1800 W/Canal @ 4 Ohms Stereo 2500 W/Canal @ 2 Ohms Stereo 3600 W/Canal @ 8 Ohms Bridged 5000 W/Canal @ 4 Ohms Bridged
Factor Damping	> 200
Sensibilidad de entrada [ $V_{Rms}$ ]	1,25
Impedancia de entrada	Balanceado: 20K Ohms Desbalanceado: 10K Ohms
Ganancia	Ajustable
Respuesta en frecuencia	20Hz – 20KHz
Razón de S/R [ $dBA$ ]	> 100
Distorsión armónica total (THD) [%]	< 0,5
Conectores	2 XLR de entrada 2 Speakon de salida 2 Binding post de salida 1 Alimentación AC de entrada
Controles	1 Interruptor selector de modo 1 Interruptor de potencia 2 Controles de volumen
Indicadores	Luces LED para poder, señal, clip y protección
Enfriamiento	Disipadores de calor internos con ventiladores de enfriamiento de aire forzado, flujo de aire de adelante hacia atrás
Requerimientos de energía [ $VAC$ ]	120
Dimensiones [ $H \times W \times D$ ]	[0,133 x 0,483 x 0,395] m
Peso [ $Kg$ ]	27,7

Nota: Fuente, <https://goo.gl/4E5CsM>.



Cabina activa JBL SRX722F.

Fuente: <https://goo.gl/7pHqAb>.

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CABINA JBL SRX722F

Característica	Especificación
Tipo de sistema	Dual de 12'' y de dos vías, con puerto de bajo reflejo
Rango de frecuencia [ $-10$ dB]	72 Hz – 20 KHz
Respuesta en frecuencia [ $\pm 3$ dB]	81 Hz – 20 KHz
Ángulo de cobertura horizontal	50° Nominal
Ángulo de cobertura vertical	75° Nominal
Modos de crossover	Bi-amplificado / pasivo, conmutable externamente
Frecuencia del crossover [KHz]	1,2
Potencia nominal (Continuo <sup>1</sup> / Programa / Pico)	Pasivo: 1200 W / 2400 W / 4800 W Bi-amplificado de bajas frecuencias: 1200 W / 2400 W / 4800 W Bi-amplificado de altas frecuencias: 75 W / 150 W / 300 W
Máximo SPL <sup>2</sup>	135 dBSPL pico
Sensibilidad del sistema (1w @ 1m)	97 dBSPL (modo pasivo)
Driver de bajas frecuencias	2 JBL 2262H de 12'' driver woofer diferencial
Driver de altas frecuencias	JBL 2451H de 4'' bobina de voz, driver de compresión de neodinio
Impedancia nominal	Pasivo: 4 Ohms Bi-amplificado de bajas frecuencias: 4 Ohms Bi-amplificado de altas frecuencias: 8 Ohms
Afinaciones activas	dbx DriveRack, todos los modelos
Recinto	Trapezoidal, 15 mm, contrachapado de 11 capas de Abedul
Suspensión / Montaje	5 puntos de suspensión, M10 o pista de vuelo
Transporte	2 manijas de acero

Acabado	Acabado negro DuraFlex
Malla	Acero perforado recubierto en polvo, negro, calibre 16 con respaldo de espuma de carbón transparente. Insignia JBL extraíble y logotipo de JBL perforado
Conectores de entrada	2 Neutrik Speakon NL-4
Dimensiones [H x W x D]	[0,965 x 0,394 x 0,394] m
Peso neto [Kg]	34
Accesorios opcionales	SRX722-CVR: Cubierta acolchada extraíble SRX-FF3: 3 accesorios de vuelo desmontable 229-00017-00: Kit de 10 mm

Nota 1: <sup>1</sup>IEC filtrado con 6 dB de factor de cresta, <sup>2</sup>Calculado en función de la potencia nominal y la sensibilidad.

Nota 2: Fuente, <https://goo.gl/7pHqAb>.



Cabina activa JBL EON 15P-1.

Fuente: <https://goo.gl/xmcAXu>.

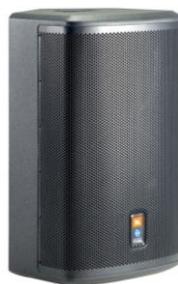
#### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CABINA JBL EON 15P-1

Característica	Especificación
Rango de frecuencias [-10 dB]	47 Hz – 18 KHz
Respuesta en frecuencia [±3 dB]	65 Hz – 16 KHz
Ángulo de cobertura horizontal [-6 dB]	90° Nominal
Ángulo de cobertura vertical [-6 dB]	60° Nominal
Nivel de presión sonora máximo a 1 metro [dB]	127
Dimensiones en metros [H x W x L]	[0,686 x 0,430 x 0,444]

Peso neto [Kg]	21
Driver de bajas frecuencias	Driver de marco integral con 15'', magneto de neodimio, Drive de bobina de voz diferencial de 2''
Driver de altas frecuencias	JBL 2418H-1 de 1'', driver de compresión con 1,75'' de diámetro de diafragma de titanio
Amplificador de potencia de bajas frecuencias	130 W, impedancia del driver de baja frecuencia < 0,1% THD
Amplificador de potencia de altas frecuencias	50 W, impedancia del driver de alta frecuencia < 0,1% THD
Sensibilidad de entrada	-55 dBU a -2 dBU para salida clasificada (MIC/Line en posición MIC) +7 dBU a +26 dBU para salida clasificada (MIC/Line en posición Line)
Material del recinto	Deflector de aluminio, recinto de copolímero gris y bisel protector
Conectores de audio	Entrada: XLR hembra balanceado Salida: XLR macho balanceado
Frecuencia de crossover [KHz]	1,5
Entrada AC	Conmutable 115 – 230 VAC ( $\pm 10\%$ ), 50 – 60 Hz

Nota: Fuente, <https://goo.gl/xmcAXu>.

#### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CABINA JBL PRX512M



Cabina activa JBL PRX512M.

Fuente: <https://goo.gl/jWgwrB>.

Característica	Especificación
Tipo de sistema	Autoamplificado de 12'' y de dos vías, con puerto de bajo reflejo
Rango de frecuencia [ $-10$ dB]	46 Hz – 20 KHz (EQ en posición MAIN) 60 Hz – 20 KHz (EQ en posición MONITOR)

Respuesta en frecuencia [ $\pm 3$ dB]	76 Hz – 20 KHz (EQ en posición MAIN) 90 Hz – 20 KHz (EQ en posición MONITOR)
Ángulo de cobertura horizontal	70° Nominal
Ángulo de cobertura vertical	70° Nominal
Índice de directividad (DI) [dB]	10,2
Factor de directividad	10,8
Modos de crossover	Controlador DSP con pendiente de filtro 48 dB
Frecuencia del crossover [KHz]	1,6
Potencia del sistema	500 W Rms 1000 W Pico
Amplificador de potencia de bajas frecuencias	Clase D, 400 W Rms a driver de impedancia
Amplificador de potencia de altas frecuencias	Clase D, 100 W Rms a driver de impedancia
Distorsión	< 0,1 % a potencia nominal
Pico máximo de salida <sup>1</sup>	133 dB SPL
Indicadores de señal	Sobrecarga: LED Rojo indica la condición de sobrecarga de entrada Señal: LED Verde indica la señal presente
Sensibilidad de entrada	Posición MIC: $-25$ dBU a $0$ dBU Posición LINE: $+28$ dBU a $+10$ dBU
Impedancia de entrada	Balanceado: 64 K Ohms Desbalanceado: 32 K Ohms
EQ	Presets para las posiciones MAIN y MONITOR
Driver de bajas frecuencias	Woofers diferenciales JBL 262F de 12''
Driver de altas frecuencias	Diafragma de polímero anular JBL 2408F de 1,5''
	Madera trapezoidal contrachapada de 18 mm
Suspensión / Montaje	Dual de 36mm
Transporte	Mango integrado con copa de respaldo
Malla	De acero perforado calibre 18, Negro Con recubrimiento de polvo con respaldo de espuma negra acústicamente transparente
Conectores de entrada	XLR balanceado de $\frac{1}{4}$
Dimensiones [H x W x D]	[0,65 x 0,38 x 0,35] m
Peso neto [Kg]	18

Nota: Fuente, <https://goo.gl/jWgwrB>



Mixer BEHRINGER XENYX Q1202-USB de 12 canales.

Fuente: <https://goo.gl/5JWjBR>.

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MIXER BEHRINGER XENYX Q1202-USB

Característica	Especificación
Potencia Nominal	280 W/Canal @ 8 Ohms Stereo 450 W/Canal @ 4 Ohms Stereo 700 W/Canal @ 2 Ohms Stereo 900 W/Canal @ 8 Ohms Bridged 1400 W/Canal @ 4 Ohms Bridged
Factor Damping	> 300
Sensibilidad de entrada [ $V_{Rms}$ ]	1,15
Impedancia de entrada	Balanceado: 20K Ohms Desbalanceado: 10K Ohms
Ganancia	Ajustable
Respuesta en frecuencia	20Hz – 20KHz
Razón de S/R [ $dB$ ]	> 100
Distorción armónica total (THD) [%]	< 0,1
Conectores	Bloque de terminales desmontable de 3 pines 2 XLR 2 Neutrik Speakon 1 Alimentación AC de entrada
Controles	1 Interruptor selector de modo y de potencia 2 Botones de ganancia
Indicadores	Luces LED para poder, señal, clip y protección

Protección del amplificador	Cortocircuito completo, circuito abierto, térmico, ultrasónico, protección RF
Requerimientos de energía [VAC]	120
Altura [m]	0,89
Peso [Kg]	18,2

*Nota:* Fuente, <https://goo.gl/5JWjBR>.



Medición de los parámetros de potencia para un amplificador en general.

**Fuente:** Propia



Obtención de la curva de sensibilidad para el sensor utilizado.

**Fuente:** Propia