



Diseño e implementación de un dispositivo de asistencia para personas con sordera que permita el aviso e identificación de alarmas sonoras en entornos de la industria automotriz

Gavilanes Cortez, Andrea Isabel y Sevillano Mera, María José

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica, Automatización y Control.

Ing. Arcentales Viteri, Andrés Ricardo, PhD

08 de mayo de 2023

Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO

Tesis 2023

NOMBRE DEL ALUMNO

ANDREA ISABEL GAVILANES CORTEZ

NOMBRE DEL ARCHIVO

TESIS_GAVILANES_SEVILLANO

SE HA CREADO EL INFORME

16 may 2023

Resumen

Fragmentos marcados	10	0,5 %
Fragmentos citados o entrecorillados	8	0,6 %

Coincidencias de la Web

uva.es	4	0,2 %
analfatecnicos.net	3	0,1 %
srt.gob.ar	3	0,1 %
fundacioncarlosslim.org	1	0,1 %
respectability.org	1	0,1 %
eniun.com	1	0,1 %
magroove.com	1	0,1 %
trabajo.gob.ec	1	0,1 %
www.gob.mx	1	0 %
imf-formacion.com	1	0 %
nih.gov	1	0 %

1 de 18 fragmentos

Fragmento del alumno MARCADO



ESTADO: AUTENTICO
 ANDRES RICARDO
 MARCENTALES VITERI



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **"Diseño e implementación de un dispositivo de asistencia para personas con sordera que permita el aviso e identificación de alarmas sonoras en entornos de la industria automotriz"** fue realizado por las señoritas **Gavilanes Cortez, Andrea Isabel** y **Sevillano Mera María José**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 29 de mayo de 2023



Arcentales Viteri, Andrés Ricardo

C. C. 1712480746



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Responsabilidad de Autoría

Nosotras, **Gavilanes Cortez, Andrea Isabel**, con cédula de ciudadanía n°1753986197 y **Sevillano Mera María José**, con cédula de ciudadanía n° 1726162025, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un dispositivo de asistencia para personas con sordera que permita el aviso e identificación de alarmas sonoras en entornos de la industria automotriz** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 30 de mayo de 2023

Gavilanes Cortez, Andrea Isabel

C.C.: 1753986197

Sevillano Mera María José

C.C.: 1726162025



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Autorización de Publicación

Nosotras, **Gavilanes Cortez, Andrea Isabel**, con cédula de ciudadanía n°1753986197 y **Sevillano Mera María José**, con cédula de ciudadanía n° 1726162025, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Título: Diseño e implementación de un dispositivo de asistencia para personas con sordera que permita el aviso e identificación de alarmas sonoras en entornos de la industria automotriz** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 30 de mayo de 2023

Gavilanes Cortez, Andrea Isabel

C.C.: 1753986197

Sevillano Mera María José

C.C.: 1726162025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre, por su amor incondicional y su confianza en mí. Por ser la persona que siempre estuvo a mi lado, que me apoyó en todo el camino. Por enseñarme a nunca rendirme y a perseguir siempre mis sueños.

Andrea Isabel Gavilanes Cortez

Dedicatoria

A mis papás Fernando y Rocío, quienes me han apoyado en todas las facetas de mi vida, ya que sin ellos no hubiera llegado al lugar en el que estoy. Gracias por siempre estar presentes y motivarme a alcanzar mis metas.

María José Sevillano Mera

Agradecimiento

Agradezco a mi familia por todo su apoyo. Especialmente a mi madre, gracias a todo su trabajo y esfuerzo puedo cumplir mis sueños. A mis hermanos, por apoyar mis decisiones y siempre creer en mí.

A mis amigos, a mi grupo de amigos por estar conmigo en cada locura, ustedes fueron mi compañía durante estos años y siempre estaré agradecida por todos los momentos. A mi mejor amigo Pedro Luis, nos conocimos por coincidencia, pero gracias por estar a mi lado, por ser la persona en la que puedo confiar, al que espero siempre poder llamar mi amigo. A mi amiga Majo por ser mi compañera en el desarrollo de este proyecto, por la gran persona que es y todos los momentos que pasamos juntas.

Un agradecimiento a todos los profesores y compañeros. A nuestro tutor el Dr. Andrés Arcentales por todas sus enseñanzas y todo el apoyo para el desarrollo del presente trabajo. Por último, agradezco a todas aquellas personas que conocí a lo largo de mis estudios y que dejaron huella en mi vida.

Andrea Isabel Gavilanes Cortez

Agradecimiento

A Dios quién me ha guiado en todo mi camino y me ha dado fortaleza para cumplir mis objetivos.

A mis padres por todo su tiempo invertido y dedicación, a mis hermanas por sus consejos, en especial a mi hermana Gaby por demostrarme lo lejos que se puede llegar cuando se desea alcanzar una meta. A mi novio David por acompañarme en toda mi carrera universitaria y festejar mis logros como suyos, por todo tu tiempo, tu apoyo incondicional en cualquier tema que te pida ayuda, ya que siempre tienes una respuesta para todo y en especial por formar parte de mi vida.

A mis amigos en especial a mis amigos Mauri y Cris por siempre estar pendiente de mi bienestar y apoyarme en cualquier decisión que tome. A mi amiga Andre por cumplir nuestro objetivo de terminar la tesis sin pelearnos.

A todos los profesores de la Universidad que me han hecho entusiasmar de haber decidido estudiar esta carrera, en especial al Dr. Andrés Arcenales por su apoyo en el desarrollo del proyecto de titulación.

Finalmente, a la empresa DANA Transejes Ecuador que nos abrió sus puertas para realizar la tesis y en especial a Santiago quien fue la persona que nos inspiró a realizar este proyecto, ya que a pesar de sus limitaciones siempre tiene una sonrisa y buena voluntad de realizar su trabajo lo mejor posible.

María José Sevillano Mera

Índice de Contenidos

Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento	8
Agradecimiento	9
Índice de Tablas.....	13
Índice de Figuras	15
Resumen.....	18
Abstract	19
Capítulo I. Introducción.....	20
Antecedentes	20
Justificación e Importancia.....	24
Alcance del Proyecto	26
Objetivos	28
Objetivo General	28
Objetivos Específicos.....	28
Capítulo II. Marco conceptual	29
Introducción	29
Leyes y reglamentos de seguridad y salud industrial.....	29
Sistemas de alarma de seguridad industrial	32
Equipos de protección individual	33
Proyectos de asistencia guiada para personas con discapacidades en la industria	36
Normas y regulación acústica en entornos industriales	38
Fundamentos de propagación y medición en entornos industriales.....	40
Capitulo III. Diseño e implementación del hardware.....	45
Introducción	45

	11
Descripción de señales de alarma	47
Descripción de localizaciones.....	50
Análisis comparativo y selección de componentes del hardware	52
Descripción, configuraciones y selección de sensores de sonido	52
Descripción y selección de microcontroladores.....	70
Descripción y selección de sistemas de estimulación para personas con sordera	72
Identificación y selección ergonómica para la ubicación del dispositivo.....	74
Desarrollo y diseño del hardware	79
Capítulo IV. Diseño e implementación del software.....	89
Introducción	89
Etapa de adquisición de señales de alarma	90
Protocolo de bus I2S.....	91
Formato de archivos de audio.....	94
Etapa de reconocimiento e identificación de señales de alarma	98
Selección del método de estimación espectral.....	100
Análisis de las señales de alarma	102
Entrenamiento del modelo del sistema.....	109
Sistema modelado en Matlab	110
Sistema de identificación de alarma en tiempo real.....	120
Capítulo V. Pruebas y Resultados.....	131
Introducción	131
Indicaciones generales del dispositivo de asistencia	132
Pruebas y resultados	141
Pruebas de desempeño.....	142
Pruebas ergonómicas.....	148
Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones.....	152

Bibliografía	165
Apéndice.....	176

Índice de Tablas

Tabla 1 Principales formas de ocurrencia de las lesiones, las zonas del cuerpo afectadas y los materiales en la industria automotriz.....	31
Tabla 2 Equipos de protección individual para trabajadores en entornos industriales	34
Tabla 3 Nivel de presión sonora de acuerdo al tipo de zona y según el uso del suelo	40
Tabla 4 Frecuencia característica de las señales de alarma	48
Tabla 5 Localizaciones en planta para toma de datos	51
Tabla 6 Características de los micrófonos SPH0645 y INMP441.....	53
Tabla 7 Configuraciones establecidas para los micrófonos SPH0645 y INMP441	57
Tabla 8 Comparativa entre los microcontroladores ESP32 y Raspberry Pi	71
Tabla 9 Tiempos de Operación de pines en Raspberry Pi Pico y ESP32.....	71
Tabla 10 Formatos de fichero de audio.....	95
Tabla 11 Amplitudes mínimas de las señales de alarma	105
Tabla 12 Rango de frecuencias de las señales de alarma	109
Tabla 13 Tabla verdad grabación de 20 segundos alarma elevador	112
Tabla 14 Tabla verdad grabación de 20 segundos alarma montacargas.....	113
Tabla 15 Tabla verdad grabación de 20 segundos alarma ANDON.....	113
Tabla 16 Tabla verdad grabación de 20 segundos alarma incendios	114
Tabla 17 Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma elevador.....	115
Tabla 18 Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma elevador	116
Tabla 19 Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma montacargas	116
Tabla 20 Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma montacargas.....	117
Tabla 21 Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma ANDON	117
Tabla 22 Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma ANDON.....	117

Tabla 23 <i>Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma incendios.....</i>	118
Tabla 24 <i>Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma incendios</i>	118
Tabla 25 <i>Rangos de las señales de alarma para ubicar en contenedores.....</i>	122
Tabla 26 <i>Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma elevador.....</i>	125
Tabla 27 <i>Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma elevador</i>	126
Tabla 28 <i>Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma montacargas</i>	126
Tabla 29 <i>Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma montacargas.....</i>	127
Tabla 30 <i>Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma ANDON</i>	127
Tabla 31 <i>Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma ANDON.....</i>	127
Tabla 32 <i>Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma incendios.....</i>	128
Tabla 33 <i>Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma incendios</i>	128
Tabla 34 <i>Pruebas del tiempo de respuesta</i>	143
Tabla 35 <i>Pruebas del tiempo de respuesta en el operario</i>	144
Tabla 36 <i>Pruebas de distancia mínima y máxima de detección</i>	146
Tabla 37 <i>Resultados de pruebas ergonómicas de la encuesta realizada en la empresa DANA.....</i>	149

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Dispositivo de advertencia en gafas de seguridad para detectar obstrucciones para personas sordociegas</i>	22
Figura 2 <i>Guantes vibro táctiles</i>	23
Figura 3 <i>Curvas de frecuencias A, B, C, D</i>	43
Figura 4 <i>Respuesta en frecuencia del micrófono SPH0645</i>	54
Figura 5 <i>Respuesta en frecuencia del micrófono INMP441</i>	55
Figura 6 <i>Tipos de configuraciones con micrófonos</i>	56
Figura 7 <i>Señales en el puesto de trabajo de los 3 tipos de configuraciones</i>	59
Figura 8 <i>Señales en el área de almacén de los 3 tipos de configuraciones</i>	61
Figura 9 <i>Señales en el pasillo de producción de los 3 tipos de configuraciones</i>	62
Figura 10 <i>Señales en el pasillo de vestidura de los 3 tipos de configuraciones</i>	64
Figura 11 <i>Señales de la alarma del elevador obtenido de los 3 tipos de configuraciones</i>	66
Figura 12 <i>Señales de la alarma del montacargas obtenido de los 3 tipos de configuraciones</i>	67
Figura 13 <i>Señales de la alarma del sistema ANDON obtenido de los 3 tipos de configuraciones</i>	68
Figura 14 <i>Señales de la alarma de incendios obtenido de los 3 tipos de configuraciones</i>	69
Figura 15 <i>Esquemático mini motor incorporado en el EPI: casco</i>	75
Figura 16 <i>Esquemático mini motor incorporado en el EPI: orejeras</i>	75
Figura 17 <i>Esquemático mini motor incorporado en el EPI: pantalla de protección</i>	76
Figura 18 <i>Etapas del dispositivo de asistencia</i>	80
Figura 19 <i>Diseño Eléctrico final del dispositivo</i>	80
Figura 20 <i>Etapa de alimentación</i>	81
Figura 21 <i>Etapa de adquisición de datos</i>	82
Figura 22 <i>Etapa de reconocimiento e identificación</i>	83

Figura 23 <i>Etapa de activación de alarmas</i>	84
Figura 24 <i>PCB diseñado del sistema</i>	85
Figura 25 <i>Montaje de la PCB diseñada</i>	85
Figura 26 <i>Diseño e implementación de estructura del dispositivo de asistencia</i>	87
Figura 27 <i>Diseño e implementación del dispositivo final</i>	87
Figura 28 <i>Diagrama de bloques y salida I2S de micrófonos MEMS</i>	93
Figura 29 <i>Forma canónica de un fichero WAVE</i>	97
Figura 30 <i>Representación de la señal de alarma mediante el periodograma y la transformada rápida de Fourier a) señal con periodograma y b) señal con FFT</i>	101
Figura 31 <i>Valores umbrales de la señal de a alarma a) señal del elevador y b) señal del montacargas</i>	104
Figura 32 <i>Representación del sensor detector de sonido en la señal de alarma del montacargas</i>	106
Figura 33 <i>Representación del sensor KY-037 en la señal de alarma del montacargas</i>	107
Figura 34 <i>Representación de los micrófonos SPH0645 y INMP441 en la señal de alarma del montacargas</i>	107
Figura 35 <i>Frecuencias de la señal de alarma del elevador a) frecuencia mínima y b) frecuencia máxima</i>	108
Figura 36 <i>Señales del elevador y montacargas con identificación errónea a) señal del elevador b) señal del montacargas</i>	114
Figura 37 <i>Modelo matemático en Matlab</i>	119
Figura 38 <i>Diagrama de flujo etapa de adquisición del sistema de reconocimiento e identificación de alarmas</i>	129
Figura 39 <i>Diagrama de flujo del sistema de reconocimiento e identificación de alarmas</i>	130
Figura 40 <i>Representación para ajustar el casco de protección</i>	134

Figura 41 <i>Representación de carcasa con tornillos</i>	135
Figura 42 <i>Representación de carga del dispositivo</i>	135
Figura 43 <i>Representación de ubicación de la batería</i>	136
Figura 44 <i>Representación de modo de encendido del dispositivo</i>	137
Figura 45 <i>Representación de la activación de alarmas del dispositivo de asistencia</i>	138
Figura 46 <i>Representación del botón Reset</i>	139
Figura 47 <i>Representación de las recomendaciones para el dispositivo de asistencia</i>	140
Figura 48 <i>Prueba del tiempo de respuesta con el trabajador</i>	145
Figura 49 <i>Pruebas de distancia mínima y máxima de detección con el trabajador</i>	147
Figura 50 <i>Pruebas de duración de la batería con el operario</i>	148

Resumen

En Ecuador alrededor del 2,77% de la población sufre de algún tipo de discapacidad, según datos obtenidos por la CONADIS. Es por esta razón que se han formulado leyes enfocadas a la contratación de personas con discapacidad. A fin de cumplir con estas normativas varias empresas del Ecuador, ha empleado a personas con discapacidad, entre ellas personas con discapacidad auditiva. Por lo que han adecuado instalaciones y buscado soluciones que le permitan al operario tener independencia laboral para realizar sus actividades de manera segura.

Dando solución a esta problemática, se ha elaborado un dispositivo de asistencia enfocado en cumplir las necesidades del trabajador con discapacidad auditiva. El dispositivo tiene como propósito alertar al operador sobre la activación de alarmas sonoras generadas por vehículos móviles como el elevador y montacargas, el llamado ANDON que informa sobre alguna anomalía en producción y la alarma de incendios. Con el fin de posibilitar la igualdad de oportunidades con el resto de empleados al poder reaccionar frente a siniestros fomentando su autonomía laboral.

Para la elaboración del dispositivo se hizo uso de micrófonos MEMS para la adquisición de las señales de alarmas, los cuales a través del microcontrolador ESP32 activan actuadores que estimulen el tacto y la visión del operador. Una vez elaborado el dispositivo se han realizado pruebas a fin de evaluar parámetros como tiempo de respuesta, distancia y portabilidad del dispositivo. De igual manera se realizaron pruebas ergonómicas para evaluar las opiniones del operario, de las pruebas realizadas se concluye que el dispositivo cumple con los objetivos planteados pues ayuda al trabajador a realizar sus actividades de manera segura.

Palabras claves: discapacidad auditiva, dispositivo de asistencia, autonomía laboral.

Abstract

In Ecuador, around 2.77% of the population suffers from some type of disability, according to data obtained by CONADIS. For this reason, laws focused on the employment of people with disabilities have been formulated. In order to comply with these regulations, several companies in Ecuador have employed people with disabilities, including people with hearing disabilities. Therefore, they have adapted facilities and sought solutions that allow the operator to have work independence to perform his activities safely.

To address this issue, an assistance device has been developed to meet the needs of the worker with this disability. The device's purpose is to alert the operator about the activation of alarms generated by mobile vehicles such as the elevator and forklift, the so-called ANDON that informs about any anomaly in production, and the fire alarm. This is to enable equal opportunities with the rest of the employees by being able to react to disasters, promoting his work autonomy.

To develop the device, MEMS microphones were used to acquire the alarm signals, which activate actuators that stimulate the operator's touch and vision through the ESP32 microcontroller. Once the device was developed, tests were carried out to evaluate parameters such as response time, distance, and portability of the device. Likewise, ergonomic tests were carried out to evaluate the operator's opinions. From the tests carried out, it is concluded that the device meets the stated objectives as it helps the worker perform his activities safely.

Key Words: hearing impaired, assistive device, labor autonomy.

Capítulo I. Introducción

Antecedentes

La OMS estima que más del 5% de la población del mundo tiene pérdida discapacitante de la audición (Mitchell. C, 2020), este problema se presenta cuando existe una afección en una o más partes del oído evitando que un individuo reciba sonidos en todas o casi todas sus formas, como el tono, volumen y calidad. La pérdida auditiva es la incapacidad para recibir adecuadamente los estímulos auditivos del medio ambiente. La persona afectada no solo escucha menos, sino que percibe el sonido de forma irregular y distorsionada, limitando sus posibilidades para procesar debidamente la información auditiva de acuerdo con el tipo y grado de pérdida auditiva (Consejo Nacional de Fomento Educativo, 2010).

La Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad ONU 2006, resalta entre sus principios generales la participación e inclusión plena y efectiva en todas las actividades de la vida (Sánchez, Romero, & Padrón, 2019), por esta razón, se busca que el trabajador con sordera desarrolle habilidades para la comunicación y entendimiento entre los demás trabajadores y su entorno laboral. La responsabilidad empresarial está basada en cumplir con la obligación de alcanzar la máxima seguridad para el personal que trabaja con ellos, evitando así utilizar como pretexto la seguridad y la salud para no emplear o dejar de emplear personas con discapacidad (Fundación ONCE, 2022).

Por ejemplo, en el campo de la industria Honda Motor, empresa líder en la fabricación de motocicletas y automóviles, es una de las principales empresas a nivel mundial en incluir políticas de no discriminación, dando oportunidad de empleo a personas con capacidades especiales, promoviendo su independencia social creando proyectos para obtener un entorno de trabajo libre

de obstáculos, obteniendo así un lugar accesible para empleados con y sin discapacidad (Oficina Internacional del Trabajo, 2011), logrando bajar el índice de accidentes laborales.

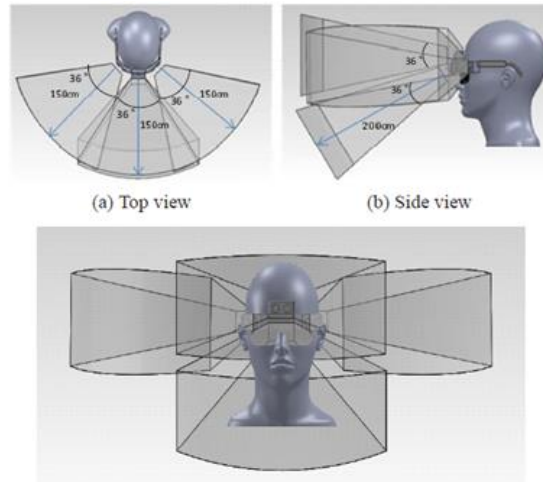
En Ecuador, desde febrero de 2020 hasta febrero de 2021, el Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social registró 10821 accidentes laborales (Universidad Técnica Particular de Loja, 2021), entre ellas personas con discapacidad, por lo que se llama a la concientización de empleadores para desarrollar planes preventivos para gestionar todos los temas de seguridad de forma planificada, en especial si existen trabajadores con alguna discapacidad en el lugar de trabajo.

En la actualidad no existen muchas soluciones tecnológicas en el ámbito de seguridad industrial que proporcionen información en tiempo real y alerten a trabajadores con sordera en casos de emergencias o cualquier tipo de alarma institucional, sin embargo, existen varias soluciones para la comunicación entre personas oyentes y con sordera, que se tomarán como base para este proyecto de titulación.

Debido a las necesidades, se ha venido desarrollando diferentes propuestas de prototipos que permitan ayudar a personas con capacidades reducidas. Por ejemplo, en el trabajo realizado en (Nordqvist & Leijon, 2004) titulado “An efficient robust sound classification algorithm for hearing aids” se presenta un análisis del desempeño de un dispositivo inalámbrico de advertencia de vibración colocado en gafas de seguridad para detectar obstrucciones para personas sordociegas. Se utilizan zumbadores eléctricos para dar señales de advertencia al detectar obstáculos mediante sensores ultrasónicos que se montan en las gafas de seguridad para detectar el obstáculo en cuatro direcciones, como adelante, abajo, izquierda y derecha. Para el experimento se configuran las vibraciones para avisar al usuario cuando se detecten obstáculos.

Figura 1

Dispositivo de advertencia en gafas de seguridad para detectar obstrucciones para personas sordociegas

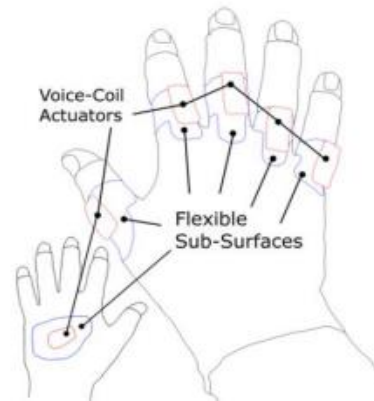


Nota. Dispositivo de advertencia en gafas de seguridad para detectar obstrucciones para personas sordociegas tomado de *An efficient robust sound classification algorithm for hearing aids*, por Nordqvist & Leijon, 2004.

En el artículo de (Thie, 1998) , titulado “A pan-European social alarm system” se presenta una solución mediante uso de señales hápticas las cuales se centran principalmente en la detección de cambios de baja frecuencia, tanto para tonos puros (ondas sinusoidales) como para formas de onda más complejas (onda de sierra y cuadradas), mediante la utilización de tareas de discriminación de frecuencia de elección forzada de dos alternativas (2AFC) para medir la sensibilidad. La estimulación auditiva y táctil se recibe a través de la presión mecánica física en forma de oscilaciones, estas vibraciones hacen que los mecanorreceptores de la piel activen impulsos neuronales que son procesados por el cerebro, hablando así de retroalimentación vibro táctil de audiofrecuencia.

Figura 2

Guantes vibro táctiles



Nota. Guantes vibro táctiles mediante señales hápticas tomado de *A pan-European social alarm system*, por Thie, 1998.

Otra técnica es la presentada en el trabajo (Thin, Tho, & Nga, 2017), titulado “Robot supporting for deaf and less hearing people” propone un sistema de alarmas correspondiente a la vibración inalámbrica, en donde el rango de velocidad operativa del vibrador puede controlarse mediante modulación de ancho de pulso (PWM) producida por un microcontrolador para generar varios tipos de patrones de vibración, que permiten diferenciar la dirección de la obstrucción o para indicar la distancia de la obstrucción del usuario.

Finalmente, en (Ohtsuka, Hasegawa, Sasaki, & Harakawa, 2010) se ofrece una solución para la comunicación entre personas con discapacidad auditiva y oyentes a través de un robot. Este robot se ubica en el espacio público para brindar y orientar información tanto a los clientes como a las personas sordas y con problemas de audición, mientras que en (Adhami & Clontz, 1989) se estipula la comunicación entre personas oyentes con personas sordociegas haciendo uso de un sistema Body-Braille de control remoto por infrarrojo. Este sistema se transmite a través de

cualquier parte del cuerpo mediante dos micro vibradores, interruptores para la entrada de datos en Braille y una salida de infrarrojos.

Justificación e Importancia

Según datos de la OMS, en el mundo 1500 millones de personas viven con algún grado de pérdida de audición, de las cuales casi el 80% vive en países de ingresos bajos y medianos, afectando a su comunicación, educación y empleo (Guernsey, Nicoli, & Nini, 2007).

La Ley para Personas con Discapacidades ADA de EE.UU y la Ley de Integración Social del Minusválido LISMI de España, concede protecciones de derechos civiles a personas con discapacidades, tanto en educación como en empleo permitiendo que estas personas tengan vidas más activas y productivas, es por esto que se ha establecido reglamentos de seguridad industrial, a fin de evitar accidentes, haciendo uso de adaptaciones razonables donde se hacen cambios o ajustes en el entorno laboral que permite asegurar que una persona calificada con discapacidad tengan los mismos derechos que los empleados que no posean discapacidades (Cañón, 2013). Por su parte, la Ley Orgánica de discapacidades en Ecuador promueve el cumplimiento del porcentaje de inclusión de personas con discapacidad, como se menciona en el artículo 12 donde se establece que el porcentaje se calculará y aplicará en base al total de trabajadores (Ley Orgánica de Discapacidades, 2017). El Ministerio de Trabajo en Ecuador, fomenta la inserción laboral de personas con discapacidad, a fin de garantizar los derechos de los trabajadores con alguna clase de discapacidad. El artículo 42 numeral 33 del Código del Trabajo determina que, en caso de contar con un número mínimo de veinticinco trabajadores, está obligado a contratar, al menos a una persona con discapacidad. (Ministerio del Trabajo, 2009)

Hace muchos años, las personas sordas y con dificultades auditivas se comunicaban a través de dispositivos de telecomunicaciones conocidos como modo teléfono de texto TTY o desarrollo dirigido por tests TDD, ya sea entre dos usuarios de dichos dispositivos o entre un usuario y un operador de retransmisión (ADA, 2014). Si bien existen numerosas referencias a dichos dispositivos, es importante tener en cuenta que esta tecnología está entrando en desuso, siendo reemplazada por nuevas formas de transmisión más fáciles y accesibles para todos. Es por esta razón que hoy en día, se hace uso del procesamiento de señales, teniendo así mayor oportunidad de desarrollar dispositivos que ayuden a mejorar la calidad de vida en ámbitos laborales para personas con sordera, generando estrategias de inserción laboral para mejorar la empleabilidad, las tasas de actividad y de ocupación y la calidad del empleo de las personas.

Una de las empresas que en el ámbito local apoya la inserción laboral de personas con sordera es Dana - Transejes Ecuador, orientada a la industria automotriz ubicada en el sector de Carcelén en la ciudad de Quito, provincia de Pichincha, que busca la igualdad de sus trabajadores, mediante prácticas de responsabilidad social. Actualmente cuenta con 75 empleados entre ellos una persona con sordera. Esta persona con capacidades especiales se encarga del proceso de vestidura de vehículos en una zona ruidosa donde existen varias alarmas como medio de seguridad. Las alarmas corresponden al montacargas y procesos productivos de la empresa los cuales son auditivos y lumínicos. Las alarmas lumínicas se encuentran localizadas en puntos estratégicos, sin embargo, el operario con sordera no siempre puede visualizar la activación de las alarmas. Por esta razón DANA Transejes Ecuador busca mejorar los equipos de protección mediante un sistema de asistencia guiada que informe y ayude al operario con sordera a identificar las distintas alarmas de la empresa.

Alcance del Proyecto

El presente proyecto de titulación consiste en la elaboración de dos versiones de un sistema de asistencia guiada para un trabajador con sordera de Dana - Transejes Ecuador, a fin de que pueda detectar e identificar una alarma sonora y alerte de forma eficiente al usuario. Se busca implementar dos dispositivos que permitan una asistencia guiada para el trabajador con sordera, las mismas que se accionarán con las diferentes alarmas de la empresa, a fin de seleccionar la versión del dispositivo que mejor se adapte a las condiciones de trabajo, confort y accesibilidad de acuerdo con su desempeño y la apreciación del usuario.

Para la adquisición de las distintas señales de alarma de la empresa, se propone el diseño en distintas configuraciones de sensores de detección de sonido que permitan el correcto registro de las señales de alarma. El sensor seleccionado para la detección de sonido es el micrófono que es un transductor que realiza una conversión entre las ondas de presión y variaciones de nivel en la corriente eléctrica (Arellano, 2007). Existen diferentes configuraciones de micrófonos, por lo que se realizarán pruebas para elegir la configuración que mejor se adapte a las necesidades del proyecto en este caso la reducción de ruido para identificar de mejor manera las diferentes señales de alarmas.

Las señales captadas serán procesadas, analizadas y clasificadas, de acuerdo a los diferentes tipos de alarmas de la empresa DANA, para ello se analizará diferentes especificaciones y configuraciones de tarjetas microcontroladas y microprocesadas buscando el mejor desempeño en el procesamiento y clasificación. Cabe indicar que para este caso se va a utilizar microcontroladores debido a su arquitectura, instrucciones ortogonales, amplio margen de alimentación y salidas de corriente elevadas.

La selección de los actuadores dependerá de la estimulación multisensorial y recepción de estímulos, cualidades y formas que sirven para captar información del mundo. Para una persona con sordera las estimulaciones hápticas, que es un tipo de estimulación táctil, y las estimulaciones visuales son la forma más fácil de reconocer y procesar información. Estas estimulaciones cobran gran importancia debido a que son empleadas en la percepción y orientación. En la estimulación visual los recursos utilizados pueden ser: linternas, proyector, pantallas, bombillas, entre otras. Mientras que en la estimulación háptica se utilizan aparatos vibradores, masajeadores con vibración, altavoces. (Perez, 2015)

Se propone el diseño de dos dispositivos: uno basado en estimulación háptica y el otro en estimulación visual. Para ello se va a registrar, procesar, e identificar las diferentes señales de alarma generadas por el sistema de seguridad de la empresa, con el fin de activar los dispositivos, se hace uso de actuadores para la estimulación visual en este caso luces led y háptica como zumbadores eléctricos que ayuden a la persona con sordera para la identificación de las señales de alarma.

Finalmente, se realizará una valoración cuantitativa de los prototipos propuestos en cuanto tiempo de respuesta, tamaño, tiempo de carga y descarga y sincronización. Adicional, se realizará una evaluación cuantitativa de acuerdo a la percepción del operario con sordera que trabaja en la empresa para el cual fueron diseñados los dispositivos, donde se analizarán temas de ergonomía, comodidad y funcionamiento. A fin de seleccionar el mejor dispositivo que se adapte a las necesidades y gusto del trabajador.

Objetivos

Objetivo General

Implementar un dispositivo de asistencia guiada para personas con sordera que permita el aviso e identificación de alarmas sonoras en entornos de la industria automotriz.

Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de monitorización que permita la adquisición de diferentes señales de alarmas auditivas de una empresa automotriz.
- Realizar un análisis comparativo del desempeño de diferentes microcontroladores para la adquisición y procesamiento de las señales de alarma.
- Diseñar un sistema de estimulación visual y táctil para personas con sordera o capacidades auditivas limitadas.
- Elaborar dos prototipos de prueba uno basado en la estimulación háptica y otro en la estimulación visual que permitan la adquisición, procesamiento e identificación de diferentes alarmas sonoras y generen estímulos para personas con sordera o capacidades auditivas limitadas.
- Realizar un análisis comparativo del desempeño de los diferentes prototipos propuestos en el entorno industrial.

Capítulo II. Marco conceptual

Introducción

El presente proyecto de titulación está basado en mejorar las oportunidades de personas con discapacidad auditiva a través de un dispositivo de asistencia, con el fin de incentivar y fortalecer sin restricciones su vida laboral en entornos industriales. Evitando que existan inconvenientes ocasionados por peligros latentes como accidentes con distintos tipos de montacargas y también para que puedan reaccionar ante llamados de emergencia que pongan en riesgo su vida o la producción de la planta.

En este capítulo se realiza una investigación sobre las leyes y reglamentos que ofrecen seguridad a personas que trabajan en entornos industriales, dando énfasis a las necesidades de personas con discapacidad. También se describen conceptos necesarios para la construcción del algoritmo de programación e implicaciones que permitan el correcto desarrollo del dispositivo. Finalmente, se va a realizar una búsqueda de instrumentos de medición de sonido que fundamenten la elaboración del dispositivo para contribuir con la seguridad del trabajador con sordera.

Leyes y reglamentos de seguridad y salud industrial

Actualmente la seguridad y salud laboral se establece como un modelo integrado en proyectos, equipos o procesos, con la adopción de medidas de prevención que permitan las mejores condiciones de seguridad (Vargas, 2011). Debido a que la seguridad industrial se basa en proteger la vida de los trabajadores, es necesario el cumplimiento de normas y procedimientos que proporcionen óptimas condiciones laborales y de capacitación. A continuación, se detallan algunas de las leyes y reglamentos a nivel mundial y nacional, que proponen prevenir

enfermedades ocupacionales y accidentes laborales en empresas dedicadas a la producción industrial.

A nivel andino de acuerdo con el Artículo 11 establecido por (Pérez & Moreira, 2021) se deben tomar medidas que disminuyan el nivel de riesgos laborales. En este aspecto se busca la regulación de una política de prevención contra riesgos en el trabajo mediante la adopción de mecanismos que garanticen la seguridad y salud del trabajador.

El gobierno del Ecuador tratando de promulgar las buenas prácticas laborales para fomentar la seguridad y salud ocupacional, estipula en el artículo 326 (Constitución de la República del Ecuador, 2008) el derecho de los trabajadores a contar con un ambiente laboral digno, que garantice su bienestar cumpliendo con condiciones saludables y seguras. A fin de cumplir con dichas condiciones, en el artículo 155 (Reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores, 1986) se han contemplado algunos mecanismos de prevención de riesgos que las empresas deben implementar a fin de salvaguardar la vida e integridad de sus empleados. Los mecanismos de prevención se establecen mediante acciones técnicas como identificación y medición de peligros que ayuden a los trabajadores a contemplar situaciones de riesgo laboral y tomar planes de acción ante estas situaciones.

Según las leyes del Ecuador (Ministerio del Trabajo, 2009) se postula que entre los trabajadores de una empresa debe haber un mínimo de empleados con discapacidad, por lo que se plantean normativas para desarrollar entornos de trabajo libre de discriminación y accidentes, dando como finalidad que los trabajadores con discapacidad gocen de las mismas oportunidades que el resto del equipo de trabajo (Ley Orgánica de Discapacidades, 2017).

Las buenas prácticas laborales están basadas en el cumplimiento de las leyes y reglamentos mencionados anteriormente, sin embargo, existen diversos sectores industriales que presentan riesgos particulares. Es por esta razón que existen manuales y protocolos dedicados a cubrir las necesidades de cada sector industrial.

La industria automotriz se caracteriza por asegurar las condiciones de trabajo fomentando la participación y asesoramiento de Salud y Seguridad Ocupacional, basándose en contrarrestar accidentes laborales que tengan mayor concurrencia. Según la Superintendencia de Riesgos del Trabajo las principales formas de lesiones a personal que trabaja en esta área son golpes por objetos móviles, choques contra objetos móviles, caídas de personas, entre otros, en la Tabla 1 se presenta el porcentaje de ocurrencia de los accidentes mencionados (Superintendencia de Riesgos del Trabajo, 2016).

Tabla 1

Principales formas de ocurrencia de las lesiones, las zonas del cuerpo afectadas y los materiales en la industria automotriz

Formas de ocurrencia	Porcentaje de casos
Golpes por objetos móviles (excluye golpes por objetos que caen)	15,4%
Choque contra objetos móviles	9,8%
Injuria punzo-cortante o contusa involuntaria	9,3%
Choque de vehículos	8,7%
Caídas de personas que ocurren al mismo nivel	6,4%

Nota. Tabla con las principales formas de ocurrencia de las lesiones, las zonas del cuerpo afectadas y los materiales en la industria automotriz. Información adaptada de *Manual de Buenas Prácticas- Industria Automotriz.*, por Superintendencia de Riesgos del Trabajo, 2016

En base al estudio realizado en (Superintendencia de Riesgos del Trabajo, 2016) las consecuencias que generan estas acciones pueden ocasionar contusiones, heridas cortantes, traumatismos internos, trastornos en oídos y ojos, e incluso la muerte del operador. A fin de evitar estos accidentes las empresas han implementado sistemas de alarmas que alerten a los trabajadores sobre peligros latentes como el acercamiento de objetos móviles, además del uso de equipos de protección individual para contrarrestar daños ocasionados por los mismos.

Sistemas de alarma de seguridad industrial

Una de las acciones técnicas aplicadas en el cumplimiento de objetivos de seguridad industrial son los sistemas de alarma, destinados a informar al personal sobre distintos acontecimientos que pueden ocasionar daños tanto al personal como a su lugar de trabajo (Lasluisa, 2008). Estos sistemas de alarma son considerados mecanismos de seguridad ante situaciones de riesgo, incapaces de detener físicamente el evento, pero que tienen como finalidad alertar sobre un suceso, utilizando dispositivos de notificación que pueden ser sonoros o visuales.

Actualmente, el uso tecnológico en sistemas de alarma ha tenido mayor acogida debido a su robustez, garantizando la seguridad de los trabajadores y del espacio físico. Los sistemas de alarma se pueden clasificar conforme a las necesidades industriales como; sistemas de priorización de zonas que tiene como objetivo disminuir los riesgos de los activos de la empresa, sistemas de video vigilancia que incorporan CCTV para definir el nivel de vulnerabilidad y sistemas de alarma con sensores de alta sensibilidad encargados de detectar eventos usando vibraciones de ondas de sonido o luz infrarroja. (Vigitek, 2022)

Los sistemas de alarma cuentan con dispositivos de notificación para alertar al trabajador sobre siniestros acontecidos, entre los más comunes se encuentran los dispositivos audibles que

indican el riesgo mediante el sentido del oído transmitido por sirenas, campanas o bocinas, los dispositivos visuales que utilizan el sentido de la vista y se difunden a través de luces parpadeantes y dispositivos combinados que realizan una notificación en masa mediante sistemas auditivos y visuales (Macías, 2021).

Las ramificaciones de la seguridad industrial generan riesgos particulares en donde se debe priorizar sistemas de alarmas que estén orientados a situaciones específicas. En el caso particular del sector automotriz se hace uso de sistemas de alarma que tienen como objetivo advertir sobre zonas prioritarias de la producción y la detección de eventos, a través de dispositivos de notificación auditivos y visuales que permitan la toma de decisiones. Por esta razón, se debe desarrollar planes de acción antes diferentes situaciones de riesgo y la aplicación de nuevas técnicas y tecnologías que produzcan un entorno donde todos los trabajadores puedan sentirse seguros.

Equipos de protección individual

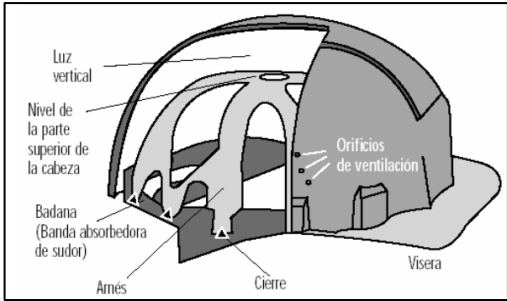
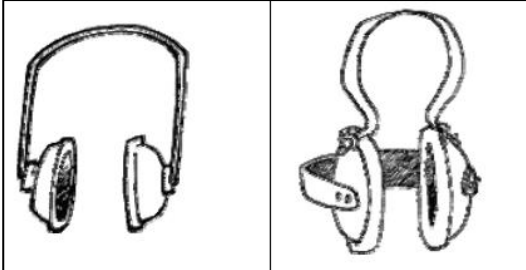
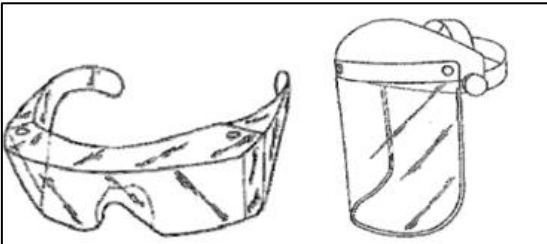
Debido al porcentaje de accidentes mencionados en la Tabla 1 se han tomado planes de acción como el uso de equipos de protección individual (EPI) definidos como equipos de protección para trabajadores contra riesgos o amenazas de seguridad y/o salud (Real decreto 773 Ministerio de la Presidencia BOE, 1997). La selección de estos equipos depende del área de trabajo y área de protección, entre ellos se encuentran los protectores de cabeza que incluyen oídos, ojos, cara y vías respiratorias, además de protectores para extremidades como manos, brazos, pies y piernas, y también equipos de protección total del cuerpo.


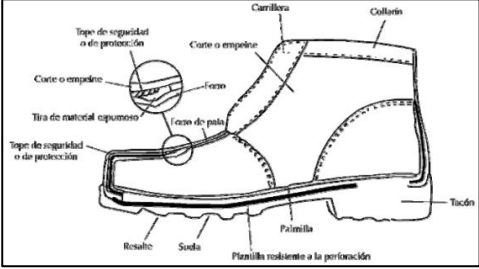
Con el objetivo de crear ambientes laborales libres de riesgo se hace uso de EPI en zonas industriales, zonas de construcción y lugares en donde corra peligro la integridad física de los

empleados. Debido a ello, existen criterios de selección de EPI que dependen de las condiciones anatómicas y físicas del trabajador y de su lugar de trabajo, a fin de evitar molestias innecesarias y riesgos adicionales. En la industria automotriz es obligatorio que tanto operadores como personas que ingresen a la planta de producción hagan uso de EPI que protejan ante riesgos de origen mecánico, eléctrico, térmico o físico (Superintendencia de Riesgos del Trabajo, 2016). En la Tabla 2 se detallan los EPI y la zona de protección utilizados en la industria automotriz.

Tabla 2

Equipos de protección individual para trabajadores en entornos industriales

Equipo	Ilustración
<p>El casco es una prenda usada para proteger la parte superior de la cabeza de posibles golpes, desviar objetos que caigan y disipar la energía del impacto. ^a</p>	
<p>Los protectores del oído son usados para atenuar el sonido, reducir el ruido laboral y evitar posibles daños de salud como sordera, jaquecas o estrés laboral. ^a</p>	
<p>Las gafas y pantallas de protección sirven para contrarrestar riesgos contra los ojos como impactos, polvo fino, gases, líquidos, radiaciones y polvo grueso. ^a</p>	

Equipo	Ilustración
<p>Los guantes son equipos de protección dedicados a proteger las manos y en algunos casos antebrazos y brazos, utilizados debido a riesgos como cortes, quemaduras, riesgos químicos, mecánicos o eléctricos. ^a</p>	
<p>Las botas abastecen de protección para los dedos gracias a su punta de acero evitando que exista lesiones en el caso de recibir algún impacto. ^a</p>	

Nota. Tabla con los equipos de protección individual industria automotriz. Definiciones adaptadas de ^a*Equipos de Protección de Fundación Estatal para la prevención de riesgos laborales, 2019* y gráficas obtenidas de *Real Decreto 773 Ministerio de la Presidencia BOE, 1997*

Con el fin de precautelar la vida y salud de los empleados, los EPI deben cumplir con requisitos legales y reglamentarios denominados “exigencias esenciales de salud y seguridad”, clasificándose en tres categorías; categoría I utilizada para proteger al usuario de agresiones superficiales, categoría II para la protección contra riesgos de grado medio o elevado y por último equipos de categoría III dedicados a proteger contra riesgos mortales o irreversibles (Superintendencia de Riesgos del Trabajo, 2016). En la industria automotriz se hace uso de equipos de categoría I y II debido a que el riesgo es considerado elevado, pero no irreversible.

A pesar de la calidad y selección de los EPI la eficiencia depende de su correcto uso y adecuado mantenimiento, es por esta razón que resulta indispensable cumplir con las instrucciones del folleto informativo que viene con cada equipo de protección, dando así

responsabilidades y obligaciones al operador o portador de los EPI a cuidar su ambiente laboral y proteger su integridad física. Adicionalmente, la correlación de estos mecanismos junto al uso de tecnología puede llegar a crear proyectos sociales que optimicen el bienestar y confort de los trabajadores ayudando en el cumplimiento de sus funciones.

Proyectos de asistencia guiada para personas con discapacidades en la industria

La discapacidad y la exclusión social son dos conceptos que van de la mano debido a que las personas que cuentan con una discapacidad son restringidas y limitadas a la integración social impidiendo su inclusión, pues varios sectores no pueden satisfacer las necesidades de estas personas a pesar de sus derechos sociales como se menciona en (ADA, 2014) que incentiva a las personas con discapacidad a tener vidas más productivas.

Según el censo del 2022, el INEC informa que en el Ecuador existen 612.837 personas que declaran estar en condición de discapacidad (Ministerio de Salud Pública del Ecuador, 2022), es por esta razón que el gobierno del Ecuador ha incursionado en el desarrollo de acciones para atender a la población con discapacidad, a través de programas de asistencia en educación, salud, trabajo y bienestar social; fomentando el cumplimiento de obligaciones laborales contenidas en el código de trabajo a fin de garantizar los derechos de los trabajadores con alguna clase de discapacidad, procurando su inserción laboral en las empresas según el porcentaje que determina la ley (Ministerio del Trabajo, 2022).

Las oportunidades generadas a las personas con discapacidad han tomado fuerza en las últimas dos décadas, logrando que tanto el sector privado como instituciones del sector público tengan la obligación de contratar personas con discapacidad, obligando a crear entornos de trabajo en donde estas personas cuenten con las mismas oportunidades que el resto de

empleados. Es por esta razón que se ha fomentado proyectos de ayuda social para la contratación de personas con discapacidad y valorar el trabajo de cada uno de ellos. A continuación, se detallan algunos proyectos que sirven como sustento para el desarrollo de proyectos tecnológicos de inclusión social.

En la industria de conservas Isabel de la ciudad de Manta-Ecuador, el departamento de Talento Humano ha creado proyectos de inclusión social que promueven la protección de derechos de colaboradores con discapacidad, creando cincuenta y siete plazas de trabajo las cuales se encargan de la limpieza de pescados, área de almacén, empaque, línea de vidrios y vendedores. Estos proyectos están basados en crear espacios adecuados y adaptados para personas con discapacidad, facilitando su movilización para que puedan desenvolverse en las funciones que se les asigne, pese a ello existen casos que ameritan que el trabajador con discapacidad tenga el apoyo adicional de un colaborador. Estas estrategias han tenido un impacto positivo, debido a que garantizan el cumplimiento de los derechos de las personas con discapacidad y la compatibilidad de los objetivos de las personas de su entorno (Pérez & Moreira, 2021).

Actualmente, existen proyectos sociales implementados para la inclusión laboral, que tienen como objetivo mejorar el entorno de trabajo de las personas con discapacidad y también proyectos enfocados en el apoyo de colaboradores para la realización de su trabajo. Pese a los esfuerzos creados por distintas organizaciones, no se han realizado proyectos con medios tecnológicos que ayuden al cumplimiento de sus funciones. Sin embargo, existen investigaciones que pueden ser base en el desarrollo de asistencias tecnológicas para personas con discapacidad, que trabajan en entornos industriales capaces de crear autonomía laboral, a continuación, se detallan las investigaciones que pueden servir a este propósito.

Dentro de las investigaciones realizadas se encuentra el trabajo de (Oberle & Kaelin, 1995) basado en el entrenamiento de redes neuronales para el reconocimiento de diferentes señales acústicas implementadas en audífonos. A partir de esta investigación, en el trabajo de (Nordqvist & Leijon, 2004) se estudia el comportamiento en diferentes entornos auditivos y la categorización de modulación de las señales; dando como resultado un algoritmo clasificador robusto y eficiente.

Por otro lado, en el trabajo realizado por (Nelson, Gallegos, Rea, & Galeas, 2021) se presenta una solución tecnológica para la industria minera, que brinda información y avisos en tiempo real sobre distintos eventos que ayudan a la seguridad de trabajadores y personal médico sin necesidad de equipos adicionales. En este proyecto se incorporan diferentes sensores que permiten la recopilación de datos en tiempo real y la visualización mediante una aplicación orientada a una interacción del usuario con el entorno. Con la finalidad de reducir el número de accidentes laborales haciendo uso de medios tecnológicos.

Las investigaciones mencionadas anteriormente sirven como fundamento teórico y práctico para el desarrollo del dispositivo de asistencia, haciendo uso de distintas leyes y reglamentos que tienen como objetivo priorizar el bienestar, autonomía y seguridad de personas con discapacidad, logrando un entorno de trabajo libre de discriminación y oportunidades igualitarias. Dentro de estos proyectos se utilizan conceptos como propagación de sonido, frecuencia y amplitud; indispensables en la construcción de bases sólidas para la elaboración del presente proyecto de titulación.

Normas y regulación acústica en entornos industriales

La contaminación auditiva es la representación de ruidos ambientales de intensidad medible compuesta por sonidos de varias fuentes fijas y móviles cercanas y lejanas (Ley de

Gestión Ambiental, 2004) que se superponen al sonido entre un emisor y un receptor. La contaminación auditiva es un problema provocado por varias fuentes nocivas de ruido que causan complicaciones a la salud del ser humano como dolores de cabeza e incluso pérdida de la audición. Es por esta razón que el estado ecuatoriano atendiendo al artículo 28 citado en (Nieto, 2008) propone a la ciudadanía establecer un ambiente sano y ecológicamente equilibrado que garantice el bienestar y salud de todos.

Un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud ha difundido que el límite superior deseable que un ser humano puede percibir es de 50 dB, mientras que 90 dB es un nivel de ruido perjudicial para el oído humano (Quispe, Roque, Rivera, Rivera, & Claros, 2021). Como resultado de esta investigación se han establecido normas de seguridad y leyes medioambientales que proponen diferentes alternativas de solución para mejorar la calidad de vida de las personas, estas acciones dependen de la hora del día y la actividad que se esté realizando.

Bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental (Ley de Gestión Ambiental, 2004) se ha establecido niveles máximos permisibles de ruido en diferentes zonas como se muestra en la Tabla 3, donde se puede constatar que la mayor ocurrencia de ruido se da en entornos industriales. Debido a estos altos niveles de sonoridad, se han establecido normas y reglamentos que las empresas industriales deben cumplir a fin de proteger la salud y bienestar de sus trabajadores.

Tabla 3

Nivel de presión sonora de acuerdo al tipo de zona y según el uso del suelo

Tipo de zona según uso del suelo	Nivel de presión sonora equivalente NPS eq [dB(A)]	
	06H00 A 20H00	20H00 A 06H00
Zona hospitalaria y educativa	45	35
Zona Residencial	50	40
Zona Residencial mixta	55	45
Zona Comercial	60	50
Zona Comercial mixta	65	55
Zona Industrial	70	65

Nota. Tabla con los niveles de presión sonoros de acuerdo al tipo de zona y según el uso del suelo.

Información adaptada de *la Norma técnica de los límites permisibles de ruido ambiente para fuentes fijas y fuentes móviles.*, por *Ley de Gestión Ambiental, 2004.*

En este contexto se considera al ruido como uno de los contaminantes laborales más comunes en entornos industriales, ya que son un peligro potencial para la audición de los trabajadores. Es por esta razón que se han generado acciones que contrarresten este problema como controlar la exposición diaria a ruido y el uso de equipos de protección auditiva, a fin de evitar problemas como pérdida auditiva, acufenos, estrés, incremento de accidentes y disminución del rendimiento laboral (Superintendencia de Riesgos del Trabajo, 2016). Adicionalmente, se capacita al personal con fundamentación teórica que facilite el entendimiento y cuidado al trabajar en lugares con alto nivel de presión sonora.

Fundamentos de propagación y medición en entornos industriales

Los estímulos auditivos se propagan a través del aire hasta llegar al pabellón de oído, generando impulsos nerviosos que viajan hacia el cerebro, el cual analiza y genera respuestas apropiadas ante los mismos. Dichos estímulos son conocidos como sonido que es el conjunto de

ondas mecánicas de presión longitudinal generando vibraciones en el aire que viajan a través de formas de fluctuación dependiendo de la presión en el aire (Vilanova, 2016). El sonido cuenta con características que ayudan al reconocimiento e identificación de mensajes como amplitud, frecuencia, intensidad, duración y timbre.

Existen varias propiedades que brindan cualidades únicas al sonido entre ellas; la intensidad encargada de caracterizar al sonido como fuerte o débil según la potencia con la que se haya generado (Vilanova, 2016), esta cualidad es medida a través de un sonómetro y su resultado se expresa en decibeles (dB). Otra forma de caracterizar el sonido es dependiendo de la amplitud, es decir, la presión sonora ejercida, la cual relaciona la distancia y el desplazamiento de moléculas dando como resultado que el mensaje pueda ser escuchado o no, dependiendo de la distancia y el entorno (Sinclair, 1998).

La frecuencia es otra característica del sonido denominada como la cantidad de vibraciones en el aire transmitidas en un segundo, ayudando así a la identificación y percepción que clasifica al sonido como grave o agudo, su unidad de medida es el Hercio o por sus siglas Hz (Aldas, 2022). Como se pudo observar cada característica del sonido lleva consigo una unidad de medición que tiene como objetivo principal cuantificar las propiedades físicas del mismo.

En este contexto, para que exista una correcta identificación del sonido es necesario que exista un medio material donde las vibraciones de las moléculas sean percibidas como ondas sonoras con la finalidad de obtener una correcta propagación del mensaje (Fundamentos de sonido, 2018). La propagación del sonido está sujeta a ciertas condiciones que generan dos tipos de propagación refracción y reflexión. La refracción hace que el sonido viaje en línea recta en un medio de densidad uniforme, mientras que en la propagación ocasionada por la reflexión las

ondas sonoras golpean medios con diferentes densidades con ángulos de incidencia, dando lugar al reflejo del sonido mejor conocido como eco (Aldas, 2022).

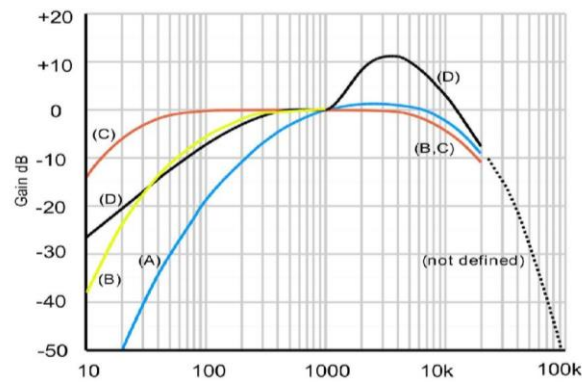
Tomando en consideración las formas de propagación, se pretende describir el movimiento oscilatorio de las partículas que generan sonido, dando lugar al espectro de frecuencia como una representación gráfica de las ondas y su campo de aplicación en función de la frecuencia (Rossmann, 2014). Para caracterizar las formas de onda que generan diferentes vibraciones en el oído es necesario conocer el nivel y la energía sonora que se distribuye en cada frecuencia (Murrel, Mannix, & Vetrani, 2015).

La primera característica está basada en la ponderación de frecuencias que sirve para medir los niveles de ruido a través de un instrumento de medición específico, dando como resultado una interpretación más plausible del sonido. Existen diferentes tipos de ponderaciones la más utilizada es la ponderación A, debido a las diversas aplicaciones de medición y facilidad de lectura, según la norma estándar internacional IEC 61672:2003 de la Comisión Internacional Electrotécnica (Aldas, 2022) se define a la frecuencia de la ponderación A como una medida de ruido ambiental y laboral, además de ser apropiada para medir ruido de fondo y evaluaciones de ruido nocivo para la salud como se muestra en la Figura 3.

Por otro lado, se puede caracterizar al sonido dependiendo de la división del espectro de la frecuencia, a esta característica se la define como bandas de octava. Como su nombre expresa la frecuencia es dividida en bandas de ocho octavas, las cuales guardan una relación entre frecuencias de 2:1, es decir, la frecuencia $n+1$ es igual a dos veces la frecuencia n . Además, las escalas más utilizadas de bandas por octava se encuentran en el rango de 63 Hz a 8 000 Hz (Aldas, 2022), la misma que será utilizada en el algoritmo de programación para el desarrollo del dispositivo de asistencia.

Figura 3

Curvas de frecuencias A, B, C, D



Nota. Curvas de Frecuencias A, B, C, D en el eje X en Hz y eje Y en dB tomado de *Evaluación del ruido ambiental y vibraciones de la empresa master metal, 2022.*

Siguiendo con la investigación, se ha observado que las industrias con mayores niveles de ruido son las dedicadas a la imprenta, pintura, construcción, industrias manufactureras, automotrices, fábricas petroleras, agrícolas y mineras, las mismas que contienen máquinas de soldadura, mecanizado de piezas, entre otras, que son los principales productores de ruido (Arce, *Micrófonos: Tecnología y procesos para la creación sonora y el registro binaural, 2021*). A fin de salvaguardar la salud de los trabajadores las industrias han adoptado medidas que protegen a los empleados de los riesgos derivados del ruido, dando como resultado el uso de equipos de protección personal e individual EPI contra el ruido como tapones u orejeras, que ayudan a la atenuación contra el mismo.

Un trabajador puede recibir cierta dosis de ruido durante la jornada laboral, por ellos es necesario medir el ruido estable, fluctuante o impulsivo mediante medidores de nivel sonoro que cumpla con las exigencias señaladas para un instrumento Tipo 2. Estos instrumentos se caracterizan por medir parámetros de forma simultánea y están acoplados a un calibrador

acústico, cumpliendo con la norma IRAM4074:1988 y la norma IEC804-1985 (Superintendencia de Riesgos del Trabajo, 2016).

Existen dos métodos de medición para obtener la exposición diaria de ruido, la primera es a través de una medición directa y la segunda es mediante los niveles sonoros equivalentes (Superintendencia de Riesgos del Trabajo, 2016). Para el trabajo presente se hace uso de la medición a partir de niveles sonoros equivalentes, usando un instrumento de medición que disponga de un filtro de ponderación A en frecuencia y respuesta temporal lenta, que son características de los instrumentos de medición Tipo 2.

Finalmente, en la medición del ruido en entornos industriales se debe tener en cuenta ciertos factores como la correcta calibración de los equipos y evitar que el ambiente de trabajo no se vea influenciado por factores ajenos a los habituales como la incorporación de campos eléctricos y magnéticos puesto que pueden afectar a las mediciones. Además, es necesario conocer los niveles de inmisión del ruido para analizar el sonido en áreas y situaciones distintas a fin de determinar el grado de molestia que estas ocasionan, esta característica es subjetiva al momento de establecer los criterios de calidad del ambiente, por lo que se establecen indicadores para evaluar el ruido en los entornos industriales como por ejemplo el tiempo de exposición y la energía sonora.

Capítulo III. Diseño e implementación del hardware

Introducción

El prototipo fue diseñado para satisfacer las necesidades del operario con discapacidad auditiva, donde se planteó el diseño e implementación de un dispositivo de asistencia, que permita la adquisición de distintas alarmas para su posterior reconocimiento e identificación. Para cumplir con las normativas establecidas por entidades gubernamentales sobre la creación de espacios libres de riesgo y discriminación como se mencionó en el capítulo anterior.

El dispositivo realiza la conversión de señales de audio que pueden ser detectadas mediante estímulos. Para el proceso de diseño se planteó el uso de tres configuraciones para la obtención de señales de audio, basadas en diferentes micrófonos que cumplen con los requisitos de instrumentos Tipo 2. Los micrófonos utilizados para este propósito son INMP441y SPH0645, conectados en configuración de audio monofónica y estéreo. Adicionalmente, se realizó la selección del microcontrolador y de actuadores que ayuden a alertar al operario sobre la activación de alguna alarma.

Tras las pruebas de funcionamiento, en la empresa DANA Transejes Ecuador, se ejecutaron pruebas de ergonomía que fueron realizadas al operario, dando lugar al desarrollo del diseño final e implementación del dispositivo de asistencia, para el bienestar y crecimiento laboral del operario con discapacidad auditiva.

Requerimientos de diseño

El dispositivo de asistencia planteado en el presente proyecto de titulación, está dirigido a la empresa DANA Transejes Ecuador, una empresa automotriz dedicada a la elaboración de autopartes. La misma que emplea a una persona con discapacidad auditiva en el área de almacén,

razón por la cual se han tomado acciones y procedimientos en la adecuación de sus espacios físicos para la adaptabilidad del trabajador facilitando su movilidad. El departamento de Ingeniería junto con el de Talento Humano desean garantizar la protección de los derechos de su colaborador con discapacidad, promoviendo diversas iniciativas como aprendizaje de lenguaje de señas y proyectos de inclusión que ayuden al operador a realizar sus actividades sin riesgo de accidentes.

Debido a esto, se plantea el desarrollo de un dispositivo de asistencia que alerte al trabajador sobre peligros latentes como choques con vehículos móviles como el montacargas o situaciones de emergencia como incendios que pongan en riesgo la vida del colaborador con discapacidad. Además de advertir al operador sobre los estados del proceso de producción, otorgando autonomía y evitando complicaciones en la realización de sus actividades.

Teniendo en cuenta las recomendaciones de la empresa se plantea una solución que sea capaz de detectar las alarmas en tiempo real a una distancia mínima de exposición entre el operador y la alarma menor a un metro y que pueda cumplir con sus funciones de forma continua, es decir, sin interrupciones, en una jornada de ocho horas laborales. Además, el dispositivo debe ser capaz de reconocer e identificar cuatro tipos de alarmas, que cumplen con ciertas condiciones estipuladas por el reglamento interno de la empresa (DANA, procedimiento operativo, 2021).

Entre los sistemas de alerta que se desea reconocer se encuentran las alarmas que usan las maquinarias del elevador y montacargas, para avisar a los trabajadores o personas que se encuentren en la fábrica sobre el acercamiento de los mismos. El reglamento manifiesta que debe existir una distancia segura entre el operador y el vehículo de 2 pies o 60 centímetros a fin de evitar accidentes (DANA, procedimiento operativo, 2021). La siguiente alarma es conocida como llamado ANDON, encargada de advertir a los operadores del área de almacén sobre paradas de

producción debido al desabastecimiento de materiales. Finalmente, se desea reconocer la alarma de incendios, cuyo objetivo es indicar a los trabajadores que deben dirigirse de forma inmediata a las salidas de emergencia. Cada alarma cuenta con un tono particular que las diferencia unas de otras, logrando así que los trabajadores puedan responder de forma inmediata ante sus activaciones.

Descripción de señales de alarma

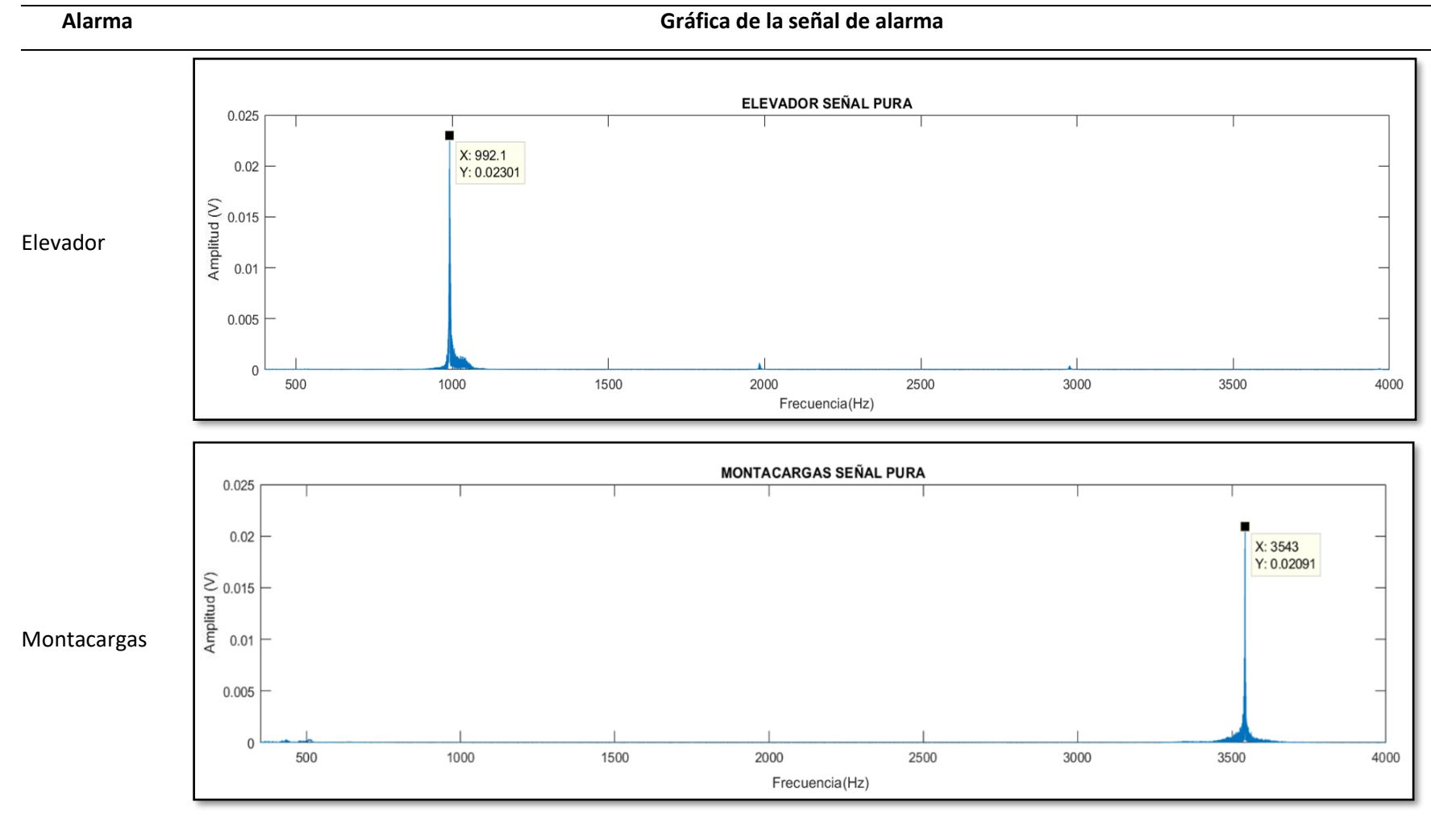
Para la adquisición, reconocimiento e identificación de señales de audio se debe caracterizar los distintos sonidos de las alarmas generadas por el elevador, montacargas, llamado ANDON y la alarma de incendios.

En el área de almacén es común el uso de vehículos como montacargas y elevador cuyo objetivo es facilitar el transporte y manipulación de piezas. El elevador presenta un tono agudo con una frecuencia de 922Hz, mientras que el montacargas tiene frecuencia de 3543Hz. El llamado ANDON es una alarma específica que señala inconformidades en distintas áreas, para el área de almacén la activación de esta alarma se debe a una parada en la producción, por defectos o falta de material. Esta alarma tiene una frecuencia característica de 2025Hz, que tiene como objetivo la inmediata corrección de la falla. Finalmente, la alarma de incendios que indica a todo el personal de la planta sobre algún tipo de incendio, la frecuencia que caracteriza a esta alarma es de 1350Hz.

En la Tabla 4 se muestran los espectros en frecuencia de las distintas alarmas a fin de representar las frecuencias características que generan al ser activadas. Cabe mencionar que las gráficas representan señales de las alarmas que no fueron grabadas con los micrófonos presentados en este proyecto y estimadas con la FFT que será explicado en el capítulo IV.

Tabla 4

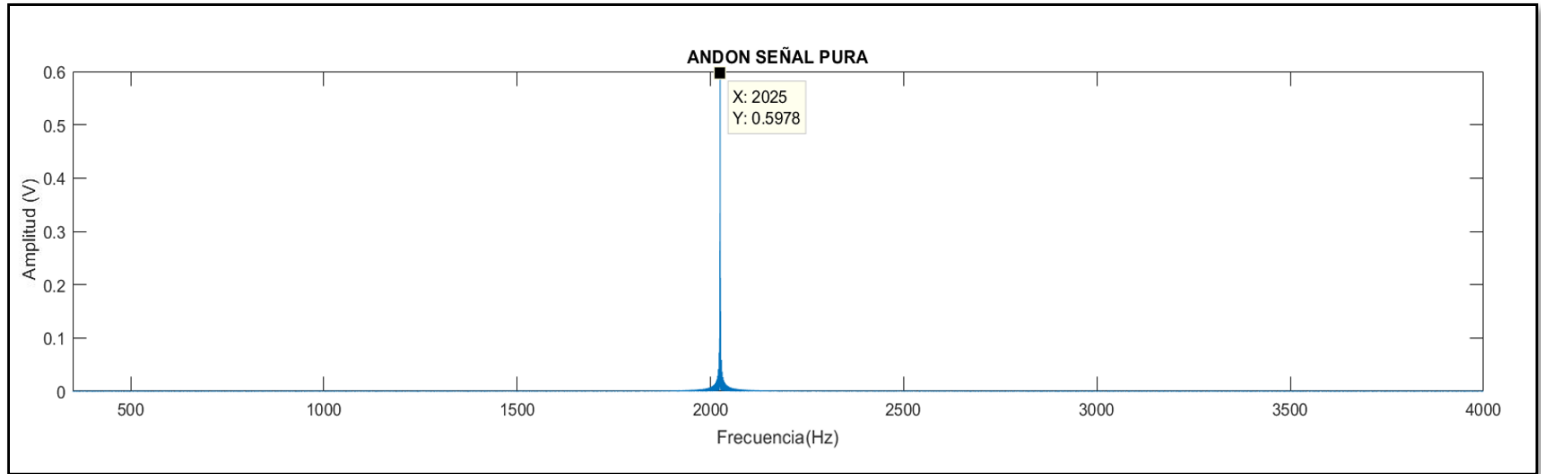
Frecuencia característica de las señales de alarma



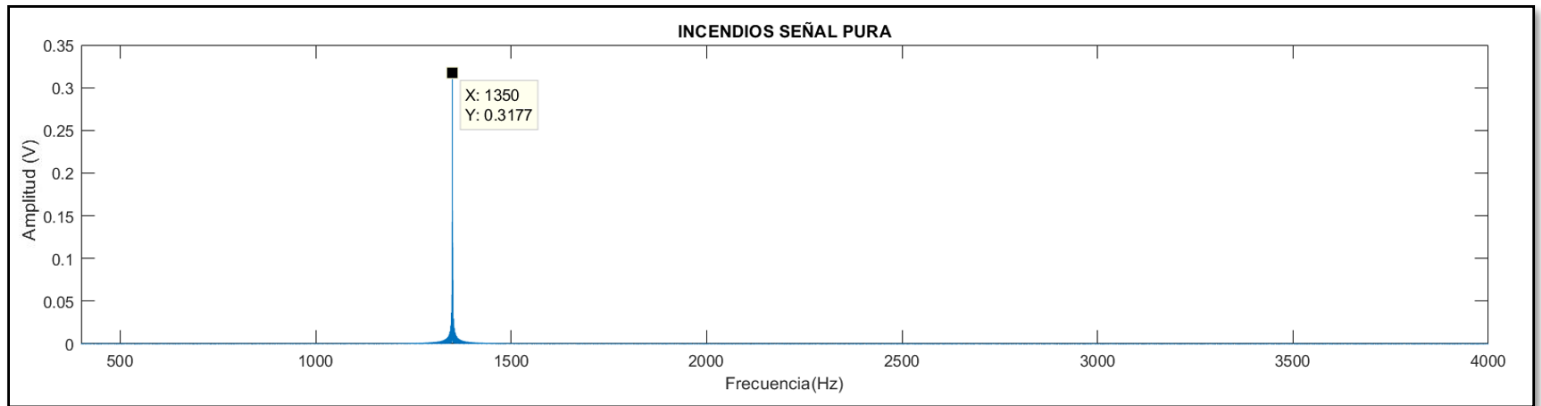
Alarma

Gráfica de la señal de alarma

ANDON



Incendios



Como se observa en la Tabla 4, las frecuencias que caracterizan a cada tipo alarma son diferentes y tienen una separación entre frecuencias de aproximadamente 200 Hz. Para analizar el sonido real de las señales de alarma se realizaron grabaciones del micrófono en distintas locaciones y con diferentes configuraciones de micrófonos, con el fin de establecer un rango de frecuencias y conocer si se ha activado una de las cuatro alarmas, a fin de evitar la superposición entre ellas.

Descripción de localizaciones

Para el establecimiento de las locaciones se da prioridad a espacios en donde el trabajador con discapacidad auditiva pase el mayor tiempo de su jornada laboral. Con el fin de adquirir varias grabaciones de los sonidos generados en la planta y alarmas que se activan a lo largo del día, estableciendo rangos de frecuencias para las distintas alarmas y un umbral de ruido que servirá para el futuro desarrollo del presente proyecto. La selección de estas locaciones se las realizó tomando en consideración opiniones del operario con discapacidad y del departamento de ingeniería.

Con respecto a lo antes mencionado, se han seleccionado un total de cuatro locaciones como se observa en la Tabla 5, en donde se da una descripción de la razón de la selección del lugar junto con una imagen. Cabe mencionar que tanto la alarma de incendios como el llamado ANDON emiten su sonido desde una fuente fija, localizada en zonas estratégicas de la planta para que todo el personal pueda atender su llamado, mientras que el montacargas y el elevador generan una alerta cuando están siendo manipuladas en distintas zonas de la planta.

Tabla 5

Localizaciones en planta para toma de datos

Locación	Característica	Foto
Puesto de trabajo del operario	Área de trabajo principal del operario donde pasa mayor tiempo, es un entorno con poco ruido de maquinaria.	
Oficinas de despacho	Área de computadoras utilizadas por el operario, es un entorno donde el ruido es parecido al puesto del operario, es decir, con poco ruido de maquinaria	
Pasillo de producción	Pasillo del área de producción que une a despacho con vestidura. Es el entorno con mayor ruido en la planta, debido al sonido ocasionado por las maquinarias.	
Pasillo de vestidura	Pasillo de vestidura en donde se transporta materiales del área de despacho por el trabajador. Es un entorno con sonido de máquinas que produce niveles de ruido leves.	

Análisis comparativo y selección de componentes del hardware

El primer paso para el diseño del dispositivo es la correcta selección de los diferentes componentes como sensores, microcontroladores y actuadores que sirven para la adquisición y procesamiento de datos. Existen muchas variables a considerar en base a las características que se desean priorizar para la construcción del dispositivo, entre ellas está el tiempo de respuesta, bajo consumo de energía, sensibilidad, robustez ante caídas y golpes, alimentación eléctrica y costo.

Se buscó alternativas de micrófonos que cumplan con las características de instrumentos tipo 2, y ayuden a la identificación de frecuencias. Además, de la selección de un microcontrolador y actuadores de estimulación propicios para personas con discapacidad auditiva. Adicionalmente, a las recomendaciones mencionadas se debe tomar en consideración el tamaño y peso de cada componente, puesto que uno de los objetivos del proyecto es la comodidad del usuario. En donde se tomando en cuenta la opinión del trabajador frente a las características de ergonomía planteadas en la construcción del dispositivo de asistencia.

Descripción, configuraciones y selección de sensores de sonido

Para el diseño y construcción del dispositivo de asistencia se hace uso de micrófonos, los cuales están definidos como transductores electroacústicos analógicos que permiten amplificar y registrar vibraciones sonoras, este proceso se realiza convirtiendo las ondas sonoras o vibraciones de aire en señales eléctricas analógico a la sensación sonora percibida (Arce, 2021).

En el presente proyecto se hace uso de micrófonos microelectromecánicos MEMS, para la adquisición de datos, debido a que tienen buen rendimiento, alta sensibilidad, cancelación de ruido y bajo costo. Actualmente, los micrófonos MEMS tienen gran acogida en industrias

dedicadas a la elaboración de teléfonos inteligentes, así como otros dispositivos IoT para audio y aplicaciones de detección (Aisyah, Azlan, Yeop, & Mohd-Yasin, 2020).

Existen varias propiedades que debe cumplir un micrófono para ser considerado ideal en la detección de sonidos, una de ellas es la propiedad de directividad omnidireccional, definida como la capacidad del micrófono de captar señales procedentes de alguna dirección y atenuar o rechazar otras. La respuesta en frecuencia es otra característica a considerar, debido a que todo sistema sonoro debe ser HIFE (alta fidelidad) y HD (alta definición), con el fin de cumplir el margen de frecuencia audible, es decir, mientras más amplia sea la respuesta en frecuencia, más calidad tendrá el sonido final. Por último, se considera la característica de la sensibilidad como una propiedad fundamental, debido a que la salida eléctrica determina el nivel de presión sonora (Arce, 2021). Estas características son elementales para este proyecto, ya que se debe considerar un ambiente que cuenta con varias fuentes generadoras de sonido.

Teniendo en consideración las características y propiedades mencionadas se seleccionarán los micrófonos SPH0645 y INMP441, para la adquisición de señales del dispositivo de asistencia. Estos micrófonos integran un amplificador de audio, circuito integrado ADC y una interfaz I2S, que proporcionan una salida digital a partir de las ondas sonoras captadas de acuerdo con el datasheet. En la Tabla 6 se detallan las principales características de ambos sensores.

Tabla 6

Características de los micrófonos SPH0645 y INMP441

Característica	INMP441	SPH0645
Tipo de micrófono	MEMS	MEMS
Directividad	Omnidireccional	Omnidireccional
Salida	I2S digital 24 bits	I2S digital de 32 bits
SNR (Relación señal ruido)	61dBA	65dBA
Sensibilidad	-26dBFS a 87dB	-26dB +3dB a 94dB SPL
Consumo de corriente	1,4 mA	600uA

Característica	INMP441	SPH0645
Respuesta en frecuencia	60Hz a 15KHz	50Hz a 15kHz
THD (Distorsión armónica total)	3%	1%
Acondicionamiento de señal	SI	SI
Convertidor analógico a digital	SI	SI
Administración de energía	SI	SI
Filtro Anti solapamiento	SI	SI

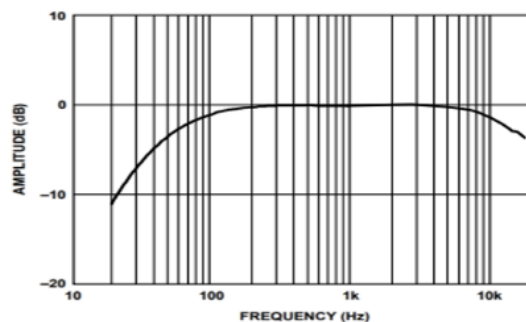
Nota. Tabla con las principales características de los micrófonos MEMS *SPH0645* y *INMP441*.

Información adaptada de *Datasheet del micrófono SPH0645LM4H-B* y *INMP441*, 2014.

Como se puede observar ambos micrófonos difieren en la característica de la relación señal ruido y la sensibilidad, por lo que se va a realizar una comparación cualitativa de las respuestas en frecuencia de ambos micrófonos obtenidas del datasheet correspondiente, en la Figura 4 presenta el comportamiento de la sensibilidad relativa del micrófono *SPH0645* y en la Figura 5 comportamiento de la sensibilidad relativa del micrófono *INMP441*. Debido a que es necesario establecer un rango de funcionamiento estable, en donde ambos micrófonos presenten una respuesta lineal en las mismas frecuencias.

Figura 4

Respuesta en frecuencia del micrófono SPH0645

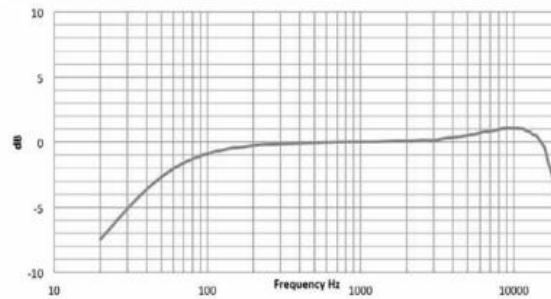


Nota. Las gráficas muestran el comportamiento de la sensibilidad relativa del micrófono *SPH0645*, medidas en dB, en el eje Y a lo largo de las diferentes frecuencias, medidas en Hz, en el eje X.

Gráficas tomadas de *Datasheet del micrófono SPH0645LM4H-B*.

Figura 5

Respuesta en frecuencia del micrófono INMP441



Nota. Las gráficas muestran el comportamiento de la sensibilidad relativa del micrófono INMP441, medidas en dB, en el eje Y a lo largo de las diferentes frecuencias, medidas en Hz, en el eje X.

Gráficas tomadas de *Datasheet del micrófono INMP441, 2014.*

Como se puede observar en las gráficas existe una pequeña variación en las curvas de respuesta en frecuencia de ambos micrófonos. A pesar de que el datasheet da un rango de respuesta en frecuencia específico de 50Hz a 15KHz para el SPH0645 y de 60Hz a 15KHz para el INMP441, se visualiza que hay una ligera disminución en la sensibilidad por debajo de los 200Hz que se reduce a aproximadamente -10dB en el INMP441 y a -7dB en el SPH0645. Adicionalmente, en frecuencias superiores a 10KHz existe una caída de sensibilidad de aproximadamente -5dB en ambos sensores. De las acotaciones mencionadas se puede considerar que el rango de respuesta de ambos micrófonos va desde los 200 Hz a aproximadamente 10KHz, en donde el sistema tiene una buena sensibilidad tratando igual a todos los sonidos que se encuentren entre este rango de frecuencias, es decir, no acentúa ninguna frecuencia particular sobre otras. Se puede establecer que ambos micrófonos presentan características similares por lo que se pretende construir diferentes configuraciones, a fin de elegir la que presente mejores resultados.

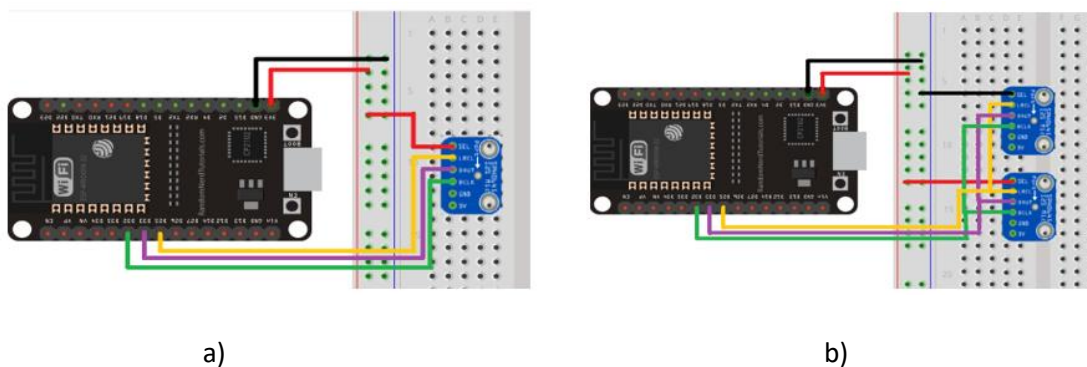
Las configuraciones a analizar están ligadas al canal de audio, definido como una representación del sonido; un archivo de audio puede contener uno o múltiples canales de datos. Cuando se graba un audio por un solo canal se habla de una señal monofónica o mono, mientras que cuando se graba un audio a través de dos canales, izquierdo y derecho se habla de una señal estereofónica o estéreo (García S. , 2013).

La diferencia entre estos dos conceptos se puede determinar cuándo se escucha una grabación, con sonidos mono todas las señales de audio llegan desde el centro, semejante a un sonido plano. Mientras que el sonido estéreo tiene un audio diferente por cada uno de sus canales, haciendo que el sonido se escuche lo más real posible, para que el oyente tenga la capacidad de localizar la dirección de voces e instrumentos.

Los micrófonos usados en el presente trabajo son monofónicos debido a que adquieren sonidos a través de un solo canal. Para la construcción de un audio estéreo, como es recomendable para aplicaciones de identificación de sonido, es necesario utilizar dos micrófonos conectados a distintos canales, es decir, al canal izquierdo y derecho como se presentan en la Figura 6 que presenta a) configuración monofónica y b) configuración estéreo.

Figura 6

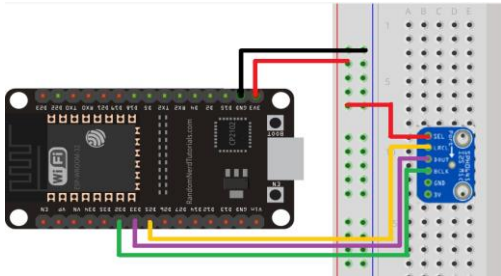
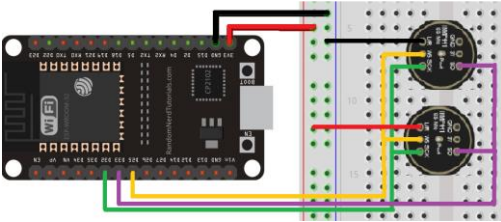
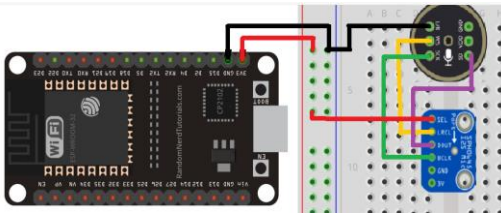
Tipos de configuraciones con micrófonos



Como se presenta en los esquemas de la Figura 6 los micrófonos tienen seis pines de conexión; SEL indica la selección del canal, LRCLK indica la transmisión de la señal a adquirir, DOUT es la salida de datos del micrófono, BCLK es el reloj de bits y GND/VCC representan los pines para energizar al micrófono. Para la conexión estéreo es necesario que los pines LRCLK, DOUT, BCLK estén interconectados entre sí cambiando el pin SELEC para cada canal. Si se desea el canal derecho se conecta a VCC y si se desea el canal izquierdo se conecta a GND. Para el presente proyecto se optó por probar tres distintas configuraciones, como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7

Configuraciones establecidas para los micrófonos SPH0645 y INMP441

Configuración	Descripción	Ilustración
Configuración 1	Configuración monofónica utilizando el sensor SPH0645, conectado al canal derecho.	
Configuración 2	Configuración estereofónica utilizando dos sensores INMP441, conectado al canal izquierdo y derecho.	
Configuración 3	Configuración estereofónica utilizando un sensor INMP441 conectado al canal izquierdo y un sensor SPH0645 conectado al canal derecho.	

Se pusieron a prueba el funcionamiento de las tres configuraciones: la primera es monofónica donde se hace uso del micrófono SPH645; la segunda es estéreo usando dos INMP441; y por último una configuración estéreo en donde se utiliza una conexión mixta entre el SPH0645 y el INMP441. Los criterios a los que se puso a prueba cada una de las configuraciones permitieron seleccionar la mejor configuración considerando los parámetros de atenuación de ruido y sensibilidad. Para caracterizar la atenuación de ruido se tomaron grabaciones del sonido de la planta a diferentes horas del día en las locaciones seleccionadas. Mientras que para cuantificar la sensibilidad de los micrófonos se hicieron pruebas tomando como referencia la representación frecuencial de los sonidos emitidos por las distintas alarmas.

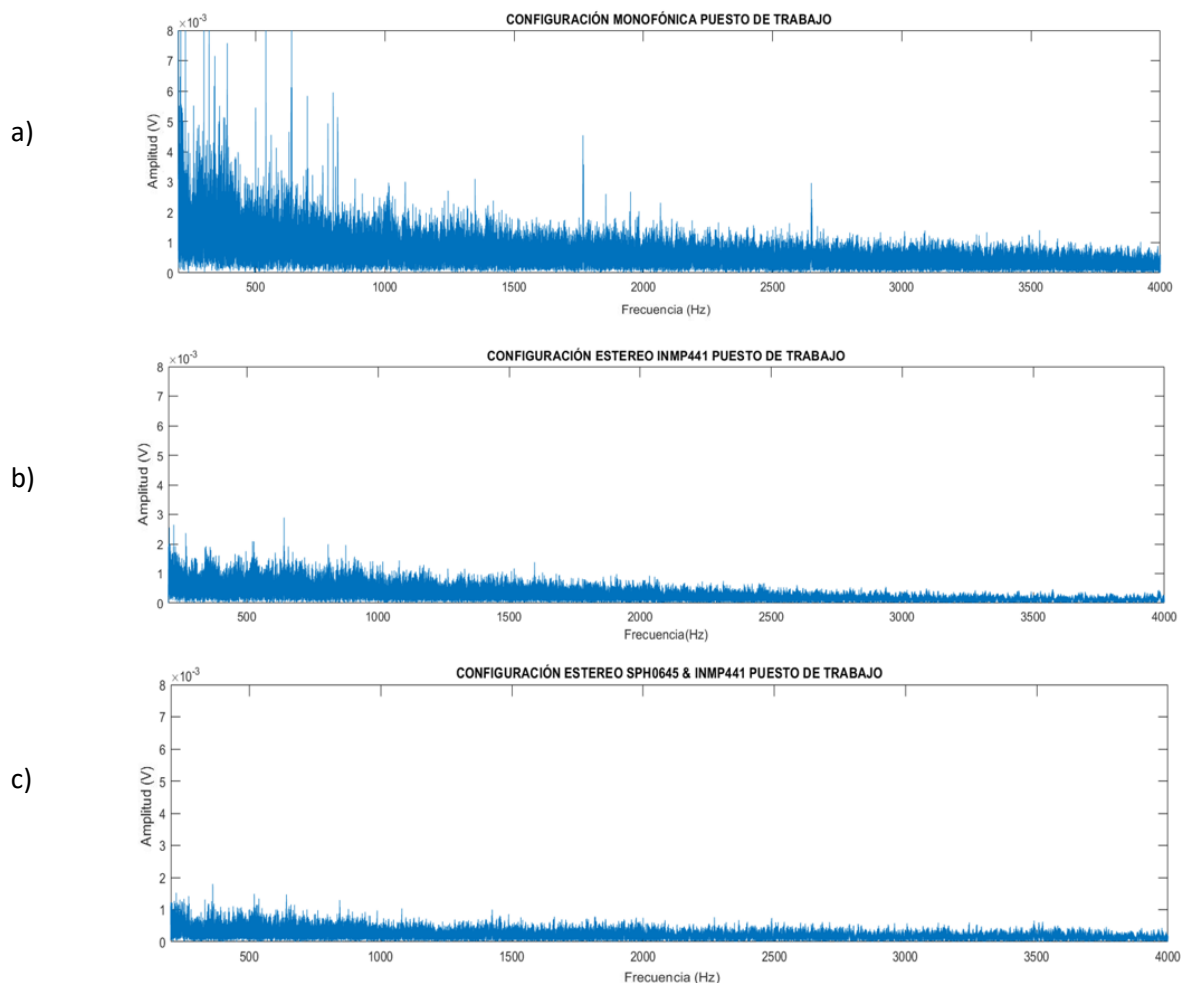
Pruebas de la configuración de los micrófonos

Las pruebas para comparar la atenuación al ruido entre las tres configuraciones de la Tabla 7 se las llevó a cabo grabando el sonido de la planta en las cuatro locaciones mencionadas en la Tabla 5 por un tiempo de dos minutos de cada grabación. Estas pruebas se realizaron a diferentes horas del día conjuntamente con las tres configuraciones en funcionamiento, a fin de obtener datos precisos de la planta.

En la Figura 7 se presentan las señales de ruido más significativas de la planta, tomadas a las 11am del día cuando todos los equipos y maquinarias se encuentran en funcionamiento. Para ello, las muestras fueron grabadas en las tres configuraciones desde el puesto de trabajo del operador. Adicionalmente, las gráficas de la Figura 7 representan la presión sonora que ejerce el ruido a diferentes frecuencias, es decir, amplitud en el eje Y vs. Frecuencia en el eje X.

Figura 7

Señales en el puesto de trabajo de los 3 tipos de configuraciones



Nota. En la gráfica se presenta a) configuración 1: monofónico micrófono SPH645, b) configuración 2: estéreo micrófonos INMP441 y c) configuración 3: estéreo micrófonos SPH645 y INMP441 en el puesto de trabajo

De los datos obtenidos de las gráficas visualizadas en la Figura 7 se analizaron dos parámetros: el promedio, a fin de tener un único valor que represente el centro de la distribución de los datos y la desviación estándar, para conocer la dispersión de los mismos. Obtiene los siguientes resultados: la media de la configuración 1 es 0.00059V, mientras la media de la configuración 2 es 0.00049V y por último la media de la configuración 3 es 0.00032V. Además, la

desviación estándar de los picos máximos de la amplitud es: en la configuración 1: 0.00821, configuración 2: 0.00085, y configuración 3: 0.00035.

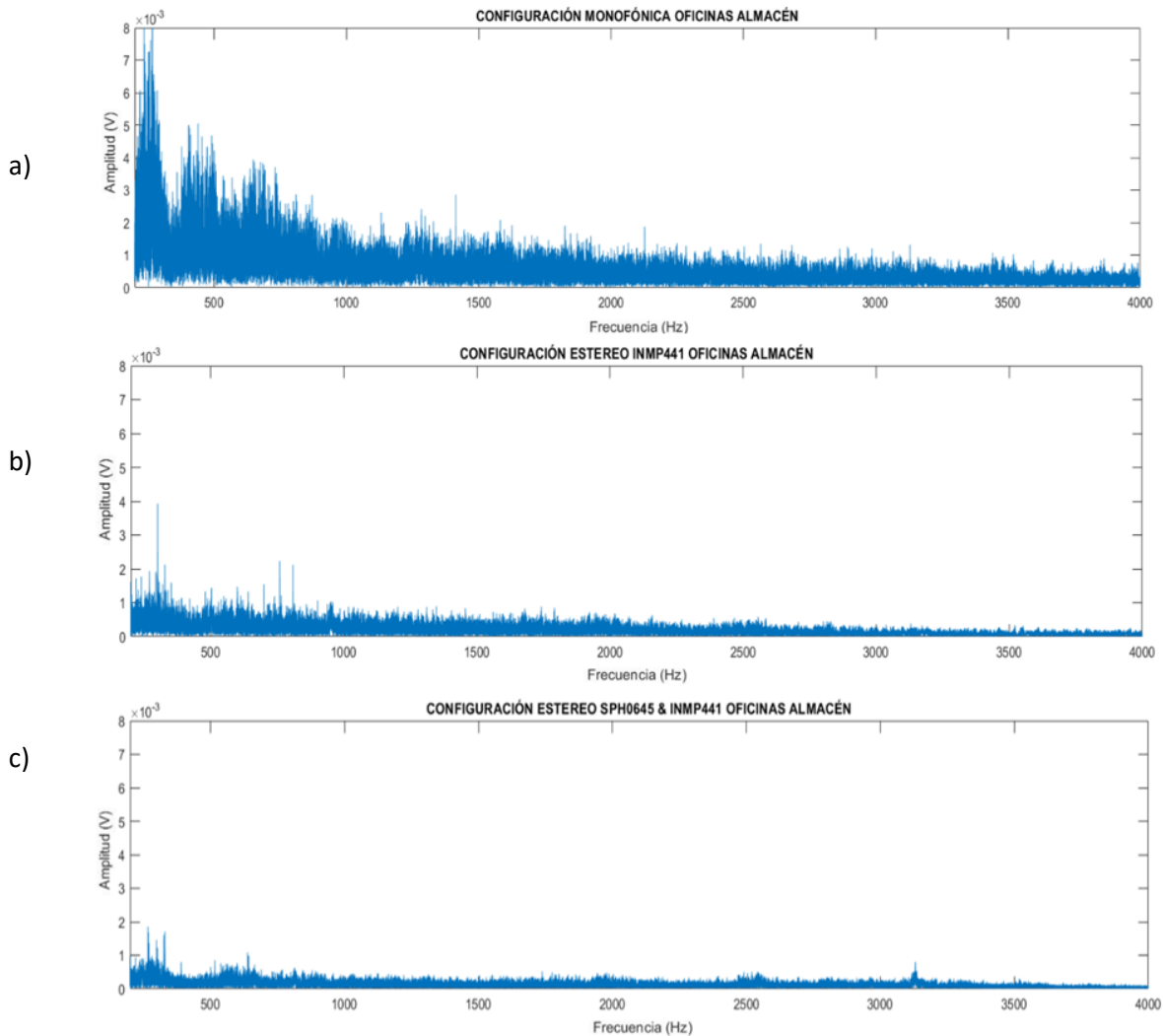
De los datos obtenidos del promedio de las tres configuraciones se concluye que la configuración 1 tiene los mayores picos en amplitud de ruido a frecuencias menores a 1000Hz, lo que podría llegar a ser un problema en la identificación de la alarma del elevador pues el ruido interfiere con la frecuencia característica del mismo. Esto ocurre debido a que, para aplicaciones de reconocimiento de sonidos se recomienda utilizar una configuración estéreo, debido a sus cualidades en atenuación de ruido.

Adicionalmente, con los valores obtenidos al calcular la desviación estándar se observa que en la configuración 1 y 2 los datos están más dispersos en comparación con la configuración 3, concluyendo que al adquirir señales de audio usando la configuración 3 hay una mejor distribución de los datos, debido a que esta configuración tiene una mejor respuesta frecuencial, sin acentuar ninguna frecuencia sobre otra, logrando así obtener una respuesta plana. En la Figura 8 se encuentran representadas las señales de ruido grabadas en las oficinas de almacén, tomadas a las 2pm, en donde se observaron mayores variaciones de ruido. Adicionalmente, se representa la presión sonora que ejerce el ruido a diferentes frecuencias.

De los datos obtenidos de las gráficas visualizadas en la Figura 8 se analizaron los parámetros de promedio y desviación estándar, obtiene los siguientes resultados: la media de la configuración 1 es 0.000412V, de la configuración 2 es 0.000295V y por último la media de la configuración 3 es 0.000242V. Además, la desviación estándar de los picos máximos de la amplitud es: en la configuración 1: 0.000767, configuración 2: 0.000265, y configuración 3: 0.000884.

Figura 8

Señales en el área de almacén de los 3 tipos de configuraciones



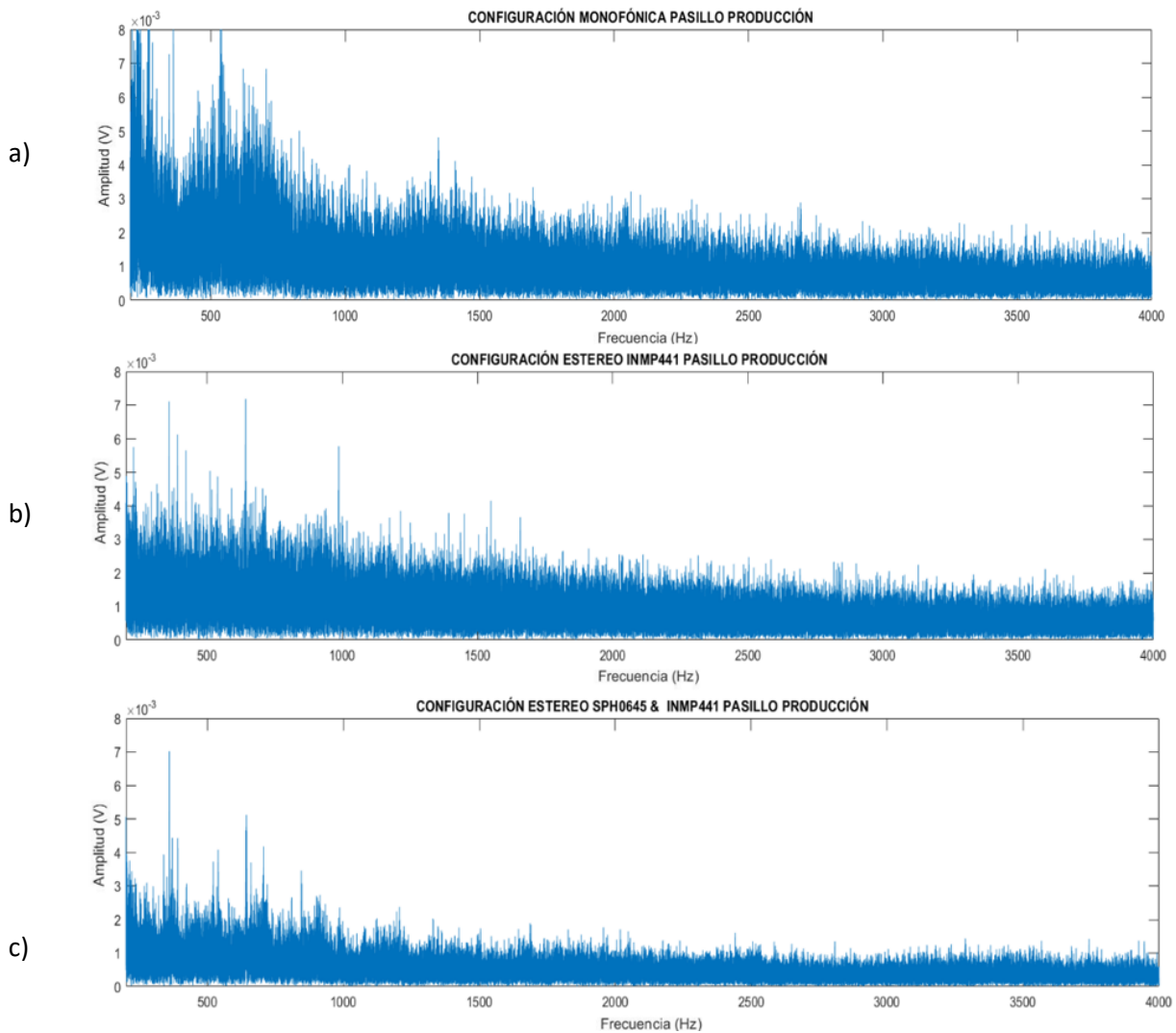
Nota. En la gráfica se presenta a) configuración 1: monofónico micrófono SPH645, b) configuración 2: estéreo micrófonos INMP441 y c) configuración 3: estéreo micrófonos SPH645 y INMP441 en el área de almacén.

De los datos obtenidos del promedio de las tres configuraciones se concluye que la configuración 1 tiene los mayores picos en amplitud de ruido a frecuencias bajas, mientras que la configuración 2 y 3 tienen valores próximos de presión sonora, debido a que al ser configuraciones estéreo presentan mayor atenuación al ruido.

En la Figura 9 se encuentran representadas las señales de ruido grabadas en el pasillo de producción, estos datos fueron tomados a las 11am, donde se observaron mayores variaciones de ruido, por la activación de herramientas y maquinarias.

Figura 9

Señales en el pasillo de producción de los 3 tipos de configuraciones



Nota. En la gráfica se presenta a) configuración 1: monofónico mcrófono SPH645, b) configuración 2: estéreo micrófonos INMP441 y c) configuración 3: estéreo micrófonos SPH645 y INMP441 en el pasillo de producción.

A través de los datos obtenidos de las gráficas mostradas en la Figura 9 se analizaron los parámetros de promedio y desviación estándar, obtiene los siguientes resultados: la media de la configuración 1 es 0.001141V, de la configuración 2 es 0.000932V y por último la media de la configuración 3 es 0.000809V. Además, la desviación estándar de los picos máximos de la amplitud es: en la configuración 1: 0.000961, configuración 2: 0.000797 y configuración 3: 0.000916.

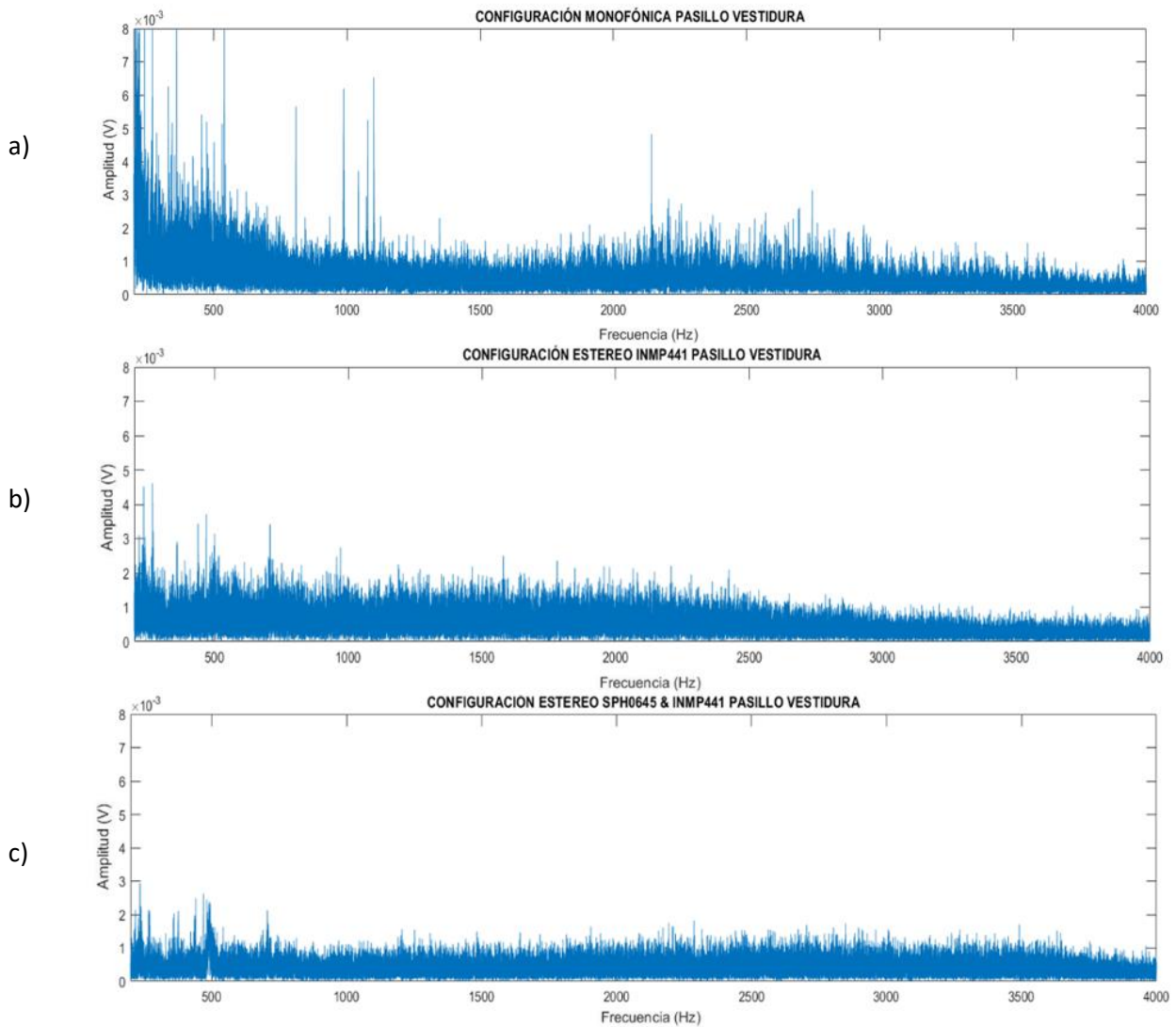
De los datos obtenidos del promedio de las tres configuraciones se concluye que la configuración 1 tiene los mayores picos en amplitud de ruido a frecuencias bajas, y la configuración 3 tiene menores picos de amplitud presentan mayor atenuación al ruido. Adicionalmente, con los valores obtenidos al calcular la desviación estándar se observa que la configuración 3 presente mejor distribución de datos, al no estar dispersos en comparación con la configuración 1 y 2.

En la Figura 10 se encuentran representadas las señales de ruido grabadas en el pasillo de vestidura, estos datos fueron tomados a las 11am, donde se observaron mayores variaciones de ruido por la activación de maquinarias. Además, las gráficas de la Figura 10 representa la presión sonora que ejerce el ruido a diferentes frecuencias, es decir, amplitud en el eje Y vs. Frecuencia en el eje X.

A través de los datos obtenidos de las gráficas mostradas en la Figura 10 se analizaron los parámetros de promedio y desviación estándar, obtiene los siguientes resultados: la media de la configuración 1 es 0.00091V, de la configuración 2 es 0.00081V y por último la media de la configuración 3 es 0.00057V. Además, la desviación estándar de los picos máximos de la amplitud es: en la configuración 1: 0.00054, configuración 2: 0.00104 y configuración 3: 0.000845.

Figura 10

Señales en el pasillo de vestidura de los 3 tipos de configuraciones



Nota. En la gráfica se presenta a) configuración 1: monofónico micrófono SPH645, b) configuración 2: estéreo micrófonos INMP441 y c) configuración 3: estéreo micrófonos SPH645 y INMP441 en el pasillo de vestidura.

De los datos obtenidos del promedio de las tres configuraciones se concluye que la configuración 1 tiene los mayores picos en amplitud de ruido a frecuencias bajas, y la configuración 3 tiene menores picos de amplitud presentan mayor atenuación al ruido.

Adicionalmente, con los valores obtenidos al calcular la desviación estándar se observa que la configuración 2 y 3 presente mejor distribución de datos, en comparación con la configuración 1.

Con respecto a los datos obtenidos se concluye que la configuración 3 es la mejor al momento de presentar mayor atenuación de ruido, debido a que no acentúa ninguna frecuencia sobre otra, además es la configuración que más se acerca a una representación de respuesta de frecuencia plana, lo que resulta ideal para aplicaciones de reconocimiento e identificación de sonidos.

Pruebas para caracterizar la sensibilidad de las configuraciones

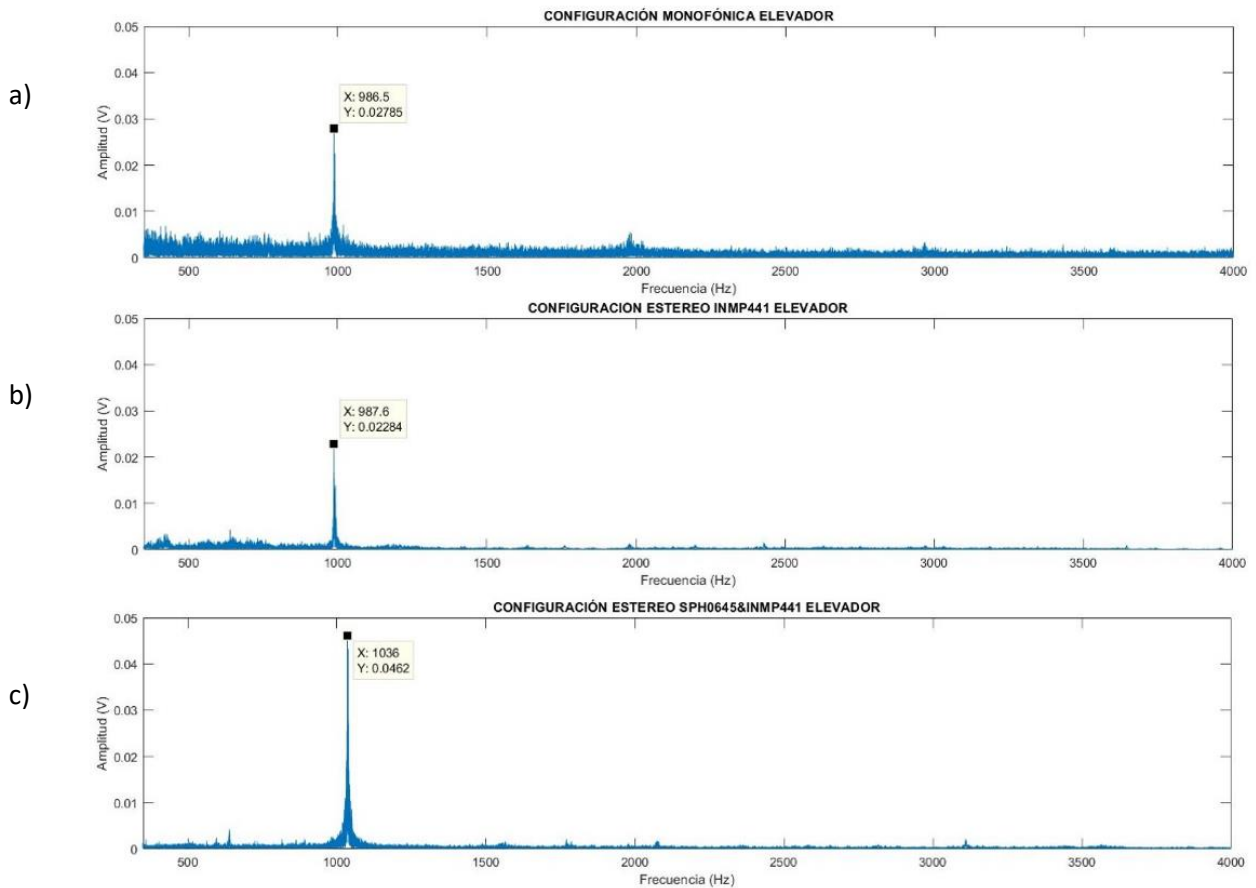
Las pruebas para comparar la sensibilidad entre las tres distintas configuraciones, se las llevó a cabo grabando el sonido que genera las cuatro alarmas presentadas en la Tabla 4 por 2 minutos. Estas pruebas se realizaron a diferentes horas del día conjuntamente con las tres configuraciones en funcionamiento, a fin de obtener datos precisos de la activación de las alarmas.

En la Figura 11 se representan las señales obtenidas de la activación de la alarma del elevador, estas señales fueron adquiridas a través de las tres distintas configuraciones planteadas. Adicionalmente, las gráficas representan la presión sonora que ejerce el ruido a diferentes frecuencias, es decir, amplitud en el eje Y vs. Frecuencia en el eje X.

Se considera a la sensibilidad como el cambio de presión sonora más alto, en las gráficas de la Figura 11 se observa que la mayor amplitud es la obtenida al adquirir la señal de la alarma utilizando la configuración 3, además de poseer mejor respuesta al ruido, dando lugar a que la lectura de la frecuencia del elevador se vea mejor representada.

Figura 11

Señales de la alarma del elevador obtenido de los 3 tipos de configuraciones

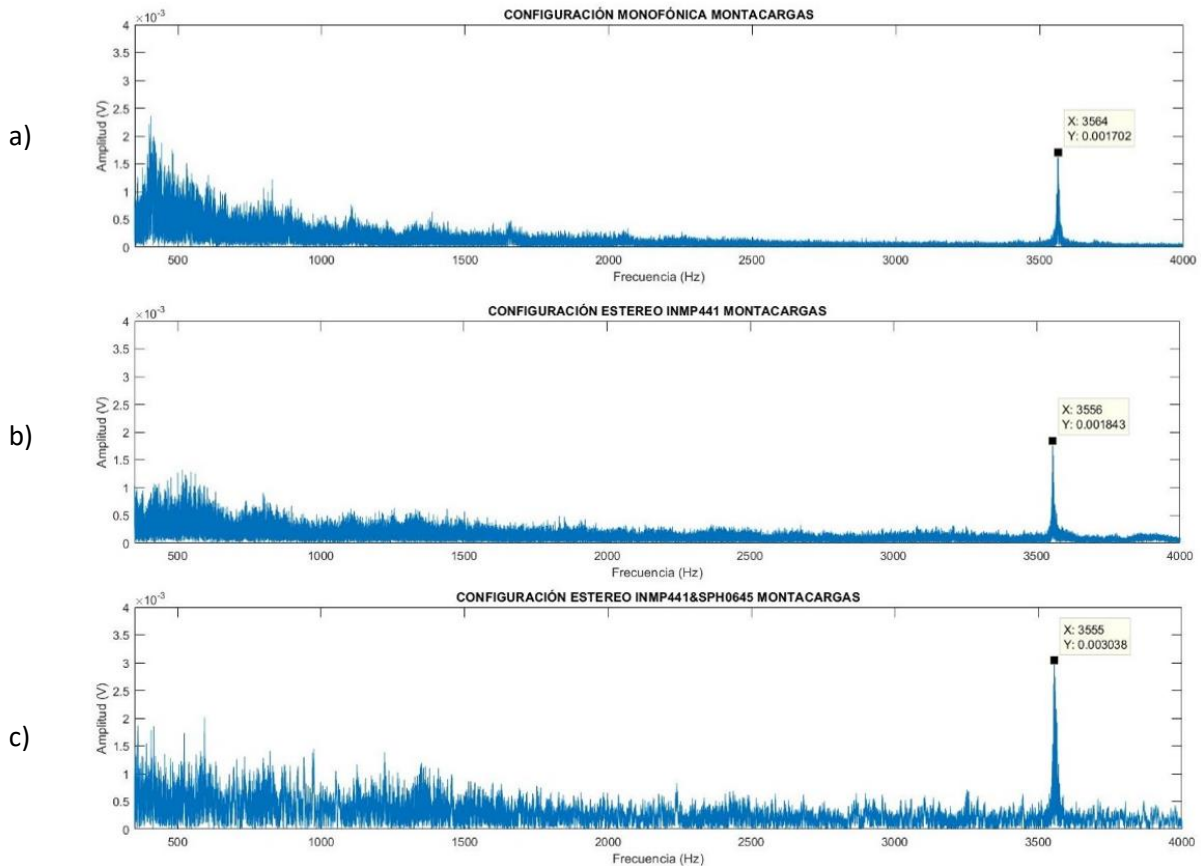


Nota. En la gráfica se presenta las señales del elevador en a) configuración 1: monofónico micrófono SPH645, b) configuración 2: estéreo micrófonos INMP441 y c) configuración 3: estéreo micrófonos SPH645.

En la Figura 12 se representan las señales obtenidas de la activación de la alarma del montacargas, estas señales fueron adquiridas a través de las tres distintas configuraciones planteadas. Adicionalmente, las gráficas de la Figura 12 representa la presión sonora que ejerce el ruido a diferentes frecuencias, es decir, amplitud en el eje Y vs. Frecuencia en el eje X.

Figura 12

Señales de la alarma del montacargas obtenido de los 3 tipos de configuraciones



Nota. En la gráfica se presenta las señales del montacargas en a) configuración 1: monofónico micrófono SPH645, b) configuración 2: estéreo micrófonos INMP441 y c) configuración 3: estéreo micrófonos SPH645.

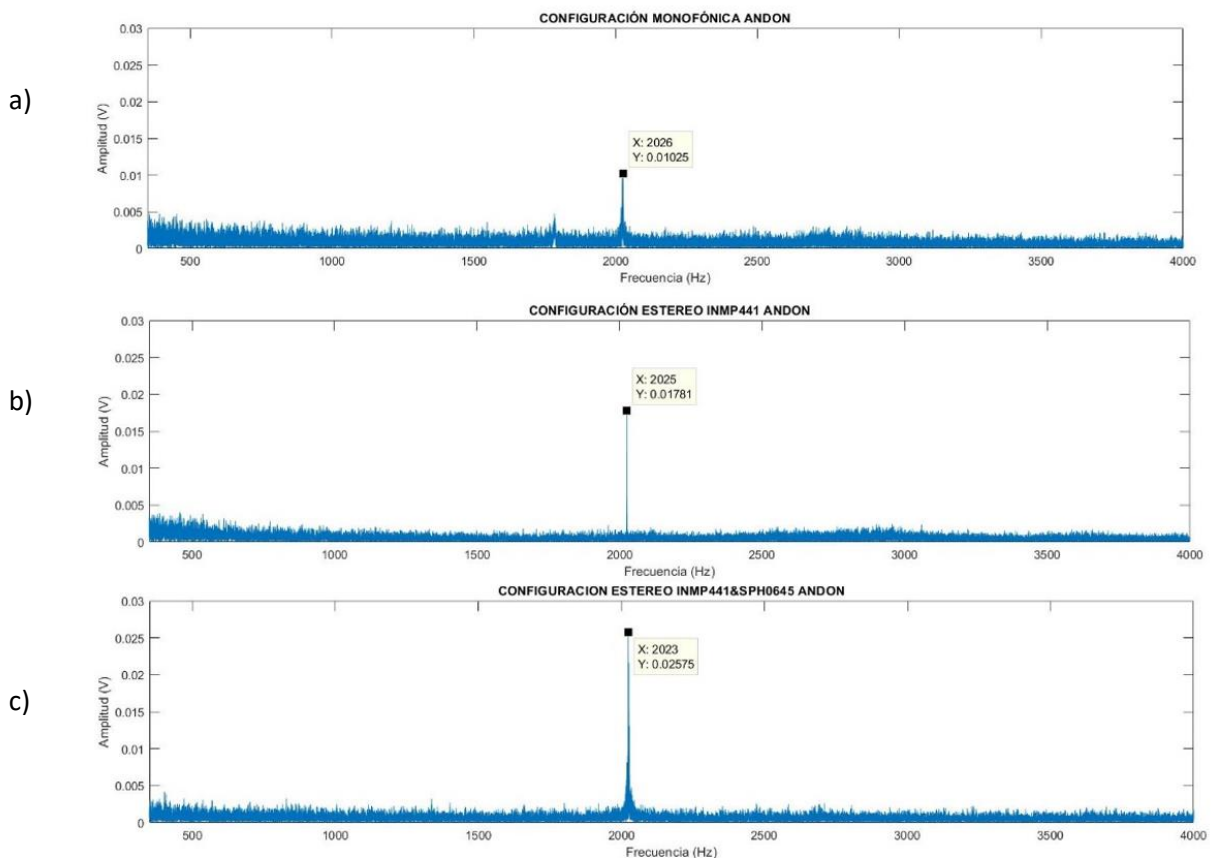
En las gráficas de la Figura 12 se observa que la configuración 1 presenta gran cantidad de ruido en los primeros 500 Hz, superando a la amplitud que genera el montacargas, lo cual es un problema al momento de la identificación de alarmas. Mientras que en la configuración 2 y 3 la frecuencia generada por la activación de la alarma del montacargas tiene un pico mayor en amplitud en comparación con el ruido, ocasionando que estas configuraciones sean las mejores al momento de cumplir con los objetivos del proyecto de asistencia. Adicionalmente, se observar

que el sonido que genera la alarma del montacargas tiene menor intensidad que el resto de alarmas. Por lo que es de gran importancia tratar de que la configuración seleccionada tenga una buena atenuación de ruido, a fin de evitar problemas como el que se observó usando la configuración 1.

En la Figura 13 se representan las señales obtenidas de la activación del llamado ANDON, estas señales representan la presión sonora que ejerce el ruido a diferentes frecuencias, es decir, amplitud en el eje Y vs. Frecuencia en el eje X.

Figura 13

Señales de la alarma del sistema ANDON obtenido de los 3 tipos de configuraciones



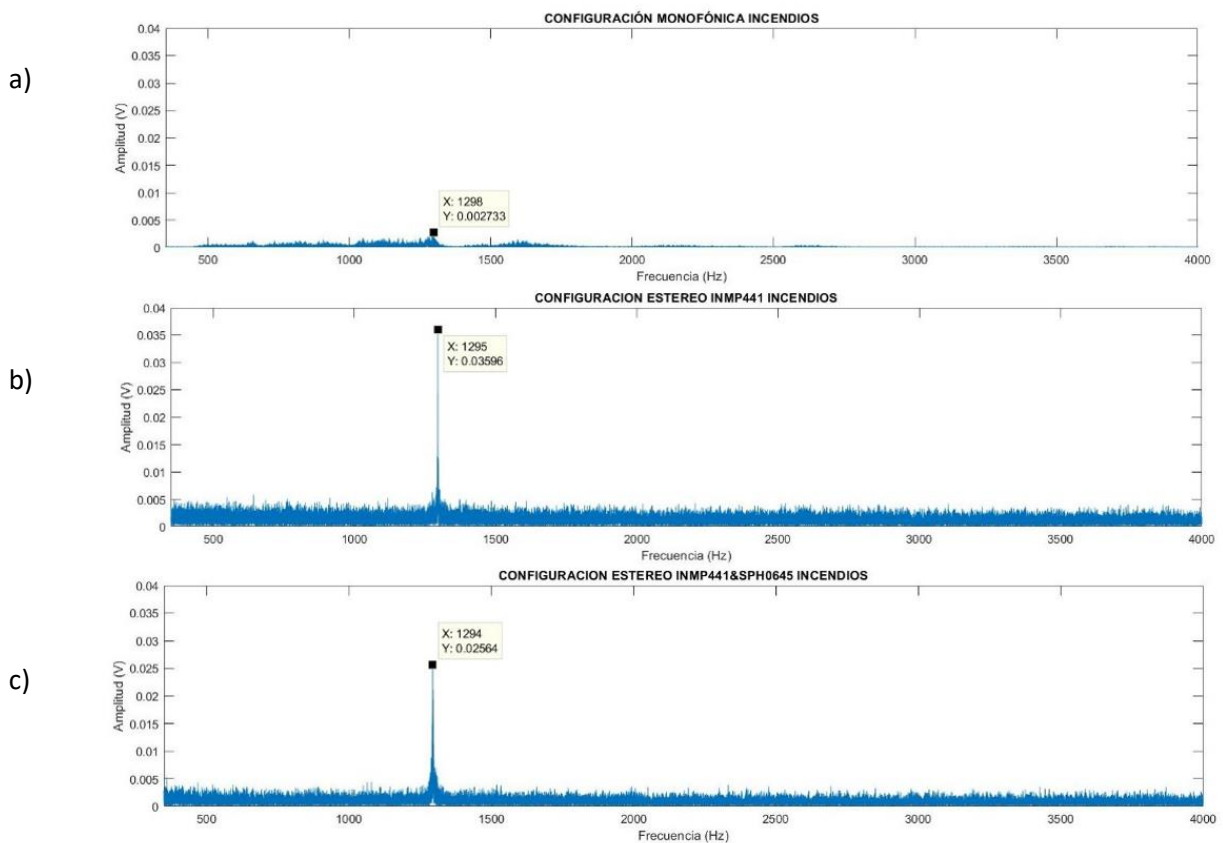
Nota. Se presenta las señales del ANDON en a) configuración 1: monofónico micrófono SPH645, b) configuración 2: estéreo micrófonos INMP441 y c) configuración 3: estéreo micrófonos SPH645.

En las gráficas de la Figura 13 se observa que la configuración 3 es la que tiene mayor amplitud en comparación con las otras configuraciones, además de presentar mejor atenuación de ruido.

En la Figura 14 se representan las señales obtenidas de la activación de la alarma de incendios, estas señales fueron adquiridas a través de las tres distintas configuraciones planteadas. Adicionalmente, las gráficas de la Figura 14 representa la presión sonora que ejerce el ruido a diferentes frecuencias, es decir, amplitud en el eje Y vs. Frecuencia en el eje X.

Figura 14

Señales de la alarma de incendios obtenido de los 3 tipos de configuraciones



Nota. Se presenta las señales de incendios en a) configuración 1: monofónico micrófono SPH645, b) configuración 2: estéreo micrófonos INMP441 y c) configuración 3: estéreo micrófonos SPH645.

Del análisis anterior se deduce que las configuraciones 2 y 3 tuvieron las mejores respuestas de sensibilidad. Adicional, se observa que la configuración 3 es la que presenta mejor atenuación de ruido. Es por esta razón, fue seleccionada la configuración 3 como la mejor opción para llevar a cabo el proyecto de reconocimiento e identificación de alarmas para una persona con sordera. Tras evaluar las características de atenuación de ruido y sensibilidad, se plantea el uso de microcontroladores con el objetivo de analizar, reconocer e identificar señales de audio.

Descripción y selección de microcontroladores

Para el proceso de configuración, adquisición y registro de datos se emplean microcontroladores, cuyo objetivo principal es controlar el funcionamiento de una tarea determinada. La ventaja de usar microcontroladores es que, debido a su reducido tamaño pueden formar parte de múltiples sistemas en diferentes aplicaciones (Gaitán, Tocarruncho, & Valencia, 2019)

Trabajos investigativos señalan a los microcontroladores ESP32 y Raspberry Pi como las mejores alternativas al momento de utilizar micrófonos INMP441 y SPH0645 debido a la implementación del protocolo I2S para su comunicación, que permite el envío de datos (E. Systems, 2008). A continuación, en la Tabla 8 se visualiza una comparativa entre los microcontroladores ESP32 y Raspberry Pi, a fin de seleccionar el microcontrolador que presente mejores resultados en diferentes pruebas de rendimiento. Caba recalcar que esta comparativa está basada en datos bibliográficos otorgados por el datasheet de cada microcontrolador.

La primera prueba de funcionamiento está basada en determinar el tiempo que dedica el procesador en llamar a una operación. Este tiempo de procesamiento corresponde a un ciclo de reloj obteniendo los siguientes datos.

Tabla 8

Comparativa entre los microcontroladores ESP32 y Raspberry Pi

Característica	Raspberry Pi Pico	ESP32
Frecuencia CPU	133	240
1/F (μ s)	0,0075	0,0042
Sobrecoste (μ s)	0,034	0,022

Nota. Tabla comparativa de los microcontroladores ESP32 y Raspberry Pi. Información adaptada de *Datasheet*.

En la Tabla 9 se observa que los tiempos en que el procesador llama a una operación es similar entre ambas tarjetas. Tomando en consideración estos valores se va a calcular los tiempos de las siguientes pruebas que corresponden a respuestas en pines digitales, operaciones con caracteres, enteros y flotantes y el tiempo requerido en manejo de bits.

Tabla 9

Tiempos de Operación de pines en Raspberry Pi Pico y ESP32

Característica	Raspberry Pi Pico	ESP32	
Test pines digitales	digitalRead (μ s)	0,131	0,141
	digitalWrite (μ s)	0,278	0,109
	pinMode (μ s)	0,866	2,506
Test de operaciones con caracteres	multiply byte (μ s)	0,065	0,037
	divide byte (μ s)	0,251	0,049
	add byte (μ s)	0,065	0,032
Test de operaciones con enteros	multiply byte (μ s)	0,057	0,053
	divide byte (μ s)	0,228	0,059
	add byte (μ s)	0,056	0,053
Test de operaciones con flotantes	multiply byte (μ s)	0,583	0,054
	divide byte (μ s)	0,473	0,224
	add byte (μ s)	0,688	0,054
Test de manejo de bits	bitSet() (μ s)	0,04	0,045

Nota. Tabla comparativa de pruebas realizadas en tiempo de operación de los microcontroladores ESP32 y Raspberry Pi. Información adaptada de *Pruebas de rendimiento de Raspberry Pi Pico y comparativa con plataformas Arduino, ESP8266 y ESP32, por Minibots, 2022*.

En la Tabla 9 se puede observar los diferentes tiempos en que ambas tarjetas tardan en procesar una operación. En el test de pines digitales el tiempo que tardan ambos microcontroladores en realizar operaciones de lectura escritura y cambio de estado son similares. Mientras que en las operaciones con caracteres, enteros y flotantes el microcontrolador ESP32 es superior en prestaciones de cálculos al procesador Raspberry Pi. Por último, en el test de manejo de bits se observa que ambos procesadores están a la par. En base a estos resultados, se selecciona a la placa ESP32 como la mejor opción al momento de elegir el microcontrolador, pues cumple con las características ideales para el desarrollo del dispositivo de asistencia.

El microcontrolador ESP32 tiene varias adaptaciones, entre ellas se encuentra la placa de desarrollo Node MCU, que permite la configuración y programación a través del software Arduino IDE. Adicionalmente, el módulo Node MCU ESP32 es capaz de generar comunicaciones inalámbricas y de bajo costo, al tener un procesador de doble núcleo de 32 bits de hasta 240MHz para trabajos independientes (Vlastegui, 2021).

Se emplea el microcontrolador ESP32 en la etapa de adquisición y almacenamiento de señales de audio, con el fin de analizar e interpretar los datos procesados y así proporcionar acciones adecuadas frente a casos particulares como es la activación de una alarma. Esta acción produce que se envíe información a los actuadores para alertar al operario, a través de estímulos, sobre una de las diferentes situaciones generadas por la activación de las alarmas.

Descripción y selección de sistemas de estimulación para personas con sordera

La forma en que las personas descubren e interpretan el medio que los rodea, se realiza a través de la exploración mediante sistemas sensoriales. Los mismos que utilizan receptores sensitivos como la piel, retina, lengua, oídos y otros sentidos para recibir información y detectar

estímulos. Los estímulos originan impulsos nerviosos que se dirigen al cerebro para experimentar sensaciones. A partir de las sensaciones y las percepciones se van formando procesos de reconocimiento a fin de actuar frente a diferentes situaciones (Sisalima & Vanegas, 2013).

El desarrollo sensorial de las personas con discapacidad auditiva se basa en el manejo de receptores sensitivos en la piel y en la retina, logrando generar estímulos visuales y hápticos que les proporcionen datos, a fin de mejorar la capacidad de percibir y receptor información del entorno. Para el desarrollo del dispositivo de asistencia, se hace uso de actuadores que estimulen la piel mediante vibraciones y la retina mediante fuentes de luz, con el objetivo de proporcionar información al operador sobre la activación de alarmas.

De acuerdo con investigaciones de proyectos orientados a personas con discapacidad auditiva, se selecciona al mini motor vibrador como el actuador ideal para la generación de estímulos hápticos, debido a sus características como alta sensibilidad a cambios, velocidad de rotación estable de 44000 rpm y bajo consumo de energía en base con el datasheet. Este actuador tiene como finalidad producir vibraciones al recibir un voltaje determinado, el cual es percibido por la persona que está en contacto (Nordqvist & Leijon, 2004).

Para la selección del actuador que genere estímulos visuales, se tomó en consideración características como; intensidad de luz, vida útil, consumo de energía y resistencia contra golpes y caídas. Optando por el uso de un diodo led RGB, debido a que es capaz de generar una respuesta lumínica mediante el uso de diferentes colores que permitan la identificación de alarma (Arboleda & Gutiérrez, 2022).

Existen diversos estudios dirigidos a la comunicación de personas con sordera, que potencian el uso de vías visuales y de materiales didáctico. Es por esta razón, para cumplir con las

consideraciones de estudios mencionados en el capítulo I, se hace uso de estimulaciones hápticas y visuales. A fin de que el trabajador, al que está dirigido el proyecto de asistencia, sea capaz de reconocer situaciones de riesgo y actuar frente las mismas. Adicionalmente, se debe cumplir con el objetivo de evitar que el dispositivo genere incomodidad al operario a lo largo de su jornada laboral, por lo que se buscan diversas alternativas para la colocación del mismo.

Identificación y selección ergonómica para la ubicación del dispositivo

Actualmente, la calidad de vida laboral se ve reflejada en las normativas internas de cada empresa, que tratan de mejorar las condiciones de trabajo, con la finalidad de favorecer la salud, bienestar, reducir accidentes laborales, mejorar la productividad y ofrecer medios para el desarrollo personal. La ergonomía es uno de los elementos fundamentales que garantizar la comodidad, bienestar y seguridad de los empleados a nivel físico y prevenir riesgos laborales. Es por esta razón que, el dispositivo de asistencia desarrollado en el presente escrito, busca cumplir los objetivos de equipos ergonómicos aportando al trabajador con discapacidad auditiva bienestar, comodidad y autonomía laboral (Bornacelli, Escibar, & Velásquez, 2020).

Con la finalidad de crear una herramienta de trabajo cómoda y ergonómica se considera incorporar el dispositivo de asistencia a los EPI (equipo de protección individual), debido a que estos equipos son de uso obligatorio según las leyes de seguridad industrial, lo que garantiza el uso del dispositivo en la jornada laboral del trabajador. Tras la selección de los elementos que generan estimulación visual y háptica se eligió al casco, orejeras y pantallas de protección facial como los EPI apropiados para colocar los actuadores.

El primer EPI seleccionado es el casco que tiene como ventaja acoplar diversos equipos de protección, ya sean auditivos como orejeras o faciales como pantallas protectoras. El casco cuenta

con una banda absorbente de sudor construida a base de tela y almohadillas, razón por la cual se va a colocar el mini motor vibrador en esta estructura. La activación del mini motor produce ligeras vibraciones en la frente del operario, a fin de dar estímulos sensoriales al momento de detectar una alarma, en la Figura 15 se muestra el esquemático del mini motor incorporado al casco.

Figura 15

Esquemático mini motor incorporado en el EPI: casco



El segundo EPI seleccionado son las orejeras, compuestas por dos casquetes forrados con material absorbente de sonido ideales para la colocación del mini motor, debido a sus dimensiones y contacto con la piel del operario. La activación del mini motor produce vibraciones cerca de la oreja, ocasionando que el operario pueda reaccionar frente a las distintas situaciones generadas por la activación de alarmas. En la Figura 16 se muestra la incorporación del mini motor en las orejeras.

Figura 16

Esquemático mini motor incorporado en el EPI: orejeras



Finalmente, el tercer EPI seleccionado es la pantalla facial, la cual está dirigida a la protección de ojos y cara del operario. Razón por la cual se pretende colocar el led RGB como generador de estímulos visuales para dar información al operario sobre la activación de las alarmas caracterizadas por un color en particular; la luz roja indica la activación de la alarma de incendios, la luz verde se activa cuando se genere un llamado ANDON y la luz amarilla alerta al operario sobre el acercamiento del montacargas o elevador. En la Figura 17 se muestra la representación esquemática de la incorporación del led RGB en la pantalla de protección facial.

Figura 17

Esquemático mini motor incorporado en el EPI: pantalla de protección



Con el fin de establecer la ubicación más apropiada al momento de colocar los actuadores que alerten al operario sobre la activación de alarmas, se realizan pruebas ergonómicas, priorizando la comodidad del operario. Estas pruebas están basadas en obtener resultados cuantificables para la selección entre el casco y las orejeras para colocar el mini motor, debido a que estas EPI se encuentran en contacto con la piel. Además, la ubicación del led RGB en la pantalla de protección, pues se desea evitar que la luz generada por este actuador dificulte las capacidades de observar del operario.

Las pruebas para seleccionar el EPI en donde se va a incorporar el mini motor y la ubicación del LED RGB, fueron realizadas en la empresa DANA Transejes Ecuador. Estas pruebas

están basadas en la realización de una encuesta dirigida hacia al operador con discapacidad auditiva, en donde se hicieron una serie de preguntas, las cuales fueron contestadas mediante el uso de la escala de Likert en donde 1 es totalmente en desacuerdo y 5 totalmente de acuerdo obteniendo las siguientes respuestas.

EPI: Casco de seguridad

Preguntas	Respuesta				
	1	2	3	4	5
Tuvo dificultad en la colocación del EPI					
Siente las vibraciones ocasionadas por el mini motor					
Las vibraciones son incómodas al contacto con la piel					
El dispositivo genera peso adicional a la EPI					

De la encuesta realizada se obtuvieron las siguientes afirmaciones; las vibraciones generadas por el mini motor alertan al operario sobre la activación de una alarma; las vibraciones no ocasionan incomodidad al contacto con la piel; el dispositivo no produce peso adicional y no existe dificultad en la colocación del casco. Cumpliendo con los objetivos de ergonomía planteados.

EPI: Orejeras

Preguntas	Respuesta				
	1	2	3	4	5
Tuvo dificultad en la colocación del EPI					
Siente las vibraciones ocasionadas por el mini motor					
Las vibraciones son incómodas al contacto con la piel					
El dispositivo genera peso adicional a la EPI					

De la encuesta realizada se deduce que las vibraciones generadas por el mini motor no alertan al operario sobre la activación de una alarma, debido al material con el que están

construidas. A pesar de que las demás respuestas fueron favorables, al no cumplir con el objetivo principal del dispositivo de asistencia, las orejeras ya no son consideradas en la construcción e implementación del dispositivo.

EPI: Pantalla de protección facial (led RGB colocado en la mitad)

Preguntas	Respuesta				
	1	2	3	4	5
Tuvo dificultad en la colocación del dispositivo					
La posición de la luz quita visibilidad de las actividades que está realizando					
La intensidad de la luz es apropiada					
El dispositivo genera peso adicional a la EPI					

De la encuesta realizada se deduce que la activación del led RGB dificulta la visibilidad del operario, debido a la posición e intensidad lumínica que genera. A pesar de que las demás respuestas fueron favorables, al crear incomodidad en el usuario, se rechaza la ubicación en la mitad de la pantalla de protección facial.

EPI: Pantalla de protección facial (led RGB colocado en el lateral)

Preguntas	Respuesta				
	1	2	3	4	5
Tuvo dificultad en la colocación del dispositivo					
La posición de la luz quita visibilidad de las actividades que está realizando					
La intensidad de la luz es apropiada					
El dispositivo genera peso adicional a la EPI					

Las respuestas obtenidas de la encuesta realizada indican que la posición del led RGB hace que la luz se disperse por la pantalla de protección ocasionando que el operario identifique la

activación de la alarma sin causar molestias en su visión. Adicionalmente, se establece que el dispositivo es cómodo y de fácil uso, pues no genera peso adicional.

Del análisis anterior se concluye que el mejor lugar en donde se debe instalar los sistemas de estimulación háptica y lumínica son el casco de seguridad, para incorporar los mini motores, y la ubicación ideal para colocar el led RGB es en los laterales de la pantalla de protección facial. Una vez seleccionado los parámetros mencionados a lo largo de este capítulo se inicia con el desarrollo eléctrico del dispositivo de asistencia en conjunto con el diseño de la carcasa protectora del mismo.

Desarrollo y diseño del hardware

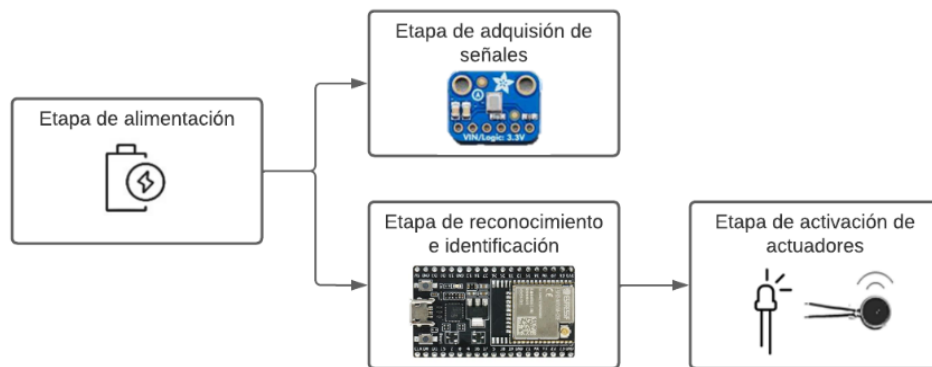
El desarrollo físico del dispositivo de asistencia está basado en la selección de sensores, microcontroladores, actuadores y su ubicación. Además, características previamente definidas como la configuración de los micrófonos, el uso del microcontrolador ESP32 y los tipos de actuadores colocados en los EPI para dar un estímulo al operario mediante el uso del led RGB y del mini motor.

También con estas acciones se asocian particularidades en el tamaño, versatilidad y funcionamiento que permitan el cumplimiento de las siguientes características; el dispositivo debe contar con un cargador que sea ligero para su colocación en el equipo de protección individual y un sistema que permita el correcto funcionamiento aun cuando la batería haya disminuido su capacidad o se encuentre conectado al cargador. Además, debe tener un botón para encender y apagar el sistema, por lo que es necesario un indicador que muestre el estado en el que se encuentra el proceso: apagado, encendido, detección de fallas y correcto funcionamiento. Así mismo, el dispositivo debe contar con un control reset que ayude al trabajador a detener el accionamiento de los actuadores provocados por la activación de las distintas alarmas. Con el fin

de cumplir las necesidades planteadas se estructura las etapas que se presentan en el diagrama de la Figura 18.

Figura 18

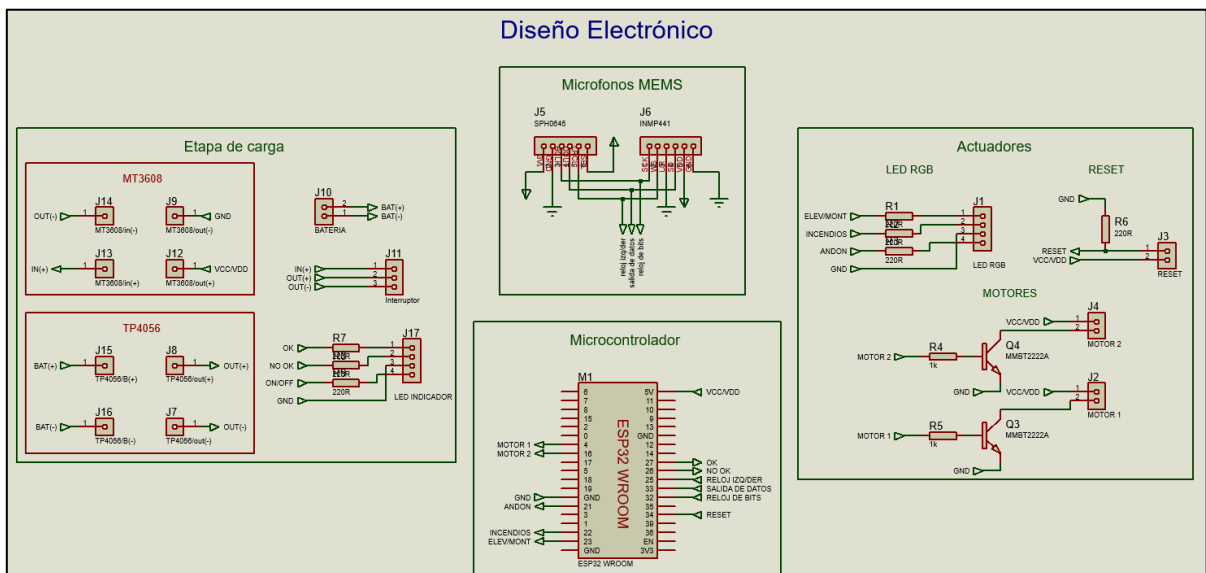
Etapas del dispositivo de asistencia



En el esquema de la Figura 19 se presenta la conexión de cada etapa del sistema, donde se integran la etapa de alimentación que se conecta con las etapas de adquisición de señales y la etapa de reconocimiento e identificación, la cual envía la señal de activación a los actuadores y el reset del sistema.

Figura 19

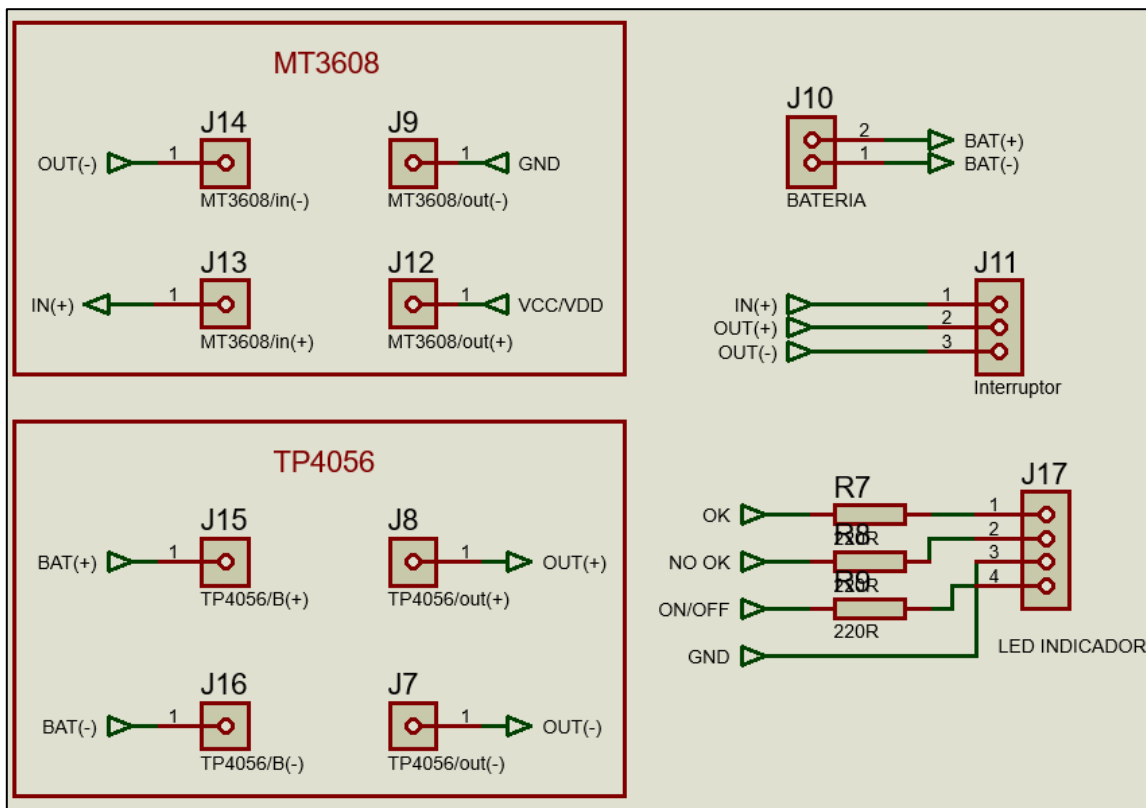
Diseño Eléctrico final del dispositivo



En la etapa de alimentación observada en la Figura 20 se utiliza como fuente una batería de litio de 3,7V y 1000mA, debido a que estas baterías tienen una carga rápida y una densidad de potencia alta, causando que la batería sea más ligera y tenga mayor duración (Apple, 2023). Para el abastecimiento de batería se utiliza el módulo TP4056, usado para cargar la batería mediante un cable micro USB conectado a una fuente de alimentación, el mismo que cuenta con un circuito de protección contra sobrecargas para optimizar el tiempo de vida útil de la batería de acuerdo con el datasheet. Adicional, se agrega un módulo MT3608 utilizado para elevar el voltaje, para que la entrada del circuito sea constante. Por último, a esta etapa se coloca un interruptor para encender y apagar el sistema, conjuntamente un led indicador muestra su estado.

Figura 20

Etapa de alimentación

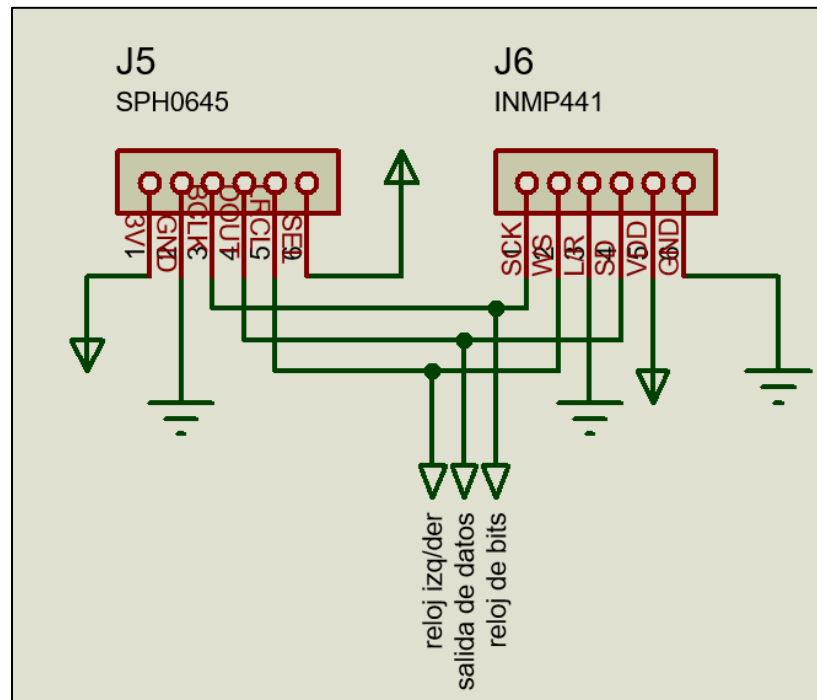


Para la etapa de adquisición de señales se hace uso del micrófono SPH645 y el micrófono INMP441 seleccionados previamente para la recolección de información del sistema. Los datos

que se almacenan son las componentes de ruido ambiental y perturbaciones ocasionadas por la activación de alarmas. Mediante una configuración de audio estéreo, conectando el micrófono SPH645 al canal derecho a través de VCC y el micrófono INMP441 al canal izquierdo mediante GND como se observa en la Figura 21.

Figura 21

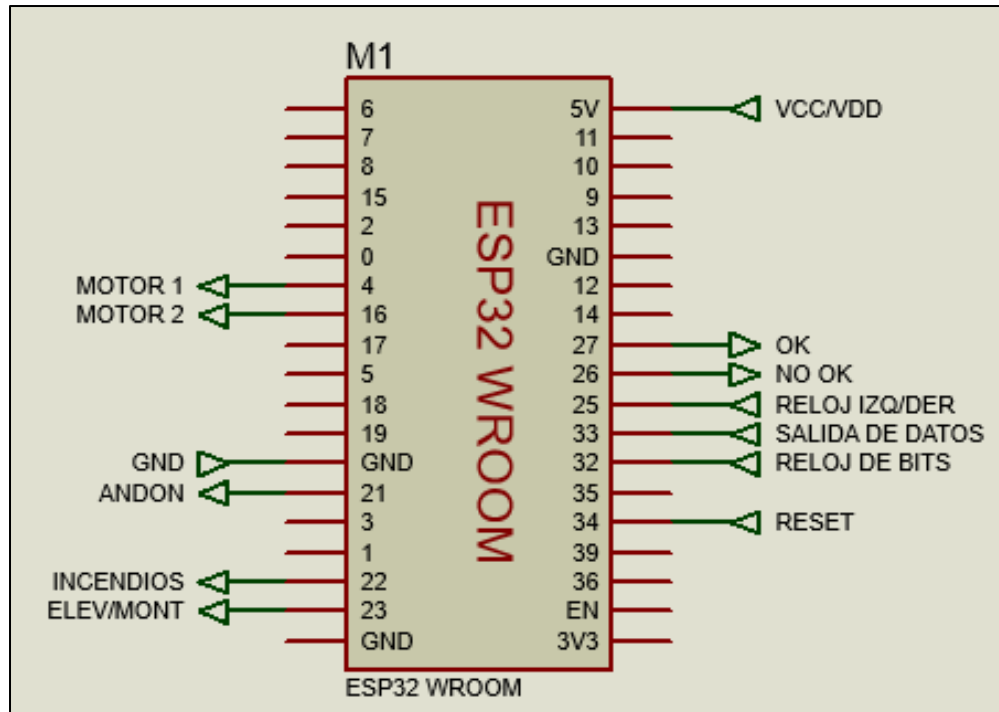
Etapa de adquisición de datos



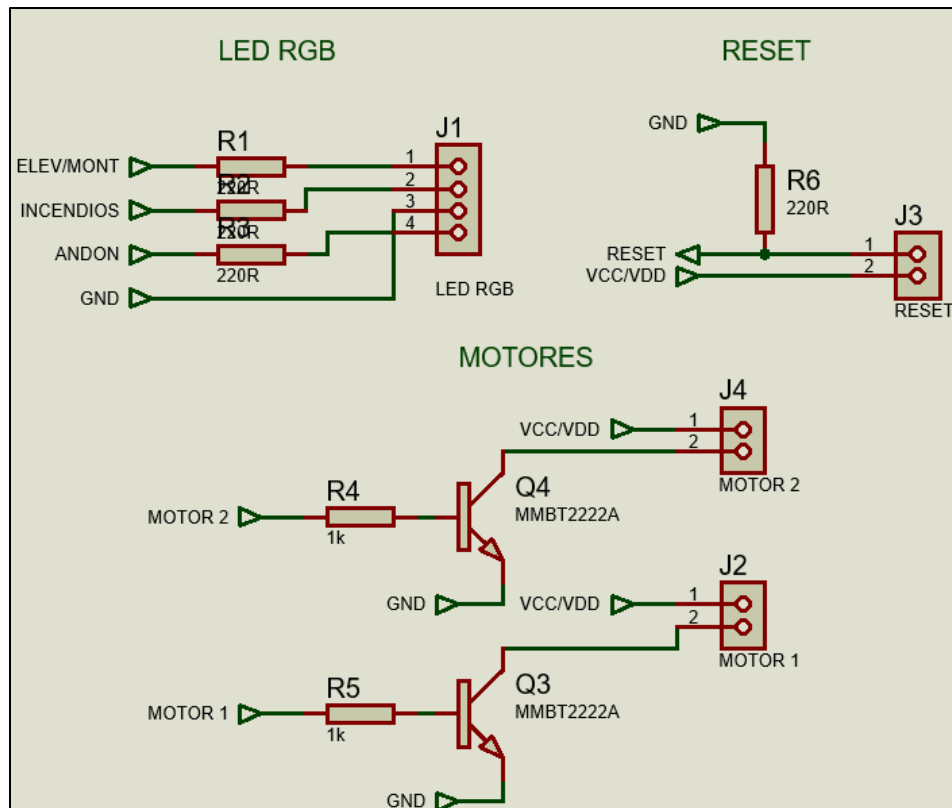
Para la etapa de reconocimiento e identificación se seleccionó el microcontrolador ESP32 que recibe datos de los micrófonos y realiza el procesamiento de la señal. De esta forma obtiene la información necesaria para la identificación y reconocimiento de las alarmas, la cual se envía al sistema de estimulación y permite alertar al trabajador con discapacidad auditiva. En la Figura 22, se presenta el microcontrolador ESP32 al cual están conectado a la etapa de alimentación y la etapa de adquisición de señales como entradas. Mientras que, las salidas se conectan con el sistema de estimulación.

Figura 22

Etapa de reconocimiento e identificación



A partir de la información obtenida de la etapa de reconocimiento e identificación de los micrófonos SPH645 y el micrófono INMP441, el sistema procesa los datos y envía una señal a los actuadores, a través de vibraciones en la piel y luces parpadeantes que alertan al operario sobre la activación de las alarmas del elevador, montacargas, sistema ANDON e incendios. En la Figura 23, se muestra la etapa de activación de los actuadores para la estimulación háptica que utiliza un motor vibrador, mientras que la estimulación visual hace uso de un led RGB. Cada uno de los actuadores se colocan en el equipo de protección individual correspondiente para alertar a la persona con discapacidad auditiva. Adicionalmente, se coloca el botón de reset que sirve para desactivar los actuadores cuando el trabajo sea alertado sobre la alarma activada.

Figura 23*Etapa de activación de alarmas*

En base al esquema de distribución de pines se realiza el diseño de la Figura 24 e implementación de la Figura 25 de la etapa alimentación, la etapa de adquisición de señales, la etapa de reconocimiento e identificación y la etapa de activación a los actuadores en la PCB. Debido a que una de las condiciones de ergonomía fundamentales del dispositivo es el tamaño y el peso, se optó por el uso de componentes SMD. Adicionalmente, para el diseño de la placa se tomó en consideración las dimensiones posteriores del casco, obteniendo un diseño final que tiene las siguientes dimensiones de 76,5 mm de ancho por 56 mm de largo.

Figura 24

PCB diseñado del sistema

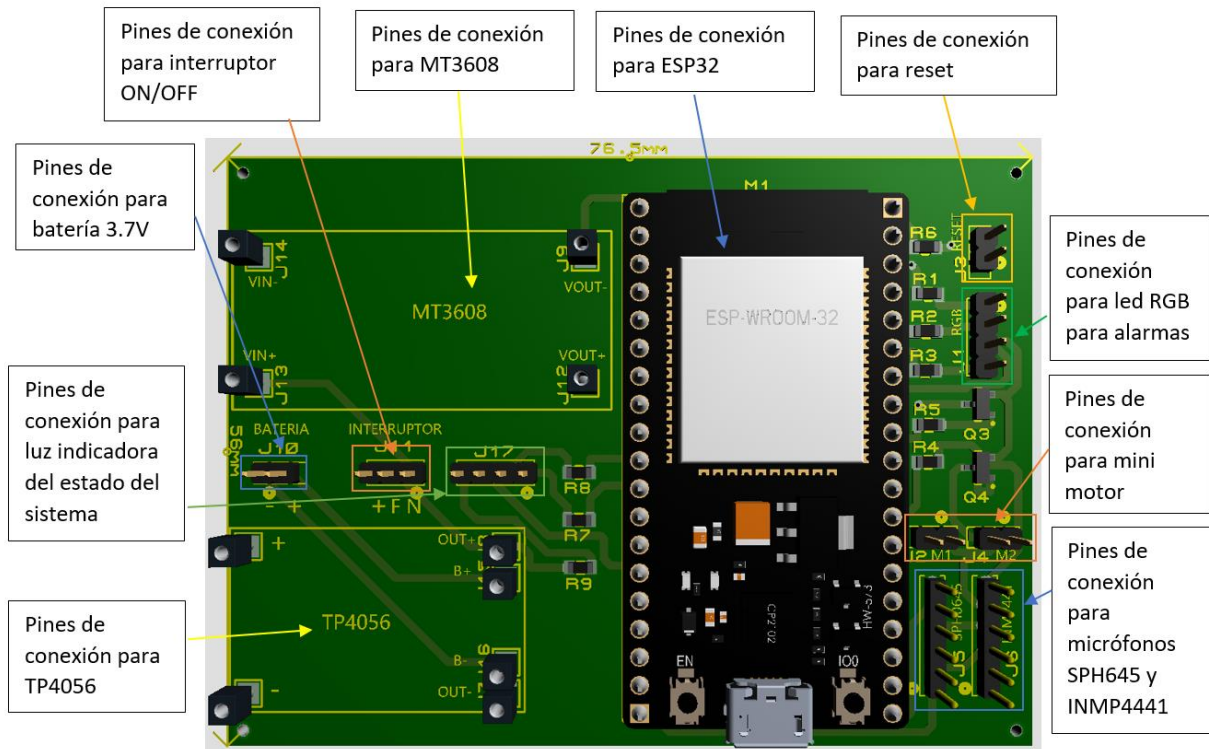
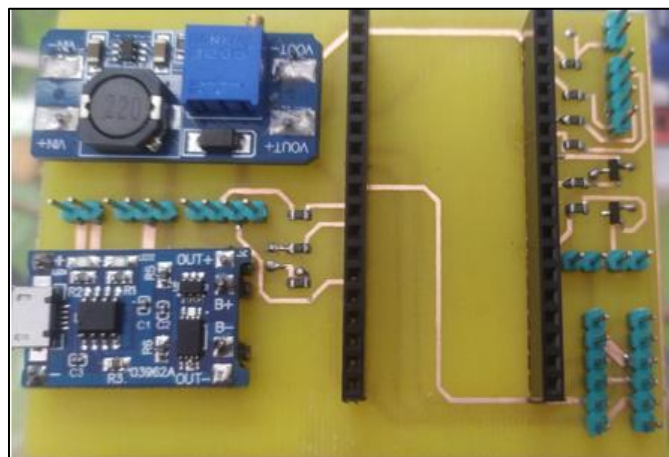


Figura 25

Montaje de la PCB diseñada



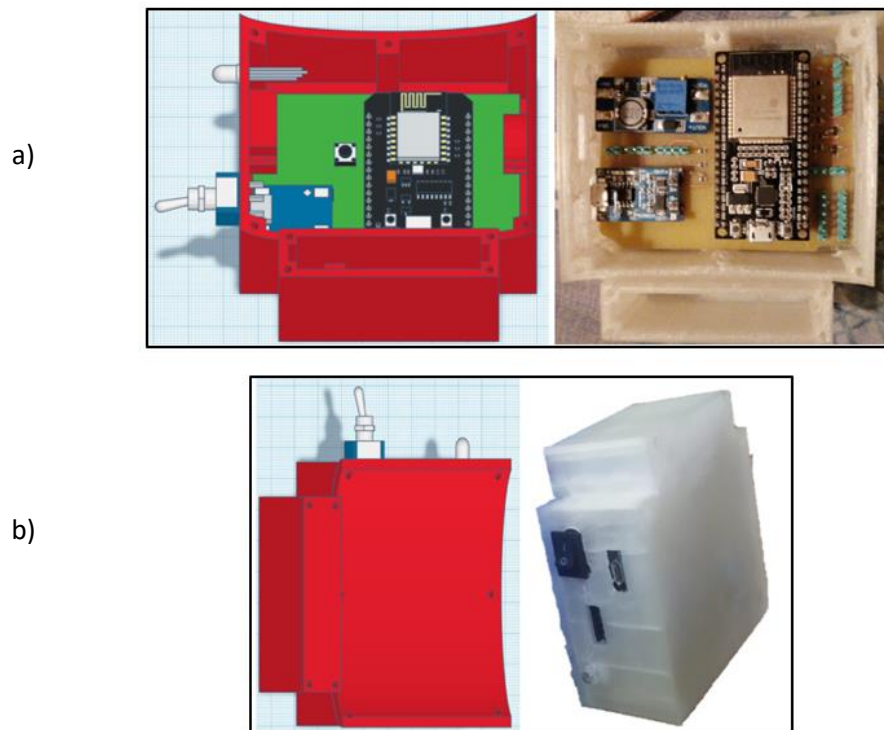
Tras el montaje de los diferentes elementos, como se muestra en la Figura 25, se diseña una estructura que contenga la placa y elementos externos. Debido a que el dispositivo va a estar instalado en el equipo de protección individual del trabajador, se requiere de una estructura diseñada con un material liviano y capaz de soportar golpes. Con el fin de evitar complicaciones al momento de la colocación ya sea del casco o de la pantalla facial de seguridad, que fueron los equipos de protección individual seleccionados para montar el dispositivo.

El diseño 3D tiene las siguientes especificaciones: en el lado izquierdo se encuentra un interruptor que permite al usuario encender o apagar el sistema, junto con un led RGB para indicar el estado del proceso, además de un conector micro USB que sirve para cargar la batería de litio. En los laterales de la caja se encuentran orificios para los micrófonos, a fin de que pueda ingresar el sonido de la planta para el reconocimiento e identificación de las alarmas. También existe un compartimento para colocar la batería de litio, este diseño se hizo pensando en la comodidad del usuario al momento de cambiar la batería, pues su tiempo de vida es de 3 a 5 años. Finalmente, la construcción de la estructura se hizo a base de un material reforzado con fibra de carbono transparente, no corrosivo y de gran resistencia, acoplados al casco con tornillos. La estructura tiene una forma rectangular con una tapa convexa y sus dimensiones son: 88mm x 85mm x 35mm.

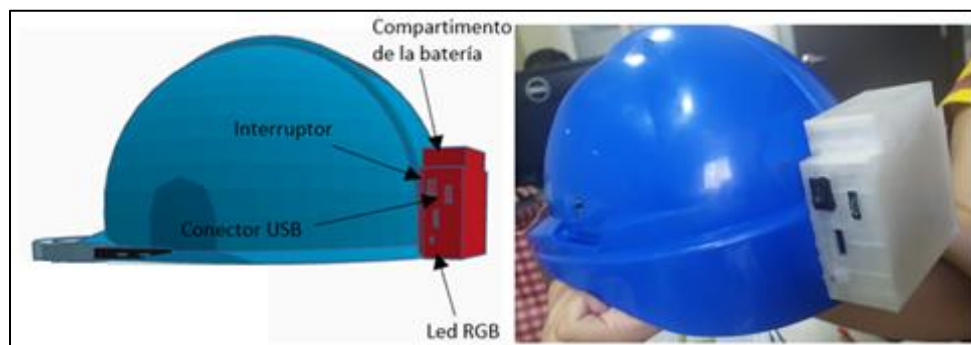
La estructura fue diseñada en el software Tinkercard de acuerdo con las características establecidas. En la Figura 26 se presenta a) la vista frontal del diseño y la implementación de la estructura y b) la vista lateral del diseño y la implementación de la estructura que se coloca en el equipo de protección individual. Por último, en la Figura 27 se muestra el esquemático del diseño y la implementación final del dispositivo de asistencia.

Figura 26

Diseño e implementación de estructura del dispositivo de asistencia

**Figura 27**

Diseño e implementación del dispositivo final



Para la implementación del dispositivo se tomó en consideración opiniones del trabajador al cual está dirigido el dispositivo de asistencia y del área de ingeniería, a fin de llegar a un consenso en donde se tuvo como prioridad la comodidad del usuario y el correcto funcionamiento del dispositivo cumpliendo con el objetivo de alertar al operador sobre la activación de alarmas. Como se observa en la Figura 22 la etapa de análisis de las señales de alarmas se realiza usando un microcontrolador en el cual se realiza la programación necesaria para la adquisición de señales generadas por la activación de alarmas, el reconocimiento de sonidos mediante la amplitud generada y la identificación de las alarmas a través de la frecuencia característica de cada una. Por lo cual es importante realizar un algoritmo de programación que tenga en consideración ciertos parámetros que ayude a este propósito.

Capítulo IV. Diseño e implementación del software

Introducción

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento y ergonomía del dispositivo de asistencia, en el presente capítulo se describe el desarrollo del algoritmo de programación usado en las etapas de adquisición, procesamiento, reconocimiento e identificación de las señales de alarma. En cada etapa se analizan criterios de diseño como calidad en la señal, tiempo de respuesta y distancia máxima en la cual el dispositivo funciona correctamente.

En la etapa de adquisición se hizo uso del protocolo de comunicación I2S para transferir datos de audio entre los micrófonos INMP441 y SHPH0645 y el microcontrolador ESP32. Para la lectura de estos datos, es necesario emplear un formato de audio. En aplicaciones destinadas al reconocimiento de sonidos los formatos de audio recomendables son formatos sin comprimir como WAV, AIFF o AU. Para el presente proyecto se utilizó el formato WAV, pues es compatible con el software empleado en la etapa de reconocimiento e identificación de las señales de alarma.

Previo a implementar el algoritmo en el microcontrolador se realizaron pruebas de algoritmo mediante el software Matlab, el mismo que cuenta con varias funciones de análisis espectral como la transformada rápida de Fourier y la densidad espectral de potencia. Estas funciones fueron comparadas y analizadas a fin de seleccionar la que presente mejores resultados y menor costo computacional, para el desarrollo del algoritmo de programación del dispositivo de asistencia.

Una vez determinada la función que permita establecer las frecuencias y amplitudes que caractericen a las alarmas, se transfiere el sistema modelado por Matlab al microcontrolador ESP32 haciendo uso del software Arduino IDE. Finalmente, se utilizan tablas de verdad para

cuantificar los criterios del software, donde se analizan las características de tiempo de respuesta y distancia, para determinar la calidad en el reconocimiento e identificación de alarmas que alertar al operario sobre la activación de las mismas.

Etapas de adquisición de señales de alarma

Como se mencionó en el capítulo III el hardware para la adquisición de datos está compuesto por componentes electrónicos que recopilan, acondicionan, convierten y transmiten señales de audio, obtenidas por el transductor de presión sonora o micrófono. El micrófono tiene como finalidad convertir las ondas de presión de aire generadas a causa de ruidos o la activación de alarmas, en señales continuas que varían su amplitud y periodo en función del tiempo. A este tipo de señales se las conoce como analógicas y están conformadas por ondas sinusoidales de distintas frecuencias que responden a variaciones de sonido (Cajas & Torres, 2018).

En la actualidad, existen micrófonos como los MEMS que tienen la capacidad de convertir señales analógicas en digitales, en el mismo circuito integrado, facilitando el procesamiento de las señales. Existen varios tipos de conversores predefinidos que tienen la capacidad de muestrear, cuantificar y codificar las señales analógicas obtenidas. Los micrófonos seleccionados para el desarrollo del dispositivo de asistencia, cuentan con un conversor de sobre muestreo conocido como Sigma-Delta, debido a su tamaño pequeño y facilidad en la transmisión de señales, que permite que la salida del micrófono sea digital (Flores, 2017).

Los micrófonos INMP441 y SPH0645 son micrófonos tipo MEMS, que cuentan con un conversor ADC para obtener una salida digital y un filtro antialiasing, a fin de evitar fluctuaciones en las señales de sonido. Para la transferencia de datos se hace uso del protocolo serial I2S, que tiene como objetivo facilitar la conexión de los transductores directamente con el procesador de señales, para este caso específico se hace uso del microcontrolador ESP32 (NTI, 2020).

Protocolo de bus I2S

Actualmente, la interconexión de sistemas y dispositivos está asociada a diversos protocolos de comunicación. Los protocolos de comunicación establecen restricciones, procedimientos y formatos necesarios para el intercambio de paquetes de información entre dos o más dispositivos. A fin de lograr esta comunicación, se han establecido reglas, estándares y políticas formales que aportan conocimiento de los distintos tipos de protocolos y el correcto uso de los mismos (KIO, 2023).

En las industrias dedicadas a los sistemas de audio digital, se está introduciendo nuevos protocolos para facilitar la comunicación de señales de audio. En los últimos años, las señales de audio digital están siendo procesadas por un protocolo de bus de sonido inter-IC (I2S), que se encuentra presente en circuitos integrados estandarizados para aumentar la flexibilidad de los sistemas. El protocolo de bus I2S es un enlace en serie para audio digital, diseñado para manejar únicamente datos de audio (NXP semiconductors, 2022).

Varias aplicaciones de tecnología multimedia utilizan el protocolo de bus I2S, debido a sus características de recopilación, procesamiento y transmisión de datos de audio entre dispositivos de audio digitales (Ailson, 2019). El protocolo I2S utiliza buses seriales para conectar micrófonos a circuitos que soporten una salida de audio digitalizada, por lo general, los circuitos suelen ser microcontroladores. A fin de usar con facilidad la implementación del protocolo IS2 en aplicaciones de audio, se han instaurado librerías que permiten trabajar con señales de audio, en distintos softwares (Gómez, 2021).

El bus I2S es usado como una interfaz de puertos seriales dúplex completos, para la transmisión y recepción de datos de audio. Además, cuenta con registros de datos con doble

buffer para permitir el flujo de datos continuo con longitudes de palabras de hasta 32 bits. La comunicación del bus I2S corresponde a una serie de 1 y 0, que se puede describir en términos de: bits representados por 1 lógica alta y 0 lógica baja; palabras como el grupo de bits con longitud programable; y cuadros compuesta por grupos de palabras que transmiten o reciben datos. Cuando el protocolo I2S está habilitado la transferencia de datos empieza cuando se detecta el nivel apropiado en el reloj de sincronización de cuadros, correspondiente a la frecuencia de muestreo (Texas Instruments, 2014)

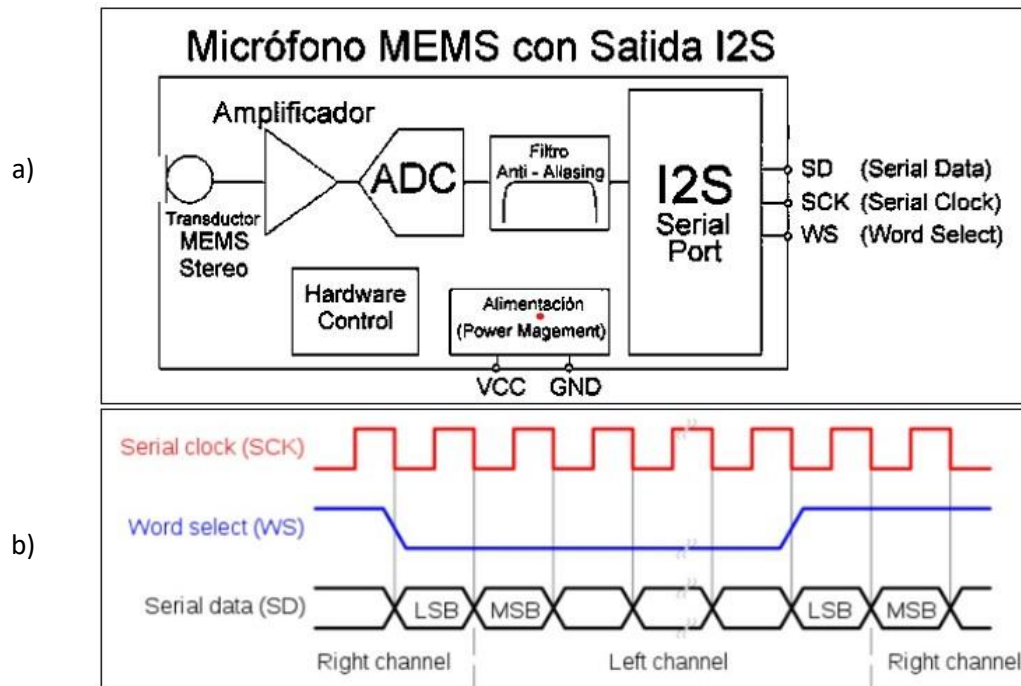
Existen varias características que definen al protocolo I2S como el protocolo de comunicación ideal para aplicaciones de audio, entre ellas; el método de cuantificación a través de la modulación de código de pulsos o PCM, que proporciona bidireccionalidad y sincronía. El método PCM representa digitalmente señales analógicas muestreadas en ambas direcciones que empieza desde la captura de audio hasta la reproducción del mismo. Además, el protocolo I2S tiene la capacidad de ponerse en estado inactivo a fin de ahorrar consumo de energía (Silvaco, 2019).

Los micrófonos MEMS usan el protocolo I2S para la transferencia de señales acústicas, a través de un puerto serie de datos I2S, compuesto por; línea de datos SD, línea de reloj SCK y selector de palabra WS. Adicionalmente, existe otra línea para la transferencia de datos, denominada reloj maestro o línea de datos multiplexados SEL, que permiten la comunicación bidireccional para uno o dos micrófonos diferentes. Para determinar si los datos de modulación se activan en flancos de subida se conecta SEL a VDD, mientras que si se desea que los datos se activan en flancos de bajada se conecta SEL a GND. Estas configuraciones son usadas a menudo para sincronizar micrófonos en estéreo. En la Figura 28 en a) se puede observar el diagrama de

bloques interno de los micrófonos MEMS, que cuenta con alimentación independiente y los puertos seriales del protocolo I2S (Gómez, 2021).

Figura 28

Diagrama de bloques y salida I2S de micrófonos MEMS



Nota. Las gráficas muestran a) el diagrama de bloques interno de los micrófonos MEMS y b) las líneas de comunicación del protocolo I2S. Gráficas tomadas de Gómez, 2021.

Como se observa en la Figura 28 en a) las líneas de comunicación del protocolo I2S están definidas por: SCK representado por el color rojo, conocida como reloj serial o reloj de bits, corresponde a cada bit de datos de audio digital. WS representado por el color azul, conocido como selector de palabra, se utiliza para indicar el canal que se está transmitiendo, estableciendo una comunicación síncrona. Por último, el canal SD representado por el color negro, conocida

como datos seriales, este es el pin por donde entran o salen los datos reales, expresados en complemento a dos (Ailson, 2019).

Finalmente, para obtener una correcta comunicación se debe tener en cuenta ciertos parámetros predefinidos para cada línea de transmisión como; la tasa de sobremuestreo se debe fijar en 64, por lo tanto, la señal WS debe ser SCK/64 y a su vez debe estar sincronizada con SCK. Las frecuencias de muestreo SD están definidas entre 2048 MHz a 4096 MHz, por lo que se pueden utilizar tasas de muestreo de 32 KHz a 64 KHz cambiando la frecuencia del reloj. A partir de la adquisición de datos se establece un formato de archivo de audio para la lectura de las señales, las mismas que serán almacenadas en la memoria flash del microcontrolador (Gómez, 2021).

Formato de archivos de audio

En la actualidad, existen varios dispositivos que pueden reproducir sonidos como celulares, tabletas, computadoras o reproductores de música. La reproducción de estos sonidos se debe a formatos de audio digital, que permiten almacenar grandes cantidades de sonido en poco espacio cumpliendo con las características de HIFI y HD, existen varios formatos en donde se pueden guardar audios digitales. Los formatos de audio son contenedores multimedia que tienen la capacidad de guardar grabaciones, estableciendo ciertos parámetros como el tamaño del fichero y la calidad del sonido (Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía, 2010).

El primer parámetro a considerar es el tamaño del fichero, que indica la estructura con la que el audio se encuentra almacenado. Existen dos grupos de formatos de ficheros de audio: formatos autodescriptivos, en donde se pueden establecer parámetros del dispositivo y codificaciones; y los formatos sin cabecera o tipo raw que tiene parámetros fijos. En la Tabla 10 se

muestra algunos formatos de fichero de audio autodescriptivos y los parámetros que se permiten modificar (López, 2018).

Tabla 10

Formatos de fichero de audio

Extensión	Nombre	Origen	Parámetros modificables				Comentarios
			Tasa	Canales	Codif.	Otra info	
.au, .snd		NeXT, S	X	X	X	X	
.aif, .aiff	AIFF	Apple, SGI	X	X	X	X	
.aif, .aiff	AIFC	Apple, SGI	X	X	X	X	
.iff	IFF/8SVX	AMIGA	X	X		X	AIFF con compresión Info.
.mp2, .mp3	MPEG	MPEG	X	X	X		De instrument, 8 bits
.ra	Real Audio	Real Networks	X	X	X		
.sf	IRCAM		X	X	X	X	
.smp		Turtle Beach					16 bits/ 1 canal, bucles
.voc		SoundBlaster	X				8 bits/ 1 canal puede detector el silencio
.wav	WAVE	Microsoft	X	X	X	X	8k sps, 1 canal, ley-A, 8 bits
.wve		Psion					8bits/1 canal, comp. Huffman
(ninguna)	HCOM	Mac	X				

Nota. La tabla presenta los formatos de fichero de audio autodescriptivos y los parámetros que se permiten modificar. Datos obtenidos de López, 2018.

El segundo parámetro corresponde a la calidad de audio digital, al comparar la señal original con la señal reproducida. Esta cualidad se determinada por el número de bits por muestra y la tasa de muestreo. El número de bits por muestra determina la relación señal a ruido que depende de la forma cuadrática del número de bits por muestra. Mientras que, la tasa de muestreo establece una cota superior para las componentes espectrales, pudiendo denotar

distorsión lineal en la señal de salida o aliasing si el filtro de la señal no es el adecuado (López, 2018).

Los formatos de audio corresponden a una extensión específica de archivo que les brinda características únicas, las más utilizadas son: los formatos WAV que permiten la compresión de audios en distintos tamaños de muestreo para publicar en la Web, ofreciendo calidad en el audio. Los formatos MP3 tiene una gran capacidad de compresión y alta calidad, logrando que todos los dispositivos puedan reproducir este tipo de formato. Por último, el formato OGG es una alternativa libre y de código abierto, capaz de contener audio y video (Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía, 2010).

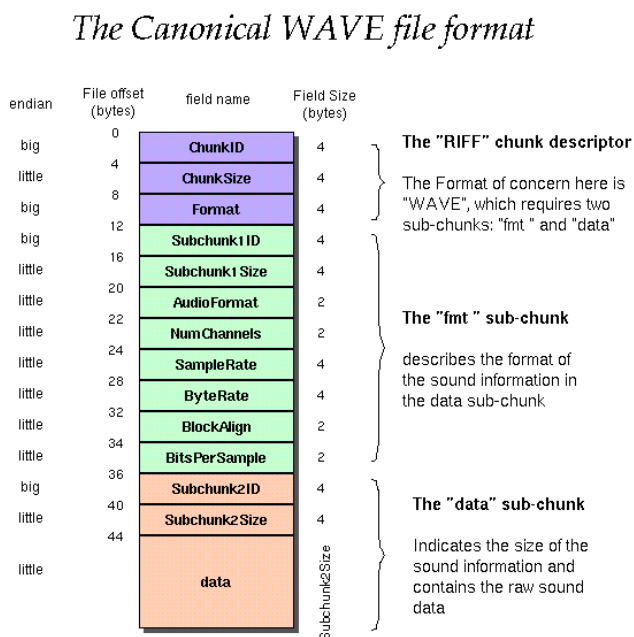
Para la adquisición de señales de audio de los distintos sonidos que genera la activación de alarmas y el ruido ocasionado por la maquinaria de la planta, se hace uso del formato de audio WAV denominado como WaveForm Audio File un archivo de extensión *.wav. Este formato es ideal para guardar audios originales, a partir de los cuales se puede comprimir y guardar distintos tamaños de muestreo. Los archivos WAV se pueden guardar con distintos tipos de compresión, los más usados son PCM y ADPCM. Además, tiene excelente calidad de audio, sin embargo, genera archivos pesados que pueden ocupar espacio entre 20 y 30 Mb (Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía, 2010).

El formato de archivo WAVE sirve para el almacenamiento de archivos multimedia y se almacena dentro de un fichero con formato RIFF. Está estructurado por varios segmentos los principales y de uso obligatorio son FMT para especificar el formato de los datos y DATA que contiene los datos reales de audio. Mientras que, los segmentos como FACT, Cue-Points, playlist, entre otros, son de uso opcional, dependiendo de la aplicación que se desea realizar (Scott, 2003).

Como se observa en la Figura 29, el primer segmento está conformado por el encabezado en donde se establece el tipo de formato y la distribución de los segmentos FTM y DATA. El orden y la longitud en el que se dividen los segmentos es importante, pues cada dirección define un parámetro del archivo de audio que se desea escuchar. El segundo segmento FTM está compuesto por dos elementos: un conjunto de campos comunes y un conjunto de campos específicos. En este segmento se puede cambiar el formato del audio o PCM, el número de canales, la tasa de muestreo de cada canal, el tamaño del buffer y el número de bits de la señal muestreada. Finalmente, el tercer segmento DATA, contiene el tamaño de los datos y el sonido real, en donde se configura el número de bytes de los datos para el tamaño de lectura del fragmento. Cabe mencionar que, la escritura de las direcciones de los contenedores de cada segmento es a través del sistema de numeración hexadecimal (Scott, 2003).

Figura 29

Forma canónica de un fichero WAVE



Nota. La gráfica muestra la estructura de un fichero WAVE tomado de Scott, 2003.

Los formatos de audio permiten representar un conjunto de muestras digitales de forma eficiente y optimizada. Por lo que se debe establecer características como frecuencia, tasa de muestreo, resolución y velocidad de transmisión, dando lugar a la selección del tipo de formato que se adapte al software a utilizar. Para el presente trabajo se hace uso de un software de programación Matlab para analizar, reconocer e identificar las señales de audio previamente grabadas de las distintas alarmas, usando la configuración 3 definida en el capítulo anterior.

Etapas de reconocimiento e identificación de señales de alarma

Cuando se desea analizar y tratar señales de audio se utilizan métodos numéricos. Para ello, lo primero que se debe hacer es la adquisición de valores de una onda en intervalos discretos, con la condición de que sean lo suficientemente próximos en el tiempo para poder reconstruir la señal original. Las señales de audio originales son analógicas, para aplicaciones de reconocimiento e identificación de sonidos es necesario trabajar con señales digitales como se mencionó anteriormente, por lo que se hace uso de un conversor ADC para transformar este tipo de señales. Una vez adquiridos los datos de audio, se almacenan en memorias digitales, a través de formatos de audio, para ser procesadas y analizadas mediante un software de programación (Martí, 1987).

Existen varios softwares de análisis de señales de audio como Python, Visual Studio Code, Minitab, Matlab, entre otros. Se hace uso del software Matlab para la manipulación y estudio de las señales digitalizadas de audio, debido a que ofrece funciones para la lectura de las mismas, basadas en estimaciones espectrales para el análisis de señales muestreadas de manera uniforme o no uniforme. En el presente proyecto de titulación se emplean dos funciones para el análisis de las señales, la Transformada rápida de Fourier y el periodograma, para la estimación de la densidad espectral de potencia que permiten determinar la frecuencia y amplitud generadas por las alarmas mencionadas en la Tabla 4 del Capítulo III.

El primer método empleado es la Transformada rápida de Fourier, en donde se explica que toda señal periódica compleja se puede descomponer en la suma de las diferentes señales sinusoidales tanto en frecuencia como en amplitud (Martín, 2015). En términos matemáticos la Transformada de Fourier se denomina como un operador (F), que es la conversión de una función en el dominio del tiempo real $g(t)$ a una función en el dominio de la frecuencia $G(f)$, en donde ambas aporta la misma información (Martí, 1987).

La Transformada Rápida de Fourier o FFT es un método basado en el Teorema de Fourier que facilita enormemente la rapidez del cálculo frecuencial, usada en aplicaciones de tiempo real. Para analizar señales de audio a través del FFT se toma en consideración el número de muestras, el cual debe ser una potencia de 2, es decir, 2^n puntos, por ejemplo 32,1024, 2048, etc., a fin de obtener una buena representación de la señal de audio transcrita (Martí, 1987).

Adicionalmente, para el análisis de datos usando FFT se debe seleccionar fragmentos temporales que se adapten a la señal original, a este proceso se lo conoce como método de ventaneo. El método de ventaneo consiste en multiplicar la señal original por una función ventada, la misma que acota a la señal en cierto intervalo de tiempo permitiendo hacer una relación tiempo-frecuencia. La resolución de este método está dada por la longitud de la ventana, teniendo en consideración que la calidad de la frecuencia es inversamente proporcional a la calidad del tiempo. La función ventada establecida para aplicaciones de reconocimiento e identificación es la ventana flat, debido a que asocia señales de audio mediante simetría de puntos (Giraldo & Quintero, 2014).

El segundo método seleccionado es el periodograma, definido como un modelo de análisis matemático representado por la estimación de la transformada discreta de Fourier. Este método está basado en el teorema de Wiener Khintchine, el cual estipula que la función de auto

correlación del campo eléctrico y el espectro de potencia son transformadas de Fourier pares. Es por esta razón que para obtener la estimación del periodograma se debe calcular la secuencia de auto correlación, seguidamente de la transformada de Fourier de la señal procesada (IITM, 2015). Al utilizar el periodograma se puede determinar la distribución de la energía de una señal a lo largo de un intervalo de frecuencia. Esto se realiza dividiendo la señal de audio en un número determinado de segmentos traslapados y evaluando la transformada de Fourier para cada uno (Echeverry, Guarnizo, & Orozco, 2007).

Después de haber analizadas ambas funciones, se puede mencionar que tanto el periodograma como la transformada rápida de Fourier son matemáticamente equivalentes en una secuencia de auto correlación sesgada. Sin embargo, existe una ligera diferencia entre ambas debido a las fluctuaciones de las frecuencias manifestadas. Es por esta razón, que para la selección de la función que se va a implementar se realiza una comparación entre ellas, a fin de determinar la que presente mejores características en función de la frecuencia, amplitud y costo computacional.

Selección del método de estimación espectral

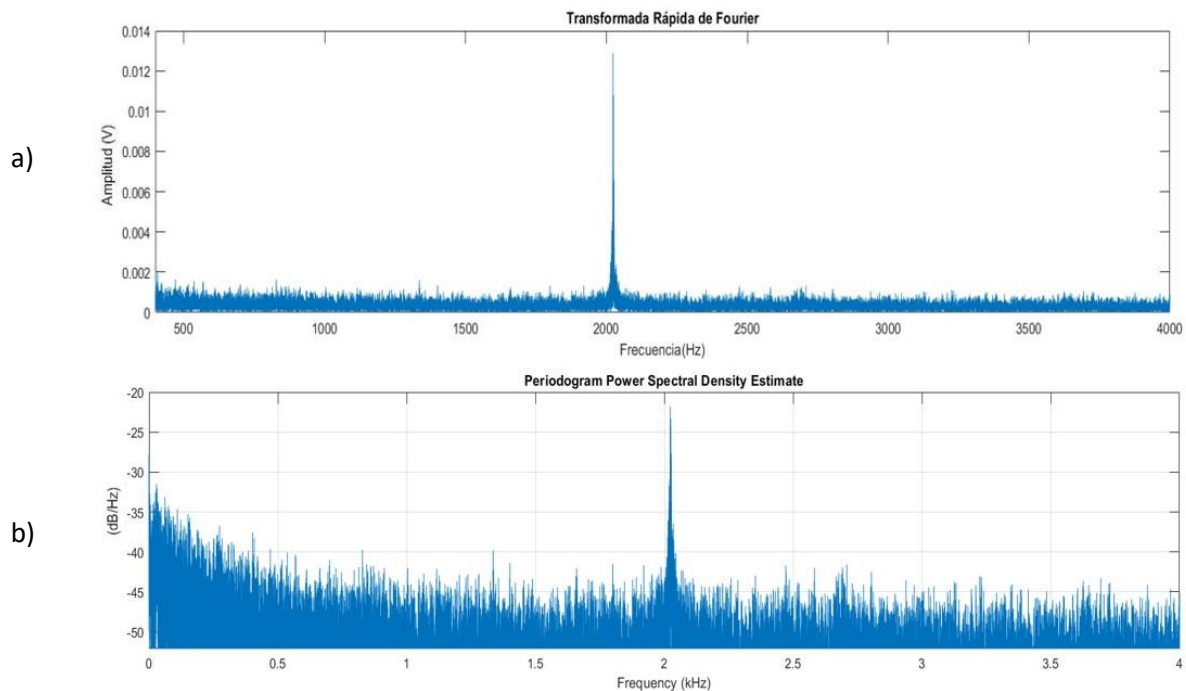
Como se mencionó, tanto la transformada rápida de Fourier como el periodograma sirven para el cambio de una señal de audio del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, haciendo posible la caracterización de frecuencia vs. amplitud de las señales de alarma determinadas. A continuación, en la Figura 30 se observa la representación de cada método.

Las señales representadas en la Figura 30 corresponden a una única grabación generada por la activación del llamado ANDON, que tiene una frecuencia característica de 2025Hz. Esta señal fue previamente grabada a través de los micrófonos INMP441 y SHP0645 y guardada en un

formato de audio tipo WAVE. Para finalizar, en la Figura 30 a) se realizó un algoritmo de programación para establecer la FFT de la señal grabada y en b) se presenta la señal digitalizada fue ingresada al software Matlab en donde se utilizó la función periodograma.

Figura 30

Representación de la señal de alarma mediante el periodograma y la transformada rápida de Fourier a) señal con periodograma y b) señal con FFT



Al analizar ambas gráficas se concluye que tanto la función FFT como el periodograma, ofrecen características similares en función de la frecuencia y amplitud. Sin embargo, se decide emplear la transformada rápida de Fourier o FFT para el análisis de las señales de alarma debido a la facilidad de programación y menor costo computacional, ocasionando menor tiempo de respuesta. Estas características resultan ideales debido a que el dispositivo de asistencia es una aplicación enfocada a alerta tiempo real sobre la activación de alarmas.

Una vez seleccionada la función con la que se va a desarrollar el software del dispositivo de asistencia, se consideran ciertos parámetros para el manejo y manipulación de las señales de audio. Como el rango de funcionamiento de cada alarma para su identificación y también para establecer una cota en la amplitud, a fin de reconocer entre ruido generado por la maquinaria de la planta y la activación de las alarmas.

Análisis de las señales de alarma

Una de las herramientas actuales para el análisis y predicción del comportamiento de sistemas, se basa en la construcción de modelos matemáticos. Definiendo como modelo matemático, a una representación abstracta y simplificada de un problema real, que tiene como propósito crear una solución particular (Fundación Polar, 2004). Los modelos matemáticos están enfocados en estudiar y caracterizar objetos y fenómenos de interés en diversas áreas relacionadas con la ingeniería. Con la ayuda de modelos matemáticos se hace más fácil la tarea de predicción del comportamiento de dispositivos, procesos y sistemas. Los cuales tienen como finalidad caracterizar, filtrar y eventualmente reducir efectos indeseados, creando una solución específica ante un comportamiento determinado (Giacomantone & Bria, 2020).

Con la ayuda de la FFT se puede detectar amplitudes en frecuencias específicas de señales provenientes de una grabación digital, denominada señal virtualmente periódica. El análisis frecuencial mediante FFT otorga una gran cantidad de datos útiles, debido a la reducción de fragmentos de la señal en componentes sinusoidales más pequeñas a fin de facilitar el análisis matemático tanto en frecuencia como en amplitud (Vilanova, 2016).

Para el análisis de las señales se realizaron varias grabaciones de las alarmas a diferentes horas del día y en distintas locaciones. De las grabaciones obtenidas se observó que existe

diferencia en las frecuencias y amplitudes de un mismo tipo de alarmas con respecto a las señales puras mencionadas de la Tabla 4 del Capítulo III. Esto ocurre debido a la sensibilidad de los micrófonos y a fenómenos físicos. Generalmente, los micrófonos tienen frecuencias de resonancia que afectan los picos y valles de la respuesta frecuencial ocasionando variaciones (Martí, 1987). Además, se toma en consideración fenómenos físicos ocasionados por efecto de proximidad, afectando en mayor medida a los micrófonos omnidireccionales, haciendo que la respuesta en frecuencia difiera una con otra (Arce, 2021). A esta anomalía se suma el efecto Doppler, que es el cambio de frecuencia de las ondas sonoras cuando la fuente de sonido o el receptor se desplazan uno respecto al otro (Hernández, 2014).

Tras el análisis de las grabaciones, se plantea dos características de las señales de alarma; establecer la amplitud umbral mínima de las señales de alarma, a fin de poder reconocer entre la activación de una alarma y la generación de ruido de la planta, sin tener que usar la función FFT. Por otro lado, establecer un rango de frecuencias en donde las alarmas puedan ser detectadas sin importar el movimiento del usuario o de la fuente de sonido. Para establecer este rango de frecuencias se utilizó como referencia la señal con frecuencia mínimo y máximo de cada señal registrada. Estas soluciones conllevan grandes beneficios para el dispositivo de asistencia, pues evita la generación de falsos positivos y disminuya el costo computacional haciendo que la batería dure más tiempo.

Análisis en amplitud de las señales de alarma

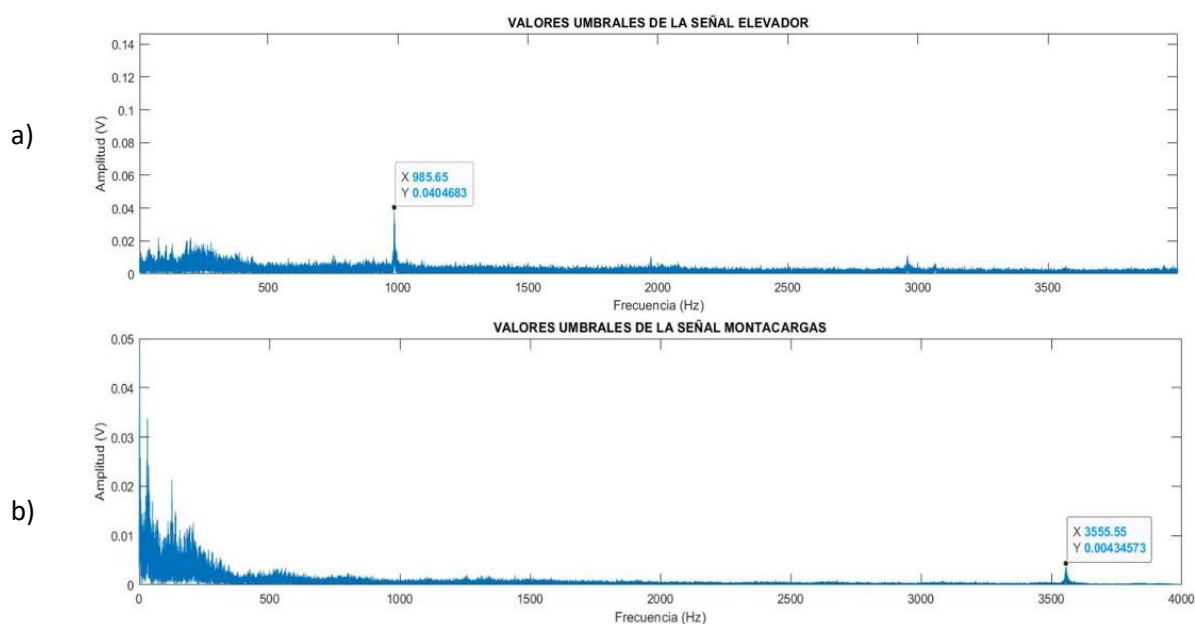
Con el fin de evitar altos consumos en el rendimiento, se considera la característica de la amplitud para establecer cambios de potencia entre alarmas y ruido generado por la maquinaria de producción. Mediante el uso de la técnica de suavizado o envolvente para extraer los datos de

la amplitud aparente de cada alarma, a fin de diseñar interacciones basadas en el volumen del sonido. Esta técnica propone definir los umbrales de las señales de alarma (Vilanova, 2016).

Para la caracterización de la amplitud se establecen las amplitudes mínimas generadas por cada alarma, para posteriormente, seleccionar la menor entre ellas y así poder determinar el umbral mínimo que diferencia a la activación de las alarmas del ruido de la planta. Estos valores se tomaron de acuerdo con pruebas de las 4 señales de alarma como se observa en la Figura 31 que muestra el valor umbral del elevador y del montacargas.

Figura 31

Valores umbrales de la señal de a alarma a) señal del elevador y b) señal del montacargas



En la Tabla 11 se presenta los datos obtenidos debido a que se pretende ahorrar costo computacional, pues solo se realizará la FFT una vez que esta haya superado el umbral establecido, haciendo que la batería dure más tiempo.

Tabla 11*Amplitudes mínimas de las señales de alarma*

Tipo de Alarma	Amplitudes mínimas
Elevador	0.04V
Montacargas	0.004V
ANDON	0.012V
Incendios	0.025V

Con respecto a los valores de la Tabla 11, se verifica que la menor amplitud de las alarmas es de 0.004V que corresponde a la alarma del montacargas. Este valor se establece como el umbral para identificar entre ruido de la planta o activación de una alarma. Para detectar la variación del sonido se proponen tres sensores detectores de audio que tienen las características de instrumento tipo 2. A fin de determinar el que presente mayor sensibilidad a la hora de detectar la activación de las alarmas.

El primer sensor se denomina sensor detector de sonido de la marca Sparkfun. Este sensor da la opción de elegir los valores entre tres salidas: audio para valores de voltaje, envelope para conocer la amplitud del sonido y gate para obtener una señal digital. El segundo sensor es el módulo KY-037 diseñado para medir el ruido ambiental de ambientes laborales. La ventaja de este sensor con respecto al anterior es que se puede regular la sensibilidad. El módulo KY-037 tiene una salida digital y una salida analógica para mostrar los valores de voltaje. Por último, se emplean los micrófonos SPH0645 y INMP441 de la configuración 3, para determinar el valor de ruido de la planta.

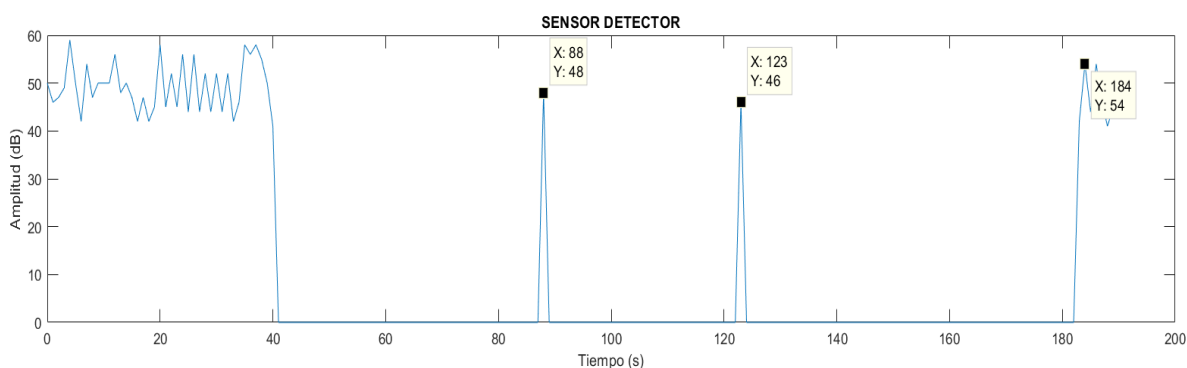
A continuación, se presentan las gráficas obtenidas de cada sensor, en donde se observa la variación del ruido de la planta. Los datos fueron tomados conjuntamente con los tres sensores, en el pasillo de producción, que es el lugar que presentó mayor cantidad de ruido. Para observar la

variación de las señales, se empleó la alarma del montacargas, debido a que es la que tiene menor amplitud.

La Figura 32 es la representación del sensor detector de sonido en donde se observa que existe un tiempo muerto de por lo menos 3 segundos hasta que la señal se estabilice, de las cuatro ocasiones en las que sonó el montacargas solo se pudo detectar tres de ellas. La respuesta del micrófono se obtuvo mediante la salida Envelope del sensor que otorga una señal analógica, en donde el nivel de sensibilidad viene preestablecido por defecto.

Figura 32

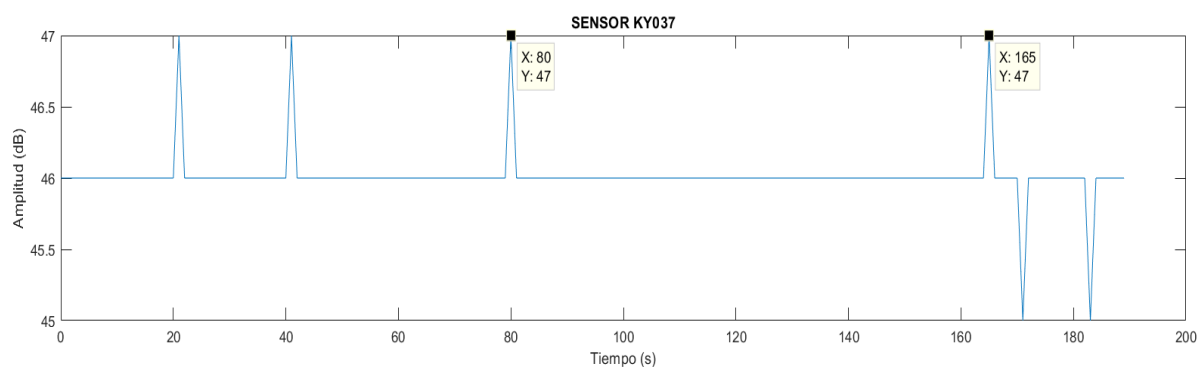
Representación del sensor detector de sonido en la señal de alarma del montacargas



La Figura 33 representa los datos obtenidos por el sensor KY-037 en donde se observa los niveles de detección de la alarma del montacargas son bajos. Debido a que solo detecta dos de las cuatro activaciones de la alarma, existen falsos positivos en los primeros 4 segundos. Esta señal se obtuvo mediante el pin analógico, corrigiendo la sensibilidad del sensor mediante el uso del potenciómetro que tiene incorporado.

Figura 33

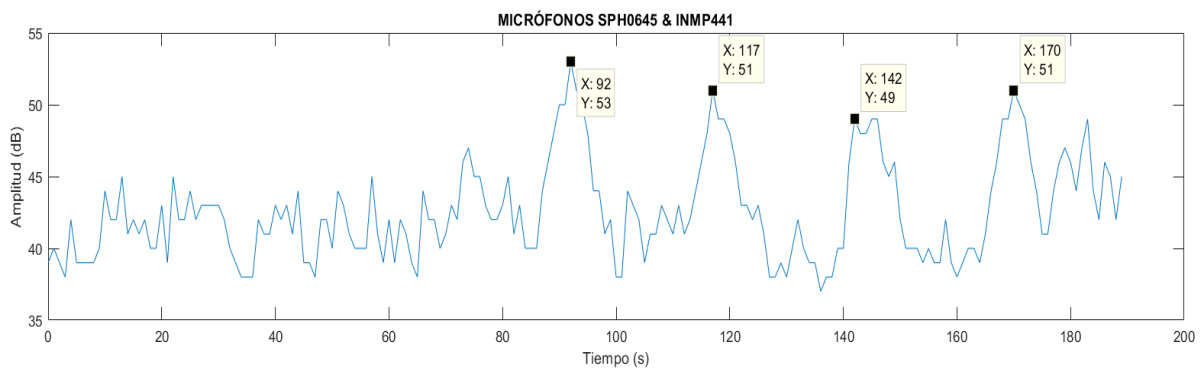
Representación del sensor KY-037 en la señal de alarma del montacargas



La Figura 34 es la representación de la configuración 3 de la Tabla 7, en donde se usan los micrófonos SPH0645 y INMP441. En esta gráfica se observa que esta conexión es capaz de identificar las cuatro activaciones del montacargas, haciendo que sea la que presenta mayor sensibilidad en comparación con los sensores anteriores.

Figura 34

Representación de los micrófonos SPH0645 y INMP441 en la señal de alarma del montacargas



Debido al grado de sensibilidad se seleccionaron los sensores INMP441 y SPH0645 como los encargados de medir los niveles de ruido de la planta. Cuando el nivel de ruido sobrepase el

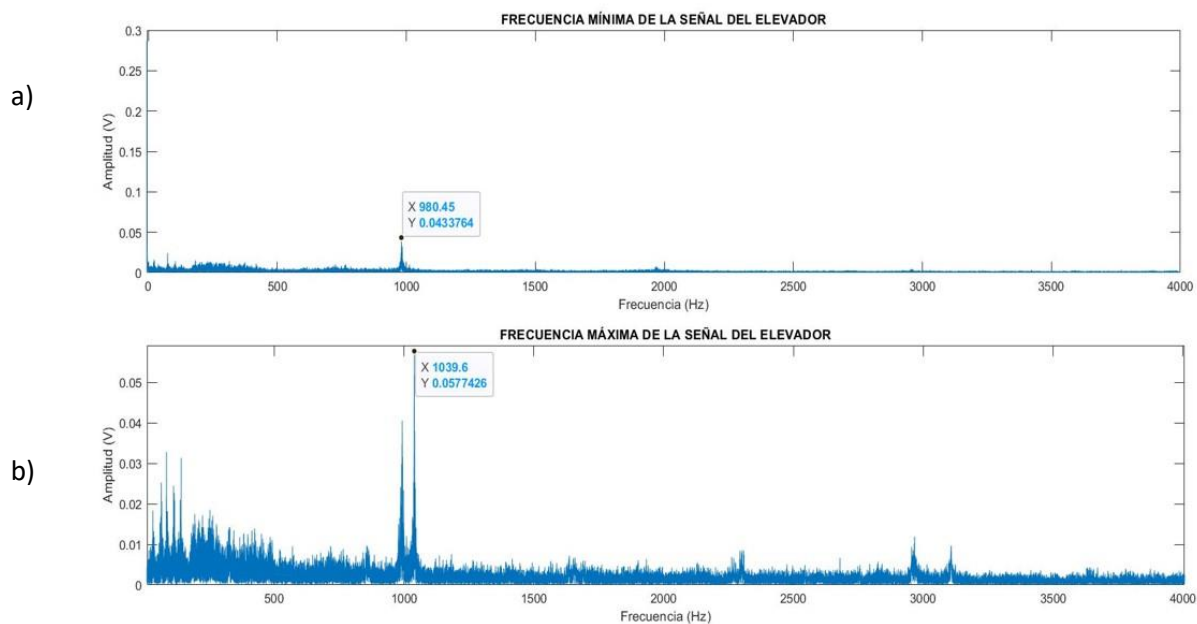
umbral de 0.003 V, se enviará una señal al microcontrolador para empezar a realizar la FFT de las señales.

Análisis frecuencial de las señales de alarma

Para caracterizar las señales de alarma por la frecuencia, se realizaron varias grabaciones de las cuatro alarmas en distintas locaciones de la planta. A partir de estas grabaciones se estableció el rango de frecuencia para registrar la activación de las alarmas, como se muestra en la señal de alarma del elevador de la Figura 35 que muestra la frecuencia mínima y máxima.

Figura 35

Frecuencias de la señal de alarma del elevador a) frecuencia mínima y b) frecuencia máxima



En la Tabla 12 a partir de los datos obtenidos se deduce que, tanto el elevador como el montacargas tienen el mayor rango de frecuencia, esto ocurre debido a que son las alarmas activadas por los vehículos de carga de la planta que se encienden cuando el vehículo está en movimiento. Mientras, los rangos del llamado ANDON y la alarma de incendios tienen rangos muy

próximos, pues estas alarmas se encuentran ubicadas en lugares específicos, a pesar de que se tomaron las mediciones en varios lugares, la frecuencia característica cambia de manera mínima.

Tabla 12

Rango de frecuencias de las señales de alarma

Tipo de Alarma	Rango de Frecuencia
Elevador	980Hz – 1040Hz
Montacargas	3550Hz – 3570Hz
ANDON	2020Hz – 2025Hz
Incendios	1290Hz – 1295Hz

Después del análisis de las señales y el planteamiento de soluciones que ayudan a cumplir los objetivos del dispositivo de asistencia, se propone el entrenamiento del modelo matemático en el software Matlab, para determinar el funcionamiento del sistema. Finalmente, se transfiere el algoritmo planteado en Matlab al software Arduino IDE, debido a que tiene compatibilidad con el microcontrolador ESP32 e incluye librerías que facilitan la programación como la función I2S y FFT, indispensables para lograr que el dispositivo reconozca e identifique alarmas en tiempo real.

Entrenamiento del modelo del sistema

Hoy en día gracias a los avances tecnológicos, se hace más común el uso de ordenadores y softwares matemáticos, para el desarrollo de modelamiento de sistemas. Este desarrollo se basa en tres pasos; la abstracción dedicada a establecer hipótesis, definir variables y desarrollar la matemática adecuada para resolver el problema. La interpretación, que tiene como objetivo simplificar las herramientas matemáticas. Finalmente, el último paso es recopilar nuevos datos y compararlos con las predicciones que se realizaron. Si las predicciones coinciden con la realidad se trata de un sistema robusto y flexible que cumple con la hipótesis y variables planteadas (Gomez, 2009).

Para conocer el comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo es necesario el uso de un ordenador que permite realizar múltiples simulaciones de cualquier modelo matemático. Existen varios programas de cálculo enfocados en cumplir este propósito como Derive, Maple, Mathematica o Matlab (Gomez, 2009). Los programas computacionales utilizan datos y algoritmos para solucionar problemas en elaboración de métodos computacionales. Los mismos que asocian modelos determinísticos y probabilísticos para buscar una solución viable, haciendo uso de métricas y paradigmas que corroboren el correcto desempeño del sistema mediante condiciones estructurales (Giacomantone & Bria, 2020). El uso del software Matlab, ayuda a establecer condiciones para cumplir con el propósito del dispositivo de asistencia, mediante la construcción de un algoritmo de programación basado en el reconocimiento e identificación de señales de alarma.

Sistema modelado en Matlab

El uso del software Matlab tiene gran acogida, al ofrecer soluciones matemáticas a problemas de ingeniería. Las ventajas que ofrece este software es la capacidad de procesamiento de los recursos computacionales, que permiten realizar modelos matemáticos dedicados al ajuste de conjuntos de datos, la construcción y el análisis de gráficas (de Armas & Trujillo, 2017)

Para desarrollar el modelo matemático del dispositivo de asistencia, se realizaron varias acciones previas. La etapa de adquisición, en donde se realizaron grabaciones de las señales de alarma en distintas locaciones, a través de los micrófonos IMNP441 y SPH0645. Estas grabaciones fueron guardadas en archivos con extensión *.wav, en la memoria flash del microcontrolador ESP32. Posteriormente, se pasó a la etapa de reconocimiento e identificación, en donde se hizo uso la función FFT para caracterizar a las señales en función de la frecuencia y amplitud. A fin de establecer un rango de frecuencia en donde las alarmas sean reconocidas tras su activación y

determinar el umbral de amplitud mínimo de las alarmas, para poder identificar entre una señal de alarma y el ruido de la planta.

Una vez realizadas estas etapas, se elaboró un modelo matemático que cumpla con la función de reconocer e identificar las señales de alarmas descritas en la Tabla 4 del Capítulo III. La estructura del modelado del sistema se basa en la lectura del archivo WAVE, la aplicación de la función FFT a la señal ingresada. El reconocimiento entre ruido y la activación de una alarma, estableciendo una condición, si la amplitud registrada es mayor que el umbral mínimo establecido se trata de la activación de una alarma, mientras que, si la amplitud es menor que el umbral se trata de ruido ocasionado por la maquinaria de la planta. Por último, se pasa a la identificación de las alarmas, a través de la caracterización de la frecuencia que tenga mayor amplitud.

Estableciendo cuatro condiciones, si la frecuencia de mayor amplitud se encuentra entre el rango de 980Hz – 1040Hz se trata de la alarma del elevador, 3550Hz – 3570Hz alarma del montacargas, 2020Hz – 2025Hz llamado ANDON, finalmente si la frecuencia de amplitud máxima se encuentra entre 1290Hz – 1295Hz se trata de la activación de la alarma de incendios de acuerdo con la Tabla 12.

Tras elaborar el modelamiento del sistema se pasa a la etapa de entrenamiento, en esta etapa se recopilan nuevas grabaciones de 20 segundos, tanto de la activación de alarmas como de ruido de la planta. A fin de determinar si los nuevos datos se ajustan a las predicciones que se establecieron a través del modelo matemático. Estas pruebas de funcionamiento se realizaron mediante el uso de tablas de verdad.

A continuación, se presentan las tablas de verdad de las pruebas realizadas de las 4 señales de alarmas junto con señales de ruido de la planta en donde se analizan las predicciones del modelo matemático, frente a los nuevos datos. Las grabaciones se realizan en diferentes horas

del día en un total de 15 grabaciones de cada alarma; elevador, montacargas, ANDON e incendios y del ruido ambiente en la empresa.

De las 15 grabaciones de audio realizadas a la alarma en el elevador y a las señales de ruido de la planta en la Tabla 13, se observa que existe un error de identificación en la primera señal del elevador. Debido a que en la frecuencia de 0.23Hz existe una amplitud que llega 0.23V, la amplitud es mayor que la amplitud generada por la alarma del elevador que es de 0.040V. Al analizar la frecuencia con mayor amplitud y que se encuentre en la frecuencia de 0.23Hz, que no pertenece a ninguna señal de alarma se identifica a esta señal como ruido.

Tabla 13

Tabla verdad grabación de 20 segundos alarma elevador

		Real	
		Elevador	Ruido
Estimado	Elevador	14	0
	Ruido	1	15

La Tabla 14, representa las grabaciones de la alarma del montacargas junto con grabaciones de ruido, en donde se observa que ninguna señal de la alarma del montacargas es identificada. Se visualiza que existe frecuencias menores a 200Hz que generan amplitudes mayores que la señal del montacargas, ocasionando que todas estas grabaciones sean reconocidas como ruido.

Tabla 14

Tabla verdad grabación de 20 segundos alarma montacargas

		Real	
		Montacargas	Ruido
Estimado	Montacargas	0	0
	Ruido	15	15

En base a los datos obtenidos de las grabaciones en la Tabla 15, se observa que todas las grabaciones del llamado ANDON, junto con las grabaciones de ruido son identificadas de manera correcta.

Tabla 15

Tabla verdad grabación de 20 segundos alarma ANDON

		Real	
		ANDON	Ruido
Estimado	ANDON	15	0
	Ruido	0	15

En la Tabla 16, de acuerdo con los datos obtenidos se observa que todas las grabaciones de la alarma de incendios son identificadas de manera correcta, de igual forma no existe un error de identificación con las señales de ruido de la planta.

Tabla 16

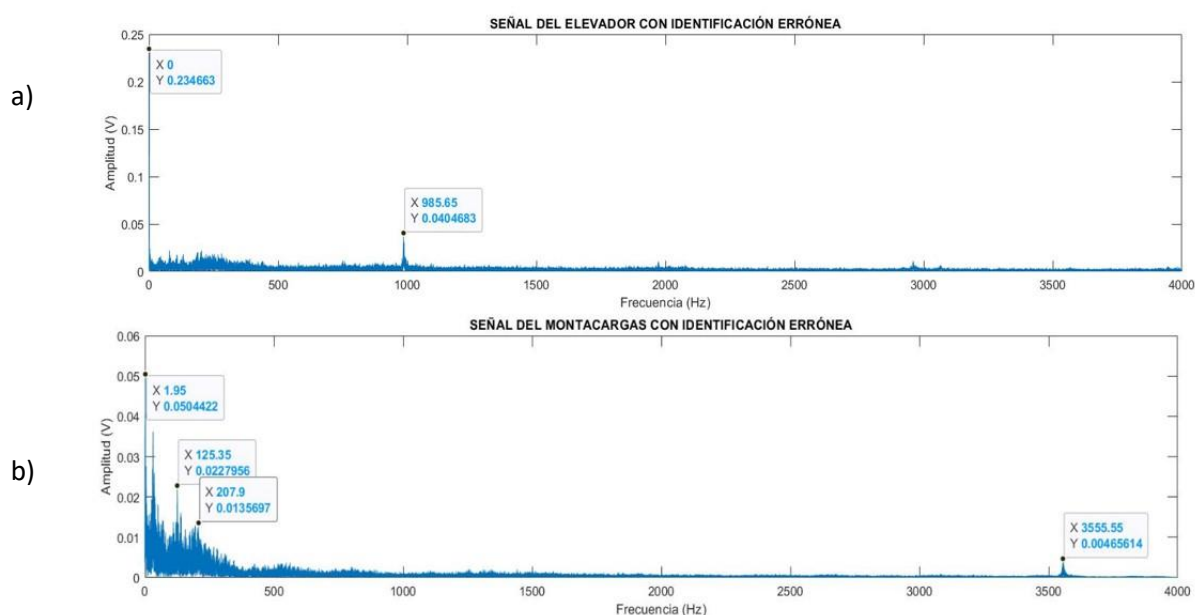
Tabla verdad grabación de 20 segundos alarma incendios

		Real	
		Incendios	Ruido
Estimado	Incendios	15	0
	Ruido	0	15

Del análisis anterior se concluye que para la alarma de incendios y el llamado ANDON el modelo planteado es eficiente, pues reconoce entre el ruido y la activación de estas alarmas. Mientras que, para en las alarmas del elevador y del montacargas ocurre un problema al momento de la identificación pues existe una frecuencia parásita que genera mayor amplitud que las propias alarmas, por lo que se identifican como ruido que se muestra en la Figura 36.

Figura 36

Señales del elevador y montacargas con identificación errónea a) señal del elevador b) señal del montacargas



Como se observa en la Figura 36 en todas las gráficas la frecuencia parásita corresponde a una zona determinada del espectro, por lo que se plantea usar un filtro pasa banda de 500Hz a 4000Hz a fin de eliminar frecuencias indeseables. Esta acción no ocasiona inconvenientes, debido a que el rango seleccionado del filtro agrupa a las frecuencias máximas y mínimas de las cuatro alarmas. Para la construcción del filtro se hace uso de una ventana rectangular que se multiplique con la señal original, a fin de eliminar frecuencias menores a 500Hz y mayores a 4000Hz. Evitando falsos negativos en el reconocimiento e identificación de alarmas y ayudando al sistema con el ahorro de recursos haciendo que la FFT solo trabaje en el intervalo de frecuencias establecido.

Una vez que se implementó el filtro, utilizando una ventana rectangular que elimine frecuencias menores de 500Hz y mayores a 4000Hz se procede a realizar nuevamente las pruebas. Estas pruebas se harán con 5 grabaciones de 1 segundo y 5 grabaciones de 0.5 segundos a fin de conocer el tiempo mínimo necesario para una correcta identificación de las alarmas.

En la Tabla 17, se puede observar que todas las grabaciones que representan la activación de la alarma del elevador son reconocidas después de utilizar el filtro. Además, se constata que en grabaciones de 1 segundo las alarmas son reconocidas.

Tabla 17

Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma elevador

		Real	
		Elevador	Ruido
Estimado	Elevador	5	0
	Ruido	0	5

En la Tabla 18, se puede observar que todas las grabaciones que representan la activación de la alarma del elevador son reconocidas después de utilizar el filtro. Además, se constata que en el tiempo de 0.5 segundos las alarmas son reconocidas.

Tabla 18

Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma elevador

		Real	
		Elevador	Ruido
Estimado	Elevador	5	0
	Ruido	0	5

En la Tabla 19 y Tabla 20 se puede observar que todas las grabaciones que representan la activación de la alarma del montacargas son reconocidas después de utilizar el filtro, junto con las señales de ruido de la planta. Además, se constata que en grabaciones de 1 segundo como en 0.5 segundos las alarmas son reconocidas.

Tabla 19

Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma montacargas

		Real	
		Montacargas	Ruido
Estimado	Montacargas	5	0
	Ruido	0	5

Tabla 20

Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma montacargas

		Real	
		Montacargas	Ruido
Estimado	Montacargas	5	0
	Ruido	0	5

En la Tabla 21 y Tabla 22, se observa que tanto en grabaciones de 1 segundo como en 0.5 segundos las grabaciones del llamado ANDON son identificadas.

Tabla 21

Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma ANDON

		Real	
		ANDON	Ruido
Estimado	ANDON	5	0
	Ruido	0	5

Tabla 22

Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma ANDON

		Real	
		ANDON	Ruido
Estimado	ANDON	5	0
	Ruido	0	5

En la Tabla 23 y Tabla 24 se observa que tanto en grabaciones de 1 segundo como en 0.5 segundos las grabaciones de la alarma de incendios son identificadas.

Tabla 23

Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma incendios

		Real	
		Incendios	Ruido
Estimado	Incendios	5	0
	Ruido	0	5

Tabla 24

Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma incendios

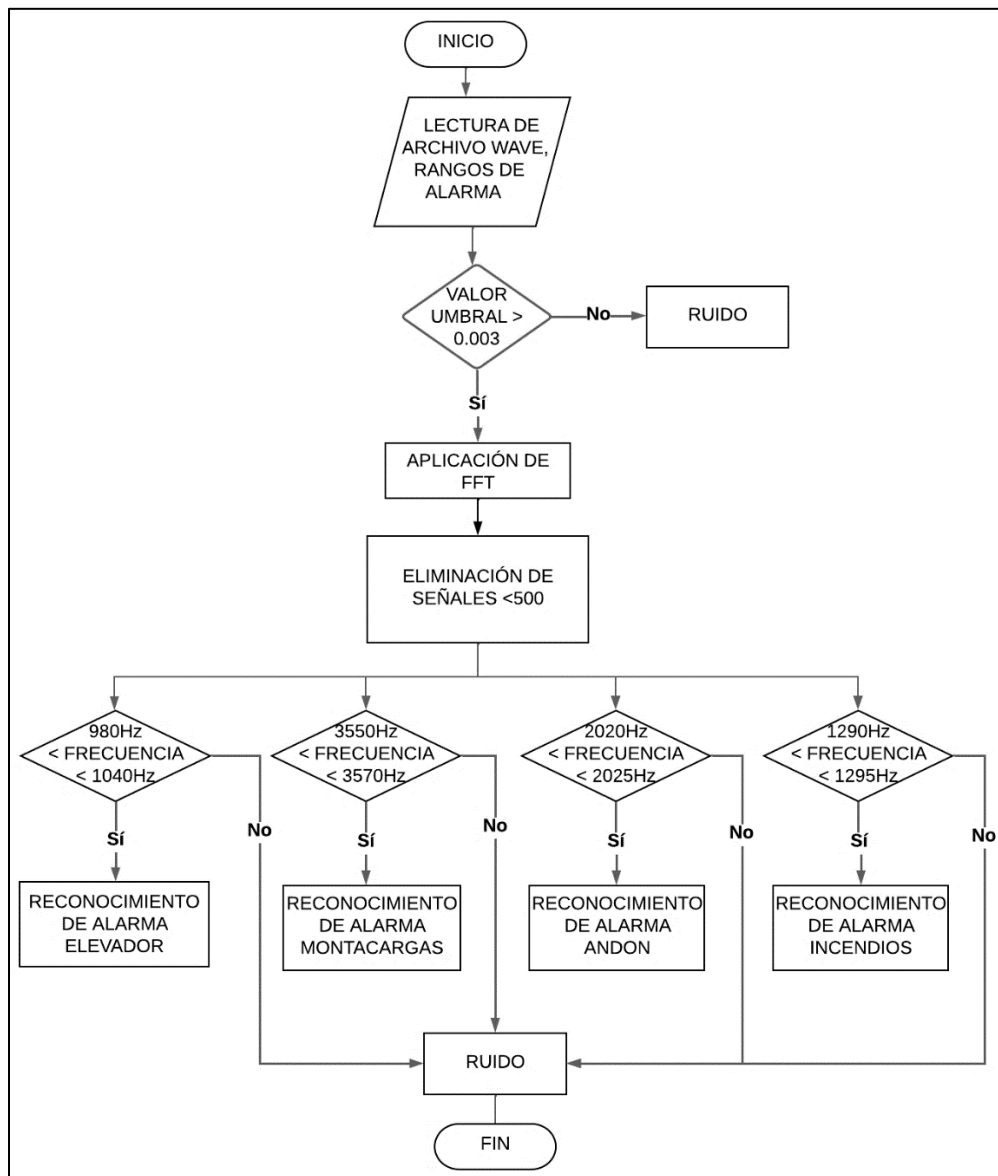
		Real	
		Incendios	Ruido
Estimado	Incendios	5	0
	Ruido	0	5

Una vez analizadas las tablas anteriores se concluye que gracias a la implementación del filtro todas las alarmas son reconocidas e identificadas sin excepción. Además, se comprueba que para un tiempo de 0.5 segundos el programa es capaz de reconocer la alarma, con lo cual se puede establecer un tiempo de muestreo igual o menor a 0.5 segundos.

Tras las pruebas y resultados favorables, se conlleva a deducir que el algoritmo utilizado para el modelamiento del sistema observado en la Figura 37, es el adecuado por lo que se procede a trasladar la lógica de programación al software Arduino debido a su compatibilidad con el microcontrolador ESP32.

Figura 37

Modelo matemático en Matlab



Sistema de identificación de alarma en tiempo real

Los microcontroladores desarrollados por Espressif Systems, permiten la elaboración de diversas aplicaciones tecnológicas, a través de varios entornos de programación como Arduino IDE, Visual Studio, Python, entre otros. Se considerado al software Arduino IDE como uno de los lenguajes de programación más sencillo y amigables con el programador, que tiene como ventaja la incorporación de librerías que simplifican y facilitan el desarrollo de aplicaciones (Ikiss, 2020).

Se ha utilizado el entorno de programación Arduino IDE en aplicaciones de detección de ruido como las mencionadas en (Trujillo, 2020) y (Navarro, 2021). En estas investigaciones se hace uso de librerías como Arduino I2S, para el envío y recepción de datos de audio digital, necesario para la comunicación de los micrófonos MEMS con el microcontrolador (Espressif, 2022). Además, para trabajar con sonidos en el dominio de la frecuencia haciendo uso de la biblioteca de Arduino FFT, en la cual se puede ajustar el número de bits de 16 a 256 para disminuir el costo computacional mediante la compresión de datos de entrada (Perales, 2015).

Para cumplir con el propósito de alertar al operador con sordera sobre la activación de alarmas, se transcribió el modelo matemático planteado en Matlab, al entorno de programación del microcontrolador ESP32 usando la plataforma Arduino IDE. Para el desarrollo del algoritmo se realizaron algunas modificaciones al diagrama de flujo presentado en la Figura 38, con el fin de conseguir que la adquisición y reconocimiento de las señales de alarmas sean en tiempo real. Se hizo uso de la librería Arduino FFT, la cual permite descomponer una señal de sonido en distintas frecuencias durante un periodo de tiempo. Al conocer los rangos de frecuencia que caracterizan a las cuatro alarmas como se observa en la Tabla 4 del capítulo III, y determinar el tiempo mínimo para la detección de las alarmas, demostradas en las pruebas realizadas por el modelo matemático

de Matlab. Se pasa a definir el resto de parámetros necesarios para la usar la librería Arduino FFT que utiliza el algoritmo de la transformada rápida de Fourier.

Con el fin de emplear la librería Arduino FFT se debe establecer la tasa o frecuencia de muestreo, a través del teorema de Nyquist. Este teorema estipula que, para una representación digital exacta de una onda sonora, la frecuencia de muestreo debe ser, al menos dos veces mayor que la frecuencia más alta que se va a registrar (Magroove, 2020). Para establecer este parámetro se debe considerar que la frecuencia de muestreo es el número de mediciones por segundo que los micrófonos van a medir, cuanto más grande sea la tasa de muestreo mayor es el límite de frecuencias que se puede detectar. Debido a que el dispositivo de asistencia va a capturar todos los sonidos audibles por el ser humano, se define que la máxima frecuencia a registrar es de 20kHz. Es por esta razón que se establece que la frecuencia de muestreo sea de 48kHz, que es la frecuencia más utilizada en aplicaciones de audio. Una vez seleccionada la tasa de muestreo, se establece el número de muestras o profundidad de bits. Este parámetro es necesario para definir la precisión de las señales de audio y la potencia informática. Este número determina el rango dinámico de la grabación de audio, un valor más alto representa menor ruido y mayor fidelidad, por lo que se seleccionó $2^{10} = 1024bits$ por muestra.

Luego de definir los parámetros mencionados, se procede a calcular la duración de la medición y la resolución de la frecuencia, para conocer el comportamiento del dispositivo de asistencia. La duración de la medición se calcula dividiendo el número de muestras entre la frecuencia de muestreo, para establecer el tiempo que se demora el programa en tomar todas las muestras requeridas, en este caso la duración es de 21,3 ms. Por otra parte, la resolución de la frecuencia se calcula dividiendo la frecuencia de muestreo entre el número de muestras. En este caso la resolución es de 46,88 Hz, este resultado se interpreta como el espacio entre dos

frecuencias. A este rango de frecuencias se le conoce como contenedores o bins, por lo tanto, bin [0] representa la frecuencia de 0 Hz a 46,88 Hz, bin [1] representa la frecuencia entre 46,88 y 93,76 Hz y así sucesivamente hasta llegar al contenedor bin [512] entre 23.953,12 a 24kHz que es la frecuencia máxima que puede detectar el dispositivo.

Para utilizar la librería Arduino FFT, se toma como entrada una matriz de valores definidos por el número de muestras, los mismos que son utilizados para calcular la energía de la parte real e imaginaria de las señales de audio. De este cálculo se realiza una suma entre las dos partes para definir la energía de cada bin por octava, transformando este dato en frecuencias de ponderación A. Al finalizar este proceso se obtiene una matriz del mismo tamaño de la original que corresponde a las amplitudes de todas las frecuencias en el rango, con el fin de poder detectar la amplitud máxima de una frecuencia en un momento dado.

Al igual que el modelo matemático implementando en Matlab se necesita que la frecuencia máxima sea igual a la frecuencia que caracteriza a cada alarma, por ello es necesario establecer los contenedores en que se encuentran estas frecuencias. Para calcular el contenedor se debe dividir la frecuencia deseada entre la resolución, obteniendo los siguientes datos mostrados en la Tabla 25.

Tabla 25

Rangos de las señales de alarma para ubicar en contenedores

Tipo de alarma	Frecuencia	Contenedor
Elevador	980Hz – 1040Hz	bin [19] – bin [22]
Montacargas	3550Hz – 3570Hz	bin [75] – bin [77]
ANDON	2020Hz – 2025Hz	bin [43] – bin [44]
Incendios	1290Hz – 1295Hz	bin [27] – bin [28]

Sin embargo, al comparar la frecuencia máxima con la frecuencia característica de las alarmas se generan falsos positivos, debido a que existen diversas fuentes de sonido que podrían emitir las mismas frecuencias que las alarmas. Es por esta razón que se implementó una condición para determinar un periodo de tiempo, en el cual se pueda distinguir entre la activación de una alarma y un sonido diferente. Se determinó este periodo de tiempo a través de una cola de datos FIFO de 32 bits de 1 y 0 para cada FFT realizada. Si la frecuencia máxima coincide con la frecuencia requerida, se agrega un 1 a la cola, de lo contrario se coloca un 0. Esta toma de datos se realiza cada 21.3ms, es decir, cada que transcurra este tiempo se coloca un 0 o un 1 dependiendo de la coincidencia entre la frecuencia dominante y la frecuencia de la alarma activada.

Debido a las pruebas realizadas anteriormente, se estableció que el menor tiempo para detectar una alarma es 500 ms, por lo que se considera que la alarma debe sonar por lo menos durante medio segundo para activar el dispositivo de asistencia. Es por esta razón que se estableció que la lectura de la cola FIFO debe presentar veinte 1 seguidos para activar el dispositivo de asistencia, debido a que ha pasado 426ms en los cuales la alarma ha sonado continuamente. El tiempo máximo de cada cola FIFO se calcula multiplicando 32 por la duración de cada muestra, llegando a tener un tiempo total de 639ms.

Adicionalmente, la librería Arduino FFT ofrece varias opciones para establecer un tipo de ventana para suavizar la señal original y calcular la energía de cada frecuencia, lo que es equivalente a realizar una convolución entre las frecuencias de los espectros de la ventana y la señal original de audio. Para este caso se hace uso de la ventana FLAT TOP, debido a que presenta mejor precisión al momento de identificar amplitudes. Esta ventana contiene una banda de paso plana que reduce el tamaño de la amplitud entre los bins, minimizando el error en la medida de la amplitud, llegando a tener un error máximo de 0.1 dB (Serna, 2014). Gracias a esta ventana se

establece la frecuencia con la máxima amplitud registrada en un periodo de tiempo de 639ms, que es el tiempo máximo que se puede almacenar un sonido.

En caso de que el programa no haya encontrado coincidencias entre las frecuencias máximas y las frecuencias características de las alarmas, o que el tiempo de duración del sonido sea menor al preestablecido, el sistema seguirá realizando la lectura de las señales de audio a través del protocolo de comunicación I2S. Para establecer este protocolo de comunicación se hace uso de la librería Arduino I2S, en la cual se deben configurar parámetros como frecuencia de muestreo, profundidad de bits y el número de canales que se van a usar. Para la adquisición de datos del dispositivo de asistencia se realizó una conexión estéreo, es decir, dos micrófonos conectados simultáneamente, por lo que se debe realizar la lectura de los bloques de datos tanto para el canal izquierdo como para el derecho.

Debido a que el dispositivo de asistencia debe funcionar durante toda la jornada laboral del trabajador con discapacidad, se debe garantizar que la batería va a abastecer al sistema durante 8 horas seguidas. Para cumplir con este propósito se debe reducir el costo computacional que ocasiona que la FFT se realice cada 639ms. Es por esta razón que se programa una lectura de datos independiente a la FFT, cada medio segundo, en donde se compara el voltaje enviado desde los micrófonos con los valores determinados con la Tabla 11 que muestra la frecuencia umbral de cada señal de alarma.

El valor umbral establecido es de 0.003V o -46dB, si el valor enviado por los micrófonos es menor al umbral el programa seguirá realizando la lectura de datos. Por otro lado, si el valor sobrepasa el umbral establecido se activará la función FFT. Adicionalmente, al igual que en el algoritmo usado en Matlab se incorporó un filtro pasa altos para eliminar frecuencias menores a

400Hz con el fin de evitar falsos positivos que activen la función FFT y ocasionen pérdida de batería.

Posterior a la programación del modelo en Arduino se realiza la etapa de verificación, para lo cual se realizan 5 pruebas de cada alarma en 1 segundo y 0.5 segundos, a fin de conocer si en estos tiempos el programa realiza una correcta identificación de las alarmas. Estas pruebas se realizan en tiempo real a diferentes horas del día en el que el trabajador se encuentra realizando su jornada laboral. Con el fin de determinar si los datos cumplen con los resultados obtenidos en el modelo de Matlab. Las pruebas de funcionamiento se realizan mediante el uso de tablas de verdad de las señales de alarma; elevador, montacargas, incendios y llamado ANDON.

De las pruebas realizadas en tiempo real de la activación de la señal de alarma del elevador se puede observar en la Tabla 26, que la identificación es correcta en todos los casos. Además, se constata que la alarma se activó durante intervalos de 1 segundo, y el programa fue capaz de reconocer la activación en el rango de frecuencia establecido para alarma del elevador.

Tabla 26

Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma elevador

		Real	
		Elevador	Ruido
Estimado	Elevador	5	0
	Ruido	0	5

En la Tabla 27, se puede observar que la identificación es correcta en todos los casos. Además, se constata que la alarma se activó durante intervalos de 0.5 segundos, y el programa fue capaz de reconocer la activación en el rango de frecuencia establecido para alarma del elevador.

Tabla 27

Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma elevador

		Real	
		Elevador	Ruido
Estimado	Elevador	5	0
	Ruido	0	5

En la Tabla 28 y Tabla 29, se puede comprobar las pruebas realizadas con la señal de alarma del montacargas, en donde el reconocimiento es correcto en todos los casos. Además, se constata que en grabaciones de 1 segundo como en 0.5 segundos las alarmas son reconocidas.

Tabla 28

Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma montacargas

		Real	
		Montacargas	Ruido
Estimado	Montacargas	5	0
	Ruido	0	5

Tabla 29

Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma montacargas

		Real	
		Montacargas	Ruido
Estimado	Montacargas	5	0
	Ruido	0	5

En la Tabla 30 y Tabla 31, se puede observar la correcta identificación del sistema de alarma ANDON el cual se activó en las locaciones de la Tabla 4 del Capítulo III.

Tabla 30

Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma ANDON

		Real	
		ANDON	Ruido
Estimado	ANDON	5	0
	Ruido	0	5

Tabla 31

Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma ANDON

		Real	
		ANDON	Ruido
Estimado	ANDON	5	0
	Ruido	0	5

De las pruebas realizadas con la activación de la señal de alarma de incendios se puede verificar en la Tabla 32 y Tabla 33, que el reconocimiento de la frecuencia es correcto y que no presenta confusiones con otras alarmas como la del elevador que tiene la frecuencia más cercana con 992 Hz a la de incendios de 1350 Hz.

Tabla 32

Tabla verdad grabación de 1 segundo alarma incendios

		Real	
		Incendios	Ruido
Estimado	Incendios	5	0
	Ruido	0	5

Tabla 33

Tabla verdad grabación de 0.5 segundos alarma incendios

		Real	
		Incendios	Ruido
Estimado	Incendios	5	0
	Ruido	0	5

En base a las tablas anteriores se concluye que el algoritmo realizado en Arduino permite la activación el reconocimiento e identificación de la alarma de forma inmediata. Además, el sistema es capaz de reconocer a los distintos tipos de alarma en tiempos de 1 segundo y 0.5 segundos, con lo cual el tiempo de muestreo de 0.6ms funciona adecuadamente. Cabe recalcar

que las pruebas se realizaron de acuerdo con las normas descritas en el reglamento interno de la empresa mencionadas en el capítulo III.

Finalmente, en la Figura 38 y en la Figura 39 se muestra el algoritmo final que permite la adquisición, reconocimiento, identificación y activación de actuadores. Tras la implementación del hardware y software del dispositivo de asistencia se procede a las pruebas del dispositivo colocado en los equipos de protección, para lo que se toma en consideración tiempos de respuesta, distancia, duración de la batería y ergonomía del sistema.

Figura 38

Diagrama de flujo etapa de adquisición del sistema de reconocimiento e identificación de alarmas

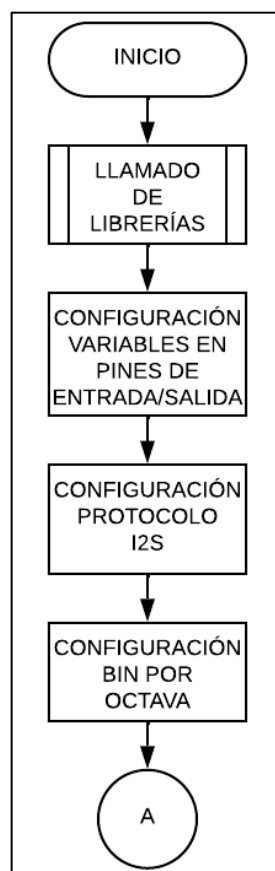
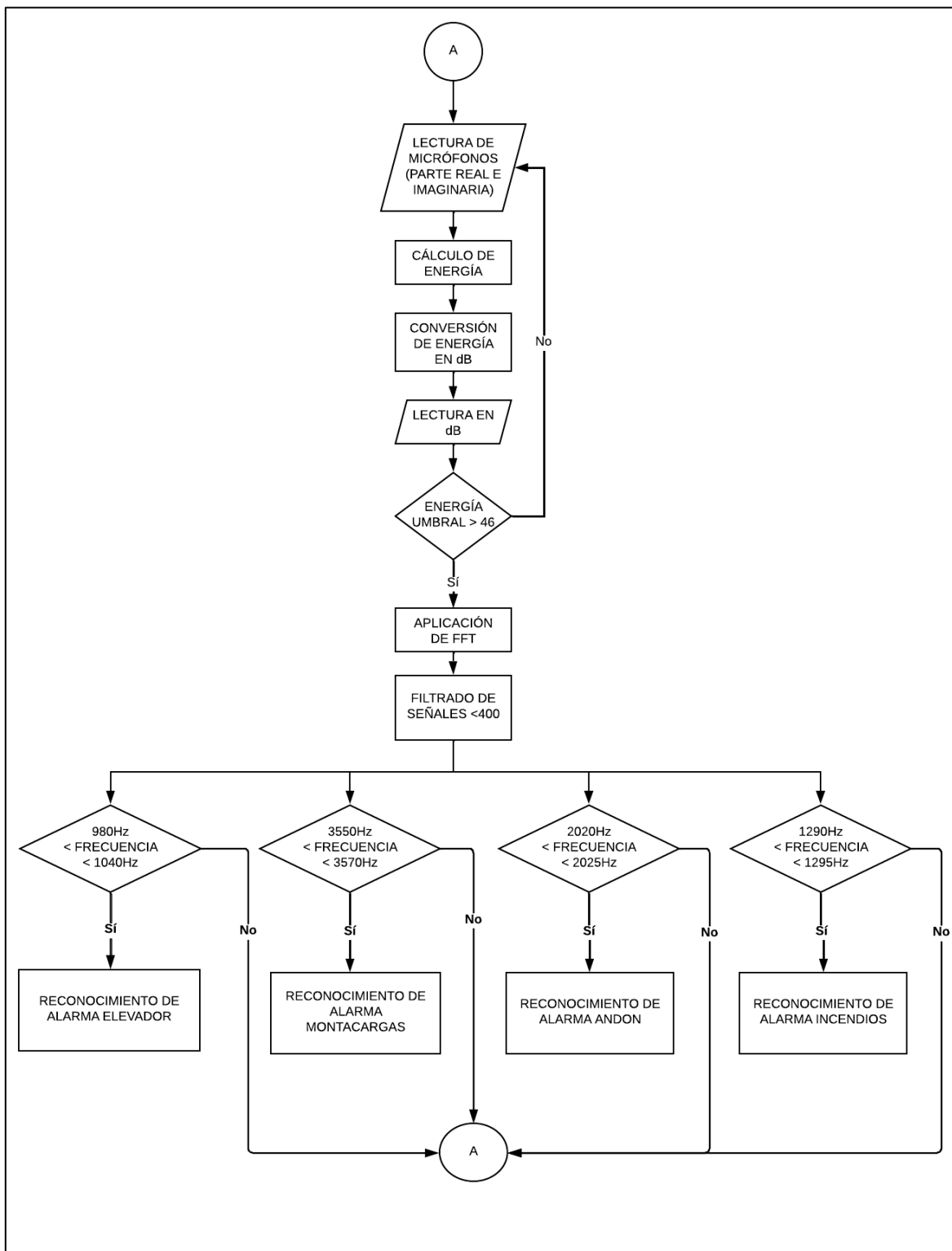


Figura 39

Diagrama de flujo del sistema de reconocimiento e identificación de alarmas



Capítulo V. Pruebas y Resultados

Introducción

Hoy en día disponer de un empleo supone desempeñar un rol socialmente valorado, que ayuda al crecimiento personal de los individuos. Debido a esta razón, se han formulado varias leyes que favorecen la contratación de personas con discapacidad, como se menciona en el capítulo II. Actualmente, existen proyectos de inserción laboral a personas con discapacidad, dirigidos a empresas que tienen como propósito generar entornos de trabajo con las mismas condiciones de horarios, tareas y sueldos que los trabajadores sin discapacidad (Calleja, 2016). En el presente escrito, se desarrolla una solución tecnológica para ayudar a este propósito.

Gracias a los continuos avances tecnológicos, la brecha laboral entre las personas con discapacidad y el resto de la sociedad ha ido disminuyendo. Debido a tecnologías de asistencia (TA), que son dispositivos empleados para mejorar la independencia de personas con discapacidad ante tareas cotidianas (Centro Nacional de Defectos Congénitos y Discapacidades del Desarrollo, 2020). La solución tecnológica desarrollada en el presente proyecto de titulación, fomentando el crecimiento personal y autónomo de un trabajador con discapacidad auditiva posibilitando la igualdad de oportunidades con el resto. Mediante un dispositivo de asistencia capaz de advertir sobre la activación de alarmas que pongan en riesgo su integridad física y su desempeño laboral como se mencionó en capítulos anteriores.

En el presente capítulo se describe la forma en que se debe utilizar el dispositivo de asistencia, junto con especificaciones y recomendaciones que ayuden al operario a manipular el dispositivo de manera correcta y eficiente. Adicionalmente, se muestran los resultados del análisis de los datos obtenidos en diferentes pruebas de desempeño, diseño e implementación. Estos

resultados muestran el comportamiento del dispositivo ante situaciones cotidianas que vive el trabajador con discapacidad auditiva. Además, se destaca el cumplimiento de los objetivos ergonómicos del dispositivo, teniendo en cuenta los comentarios del trabajador al que está dirigido el dispositivo.

Indicaciones generales del dispositivo de asistencia

Las tecnologías inclusivas y productos de apoyo tecnológico ofrecen facilitar tareas, a fin de mejorar la calidad de vida de personas con discapacidad. El uso de estas tecnologías ha generado un gran impacto en el acceso a empleos, debido a que favorecen la participación, comunicación y autonomía laboral de personas con discapacidad (Gil, 2022). Las tecnologías de asistencia no solo benefician a para personas con discapacidad, sino también a empleadores que buscan ofrecer entornos de trabajo adecuados y cumplir las leyes de contratación a personas con discapacidad (NIH, 2019).

Los dispositivos de asistencia buscan adaptar tecnologías particulares a necesidades específicas, haciendo dispositivos fáciles de usar e intuitivos. Para el desarrollo de tecnologías de asistencia se toma en consideración la accesibilidad y usabilidad de las herramientas empleadas debido a que se busca una comunicación clara y sencilla. Una de las herramientas mayormente empleadas en la construcción de estos dispositivos son las adaptaciones tecnológicas o gadgets. Los cuales busca la inclusión socio laboral de personas con discapacidad, a fin de eliminar barreras físicas en entornos laborales. Existen varios ejemplos de adaptaciones tecnológicas para contrarrestar problemas como mesas regulables, lectores de pantalla, intérpretes de lengua de signos, entre otras (Gil, 2022).

Para el dispositivo de asistencia desarrollado en el presente proyecto, se tomaron varias consideraciones para cumplir con los objetivos de tecnología de inclusión intuitivo para el usuario. Es por esta razón que se empleó el concepto de diseño universal para simplificar la utilización, comunicación y entorno físico del dispositivo, a fin de que sea más fácil de usar por la mayor cantidad de personas posibles. Existen siete principios para que un dispositivo sea considerado como un diseño universal; uso equiparable, es decir, útil y comercializable. Debe tener un diseño flexible, capaz de adaptarse a necesidades y capacidades específicas. Además, debe ser simple e intuitivo, con información perceptible y tolerancia a errores evitando peligros o consecuencias nocivas. Finalmente, estos dispositivos deben ser cómodos y con un tamaño adecuado y proporcional para su manipulación (Centro Nacional de Defectos Congénitos y Discapacidades del Desarrollo, 2020). Tomando en consideración los principios mencionados, se describe a continuación la manera de utilizar el dispositivo de asistencia, junto con especificaciones y recomendaciones para su correcto funcionamiento.

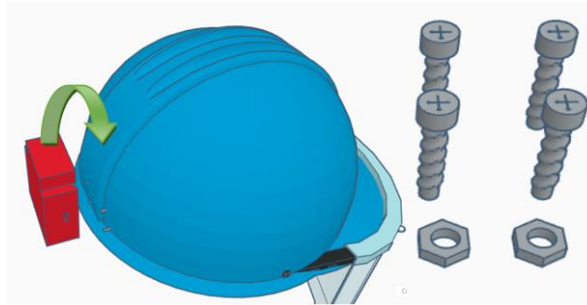
A fin de cumplir con las medidas de seguridad recomendadas por la empresa DANA Transejes Ecuador, se colocó el dispositivo en el casco de seguridad del operario. Esta ubicación fue previamente seleccionada debido al cumplimiento de características como seguridad y ergonomía, como se detalló en el Capítulo III. El dispositivo de asistencia no genera peso adicional al casco de seguridad, por lo que el operario debe colocarse el casco con normalidad. Sin embargo, se recomienda que el motor vibrador colocado en la banda de sudor, este en contacto directo con la frente del usuario. En el caso de que el motor vibrador no esté en contacto con la piel, se debe manipular el torniquete que se encuentra detrás del casco de seguridad para regular el tamaño del mismo, como se observa en la Figura 40.

Figura 40

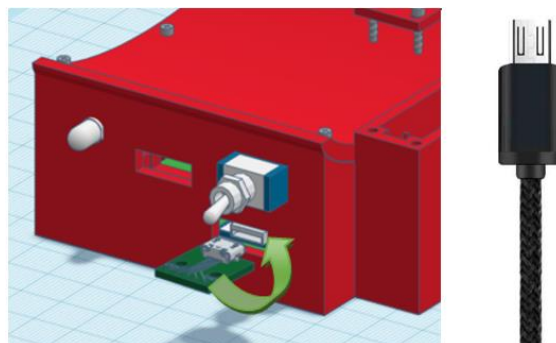
Representación para ajustar el casco de protección



El dispositivo de asistencia cuenta con varios elementos electrónicos que facilitan la manipulación y entendimiento del sistema. A continuación, se da un instructivo detallado de las funciones que tiene cada elemento que integra el dispositivo de asistencia, a fin de precautelar la seguridad del operario y hacer que el dispositivo sea intuitivo y fácil de utilizar. El dispositivo de asistencia está empotrado al casco de seguridad, por lo que tiene la capacidad de ser retirado y colocado en un nuevo casco, en caso de ser necesario. La colocación del dispositivo es a través de tornillos diseñados a la medida del dispositivo, como se observa en la Figura 41.

Figura 41*Representación de carcasa con tornillos*

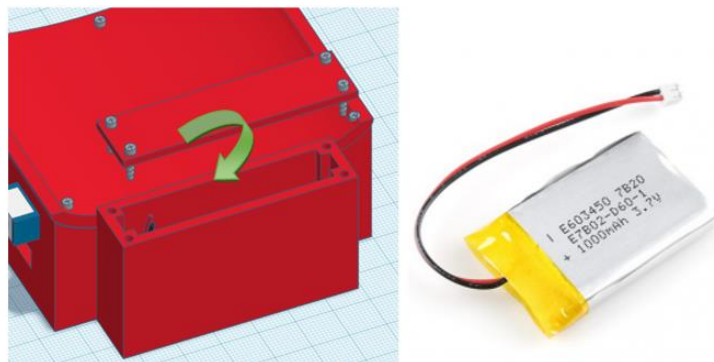
Con el objetivo de lograr que el dispositivo sea portable y liviano, se hizo uso de baterías de litio para alimentar a los componentes eléctricos empleados en el sistema. Al igual que el resto de baterías, estas se descargan dependiendo su uso. Por lo que se recomienda cargar la batería después de la jornada laboral del operario. Tras varias pruebas se ha comprobado que el dispositivo funciona correctamente durante 10 horas seguidas, luego de este tiempo la batería no satisface la corriente requerida por el microcontrolador, que al realizar varias funciones de manera simultánea consume gran cantidad de energía. Para cargar la batería se debe usar un cable micro USB, como se observa en la Figura 42, y conectarlo en la abertura inferior del lado derecho del dispositivo. Adicionalmente, se recomienda que no se sobrecargue la batería.

Figura 42*Representación de carga del dispositivo*

Como se mencionó la batería de litio es recargable, sin embargo, tiene un tiempo de vida de 5 años. Es por esta razón que, pasado este tiempo o cuando la batería empiece a presentar problemas para energizar al circuito, es recomendable cambiar de batería. Es indispensable que la batería nueva que se va a colocar sea de 3,7V y 1000mA, pues es la corriente y voltaje que abastece a todos los componentes del sistema. Para cambiar la batería se debe retirar el dispositivo del casco y abrir el compartimento de la batería como se observa en la Figura 43, conectando los cables correspondientes, rojo VCC y negro GND.

Figura 43

Representación de ubicación de la batería

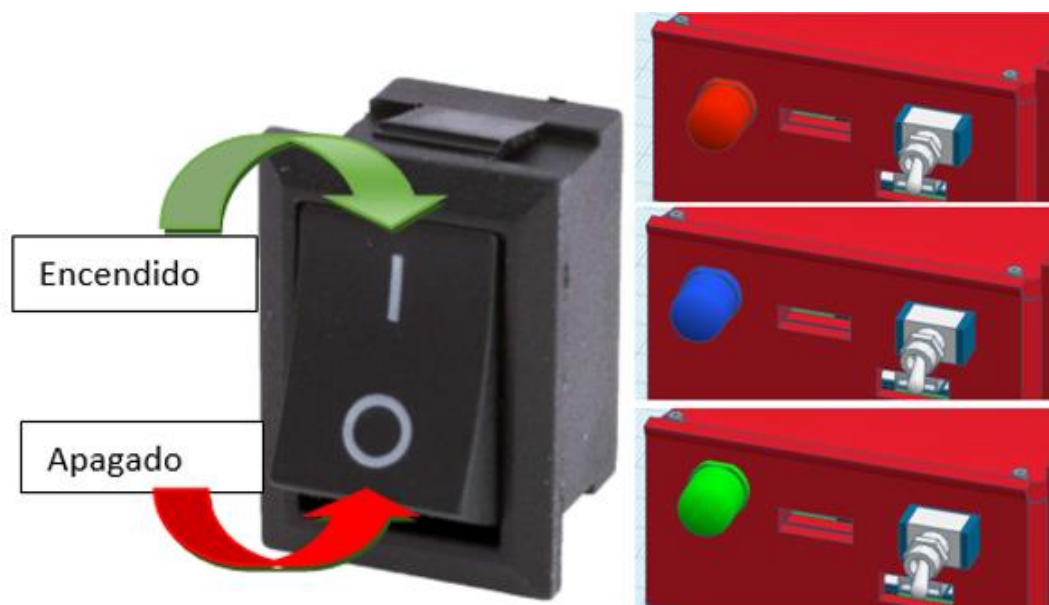


Además, el dispositivo de asistencia cuenta con un interruptor que sirve para encender o apagar el equipo, como se puede observar en la Figura 44. Junto al interruptor hay un led que indica el estado en que se encuentra el dispositivo. Si se enciende el color verde significa que el dispositivo está encendido y funcionando con normalidad. Mientras que, el color azul indica que no se pudo establecer el protocolo I2S necesaria para la comunicación entre el microcontrolador y los micrófonos. Cuando el color azul se activa, se debe reiniciar el sistema. Finalmente, el color rojo representa que la energía entregada por la batería no satisface las necesidades de los componentes electrónicos, por lo que es necesario cargar o reemplazar la batería. Se recomienda

al operador que apague el dispositivo cuando haya terminado su jornada laboral o cuando no esté usando el dispositivo.

Figura 44

Representación de modo de encendido del dispositivo



Debido a que el objetivo del dispositivo de asistencia es reconocer e identificar las señales de alarma, se ha colocado una luz en la pantalla de protección facial para indicar al operador que alarma se ha activado. Este estímulo visual es a través de un led RGB, que tiene la capacidad de cambiar su color. De la Figura 45 cuando se enciende el color azul significa que se han detectado las alarmas generadas por vehículos móviles como el montacargas o el elevador. Al activarse este color el operario debe asegurarse de estar a una distancia segura, en la normativa interna de la empresa esta distancia es de 60 centímetros. El color verde por otro lado, representa el llamado ANDON que alerta al operario sobre alguna anomalía en la producción de la fábrica, debido a defectos o falta de material. Por último, el color rojo se enciende cuando la alarma de incendios se

ha activado, dando a conocer al trabajador con discapacidad auditiva que debe dirigirse a las salidas de emergencia de la planta debido a algún tipo de incendio.

Figura 45

Representación de la activación de alarmas del dispositivo de asistencia

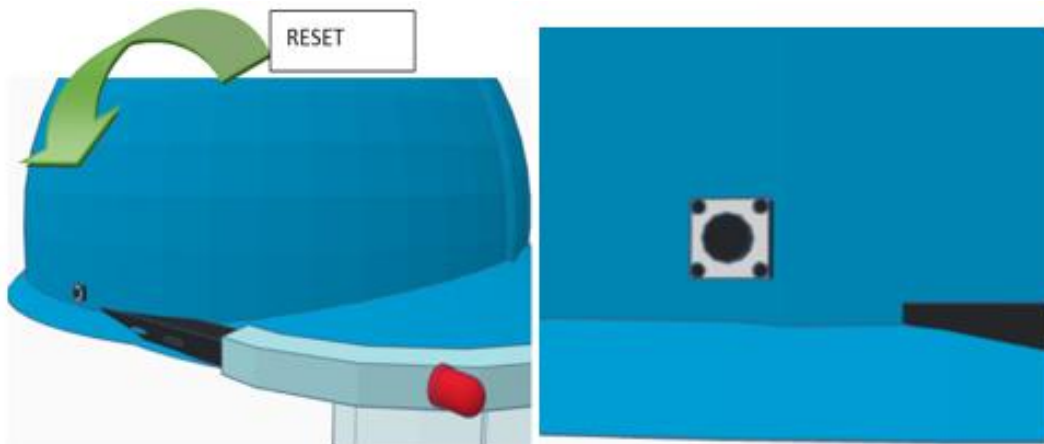


Adicionalmente, el dispositivo de asistencia cuenta con un botón de Reset, como se observa en la Figura 46. El botón de Reset sirve para desactivar el motor vibrador y la luz indicadora, siempre y cuando el operario haya identificado la alarma y ejercido la acción correspondiente para cada situación. Cabe mencionar que mientras la alarma siga sonando se

volverán a activar los actuadores correspondientes a cada alarma, debido a que sigue siendo un potencial riesgo para el operario. El botón de Reset se encuentra al lado izquierdo del casco de seguridad.

Figura 46

Representación del botón Reset



Para evitar daños en el dispositivo, se debe seguir las siguientes recomendaciones; evitar golpes fuertes o caídas de gran altura. A pesar de que el material con el que se realizó la carcasa del dispositivo es fuerte y anticorrosivo, se puede llegar a romper y como consecuencia dañar los materiales eléctricos que se encuentran dentro de él. Se recomienda evitar lugares llenos de polvo, pues al tener aberturas tanto para los micrófonos como para el cargador de la batería, se puede correr el riesgo de que el polvo cause fallas en el sistema. Adicionalmente, se recomienda evitar la manipulación de los actuadores del sistema, tanto el led RGB como del motor vibrador y el Reset del casco de seguridad, pues al estar interconectados con el dispositivo se pueden llegar a desconectar. Finalmente se debe evitar mojar el dispositivo, debido a que puede ocasionar un corto circuito como se observa en la Figura 47.

Figura 47

Representación de las recomendaciones para el dispositivo de asistencia



Una vez que se han detallado las indicaciones necesarias para usar el dispositivo de asistencia y las recomendaciones que se debe seguir para evitar que el dispositivo se dañe, se procede a realizar las pruebas necesarias para evaluar el correcto funcionamiento del dispositivo y el cumplimiento de los principios de diseño universal.

Pruebas y resultados

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo del presente proyecto de titulación está basado en ofrecer una solución tecnológica, ante las necesidades laborales de un trabajador con discapacidad auditiva en un entorno industrial. El propósito del dispositivo de asistencia es equiparar las condiciones laborales del trabajador con discapacidad y brindar autonomía, a fin de que pueda reaccionar ante situaciones de riesgo como la activación de distintas alarmas como se menciona en la Tabla 4 del capítulo III.

Con el propósito de cumplir los objetivos planteados, se realizaron varias pruebas. Estas pruebas fueron ejecutadas en la empresa DANA Transejes Ecuador, a partir del 19 de enero hasta el 30 de enero del 2023. Las pruebas fueron clasificadas en dos tipos; desempeño y diseño ergonómico del dispositivo. Las primeras pruebas se basan en evaluar el funcionamiento del dispositivo de asistencia, considerando características como: tiempo de respuesta, duración de la batería y distancia en la que el dispositivo detecta las señales de alarma. La segunda fase de pruebas consiste en evaluar los principios de diseño universal para definir al dispositivo como fácil de usar e intuitivo para la mayor cantidad de personas posibles. Es por esta razón que el casco junto con el dispositivo de asistencia fue utilizado por 7 personas entre ellas el gerente de la compañía, el jefe de departamento de ingeniería, el coordinador de seguridad industrial, el coordinador del departamento de talento humano, el operario con discapacidad auditiva al que está dirigido el proyecto y los responsables del desarrollo del dispositivo de seguridad, obteniendo los resultados que se presentan a continuación.

Pruebas de desempeño

La primera sección de pruebas consiste en evaluar el desempeño del dispositivo de asistencia. Para asegurar que cada componente eléctrico que lo conforma está trabajando correctamente, y que el sistema en conjunto está funcionando de acuerdo con los requerimientos preestablecidos y cumpliendo los objetivos específicos planteados.

Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta es un factor importante que se debe considerar, pues es el tiempo mínimo que tiene el operario de reaccionar frente a situaciones que pongan en riesgo su vida. Como en el caso de la activación de la alarma de incendios o el acercamiento de un vehículo móvil de carga como el elevador o montacargas. Es por esta razón, que se desarrolló el algoritmo de programación con el objetivo de cumplir que el tiempo de respuesta sea lo más corto posible. La duración de la medición de frecuencias es de 64,2 milisegundos en detectar una alarma de acuerdo con lo establecido en el Capítulo IV. Debido a varios factores como la intensidad del tono y la distancia de la alarma, el tiempo de respuesta puede variar, por lo que se ha realizado pruebas para evaluar el comportamiento del dispositivo de asistencia como se observa en la Tabla 34.

Los datos fueron obtenidos forzando las alarmas a distintas horas del día y en diferentes locaciones de la planta. En total se realizaron 24 pruebas por cada alarma para detectar el tiempo de respuesta de las mismas. Estas pruebas fueron realizadas en un total de 2 días laborales, con la intervención de distintas personas entre ellas el operador con sordera.

Tabla 34*Pruebas del tiempo de respuesta*

Tipo de alarma	Tiempo promedio			Observación
	0,6s	1,0s	1,2s	
Elevador	X			Ninguna
Montacargas		X		Debido al bajo sonido que ejerce la alarma del montacargas el tiempo promedio en detectar esta frecuencia es mayor. Sin embargo, el tiempo de respuesta es un segundo por lo que es apropiado.
ANDON	X			Ninguna
Incendios	X			Ninguna

En la Tabla 35 se muestran los nuevos resultados de las pruebas de tiempo de respuesta, fueron realizadas únicamente por el operador en un día de trabajo normal, es decir, sin forzar las alarmas. Cabe mencionar, que el operador pasa mayor tiempo de su jornada laboral en el área de almacén donde el ruido de la planta es menor. Adicionalmente, estas pruebas fueron realizadas en un total de 3 días laborales.

Tabla 35*Pruebas del tiempo de respuesta en el operario*

Tipo de alarma	Tiempo promedio			Observación
	0,6s	1,0s	1,2s	
Elevador		X		Existió un falso positivo en la detección del elevador y montacargas. Debido a que en la empresa se encontraba una grúa, cuya alarma ejercía la misma frecuencia del elevador o montacargas. Sin embargo, esta acción favorece al dispositivo de asistencia pues fue capaz de advertir al operador sobre un peligro latente.
Montacargas		X		Ninguna
ANDON		X		Ninguna
Incendios	-	-	-	No se activó la alarma de incendios.

A partir de los datos de la Tabla 34, se puede deducir que el dispositivo de asistencia cumple con el objetivo de corto tiempo de respuesta, con un tiempo promedio de 1,0 segundo. Adicionalmente, se constató que el dispositivo no tuvo ningún falso negativo, es decir, reconoció todas las alarmas, ayudando al operario a reaccionar frente a las situaciones cotidianas de su día de trabajo. Como se mencionó en la Tabla 35, existió un evento fuera de lo normal, con la llegada de un proveedor a la planta, el cual llevaba consigo una grúa. El dispositivo fue capaz de detectar la alarma generada por la grúa, debido a que tiene la misma frecuencia característica que el montacargas o elevador. Esta acción favorece al operario, pues fue capaz de reaccionar frente a

una situación de riesgo. A continuación, en la Figura 48 se indica una foto del operador cuando el dispositivo detectó la alarma de la grúa.

Figura 48

Prueba del tiempo de respuesta con el trabajador



Distancia mínima y máxima de detección

A fin de precautelar la integridad del operario con discapacidad auditiva, se debe establecer un mínimo de distancia de 60 cm, en la cual el dispositivo sea capaz de detectar la activación de las alarmas generadas por los vehículos móviles como el elevador y el montacargas. Es por esta razón que se realizaron pruebas para seleccionaron la configuración de micrófonos, que presente mayor sensibilidad ante perturbaciones. A continuación, en la Tabla 36, se describen los datos obtenidos de las pruebas realizadas, obtenidos forzando las alarmas en distintas horas del día, a diferentes distancias. En total se realizaron 5 pruebas por cada alarma para detectar la distancia máxima en que el dispositivo es capaz de detectar las cuatro alarmas. Estas pruebas fueron realizadas en un total de 2 días laborales, con la intervención de distintas personas entre ellas el operador con sordera.

Tabla 36*Pruebas de distancia mínima y máxima de detección*

Tipo de alarma	Distancia [metros]				Observación
	0,6	2,0	3,0	5,0	
Elevador	X	X	X		La alarma del elevador se activa cuando el vehículo está en movimiento.
Montacargas	X	X			La alarma del montacargas se activa cuando el vehículo está en movimiento.
ANDON	X	X	X		La alarma generada por el llamado ANDON es fija y se encuentra en la mitad de la planta.
Incendios	X	X	X	X	La alarma de incendios es fija y se encuentra localizada en la mitad de la planta.

De los datos obtenidos al analizar la Tabla 36, se deduce que la alarma de incendios es la que genera más ruido, es por esta razón que es detectada a mayor distancia. Mientras que la alarma del montacargas, es la que genera menos intensidad al momento de su activación. Pese a esto, la mayor distancia en que el dispositivo puede detectar la alarma del montacargas es 2 metros. Por otro lado, la alarma del elevador se puede detectar hasta 3 metros de distancia, llegando a cumplir con los requerimientos establecidos en las normas internas de la empresa, sobre la distancia mínima en que una persona puede estar cerca del montacargas o elevador. En la Figura 49, se observa la activación del dispositivo frente a la alarma del elevador, a una distancia de 2 metros.

Figura 49

Pruebas de distancia mínima y máxima de detección con el trabajador



Duración de la batería

Para que el dispositivo de asistencia sea portable y pueda ser usado en la jornada laboral del operario con discapacidad, se debe asegurar que la batería puede abastecer de energía al dispositivo de asistencia por un mínimo de 8 horas sin interrupciones. Las pruebas para determinar el tiempo de duración de la batería, se realizaron dejando prendido el dispositivo hasta que se encienda la luz roja, que indica que la batería debe ser cargada.

De las pruebas para establecer la duración de la batería fueron realizadas por el trabajador con discapacidad, el cual realizó sus tareas diarias, de manera normal usando el casco con el dispositivo encendido. La batería pudo abastecer al dispositivo de asistencia por 10 horas seguidas, en este tiempo el operador culminó su jornada laboral y al día siguiente pudo usar el casco por aproximadamente dos horas más. El tiempo para cargar por completo la batería es de 2 horas. Por lo se recomienda a la empresa, que no sobrecarguen la batería pues puede ocasionar que el tiempo de vida de la misma disminuya.

Al realizar las pruebas de duración de la batería, se puede constatar que el dispositivo funciona sin necesidad de carga, durante las 8 horas que dura la jornada laboral del operario con

discapacidad. Se recomienda al operario que, al finalizar su turno o cuando no use el casco, apague el dispositivo, a fin de evitar gastos innecesarios en la batería. El tiempo de duración de la batería dependerá del número de veces en que se active la FFT para detectar las frecuencias. Adicionalmente, se recomienda que no se sobrecargue la batería pues puede acortar el tiempo de vida de la misma. Por lo que se pide a la empresa que al pasar el tiempo de 2 horas de carga se desconecte el cargador. A continuación, en la Figura 50 se observa la activación del color rojo, que representa que la batería necesita ser cargada.

Figura 50

Pruebas de duración de la batería con el operario



Pruebas ergonómicas

Una vez que se culminaron las pruebas de funcionamiento, se pasa a realizar las pruebas de ergonomía que informan sobre la usabilidad y adaptación del equipo con el entorno de trabajo. Para ello se realizó una encuesta a cinco personas que usaron el dispositivo entre ellas el gerente de la compañía, el jefe de departamento de ingeniería, el coordinador de seguridad industrial, el coordinador del departamento de talento humano y el operario con discapacidad auditiva al que

está dirigido el dispositivo. La encuesta está basada en preguntas cerradas de sí y no, para conocer la medida en que se cumplieron los siete principios de diseño universal mencionado anteriormente de los cuales se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 37.

Tabla 37

Resultados de pruebas ergonómicas de la encuesta realizada en la empresa DANA

Pregunta	SI	NO
<p>¿El dispositivo de asistencia es de uso equiparable? Esta pregunta está basada en el principio de diseño útil y comerciable, es decir, que el dispositivo pueda ser usado en distintos entornos.</p>	5	0
<p>¿El dispositivo de asistencia es flexible? Esta pregunta se refiere a que el dispositivo sea capaz de adaptarse a diversas gamas preferenciales y capacidades especiales de diferentes individuos.</p>	5	0
<p>¿El dispositivo de asistencia es simple e intuitivo? Esta pregunta evalúa si diseño del dispositivo es fácil de entender, independientemente de la experiencia, los conocimientos o el nivel de concentración del usuario, es decir, las instrucciones son claras y sencillas.</p>	5	0
<p>¿El dispositivo informa sobre la activación de alarmas de manera perceptible? Esta pregunta se refiere a que, si la información aportada por el dispositivo de asistencia comunica de forma eficaz al usuario, independientemente de las condiciones actuales de iluminación o ruido, sobre la activación de las alarmas.</p>	5	0
<p>¿Cree usted que el dispositivo de asistencia minimiza peligros? Esta pregunta hace referencia a que el diseño tenga tolerancia de errores, es decir, el dispositivo es capaz de minimizar riesgos o consecuencias perjudiciales tanto para la salud del usuario como para su desempeño laboral.</p>	5	0
<p>¿Cree usted que usar el dispositivo genera esfuerzo físico? Esta pregunta está basada en la comodidad del usuario frente al dispositivo, debido a que es un implemento que se debe colocar todos los días, las 8 horas de jornada laboral, por lo que no debe ocasionar fatiga.</p>	5	0

Pregunta	SI	NO
¿Cree usted que el tamaño del dispositivo de asistencia es adecuado? Esta pregunta junto con la anterior evalúa la comodidad del usuario, por lo que se pregunta si el tamaño y espacio son adecuados para manipular el dispositivo.	5	0
¿El dispositivo de asistencia es de uso equiparable? Esta pregunta está basada en el principio de diseño útil y comerciable, es decir, que el dispositivo pueda ser usado en distintos entornos.	5	0
¿El dispositivo de asistencia es flexible? Esta pregunta se refiere a que el dispositivo sea capaz de adaptarse a diversas gamas preferenciales y capacidades especiales de diferentes individuos.	3	2

Como se puede observar de los resultados de la Tabla 37, todas las personas encuestadas afirmaron positivamente en las seis primeras preguntas sobre las características ergonómicas del dispositivo. Debido a que puede ser llevado a diversos entornos industriales generando mayor contratación a personas con discapacidad pues genera autonomía laboral, ante situaciones de riesgo. Además, es un dispositivo flexible ya que puede ser usado por una persona sordo ciega, y aun así identificar que se ha activado una alarma. En donde el dispositivo es capaz de minimizar riesgos o consecuencias perjudiciales tanto para la salud del usuario como para su desempeño laboral. Adicional, se indica que el diseño del dispositivo es fácil de entender, independientemente de la experiencia, los conocimientos o el nivel de concentración del usuario, es decir, las instrucciones son claras y sencillas. Finalmente, se menciona que el dispositivo no es pesado y no causa fatiga o incomodidad al momento de ser usado. Cabe recalcar que esta encuesta se realizó al operario al que está dirigido el dispositivo de asistencia después de haber pasado varios días usando el casco de seguridad junto con el dispositivo de asistencia.

Por otro lado, en la última pregunta observar dos personas de las cinco encuestadas, manifestaron que el tamaño de la carcasa no es el adecuado pues al momento de cambiar la batería resulta incómodo, por su pequeño tamaño. Adicionalmente, expresaron que el botón de

Reset es pequeño y en ocasiones es difícil de encontrar. Cabe mencionar que estas respuestas no fueron obtenidas de la encuesta realizada al operador con discapacidad, pues el menciona que el tamaño del dispositivo es adecuado.

Después de haber analizado los resultados obtenidos de las pruebas realizadas tanto en desempeño como en comodidad y usabilidad del dispositivo de asistencia, se concluye que se han cumplido de manera favorable los objetivos planteados. Adicionalmente, se hace entrega del dispositivo de asistencia a la empresa DANA Transejes Ecuador, el 31 de enero del 2023. El mismo que fue considerado como un proyecto tecnológico inclusivo dirigido a personas con discapacidad, que deseen trabajar en empresas industriales de manera autónoma y en entornos laborales libres de riesgos. En el apartado de apéndice se encuentra la carta de conformidad proporcionada por de la empresa DANA Transejes Ecuador, en donde aceptan el dispositivo de asistencia y constatan el trabajo realizado.

Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones

La elaboración del dispositivo de asistencia descrito en el presente proyecto de titulación, está basado en mejorar el desempeño laboral de una persona con discapacidad auditiva. Según datos obtenidos por la OMS, se estima que más del 5% de la población del mundo presenta algún grado de pérdida auditiva, ocasionando que las personas afectadas por esta limitación les sea más complicado conseguir una fuente estable de trabajo. A fin de eludir esta brecha laboral, se han realizado proyectos y leyes enfocadas a la responsabilidad empresarial, las cuales gestionan la contratación de personas con discapacidad.

En Ecuador el Ministerio de Trabajo es la organización que rige la contratación de personas con discapacidad, a través de la Ley Orgánica de Discapacidad. Esta ley estipula que, por cada veinticinco trabajadores, la empresa está obligada a contratar al menos a una persona con discapacidad. Además, la empresa debe ofrecer entornos de trabajo libre de riesgo, aseverando que la persona calificada con discapacidad posea los mismos derechos que los empleados que no posean algún impedimento discapacitante. Estas acciones se cumplen mediante el uso de reglamentos de seguridad industrial y planes preventivos para evitar accidentes laborales.

Las normativas de seguridad y salud laboral son mecanismos internos de cada empresa, enfocados en realizar planes de acción, manuales y protocolos dedicados a cubrir las necesidades particulares de cada sector industrial. Estos mecanismos son empleados para prevenir enfermedades ocupacionales y accidentes laborales, a fin de salvaguardar la vida e integridad de los empleados. Según datos obtenidos por la Superintendencia de Riesgos del Trabajo las principales formas de lesiones a personas que trabajan en sectores industriales son golpes o choques por objetos móviles. Para prevenir estos accidentes se colocan sistemas de alarmas que alerten al personal de forma sonora o visual, sobre algún siniestro que ponga en riesgo su vida

como el acercamiento de vehículos móviles de carga o para informar sobre alguna anomalía en su entorno de trabajo. Además, para evitar golpes o traumatismos por caída de materiales o maquinaria se hace uso de equipos de protección individual (EPI), para proteger distintas partes del cuerpo de los trabajadores.

El cumplimiento de las acciones mencionadas, genera ambientes de trabajo más óptimos y confortables, pese a esto, las personas con discapacidades poseen otro tipo de necesidades las cuales deben ser cubiertas por los empleadores. Es por esta razón que se han establecido varios proyectos enfocados a la inserción laboral, que tienen como propósito generar entornos con las mismas condiciones de horarios, tareas y sueldos que el resto de los trabajadores. Tras la búsqueda de varias investigaciones, se concluye que la mayor parte de estos proyectos están basados en cumplir este propósito capacitando a los trabajadores sobre el buen trato, ambientes libres de discriminación y acoplando el entorno de trabajo a las necesidades de los empleados con discapacidad. Sin embargo, gracias a varios avances tecnológicos se puede cumplir este reto mediante tecnologías de asistencia (TA), las cuales posibilitan mejorar la independencia de personas con algún tipo de discapacidad. Como es el caso del desarrollo de unas gafas de seguridad inalámbricas que advierta a personas sordociegas sobre alguna obstrucción mediante vibraciones mencionado en (Nordqvist & Leijon, 2004), o el desarrollo de guantes vibro táctiles para reconocer distintos sonidos mencionado en (Thie, 1998).

La utilización de tecnologías de asistencia son la respuesta para mejorar la independencia y desempeño laboral de personas con discapacidad. Es por esta razón que DANA Transejes Ecuador, busca dar solución a las necesidades de un empleado con discapacidad auditiva, a través de la construcción de un dispositivo de asistencia, con el fin de fomentar su crecimiento personal y autonomía laboral. Este dispositivo tiene como objetivo principal advertir al operador sobre el

acercamiento de distintos tipos de vehículos móviles de carga, un incendio o una falla en la producción de la planta.

Para lograr el propósito del dispositivo de asistencia, es necesario realizar varias actividades que den cumplimiento a los objetivos específicos planteados en el presente trabajo de titulación. La realización de estas actividades da lugar a la obtención de la mejor solución tecnológica de asistencia, que favorezca tanto al empleado con discapacidad a reconocer situaciones de riesgo, como a los empleadores a otorgar un entorno libre de peligro cumpliendo con la Ley Orgánica de Discapacidad.

A fin de cumplir con los requerimientos proporcionados por la empresa, se caracterizó los distintos sonidos del sistema de alarmas. Como se mencionó en la Tabla 4 del Capítulo III, existen cuatro alarmas que el dispositivo de asistencia debe ser capaz de reconocer, estas alarmas tienen una frecuencia característica haciendo posible el identificarlas. Las frecuencias características son; elevador 922Hz, montacargas 3543Hz, ANDON 2025Hz y la alarma de incendios 1350Hz. Una vez distinguidas las alarmas se seleccionó las locaciones en las cuales se van a realizar las pruebas de funcionamiento de las distintas etapas del desarrollo del dispositivo. Las locaciones seleccionadas fueron el puesto de trabajo del operador, las oficinas de despacho, el pasillo de producción y el pasillo de vestidura, descritos en la Tabla 5 del Capítulo III.

Tras establecer las frecuencias características de las alarmas junto con las locaciones en donde se van a realizar las pruebas de desarrollo, se procede a seleccionar los componentes de hardware necesarios para la elaboración del dispositivo de asistencia. La elección de estos componentes está basada en el cumplimiento de características como tiempo de respuesta, tamaño, sensibilidad, costo y robustez ante caídas, las mismas que fueron evaluadas mediante pruebas de funcionamiento e investigación bibliográfica.

Para la adquisición de señales de audio, se hizo uso de los micrófonos INMP441 y SPH0645 que pertenecen a la familia de micrófonos MEMS, debido a que son los más recomendable según investigaciones bibliográficas de proyectos enfocados en la elaboración de prototipos de asistencia portables por a su tamaño, sensibilidad y robustez. Así mismo, los micrófonos MEMS cumplen con los requerimientos de instrumento Tipo 2 los cuales, según la Superintendencia de Riesgo de Trabajo, son idóneos al momento de recolectar sonidos en entornos industriales, pues son capaces de medir parámetros de forma simultánea.

Para la adquisición de señales de audio se implementó tres configuraciones distintas para los micrófonos INMP441 y SPH0645, detalladas en la Tabla 7 del Capítulo III. Cada configuración fue evaluada según parámetros de atenuación de ruido y sensibilidad. La primera configuración utiliza una conexión monofónica a través de un micrófono SPH0645. Tras las pruebas realizadas se obtuvo que la configuración uno presenta menor atenuación a ruido dificultando la identificación de sonidos específicos. Además, al evaluar la sensibilidad frente a la activación de alarmas se constata que esta configuración no reconoce la señal emitida por el montacargas, por lo que se descarta. La configuración dos tiene una conexión estéreo a través de dos micrófonos INMP441. Al evaluar esta configuración se observa que la atenuación de ruido y la sensibilidad da mejores resultados que la configuración uno. Adicionalmente, la configuración tres tiene una conexión estéreo utilizando un micrófono INMP441 y SPH0654. Esta configuración es la que presenta mejores resultados tanto en atenuación de ruido como en sensibilidad de las tres configuraciones implementadas. Del análisis de resultados presentados en la sección Pruebas de configuración de los micrófonos del Capítulo III, se concluye que la configuración tres es la mejor opción para desarrollar el dispositivo de asistencia, pues es capaz de reconocer las cuatro alarmas y disminuir el ruido que genera la planta.

Después de seleccionar la configuración de micrófonos, se eligió un microcontrolador adecuado para el procesamiento de las señales adquiridas. Trabajos investigativos señalan a las tarjetas ESP32 y Raspberry como las mejores alternativas al momento de realizar proyectos en donde se haga uso de micrófonos INMP441 y SPH0645. Debido a que ambos procesadores cuentan con un protocolo de comunicación I2S que permite el envío de datos entre los micrófonos MEMS y el microcontrolador.

Para seleccionar el microcontrolador adecuado para el desarrollo del dispositivo de asistencia, se evalúan parámetros de tiempo de respuesta en que el procesador tarda en realizar una operación como se observa en la Tabla 9 del Capítulo III. Tras evaluar el desempeño de ambas tarjetas se selecciona a la placa ESP32 como la mejor opción al momento de procesar las señales de audio adquiridas. Debido a que es el procesador es más potente y cuenta con una arquitectura que incluye conectividad wifi y bluetooth.

Finalmente, para seleccionar los sistemas de estimulación para el desarrollo del dispositivo de asistencia, se realizó una búsqueda bibliográfica en donde se menciona que las personas con discapacidad auditiva tienen mayor sensibilidad ante estímulos hápticos y lumínicos. Es por esta razón que se optó por utilizar un led RGB que estimule la retina del operador y un mini motor vibrador, el cual en contacto con la piel produce vibraciones ante la activación de los distintos tipos de alarmas como se detalla en el Capítulo III. Estos actuadores fueron seleccionados a través de pruebas cualitativas realizadas al operador con discapacidad auditiva.

Al seleccionar los componentes de hardware para el desarrollo del dispositivo de asistencia se da cumplimiento al objetivo específico dos y se da paso a la identificación y selección ergonómica para la ubicación del dispositivo. Para ello se debe considerar temas de comodidad,

bienestar y seguridad a nivel físico para prevenir riesgos laborales y tomando en consideración las opiniones del operador con discapacidad auditiva.

Como se mencionó en los objetivos específicos del proyecto de titulación se debe realizar dos prototipos de asistencia enfocados en la estimulación háptica y lumínica. Es por esta razón que se incorporó el dispositivo de asistencia en los equipos de protección individual (EPI), pues estos equipos son de uso obligatorio, garantizando así la utilización constante del dispositivo en la jornada laboral del operador con discapacidad. Las EPI seleccionadas fueron el casco de seguridad y las orejeras para colocar el motor vibrador y la pantalla de protección fácil para colocar el led RGB. El motor vibrador estará en contacto con la piel y permitirá al operario reconocer la activación de una alarma debido a las vibraciones generadas y a identificar el tipo de alarma dependiendo de la intermitencia de las mismas. Por otro lado, el led RGB se encenderá de 3 distintos colores, cada color representa la activación de una alarma específica.

Tras realizar varias pruebas ergonómicas al operador con discapacidad, se concluyó que el casco de seguridad es el lugar idóneo para colocar el mini motor vibrador, pues al estar en contacto directo con la frente del operador, este puede reaccionar frente al estímulo generado. Adicionalmente, para conocer el lugar en donde colocar el led RGB se probó dos posiciones la primera en la mitad de la pantalla de protección fácil y la segunda a los laterales, dando como resultado que la mejor posición es a los laterales debido a que la activación del led RGB no dificulta la visibilidad del operador, estas pruebas son detalladas en el capítulo III. Cabe mencionar que el trabajador al que está dirigido el dispositivo de asistencia, mencionó que la unión de ambos prototipos ayudaría a reconocer e identificar los diferentes tipos de alarma de manera más eficiente. Debido a que es más fácil reconocer la vibración generada por los mini motores y a su vez es más fácil identificar los colores para conocer que alarma se ha activado. Es por esta razón

que se realizó un solo prototipo uniendo ambos sistemas de estimulación, en donde el mini motor vibrador se activará de manera prolongada al detectar la activación de una alarma, mientras que el led RGB será el encargado de brindar información al operador sobre el tipo de alarma que se activó.

Una vez realizadas las modificaciones mencionadas a la estructura del dispositivo de asistencia se da cumplimiento al objetivo específico tres, pasando así a la etapa de diseño del dispositivo. Para el desarrollo físico del presente proyecto de titulación se toma en consideración características de tamaño, peso y portabilidad. El diseño electrónico consta de una etapa de alimentación la misma que tiene la capacidad de energizar o no el circuito, además consta de una batería portable la cual se puede cargar de manera regular. La siguiente etapa sirve para la adquisición de señales en donde se implementa la configuración seleccionada de los micrófonos, prosiguiendo a la etapa de reconocimiento e identificación en donde se hace uso del microcontrolador ESP32. Por último, la etapa de activación de actuadores en donde se ha implementado un botón de Reset para reestablecer las condiciones iniciales del sistema. Este circuito fue montado en una estructura de fibra de carbón diseñada en 3D como se observa en la sección de Desarrollo y diseño del hardware del Capítulo III.

El siguiente paso para la construcción del dispositivo de asistencia está basado en el desarrollo del algoritmo de programación para la etapa de adquisición, procesamiento, reconocimiento e identificación de las diferentes señales de alarma. Como se mencionó anteriormente, la recopilación de señales de audio está dada por los micrófonos MEMS debido a que envían datos digitales a través del protocolo de comunicación I2S que es un protocolo de enlace para manejar únicamente datos de audio. Además, se utiliza el formato de audio WAVE

para almacenar señales de audio debido a que cumple con las características de HIFI y HD como se menciona en el Capítulo IV.

Una vez obtenidos los datos de audio de forma digitalizada se procede a realizar la etapa de reconocimiento e identificación de las señales. Para cumplir con este propósito se hace uso del software Matlab para la manipulación y estudio de las señales digitalizadas de audio. En este entorno de programación se puede analizar las señales en función de la frecuencia de dos distintas formas por la Transformada Rápida de Fourier y por el periodograma. La Transformada Rápida de Fourier tiene como ventaja la rapidez del cálculo frecuencial ideal para ser utilizada en aplicaciones de tiempo real. Mientras que el periodograma tiene como ventaja la utilización de la función de autocorrelación para determinar la energía de las señales de audio. Ambos cálculos presentan información similar, por lo que se realiza una comparación a fin de seleccionar la que presente mejores resultados como se detalla en la sección Selección del método de estimación espectral del Capítulo IV.

Después de realizar las pruebas mencionadas se concluye que el método de la Transformada Rápida de Fourier es el más propicio a la hora de representar las señales de audio en frecuencia y amplitud, pues genera menor costo computacional lo que es favorable para aplicaciones de tiempo real, como el caso del dispositivo de asistencia diseñado. A fin de cumplir con la etapa de procesamiento, se pasa a realizar un análisis exhaustivo de las diferentes señales generadas por las alarmas. Del análisis realizado se puede observar que existe diferentes frecuencias y amplitudes que corresponden a un mismo tipo de alarma. Para solucionar este fenómeno se establece una amplitud umbral y un rango de frecuencia en donde las alarmas puedan ser detectadas tal como se menciona en el Capítulo IV.

El rango de frecuencias fue establecido a través del análisis de varias grabaciones en donde fueron consideradas las frecuencia más baja y más alta de las cuatro señales de alarma. Tras el análisis frecuencial se obtuvieron los siguientes rangos para el elevador 980Hz a 1040Hz, para el montacargas 3550Hz a 3570Hz, para el ANDON 2020Hz a 2025Hz, y finalmente para la alarma de incendios que se encuentra en el rango de 1290Hz a 1295Hz. Concluyendo así que, las alarmas del elevador y montacargas son las que presentan mayor variabilidad frecuencial pues son sonidos que se acercan y se alejan debido a que son alarmas generadas por vehículos móviles de carga. Mientras que las alarmas del ANDON y de incendios al ser alarmas fijas no varía en gran medida sus frecuencias.

Con el propósito de evitar altos consumos de energía, se establece un valor umbral de amplitud, para detectar cambios de potencia entre la activación de las alarmas y el ruido generado por la maquinaria de producción. Es por esta razón que en la Tabla 11 del Capítulo IV se han colocado las amplitudes mínimas de las señales de alarma siendo la menor la generada por el montacargas.

Así mismo, con la intención de reducir el costo computacional, se establece una condición en la programación para realizar la FFT de una señal procesada siempre y cuando esta sea mayor al umbral preestablecido. Para cumplir con esta condición se utilizaron tres diferentes sensores que cumplen con las características de instrumentos de tipo 2 para la detección de ruido de la empresa. Los sensores seleccionados fueron el sensor detector de sonido, el módulo KY-037 y por último los micrófonos INMP441 y SPH0645 en configuración estéreo, utilizados para la adquisición de las señales de alarma. De las pruebas realizadas por los tres sensores de manera simultánea se concluye que la configuración de los micrófonos INMP441 y SPH0645 son los que presentan mejores resultados al momento de la detección de picos de frecuencias determinadas.

Una vez analizadas las señales de audio se implementó un modelo matemático en el software de Matlab para la predicción del comportamiento del sistema de asistencia. El modelo matemático planteado tiene la capacidad de reconocer entre ruido o una alarma. Es por esta razón que se estableció un valor umbral de amplitud para diferenciar las señales de ruido generado por la maquinaria y la activación de una alarma a través de sensores que tengan gran sensibilidad. Además, el modelo matemático puede identificar entre las cuatro alarmas mencionadas anteriormente, a través de las frecuencias que tengan mayor amplitud. Por ello fue esencial escoger la configuración que presente mayor sensibilidad y mayor atenuación de ruido.

Después de haber establecido el modelo matemático en el software Matlab se pasa a la etapa de entrenamiento del sistema como se detalla en el Capítulo IV. Para analizar los datos obtenidos se hace uso de tablas de verdad, en donde se observa que la alarma del montacargas no ha sido reconocida. A fin de evitar este problema se ha filtrado la señal, a través de una ventana rectangular que se multiplica con la señal original a fin de eliminar frecuencias entre 500Hz a 4000Hz, con el propósito para eliminar la componente de ruido que genera que no se reconozca la alarma. Tras realizar el filtrado de la señal se concluye que el modelo matemático planteado cumple con las predicciones establecidas, por lo que es considerado como un modelo eficiente y robusto.

Con la finalidad de cumplir el objetivo de alertar al operador con discapacidad auditiva sobre la activación de alarmas, se pasa a transcribir el modelo matemático implementado en Matlab al entorno de programación del microcontrolador ESP32 usando la plataforma Arduino IDE. Debido a que el sistema debe funcionar en tiempo real se realizaron algunas modificaciones al modelo matemático de Matlab. Para la programación del microcontrolador se establecieron varios parámetros descritos en la sección Sistema de identificación de alarma en tiempo real del Capítulo

IV, que sirven para calcular el tiempo de respuesta en que se demora el dispositivo de asistencia en advertir al operario sobre la activación de una alarma. El tiempo de respuesta establecido es de 639ms, lo cual es propicio para esta aplicación pues el operario tendrá tiempo de reaccionar frente a una posible situación de riesgo.

Para analizar los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento, se utilizaron tablas de verdad como se observa en la sección Sistema de identificación de alarma en tiempo real del Capítulo IV, en donde se puede visualizar que el modelo matemático cumple con las especificaciones requeridas por la empresa. Tras estas pruebas se concluye que el sistema implementado en el microcontrolador, al igual que el modelo matemático realizado en Matlab, es robusto y eficiente pues es capaz de reconocer todas las señales de alarma dando tiempo al operario de reaccionar frente a un incendio, el acercamiento de vehículos móviles de carga o a alguna anomalía presentada en la producción de la empresa. Con respecto al análisis presentado de los distintos modelos matemáticos, se da cumplimiento al objetivo uno, tres y cuatro del presente proyecto de titulación. Dando lugar al apartado de pruebas de desempeño para determinar el funcionamiento del dispositivo de asistencia en condiciones reales de trabajo.

El dispositivo de asistencia implementado, es una solución tecnológica ante las necesidades laborales de una persona con discapacidad auditiva. Es por esta razón que se realizaron pruebas de funcionamiento y ergonomía, a fin de establecer el grado de cumplimiento de las especificaciones planteadas tanto por el operador como por el departamento de Ingeniería y Recursos Humanos de la Empresa DANA Transejes Ecuador.

Para equiparar las condiciones laborales del trabajador con discapacidad y brindarle autonomía laboral, a través de la utilización del dispositivo de asistencia, se tomó en consideración el cumplimiento del reglamento interno de la empresa. En donde se estipula que un trabajador no

puede estar a menos de 60 cm de distancia tanto del montacargas como del elevador, por lo que se evaluó la distancia en la cual el dispositivo detecta las señales de alarma. Además, se evaluó el parámetro del tiempo de respuesta, ya que es el tiempo mínimo en el que el operador puede reaccionar frente a alguna situación. Finalmente, se evaluó la duración de la batería ya que esta debe ser capaz de energizar al circuito durante la jornada laboral del operador, la cual es de 8 horas seguidas.

En la sección Pruebas y resultados del Capítulo V, se detallan las pruebas realizadas al dispositivo de asistencia, en donde se obtuvieron los siguientes datos. El tiempo promedio en el cual el dispositivo es capaz de alertar al operador sobre la activación de una alarma es de 1 segundo, cumpliendo con los requerimientos planteados por la empresa. Además, se concluye que el dispositivo es capaz de alertar al operador sobre la activación de cualquier vehículo móvil de carga, pues en la etapa de pruebas el dispositivo fue capaz de reconocer la alarma de una grúa que se encontraba en la planta. Al evaluar la distancia máxima de detección se observa que la alarma del montacargas es la que genera menor sonido por lo que es la que se detecta a menor distancia. Sin embargo, cumple con el reglamento interno de la empresa pues se detecta a 2 metros de distancia al igual que la alarma del elevador. Finalmente, al evaluar la duración de la batería se pudo constatar que dura aproximadamente 10 horas, cumpliendo así con el requisito de que la batería debe energizar al circuito durante la jornada laboral del operador con discapacidad.

Por último, se hicieron pruebas ergonómicas en donde se evaluó los siete principios de diseño universal para definir si el dispositivo de asistencia elaborado en el presente proyecto de titulación es fácil e intuitivo de usar. Las pruebas fueron realizadas a cinco personas como se detalla en la sección de Pruebas y resultados del Capítulo V, obteniendo los siguientes resultados. El dispositivo de asistencia cumple con seis de los siete principios de diseño universal de forma

unánime. Sin embargo, en la característica de tamaño adecuado del dispositivo, dos de las cinco personas encuestadas manifestaron que el tamaño es incómodo al momento de cambiar la batería, además mencionaron que el botón de Reset es muy pequeño. Es por esta razón que se toma en consideración estas opiniones para trabajos futuros. Una vez realizadas estas pruebas se da cumplimiento al último objetivo del trabajo de titulación y se finaliza el propósito del dispositivo de asistencia, al proporciona independencia laboral al trabajador con discapacidad auditiva ante tareas cotidianas, fomentando su crecimiento laboral y posibilitando la igualdad de oportunidades con el resto de empleados.

Bibliografía

- Abad, L., Aranguren, D., Ruiz, D., & Maqueda, M. (2011). Ruido Ambiental; Seguridad y Salud. *Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*.
- ADA. (2014). *La Ley para Personas con Discapacidades*. (National Network) Obtenido de <https://adata.org/guide/la-ley-para-personas-con-discapacidades-preguntas-y-respuestas>
- Adhami, R., & Clontz, S. (1989). *Long-duration signal detection in a noisy environment*. Proceedings. The Twenty-First Southeastern Symposium on System Theory. doi:10.1109/SSST.1989.72524
- Ailson, J. (2019). *Prometieron caminar*. Obtenido de Protocolo I2S: un artículo para llevarlo a comprender: <http://www.only2fire.com/archives/108.html>
- Aisyah, S., Azlan, A., Yeop, B., & Mohd-Yasin. (2020). A Review of MEMS Capacitive Microphones. *Micromachines*. doi:10.3390/mi11050484
- Aldas, J. (2022). *Evaluación del ruido ambiental y vibraciones de la empresa master metal*.
- Apple. (2023). *¿Por qué iones de litio?*
- Arboleda, J., & Gutiérrez, C. (2022). *Diseño de un prototipo de estimulador visual síncrono basado en tecnología LED*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21712/1/UPS-CT009533.pdf>
- Arce, M. (2021). *Micrófonos: Tecnología y procesos para la creación sonora y el registro binaural*. Banizu Nizuke. Obtenido de <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/52084/KAT01-CAST-Microfonos-WEB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Arellano, C. (2007). *Micrófonos*. (Instituto Politécnico Nacional) Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/6201/ICE105.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bornacelli, D., Escibar, R., & Velásquez, M. (2020). *La ergonomía y su aplicación médica a la seguridad y salud en el trabajo*.
- Cajas, F., & Torres, C. (2018). *Univerdiad Politécnica Salesiana Sede Cuenca*. Obtenido de Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor recíprocante de doble etapa: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16592/1/UPS-CT008047.pdf>
- Calleja, L. (2016). *Inserción Laboral de Personas con Discapacidad en la Organización E&L S.A.* Instituto Universitario Aeronáutico . Obtenido de <https://rdu.iaa.edu.ar/bitstream/123456789/1262/1/PROYECTO%20DE%20GRADO%20FISCAL%20CALLEJA.pdf>
- Cañón, P. (2013). Análisis de las condiciones de Seguridad y Salud Laboral de los trabajadores de Centros Especiales de Empleo (CEE). Obtenido de <https://castillogrupo.com/wp-content/uploads/2017/06/INFORME-MARIA-PILAR-CA%3%91ON-BLANCO-SEGURIDAD-Y-SALUD-LABORAL.pdf>
- Carracosa, J. (2015). La discapacidad auditiva. Principales modelos y ayudas técnicas para la intervención. *Revista Internacional de Apoyo a la Inclusión, Logopedia, Sociedad y Multiculturalidad, Vol.1(Número 2)*, 101-113.
- Centro Nacional de Defectos Congénitos y Discapacidades del Desarrollo. (2020). *La discapacidad y la salud*.

- Consejo Nacional de Fomento Educativo. (2010). *Discapacidad auditiva: Guía didáctica para la inclusión en educación inicial y básica*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/106806/discapacidad-auditiva.pdf>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). Decreto Legislativo 0. *Registro Oficial 449*. Última modificación: 25-ene.-2021.
- de Armas, R., & Trujillo, M. (2017). *Introducción al modelado matemático con MatLab*. Ciencias básicas e ingeniería: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1016&context=edunisalle_ciencias-basicas-ingenieria.
- E. Systems. (2008). *Espressif*. Obtenido de <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>.
- Echeverry, J., Guarnizo, C., & Orozco, A. (2007). Análisis de la densidad espectral de potencia en registros MER. *Scientia et Technica Año XIII*, 123-126.
- Espressif. (2022). *Arduino-ESP32*. Obtenido de <https://espressif-docs.readthedocs-hosted.com/projects/arduino-esp32/en/latest/api/i2s.html>
- Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía. (2010). Formatos de audio y uso didáctico. *Temas para la educación revista digital para profesiones de la enseñanza*, 1-6.
- Flores, P. (2017). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla*. Obtenido de Desarrollo de un demostrador de manejo de micrófonos MEMS MP34D: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91392/fichero/Pablo+Lopez+Flores+-+Desarrollo+de+un+demostrador+de+manejo+.pdf>

- Fundación Estatal para la prevención de riesgos laborales. (2019). *Equipos de Protección Industrial en Construcción*. Obtenido de <https://epiconstruccion.lineaprevencion.com/tipos-de-epi/proteccion-auditiva/tipos-y-normativa-de-aplicacion-5>
- Fundación estatal para la prevención de riesgos laborales. (2019). *Selección de EPI*. Obtenido de <https://epiconstruccion.lineaprevencion.com/tipos-de-epi>
- Fundación ONCE. (2022). *Discapnet*. (Fundación ONCE) Obtenido de <https://www.discapnet.es/salud/salud-laboral/salud-laboral-y-discapacidad>
- Fundación Polar. (2004). *El mundo de la matemática: Modelos matemáticos*. Fundación Polar. Obtenido de <https://www.calameo.com/read/003308236370a0c55c032>
- Fundamentos de sonido. (2018).
- Gaitán, J., Tocarruncho, L., & Valencia, J. (2019). *Sistema de reconocimiento de voz para personas con discapacidad motriz*.
- Garay, B. (2004). *IDIS*. Obtenido de Tecnología Háptica: <https://proyectoidis.org/tecnologia-haptica/>
- García, R., Johnson, E., Hervás, R., González, I., Mondéjar, T., & Bravo, J. M. (2018). An Affective and Sensorized Toy to Support Emotion Perception. doi:10.3390/proceedings2191209
- García, S. (2013). *Manual para radialistas analfabéticos*. Ministerio de Comunicación del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Giacomantone, J., & Bria, O. (2020). Modelos Matemáticos y Métodos Computacionales en Ingeniería. *Instituto de Investigación en Informática LIDI (III-LIDI)*, 714-717.

Gil, I. (2022). *Fundación Adecco*. Obtenido de Diversidad e Inclusión:

<https://fundacionadecco.org/azimut/las-nuevas-tecnologias-al-servicio-de-la-discapacidad/>

Giraldo, D., & Quintero, O. (2014). Análisis de señales de audio utilizando la transformada de Gabor. *Universidad EAFIT*, 1-8.

Gómez, C. (2021). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería y sistemas de Telecomunicaciones*.

Obtenido de Hardware y acondicionamiento electrónico de un nodo para un sistema de localización de fuentes sonoras:

https://oa.upm.es/70172/1/TFG_CARLOS_GOMEZ_RAMOS.pdf

Gomez, M. (2009). *Modelos matemáticos*.

Guernsey, K., Nicoli, M., & Nini, A. (2007). *Convention on the Rights of Persons with Disabilities: Its Implementation and Relevance for the World Bank*. SP DISCUSSION PAPER.

Hernández, E. (2014). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Obtenido de Efecto Doppler:

<http://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/16710/LECT142.pdf?sequence=1>

IITM. (2015). *PSD Estimation using the DFT*. Obtenido de

https://www.ee.iitm.ac.in/~skrishna/ee471/dft_lab2.pdf

Ikiss, J. (2020). *Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech*. Obtenido de Sistema de adquisición de datos con ESP32:

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/344400/Sistema-de-adquisicion-de-datos-con-ESP32_Jamal-Ikiss.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Innovatech. (s.f.). *Motor Vibrador*. Obtenido de https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-516952352-motor-vibrador-celulares-para-proyectos-electro-repuesto-rye-_JM
- KIO. (2023). *¿Qué son y para qué sirven los protocolos de comunicación de redes?* Obtenido de <https://www.kionetworks.com/blog/data-center/protocolos-de-comunicaci%C3%B3n-de-redes>
- Lasluisa, F. (2008). Diseño de un sistema de alarmas analámbricas IP para la brigada de caballería blindada No 11 "Galápagos" en la ciudad de Riobamba. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/323/1/t368e.pdf>
- Ley de Gestión Ambiental. (2004). Registro Oficial Suplemento 418. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEY-DE-GESTION-AMBIENTAL.pdf>
- Ley de Seguridad Social . (2001). Ley 55. *Registro Oficial Suplemento 465*. Última modificación: 31-mar-2011.
- Ley Orgánica de Discapacidades. (2017). Decreto Ejecutivo 194. Obtenido de <https://www.gob.ec/regulaciones/reglamento-ley-organica-discapacidades>
- López, A. (2018). *Ingeniería de ondas formatos de audio digital*. Obtenido de <https://docplayer.es/4104935-Ingenieria-de-ondas-formatos-de-audio-digital.html>
- Luque, R. (2022). *Blog de electrónica*. Obtenido de Diodos Led: ¿Qué son y qué características tienen?: <https://www.todoelectronica.com/blog-electronica/diodos-led-que-son-y-que-caracteristicas-tienen.html>
- Macías, I. (2021). Boletín de Ingeniería . *Global Mechanical Design*, 2-5.
- Magroove. (2020). *Frecuencia de muestreo : ¿Cuál usar? ¿Cuál es la mejor?*

- Martí, J. (1987). *FFT como herramienta de análisis en fonética*. Barcelona.
- Martín, T. (2015). Transformada de Fourier - Representación de señales de sonido. *Universidad Nacional del Sur*, 1-4. Obtenido de <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-MartinTomas.pdf>
- mineARC Systems. (2021). *¿Son Peligrosas Las Luces De Crecimiento Para El Ojo Humano?* Obtenido de <https://minearc.com/?lang=es>
- Minibots. (2022). *Notas sobre robótica, domótica, sistemas operativos y programación*. Obtenido de <https://minibots.wordpress.com/2021/04/06/pruebas-de-rendimiento-de-raspberry-pi-pico-y-comparativa-con-plataformas-arduino-esp8266-y-esp32/>
- Ministerio de Salud Pública del Ecuador. (2022). *Gobierno del Ecuador*.
- Ministerio del Trabajo. (2009). Inserción de personas con discapacidades. Obtenido de <https://www.trabajo.gob.ec/insercion-de-personas-con-discapacidades/>
- Ministerio del Trabajo. (2022). *Gobierno del Ecuador*. Obtenido de <https://www.trabajo.gob.ec/insercion-de-personas-con-discapacidades/>
- Mitchell, C. (2020). *Muchos países carecen de la capacidad para prevenir y tratar la pérdida de audición*. Pan American Health Organization / World Health Organization.
- Murrel, M., Mannix, C., & Vetrani, K. (2015). *Física del Sonido*. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Navarro, D. A. (2021). *Sistema de moitorización de consumo eléctrico y supervisión de una fábrica alimentaria mediante sensores distribuidos IoT*. Universidad de Oviedo.

Nelson, H., Gallegos, F., Rea, A., & Galeas, M. (2021). Casco inteligente de seguridad industrial para la prevención de accidentes y enfermedades ocupacionales . *Revista de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo*, 1-6.

Nieto, M. (2008). *La contaminación acústica y su legislación*. Obtenido de <https://derechoecuador.com/la-contaminacion-acustica-y-su-legislacion/>

NIH. (2019). *Transformación de Descubrimientos en Salud*. Obtenido de ¿Cómo beneficia la tecnología de rehabilitación a las personas con discapacidades?

Nordqvist, A., & Leijon, P. (2004). *An efficient robust sound classification algorithm for hearing aids*. *J Acoust Soc Am*. doi:10.1121/1.1710877

NTI. (2020). *Control de calidad de matrices de micrófonos digitales MEMS*. Obtenido de <http://www.nti-audio.com/es/aplicaciones/control-de-calidad/microfono-digital-mems>

NXP semiconductors. (2022). *I2S bus specifications*. Obtenido de <https://www.nxp.com/docs/en/user-manual/UM11732.pdf>

Oberle, S., & Kaelin, A. (1995). Recognition of acoustical alarm signals for the profoundly deaf using hidden Markov models. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. doi:10.1109/ISCAS.1995.523885

Oficina Internacional del Trabajo. (2011). *Discapacidad en el lugar de trabajo: Prácticas de las Empresas*. Obtenido de https://www.ilo.org/public/spanish/dialogue/actemp/downloads/publications/working_paper_n3_sp.pdf

Ohtsuka, S., Hasegawa, S., Sasaki, N., & Harakawa, T. (2010). *Communication System between Deaf-Blind People and Non-Disabled People Using Body-Braille and Infrared*

Communication. 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference.

doi:10.1109/CCNC.2010.5421647.

Perales, M. (2015). *Entrañas de Robot Blog sobre Ciencias Computacionales, Inteligencia Artificial,*

Robótica, Mecatrónica. Obtenido de <http://entranasderobot.blogspot.com/>

Perez, M. (2015). *Estimulación multisensorial en personas con discapacidad múltiple*. (Universitat

de les Illes Balears) Obtenido de

https://dspace.uib.es/xmlui/bitstream/handle/11201/145504/Perez_Saez_Miriam.pdf

Pérez, M., & Moreira, J. (2021). Inclusión laboral a personas con discapacidad en la Industria

Conservas Isabel. *Revista Científica Y Arbitrada De Ciencias Sociales Y Trabajo Social:*

Tejedora., 1-14. doi:10.56124/tj.v5i10.0051

Quispe, J., Roque, C., Rivera, G., Rivera, F., & Claros, A. (2021). Impacto de la contaminación

sonora en la salud de la población de la ciudad de Juliaca, Perú. *Revista Multidisciplinar*

Ciencia Latina, Vol. 5. doi:10.37811/cl_rcm.v5i1.228

Real decreto 773 Ministerio de la Presidencia BOE. (1997). Equipos de Protección Individual. 1-3.

Reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores. (1986). Decreto Ejecutivo 2393. *Registro*

Oficial 565 . Ultima modificación: 21-feb.-2003.

Rossmann, R. (2014). El espectro de frecuencias y sus aplicaciones. *Cultura, Ciencia y Tecnología*

ASDOPEN-UNMSM, 1-8.

Ruiz, A. (2022). *¿El tacto y la visión están más desarrollados en las personas sordas?* Obtenido de

<https://blog.audifono.es/sentidos-mas-desarrollados-personas-sordas/>

- Sánchez, D., Romero, R., & Padrón, J. (2019). *Inclusión de personas con discapacidades auditivas y visuales en la investigación*. (Universidad Privada Dr. Rafael Beloso Chacín) Obtenido de Available: <https://www.redalyc.org/journal/993/99357718031/html/>
- Scott, W. (2003). *WAVE PCM soundfile format*.
- Serna, J. (2014). *Flat top*. Obtenido de <https://prezi.com/ltnzkn82zvfk/flat-top/>
- Silvaco. (2019). *SIPWare*. Obtenido de I2S audio Interface: https://silvaco.com/wp-content/uploads/product/ip/pdf/70027_I2S_Brief.pdf
- Sinclair, I. (1998). *Audio and Hi-Fi handbook*. Oxford : Newnes.
- Sisalima, B., & Vanegas, M. (2013). *Importancia del desarrollo sensorial en el aprendizaje del niño*. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/3402/1/Tesis.pdf>
- Superintendencia de Riesgos del Trabajo. (2016). El ruido en el ambiente laboral.
- Superintendencia de Riesgos del Trabajo. (2016). Industria Automotriz. *Manual de buenas prácticas*, 10-12.
- Texas Instruments. (2014). *User's Guide TMS320C5515*.
- Thie, J. (1998). *A pan-European social alarm system*. J Telemed Telecare. doi:10.1258/1357633981931489
- Thinh, N. T., Tho, T. P., & Nga, T. T. (2017). Robot supporting for deaf and less hearing people. En A. a. 2017 17th International Conference on Control (Ed.). 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). doi:10.23919/ICCAS.2017.8204351.
- Trabajo, I. A. (2004). Decisión del Acuerdo de Cartagena 584. *Registro Oficial Suplemento 461*.

- Trujillo, D. (2020). *Sistema de Control Activo de Ruido basado en el microcontrolador ESP32*.
Universidad de Antioquia.
- Universidad Técnica Particular de Loja. (2021). *OIT: Más de 374 millones de lesiones y accidentes se producen a diario*. (Dialoguemos)
- Vargas, J. (2011). Experiencias de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo en empresas del sector privado. *Revista Técnica Informativa del Seguro General de Riesgos del Trabajo-Ecuador*, 11-13.
- Velastegui, V. (2021). *Naylamp Mechatronic*. Obtenido de
<https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/384-nodemcu-32-30-pin-esp32-wifi.html>
- Vigitek. (03 de Noviembre de 2022). *Tipos De Alarmas Industriales Que Debes Conocer*. Obtenido de <https://www.vigitek.com.bo/blog/tipos-de-alarmas-industriales/>
- Vigitek. (2022). *Tipos De Alarmas Industriales Que Debes Conocer*. Obtenido de <https://www.vigitek.com.bo/blog/tipos-de-alarmas-industriales/>
- Vilanova, S. (2016). *Análisis de audio*. Universidad Oberta de Catalunya.

Apéndice