

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA EL MONITOREO DE LA EXPOSICIÓN A
VIBRACIONES MANO - BRAZO EN LOS OPERADORES DE HERRAMIENTAS
MECÁNICAS EN EL SECTOR INDUSTRIAL EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

Integrantes:

David Adolfo Páez Molina

Michelle Stefania Ortiz Sanabria

Fundación Universitaria Agraria de Colombia

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería Industrial

Bogotá D.C, Colombia

2024

Desarrollo de un prototipo para el monitoreo de la exposición a vibraciones mano - brazo
en los operadores de herramientas mecánicas en el sector industrial en la ciudad de
Bogotá.

Integrantes:

David Adolfo Páez Molina

Michelle Stefania Ortiz Sanabria

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero en Mecatrónico e Ingeniero Industrial

Directores: Ing. Sandra Torres

Ing. Miguel García

Fundación Universitaria Agraria de Colombia

Ingeniería Mecatrónica - Ingeniería Industrial

Bogotá D.C, Colombia

2024

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma jurado

Firma jurado

DEDICATORIA

Michelle Ortiz

Este trabajo va dedicado principalmente a mi familia. A mis padres, Carolina Sanabria y Luis Alberto Ortiz, quienes me dieron el privilegio de educarme y me han enseñado con su ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mi hermano, Diego Ortiz, por su constante apoyo y por estar siempre a mi lado, compartiendo cada desafío y cada logro. A mi abuela, Rosa Sanabria, por su amor incondicional, por ser una fuente de sabiduría y fortaleza y por siempre estar dispuesta a ayudar. A mi gata Nala, que con su compañía incondicional hizo más llevaderos los momentos de estrés y me brindó consuelo en las noches de estudio. Y, por último, a mi pareja, Juan Figueredo, por su amor, paciencia y por ser mi apoyo constante en este camino. Gracias por ser mi fuerza y mi inspiración en cada paso de este viaje

David Páez

Dedico este trabajo de grado a mis padres, Nidia Molina y Adolfo Páez, por ser pilares fundamentales en mi educación y formación a lo largo de todos estos años, hasta llegar a ser quien soy hoy, por enseñarme a nunca rendirme y estar para mí en todo momento. En especial, dedico este logro a mis hermanos Juan Páez, Felipe Páez y Juan Hermosa, quienes me brindaron apoyo, motivación y la fuerza necesaria para avanzar, sin importar lo que sucediera en el camino, con consejos y momentos que me ayudaron a superarme cada día. A mi perrito Giordy por su compañía incondicional en todo el proceso, lo cual lo hizo llevadero y a perseverar para alcanzar la meta.

AGRADECIMIENTOS

Michelle Ortiz

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento, primeramente, a Dios, cuya guía y acompañamiento han sido fundamentales en cada paso de este camino. Agradezco de todo corazón a mi familia, mi pareja y mis amigos, por estar presentes durante este viaje, brindándome su apoyo incondicional.

Extiendo un especial agradecimiento a los ingenieros Ricardo Bello, Sandra Torres, Miguel García, Andrea Pineda y Jimmy Méndez, por su invaluable guía, sabiduría y paciencia a lo largo del desarrollo de este proyecto. Sus conocimientos y experiencia fueron pilares fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo. Finalmente, quiero agradecer a mis compañeros de estudio por su amistad y compañerismo. En especial, a mi compañero de proyecto, David Páez, por su amistad y por hacer de este proceso una experiencia más amena y llevadera.

David Paez

Agradezco inmensamente a Dios por acompañarme en cada etapa de mi vida y permitirme superarme constantemente. A mis padres, por su incondicional apoyo y guía. A los ingenieros Ricardo Bello, Sandra Torres, Miguel García, Andrea Pineda, Valentina Reyes y Jimmy Méndez, por su acompañamiento, paciencia y por compartir su conocimiento, lo que nos permitió alcanzar este gran logro y obtener la doble titulación. También agradezco a todas las personas que nos acompañaron y apoyaron durante cada etapa de nuestro proceso para finalizar nuestros pregrados logrando este sueño.

Firma:

Michelle Ortiz

David Paez

CONTENIDO

1. RESUMEN	14
2. INTRODUCCION	15
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
4. JUSTIFICACIÓN	19
5. OBJETIVOS	22
5.1. <i>Objetivo General</i>	22
5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	22
6. ALCANCE Y LIMITACIONES	23
6.1. <i>Alcances</i>	23
6.2. <i>Limitaciones</i>	23
7. MARCO REFERENCIAL	25
7.1. <i>Estado del Arte</i>	25
7.2. <i>Marco Histórico</i>	29
7.3. <i>Marco Geográfico</i>	37
7.4. <i>Marco Teórico</i>	39
7.5. <i>Marco Conceptual</i>	74
7.6. <i>Marco Legal</i>	84
7.6.1. <i>Marco Legal Nacional</i>	84
7.6.2. <i>Marco Legal Internacional</i>	87
8. DISEÑO METODOLOGICO	90
9. DIAGNÓSTICO	96
10. DESARROLLO	101
11. ANALISIS Y RESULTADOS	133

12. RECURSOS DISPONIBLES	147
13. CRONOGRAMA	149
14. CONCLUSIONES	150
15. RECOMENDACIONES	152
16. REFERENCIAS	154

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 ESTADO DEL ARTE	25
TABLA 2 ESPECIFICACIONES DETALLADAS DE ALGUNOS DE LOS WEARABLES Y EJEMPLOS EN EL MERCADO	40
TABLA 3 SÍNTOMAS SEGÚN RANGO DE FRECUENCIA	45
TABLA 4 VALORES LÍMITES PERMISIBLES DE VIBRACIÓN DIARIA	50
TABLA 5 VALORES A (8)	51
TABLA 6 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL FILAMENTO PETG	57
TABLA 7 CARACTERÍSTICAS COMPLETAS DEL ESP32	58
TABLA 8 CARACTERÍSTICAS COMPLETAS DEL SENSOR	61
TABLA 9 CARACTERÍSTICAS DE LA BATERÍA	63
TABLA 10 CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DE CARGA	64
TABLA 11 CARACTERÍSTICAS DEL REDUCTOR	66
TABLA 12 CARACTERÍSTICAS DE LOS ACTUADORES	67
TABLA 13 ESPECIFICACIONES DEL MÉTODO FABRICACIÓN DE LA PCB	72
TABLA 14 AGENTES FÍSICOS – RIESGOS LABORALES Y ENFERMEDADES	85
TABLA 15 AGENTES ERGONÓMICOS – RIESGOS LABORALES Y ENFERMEDADES	85
TABLA 16 CARACTERÍSTICAS SOBRE REQUERIMIENTOS DEL DISPOSITIVO	100
TABLA 17 SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR	102
TABLA 18 SELECCIÓN DEL SENSOR	103
TABLA 19 SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN	104
TABLA 20 SELECCIÓN DEL MÓDULO DE CARGA	105
TABLA 21 SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES	105
TABLA 22 LISTADO DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS DEL ESQUEMÁTICO	107
TABLA 23 LISTADO DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS DEL ESQUEMÁTICO	115
TABLA 24 SELECCIÓN DE MATERIALES IMPRESIÓN 3D	120
TABLA 25 SELECCIÓN DEL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN	125
TABLA 26 MEDIDAS DE DISPERSIÓN Y TENDENCIA CENTRAL - PRUEBA 1	137
TABLA 27 MEDIDAS DE DISPERSIÓN Y TENDENCIA CENTRAL - PRUEBA 2	141
TABLA 28 MEDIDAS DE DISPERSIÓN Y TENDENCIA CENTRAL - PRUEBA 3	144
TABLA 29 RECURSOS DISPONIBLES	147
TABLA 30 CRONOGRAMA	149

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 ÁRBOL DEL PROBLEMA	18
FIGURA 2 LÍNEA CRONOLÓGICA GLOBAL DE LA SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	29
FIGURA 3 LÍNEA CRONOLÓGICA NACIONAL DE LA SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL EN EL TRABAJO	36
FIGURA 4 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA EMPRESA EN @GOOGLE EARTH	38
FIGURA 5 FUNCIONALIDADES GENERALES DE LOS WEARABLES	39
FIGURA 6 TIPOS DE WEARABLES DEPENDIENDO DE SU USO Y UBICACIÓN EN EL CUERPO HUMANO	40
FIGURA 7 CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS BIOMÉDICOS SEGÚN CRITERIOS DEL INVIMA	42
FIGURA 10 VISUALIZACIÓN DE A) ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA COMÚN DE LOS DISPOSITIVOS MEDIDORES DE VIBRACIÓN Y B) ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA DE LOS SMART EPP	48
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 8 SISTEMA BIODINÁMICO COMPLETO DEL CUERPO DE MASAS INTERCONECTADAS	44
FIGURA 9 RESPUESTA A LA DIRECCIÓN DE LA VIBRACIÓN EN EJES	46
FIGURA 10 DISPOSITIVOS ACTUALMENTE USADOS EN EL MERCADO	47
FIGURA 11 VISUALIZACIÓN DE A) ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA COMÚN DE LOS DISPOSITIVOS MEDIDORES DE VIBRACIÓN Y B) ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA DE LOS SMART EPP	48
FIGURA 12 SISTEMAS ESTÁNDAR DE COORDENADAS DE LA MANO PARA AGARRAR UN MANGO CILÍNDRICO DEFINIDOS EN ISO 5349-1 E ISO 8727 A) SISTEMA DE COORDENADAS BIODINÁMICAS EN LOS EJES X, Y, Z EN POSICIÓN DE AGARRE, B) SISTEMA DE COORDENADAS BIODINÁMICAS EN LOS EJES X, Z, EN POSICIÓN PALMA PALMA) SISTEMA DE COORDENADAS BASICENTRICAS Y BIODINÁMICAS EN LA EMPUÑADURA Y EL BRAZO SEGÚN LA ISO 8727	49
FIGURA 13 VALORES UMBRAL (TLV) Y LÍMITES DE ACCIÓN (AL) RELACIONADOS CON LOS VALORES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN DIARIA (DELV) Y LOS VALORES DE ACCIÓN DE EXPOSICIÓN DIARIA (DEAV) DE ANSI 2.70.	50
FIGURA 14 TÉCNICAS ACTUALES SOBRE LA VALORACIÓN DE LAS VIBRACIONES	52
FIGURA 15 AVANCES DESDE LOS 2000 EN CUANTO A PREVENCIÓN, INTERVENCIONES Y ESTRATEGIAS TENIENDO EN CUENTA LAS TEORÍAS Y EFECTOS DE LA EXPOSICIÓN A VIBRACIONES	53
FIGURA 16 VISUALIZACIÓN DE UNA IMPRESORA 3D PUESTA EN MARCHA	56
FIGURA 17 MATERIAL 3D - PETG	57
FIGURA 18 VISUALIZACIÓN DE A) MICROCONTROLADOR ESP32 WROOM 32 EN FÍSICO Y B) DATASHEET PARA CONFIGURACIÓN Y ORDEN DE LOS PINES	59
FIGURA 19 VISUALIZACIÓN DE A) ESTRUCTURA Y B) SENSOR CAPACITIVO MEMS	61
FIGURA 20 DATASHEET DEL ADXL345 CON SUS RESPECTIVOS ENTRADAS Y SALIDAS	62
FIGURA 21 BATERÍA RECARGABLE DE POLÍMERO DE LITIO DE 3.7V 1000MA	63
FIGURA 22 VISUALIZACIÓN DE MÓDULO DE CARGA - TIPO C	65
FIGURA 23 MÓDULO CONVERTOR DC-DC TIPO BUCK MP1584EN	66
FIGURA 24 VISUALIZACIÓN DE A) UN BUZZER Y B) UN LED RGB COMÚN CATODO	67
FIGURA 25 VISUALIZACIÓN DE A) MÓDULO WIFI ESP8266 DE @ESPRESSIF Y B) MÓDULO DE BLUETOOTH HC-05 GENÉRICO	68
FIGURA 26 VISUALIZACIÓN DE A) ARQUITECTURA DE TIPOS DE BLUETOOTH Y B) EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DE LA ARQUITECTURA DE BLUETOOTH BAJO UNA RED PICONET (ESTRELLA) Y SCATTERNET (MULTIPLEXACIÓN)	69

FIGURA 27 VISUALIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN IC2 MAESTRO Y ESCLAVO	70
FIGURA 28 VISUALIZACIÓN DE A) PCB PROTOTIPO Y B) ESTRUCTURA DE PCB RÍGIDAS Y FLEXIBLES	71
FIGURA 29 FABRICACIÓN DE PCB'S	71
FIGURA 30 DIAGRAMA DE FLUJO DEL FILTRO DE KALMAN JUNTO CON LAS ECUACIONES DE UN SISTEMA NORMAL COMO LINEAL UNIDIMENSIONAL	79
FIGURA 31 TASA DE ENFERMEDAD LABORAL POR SECTOR	81
FIGURA 32 METODOLOGÍA - PLAN DE TRABAJO	92
FIGURA 33 DURACIÓN PAUSAS ACTIVAS	97
FIGURA 34 FRECUENCIA DE REVISIÓN DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL	98
FIGURA 35 FACTORES CLAVE DEL PROYECTO	99
FIGURA 36 SIMULACIÓN CAE ESP32, MPU6050 Y OLED SSD1306 EN @WOKWI	108
FIGURA 37 SEÑAL DEL ACELERÓMETRO FILTRADA POR KALMAN Y SIN FILTRAR	110
FIGURA 38 INDICACIONES DE FUNCIONAMIENTO CON LA PARTE FÍSICA Y LA PROGRAMACIÓN	111
FIGURA 39 VISUALIZACIÓN EN MODOS DE TRABAJO Y PUESTA EN MARCHA	112
FIGURA 40 DIAGRAMA DE FLUJO DEL FUNCIONAMIENTO DEL CÓDIGO DEL MICROCONTROLADOR Y LA INTERFAZ	114
FIGURA 41 SIMULACIÓN DEL DISEÑO 3D DE LA PCB EN @PROTEUS EN LAS VISTA A) SUPERIOR Y B) INFERIOR	116
FIGURA 42 GERBER DE LA PCB, CON LA DESCRIPCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PISTAS Y LA PLACA DE TIERRA EN @PROTEUS	117
FIGURA 43 VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO FINAL DE LA FABRICACIÓN DE LA PCB POR LA A) CARA SUPERIOR Y B) CARA INFERIOR	118
FIGURA 44 VISUALIZACIÓN DE TODAS LAS VERSIONES DE LA PLACA PCB HASTA LLEGAR A LA FINAL	118
FIGURA 45 BASE MODELO 3D	121
FIGURA 46 TAPA MODELO 3D	122
FIGURA 47 CONFIGURACIÓN IMPRESIÓN 3D	123
FIGURA 48 VISUALIZACIÓN DE TODAS LAS VERSIONES DE LAS ESTRUCTURAS EN IMPRESIÓN 3D HASTA LLEGAR A LA FINAL DE LA VERSIÓN 3	123
FIGURA 49 VISUALIZACIÓN DE A) CONFORMACIÓN DE ARCHIVO Y B) ENTORNO DEL INTERFAZ DETALLADO	126
FIGURA 50 VISUALIZACIÓN DE A) ICONO DE LA INTERFAZ Y B) FONDO DE LA INTERFAZ	127
FIGURA 51 MENSAJE DE ADVERTENCIA SOBRE LA EXPOSICIÓN AL RIESGO	128
FIGURA 52 VISUALIZACIÓN DE LA PCB SOLDADA POR LA CARA A) SUPERIOR Y B) INFERIOR	129
FIGURA 53 COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PLACA EN A) CONEXIÓN BLUETOOTH Y B) PCB	129
FIGURA 54 VISUALIZACIÓN DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN INICIAL DEL SENSOR SEGÚN LOS EJES.	131
FIGURA 55 VISUALIZACIÓN DE: A) LA COMUNICACIÓN ENTRE EL DISPOSITIVO FINAL Y LA INTERFAZ, Y B) EL ENSAMBLAJE Y LA UBICACIÓN EN LA MUÑECA MEDIANTE UN VELCRO AJUSTABLE.	132
FIGURA 56 TALADRO DE CONCRETO	134
FIGURA 57 PRUEBA PILOTO 1 – SECTOR DE CONSTRUCCIÓN	135
FIGURA 58 PRUEBA PILOTO 1 – RESULTADOS INTERFAZ PROTOTIPO	136
FIGURA 59 PRUEBA PILOTO 1 ANÁLISIS	136
FIGURA 60 HERRAMIENTA - LIJADORA	138
FIGURA 61 PRUEBA PILOTO 2 – SECTOR DE CARPINTERÍA Y EBANISTERÍA	139

FIGURA 62	PRUEBA PILOTO 2 – RESULTADOS INTERFAZ PROTOTIPO	140
FIGURA 63	PRUEBA PILOTO 2 ANÁLISIS	140
FIGURA 64	PLANEADORA DE MESA	142
FIGURA 65	PRUEBA PILOTO 3 – SECTOR DE CARPINTERÍA Y EBANISTERÍA	143
FIGURA 66	PRUEBA PILOTO 3 – RESULTADOS INTERFAZ PROTOTIPO	143
FIGURA 67	PRUEBA PILOTO 3 ANÁLISIS	144

LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 ACELERACIÓN EFICAZ	51
ECUACIÓN 2 PARÁMETRO A (8)	51
ECUACIÓN 3 RANGOS DE TIEMPO SEGÚN LA ACELERACIÓN	112
ECUACIÓN 4 INPUT	130
ECUACIÓN 5 AUTONOMÍA	130

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1	DIAGRAMA COMPLETO DE LA LÍNEA DE TIEMPO GLOBAL	162
ANEXO 2	METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO COMPLETO	164
ANEXO 3	INSTRUMENTO DE DIAGNÓSTICO	167
ANEXO 4	FORMATO DE INSPECCIÓN DE LAS VIBRACIONES EN EL ÁREA DE TRABAJO VIBRACIONESRABAJO	174
ANEXO 5	INSTRUMENTO DE POST – DIAGNOSTICO	175
ANEXO 6	CRONOGRAMA COMPLETO	177
ANEXO 7	ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO EN @PROTEUS	178
ANEXO 8	PROGRAMACIÓN DE LA SIMULACIÓN CAE ESP32, MPU6050 Y OLED SSD1306 EN @WOKWI	179
ANEXO 9	CÓDIGO DEL MICROCONTROLADOR ESP32 WROOM 32 EN @ARDUINO IDE	181
ANEXO 10	GERBER PLANO GENERAL Y VISTA DE PLANO DE TIERRA	185
ANEXO 11	PLANOS DE LA ESTRUCTURA EN 3D EN @SOLIDWORKS	186
ANEXO 12	CÓDIGO DE LA INTERFAZ GRAFICA	187
ANEXO 13	RESULTADOS ENCUESTA DIAGNOSTICO	191
ANEXO 14	RESULTADOS ENCUESTA PROTOTIPO	195
ANEXO 15	RESULTADOS FORMATO DE INSPECCIÓN	196
ANEXO 16	MANUAL DEL DISPOSITIVO	197
ANEXO 17	FICHA TÉCNICA DEL DISPOSITIVO	201

1. RESUMEN

El proyecto de grado se centra en el sector industrial, tanto en áreas urbanas como rurales, con el propósito de desarrollar un prototipo de dispositivo para el monitoreo de la vibración a la que están expuestos los operadores de herramientas mecánicas mediante la presentación de indicadores que permitan la gestión de este riesgo. Este trabajo aplica los conocimientos adquiridos en la Fundación Universitaria Agraria de Colombia - UNIAGRARIA, en los programas de pregrado de Ingeniería Mecatrónica e Industrial.

La exposición a vibraciones representa un riesgo significativo, dado que los métodos de prevención actuales son ineficaces. Este riesgo puede provocar desde síntomas leves hasta enfermedades laborales graves, lo que destaca la necesidad de implementar medidas preventivas más efectivas.

La metodología utilizada es de enfoque mixto y tipo descriptivo, que incluye el análisis de las características del problema a través de la revisión de literatura y visitas de campo, así como la recolección de datos cuantitativos del dispositivo y cualitativos de los instrumentos utilizados.

El enfoque del trabajo es el desarrollo de un prototipo de dispositivo portátil para el monitoreo de las vibraciones generadas por herramientas mecánicas que afectan las extremidades superiores (mano-brazo). Se seguirá la normativa ISO 5349 de 2002 al aplicar el dispositivo en tres tipos diferentes de herramientas, donde el comportamiento varía debido a movimientos involuntarios y otros factores externos. La recolección y procesamiento de datos sobre las vibraciones (aceleración) se realizará en los tres ejes (X, Y, Z) de los trabajadores, enviándolos a un computador a través de Bluetooth. Este desarrollo no solo busca abordar el problema de la exposición a vibraciones, sino también establecer un marco que contribuya a la mejora de la salud y seguridad laboral en el sector industrial, promoviendo un ambiente de trabajo más seguro y eficiente.

Palabras Clave: Prototipo, Vibraciones, Riesgo, Monitoreo

2. INTRODUCCION

Este trabajo de grado aborda la necesidad de monitorear la exposición a la vibración, específicamente la aceleración generada por herramientas mecánicas. Esta exposición puede afectar negativamente la calidad de vida de los operarios, tanto a corto como a largo plazo (Cañola & Serna, 2020). De acuerdo con (Mokhtari, Cheng, Wang, & Foroughi, 2023) también puede reducir la productividad debido a la ineficacia de las medidas preventivas actuales. En respuesta a esta problemática, el proyecto propone el desarrollo de un dispositivo portátil para el monitoreo de vibraciones en la zona mano-brazo, con el objetivo de proporcionar indicadores de gestión que permitan sugerir medidas de prevención más efectivas frente a este riesgo físico.

El proyecto se divide en tres fases principales, Diagnóstico, Desarrollo y Evaluación o Validación. En la fase de diagnóstico del proyecto, se evalúa el estado actual de las medidas de prevención contra el riesgo de vibración en una empresa de Bogotá, Distrito Capital, a través de encuestas y análisis de informes de inspección. En la fase de desarrollo del prototipo, se seleccionan los materiales adecuados para su fabricación y se diseña una estructura que puede fijarse al antebrazo o a la mano del operario. El prototipo incluye un microcontrolador conectado a un acelerómetro, permitiendo el monitoreo en tiempo real de las vibraciones a través de una interfaz interactiva. Además, los datos capturados se almacenarán para su análisis posterior, facilitando la identificación de patrones y la implementación de medidas correctivas.

La implementación del prototipo ofrece a las empresas un equipo inteligente de medición que monitorea y registra la exposición a vibraciones, proporcionando indicadores para el control de este riesgo. Esto facilita la identificación y mejora de medidas preventivas, permite analizar la relación entre el tiempo de exposición y frecuencia de las vibraciones y el desarrollo de síntomas o enfermedades, y contribuye a reducir la pérdida de productividad. Además, el dispositivo tiene el potencial de ser utilizado en diversas industrias, tanto en sectores urbanos como rurales, ampliando su impacto en la mejora de la salud de los trabajadores.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las enfermedades laborales se pueden definir como aquellas causadas principalmente por la exposición a factores de riesgo físico, químico, biológico, eléctrico, ergonómicos u otros, en un ambiente de trabajo. Además, se considera como un problema de salud pública que repercute en millones de trabajadores a escala mundial (Ponce, G., 2022). De acuerdo con cifras oficiales de la OMS (Organización Mundial de la Salud) en el año 2016 alrededor de 1.9 millones de personas murieron debido a enfermedades o traumatismos causados por factores ocupacionales, el factor de riesgo con mayor porcentaje de muertes es la exposición a largas jornadas laborales al cual se le atribuyen cerca de 750.000 muertes a nivel mundial (Organización Mundial de la Salud, 2021). Por la emergencia de salud pública ocasionada a raíz del virus SARS-CoV-2 (COVID-19) en 2020, los casos de enfermedad laboral relacionadas al sistema respiratorio fueron casi el 88 % de los casos reportados, debido a esto el sector más afectado fue el de la salud (Ponce, G., 2022).

En Colombia de acuerdo con cifras del año 2017, una tasa de 94.7 de cada 100.000 trabajadores expuestos a riesgos ocupacionales desarrollan una enfermedad laboral. Con los años se ha reducido un 27.5 % en la tasa de enfermedades laborales, atribuida a la intervención de las ARL en cuanto a promoción y prevención. Las enfermedades laborales están clasificadas por sector, siendo el sector de minas y canteras, el sector manufacturero y el sector del agro aquellos que representan mayor tasa de enfermedad laboral según su ocupación, teniendo en cuenta el nivel y tipo de riesgo al que se exponen los operarios (Pino Castillo & Ponce Bravo, 2019).

Las enfermedades derivadas de actividades laborales pueden ser clasificadas por grupos. De acuerdo con el Decreto 1477 de 2014, uno de estos grupos engloba las enfermedades relacionadas al sistema musculoesquelético y tejido conjuntivo, estas se deben a agentes físicos y ergonómicos como la realización de movimientos repetitivos y la exposición constante a las vibraciones de cuerpo entero o vibraciones transmitidas a las extremidades superiores en trabajos como conducción de vehículos pesados o grúas y operación de herramientas o maquinaria percutora. Las enfermedades que pueden ser

causadas por este tipo de labor pueden ser: Síndrome de Raynaud, Lesiones de hombro, Síndrome de manguito rotador, entre otras (Congreso de Colombia, 2012)

En el mismo sentido, se entiende como vibración el movimiento oscilante de un objeto solido respecto a una posición de equilibrio, cuando el elemento que vibra está en contacto con alguna parte del cuerpo la energía liberada por el movimiento es absorbida por aquella parte del cuerpo. Conforme con estudios realizados las principales frecuencias que causan daño por vibración se encuentran en un rango de 25 a 350 Hertz, además se ha comprobado que los efectos de la vibración por encima de los 250 Hz se limitan a la mano y no se trasladan hacia las articulaciones de la muñeca, codo u hombro (López P. J., 2018). Las vibraciones suelen causar en los trabajadores sensación de malestar, irritabilidad, pérdida de precisión, entre otros (Fundación Estatal para la Prevención de Riesgos Laborales, 2017)

La exposición a vibraciones y la realización de movimientos repetitivos por tiempo prolongado puede generar enfermedades o lesiones permanentes en el sistema músculo esquelético. De acuerdo con estudios realizados en diferentes países, aproximadamente el 5% de la población está expuesta a vibraciones en el ámbito laboral, en especial el personal dedicado a trabajos como construcción, carpintería, mantenimiento, entre otros. Adicionalmente en muchos casos luego de años de exposición a vibraciones no solo se desarrollan enfermedades en el sistema muscular y óseo, sino que, además se desarrollan lesiones neuronales permanentes (López P. J., 2018)

Las enfermedades de origen laboral no solo representan un problema de salud, sino que además generan altos costos tanto para la empresa o aseguradora de riesgos laborales (ARL) como para sociedad misma. La aseguradora o el sistema de salud debe responsabilizarse de costos como la indemnización, tratamientos, medicamentos, entre otros costos relacionados con la atención de la enfermedad. Adicional a esto, la sociedad en sí tiene que acarrear los costos de la reducción de la competitividad, jubilación anticipada, absentismo laboral, el desempleo, pensiones, entre otros.

En el mismo sentido, se puede evidenciar que actualmente no existe una regulación específica para esta situación en Colombia salvo en la Resolución 2400 de 1979 artículo 93

donde se especifican los métodos de control para el uso de herramientas o maquinaria que produzca algún tipo de vibración que pueda afectar a los trabajadores (Hoyos & Diaz, 2017); la Ley 1562 de 2012 que expone las disposiciones en materia de seguridad y salud en el trabajo junto con el Decreto 1477 de 2014 en el cual se detallan los tipos de enfermedades consideradas como enfermedades laborales y los agentes o riesgos que los producen. Por otro lado, existen normas ISO (Organización internacional de Normalización) que regulan el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST como la norma ISO 45001 de 2018, UNE-EN ISO 5349 de 2012 y la norma UNE-EN ISO 10819:2014/A2:2023 para la medición y control de las herramientas vibratorias manipuladas con las manos.

3.1 FORMULACION DEL PROBLEMA

En relación con la problemática anteriormente mencionada, se plantea la pregunta ¿Cómo es posible analizar el impacto de la exposición a la vibración en trabajadores que utilizan herramientas vibratorias?

Esta se puede observar a detalle junto con las razones de la formulación del problema en la figura 1.

Figura 1 Árbol del Problema



Fuente: Propia de los autores

4. JUSTIFICACIÓN

Según la Organización Internacional del Trabajo (OIT), aproximadamente 160 millones de personas a nivel mundial padecen anualmente de enfermedades no mortales relacionadas con su actividad laboral (López, Macorra, & Alcántara, 2019). Dentro de estas enfermedades se encuentran aquellas causadas por el riesgo de vibración, mayormente conocidas como síndrome de vibración mano-brazo, el cual afecta, según (Nieradko-lwanicka, 2019), al 50% de los trabajadores expuestos, con una latencia ligada al tiempo de exposición, las condiciones del entorno y el comportamiento del operario. Este síndrome abarca afectaciones neurológicas, óseas-articulares, músculo esqueléticas y vasculares, con daños irreversibles en la calidad de vida de las personas. (Bovenzi, 2005)

Cuando las vibraciones exceden ciertos límites, representan un riesgo para la salud de los trabajadores, pudiendo causar, en algunos casos, daños permanentes. Para mitigar o prevenir los riesgos asociados con la exposición a vibraciones, es crucial implementar medidas preventivas que generen beneficios significativos, como la reducción de enfermedades o lesiones laborales (Cañola & Serna, 2020). Siendo el trastorno músculo esquelético, el que más frecuencia tiene de padecerse en ambientes laborales tanto en países industrializados como en desarrollo. Se estima que alrededor del 30% de la morbilidad ocupacional es atribuido a este tipo de patologías, lo que representa un impacto económico en forma de pérdida de días laborales, ausentismo, jubilaciones anticipadas, incapacidades, entre otros (López, Macorra, & Alcántara, 2019).

En el mismo sentido, vale la pena resaltar que, a pesar de la existencia de normativas y estándares que establecen límites de exposición a vibraciones para proteger la salud y seguridad de los trabajadores, la implementación efectiva de estas medidas sigue siendo un desafío. Según (García, Navarro, & Parra, 2020), esto se debe en gran medida al grado de desarrollo empresarial en Colombia, que apenas alcanza el 50%, debido a los problemas de transición y adaptación que enfrenta el Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) en las empresas. Esto conlleva obstáculos como la falta de conciencia o formación sobre los riesgos vinculados con las vibraciones, la ausencia de compromiso de los trabajadores para seguir los lineamientos de seguridad al utilizar adecuadamente los

elementos de protección, los altos costos de mantenimiento de equipos y sistemas de gestión (Rodríguez, Cárdenas, Álvarez, Pérez, & Palencia, 2022)

Aunque también se han expresado opiniones como la de (Sanchez, Macias, & Ramirez, 2022), quienes destacan el análisis costo-beneficio para las empresas y los empleados, así como la perspectiva de (Mokhtari, Cheng, Wang, & Foroughi, 2023), quienes señalan la ineficacia de los métodos tradicionales de control de salud y seguridad debido al consumo de tiempo y al bajo rendimiento laboral causado por retrasos en los informes.

Este proyecto de grado propone el desarrollo de un dispositivo de monitoreo para los operarios que estén expuestos a vibraciones generadas por las herramientas mecánicas utilizadas en su lugar de trabajo. Dado que estos trabajadores enfrentan este riesgo durante períodos prolongados, se busca proporcionar indicadores que contribuyan a proteger su salud. El equipo de medición proporcionará una alerta cuando los niveles de vibración o el tiempo de exposición excedan los límites establecidos, de esta manera permitirá a los trabajadores descansar regularmente, usar técnicas de trabajo seguras y reducir su exposición a las vibraciones por largos periodos de tiempo.

En resumen, el proyecto de grado aborda una problemática relevante y actual, centrándose en la protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos de las vibraciones. La implementación del dispositivo tiene el potencial de mejorar significativamente la gestión y control del SGSST en cuanto a las condiciones laborales de los operarios de herramientas vibratorias. Además, contribuirá a la promoción de una cultura de seguridad en el sector, al aumentar la conciencia sobre los peligros de las vibraciones y alentar la adopción de medidas preventivas.

Considerando los aspectos anteriores y tomando como base las políticas institucionales de UNIAGRARIA en cuanto a los pilares misionales, este estudio se centra en el emprendimiento y la innovación a través del desarrollo tecnológico sostenible, al brindar una herramienta para mejorar el monitoreo de la vibración de los trabajadores, ya sea en entornos industriales urbanos o rurales, preservando así su calidad de vida. Por su carácter novedoso puede competir en el mercado llegando a tener un alto potencial de comercialización, siendo aplicable en diversos sectores económicos apoyando así las

actividades relacionadas con la higiene industrial en el marco del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SGSST).

En el contexto del proceso de formación de los autores en cada campo específico (Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería Industria), se aplican los saberes y las competencias adquiridas en temáticas como la electrónica, mecánica, programación, seguridad y salud en el trabajo y formulación de proyectos, para enfocarlo en las líneas de investigación. Es así como en cuanto a la Ingeniería Mecatrónica se enfoca en la línea de Gestión y Conversión de Energías, por el desarrollo del dispositivo, el cual emplea baterías recargables y sigue prácticas sostenibles en cuanto a materiales, diseño y funcionamiento. Por otro lado, desde la Ingeniería industrial se centra en la gestión de operaciones para mejorar procesos y eficiencia operativa del SGSST, por proporcionar datos en tiempo real sobre la exposición a vibraciones, lo que permitirá una gestión y monitoreo más efectivo. Esto lo convierte en una herramienta de análisis tanto presente como futura, sirviendo como punto de referencia para comprender la relación entre el desarrollo de síntomas y enfermedades en el entorno laboral relacionadas a la vibración.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Desarrollar un prototipo de dispositivo para el monitoreo de la vibración a la que están expuestos los operadores de herramientas mecánicas mediante la presentación de indicadores que permitan la gestión de este riesgo.

5.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información mediante la búsqueda en fuentes bibliográficas sobre las vibraciones en extremidades superiores y experimentación para la determinación de los requerimientos del mejor diseño del prototipo.
- Diseñar el sistema electrónico, mecánico y computacional utilizando los softwares ©SolidWorks, ©Proteus, ©Arduino IDE, ©Visual Studio y ©Wowki para el desarrollo en CAD, CAE y CAM del dispositivo.
- Realizar pruebas del prototipo en los trabajadores del sector industrial con el fin de la obtención de resultados y conclusiones.

6. ALCANCE Y LIMITACIONES

6.1. Alcances

- El prototipo tiene el objetivo de monitorear las vibraciones mediante la medición de la aceleración transmitida a la muñeca o antebrazo de la mano dominante del trabajador. El dispositivo integra desarrollo electrónico, mecánico y computacional para proporcionar información en tiempo real, facilitando así la gestión y prevención del riesgo.
- El trabajo de grado incluye un sistema de monitoreo con una interfaz gráfica en tiempo real, así como el almacenamiento de datos en una base de datos local. Esta base de datos permite la visualización de indicadores como la aceleración, el tiempo y los límites establecidos. Además, el uso y mantenimiento del prototipo son sencillos gracias a la accesibilidad y bajo costo de los materiales empleados. Se proporcionará un manual de usuario claro y fácil de seguir.
- Se realizarán pruebas preliminares para verificar su funcionamiento y la fiabilidad de los datos recopilados. Estas pruebas se llevarán a cabo en una empresa ubicada en la ciudad de Bogotá. El objetivo de estas pruebas es evaluar el desempeño del dispositivo y asegurar la precisión de las mediciones antes de considerar su implementación a gran escala.

6.2. Limitaciones

- El prototipo desarrollado es una solución de bajo costo para la gestión y prevención del riesgo asociado con las vibraciones. Debido a su enfoque económico, no se puede comparar directamente con dispositivos calibrados del mercado, como los vibrómetros.
- Como dispositivo de monitoreo, el prototipo solo proporciona datos en tiempo real sobre las vibraciones, pero no permite determinar la aparición de enfermedades o

dolencias. La evaluación de estos riesgos a largo plazo requeriría un registro histórico extenso y un conocimiento detallado de las condiciones de salud previas de los usuarios. Por lo tanto, aunque el dispositivo ayuda a gestionar y reducir la exposición a vibraciones, no puede garantizar que el seguimiento y la implementación de las recomendaciones prevendrán el desarrollo de enfermedades relacionadas con la exposición prolongada a vibraciones.

- La distancia de conexión Bluetooth entre el dispositivo y la PC/Tablet/Portátil está limitada a 10 metros. Además, el almacenamiento dependerá de la capacidad del dispositivo receptor, ya que se trata de un almacenamiento local y no en la nube, aunque exista la posibilidad de hacerlo en el futuro.

7. MARCO REFERENCIAL

7.1. Estado del Arte

Para el desarrollo del trabajo de grado se realiza una revisión de los proyectos y artículos actuales relevantes. A continuación, se muestra la información obtenida:

Tabla 1 Estado del arte

No	Tipo	Título	Autor	Año	Resumen
1	Artículo científico	Herramientas Manuales Vibrátiles y Guantes Anti-Vibrátiles	(Quinchía, Lizarazo, Robinson, Rincón, & Ariza, 2018).	2018	Se realiza un diseño experimental para identificar el efecto causado por el tipo de herramienta percutora y tipo de guante sobre la transmisibilidad de la vibración en las extremidades superiores. Las mediciones se realizaron a través de acelerómetros y se utilizaron tres tipos de guantes diferentes.
2	Trabajo de grado	Modelo para la vigilancia de la exposición a vibración mano-brazo en trabajadores de empresas del sector automotor.	(Nieto, Rojas, & Nestiel, 2019)	2019	Propone un programa que consta de una serie de tareas para la supervisión de la exposición a vibraciones y del ambiente de trabajo, la identificación de riesgos presentes en el lugar y los trabajadores expuestos, y por supuesto los posibles efectos adversos en la salud de los trabajadores derivados de su labor a corto, mediano y largo plazo.
3	Artículo científico	Sistema de medición portátil de bajo costo para estimar la exposición humana a las vibraciones	(Addabbo, y otros, 2019).	2019	Presenta un dispositivo portátil de bajo costo que permite el monitoreo de la exposición a las vibraciones y los riesgos que esto conlleva para la salud de los trabajadores de acuerdo con la norma ISO 5349-1.
4	Artículo científico	Prevalencia del síndrome de vibración mano-brazo entre trabajadores de talleres de neumáticos en Kelantan, Malasia	(Qamruddin, y otros, 2019)	2019	Estudio en el que participaron 200 trabajadores de talleres neumáticos los cuales se dividieron en grupos de exposición alta ($\geq 5\text{m/s}^2$) y baja/moderada ($< 5\text{m/s}^2$) según su promedio tiempo de exposición a vibraciones.
5	Artículo científico	Consideraciones metroológicas en los requerimientos de exposición a	(Lorente-Pedreille, Sebastián, & Sáenz-Nuño, 2020).	2020	Para una correcta medición de los factores de riesgo en el ámbito de la Seguridad y Salud en el Trabajo se debe tener en cuenta la normativa vigente correspondiente. Esta

No	Tipo	Título	Autor	Año	Resumen
		vibraciones en la normativa de seguridad y salud en el trabajo			normativa establece los valores de referencia para garantizar la seguridad de los colaboradores.
6	Artículo científico	Exposición a vibraciones mano-brazo en trabajadores perforadores de roca: una comparación entre mediciones con acelerómetros manuales y acelerómetros de herramientas.	(Clemm, Nordby, Lunde, Ulvestad, & Bråtveit, 2021).	2021	Comparación entre las mediciones realizadas por acelerómetros ubicados en el mango de la herramienta vibratoria y los ubicados en la muñeca del operario.
7	Artículo científico	Investigaciones sobre la idoneidad del acelerómetro basado en MEMS para mediciones de vibraciones	(Manikandan, Pannirselvam, Jack, & Suresh, 2021)	2021	Usualmente los sensores utilizados para medir vibraciones son los acelerómetros piezoeléctricos, pero en los últimos años ha surgido la tecnología de los llamados sensores MEMS. Este artículo evalúa los acelerómetros basados en MEMS y guiar al usuario para seleccionar un acelerómetro adecuado para la medición de vibraciones.
8	Trabajo de grado	Revisión tecnológica de las patentes existentes de dispositivos para el monitoreo y control del efecto chatter en los procesos de fresado CNC.	(Espinel & Pardo, 2022)	2022	Como contribución a la investigación y desarrollo de un dispositivo o tecnología que puede mitigar o reducir el efecto de vibración en las fresadoras CNC, en este documento se presentan las patentes existentes de dispositivos para monitoreo y control del llamado "fenómeno chatter".

Fuente: Propia de los autores

Este proyecto de investigación se basa en el monitoreo de la exposición a la vibración de los operadores de herramientas percutoras en el sector industrial, por esto es importante conocer la normativa nacional e internacional que regula las actividades y estándares para la evaluación del riesgo físico por vibración. Como lo explican los autores del documento "Modelo para la vigilancia de la exposición a vibración mano-brazo en trabajadores de empresas del sector automotor" quienes construyeron una guía basada en la normativa vigente para ser utilizada por las empresas que quieran garantizar el bienestar de los colaboradores (Nieto, Rojas, & Nestiel, 2019). Además, de acuerdo con las normas

se deben tener en cuenta los valores de referencia para una medición adecuada, cuanto más alta es la fiabilidad de la medición más seguro se encuentra el trabajador (Lorente-Pedreille, Sebastián, & Sáenz-Nuño, 2020)

Para la medición de la vibración a la que se exponen los operadores de herramientas o maquinaria mecánica se utilizan los acelerómetros. Los más comunes son los acelerómetros piezoeléctricos; sin embargo, en la actualidad ha surgido una nueva tecnología de acelerómetros: los MEMS. Estos ofrecen características superiores en comparación con los acelerómetros piezoeléctricos (Manikandan, Pannirselvam, Jack, & Suresh, 2021). Además, de la selección del sensor también se debe tener en cuenta el lugar donde se va a ubicar para realizar una correcta toma de datos, como exponen los autores del artículo “Exposición a vibraciones mano-brazo en trabajadores perforadores de roca: una comparación entre mediciones con acelerómetros manuales y acelerómetros de herramientas.” donde se expone una comparación entre las mediciones realizadas por acelerómetros ubicados en el mango de la herramienta vibratoria y los ubicados en la muñeca del operario. Como resultado se encontró que los acelerómetros manuales mostraban una magnitud de vibración más baja comparado con el acelerómetro de la herramienta. Además, en este caso, se plantea la idea de que la manera en la que los trabajadores agarran la herramienta interfiere en la medida que toma el acelerómetro manual (Clemm, Nordby, Lunde, Ulvestad, & Bråtveit, 2021)

Por otro lado, los acelerómetros no se utilizan solo para tomar mediciones de vibraciones que pueden exponer a los operarios a riesgos de salud. Estos sensores se utilizan también para mantenimiento industrial. En el proceso de fresado CNC existe un factor conocido como “fenómeno chatter” el cual es causado por mínimos movimientos de corte dentro del sistema máquina pieza de trabajo, esto produce imperfecciones en el producto terminado y desperdicio de material. Como solución para esta problemática se requiere un dispositivo o tecnología que pueda mitigar o reducir el efecto de vibración en las fresadoras CNC, como el desarrollo de dispositivos para monitoreo y control del llamado “fenómeno chatter” (Espinel & Pardo, 2022). La tecnología de monitoreo de vibraciones con acelerómetros puede utilizarse en herramientas, maquinaria y en los mismos operadores, considerando las características de cada caso.

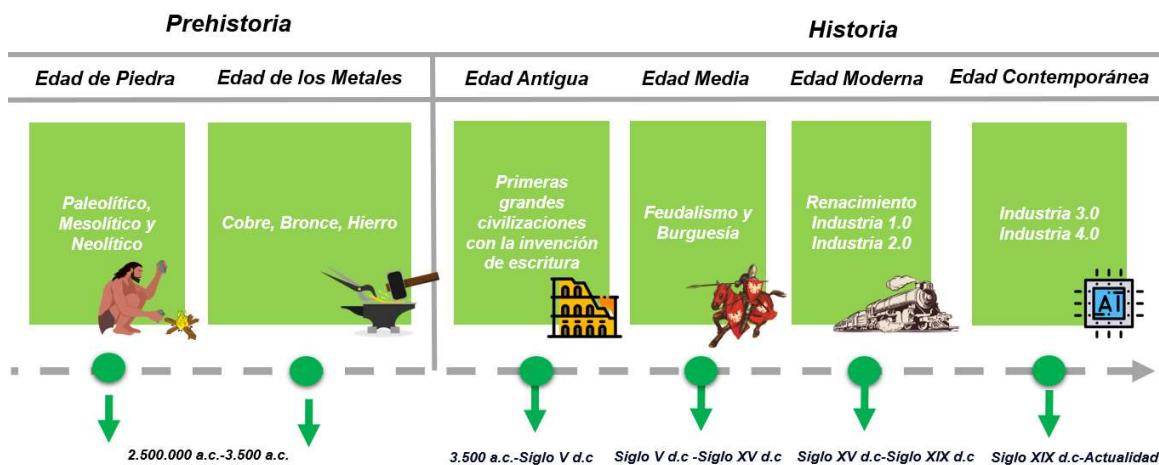
En materia de prevención y control de la exposición a las vibraciones, existe la posibilidad del uso de guantes ergonómicos anti vibrátiles, en el estudio realizado por Rigoberto Quinchía César Lizarazo y otros se realiza un diseño experimental con el objetivo de comparar guantes anti vibrátiles y su impacto en la transmisibilidad global en el uso de diferentes herramientas, dando como resultado que el uso de estos elementos de prevención o mitigación permiten a los operarios trabajar por periodos de tiempo mayores (Quinchía, Lizarazo, Robinson, Rincon, & Ariza, 2018)

Para el monitoreo de la vibración y el tiempo de exposición de los operadores de maquinaria percutora, se decide desarrollar un dispositivo portable para la toma de datos como el que presentan en el artículo “Sistema de medición portátil de bajo costo para estimar la exposición humana a las vibraciones” que permite el monitoreo de la exposición a las vibraciones y los riesgos que esto conlleva para la salud de los trabajadores de acuerdo a la norma ISO 5349-1 de 2002. El dispositivo funciona básicamente mediante el uso de dos sensores MEMS triaxiales para medir la vibración y comunica datos obtenidos mediante el uso de un módulo Bluetooth a una unidad base donde se almacena la información y puede ser posteriormente analizada (Addabbo, y otros, 2019).

7.2. Marco Histórico

La Salud Ocupacional y la Seguridad Industrial son disciplinas interrelacionadas que se abordan conjuntamente al analizar y gestionar riesgos, accidentes y enfermedades laborales. En esta sección se explorarán los eventos más relevantes a lo largo de la historia, influenciados por diversos factores históricos, sociales y económicos. Se examinarán los orígenes y la evolución de estos campos tanto a nivel global como nacional.

Figura 2 Línea cronológica global de la seguridad y salud en el trabajo



Fuente: Propia de los autores, adaptado de (Nieto S. , 2008)

En la Figura 2 se generaliza la línea de tiempo global. El diagrama completo con los detalles de acontecimientos se puede ver en el Anexo 1.

7.2.1. Global

7.2.1.1. Prehistoria

La Edad de Piedra y Metales, que abarca aproximadamente desde 2.500.000 a.C. hasta 3.500 a.C., marcó el inicio de la sedentarización humana y el desarrollo de actividades como la agricultura, caza y artesanías, conllevando a riesgos laborales constantes (Nieto S. , 2008). En este periodo, el homo neandertal empezó a concienciar de la protección ante

peligros y riesgos, primero individualmente por temor a lesiones, evolucionando hacia un enfoque colectivo por el bien de la sociedad (Gallegos, 2012). Surgieron así los primeros artefactos de protección, como protectores de piedra, hueso y barro para las muñecas y el control del fuego (Robledo, 2006), mientras que otras medidas como férulas y prácticas como amputaciones para preservar la vida fueron descritas por (Molano & Arévalo, 2013)

7.2.1.2. Historia

Esta división en la línea de tiempo marca la separación con la prehistoria por la aparición de registros escritos que documentan los eventos y desarrollos de la humanidad hasta la fecha.

7.2.1.2.1. Edad Antigua

De acuerdo con (Nieto S. , 2008), esta edad se sitúa aproximadamente desde finales de los años 3.500 a.C. hasta inicios del siglo V d.C. Además, se destacan las grandes civilizaciones como Mesopotamia, Egipto, Grecia y Roma, que desarrollaron la escritura (Ayala, 2005) .En estas sociedades, los esclavos realizaban la mayoría de las labores sin medidas de salud ocupacional o control de seguridad (Gallegos, 2012)

En Mesopotamia, se establecieron códigos o normas como el código Hammurabi, que regulaban aspectos laborales y de convivencia social; estos códigos establecían medidas de control sanitario, trabajo y campos de esclavitud (Robledo, 2006). En el antiguo Egipto la protección de los trabajadores estaba asociada al faraón, y los esclavos utilizaban arneses, andamios y sandalias como elementos de seguridad, aunque se consideraban reemplazables y no se tenían en cuenta los riesgos para su salud (Gallegos, 2012). En Grecia, según (Jiménez Leen, 2017) se avanzó en la comprensión de las enfermedades laborales, especialmente en las minas, y se documentaron los peligros de la metalurgia, como la intoxicación por plomo. En Roma, Plinio y Galeno estudiaron la toxicidad en las minas, siendo Plinio quien desarrollo la primera máscara respiratoria para evitar la inhalación de vapores nocivos (Robledo, 2006).

7.2.1.2.2. Edad Media

Esta época se sitúa aproximadamente entre el siglo V d.C. hasta inicios del siglo XV d.C. (Nieto S. , 2008), se caracteriza como un estancamiento cultural y científico debido a un sistema regido por una jerarquía feudal y el acompañamiento eclesiástico (José Ignacio Rojas-Sola & Hernández-Díaz, 2011). Las condiciones de higiene y salubridad eran precarias, lo que resultaba en que la mortalidad y las enfermedades laborales se solían confundir con las patologías generales, dificultando identificar y tratar específicamente las condiciones relacionadas con el trabajo (Garay, y otros, 2020).

Lo más destacable de esta época fueron las órdenes religiosas como fuente de beneficencia y ayuda hospitalaria. Durante el siglo XII, Guy de Montpellier estableció las órdenes hospitalarias con protocolos para los servicios médico-paciente. En el siglo XIV, en Venecia se creó el consejo de salud. Finalmente, gracias al avance de los árabes, Avicena aportó a la definición de medicina, dosificación y preparación de remedios. (Ayala, 2005)

7.2.1.2.3. Edad Moderna

Según (Ayala, 2005), este periodo se ubica aproximadamente entre el siglo XV d.C. y el inicio del siglo XIX d.C., describiéndolo como una época orientada al progreso que conllevó a cambios económicos, políticos y tecnológicos significativos. En el campo de la salud y la seguridad, los científicos dirigieron su atención hacia los rasgos técnicos del trabajo, postergando la consideración de la seguridad hasta más tarde, lo que resultó en un período de espera para la salud ocupacional hasta el final del siglo XIX (Alvarado, 2019).

7.2.1.2.4. Renacimiento

Este periodo se sitúa aproximadamente entre el siglo XV y el XVI, caracterizado por un movimiento cultural que utilizó la antigüedad como transición de la Edad Media a la Moderna (Nieto S. , 2008). Para (Robledo, 2006), este período marcó la fundación de las primeras universidades, que a su vez condujeron a las ordenanzas de Francia, las primeras leyes que protegen a los trabajadores, establecidas entre 1413 y 1417.

Desde 1450 en adelante, con la invención de la imprenta, se permitió la difusión de documentos sobre seguridad y salud ocupacional, destacando las correcciones anatómicas de Vesalico y Ulrich Ellenbaf. (Gallegos, 2012). En el periodo de 1492 a 1555, se destaca el trabajo de Agrícola y Paracelso, quienes describieron enfermedades laborales y propusieron medidas preventivas (Robledo, 2006). Entre 1633 y 1714, Bernardino Ramazzini es considerado el padre de la medicina ocupacional por su tratado que detalla los riesgos laborales (Sanchez, Macias, & Ramirez, 2022).

7.2.1.2.5. Primera Revolución Industrial-Industria 1.0

Se sitúa aproximadamente desde el año 1760 al 1890 (Nieto S. , 2008), siendo un paso de forma gradual del trabajo artesanal manual a la mecanización con la introducción de sistemas de producción y transporte impulsados por vapor (Gonzalez, y otros, 2021). En términos de seguridad y salud ocupacional, se caracterizaba por condiciones laborales infrahumanas y técnicas de trabajo peligrosas debido a la falta inicial de medidas de seguridad y reglamentación (Molano & Arévalo, 2013). Uno de los hitos más relevantes ocurrió en 1778 con el edicto de Carlos III en España para proteger contra accidentes laborales, seguido por la formación de los primeros sindicatos de trabajadores en 1795, los cuales abogaban por medidas de seguridad y bienestar social (Molano & Arévalo, 2013). En 1802, el parlamento inglés promulgó regulaciones laborales para fábricas que limitaban las horas de trabajo y establecían estándares de higiene, salud y educación para los trabajadores. Esto condujo a la creación de escuelas dentro de las fábricas para capacitar al personal. Posteriormente, en 1848, se estableció legislación sanitaria para la industria, seguida por inspecciones de cumplimiento dos años después. Estos avances llevaron a la fundación de institutos de higiene y seguridad en Múnich en 1875 y en Inglaterra en 1876. (Gallegos, 2012)

En 1802, el parlamento inglés promulgó regulaciones laborales para fábricas que limitaban las horas de trabajo y establecían estándares de higiene, salud y educación para los trabajadores. Esto condujo a la creación de escuelas dentro de las fábricas para capacitar al personal. Posteriormente, en 1848, se estableció legislación sanitaria para la industria, seguida por inspecciones de cumplimiento dos años después. Estos avances

llevaron a la fundación de institutos de higiene y seguridad en Múnich en 1875 y en Inglaterra en 1876. (Gallegos, 2012)

7.2.1.2.6. Segunda Revolución Industrial-Industria 2.0

Este período abarca desde 1870 hasta 1914, destacándose por la invención de la producción de electricidad y el modelo de producción en masa de Henry Ford (Gonzalez, y otros, 2021). En términos de seguridad y salud, las medidas y normas en las máquinas eran pasadas por alto, ya que se necesitaba mano de obra barata sin ofrecer protección adecuada. Engels reportó en 1871 que las máquinas en Manchester operaban sin protección, lo que llevó a la instalación de protecciones en 1877. (Gallegos, 2012)

Después de la Revolución Industrial, que resultó en numerosas muertes, mutilaciones y peligros, se estableció formalmente la seguridad industrial en 1883. Seguido a esto se originó la Revuelta de Chicago en 1886 que marcó un hito al conseguir reducir la jornada laboral a 8 horas. A pesar de este avance, las condiciones laborales seguían siendo precarias. En años posteriores se implementaron más medidas: en 1867 se nombraron inspectores, en 1898 se responsabilizó a las empresas por accidentes y en 1890 se generalizó la legislación de protección a los trabajadores contra riesgos laborales. (Robledo, 2006)

7.2.1.2.7. Edad Contemporánea:

Esta época abarca desde el siglo XIX hasta la actualidad, con un enfoque particular en el periodo posterior a 1945 (Blanes, 2002). Durante este tiempo, se han producido eventos históricos significativos, como la transición a la industria 3.0 y 4.0, lo que ha llevado a catalogar esta era como una época de innovación, cambios drásticos y desarrollo industrial continuo. Sin embargo, según (Molano & Arévalo, 2013), este progreso también ha traído consigo una serie de peligros para la población laboral, ya que las medidas de seguridad para el manejo de las máquinas eran inexistentes o eran ignoradas.

7.2.1.2.8. Industria 3.0 y 4.0

La industria 3.0 se inició en los años 70 y continúa hasta la actualidad, mientras que la industria 4.0 es más una visión futura que aún no se ha implementado por completo. La diferencia clave entre ambas radica en que la industria 3.0 se centra en la automatización con memorias programables (Sharma, 2020). Mientras que la industria 4.0 se basa en sistemas de manufactura conectados a través del Internet de las cosas, utilizando inteligencia artificial, Big Data y robótica (Polak, Wisniewski, Walaszczyk, Maczewska, & Sopinski, 2019). En cuanto a seguridad y salud ocupacional, se han establecido leyes para estructurar el sistema de gestión y seguridad en el trabajo (SGST), convirtiéndose en un pilar fundamental para las empresas al priorizar la seguridad sobre los intereses productivos. (Sanchez, Macias, & Ramirez, 2022). Aparte de la implementación de nuevas tecnologías y métodos para el control, prevención y análisis de los riesgos laborales, cómo lo son los equipos de seguridad y ergonomía (Benson, Chukwuma, Akinwande, & Ile, 2023).

Entre los eventos destacados desde 1919 hasta hoy están la creación de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y el Tratado de Versalles en 1919, que originó el Servicio de Prevención de Accidentes en 1921. En 1970, se aprobó una ley que dio lugar a la creación de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) y el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH). (Robledo, 2006)

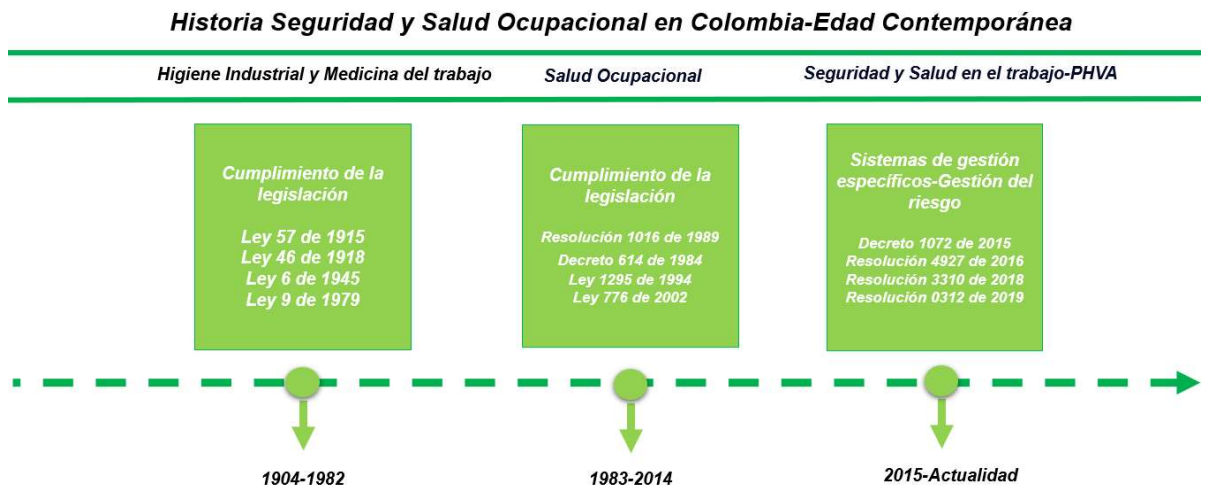
En 1999, se establecieron la norma OSHA 18001 para garantizar la salud y seguridad ocupacional, seguidas por la norma ANSI Z10, que dio paso a los sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo. En 2018, se publicaron las normas ISO 31000 y ISO 45001, centradas en la gestión del riesgo y la mejora continua de la seguridad y salud en el trabajo, respectivamente. Actualmente, se están implementando equipos de medición portátiles, EPP inteligentes y wearables empresariales para monitorear variables asociadas a la carga laboral, con el objetivo de promover el bienestar y la seguridad de los trabajadores (Márquez-Sánchez, Campero-Jurado, Herrera-Santos, Rodríguez, & Corchado, 2021). A pesar de estos avances, sigue siendo un desafío garantizar que los trabajadores cumplan con las normas de seguridad y utilicen el equipo de protección adecuado, lo que requiere un enfoque costo-beneficio para empresas y empleados. (Sanchez, Macias, & Ramirez, 2022)

7.2.2. Nacional

En Colombia, la implementación de medidas de salud ocupacional y seguridad en el trabajo se retrasó hasta inicios del siglo XX (Robledo, 2006). Esto se debió en gran medida a los sistemas de producción vigentes, que se sustentaban en la explotación de mano de obra económica y en una mecanización muy limitada de los procesos. (Lizarazo, Fajardo, Berrio, & Quintana, 2010). Además, que era un campo desconocido por lo que había bastantes injusticias y accidentes sin control alguno. (Lopez & Rodriguez, 2019) este cambio a través del tiempo se puede ver en la figura 3 de manera resumida.

Inicialmente, la prevención de riesgos laborales se enfocaba en la higiene industrial, aplicando medidas para evitar accidentes y enfermedades entre los trabajadores. Sin embargo, se reconoció la insuficiencia de estas medidas y la necesidad de intervención médica (Molano & Arévalo, 2013). Por esta razón, este enfoque evolucionó hasta convertirse en medicina del trabajo. Este término se manejó según (Lopez & Rodriguez, 2019) desde 1904 hasta 1982, siendo un punto de partida en 1904, cuando se planteó la primera política orientada a la seguridad de los trabajadores durante la conferencia de Rafael Uribe Uribe sobre seguridad laboral. Posteriormente en 1910 se estableció la indemnización para los trabajadores víctimas de accidentes laborales y se creó la Ley de Uribe o Ley 57 de 1915. Durante este periodo, se reconocen otras leyes importantes como la Ley 46 de 1918, la Ley 6 de 1945 y la Ley 9 de 1979 (Robledo, 2006)

Figura 3 Línea cronológica Nacional de la seguridad y salud ocupacional en el trabajo



Fuente: Propia de los autores, adaptado de (Molano & Arévalo, 2013)

Con la inclusión de diversas disciplinas en la medicina del trabajo, su concepto se vio limitado. Por ello, según (Molano & Arévalo, 2013), el campo evolucionó hacia la salud ocupacional, que ofrece un enfoque más integral en la prevención y mitigación de los efectos de la exposición en la salud, con el fin de prevenir enfermedades. En este periodo, desde 1983 hasta 2014, donde se empieza a considerar al trabajador como un ser integral, con aspectos sociales, físicos y emocionales que influyen en su trabajo y sus relaciones (Lopez & Rodriguez, 2019). En términos de normatividad, el primer evento significativo fue la creación del Decreto 614 de 1984, seguido de otros eventos como la Resolución 1016 de 1989, la Ley 1295 y 1294 de 1994, y la Ley 100 de 1993 (Robledo, 2006)

Posteriormente, se presenta la transformación de la salud ocupacional hacia el Sistema de gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) (García, Navarro, & Parra, 2020). Este cambio se da en 2015 hasta la actualidad, de acuerdo con (Cano & Gonzales, 2020) a raíz de la declaración de Seúl, con el fin de promover una cultura de ambientes de trabajo seguros y saludables, enfatizando en la prevención y mitigación del riesgo al concientizar a los empleadores. En cuanto a la normatividad, la primera norma que inicia este nuevo cambio fue el Decreto 1072 de 2015 (Rodríguez, Cárdenas, Álvarez, Pérez, & Palencia, 2022), seguido a otras normativas como la resolución 4927 de 2016, Resolución 3310 de 2018 y la Resolución 0312 de 2019 (Lopez & Rodriguez, 2019)

El grado de desarrollo empresarial en Colombia solo alcanza el 50% debido a los problemas de transición y adaptación que enfrenta el Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) en las empresas (García, Navarro, & Parra, 2020). Estos problemas incluyen la falta de compromiso de los trabajadores, el alto costo del mantenimiento del sistema, la desinformación y la limitación de recursos y materiales. Sin embargo, implementando medidas progresivas se podrían reducir los riesgos, los accidentes y los costos asociados, mejorando así el nivel de producción (Rodríguez, Cárdenas, Álvarez, Pérez, & Palencia, 2022)

7.3. Marco Geográfico

Bogotá, la capital de Colombia, se encuentra en el centro del país, en la cordillera de los Andes, a una altitud aproximada de 2.640 metros sobre el nivel del mar. Su ubicación geográfica está marcada por las coordenadas 4.61° de latitud norte y 74.08° de longitud oeste. Según el Ministerio de Salud, la ciudad alberga a 7.929.539 habitantes, de los cuales el 99,6% reside en áreas urbanas y solo el 0,4% en zonas rurales. (Ministerio de Salud, 2024)

La empresa en cuestión está ubicada en la localidad de Suba, que cuenta con una población de 1.294.358 personas, de las cuales 1.290.144 viven en áreas rurales y 4.214 en zonas urbanas. (Secretaria Distrital de Integración Social, 2024)

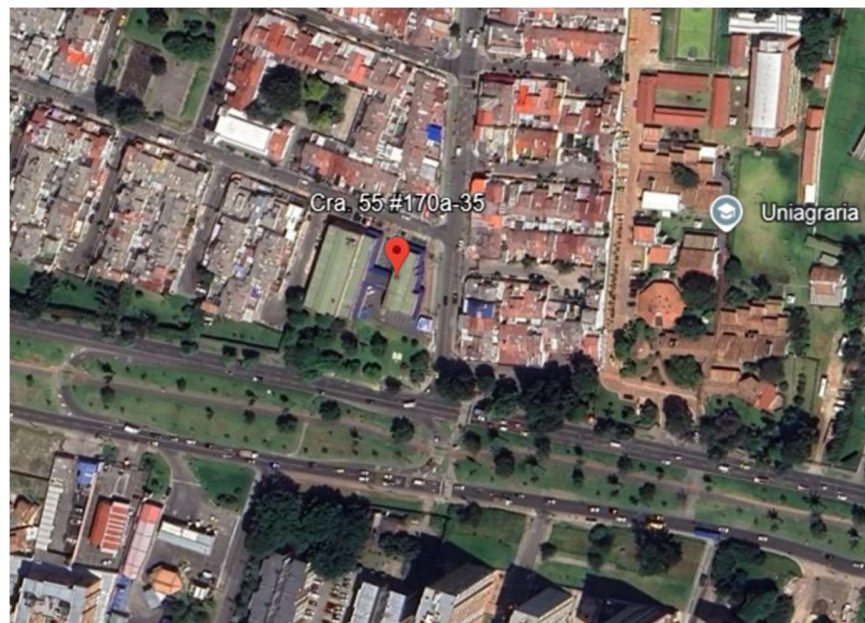
La recopilación de datos se realizó en dos empresas; sin embargo, solo una permitió la implementación del prototipo, mientras que en la otra solo se llevaron a cabo encuestas. Por lo tanto, este proyecto se enfoca en la empresa que facilitó dicha fase. Sus oficinas se encuentran en la Cra. 55 #170A, Suba local 35 oficina 04, aunque la operación civil se realiza en los lugares donde se solicitan los servicios. Además, la empresa cuenta con un taller de carpintería.

Se trata de una pyme multiservicios dedicada a la construcción y manufactura. El equipo de trabajo está compuesto por 10 empleados que desempeñan diversas funciones

administrativas, logísticas y operativas. De ellos, solo 3 están en constante riesgo de exposición a vibraciones.

Para facilitar la identificación de la ubicación exacta de la empresa, se puede consultar la figura 4, donde se muestra su localización en @Google Earth.

Figura 4 Ubicación geográfica de la empresa en @Google Earth



Fuente: (Google Earth, 2024)

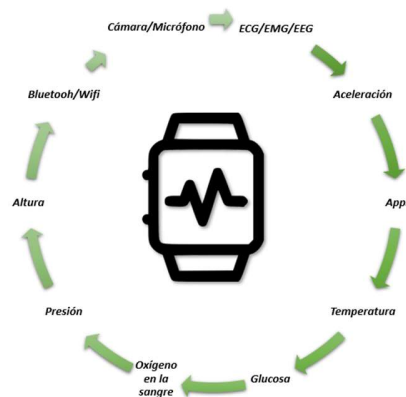
7.4. Marco Teórico

Para el desarrollo de este proyecto de investigación es necesario abordar las siguientes temáticas:

7.4.1. Wearables

Los wearables son dispositivos portátiles que tienen la capacidad de detectar, recopilar y cargar datos fisiológicos en tiempo real, según la aplicación específica que se les dé. En el ámbito de la salud, ofrecen una propuesta de valor al permitir un seguimiento detallado y preciso de la salud humana a través de sensores y actuadores. (Seneviratne, y otros, 2017) Estos se pueden usar en distintas partes del cuerpo y llevan equipados sensores para obtener datos del contexto interno o externo del usuario. (Vidal, 2018)

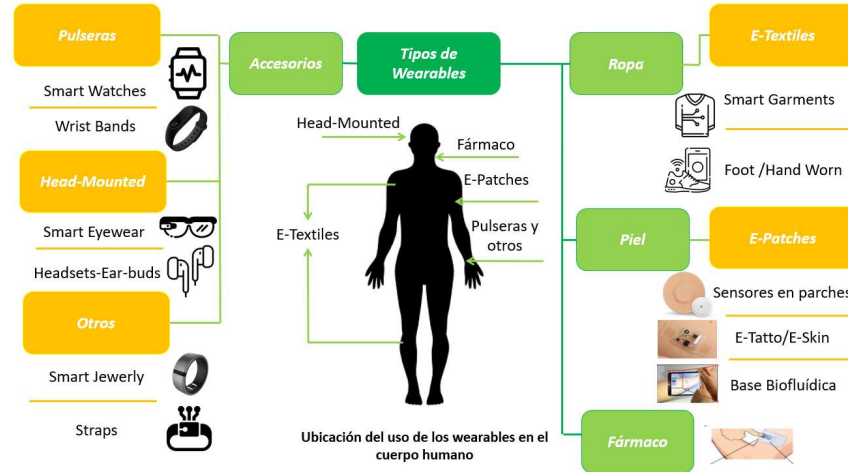
Figura 5 Funcionalidades generales de los Wearables



Fuente: Propia de los autores

En los últimos años, ha surgido en el mercado una amplia variedad de wearables con una amplia gama de funciones y usos. Estos dispositivos son principalmente no invasivos y se utilizan para monitorear una serie de variables fisiológicas y del entorno, como la altura, la presión, la temperatura, el oxígeno en la sangre, la glucosa, el ECG y la ubicación, entre otros. Estas funciones se pueden ver en la figura 5.

Figura 6 Tipos de Wearables dependiendo de su uso y ubicación en el cuerpo humano



Fuente: Propia de los autores

Los tipos de wearables se clasifican según su uso como accesorios, prendas de vestir, dispositivos para la piel o incluso como fármacos, lo que les confiere variabilidad según las necesidades del usuario, esto se puede visualizar de manera gráfica en la figura 6 o catalogado en la tabla 2.

Tabla 2 Especificaciones detalladas de algunos de los wearables y ejemplos en el mercado

Tipo de Wearable	Especificaciones	Ejemplos en el mercado	Fuente
Smart Watches- Relojes inteligentes	Son dispositivos multifuncionales que actúan como extensiones de los teléfonos inteligentes. Además de recibir notificaciones y permitir interacciones breves, también monitorizan señales fisiológicas y biomecánicas, facilitando así el seguimiento de las actividades diarias de los usuarios. Posteriormente, los datos recolectados se transfieren para su análisis y presentación a través de paneles de control, ya sea en el teléfono o en la nube.	Apple iWatch, Samsung Gear, Moto 360, Huawei Watch, Xiaomi Redmi Watch	(Seneviratne, y otros, 2017) (Guk, y otros, 2019)

Tipo de Wearable	Especificaciones	Ejemplos en el mercado	Fuente
Wrist Bands- Bandas	Comparten ciertas similitudes con los relojes inteligentes, pero su enfoque se centra en actividades físicas y de salud, mediante el seguimiento de señales fisiológicas o biomecánicas. En su mayoría, carecen de pantalla, lo que significa que los datos se pueden visualizar a través de un teléfono móvil. Sin embargo, esta ausencia de pantalla no supone un obstáculo, ya que estas pulseras realizan un seguimiento de manera pasiva y registran las actividades automáticamente.	Xiaomi smart band, Huawei Band, Samsung Galaxy fit, Sony smart band	(Seneviratne, y otros, 2017)
Smart Garments-Ropa Inteligente	Las prendas electrónicas se asemejan notablemente a la ropa convencional, como camisas, pantalones o ropa interior, con la diferencia de que son más cómodas y están fabricadas con fibras conductoras y circuitos flexibles. Estas prendas detectan y transmiten datos, principalmente a través de una aplicación, que registra variables fisiológicas para su uso en entrenamiento o deporte.	Athos, Hug Shirt, Solar Shirt, Spinovo	(Seneviratne, y otros, 2017) (Iqbal, Mahgoub, Du, Leavitt, & Asghar, 2021)

Fuente: Propia de los autores

Una categoría aparte de las anteriores que abarca a los wearables, como accesorios, ropa y tatuajes, son los Smart EPP o EPP inteligentes. Esta no se considera un subconjunto específico, sino más bien un término general que depende de si el wearable tiene esta finalidad, que es proporcionar tecnología para la detección y reducción de los riesgos para la salud y la seguridad del trabajador.

La eficacia de estos equipos de protección personal está intrínsecamente ligada a su diseño, ya que éste influye directamente en la ergonomía del dispositivo y, por ende, en la capacidad de los trabajadores para utilizarlos de forma constante y adecuada. (Mokhtari, Cheng, Wang, & Foroughi, 2023)

En comparación, los métodos manuales tradicionales de control de salud y seguridad en la industria suelen ser ineficientes, consumiendo una cantidad considerable de tiempo y energía. Esto resulta en retrasos significativos en la generación de informes y en la identificación oportuna de riesgos. Por tanto, la implementación de estos equipos no

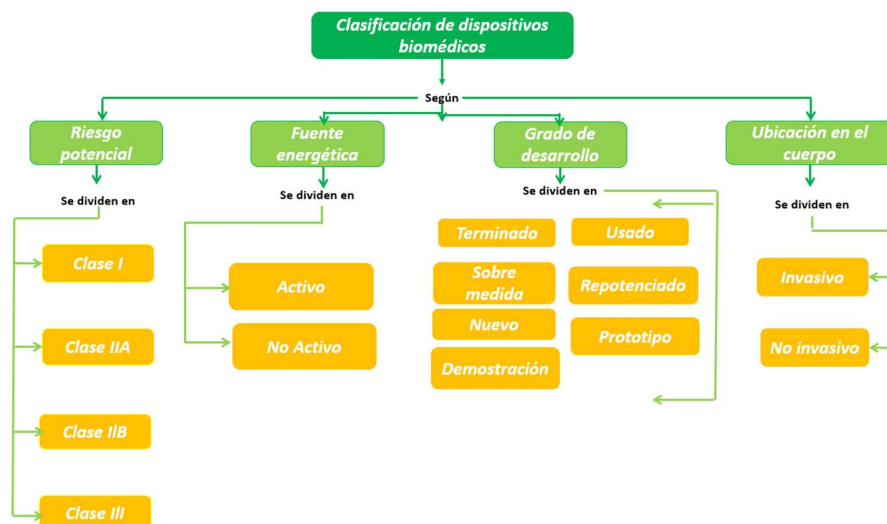
solo optimiza las operaciones, sino que también mejora la calidad del rendimiento laboral y contribuye a un entorno de trabajo más seguro. (Mokhtari, Cheng, Wang, & Foroughi, 2023)

A pesar de sus ventajas, la adopción de tecnologías de protección personal enfrenta desafíos como la cobertura limitada de red, la gestión de la transferencia de datos y la capacidad de los sistemas de almacenamiento para manejar la cantidad creciente de información generada. (Mokhtari, Cheng, Wang, & Foroughi, 2023)

7.4.2. Dispositivos Biomédicos

Un dispositivo biomédico es cualquier instrumento, aparato, máquina, software, equipo, o elemento relacionado que interviene en el diagnóstico, prevención, monitoreo, alivio, investigación, o cuidado de la salud de las personas. (Ministerio de Salud y Protección Social, 2005) Para que el dispositivo actual sea catalogado dentro de esta categoría en el campo de la bioingeniería, es necesario considerar su clasificación, la cual se divide según el riesgo potencial, la fuente energética, el grado de desarrollo, y la ubicación en el cuerpo. Estos aspectos se ilustran en la figura 7.

Figura 7 Clasificación de los dispositivos biomédicos según criterios del Invima



Fuente: Propia de los autores, adaptado de (Ministerio de Salud y Protección Social, 2005).

Teniendo en cuenta lo descrito en la figura 6, el dispositivo en cuestión se clasifica como Clase IIA debido a su exposición a un riesgo moderado, lo que requiere controles especiales durante la fase de fabricación para garantizar su seguridad y eficacia. Desde el punto de vista energético, se considera un dispositivo no activo, ya que depende de una fuente de alimentación externa al cuerpo. (Ministerio de Salud y Protección Social, 2005) Además, dado que el dispositivo aún no ha sido sometido a controles del INVIMA y no ha sido introducido en el mercado, se encuentra en fase de prototipo. Finalmente, según su ubicación en el cuerpo, se clasifica como no invasivo, ya que no ingresa ni tiene contacto interno con el organismo. (Ministerio de Salud y Protección Social, 2005)

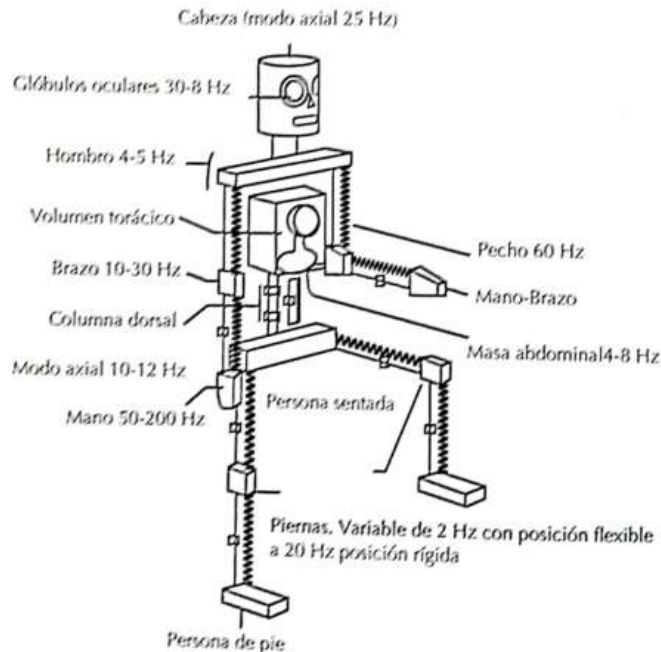
7.4.3. Contextualización de la Vibración Laboral: Efectos, Medición, Valores Límites y medidas de prevención

7.4.3.1. Efectos de la Vibración en el Cuerpo Humano

El cuerpo humano es un sistema biológico y físico extremadamente complejo, cuya respuesta a las vibraciones se entiende como un conjunto de masas interconectadas elásticamente que pueden moverse en más de una dirección. Ante ello los efectos varían siendo mecánicos, biológicos, fisiológicos y psicológicos. (Robledo, 2014). Por otro lado, para (Sigcha, 2017), este se comporta con cierta similitud a un sistema mecánico ya que en diversas partes del cuerpo se puede amortiguar la vibración y en otras dependiendo de la frecuencia de resonancia puede aumentar esta.

Teniendo en cuenta la forma de responder del cuerpo, (Robledo, 2014) define las frecuencias de resonancia de los órganos más representativos mediante un sistema del cuerpo en la figura 8.

Figura 8 Sistema biodinámico completo del cuerpo de masas interconectadas



Fuente: Tomado de (Robledo, 2014)

Dentro del sistema una de las partes más importantes a tener en cuenta para la exposición de vibraciones, es el volumen torácico con rangos de 3 a 6 Hz, lo que hace difícil de aislar o disminuir la exposición ya sea que este la persona sentada o de pie. Otros que destacan son la cabeza -cuello con una frecuencia entre los 20-30 Hz y finalmente el cráneo-mandíbula de 100 a 200 Hz. (Robledo, 2014)

Según (Robledo, 2014) los síntomas de cuerpo entero más comunes que se evidencian son: dolor, entumecimiento, cianosis en los dedos, dolor de cabeza, sensación de incomodidad, síntomas en la mandíbula inferior, influencia sobre la palabra, nudo de la garganta, dolor en el tórax, dolor en el abdomen, incitación a orinar, contracciones musculares y daño en las articulaciones. Aunque esto varía según amplitud de la vibración, la forma de usar la máquina y el tiempo de exposición.

Aparte de esto también es de importancia conocer como estos síntomas se presentan en según el rango de frecuencia, el cual se puede evidenciar en la tabla 3.

Tabla 3 Síntomas según rango de frecuencia

Síntomas	Rango de frecuencia (Hz)
Sensación de incomodidad	4-9
Dolor de cabeza	11-20
Síntomas en la mandíbula inferior	6-8
Influencia sobre la palabra	13-20
Nudo en la garganta	12-16
Dolor de tórax	4-7
Dolor de abdomen	4-10
Estimular la diuresis	10-18
Contracciones musculares	4-8

Fuente: Tomado de (Robledo, 2014)

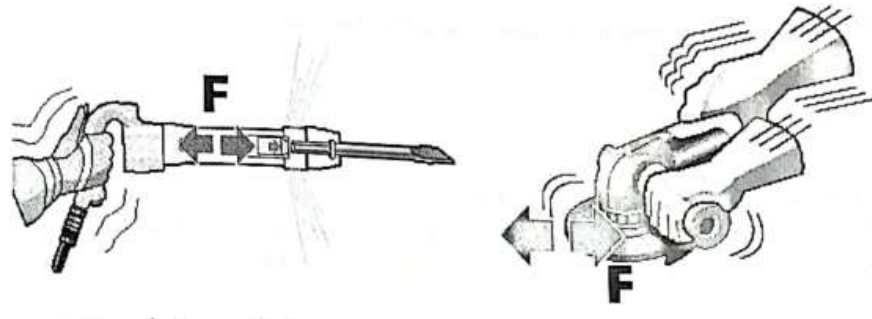
7.4.3.2. Efectos de la vibración en la sección mano-brazo

Los efectos en esta zona se originan por la transmisión de energía de herramientas portátiles mecánicas, eléctricas o neumáticas que mediante contacto en la región mano-brazo y esto sumado a la exposición supone riesgos para la salud y seguridad de los trabajadores. (Robledo, 2014)

Aunque también hay otros factores a considerar como la dirección de la vibración, el método de trabajo (utilidad y agarre de la herramienta), la destreza (fuerza de presión y de empuje, y posición del brazo), la dosis diaria a la que se expone, severidad y prevalencia de los síntomas y susceptibilidad de trabajador. (Robledo, 2014). Complementado estos aspectos (Morello, Capua, & Meduri, 2010), enfatizan que la presión de agarre y la postura pueden modificar la cantidad de energía transmitida y absorbida en esta zona. Por ende, es posible controlar estos aspectos mediante la selección adecuada de la herramienta, cambios en las prácticas laborales, gestión de los tiempos de exposición, seguimiento médico y el uso adecuado de los Equipos de Protección Personal (EPP)

Para el sistema mano-brazo, la respuesta a la vibración no solo depende de una dirección de excitación si no de varios ejes dependiendo del uso de la herramienta como lo es X, Y, Z, esto se puede evidenciar en la figura 9. Siendo la máxima frecuencia de resonancia entre los 12 y 16 Hz. (Robledo, 2014)

Figura 9 Respuesta a la dirección de la vibración en ejes



Fuente: Tomado de (Robledo, 2014)

La evidencia clínica en cuanto a sobreexposición de vibración por uso de herramientas en sistemas mano-brazo, se puede agrupar en 4 grupos, de acuerdo con (Robledo, 2014). Estos son:

- Síndrome traumático vasoespástico en la forma de Raynaud
- Neuritis y alteraciones degenerativas en los nervios cubital y axial, pérdida de sentido del tacto, sensaciones térmicas, debilidad muscular, parálisis y anomalías del sistema nervioso central
- Descalcificación de los huesos carpianos y metacarpianos, fractura, deformación y necrosis.
- Atrofia muscular y tenosinovitis

La exposición en esta zona puede producir daños físicos tanto temporales como permanentes, los más comunes son: entumecimientos, HAVS, Tendinitis, Síndrome del dedo blanco, Síndrome de Raynaud y trastornos musculoesqueléticos. (Robledo, 2014)

7.4.3.3. Estructura de los dispositivos de medición de la vibración

Figura 10 Dispositivos actualmente usados en el mercado



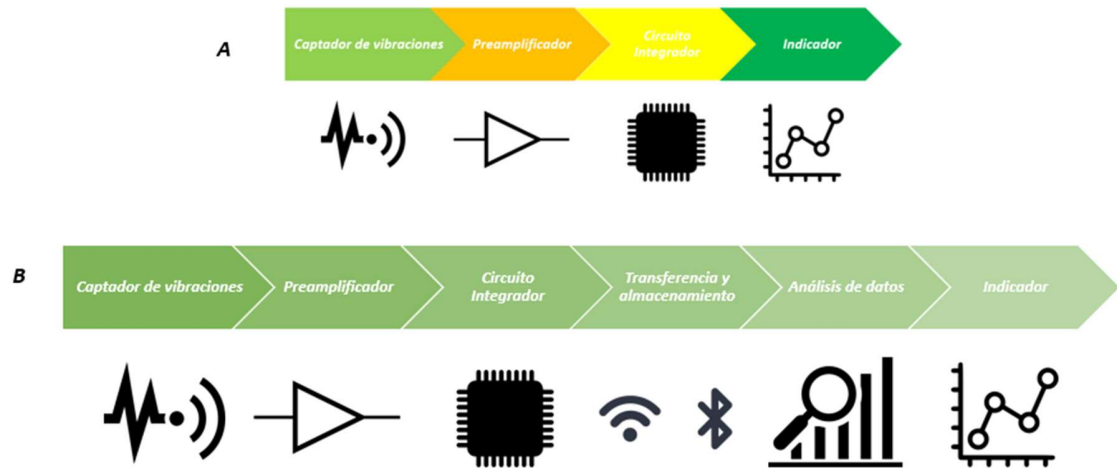
Fuente: Propia de los autores, Adaptada de a y b) (TME Electronics Components, 2024) y c) (Maedaa, Taylor, Anderson, & McLaughlin, 2019)

Al recopilar los dispositivos que se utilizan actualmente, (Fernandez, 2024) los cataloga según el tipo de medición, ya sea periódica o continua. Los dispositivos de medición periódica incluyen vibrómetros de bolsillo o de mano y analizadores de frecuencia, así como los wearables en varias investigaciones científicas, los cuales están presentes en la figura 10. Por otro lado, están los dispositivos de medición continua, que son sistemas donde se integra el sensor a la maquinaria o herramienta. En su mayoría de dispositivos mencionados anteriormente siguen la siguiente estructura: Captador de vibraciones (acelerómetro/frecuencímetro), Preamplificador, analizador amplificador e indicador. (Robledo, 2014)

Según los estudios de (Mokhtari, Cheng, Wang, & Foroughi, 2023) y (Chawla, 2020), la estructura de los sistemas de EPP inteligentes varía significativamente. Tras el circuito integrador, se incorpora una fase de transferencia de datos, seguida de un análisis de estos datos para generar puntos de emergencia en caso de un accidente. Finalmente, se presenta la información mediante un indicador en una plataforma o interfaz.

En el caso de (Mokhtari, Cheng, Wang, & Foroughi, 2023) ,la transferencia de datos se realiza directamente hacia la nube. Por otro lado, para (Suranthaa, Atmajab, David, & Wicaksono, 2021), los datos primero se transfieren a un teléfono antes de llegar a la nube. En contraste, (Santucci, Presti, Massaroni, Schena, & Setola, 2022) ofrece una alternativa distinta aparte de transferirlos mediante Bluetooth y Wifi, los almacena en una memoria SD.

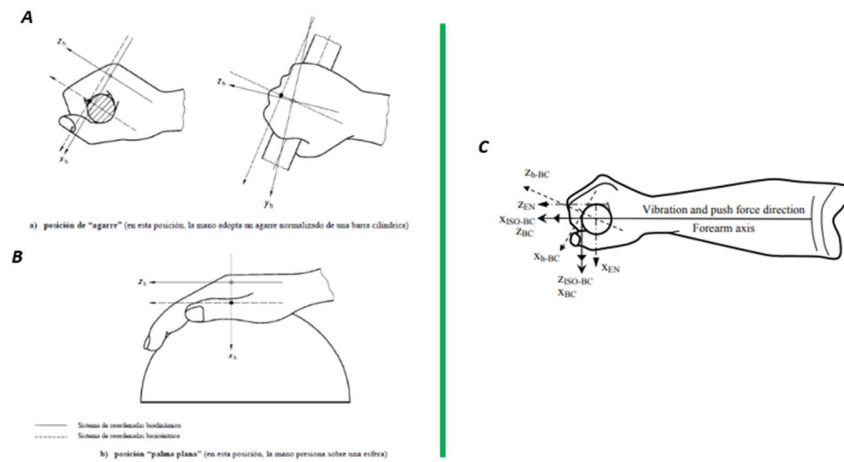
Figura 11 Visualización de A) Esquema de la estructura común de los dispositivos medidores de vibración y B) Esquema de la estructura de los Smart EPP



Fuente: Propia de los autores, Adaptado de A) (Robledo, 2014) y B) (Mokhtari, Cheng, Wang, & Foroughi, 2023)

La estructura de los dispositivos convencionales de la figura 11 en la parte A, funciona inicialmente con el captador de vibraciones, que normalmente es un acelerómetro, encargado de captar la medida de la vibración debido a las fuerzas a las que es sometido. (Robledo, 2014) Cabe resaltar que las vibraciones se producen en diferentes direcciones y frecuencias, por lo que en la zona del brazo-mano se debe medir teniendo en cuenta la norma ISO 5349 de 2002, la cual menciona que se deben considerar los ejes X, Y y Z, además de la ubicación de la medición en una zona entre la mano y el brazo que no interrumpa la labor. (Sigcha, 2017). Por lo cual en la figura 12, se especifica los ejes ortogonales de la mano y el brazo que se deben de tener en cuenta en diferentes posiciones, para medir la vibración.

Figura 12 Sistemas estándar de coordenadas de la mano para agarrar un mango cilíndrico definidos en ISO 5349-1 e ISO 8727 A) Sistema de coordenadas biodinámicas en los ejes X, Y, Z en posición de agarre, B) Sistema de coordenadas biodinámicas en los ejes X, Z, en posición palma palma) Sistema de coordenadas basicentricas y biodinámicas en la empuñadura y el brazo según la ISO 8727



Fuente: Tomado de A, B) (Sigcha, 2017) y C) (Dong, y otros, 2015)

Luego de la captación de la señal en los ejes ortogonales se amplifica ya sea dentro o fuera del circuito integrado que analizara la data y presentara esta finalmente en forma de indicador para completar la estructura de un dispositivo medidor de vibración común.

Por otra parte, la estructura de los EPP inteligentes, representada en la Figura 10. en la parte B, comparte hasta cierto punto similitud con la de los dispositivos convencionales. Sin embargo, en cuanto a la transferencia de datos, se emplea el método de Wi-Fi o Bluetooth para enviarlos a la nube o a una plataforma, con el fin de procesarlos y realizar análisis. Esto puede llevarse a cabo para generar un informe detallado para el área encargada, utilizando indicadores, o para activar un llamado de emergencia en caso de eventualidades, como sugieren (Mokhtari, Cheng, Wang, & Foroughi, 2023).

7.4.3.4. Valores límites de vibración en mano-brazo en el ámbito laboral.

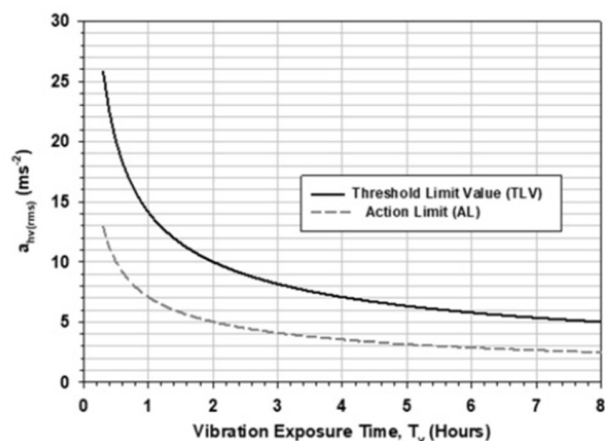
Según estudios realizados y normativa internacional, se deben establecer valores límite de vibración y tiempo al que se exponen las personas en el ámbito laboral. Actualmente no existe una normativa nacional que estandarice los valores límite para el trabajo con herramientas vibrátiles, es por esto que los valores límites permisibles se toman de acuerdo a la Resolución 2400 de 1979 que se acoge a las que se encuentran establecidas por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales de los Estados Unidos ACGIH (Cañola & Serna, 2020). A continuación, se muestran los valores límites permisibles en términos de aceleración $\frac{m}{s^2}$ para el trabajo con herramientas vibratorias mano brazo, tanto en la figura 13 como en la tabla 4.

Tabla 4 Valores límites permisibles de vibración diaria

Duración diaria de exposición	Valores cuadráticos medios (m/s)
Entre 4 y 8 horas	$4 \frac{m}{s^2}$
Entre 2 y 4 horas	$6 \frac{m}{s^2}$
Entre 1 y 2 horas	$8 \frac{m}{s^2}$
Menos de una hora	$12 \frac{m}{s^2}$

Fuente: Tomado de (Cañola & Serna, 2020), (Robledo, 2014).

Figura 13 Valores umbral (TLV) y límites de acción (AL) relacionados con los valores máximos de exposición diaria (DELV) y los valores de acción de exposición diaria (DEAV) de ANSI 2.70.



Fuente: Tomado de (Globally Protecting Worker Health, 2024)

7.4.3.5. Parámetro A (8)

El valor de $A(8)$ representa el ponderado de la vibración a la que está expuesta un trabajador en una jornada laboral estándar de ocho (8) horas diarias. Este valor debe estar acorde a los valores estándar mencionados por la norma internacional de estandarización ISO 5349 de 2002. El valor de este parámetro puede ser inferior, superior o estar en medio de los valores descritos en la Tabla 5. (Senovilla, 2009)

Tabla 5 Valores A (8)

Valor que da lugar a una acción	Valor limite diario
$2.5 \frac{m}{s^2}$	$5 \frac{m}{s^2}$

Fuente: Tomado de (Senovilla, 2009)

Para el cálculo del parámetro $A(8)$ se debe conocer el valor de la aceleración eficaz de la vibración y el tiempo de exposición a la que está sometido el operario. El valor de aceleración eficaz para la determinación de $A(8)$ se expresa como la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de los valores eficaces de la aceleración ponderada en frecuencia determinados según los tres ejes de referencia como se muestra en la ecuación 1.

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2} \quad [1]$$

Donde a_{hwx} , a_{hwy} , a_{hwz} son las aceleraciones ponderadas en frecuencia según cada uno de los ejes antes descritos. De acuerdo con la ecuación [2], para encontrar $A(8)$ se toma en cuenta el valor de T_e que representa el periodo de tiempo de exposición en horas, y el estándar de 8 horas diarias de jornada laboral (Senovilla, 2009).

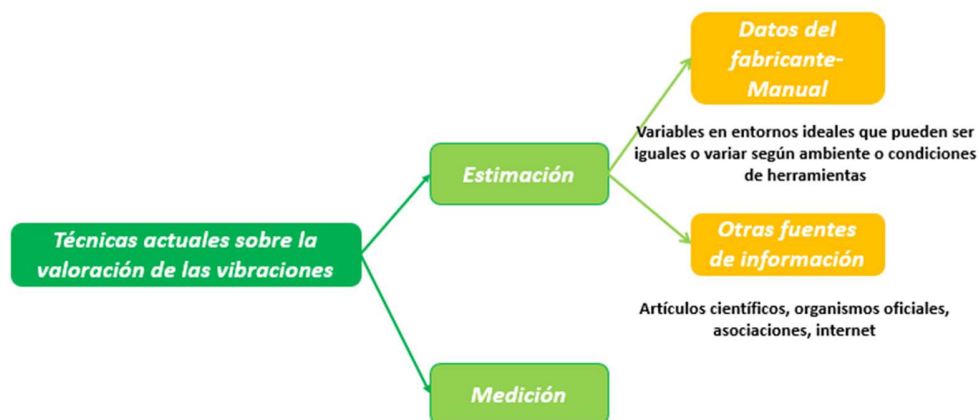
$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T_e}{8}} \quad [2]$$

De acuerdo con los valores mencionados en la Tabla 5, si el valor resultante es inferior a $2.5 \frac{m}{s^2}$ el operario puede trabajar con normalidad durante la jornada de 8 horas diarias. Si el valor es superior a $2.5 \frac{m}{s^2}$ pero inferior a $5 \frac{m}{s^2}$ la empresa debe tomar medidas preventivas como el mantenimiento de los equipos, utilizar guantes anti vibrátiles, que el tiempo de exposición continuo no supere los límites permisibles, entre otros. Por último, si el valor de $A(8)$ es superior a $5 \frac{m}{s^2}$ se deben adoptar medidas inmediatas para disminuir la exposición y cumplir con los tiempos diarios establecidos en los límites permisibles (Senovilla, 2009).

7.4.3.6. Técnicas sobre la valoración de las vibraciones

Las técnicas para determinar la aceleración, según lo propuesto por el Real Decreto 1311 de 2005 en España, se dividen en dos modalidades: la estimación y medición, ambas detalladas en la Figura 14.

Figura 14 Técnicas actuales sobre la valoración de las vibraciones



Fuente: Propia de los autores, adaptado de (Sigcha, 2017)

El primer enfoque, basado en la estimación, destaca por su capacidad de evitar mediciones directas, lo que se traduce en una reducción significativa de tiempos y costos, así como en la minimización de molestias para el trabajador. No obstante, su precisión está

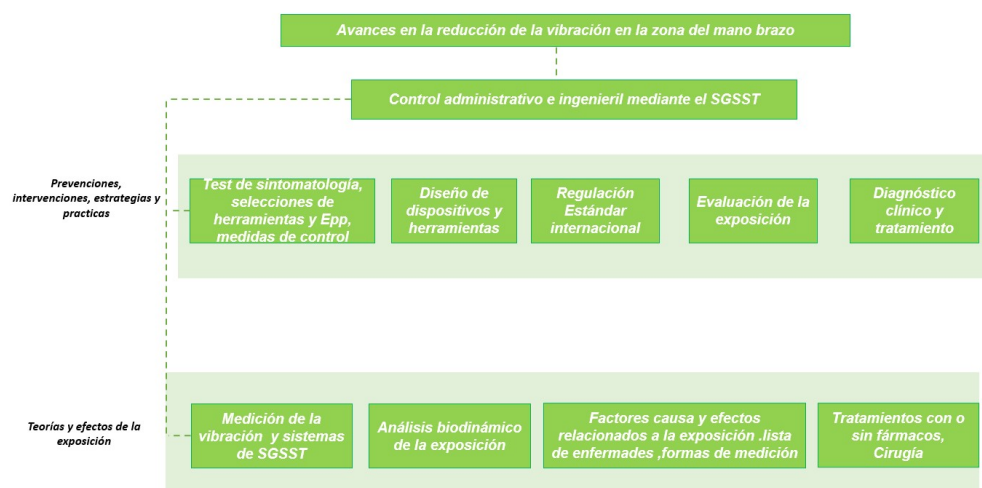
condicionada por diversos factores, como las condiciones ideales de la herramienta, del entorno y la calidad de la información proporcionada por el fabricante u otras fuentes confiables. (Sigcha, 2017)

En cambio, la técnica de medición implica la captura de datos de aceleración ponderada mediante instrumentación especializada, conforme a la normativa ISO 8041 de 2005 y la ISO 5349-1 de 2002. Este enfoque requiere el uso de un vibrómetro, equipado con un acelerómetro, el cual detecta las vibraciones, las convierte en señales eléctricas para su procesamiento y registro. (Sigcha, 2017)

7.4.3.7. Diagnóstico y medidas de prevención por riesgos de vibración

Los avances en cuanto a diagnóstico y prevención del riesgo de la vibración van de la mano con la teorías y estudios de la exposición, estos se pueden ver en la figura 15 siendo los más destacables a la fecha las pruebas de sintomatología, selección de herramienta y EPP (Elementos de Protección Personal), medidas de control, diseño de dispositivos, la regulación internacional, evaluación de la vibración y el tratamiento de las enfermedades derivadas de esto. (Dong, Wu, Xu, Welcome, & Krajnak, 2021).

Figura 15 Avances desde los 2000 en cuanto a prevención, intervenciones y estrategias teniendo en cuenta las teorías y efectos de la exposición a vibraciones



Fuente: Propia de los autores, adaptado de (Dong, Wu, Xu, Welcome, & Krajnak, 2021)

Sin embargo, en cuanto al diagnóstico de estas enfermedades, (Bovenzi, 2005) evidencia que los estudios actuales son insuficientes para tener una relación en cuanto a la vibración con la generación de un trastorno o enfermedad a lo largo del tiempo por lo que no se puede decir en qué momento contraerá este más que con la presencia de la sintomatología y los debidos exámenes. Lo que sí se puede establecer en sí para el diagnóstico es el seguimiento de variables como la duración de la exposición, el patrón de exposición, el tipo de herramientas o procesos a las que está sometido, las condiciones ambientales, la respuesta dinámica del cuerpo humano y las características individuales como manejo de la herramienta, estado de salud y uso de equipos de protección personal.

Las medidas preventivas mencionadas anteriormente no constituyen la totalidad de las opciones disponibles; de hecho, hay muchas más disponibles que se aplican en modo de intervenciones de seguridad, ocupacionales o de entrenamiento. No obstante, su adopción depende de si las empresas las aplican en su totalidad o solo algunas de ellas. A continuación, se abarcan otras medidas posibles:

- **Selección del equipo adecuado:** La selección del equipo apropiado está vinculada tanto a la política de la empresa como a la necesidad de garantizar la seguridad del trabajador. Esto implica tener en cuenta los niveles de vibración de la herramienta, según las normas ISO 8662 ó ISO 5349, proporcionadas por el fabricante. (Edwards & Holt, 2007) Además, es esencial considerar la ergonomía y la naturaleza específica de la actividad a realizar. (Health and Safety, 2005)
- **Fomentar un buen mantenimiento de los equipos:** Es fundamental para asegurar un trabajo eficiente y seguro. Esto implica revisar periódicamente el estado de las herramientas y, en caso de deterioro, someterlas a mantenimiento adecuado. Además, es importante reportar cualquier anomalía detectada durante la inspección. (Edwards & Holt, 2007)
- **Aislar las vibraciones:** Se logra mediante la aplicación de asideros antivibración, soportes, cadenas de tensión, plantillas u otros accesorios diseñados para reducir la magnitud de las vibraciones. En el caso de las manos, el uso de accesorios anti

vibratorios como guantes es recomendable, aunque cabe mencionar que algunos de estos accesorios pueden aumentar la vibración, sin embargo, mantienen una buena circulación debido al calor que conservan. Además, el uso de materiales elásticos en los agarres de herramientas puede ayudar a reducir las vibraciones de alta frecuencia. (Edwards & Holt, 2007)

- **Cambiar los procesos de trabajo:** Este enfoque implica eliminar la necesidad de usar herramientas o ciertos métodos de trabajo para evitar la exposición a vibraciones. Se lleva a cabo mediante un análisis detallado del proceso para identificar posibles alternativas, como la automatización, la limitación del tiempo de exposición, la implementación de turnos cronometrados o la restricción del uso a circunstancias específicas. (Edwards & Holt, 2007) Otra sugerencia es proporcionar herramientas auxiliares y revisar el diseño y la disposición de los lugares de trabajo, puestos de trabajo e instalaciones de descanso. (Health and Safety, 2005)
- **Buenas prácticas operativas:** La manera en que los operarios utilizan y manejan los equipos es un factor crucial en la incidencia de las vibraciones. Por lo tanto, es necesario cumplir con normas que regulen el uso adecuado de las herramientas para el trabajo, su almacenamiento, la forma de agarre, y, por supuesto, seguir las medidas de control y seguridad establecidas (Edwards & Holt, 2007). Este aspecto está estrechamente relacionado con el otro punto mencionado anteriormente sobre el uso correcto y seguro de las herramientas. (Health and Safety, 2005)
- **Formación y educación.** En este apartado, se destaca la importancia de la capacitación adecuada para prevenir incidentes debido a una formación deficiente o inexistente, lo que puede conducir a accidente o riesgos de vibración. Por ello, es fundamental proporcionar entrenamiento para la detección y prevención de riesgos y peligros, con el fin de evitar o minimizar su impacto. Esto implica ofrecer asesoramiento de manera repetitiva y en varias sesiones, asegurándose de que los trabajadores estén familiarizados con la identificación de procesos que generan vibraciones, los niveles personales de exposición diaria, HAVS y sus síntomas, así como las medidas de control pertinentes. (Edwards & Holt, 2007)

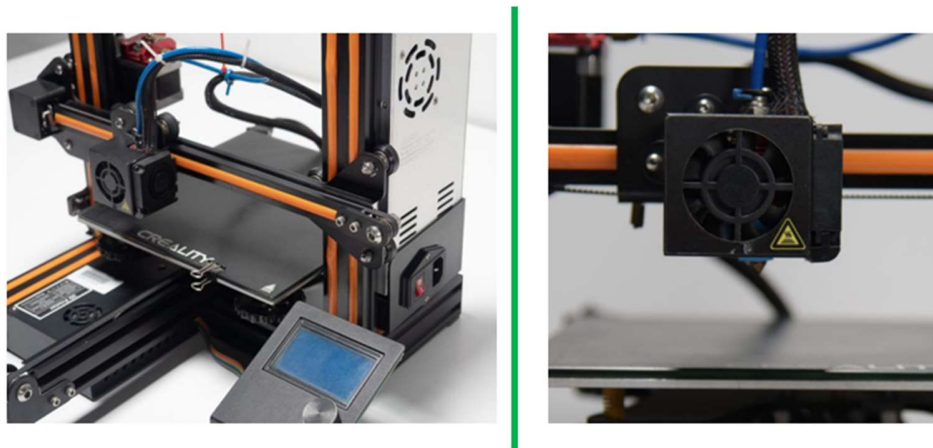
7.4.4. Diseño mecánico

En esta primera sección se describen las propiedades del método y del material seleccionados para el diseño. A continuación, se detallan:

7.4.4.1. Impresión 3D

Es un proceso de manufactura por medio del cual se pueden producir objetos tridimensionales a partir de un modelo digital a partir de un modelo CAD. Esta es una tecnología de fabricación por adición de material, donde el objeto tridimensional se elabora mediante la superposición de capas sucesivas de filamento. El término impresión 3D fue acuñado en los años 90's aproximadamente y en la actualidad su aplicación en la industria es muy variada como la producción de prototipos, diseño, mecánica automotriz, arquitectura, ingeniería, construcción, industria aeroespacial, medicina y otros. Existe n diferentes métodos o tecnologías de impresión 3D, el modelado por deposición fundida (FDM), de la figura 16, donde se emplea extrusión de pequeños aportes de termoplástico para formar capas, hasta formar el modelo o figura final (Galbiati, 2019).

Figura 16 Visualización de una impresora 3D puesta en marcha



Fuente: Tomado de (Frías, Esparza, & Margarita, 2023)

7.4.4.2. Especificaciones técnicas del material

Teniendo en cuenta los criterios de selección en el apartado de desarrollo mecánico del proyecto, se seleccionó el filamento de PETG debido a sus características de rigidez y ligereza, así como a sus propiedades superiores en comparación con otros materiales comúnmente utilizados como el ABS y PLA. A continuación, en la tabla 6, se muestran estos criterios específicos, y en la figura 17 se puede observar el material seleccionado.

Tabla 6 Especificaciones técnicas del filamento PETG

Características del filamento	
Material	Tereftalato de Polietileno y Glicol
Temperatura de ablandamiento	80°C
Biodegradable	NO
Características de interés	Propiedades mecánicas superiores al PETG normal, ya que cuenta con mayor resistencia, rigidez, estabilidad y ligereza
Densidad	1.27 gr/cm ³

Fuente: Tomado de (The Plastic People, 2013) y propia de los autores.

Figura 17 Material 3D - PETG



Fuente: Tomado de (Velayos, 2023)

7.4.5. Diseño Electrónico

En el diseño electrónico del dispositivo, se detallarán las formas de fabricación de circuitos impresos, los tipos de comunicación y las especificaciones de componentes electrónicos a utilizar para su correcto uso.

7.4.5.1. Microcontrolador

Un componente clave ya sea en tarjetas electrónicas o PCB (Printed Circuit Board), es el microcontrolador, un circuito integrado que incluye un procesador, memoria (RAM, ROM, EEPROM) y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores permiten el control de dispositivos y la ejecución de programas almacenados, siendo esenciales en aplicaciones que requieren control en tiempo real, como sistemas embebidos, controladores de dispositivos y sistemas de automatización (Sikka, 2021).

Se escogió este microcontrolador para la realización del proyecto ya que sus características se acoplan al proyecto, estas a totalidad junto con su datasheet se pueden ver en la tabla 7 y la ubicación de los pines en la figura 18.

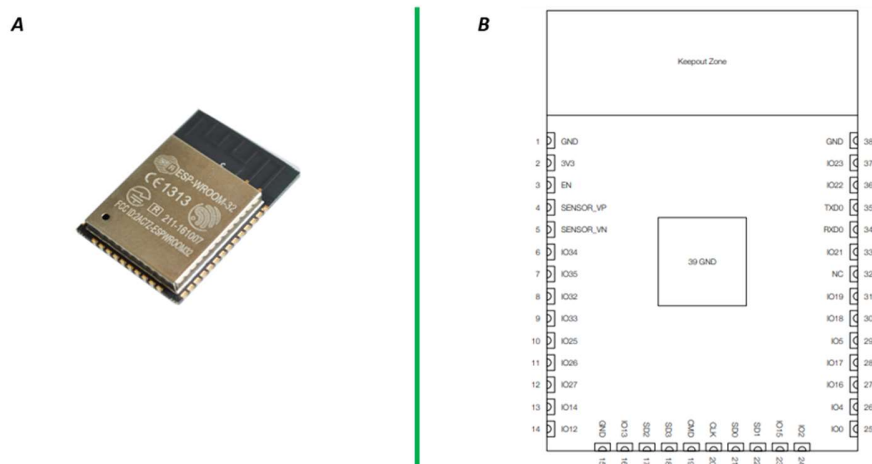
Tabla 7 Características completas del ESP32

Características ESP32	
Voltaje de alimentación	3.0 V ~ 3.6 V ideal 3.3 V
Frecuencia del reloj	80-240 MHz
Memoria ROOM	448 KB
Memoria SRAM	520 KB
Memoria Flash	4 Mb
Wifi	802.11 b/g/n (802.11n up to 150 Mbps)
Bluetooth	Bluetooth v4.2 BR/EDR and Bluetooth LE specification
Interfaces:	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR, pulse counter, GPIO, capacitive touch sensor, ADC, DAC, Two-Wire Automotive Interface (TWAI®), compatible with ISO11898-1 (CAN Specification 2.0)

Características ESP32	
Rango de temperatura	-40 °C ~ +85 °C
Dimensiones	18 mm × 25.5 mm × 3.10 mm
Puertos I/O	36 pines
Entorno de programación	Python, Espressif IDF, Arduino IDE, Visual Studio Code
Peso	3 gr
Núcleos	2

Fuente: (Espressif, 2024)

Figura 18 Visualización de A) microcontrolador ESP32 WROOM 32 en físico y B) datasheet para configuración y orden de los pines



Fuente: (Espressif, 2024)

En general la familia del ESP32 es conocida por su popularidad en aplicaciones de IoT (Internet de las cosas) y sistemas integrados. (TDK Electronics, 2023) Es diseñada por Espressif Systems, donde suele integrar al módulo en un PCB que permite alimentación por USB, botones de boot y reset y pines soldados a la placa (Herranz, 2019).

7.4.5.1.1. Especificaciones del entorno y lenguaje de programación

Entre las diversas opciones que ofrece la tarjeta electrónica, se optó por el entorno Arduino IDE debido a su naturaleza multiplataforma, lo que permite su instalación en cualquier sistema operativo. Además, destaca por su accesibilidad, respaldada por una amplia comunidad y una extensa variedad de recursos disponibles, como bibliotecas que

facilitan la integración de componentes externos. (Schmidt, 2023) . Su compatibilidad con el microcontrolador ESP32 integrado en la tarjeta también es un factor clave, ya que proporciona herramientas para depuración, carga de código y monitoreo de datos en tiempo real, todo en lenguajes de programación C y C++

Esta plataforma ofrece asistencia estándar y bibliotecas específicas para interactuar con los componentes electrónicos, según lo especificado en las fichas técnicas. (Schmidt, 2023) La estructura básica de un programa en este IDE, para (Ismailov & Jo'rayev, 2022) es la siguiente:

- Función setup (): Esta función se ejecuta una vez al inicio del programa y se utiliza para inicializar variables, configurar pines y realizar otras tareas de configuración.
- Función loop (): Esta función se ejecuta continuamente en un bucle, con las instrucciones principales del programa, como lecturas de sensores, control de actuadores y toma de decisiones basadas en esas lecturas.

7.4.5.2. Sensores

Para el diseño electrónico, es crucial contar con dispositivos que puedan detectar cambios en el entorno físico y convertirlos en señales, ya sean analógicas o digitales. En este caso, se busca captar vibraciones mediante la medición de la aceleración en 3 ejes cartesianos. Por lo tanto, es fundamental seleccionar el sensor más adecuado para satisfacer las necesidades de censado y garantizar el correcto funcionamiento del prototipo. Dado que la variedad de sensores disponibles en el mercado es extensa, en este trabajo de grado se enfocará únicamente en una selección limitada de sensores para medir la aceleración, los cuales se mencionan a continuación:

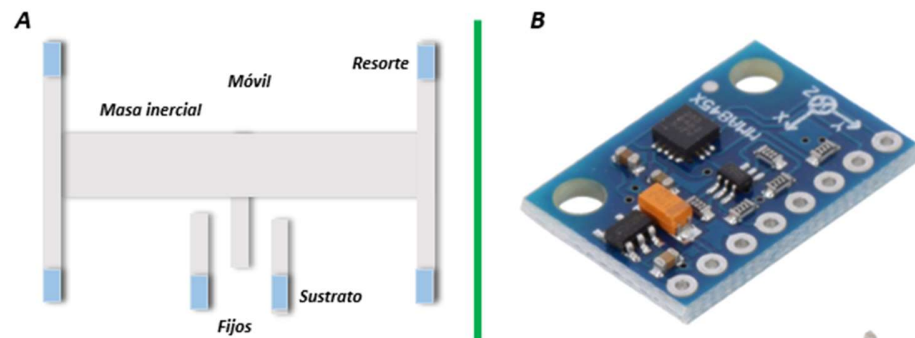
7.4.5.2.1. Sensor acelerómetro Capacitivo MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System)

Los sensores MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) son dispositivos a escala microscópica que incorporan estructuras de sustrato de silicio, como se ilustra en la figura 19. Estos dispositivos tienen la capacidad de medir una variedad de variables, como la

aceleración, la presión del aire, el campo geomagnético, la velocidad angular, la temperatura, la humedad y la calidad del aire (Algamili, y otros, 2021).

Dentro de esta categoría se encuentran los acelerómetros, donde en especial se encuentran los de tipo capacitivo que se basa en medir la tensión a través del cambio de capacitancia de un capacitor, cuyas placas están formadas por un par de micro mecanismos, uno fijo y otro móvil. La parte móvil es sensible a las aceleraciones externas y puede oscilar con respecto a la parte fija, lo que provoca cambios en la capacitancia y, por ende, en el voltaje en el circuito de detección. (Ribeiro, 2019)

Figura 19 Visualización de A) Estructura y b) sensor capacitivo MEMS



Fuente: Tomado de a) Propia de los autores y b) (TME Electronics Components, 2024)

De los resultados obtenidos en la tabla de selección, el sensor con el valor más alto fue el ADXL345. Por lo tanto, se eligió este sensor para el proyecto, ya que sus características se adaptan perfectamente a los requisitos de este. La información completa sobre el sensor, junto con su hoja de datos, está disponible en la Tabla 8 y en la Figura 20.

Tabla 8 Características completas del sensor

Características ADXL345	
Voltaje de entrada	3.3V~5V
Voltaje de operación	2V~3.6V
Corriente de operación	140uA

Características ADXL345	
Comunicación - Interfaz	I2C, SPI (5MHz)
Auto-test	Ejes x, y, z
Frecuencia de reloj interna	400KHz
Sensibilidad	4 LSB/g
Sensibilidad seleccionable	2g/4g/8g/16g
Temperatura de operación	-40°C~85°C
Dimensiones	19x14 mm

Fuente: (Analog Devices, 2022)

Figura 20 Datasheet del ADXL345 con sus respectivos entradas y salidas



Fuente: (Electronilab, 2023)

7.4.5.3. Fuentes de alimentación

En el diseño electrónico, las fuentes de alimentación son elementos esenciales para asegurar un funcionamiento ininterrumpido y sin problemas debido a posibles fallos de energía. Las baterías son dispositivos que almacenan energía y permiten convertirla entre energía química y eléctrica a través de reacciones electroquímicas. Están compuestas por

celdas electroquímicas, que se conectan en serie o en paralelo para formar la batería completa (Alcázar, 2020)

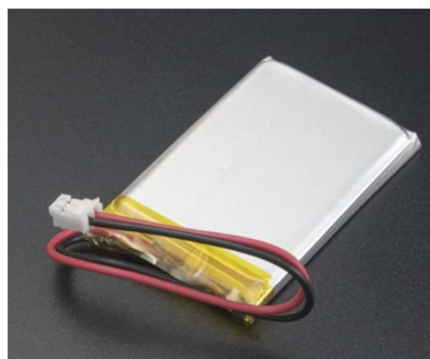
Teniendo en cuenta los resultados de la tabla de selección, la batería recargable de polímero de litio de 3.7V a 1000mA obtuvo el valor más alto. Por consiguiente, se decidió utilizar esta batería para el proyecto, dado que sus especificaciones cumplen de manera óptima con los requisitos. Los parámetros técnicos se encuentran en la tabla 9 y la visualización de la batería en la figura 21.

Tabla 9 Características de la batería

Características de la Batería Recargable en Polímero de Litio 3.7V - 1000mA	
Tipo de Batería	Batería Polímero de Litio recargable
Capacidad de la batería	1000 mA
Voltaje	3.7 V
Dimensiones y peso	•Peso: 19g •Dimensiones: 33x20x5 mm
Compatible con el tp40456	Si

Fuente: Tomado de (VISTRONICA S.A.S, 2020)

Figura 21 Batería recargable de polímero de litio de 3.7V 1000mA



Fuente: (VISTRONICA S.A.S, 2020)

7.4.5.4. Módulo de carga

Los módulos de carga tienen la función de gestionar y controlar el proceso de carga de baterías recargables en dispositivos electrónicos. Su objetivo principal es garantizar que la batería se cargue de manera eficiente y segura, regulando tanto el voltaje como la corriente, para evitar sobrecargas que puedan dañarla.

Para el desarrollo del prototipo, se optó por utilizar dos baterías de 1000 mAh cada una, con el fin de proporcionar una autonomía suficiente para su uso durante toda una jornada laboral. Por lo anterior, se escogió un módulo de carga capaz de cargar ambas celdas de manera simultánea. Se eligió el módulo de carga comercial DDTCCRUB, cuyas características se ajustan perfectamente a los requisitos del prototipo. Las especificaciones técnicas del módulo se presentan en la tabla 10, y su diseño se ilustra en la figura 22.

Tabla 10 Características del módulo de carga

Características del módulo recargable	
Referencia	Cargador Baterías DDTCCRUB 2S Tipo C
Voltaje de entrada	3 a 6V (5V)
Voltaje de salida	5V
Dimensiones	39 mm x 18 mm x 7 mm
Tipo Conector	Conector Tipo C
Temperatura de trabajo	-40° C a 85° C
Corriente de salida	1 A

Fuente: (Tecknomovo, 2024)

Figura 22 Visualización de módulo de carga - tipo c



Fuente: (Tecknomovo, 2024)

7.4.5.5. Módulo reductor-elevador de voltaje

Un módulo elevador o reductor de voltaje es un circuito electrónico diseñado para ajustar la tensión de salida a un nivel diferente de la tensión de entrada. Estos módulos son fundamentales en aplicaciones electrónicas donde es necesario transformar el voltaje de una fuente de alimentación para que coincida con los requisitos de un dispositivo o circuito específico.

- **Módulo elevador de voltaje (Boost Converter):** Incrementa la tensión de entrada a un nivel más alto en la salida, permitiendo alimentar dispositivos que requieren un voltaje superior al proporcionado por la fuente original. (Banaei & Bonab, 2019)
- **Módulo reductor de voltaje (Buck Converter):** Reduce la tensión de entrada a un nivel más bajo en la salida, siendo útil cuando se necesita un voltaje menor para el funcionamiento seguro y eficiente de los componentes electrónicos. (Banaei & Bonab, 2019)

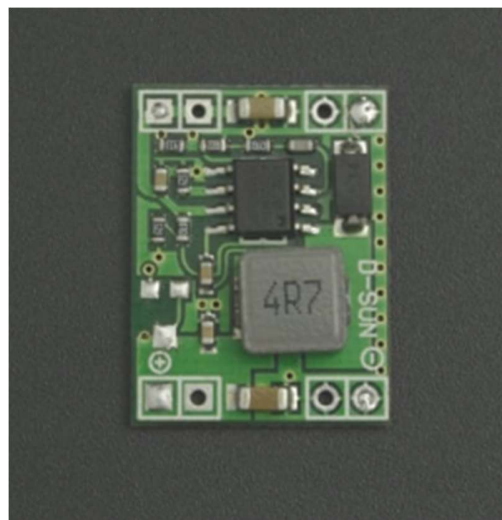
En base a la tabla de selección se escogió la opción de un reductor de voltaje Conversor DC-DC tipo Buck MP1584EN. Por ende las características técnicas de este módulo se visualización en la tabla 11 y en la figura 23

Tabla 11 Características del reductor

Características del módulo reductor	
Referencia	Convertor DC-DC tipo Buck MP1584EN
Voltaje de entrada	4.5 a 28 VDC
Voltaje de salida	5 VDC
Corriente de salida	3A Max.
Potencia	10 W
Frecuencia de Switcheo	1 MHz
Eficiencia	96%
Temperatura de funcionamiento	-40° C a 85° C

Fuente: (MPS The future of Analog IC Technology, 2011)

Figura 23 Módulo Convertor DC-DC tipo Buck MP1584EN



Fuente: (VISTRONICA S.A.S, 2020)

7.4.5.6. Actuadores

Los actuadores son componentes que, mediante una señal de control (eléctrica, neumática o hidráulica), llevan a cabo una acción física.

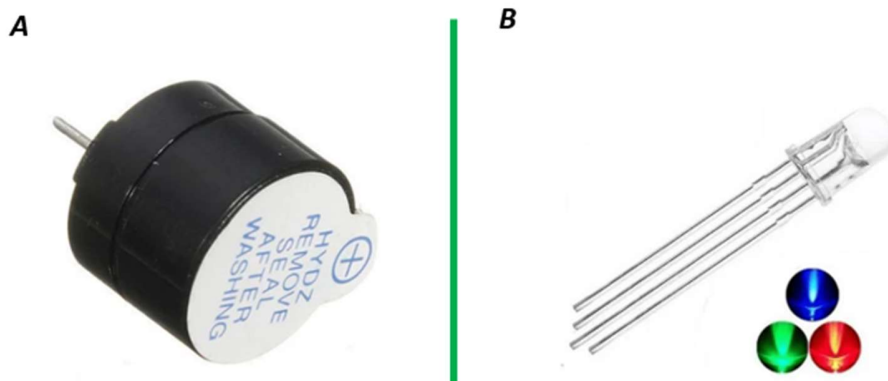
De acuerdo con la tabla de selección, se tuvieron en cuenta dos elementos como actuadores para que sirvan de indicadores ante las alertas de la programación del circuito. Por lo tanto, las especificaciones del led RGB junto con el módulo Buzzer, se visualizaban tanto en la tabla 12 como en la figura 24.

Tabla 12 Características de los actuadores

Nombre	Voltaje de entrada	Dimensiones	Tipo Conector
Diodo Led Chorro rojo, azul, amarillo, blanco, RGB	2V-5V	5 mm o 4 mm	Dos terminales cátodo
Buzzer Activo 3V - Zumbador tipo Pito Continuo	3V	12 x 9.5 mm	Dos terminales (Ánodo y Cátodo)

Fuente: Tomado de (Ferretronica, 2024)

Figura 24 Visualización de A) un Buzzer y B) un LED RGB común catodo

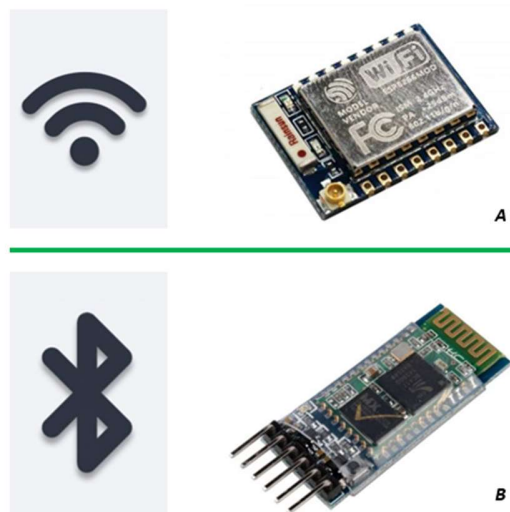


Fuente: Tomado de (Ferretronica, 2024)

7.4.5.7. Elementos de comunicación

Estos son los encargados de permitir la transmisión de datos entre el dispositivo de medición de la vibración con otros elementos externos como computadores, tarjetas electrónicas, páginas web o aplicaciones móviles, como se ilustra en la figura 25.

Figura 25 Visualización de A) Módulo Wifi ESP8266 de @Espressif y B) Módulo de Bluetooth HC-05 Genérico



Fuente: Tomado de (VISTRONICA S.A.S, 2020)

7.4.5.7.1. Tipos de comunicación

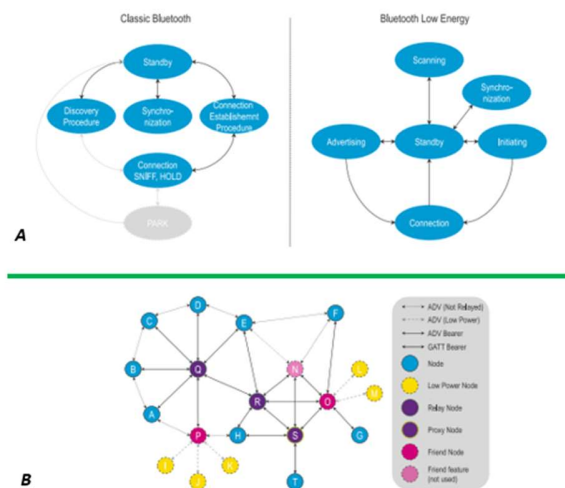
7.4.5.7.1.1. Bluetooth

Es una tecnología que utiliza ondas de radio en lugar de cables para conectar dispositivos, lo que facilita el intercambio de datos y el control de otros dispositivos. (Mohamed, 2021). Esta se ha hecho bastante popular durante la industria 4.0, debido a su bajo costo, fácil desarrollo, bajo consumo de energía y alta precisión de localización. (Zhuang, y otros, 2022).

Para establecer esta conexión, es importante considerar el emparejamiento, la topología Piconet (maestro-esclavo), permanecer dentro del radio de cobertura y recordar que se pueden conectar hasta 7 dispositivos entre sí. (Mohamed, 2021).

Hoy en día, esta tecnología ha evolucionado significativamente, dividiéndose en Bluetooth clásico y Bluetooth de baja energía, también conocido como Bluetooth 5.0. Esta distinción se refleja en su funcionamiento, que se describe en la figura 26, donde muestra la arquitectura de estas redes y un ejemplo de su funcionamiento. (Todtenberg & Kraemer, 2019)

Figura 26 Visualización de A) Arquitectura de tipos de Bluetooth y B) Ejemplo de funcionamiento de la arquitectura de Bluetooth bajo una red Piconet (Estrella) y Scatternet (Multiplexación)



Fuente: Tomado de (Todtenberg & Kraemer, 2019)

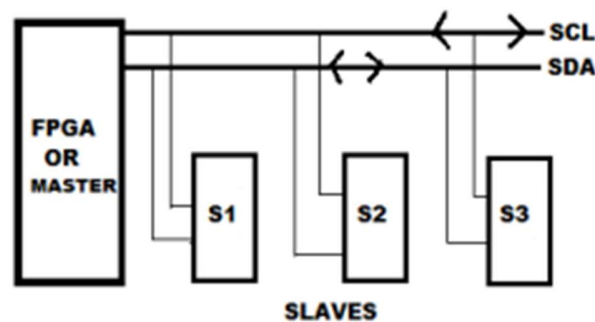
7.4.5.7.1.2. I2C

El bus I2C (Inter-Integrated Circuit) es un protocolo de comunicación que reduce la cantidad de cables necesarios para la conexión entre dispositivos electrónicos. Este bus se compone de dos líneas activas: el reloj serial (SCL) y los datos seriales (SDA), además de una conexión a tierra. Tanto SCL como SDA son bidireccionales y de medio dúplex, lo que

significa que pueden transmitir y recibir información entre los dispositivos conectados, tal como se presenta en la figura 27.

Cada dispositivo en el bus I2C, ya sea un microcontrolador, un sensor, un controlador de pantalla LCD, memoria o una interfaz de teclado, cuenta con una dirección única y puede funcionar como transmisor o receptor, dependiendo de su rol en la comunicación. Además, la facilidad para añadir o retirar dispositivos del bus lo convierte en una opción ideal para aplicaciones de bajo mantenimiento y control en sistemas embebidos. (Mankar, Darode, Trivedi, Kanoje, & Shahare, 2014)

Figura 27 Visualización del funcionamiento del protocolo de comunicación IC2 maestro y esclavo

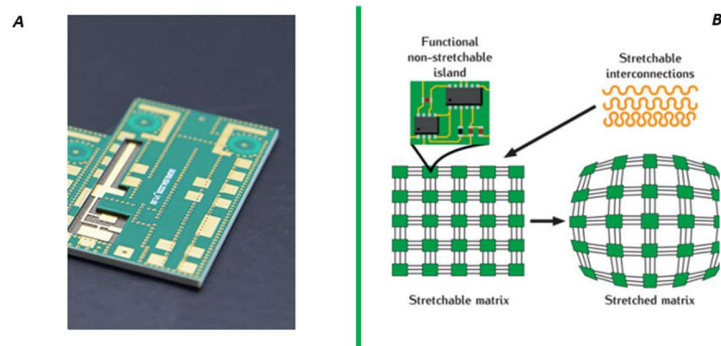


Fuente: Tomado de embebidos. (Mankar, Darode, Trivedi, Kanoje, & Shahare, 2014)

7.4.5.8. Fabricación de circuitos impresos

En todo producto electrónico, el circuito impreso es un componente principal, ya que proporciona un soporte mecánico para fijar y ensamblar los componentes al mismo tiempo que se encarga de realizar el cableado y la conexión eléctrica mediante pistas. (Li, y otros, 2023) Los circuitos impresos son placas que forman una versión bidimensional del medio de interconexión tridimensional de los componentes electrónicos, generalmente fabricados con materiales como poliamida orgánica reforzada con vidrio, resina BT y cerámica. (Thomas & Gopalan, 2022). Algunos ejemplos del material empleado ya sea rígido o flexible se ilustran en la figura 28.

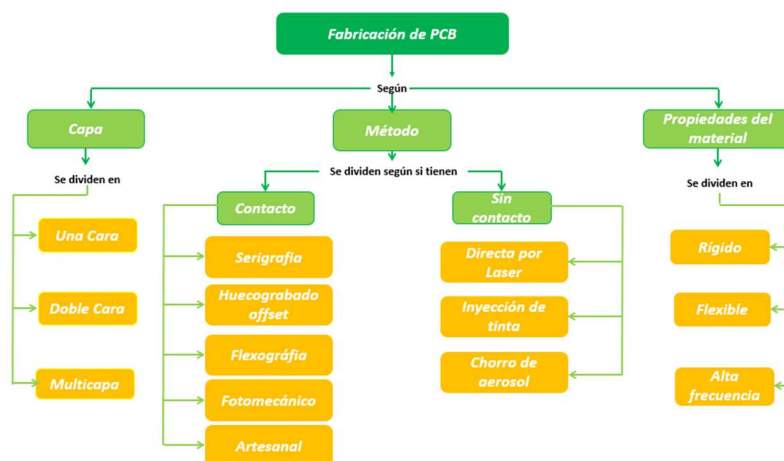
Figura 28 Visualización de A) PCB Prototipo y B) Estructura de PCB rígidas y flexibles



Fuente: Tomado de A) (PCBWAY, 2024) y B) (Vanfleteren, y otros, 2012)

Hay varios métodos disponibles para fabricar circuitos impresos, cada uno con sus propias ventajas y desventajas en términos de costos, complejidad y calidad. Por lo tanto, es crucial seleccionar el método más adecuado para el prototipo. La figura 29 presenta una visión de la fabricación de PCB en un diagrama, en el que se divide en criterios como la cantidad de capas, el método y el tipo de material.

Figura 29 Fabricación de PCB'S



Fuente: Propia de los autores, adaptado de (Rao, Avinash, Varaprasad, & Goe, 2022), (Galvis & Ramírez, 2000) y (Orient Displays, 2022)

Por otro lado, en la tabla 13 Se detalla el método seleccionado para la fabricación del PCB, teniendo en cuenta especificaciones y el índice de calidad.

Tabla 13 Especificaciones del método fabricación de la PCB

Método de fabricación	Descripción	Índice de Calidad
Serigrafía	El proceso implica el entintado de una placa utilizando una plantilla que contiene las medidas del circuito a imprimir. Se superpone la plantilla sobre la placa recubierta de cobre y se aplica tinta conductora o de grafeno, lo que permite que el circuito quede sobre el cobre. La protección contra el ácido dependerá del tipo de tinta utilizado; de lo contrario, se deberá aplicar el método offset.	Media por presentar variaciones por factores al momento de imprimir

Fuente: Tomado de (Rao, Avinash, Varaprasad, & Goe, 2022), (Galvis & Ramírez, 2000) y propia de los autores

7.4.6. Diseño Computacional

El diseño computacional del dispositivo estará estrechamente vinculado a la programación de la interfaz, la cual operará de manera continua con el software de la tarjeta electrónica. Por ello, se establecen las especificaciones del entorno y el lenguaje de programación seleccionados.

7.4.6.1. Especificaciones del entorno y lenguaje de programación

7.4.6.1.1. Visual Studio

Es un editor de código fuente de código abierto que ofrece soporte para diversos lenguajes de programación. Además, cuenta con una amplia gama de extensiones que pueden descargarse y gestionarse para personalizar y mejorar su funcionalidad. (Del Sole, 2023) Este entorno es ideal para el desarrollo de software en múltiples lenguajes como JavaScript, C, C#, CSS, TypeScript, Python y Java, mediante la instalación de paquetes específicos.

7.4.6.1.2. Python

Es un lenguaje de programación flexible y de alto nivel, destacado por su legibilidad, su sintaxis simple y su enfoque en la programación orientada a objetos. Aunque Android no

permite el desarrollo nativo de aplicaciones en Python, existen herramientas que permiten convertir aplicaciones escritas en este lenguaje en paquetes Android (APK), los cuales pueden implementarse en dispositivos Android con éxito (Wu, Budianto, Wong, & Gan, 2019)

7.5. Marco Conceptual

7.5.1. CAD

El Computer-Aided Design (CAD), consiste en la utilización de software para crear, modelar, modificar, analizar, optimizar y documentar representaciones gráficas 2D (bidimensionales) y 3D (tridimensionales) de objetos reales o en proyecto. (Bautista, 2020)

Esta herramienta, al ser utilizada en computadoras, mejora significativamente la elaboración, desarrollo y diseño de productos. Permite diseñar con mayor precisión, a un menor costo y con mayor eficacia, al facilitar la realización de pruebas de error y análisis del comportamiento del producto antes de construirse. (Erazo, 2022)

Por otro lado, para (Integral Innovation Experts, 2019) ,es una tecnología que permite crear y editar modelos bidimensionales y tridimensionales de objetos reales. Además, permite la automatización de procesos manuales del diseño de producto, reduciendo errores y aumentando la calidad debido a que permite visualizar previamente el producto final. Estos softwares son utilizados por diferentes sectores de la industria, como en el diseño de productos, mecánica automotriz, ingeniería en general, biomédica, arquitectura, y muchos otros.

7.5.2. CAE

El Computer Aided Engineering (CAE) se centra en el uso de software para analizar y simular diseños de ingeniería. Estos programas permiten evaluar las características, propiedades, viabilidad y rentabilidad de los diseños, ya sea que hayan sido creados en el ordenador o introducidos desde otro medio. (Bautista, 2020) El objetivo principal del CAE es optimizar el desarrollo de los diseños, reducir los costos de fabricación y minimizar la necesidad de pruebas físicas para obtener el producto deseado. (Erazo, 2022)

Los programas CAE suelen ser extensiones de aplicaciones CAD, que incorporan herramientas como análisis cinemático y por el método de elementos finitos (FEM), maquinado por control numérico (CNC), entre otras más. (Bautista, 2020)

En la ingeniería mecánica, se utilizan diversos parámetros en las simulaciones CAE, como presión, centros de gravedad y fuerzas aplicadas. (Erazo, 2022) Estos parámetros se basan en el entorno y las interacciones que el modelo debería experimentar una vez que esté en funcionamiento. Todos estos factores se introducen en el programa CAE para evaluar si la pieza examinada podría manejar, teóricamente, las limitaciones del diseño. (Bautista, 2020)

7.5.3. CAM

El Computer-Aided Manufacturing (CAM), es la utilización software para facilitar la fase de fabricación de un producto, actuando como un enlace entre el Diseño Asistido por Computadora (CAD) y el control de las máquinas y herramientas, con una mínima intervención del trabajador (Bautista, 2020).

La combinación CAD/CAM es usada dentro de esta área con bastante frecuencia debido a sus ventajas. Por lo que permite enviar la data desde el diseño hasta la fabricación de un producto sin necesidad de volver a introducir manualmente los datos geométricos, para controlar el proceso. (Erazo, 2022)

7.5.4. Enfermedad Laboral

De acuerdo con la ley 1562 de 2012 en su Artículo N°4, se considera enfermedad laboral “la contraída como resultado de la exposición a factores de riesgo inherentes a la actividad laboral o del medio en el que el trabajador se ha visto obligado a trabajar. El Gobierno Nacional, determinará, en forma periódica, las enfermedades que se consideran como laborales y en los casos en que una enfermedad no figure en la tabla de enfermedades laborales, pero se demuestre la relación de causalidad con los factores de riesgo ocupacionales será reconocida como enfermedad laboral, conforme lo establecido en las normas legales vigentes” (Congreso de Colombia, 2012). Los trastornos asociados con la vibración como consecuencia de uso frecuente de herramientas o labores son los siguientes:

7.5.4.1. Síndrome de HAVS

Es una afección o condición de la extremidad ocasionado por la exposición con alta frecuencia a vibraciones mano-brazo por encima del índice/dosis de vibración permitido para esa zona de cuerpo, que es de 2,5 m/s². (Shobhit Maruti, 2023). Su grado de avance o de contraer este síndrome depende sumamente del tiempo y la intensidad a la vibración a la cual este expuesto el cuerpo. (Worksafebc, 2023)

Una vez contraído, las afecciones descritas por (Nieradko-Iwanicka, 2019)) incluyen Raynaud, Túnel del Carpio, necrosis ósea y otras enfermedades del tejido conectivo que implican anomalías del sistema vascular. Por otro lado, según (Schrab, 2018) se evidencia una disminución de la fuerza y agarre de las manos, daño en las fibras sensoriales de los dedos (perdida de sensibilidad), temblores continuos, entumecimiento/hormigueo y dolor crónico.

7.5.4.2. Fenómeno de Raynaud

Descrita como ataques de vasoespasmos episódicos de las arterias de los dedos por la exposición desmesurada a labores relacionadas con el sometimiento de la mano-brazo a la vibración, este dolor aumenta con el frío y a su vez varía su tiempo depende de lo avanzada que sea la enfermedad en la persona. Se suele manifestar en tres etapas, que son: palidez (vasoespasmos), cianosis (estasis sanguínea) y rubo (reperfusión). (Swarnkar, 2023). Por otro lado (Robledo, 2014) la define como la disminución de la circulación en la mano luego de ser sometida a vibración, lo que ocasiona en mayor medida la decoloración blanca en los dedos y el dolor asociado al frío, que desaparece al ser sometidos al calor.

Los síntomas más comunes descritos por (Kurtul, 2019) incluyen pinchazos, entumecimiento, pérdida de fuerza de agarre, pérdida de habilidades manuales y potencialmente un mayor riesgo de sufrir accidentes laborales. A su vez, (Swarnkar, 2023) menciona otros síntomas como ataques de palidez, cianosis, escalofríos y dolor. Se reconocen dos tipos de este fenómeno: primario, que se origina solo por la misma enfermedad de Raynaud, y secundario, que ocurre debido a alguna enfermedad subyacente que causa esta misma.

7.5.4.3. Síndrome del Dedo Blanco

Es una forma secundaria del fenómeno de Raynaud causada por vibraciones transmitidas a la mano por equipos portátiles, lo que ocasiona una actividad vasoconstrictora alterada de los dedos, lo que conlleva a episodios de isquemia digital por frío o estrés. (Eriksson, 2020) Esta condición se caracteriza por la sensación transitoria de flujo sanguíneo hacia los dedos y los pies, y una alteración del color cutáneo. (Bazurto, 2019) Además, se presentan dolor en las venas, nervios, músculos y articulaciones que llevan a entumecimiento y discapacidad. (Kurtul, 2019)

7.5.4.4. Síndrome del Túnel Carpiano

Se trata de una neuropatía de aprisionamiento que reduce la función muscular por compresión o tracción del nervio mediano en la muñeca, lo que afecta la sensibilidad de la región. (Alexandre, Alves, Rosário, Pessanha, & Monteiro:, 2021) Al ser diagnosticado en todo el mundo, los síntomas generales incluyen entumecimiento, dolor y parestesia de los dedos, así como disminución de las habilidades motoras finas, torpeza y atrofia de la fuerza de los dedos y la extensión de la muñeca. (Benavides, y otros, 2023)

7.5.4.5. Tendinitis de Quervain

Es una afección dolorosa que afecta la vaina tendinosa en la muñeca. Esta inflamación suele ser causada por movimientos repetidos de agarre y contundentes de la muñeca, articulaciones y dedos. Los síntomas incluyen dolor, hinchazón y limitación del movimiento en la muñeca y los dedos. (Rivas, 2023).

Esta se puede presentar según (Assadi, Mirzaei, & Esmaily, 2023) en los músculos flexores, extensores, y en los abductores de los dedos.

7.5.4.6. Tenosinovitis

Es una condición en la que los tendones del abductor largo del pulgar y del extensor corto del pulgar se estrechan debido a la inflamación en la vaina tendinosa que se encuentra en el primer compartimento extensor de la muñeca. Estas lesiones son causadas por el uso repetido de agarre y movimientos bruscos de la muñeca, así como de las articulaciones de la muñeca y los dedos. Cuando una persona sufre esta patología, las vainas de sus tendones se inflaman, lo que resulta en dolor y limitación del movimiento de la muñeca y el pulgar. (Rivas, 2023)

7.5.4.7. Trastornos musculoesqueléticos TME

Se entiende como las alteraciones o cambios en las estructuras físicas del cuerpo, tales como músculos, articulaciones, tendones, ligamentos, nervios, huesos y el sistema circulatorio, que son originados o intensificados principalmente por la labor desempeñada y las influencias ambientales en las que esta tiene lugar (Collaguazo, 2023). Principio del formulario.

7.5.5. EPP

Los equipos de protección personal (EPP) son elementos usados para proteger la integridad de los trabajadores de accidentes en el lugar de trabajo. Estos consideran una gran variedad de equipos dependiendo de la industria, que pueden ser equipos de seguridad, ropa de protección, ropa resistente a impactos, ropa de protección de cuerpo entero, protectores personales de seguridad y trajes para salas limpias, entre otros (Ammad & Alaloul, 2020).

7.5.6. Equipo biomédico

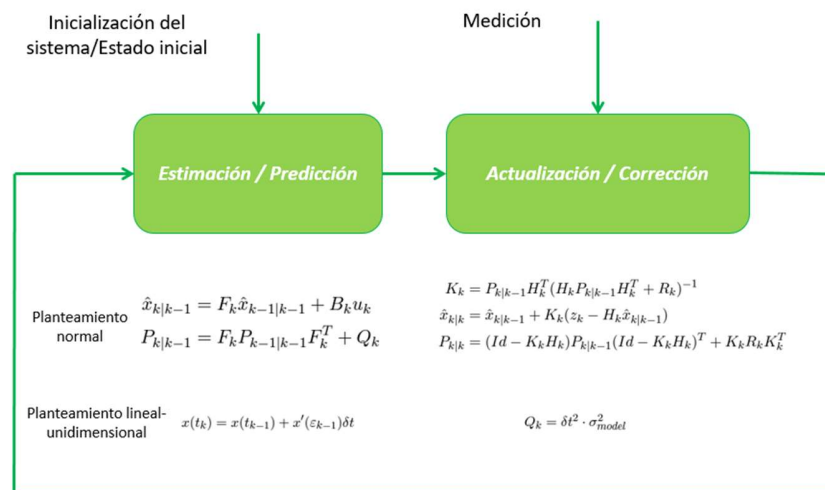
Es un dispositivo médico operativo y funcional que integra sistemas y subsistemas eléctricos, electrónicos o hidráulicos, junto con programas informáticos que aseguran su correcto funcionamiento, diseñado por el fabricante para ser utilizado en seres humanos con fines de prevención, diagnóstico, tratamiento o rehabilitación (Ministerio de Salud y Protección Social, 2005).

7.5.7. Filtro Kalman

El filtro de Kalman es considerado uno de los mayores avances en la teoría de estimación estadística. Es una herramienta clave para la estimación de estados en sistemas dinámicos y ha sido aplicada en campos como el procesamiento de señales, navegación, control de procesos y predicción meteorológica, además de ser crucial en el control de sistemas complejos como aeronaves y naves espaciales. (López J. D., 2020)

Existen básicamente tres tipos de filtros Kalman como: el propuesto originalmente para sistemas lineales, el filtro de Kalman extendido usado para sistemas no lineales y el filtro de Kalman “unscented” que usa la transformada homónima para un mejor cálculo de los parámetros estadísticos, todos estos en tiempo discreto (López J. D., 2020). Los filtros Kalman tienen principalmente tres etapas, como se ilustra en la figura 30, las cuales son: inicialización, predicción y corrección, se les conoce también como filtro de estimación cuadrática lineal, y son usados para estimar los estados actuales de un sistema a través del tiempo (Khodarahmi & Maihmi, 2022).

Figura 30 Diagrama de flujo del filtro de Kalman junto con las ecuaciones de un sistema normal como lineal unidimensional



Fuente: Propia de los autores, adaptado de (Lopez J. D., 2020) y (Carrillo, 2021)

El filtro propuesto en este trabajo es cataloga por (Lopez J. D., 2020) y (Carrillo, 2021) como un filtro de Kalman unidimensional y lineal, aplicado de forma independiente a cada eje del sistema. Este enfoque presenta la ventaja de incorporar en su modelo tanto el ruido de medición como el ruido asociado al modelo del sistema. Los parámetros clave del filtro son: la incertidumbre de medición, incertidumbre de estimación y la varianza del proceso.

7.5.8. Hardware

Es la parte física de un sistema que incluye el microprocesador, la memoria y los puertos de entrada y salida (Hoyos-Gutiérrez, J.Cardona-Aristizabal, P.Muñoz-Gutiérrez, & Ramirez-Jimenez, 2023).En este contexto, el hardware se refiere a la estructura mecánica y los componentes electrónicos que conforman un sistema.

7.5.9. Prototipo

Puede definirse como un punto de partida para el desarrollo de futuros modelos que se irán perfeccionando con la debida retroalimentación del público objetivo y la incorporación de nuevas tecnologías. Este puede tomar la forma de un producto, proceso, servicio o modelo de negocio el cual se diseña y construye con el objeto de validar su viabilidad y utilidad en la vida real (Sarraipa & Castro, 2019).

7.5.10. Riesgo Laboral

Según las definiciones del decreto 1072 de 2015 en el artículo 2.2.4.6.2. Se entiende como riesgo “la combinación de la probabilidad de que ocurra una o más exposiciones o eventos peligrosos y la severidad del daño que puede ser causada por estos”. Entiéndase riesgo laboral como la probabilidad de exposición a cualquiera de los factores de riesgo a los que pueden estar expuestos los trabajadores, en los escenarios donde se realiza la práctica o actividad, capaz de producir una enfermedad o accidente (Ministerio del Trabajo, 2015).

Los trabajadores siempre están expuestos a algún riesgo correspondiente a la actividad que realizan, existen diferentes tipos de riesgos según el sector laboral. La

exposición a estos riesgos puede traer como consecuencia el desarrollo de enfermedades o la ocurrencia de un accidente. A continuación, se muestran las estadísticas pertenecientes a la tasa de enfermedad laboral según el sector:

Figura 31 Tasa de enfermedad laboral por sector



Fuente: Tomado de (Pino Castillo & Ponce Bravo, 2019)

7.5.10.1. Agente de Riesgo Físico

Se entiende por agente de riesgo todo aquello como objetos, infraestructura, ambiente y/o acciones humanas, que están en capacidad de producir daño. Los agentes físicos son aquellos que, pueden provocar daños en la salud del trabajador, según su intensidad concentración (López, Penagos, & Murillo, 2015).

7.5.11. Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST)

Este sistema, obligatorio para todos los empleadores, se desarrolla de manera lógica y por etapas, siguiendo principios de mejora continua. Incluye aspectos como la formulación de políticas, la organización, la planificación, la ejecución, la evaluación, la auditoría y la aplicación de acciones para la mejora continua. Su propósito es prever,

identificar, evaluar y controlar los riesgos que puedan incidir en la seguridad y salud en los entornos laborales (MinTrabajo, 2015).

7.5.12. Software

Es el conjunto de programas y códigos que proporcionan instrucciones a los componentes físicos (hardware) para realizar tareas específicas (Hoyos-Gutiérrez, J.Cardona-Aristizabal, P.Muñoz-Gutiérrez, & Ramirez-Jimenez, 2023).

7.5.13. Vibración

La vibración puede describirse como un movimiento oscilatorio de cuerpos sólidos respecto a una posición de referencia o equilibrio en un tiempo determinado, el objeto no tiene desplazamiento neto (Senovilla, 2009). A este concepto se asocian otros muy importantes como son la frecuencia y el periodo. En el área de Seguridad y Salud en el Trabajo la vibración es un tipo de riesgo físico que puede ser transmitida a los trabajadores por el contacto con herramientas tales como taladros, perforadoras, lijadoras, caladoras entre otros, las cuales generan vibración y al ser absorbida por las extremidades superiores tiene implicaciones, a corto, medio y largo plazo en la salud (Nieto, Rojas, & Nestiel, 2019). La vibración tiene las siguientes características:

7.5.13.1. Frecuencia y Periodo

El termino frecuencia se define como el número de veces por cada segundo que se realiza un ciclo, es decir, que el objeto vuelva a su estado de equilibrio. Por otro lado, el periodo es el inverso de la frecuencia, se define como el tiempo que se demora un ciclo en ser completado (Cañola & Serna, 2020).

7.5.13.2. Magnitud

Por tratarse de un movimiento puede medirse en términos de la aceleración producidas. Para realizar la medición de esta magnitud, el transductor recomendado por su tamaño y fiabilidad es el acelerómetro piezoeléctrico (Senovilla, 2009).

7.5.14. EPP Inteligente

Se trata de una pieza de protección personal equipada con una serie de sensores diseñados para monitorear las variables del entorno mientras el operario lleva a cabo sus tareas. Su propósito es asegurar un ambiente seguro y reducir los riesgos asociados (Márquez-Sánchez, Campero-Jurado, Herrera-Santos, Rodríguez, & Corchado, 2021).

7.5.15. Wearable

Dispositivo compacto usado para monitorear, gestionar y detectar variables físicas en el cuerpo del ser humano. (Suranthalaa, Atmajab, David, & Wicaksono, 2021) Usualmente lo diseñan en forma de accesorios, integrado a las prendas o injertos para el cuerpo. (Guk, y otros, 2019)

7.6. Marco Legal

7.6.1. Marco Legal Nacional

7.6.1.1. Ley 1562 de 2012

Por la cual se modifica el sistema de Riesgos Laborales y se dictan otras disposiciones en materia de salud ocupacional. Esta ley define en su artículo 4 la enfermedad Laboral en Colombia como “aquella que es contraída como resultado de la exposición a factores de riesgo inherentes a la actividad laboral o del medio en el que el trabajador se ha visto obligado a trabajar” (Congreso de Colombia, 2012) .

7.6.1.2. Decreto 1477 de 2014

Por el cual se expide la Tabla de Enfermedades Laborales que se divide en dos grupos:

1. Agentes de riesgo, para facilitar la prevención de enfermedades en las actividades laborales
2. Grupos de enfermedades, para determinar el diagnóstico médico en los trabajadores afectados.

A continuación, se relacionan los riesgos a los que están expuestos los trabajadores del sector industrial y las enfermedades resultantes (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2014).

- a) Agentes físicos

Tabla 14 Agentes Físicos – Riesgos Laborales y enfermedades

Factor de Riesgo	Ocupación o industria	Enfermedades
Vibraciones, vibración cuerpo entero y vibración transmitida a la extremidad superior por maquinaria o herramientas	<ul style="list-style-type: none"> Trabajos que impliquen el manejo de maquinaria que transmiten vibraciones como: martillo neumático, punzones, taladros, taladros a percusión, sierras mecánicas, entre otras. 	<ul style="list-style-type: none"> Tendinitis Síndrome de manguito rotador Síndrome de Raynaud Dolor articular Lesiones de hombro no especificadas.

Fuente: Tomado de (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2014)

b) Agentes Ergonómicos

Tabla 15 Agentes Ergonómicos – Riesgos Laborales y enfermedades

Factor de Riesgo	Ocupación o industria	Enfermedades
Combinación de movimientos repetitivos con fuerza y/o posturas forzadas de miembros superiores, con alta demanda de tareas manuales o con herramientas de vibración.	<ul style="list-style-type: none"> Puestos y trabajos con tareas que demandan ejercer actividades manuales o repetitivas. Perforadores de piedra 	<ul style="list-style-type: none"> Síndrome del túnel carpiano. Mononeuropatías de miembros superiores. Síndrome de Canal de Guyon Lesión de nervio radial Otras
Posiciones forzadas y movimientos repetitivos. Vibraciones localizadas.	<ul style="list-style-type: none"> Operadores de taladros, motosierras, martillos neumáticos y perforadoras mecánicas. 	<ul style="list-style-type: none"> Fibromatosis de la fascia palmar. Contractura de Dupuytren. Otras entesopatías Mialgia Otros trastornos especificados de los tejidos blandos.
Movimientos repetitivos de brazo en tareas que requieren fuerza en los movimientos y posiciones difíciles involucrando uso excesivo de los músculos aprehensores de la mano al cerrar los puños.	<ul style="list-style-type: none"> Actividades que requieran al trabajador utilizar las manos para sujetar herramientas por periodos prolongados, máquina perforadora. 	<ul style="list-style-type: none"> Epicondilitis media.

Fuente: Tomado de (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2014)

7.6.1.3. Decreto 1072 de 2015 Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo

Es un compilatorio de normas preexistentes. Este decreto tiene como objetivo compilar y racionalizar las normas de carácter reglamentario que rigen en el sector y contar

con un instrumento jurídico único como Reglamento del Sector Trabajo (Ministerio del Trabajo, 2015).

7.6.1.4. Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional. GTC 45 de 2012

El documento presenta un manual para identificar los peligros y valorar los riesgos de seguridad y salud laboral. Teniendo en cuenta la naturaleza, actividades y los recursos, las organizaciones podrán ajustar esta guía a sus necesidades. El objetivo principal de la identificación y valoración de riesgos presentes en las actividades laborales es que la organización pueda desarrollar un plan de control para asegurar que este sea mínimo o aceptable. (ICONTEC - GTC 45, 2012).

7.6.1.5. Vibración mecánica y choque. Evaluación de la exposición de los seres humanos a la vibración en todo el cuerpo. NTC 5436-1:2006

El documento establece los métodos para medir la vibración en todo el cuerpo de manera periódica, aleatoria y transitoria al brindar factores que se deben tener en cuenta para establecer el grado exposición aceptable a la vibración. (INCONTEC-NTC 5436-1:2006, 2006)

7.6.1.6. Estándares Mínimos Resolución 0312 de 2019

El documento establece los estándares mínimos del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SGSST) para personas naturales y jurídicas. Incluye normas, requisitos y procedimientos para la verificación y control de las condiciones del sistema de gestión en todas las actividades. (Ministerio de Trabajo de Colombia, 2019)

7.6.1.7. Resolución 2400 de 1979

Este documento contiene disposiciones relacionadas con vivienda, higiene y seguridad que son aplicables a todos los lugares de trabajo. Esto no excluye la posibilidad de implementar regulaciones específicas para cada centro laboral, con el objetivo de salvaguardar la salud física y mental de los trabajadores, prevenir accidentes y

enfermedades laborales, y garantizar condiciones óptimas de higiene y bienestar en sus diversas actividades. (Ministerio de Trabajo de Colombia, 1979)

7.6.2. Marco Legal Internacional

7.6.2.1. Norma ISO 45001:2018

Establece un marco que permite gestionar de manera efectiva los riesgos y oportunidades asociados con la Salud y Seguridad en el Trabajo. Su objetivo principal y los resultados previstos de dicho sistema son prevenir lesiones y preservar la salud de los trabajadores, garantizando entornos laborales seguros. Por esta razón es de vital importancia identificar y eliminar peligros, así como reducir al mínimo los riesgos relacionados mediante medidas de protección y prevención (Organización Internacional de Normalización, 2018).

7.6.2.2. UNE-EN ISO 5349-1 de 2002

Esta norma especifica los requisitos generales para la adecuada medición y la información inherente a la exposición a las vibraciones transmitidas a miembros superiores, en tres ejes ortogonales. Define una ponderación en frecuencia y los filtros de banda limitante para conseguir una comparación uniforme de las medidas. Esta información puede utilizarse para predecir los efectos adversos de las vibraciones transmitidas en el intervalo de frecuencia cubierto por las bandas de octava que van desde 8 Hz a 1 000 Hz (Normalización Española - Organización Internacional de Normalización, 2002).

7.6.2.3. UNE-ISO 2631-1:2008

En este documento se definen los métodos para la correcta medición de vibraciones de cuerpo entero periódicas, aleatorias y transitorias. Además, se explican los principales factores que se combinan para determinar si el grado a la que la exposición a vibraciones es aceptable (Normalización Española - Organización Internacional de Normalización, 2008).

7.6.2.4. ISO 20643 – 2005

La norma da una guía para el ensayo de máquinas a motor que emiten vibraciones y que se manejan con las extremidades superiores. Puede además emplearse para determinar valores de referencia para aquellas máquinas para las que no existe códigos de ensayo. La norma es aplicable a herramientas eléctricas sujetas con extremidades superiores, máquinas eléctricas guiadas con extremidades superiores y otro tipo de máquinas eléctricas dotadas de mangos guías, empuñadores u otros que necesiten ser controlados con la extremidad mano-brazo (Organización Internacional de Normalización, 2019).

7.6.2.5. ISO 31000 – 2018

Esta norma es una guía para la administración de los riesgos a los que están expuestas las empresas sin importar de que tipo sean. El documento va dirigido a empresas que deseen gestionar los riesgos y tomar decisiones con base en la mejora continua. Las empresas de cualquier tipo se enfrentan a factores e influencias internas y externas que complican el alcance de los objetivos, la correcta administración de riesgos considera todos los contextos de la organización, incluyendo el factor humano y cultural (Organización Internacional de Normalización, 2018).

7.6.2.6. ANSI Z10

Establece sistemas de gestión de SST para mejorar la seguridad de los empleados, reducir los riesgos laborales y mejorar condiciones laborales. Además, permite a las organizaciones ver de manera integral los elementos centrales interdependientes del sistema e involucra a la gerencia y a los trabajadores para mejorar el desempeño de seguridad. Es uno de los estándares basados en sistemas más completos y proporciona una guía para que las empresas puedan personalizarla según sus necesidades individuales (American National Standard, 2020).

7.6.2.7. ANSI S2.70-2006

Especifica el método para la adecuada medición, análisis y evaluación de vibraciones transmitidas a la mano y riesgos para la salud. Los métodos especificados en esta norma deben usarse para caracterizar y evaluar las vibraciones transmitidas a los miembros superiores y de igual manera orientar sobre la evaluación la posibilidad de que la exposición a la vibración resulte en una patología que ponga en riesgo la salud de los usuarios de dispositivos portátiles. dispositivos, herramientas y piezas de trabajo de percusión o vibración (American National Standard, 2020).

7.6.2.8. IEC 62133-2:2017

Especifica los requisitos y pruebas para el funcionamiento seguro de pilas secundarias y baterías que contienen electrolitos alcalinos u otros electrolitos no ácidos. Adicionalmente, dicta los requisitos de seguridad para pilas secundarias portátiles sellados y para baterías fabricadas a partir de ellas para uso en dispositivos portátiles (International Electrotechnical Commission, 2017)

8. DISEÑO METODOLOGICO

8.1. Tipo y enfoque de investigación

Se define el presente trabajo como tipo de investigación descriptiva bajo un enfoque metodológico mixto, donde se aplican los conocimientos y habilidades obtenidas a lo largo del proceso de formación en los programas de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería Industrial. El tipo de enfoque es descriptivo debido a que se hace un análisis de las características del problema real mediante literatura y una visita de campo. El enfoque mixto se realiza a partir de un análisis y monitoreo de variables cuantitativas, como lo son la vibración (aceleración) y el tiempo de exposición que serán medidas por el prototipo desarrollado. Las variables cualitativas serán ejecutadas mediante instrumentos como las encuestas realizadas tanto a los operarios como a los administrativos y/o supervisores.

8.2. Diseño de investigación

Se plantea un diseño de investigación experimental debido a que se requieren una serie de pruebas para llegar al prototipo, esto a fin de garantizar la calidad de los datos obtenidos de vibración (aceleración) y el tiempo de exposición, así como asegurar el correcto funcionamiento de sistemas mecánicos, electrónicos y computacionales.

8.3. Técnicas de recolección y análisis de la información

Las fuentes de investigación para este proyecto serán de tipo primario, debido a que se requiere información recolectada mediante encuestas, un formato de inspección y revisión bibliográfica. Estos nos permiten definir la raíz del problema, las condiciones reales de la investigación y aspectos relevantes para desarrollar el prototipo. El análisis establece una fase diagnóstica y una fase de evaluación a fin de conocer la situación antes y después de la prueba de dispositivo en campo.

En la fase diagnóstica se realizan encuestas donde encontraremos preguntas abiertas y cerradas, enfocadas en tres temas principales, exposición, sensibilidad, seguridad y salud en el trabajo. Utilizando un formato de inspección para evaluar las

condiciones actuales de la empresa en cuanto al riesgo físico por vibración. El segundo instrumento para utilizar es una encuesta aplicable luego de la prueba de campo centrándose en temas como: sensibilidad, ergonomía, comodidad, utilidad y mejora del dispositivo. Lo que proporcionara data suficiente para determinar requerimientos importantes para tener en cuenta en el dispositivo.

El estado del arte nos aporta aspectos importantes de avances en investigación pertenecientes a este campo de aplicación como lo es los métodos de medición y dispositivos usados, los cuales serán de suma importancia para la toma de decisiones, permitiendo comparar los resultados de esta investigación con los indicadores actuales que puedan generar soluciones para los trabajadores.

La toma de datos se aplica a un número determinado de personas, que están expuestas a tareas repetitivas con el uso de herramientas que producen vibración específicamente la zona mano-brazo y a su vez con el personal encargado de la seguridad y salud en el trabajo.

Luego de la toma de datos tanto de instrumentos como de formatos se aplica un análisis cualitativo y cuantitativo por medio de diagramas para identificar factores clave para los requerimientos y conocer el estado inicial en el que se encuentra la empresa para tener un panorama sobre el riesgo. Por otro lado, para los datos del dispositivo se aplican medidas estadísticas descriptivas como el promedio, la mediana, la desviación estándar, la varianza, el mínimo y el máximo para obtener una comprensión completa de la exposición a vibraciones en los operarios. Estas medidas permiten:

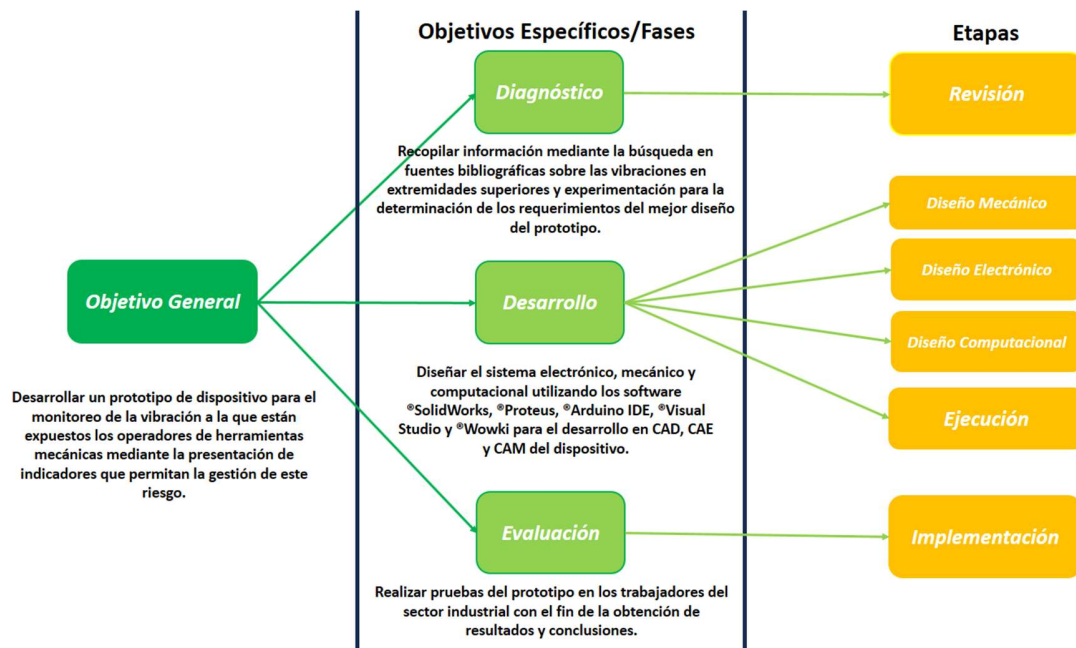
- **Evaluar el nivel de exposición:** Ayudan a identificar tanto el valor promedio de vibración al que están expuestos los operarios como los extremos, lo que es crucial para evaluar el riesgo potencial.
- **Comprender la variabilidad:** La desviación estándar y la varianza proporcionan información sobre la dispersión de los datos, lo que indica si la exposición a vibraciones es consistente o varía significativamente. Esto es importante para identificar situaciones de mayor riesgo.

- **Identificar rangos de exposición:** Los valores mínimo y máximo permiten conocer el rango de vibración, lo que ayuda a establecer límites de seguridad y a identificar condiciones de trabajo potencialmente peligrosas.
- **Informar decisiones de intervención:** Al tener una visión clara de los datos, se pueden desarrollar estrategias más efectivas para mitigar el riesgo de lesiones relacionadas con la exposición a vibraciones.

8.4. Procedimiento

Para el desarrollo de este proyecto, se establece una ruta de trabajo basada en los objetivos específicos, los cuales representan tres fases: diagnóstico, diseño e implementación. A continuación, se presenta el diagrama que muestra la metodología a seguir en el proyecto.

Figura 32 Metodología - Plan de trabajo



Fuente: Propia de los Autores

En la figura 32 se sintetiza cada elemento para mejorar la comprensión del plan de trabajo. El diagrama puede verse completo con el detalle de actividades en el Anexo 2.

8.5. Etapas del proyecto

Las etapas son subdivisiones dentro de las mismas fases del proyecto y a su vez es un indicador para delimitarlo. Dentro de cada etapa se encuentran establecidas una serie de tareas a realizar. A continuación, se describen mejor cada una de las fases.

8.5.1. Revisión

Para el desarrollo de esta primera etapa, se realizarán varias visitas técnicas a la empresa para analizar el problema de la exposición constante a vibraciones y a su vez en recopilar información esencial que abarca conceptos, temas, métodos, investigaciones bibliográficas, formatos de inspección y encuestas relacionadas con el riesgo físico por vibración. Se realizan tareas que van desde el marco teórico hasta la realización de la encuesta diagnóstica, lo que determinará los requerimientos y características necesarias para el diseño del prototipo.

La encuesta diagnóstica, el formato de inspección y la encuesta post-diagnostico se pueden ver en el anexo 3, 4 y 5.

8.5.2. Diseño Mecánico

En esta etapa del proyecto, se delimita en cuanto a la estructura del dispositivo abarcando de manera inicial la investigación y selección de materiales por medio de la matriz. Posteriormente teniendo en cuenta aspectos como la ergonomía y sostenibilidad, nos llevarán al dimensionamiento por diseño en CAD y la fabricación de la estructura mecánica del prototipo al utilizar CAM. Las tareas inician desde la investigación de materiales hasta la posterior impresión en 3D.

8.5.3. Diseño Electrónico

Para esta etapa, se definen los requerimientos técnicos de fuentes de alimentación, sensores, microcontroladores, tarjetas electrónicas, módulos de comunicación y actuadores, para su investigación a partir de sus fichas técnicas y DataSheets dando como resultado la selección por medio de la matriz. Seguido a los cálculos, diseño del circuito en CAD, simulación en CAE con su debida programación y fabricación CAM, llegando al resultado final de una tarjeta funcional.

8.5.4. Diseño Computacional

En la etapa final del diseño, se considera el método de comunicación de la etapa electrónica, para definir los requerimientos del entorno y seleccionar este por medio de la matriz. Esto nos permitirá programar el dispositivo en el entorno adecuado, realizar pruebas y completar una interfaz que facilite su uso para verificar el proceso de monitoreo de vibración en tiempo real. Durante el proceso de esta etapa, se realizan tareas desde la revisión bibliográfica de entornos de programación hasta la programación de la interfaz que permita una buena ejecución del proceso de medición.

8.5.5. Ejecución

Durante esta etapa del proyecto, se integran las habilidades teórico-prácticas adquiridas en la formación académica para el ensamble (mecánico, electrónico y software), calibración y pruebas de funcionamiento.

8.5.6. Implementación

En esta etapa, se lleva a cabo la prueba de campo del prototipo para obtener resultados estimados. Esto se realiza mediante la recolección de información a través de una encuesta posterior a la prueba, así como el uso del dispositivo en diversos entornos y con distintas herramientas. Finalmente, se procederá al análisis de los resultados y a la formulación de conclusiones del proyecto de investigación.

8.6. Población

Trabajadores u operarios de maquinaria o herramientas vibratorias conducidas por los miembros superiores. La empresa cuenta con 10 trabajadores incluyendo el dueño.

8.7. Muestra

Trabajadores de la industria que operan constantemente herramientas mecánicas como taladros, caladoras, lijadoras o pulidoras, taladros de concreto, perforadoras de roca, entre otras herramientas o máquinas que producen vibración. Muestreo a Conveniencia de trabajadores de la empresa seleccionada, aplicándolo a 3 personas.

9. DIAGNÓSTICO

9.1. Revisión

Se realizó una búsqueda bibliográfica sobre los riesgos asociados a la exposición a vibraciones, las enfermedades laborales derivadas de una exposición prolongada, la normativa nacional e internacional pertinente, entre otros aspectos, con el objetivo de desarrollar un prototipo de dispositivo capaz de monitorear tanto el tiempo de exposición como la aceleración a la que está sometido el operario.

Para el desarrollo del dispositivo, es fundamental conocer las condiciones reales a las que están expuestos los trabajadores en la industria. Como se mencionó en apartados anteriores, sectores como la construcción, la metalmecánica, la carpintería, entre otros similares, presentan una mayor exposición a este tipo de riesgos, tanto en las extremidades superiores como en el cuerpo completo. Teniendo en cuenta lo anterior, se diseñó una encuesta para recolectar información cualitativa relacionada con la Seguridad y Salud en el lugar de trabajo. La encuesta completa se encuentra en el Anexo 13.

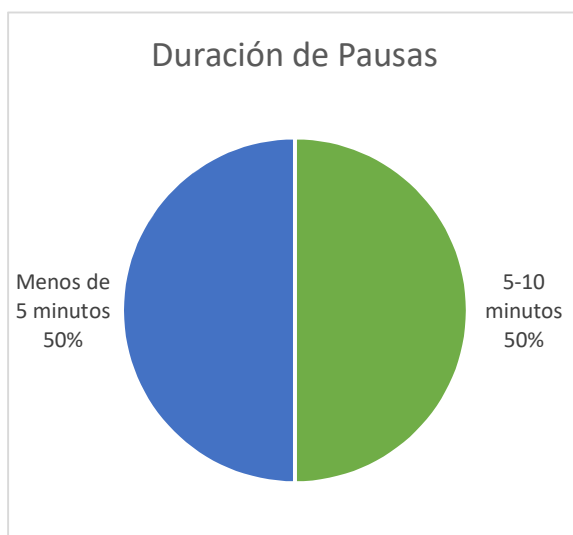
La encuesta fue aplicada a seis operarios que están expuestos al riesgo por vibración, ya sea de manera constante o esporádica durante su jornada laboral de 8 horas. La mayoría de estos trabajadores desempeñan diversas tareas, por lo que no están expuestos de forma continua a las vibraciones. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los encuestados:

9.1.1. Resultado Encuesta Diagnóstico

Las empresas donde se realizaron las encuestas al ser pequeñas tienen pocos operarios y no cuentan con un sistema de gestión de seguridad en el trabajo formalmente establecido, por lo que el uso de elementos de protección personal no es habitual. En términos generales, los trabajadores no están expuestos de manera constante a riesgos por vibración debido a que se dedican a diversas tareas según la necesidad, Por lo tanto, el uso de herramientas vibratorias es esporádico y de corta duración.

Se encuestaron a un total de 6 operarios que están expuestos regularmente a riesgos por vibración. Todos ellos utilizan diversas herramientas a lo largo de su jornada laboral, algunas de las cuales representan un riesgo significativo debido a la vibración. Ninguno de los encuestados realiza pausas activas adecuadas a la actividad que desempeñan. Sin embargo, entre tareas, toman descansos breves de aproximadamente 5 a 10 minutos. El 50% de los encuestados reporta descansos de máximo 5 minutos, mientras que el resto toma pausas de 10 minutos, como se muestra en la figura 33.

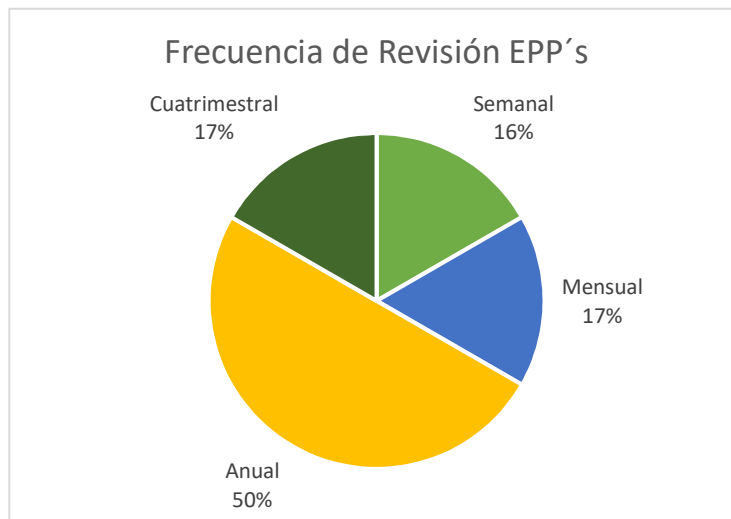
Figura 33 Duración Pausas Activas



Fuente: Propia de los Autores

A pesar de esta situación, los operarios afirmaron no presentar enfermedades ni síntomas relacionados con la exposición a la vibración. Las herramientas más comúnmente utilizadas incluyen taladros (tanto para madera como para concreto), pulidoras o lijadoras, sierras, y planeadoras, entre otras. En el anexo 13 se encuentra más detallada las respuestas de cada colaborador.

Figura 34 Frecuencia de revisión de los Elementos de Protección Personal



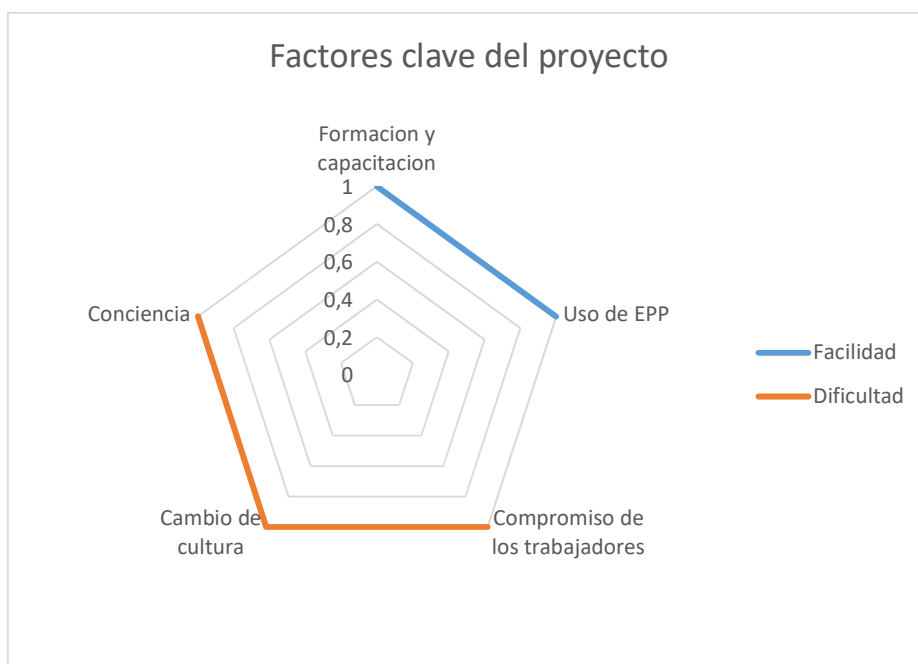
Fuente: Propia de los Autores

La mayoría de los operarios no utiliza los Elementos de Protección Personal (EPP) mínimos necesarios para la realización de sus actividades. Esto se debe al tamaño reducido de las empresas y a la variedad de tareas que desempeñan en su jornada laboral. Los encuestados indican que los EPP son revisados, en la mayoría de los casos, solo una vez al año o cuando el equipo necesita ser reemplazado por daños significativos.

Respecto al Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SGSST), se llevó a cabo una encuesta a la persona encargada para complementar la información recopilada de los trabajadores. Esta sección muestra que la empresa enfoca su SGSST en la situación laboral de manera constante. Las reuniones de capacitación se realizan cada dos meses, ajustándose al nivel de riesgo de las tareas desempeñadas por los empleados. Se subraya la importancia del uso de equipos de protección personal (EPP) para reducir riesgos. Asimismo, la administración se ocupa del mantenimiento correctivo y preventivo de los equipos, así como del aislamiento y análisis de riesgos, que incluyen el reemplazo regular de los EPP.

Además, se observa que no se efectúan mediciones de vibración, limitándose a una revisión realizada por un agente externo para evaluar el riesgo. Por otro lado, en cuanto a los factores determinantes a tener en cuenta durante la implementación, se ilustran en la figura 35.

Figura 35 Factores clave del proyecto



Fuente: Propia de los Autores

9.1.2. Resultado Formato de Inspección

El formato de inspección se realizó por observación en la visita de campo a la empresa. Se debe tener en cuenta que al ser una empresa pequeña no cuentan con un sistema de gestión de riesgos. Como resultado, los empleados no usan correctamente los elementos de protección personal para las actividades que realizan o herramientas que utilizan. En el anexo 15 se muestra el formato de inspección diligenciado.

Teniendo en cuenta la información recopilada de diversas fuentes bibliográficas, instrumentos y formatos de inspección, se establecieron los siguientes parámetros a cumplir para el desarrollo del dispositivo. Estos parámetros abarcan aspectos que van desde la

facilidad de uso hasta la duración de funcionamiento. A continuación, se presentan en la tabla 16.

Tabla 16 Características sobre requerimientos del dispositivo

Requisito	Cumplimiento
Autonomía aproximada	Entre 8 y 19 h
Modo de carga de las baterías	Sí
Accesibilidad a los datos y facilidad de uso	Sí
Ajustable y ergonómico	Sí
Resistencia al polvo, golpes, caídas y temperatura ambiente	Sí
Peso aproximado	Menor o igual a 200 gr

Fuente: Propia de los autores

10. DESARROLLO

10.1. Diseño Electrónico

En el diseño electrónico del dispositivo, se detallarán los softwares de CAD, CAE y CAM relacionados con la electrónica, destacando no solo su descripción teórica, sino también su aplicación práctica para cumplir con los objetivos del proyecto. Estos softwares se emplearán para diseñar, simular y fabricar el circuito impreso. Esto abarcará la implementación de técnicas de electrónica analógica y digital, así como el diseño de circuitos avanzados para asegurar el funcionamiento óptimo del dispositivo.

10.1.1. Selección de componentes

Para la selección de los componentes electrónicos del dispositivo de monitoreo, se tuvo en cuenta inicialmente la data recolectada en la etapa diagnóstico y también en la biodinámica de la mano y el brazo de la figura 11, así como otros criterios relevantes para la selección de cada uno de los componentes, exceptuando el uso de tarjetas electrónicas de desarrollo, pantallas LCD/OLED y módulos de comunicación externos ya que no se consideran necesarios en el diseño final. En cuanto a los módulos de comunicación no se tienen en cuenta como parámetro externo para selección sino más bien como criterio de selección para el mismo microcontrolador a modo de no tener tantos componentes por aparte que podrían llegar a dificultar el tamaño del circuito en una PCB.

A continuación, se muestran los parámetros de selección y datos de operación de los componentes seleccionados.

10.1.1.1. Parámetros de selección del microcontrolador

Según las características de cada una de las opciones contempladas, se decidió optar el microcontrolador ESP32 WROOM 32, debido a su operación, amplia variedad de tipos de comunicación y familiarización con el código que usa un lenguaje C, C++ el cual es compatible con el IDE de @Arduino. Otro factor a tener en cuenta es el tamaño, ya que al ser pequeño permite que el mismo dispositivo sea compacto, cómodo y que sea fácil el

monitoreo de la vibración. Además, este dispositivo cuenta con la ventaja de tener incorporado el módulo de comunicación Bluetooth y WI-FI.

En la tabla 17, se evidencian las características que se tuvieron en cuenta para elegir el microcontrolador, siendo el criterio de elección una evaluación del 1 al 5, siendo 5 el mayor puntaje de calificación.

Tabla 17 Selección del microcontrolador

Referencia	Microcontrolador integrado	Tipo Comunicación	Voltaje de entrada (VCC)	Tamaño de la Placa	Lenguaje de programación	Precio en el mercado aproximado	Puntuación
PIC 18F4550	No aplica	3	4	4	4	4	19
Raspberry PI 4	RP2040	3	4	2	3	3	15
Arduino Uno	ATmega328P	3	4	2	4	3	16
ESP32	Esp32 wroom 32	5	4	3	4	5	21
ESP8266	Esp8266	3	4	4	4	3	18
Adafruit Feather nRF52840 Express Bluetooth BLE, Arduino Nano 33 BLE Sense	NRF52840	4	3	4	4	2	17
BeagleBoard Black	AM335x Sitara de Texas Instruments	3	4	3	5	2	17
Nvidia Jetson Nano	NVIDIA Tegra X1	3	4	2	5	1	15

Fuente: Propia de los autores

10.1.1.2. Parámetros de selección del sensor

Según las características establecidas en la tabla 8, se eligió el sensor ADXL345 debido a varios factores: su tamaño compacto de 19x14 mm, su bajo consumo de energía, la variabilidad de conexión mediante SPI o I2C, y su alta precisión para detectar cambios de 1g, ya sea en aceleración estática o dinámica. Asimismo, este sensor se enfoca

exclusivamente en medir la aceleración, a diferencia de otros sensores que realizan mediciones adicionales.

En la tabla 18 se muestran las características evaluadas para seleccionar el sensor, utilizando un criterio de calificación del 1 al 5, siendo 5 la máxima puntuación. Además, se incluyen las especificaciones propias del sensor.

Tabla 18 Selección del sensor

Nombre	Tipo de sensor	Rango	Input	Interfaz de salida	Precio en el mercado aproximado	Ejes	Protocolo comunicación	Total
MPU6050	3	5	5	4	4	4	5	30
Módulo ADXL345	5	5	5	5	4	4	5	33
Módulo ADXL335	4	2	5	2	4	4	4	25
MPU9250	3	5	5	4	3	2	4	26
MMA845X	3	3	3	2	2	4	4	21

Fuente: Propia de los autores

10.1.1.3. Parámetros de selección de la fuente de alimentación

Según las características de las opciones tomadas en cuenta, se seleccionó una batería de 3.7v 1000mah LiPo ya que es recargable y empleada en aplicaciones de alto consumo de energía como drones, smartwath y otros dispositivos. También por el hecho de ser ligeras, tener gran capacidad de carga por lo que tiene una larga duración y su tamaño que es relativamente pequeño de 33 x 20 x 5 mm.

En la tabla 19 se presentan las características consideradas para elegir la fuente de alimentación, con un criterio de evaluación del 1 al 5, donde 5 representa la máxima calificación. También se detallan las características específicas del módulo.

Tabla 19 Selección de la fuente de alimentación

Nombre	Capacidad de la batería	Voltaje	Dimensiones y peso	Precio en el mercado aproximado	Total
Batería de Litio 18650	5	5	1	4	15
Batería Recargable en Polímero de Litio 3.7V - 1000mA	4	5	4	4	17
Batería LiPo 3.7 V 400 mAh	3	5	3	3	14
Batería botón Ion-Litio. 3,6v - 45 mAh - LIR2032	1	4	3	4	12

Fuente: Propia de los autores

Además, para proporcionar el voltaje necesario para el circuito, se utilizó un módulo conversor DC-DC TIPO BUCK MP1584EN. Este módulo reduce el voltaje de entrada de 5 v en adelante hasta 28 v y mantiene un voltaje fijo de 5V. Se eligió un módulo sin puertos externos ni potenciómetro para ajustar el voltaje; en su lugar, cuenta con un controlador que sin importar los cambios en la entrada permanece constante la salida sin que sea mejor al voltaje de salida.

10.1.1.4. Parámetros de selección del módulo de carga

De acuerdo con las características de la batería y la revisión de varios módulos de carga, se decidió optar por un módulo de carga DDTCCRUB debido a que se acopla con baterías de LiPo (Polímero de Litio) o Li-ion (Ion de Litio) de dos celdas de 3.7V. Además, se seleccionó por su tamaño reducido y por ser ligero. Proporciona comodidad para la carga mediante un puerto micro USB o tipo c, con voltaje 5v.

En la tabla 20 se presentan las características consideradas para elegir el módulo de carga, con un criterio de evaluación del 1 al 5, donde 5 representa la máxima calificación.

Tabla 20 Selección del módulo de carga

Nombre	Voltaje de corte de carga	Voltaje de entrada	Dimensiones	Tipo Conector	Precio en el mercado aproximado	Total
Cargador Baterías Litio DDTCCRUB	5	5	5	5	4	24
Cargador Solar De Alta Potencia Para Baterías De Litio Cn3065	5	5	4	4	4	22
Cargador de batería de litio MCP73831	4	3	2	4	3	16
PRT-10217 para baterías de polímero de litio	3	5	2	4	1	15
Cargador De Batería De Litio Tp5100 2ª	2	3	3	2	3	13

Fuente: Propia de los autores

10.1.1.5. Parámetros de selección de los actuadores

De acuerdo con una revisión a la lista de actuadores seleccionados, se decidió optar por un led RGB cátodo y un Buzzer Activo 3V - Zumbador tipo Pito Continuo por factores de voltaje y dimensiones, aunque en si es para que sirvan de indicadores tanto lumínico como de ruido a modo de indicar funcionamiento y también tiempo límite de exposición dependiendo del nivel de exposición. La sección de estos se puede visualizar en la tabla 21.

Tabla 21 Selección de los actuadores

Nombre	Voltaje de entrada	Dimensiones	Tipo Conector	Total
Diodo Led Chorro rojo, azul, amarillo, blanco, RGB	5	4	4	13
Módulo Buzzer Pasivo 5V - Entrada PWM 2 KHz ~ 5 KHz	1	3	3	7
Buzzer Pasivo 3V - Zumbador que Reproduce Melodías	2	3	3	8

Nombre	Voltaje de entrada	Dimensiones	Tipo Conector	Total
Buzzer Activo 3V - Zumbador tipo Pito Continuo	5	4	4	13

Fuente: Propia de los autores

10.1.2. Diseño CAD-Esquemático

Una vez fijados los elementos por los parámetros de selección se procede a realizar el esquemático del circuito en el software de simulación de Proteus donde se evidenciarán las conexiones y elementos del circuito, como se muestra en el anexo 7, para poder realizar la PCB y posterior ensamble.

El esquemático está compuesto por los elementos especificados en la tabla 22, en términos de cantidad. Inicialmente, se establecen tres entradas: dos para las baterías conectadas en serie, que suministran 7.4 V y 1 A. En los extremos de esta conexión se incluye el módulo de carga, que debe conectarse cuando el circuito esté abierto mediante el interruptor. Para prevenir picos de voltaje que puedan dañar los dispositivos, se incorpora un diodo Shockley en la entrada.

A continuación de la conexión de las baterías, se encuentra el interruptor, que permite activar el dispositivo y suministrar voltaje al módulo Buck. Este módulo se ajusta para proporcionar una salida de 3.3 V al variar la resistencia R8 a un valor de 2.734 ohms, protegiendo así los componentes que operan a ese voltaje, con una eficiencia del 96%. Posteriormente, el voltaje se suministra al Buzzer, al sensor ADXL345 y al ESP32 WROOM-32, lo que permite la medición y habilita la conexión Bluetooth para enviar los datos. En caso contrario, los componentes permanecen apagados.

Es importante destacar que las conexiones al ESP32 incluyen el ADXL345 a través del bus I2C en los pines 21 y 22, el LED RGB conectado a los pines 4, 16 y 17, y finalmente el Buzzer al pin 19. Cada uno de estos componentes cuenta con la protección adecuada; por ejemplo, el ADXL345 tiene protección interna, mientras que el LED RGB requiere resistencias, y el Buzzer necesita una resistencia y un transistor.

Además, el ESP32 WROOM-32 cuenta con conexiones al pin enable(habilitador), que incluye dos resistencias de 471 Ω y 12 k Ω para reiniciar el microcontrolador al accionar el pulsador de reset. En el pin 2, se incorpora un LED 0805 para verificar el funcionamiento, y en el pin 0, se utiliza una resistencia de 5.12 Ω , que debe estar configurada como pull-down para el modo de arranque, evitando que el pin flote.

Tabla 22 Listado de elementos electrónicos del esquemático

Nombre	Cantidad
ESP32 WROOM 32	1
ADXL345	1
Interruptor	1
Batería 3.7 v	2
Led RGB	1
Buzzer 3.3 v	1
Resistencias 150 ohms 1206	3
Resistencia 1 kohm 12006	1
transistor 2n2222 1206	1
Diodo Shockley 310 10BQ015	1
MP1584EN Regulador de voltaje lineal	1
ASPI0630LR4R7MT15 Inductor/bobina smd	1
Capacitores de 1 nf 12006 y 0805	7
Resistencia 2,734 ohms	1
Resistencia 100 ohms 12006	1
Resistencia 1k	1
Resistencia 12 k	1
Resistencia de 471 ohms 12006	2
Pulsador 2 pinea NA	1
led 0805	1
Total	30

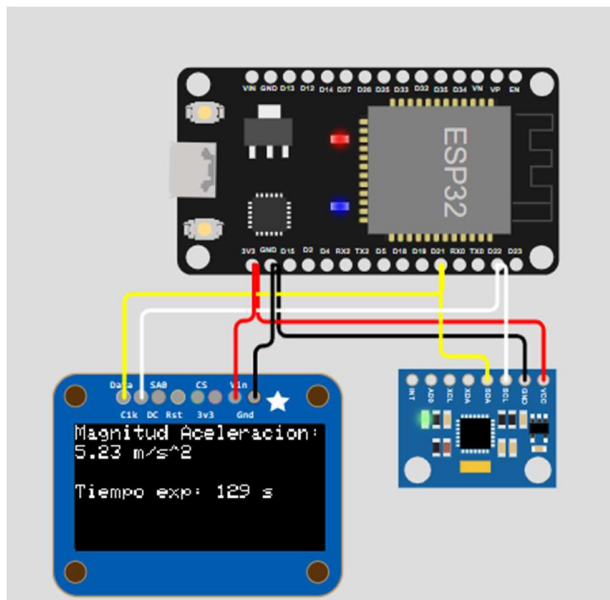
Fuente: Propia de los autores

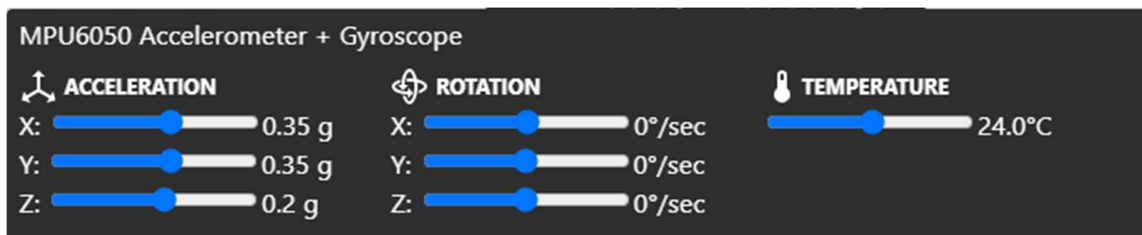
10.1.3. Simulación CAE

Dado que programas de simulación como @Proteus, @KiCad, @Multisim y @Tinkercad no ofrecen paquetes específicos para simular el comportamiento completo del circuito y solo permiten crear esquemas, la opción que brindan estos programas es usar el ESP32 con una simulación aproximada del sensor mediante potenciómetros. Por ello, se ha decidido simular únicamente el ESP32 junto con un sensor MPU6050, que comparte algunas características con el ADXL345, utilizando el software de simulación @Wokwi. Este enfoque facilita el análisis del comportamiento de un acelerómetro y permite realizar pruebas reales con una estructura muy similar a la del sistema final.

La simulación CAE de la figura 36, está conformada por un esp32, un MPU6050 y una pantalla SSD1306 para visualizar la data de la magnitud de la aceleración y el tiempo de exposición, aunque claramente está lejos de ser el circuito final sirve como una simulación de la idea del funcionamiento.

Figura 36 Simulación CAE ESP32, MPU6050 Y OLED SSD1306 en @Wokwi





Fuente: Propia de los Autores

El código de la simulación CAE, incluido en el anexo 8, utiliza las librerías Adafruit para el MPU6050 y el SSD1306. Estas librerías permiten configurar los dispositivos y establecer parámetros iniciales en las funciones `setup()` y `loop()`. Además, se definen las variables globales `startTime` y `exposureStarted` para calcular el tiempo en segundos usando la función `millis` desde el inicio del programa. Simultáneamente, se realizan mediciones de aceleración en los tres ejes cartesianos, que luego se procesan utilizando la fórmula de la Ecuación 1 para obtener el parámetro general.

Dentro de este código de simulación no se incluyeron más parámetros o funcionalidades debido a limitaciones del software @Wowki que no puede tener un código bastante largo o complejo para compilar, por lo tanto, es un prototipo inicial para el código real del microcontrolador y la interfaz.

10.1.4. Programación y estructura de funcionamiento

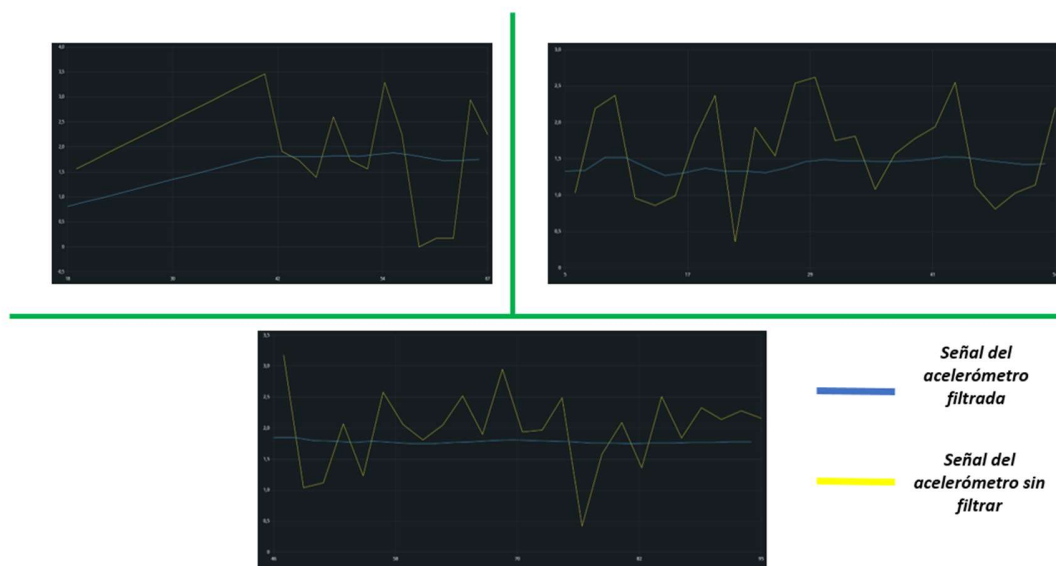
El funcionamiento completo del dispositivo depende tanto de la programación del microcontrolador como de la interfaz, aunque pueden funcionar de manera síncrona como asíncrona. Se especifica hasta qué punto cada uno de estos componentes es responsable del proceso en la figura 40 y en el anexo 9 está el código del microcontrolador.

Primero, la programación del microcontrolador se inicia con la activación del interruptor, lo que pone en funcionamiento el dispositivo. Sin esta activación, no se realiza ningún monitoreo. A continuación, se enciende el led del pcb de color blanco para rectificar el encendido y luego de eso el dispositivo debe colocarse en una posición horizontal sobre una superficie totalmente plana durante aproximadamente 5 segundos para llevar a cabo una calibración adecuada, estableciendo los offsets en cero. De manera simultánea, al

colocarlo en esta posición, se rectifica el estado del acelerómetro. Al cumplir con esto, el color rojo del LED RGB se activará, notificando la auto calibración. Después de la calibración, se coloca en la muñeca para adquirir los datos de aceleración en los tres ejes ortogonales.

Estos datos se filtran utilizando un filtro de Kalman cada 5 segundos para minimizar el ruido y evitar problemas en el buffer, un ejemplo del uso del filtro se puede visualizar en la figura 37. Posteriormente, se procesan para calcular el vector de suma de aceleración de acuerdo con la norma ISO 5349. Además, se activa el color verde del LED RGB para notificar de manera continua el envío de datos y el monitoreo.

Figura 37 Señal del acelerómetro filtrada por kalman y sin filtrar



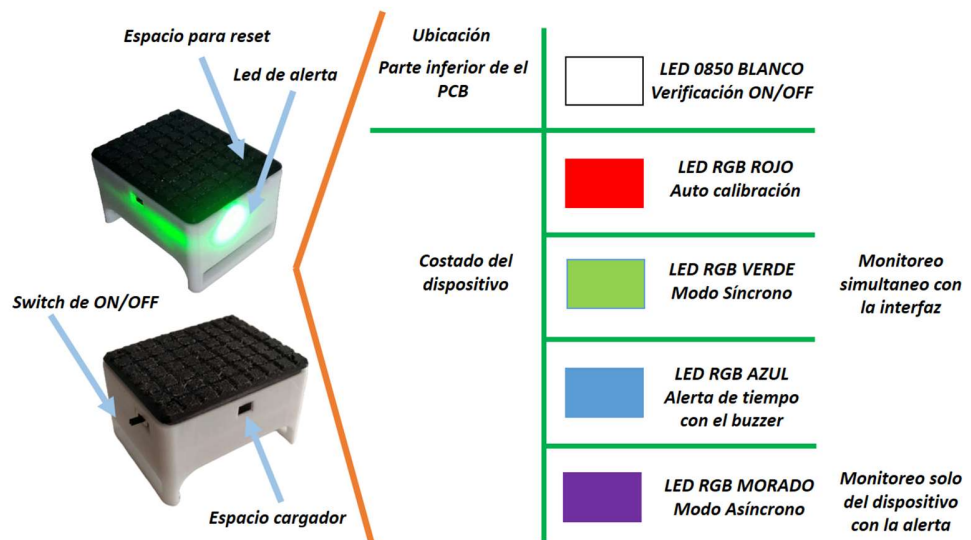
Fuente: Propia de los Autores

Si se trabaja sincrónicamente con la programación de la interfaz, el primer paso es establecer manualmente la conexión entre el dispositivo de monitoreo y el dispositivo receptor. Luego, se ejecuta manualmente el código de dashboard.py desde Visual Studio, que está vinculado a gui_app.py, para desplegar la interfaz. Esta interfaz verificará inicialmente la conexión entre el dispositivo y el receptor (PC, tableta o laptop); si detecta la conexión dentro de 1 segundo, el proceso continuará normalmente. De lo contrario, se

abrirá la interfaz en blanco con un mensaje indicando que no se pudo establecer la conexión.

Para conocer el significado de cada indicador luminoso se aborda la especificación de cada uno en la figura 38.

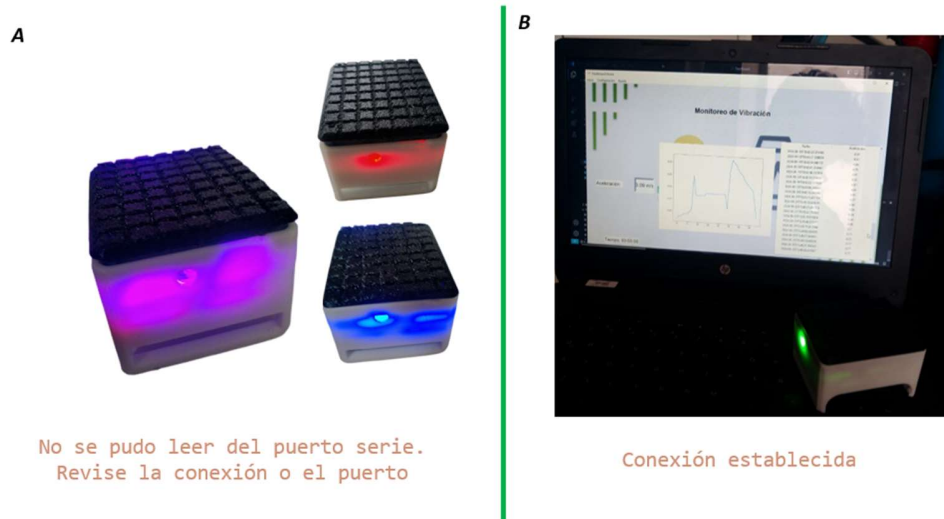
Figura 38 Indicaciones de funcionamiento con la parte física y la programación



Fuente: Propia de los Autores

Una vez abierta, la interfaz mostrará los datos de manera general en un recuadro con el valor actual, además de visualizarlos en un gráfico y en una tabla para consultar el historial. Simultáneamente, los datos se almacenarán automáticamente en una base de datos en SQL en tiempo real, como se puede visualizar en la figura 39. Donde están los modos de trabajo junto con el mensaje que sale en el monitor y la puesta en marcha.

Figura 39 Visualización en modos de trabajo y puesta en marcha



Fuente: Propia de los Autores

Además, la interfaz analizará tras un muestreo de 100 muestras el valor actual de la vibración para asignar el cronometraje del tiempo de exposición según los parámetros de la norma ISO 5349, reflejados en la tabla 4 y la ecuación [2], al promediarlos. Si se completa el tiempo máximo de exposición a la vibración, se mostrará una ventana emergente indicando que es necesario detenerse para tomar una pausa activa y a la vez se activara el Buzzer junto con un color azul del led RGB.

$$T = \begin{bmatrix} 0.5 \times 3600 & \text{si } A \geq 12 \\ 1 \times 3600 & \text{si } 8 \leq A < 12 \\ 2 \times 3600 & \text{si } 6 \leq A < 8 \\ 3 \times 3600 & \text{si } 4 \leq A < 6 \\ 8 \times 3600 & \text{Si } 2.5 < A < 4 \\ 8 \times 3600 & \text{Si } A \leq 2.5 \end{bmatrix}$$

[3]

En la ecuación 3 es otra forma de analizar los datos obtenidos de la norma ISO 5349 de la tabla 4, pero ya presentes en el código donde T es igual al tiempo de exposición y A la aceleración ponderada. Teniendo esto como base de desglosa en lo siguiente:

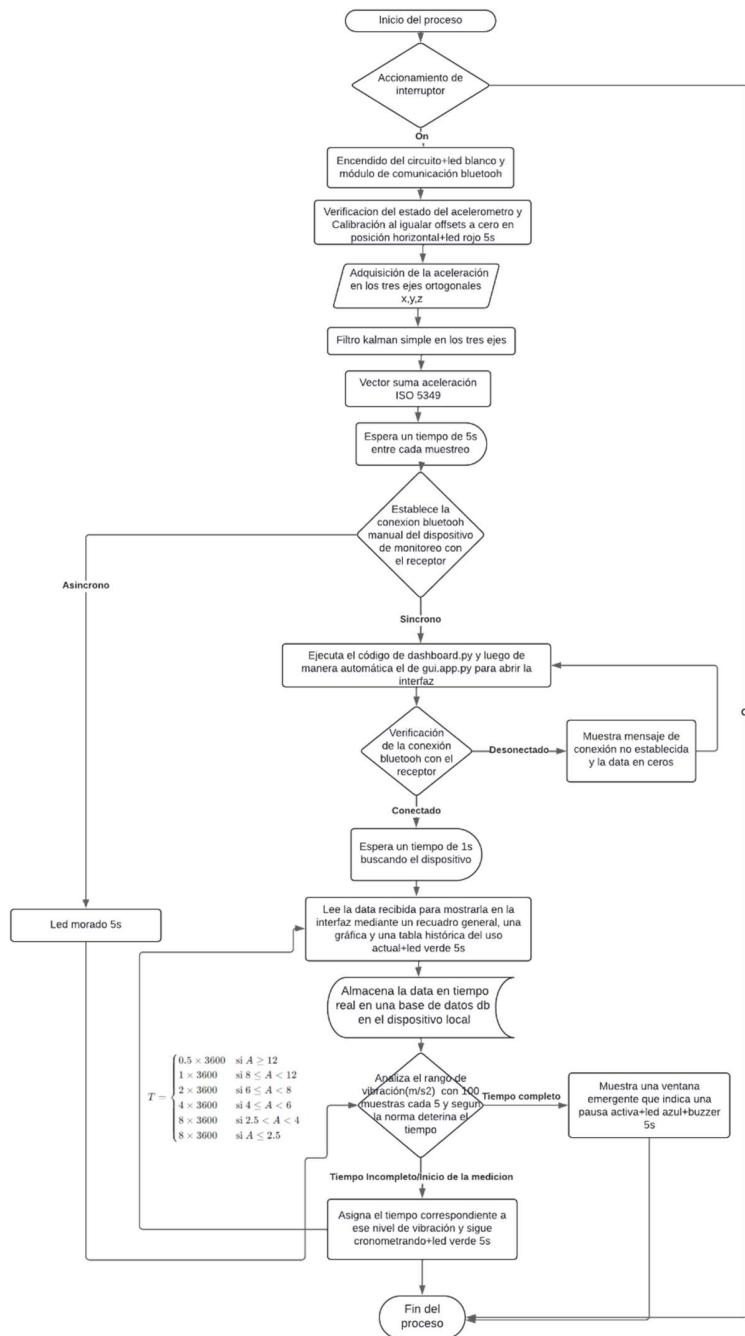
- $A \geq 12$: El tiempo restante de exposición es de 30 Minutos o 0.5 horas
- $8 \leq A < 12$: El tiempo restante de exposición es de 1 hora
- $6 \leq A < 8$: El tiempo restante de exposición es de 2 horas
- $4 \leq A < 6$: El tiempo restante de exposición es de 4 horas
- $2.5 < A < 4$: El tiempo restante de exposición es de 8 horas
- $A \leq 2.5$: El tiempo restante de exposición es de 8 horas.

Si se trabaja de manera asíncrona, el microcontrolador analiza las muestras de forma constante, cronometrando mediante milisegundos hasta alcanzar el tiempo máximo permitido por la norma. A medida que realiza el monitoreo, enciende el color morado del LED RGB. Al llegar al límite establecido, activa por igual el color azul del LED RGB junto con el Buzzer.

Figura 40 Diagrama de flujo del funcionamiento del código del microcontrolador y la interfaz

Arquitectura Microcontrolador

Arquitectura Interfaz Grafica



Fuente: Propia de los Autores

10.1.5. Diseño y Fabricación del circuito impreso en CAM

Para el diseño y fabricación del circuito impreso en PCB, se optó por el método de serigrafía, como se muestra en la tabla 23. Este método fue evaluado con un criterio del 1 al 5, donde 5 representa la calificación más alta. Se eligió este enfoque debido a factores de tiempo, economía y simplicidad, lo que lo hace ideal para la construcción de un prototipo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el índice de calidad es medio en comparación con otros métodos, ya que el proceso puede variar en cuanto a medidas y también por temas de through holes cuando es doble capa. Pero en general cumple con una buena estética, funcionalidad y nivel de resolución para un prototipo.

Tabla 23 Listado de elementos electrónicos del esquemático

Método de fabricación	Puntaje
Serigrafía	5
Offset	4
Flexografía	4
Fotomecánico	2
Artesanal	3
Directa por laser	4
Inyección de tinta	2
Chorro de aerosol	2

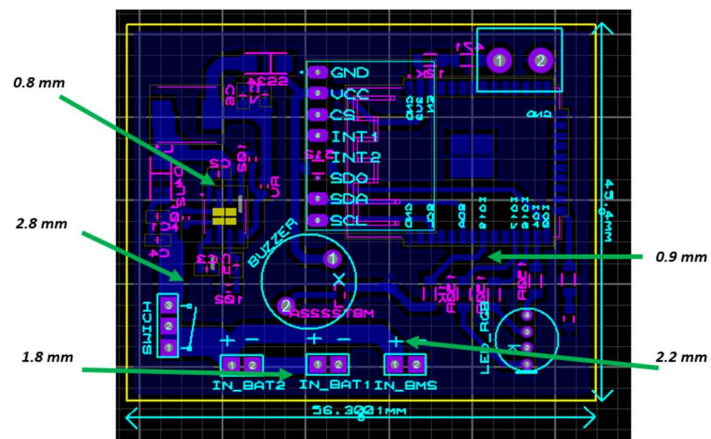
Fuente: Propia de los Autores

Una vez seleccionado el método, se consideraron varios parámetros, incluyendo la necesidad de que el PCB fuera de una sola capa, debido a limitaciones en la resolución y detalles de fabricación. Por lo tanto, se optó por esta configuración, utilizando un material rígido, como la fibra de vidrio, que es el estándar para este tipo de circuitos. Cabe resaltar que, para mejorar la distribución en la PCB, se colocaron la mayoría de los componentes en la parte inferior, junto con las pistas, mientras que en la parte superior se ubicaron los componentes que requieren agujeros pasantes (through-hole).

Teniendo en cuenta el método seleccionado y los parámetros de la PCB, se inicia el diseño basado en el esquema, en el siguiente orden:

A continuación, se trazan las pistas y se verifica su ruteo, asegurándose de que la mayoría de los ángulos sean de 45 grados, con algunos de 90 grados, para evitar posibles ruidos. Las pistas varían en tamaño desde 0.8 mm hasta los 2.8 mm, como se detalla en la figura 42 y la visualización del Gerber donde se visualiza más detalles como la placa de tierra en el anexo 10.

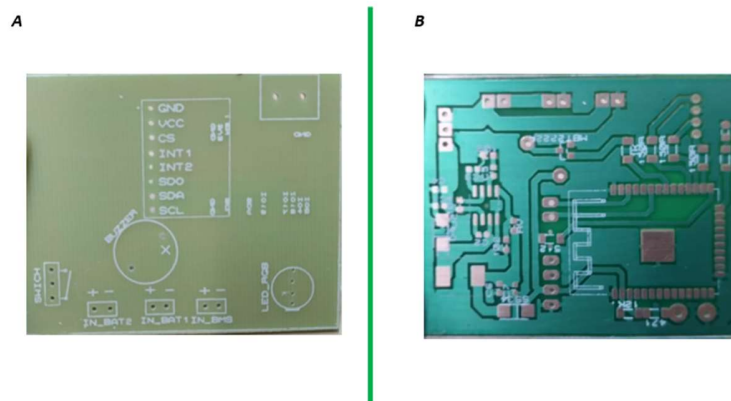
Figura 42 Gerber de la PCB, con la descripción del tamaño de las pistas y la placa de tierra en ©Proteus



Fuente: Propia de los Autores

Luego de haber completado el diseño, se procede a la fabricación en fibra de vidrio. Tras este paso, se realiza una verificación de la placa, durante la cual se detectó que faltaban los orificios para el LED. Estos se perforaron manualmente con un taladro, debido a un error del fabricante. La placa resultante se puede observar en la figura 43.

Figura 43 Visualización del resultado final de la fabricación de la PCB por la A) cara superior y B) cara inferior



Fuente: Propia de los Autores

Antes de alcanzar la versión final de la PCB, se llevó a cabo un riguroso proceso de desarrollo que incluyó múltiples iteraciones. Este proceso abarcó desde ensamblajes experimentales en protoboard hasta la fabricación de una PCB funcional. Dichas etapas permitieron realizar pruebas exhaustivas para verificar el funcionamiento de diferentes configuraciones de ensamblaje, así como evaluar el desempeño de los componentes, como se ilustra en la figura 44.

Figura 44 Visualización de todas las versiones de la placa PCB hasta llegar a la final



Fuente: Propia de los autore

10.2. Diseño Mecánico

10.2.1. Selección del método de fabricación y material

La impresión 3D es una opción ideal para la fabricación de la estructura del dispositivo debido a su capacidad para crear prototipos personalizados y adaptados a las necesidades específicas del proyecto. Al utilizar un modelo CAD, se puede diseñar una estructura ergonómica y precisa, que se ajuste cómodamente a la muñeca del usuario. La tecnología de impresión 3D, específicamente mediante el modelado por deposición fundida (FDM), permite la fabricación de estructuras ligeras y resistentes mediante la superposición de capas de termoplástico. Además, la flexibilidad en la fabricación y la reducción de costos asociados a la producción de piezas personalizadas hacen que la impresión 3D sea un método altamente eficiente para este tipo de aplicaciones en la industria de dispositivos portátiles de monitoreo.

De acuerdo con las características de los materiales de impresión 3d, se tomaron en cuenta factores como el costo vs calidad de impresión y características mecánicas del material como su resistencia, flexibilidad y durabilidad. El material PETG a diferencia de otros filamentos comúnmente utilizados para impresión como el PLA y el ABS tiene mayor adhesión entre capas, resiste altas temperaturas, es un material flexible de modo que puede doblarse sin llegar a romperse y es considerado poco toxico y ecológico ya que no emite gran cantidad de gases. Aparte de poseer propiedades mecánicas mejoradas como mayor rigidez, resistencia, ligereza y estabilidad dimensional, factores cruciales debido a que estará en un ambiente donde se someta a golpes, rozamientos, material particulado y también cambios de temperatura ambiente.

En la tabla 24 se presentan los criterios considerados para elegir el material para imprimir el diseño en 3d, con un criterio de evaluación del 1 al 5, donde 5 representa la máxima calificación.

Tabla 24 Selección de Materiales impresión 3D

Material	Siglas	Temperatura de fusión	Biodegradable	Características de interés	Total
Acrilonitrilo butadieno estireno	ABS	3	3	3	9
Ácido poliláctico	PLA	3	4	3	10
Alcohol polivinílico P	PVA	2	4	2	8
Polycarbonato	PC	2	3	1	6
Ácido poliláctico flexible	Soft PLA	1	4	1	6
Polietileno de alta densidad	HDPE	3	3	3	9
Nailon		2	3	1	6
Tereftalato de Polietileno y Glicol	PETG	4	3	4	11

Fuente: Propia de los autores.

10.2.2. Diseño en Software CAD

Se empleó el software CAD SolidWorks para el diseño del modelo tridimensional del prototipo. Este diseño se realizó conforme a las dimensiones de los componentes electrónicos seleccionados en la sección anterior. A continuación, se presentan imágenes del modelo:

Figura 45 Base Modelo 3D



Fuente: Propia de los Autores

Se diseñó un modelo de caja para almacenar los componentes electrónicos (la PCB y las dos baterías), adicionalmente se le agregaron unos soportes inferiores para sujetar el material textil de ajuste a la muñeca o antebrazo del trabajador. Además, se diseñó una tapa ajustada por tornillos para proteger el circuito interno como se muestra en la figura 36.

Es importante destacar que se realizaron las aberturas correspondientes en cada uno de los costados: una para el interruptor en la parte izquierda, otra en el centro para la conexión de carga de las baterías y una más a la derecha para el LED. Además, se incluyó una abertura extra en la tapa para introducir un alambre y así poder reiniciar el dispositivo.

Figura 46 Tapa Modelo 3D



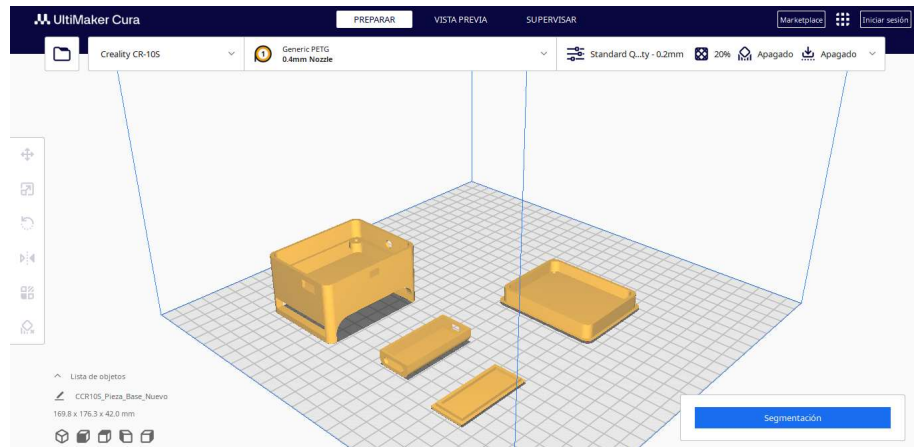
Fuente: Propia de los Autores

El modelo tiene unas medidas de $6\text{ cm} * 7.5\text{ cm}$ en su base, con una altura de 4.5 cm . Para mayor detalle ver el anexo 11 donde se muestra el plano del diseño.

10.2.3. Proceso de Manufactura-Impresión 3D

Para la elaboración del modelo 3D diseñado anteriormente se utilizó el proceso de manufactura FMD (Manufactura Aditiva), mediante el software CAM de CURA. Se configuro el programa de acuerdo con la impresora a utilizar (Creality CR-10s) y los archivos del modelo realizado en el software CAD SolidWorks.

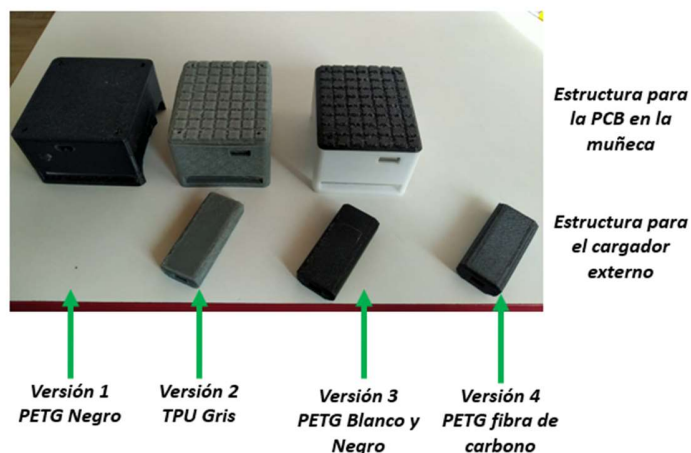
Figura 47 Configuración Impresión 3D



Fuente: Propia de los Autores

Al igual que los circuitos impresos, la impresión 3D del dispositivo pasó por varias versiones, desde la versión inicial hasta la versión final, que corresponde a la versión 3. Las complicaciones surgidas con el uso de fibra de carbono se debieron, en gran medida, a la curva de aprendizaje asociada con la impresora. Cada cambio entre versiones se fundamentó en mejoras en el diseño, los materiales y el ajuste para cumplir con los requisitos de la etapa de diagnóstico. Estos cambios se ilustran en la figura 48.

Figura 48 Visualización de todas las versiones de las estructuras en impresión 3D hasta llegar a la final de la versión 3



Fuente: Propia de los autores

10.3. Diseño Computacional

En la etapa de diseño computacional, se enfocará en el desarrollo de software específico para la interacción con el usuario. Esto implica la investigación, selección del entorno y lenguaje de programación adecuado para la interfaz. Además, se configurará la comunicación Bluetooth para permitir la conectividad remota y la transmisión de datos. Por último, se diseñará una interfaz gráfica intuitiva para que los usuarios puedan visualizar los datos relevantes.

10.3.1. Selección del entorno y lenguaje de programación

Se decidió optar por el entorno Visual Studio Code utilizando el lenguaje de programación Python. Esta elección se fundamenta en varias razones:

- Visual Studio Code: El entorno es altamente versátil y eficiente para el desarrollo de aplicaciones y software. Su naturaleza de código abierto permite una gran personalización y mejora a través de extensiones, adaptándose a las necesidades específicas del proyecto.
- Python: Este lenguaje es conocido por su sencillez y legibilidad, lo que facilita el desarrollo rápido y la depuración de código. A pesar de tener un nivel de dificultad intermedio en algunos aspectos avanzados, su amplia gama de bibliotecas y su robusta comunidad de soporte lo hacen especialmente adecuado para el desarrollo de interfaces y aplicaciones. La combinación de Python con Visual Studio Code ofrece una plataforma poderosa y flexible para crear una interfaz gráfica.

En la tabla 25, se detallan las características consideradas para seleccionar el entorno de programación. La elección se basó en una evaluación de 1 a 5, siendo 5 la calificación más alta. Los criterios de evaluación se establecieron teniendo en cuenta aspectos como la descripción del entorno, el nivel de dificultad, sus aplicaciones y la metodología de programación.

Tabla 25 Selección del entorno de programación

Entorno de desarrollo	Nivel de dificultad	Aplicaciones	Forma de programación	Total
@App Inventor	5	3	4	12
@Android Studio	3	3	4	10
@Visual Studio Code	5	5	4	14
@Python	3	4	4	11
@Java	2	4	3	9
@Flutter	3	3	3	9
@Matlab	3	3	2	8
@JavaScript	2	3	2	7
@Ubidots	5	4	4	13

Fuente: Propia de los autores

10.3.2. Desarrollo de la interfaz

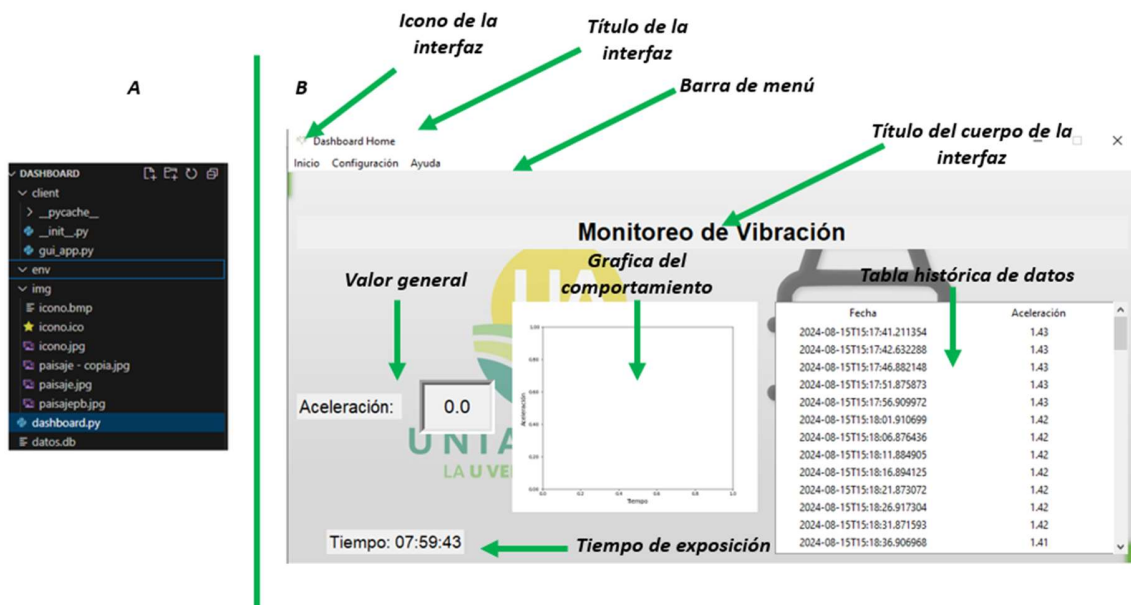
En este apartado, se proporciona una descripción detallada del proceso de desarrollo, para consultar el código completo, se puede referir al anexo 12. Antes de todo se marcará la diferencia de lo que es el Back-end y el Front-end. El Front-end representa la interfaz hombre-máquina donde el usuario final podrá interactuar con el contenido de la aplicación, mientras que el Back-end se refiere a la programación y configuración de la estructura del dispositivo.

En primera instancia se crea una carpeta denominada dashboard donde dentro de esta contendrá subcarpetas denominadas client, env e img. La de cliente contendrá a inicialización de a interfaz con el init, el cache en el pycache y el entorno de la interfaz en la gui_app. En el env de momento no se usa ya que la data será almacenada dentro de la misma carpeta en una base de datos de datos.db, donde se almacena de forma local en esta base cada vez que se conecta de forma Bluetooth entre el dispositivo y el portátil, Tablet o pc. Por otro lado en la carpeta de img se almacena la imagen de fondo de la interfaz y el logo de esta en formato ico y jpg.

Por último, fuera de estas carpetas, se encuentra el código en `dashboard.py`, que define la estructura general de la pantalla de la interfaz en unas 20 líneas de código, incluyendo su estética básica. El contenido principal de la interfaz se encuentra en `gui_app.py`, que contiene 219 líneas de código que definen el entorno detalladamente. Este enfoque permite que `dashboard.py` sirva como una plantilla general, mientras que `gui_app.py` maneja los detalles específicos y el contenido del entorno anidado en la principal.

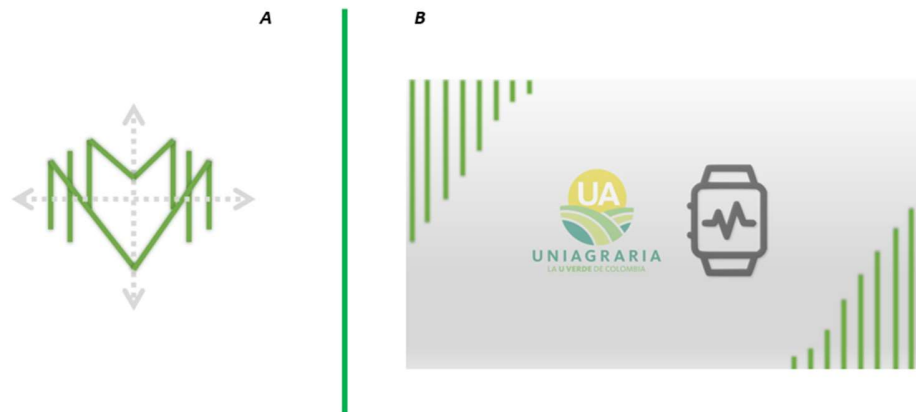
En la figura 49 se muestra la estructura del archivo general de la interfaz, así como el contenido de cada una de sus carpetas mencionadas anteriormente. Además, se detalla la conformación del entorno de la interfaz, que incluye tanto su estética como sus funcionalidades. La parte estética está compuesta por imágenes de fondo, iconos, el título de la interfaz, la barra de menú, y el encabezado del cuerpo, las cuales se pueden ver en la figura 50. En cuanto a la parte numérica, se presentan los valores generales, la gráfica de comportamiento, la tabla histórica y el tiempo de exposición, que varía según el rango de aceleración al que está sometida la persona.

Figura 49 Visualización de A) Conformación de archivo y B) Entorno del interfaz detallado



Fuente: Propia de los autores

Figura 50 Visualización de A) Icono de la interfaz y B) Fondo de la interfaz



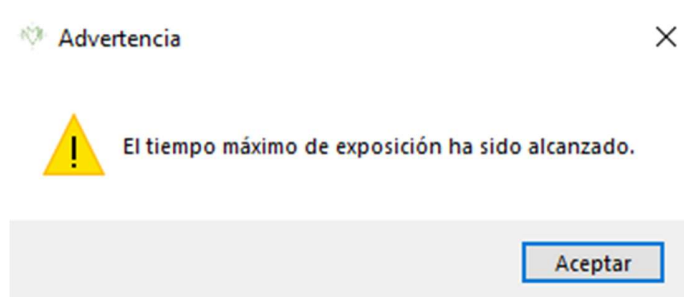
Fuente: Propia de los autores

La programación de la interfaz como se menciona con anterioridad está compuesta por varios apartados, donde los más importantes es el `gui_app.py` y el `dashboard.py`. El de `dashboard` utiliza las librerías de `tkinter` y un `from` para importar el `frame` del `gui_app`, esto con el fin de enlazar ambos códigos. Pero en este solamente definirá la función `main` que alojara el nombre de la instancia principal de la ventana, las rutas de alojamiento, establecerá el tamaño de la ventana, evitara el auto dimensionamiento e inicializara el `root` y el `loop`.

Por otro lado, en el archivo `gui_app.py` se utilizan las librerías `tkinter`, `matplotlib`, `serial`, `time`, `sqlite3`, `datetime` y `from` para gestionar las imágenes de fondo en la interfaz gráfica. Estas librerías permiten ajustar diversos aspectos de la interfaz, como la configuración de la barra de menú, la creación y ajuste de campos para mostrar la aceleración tanto en valor como en gráfico, y la actualización de datos mediante Bluetooth. Además, facilitan la lectura, creación y visualización de la base de datos en una tabla en tiempo real, con actualizaciones continuas cada 5 s que muestran indicadores de aceleración. También se incluye un cronómetro que, según la medición de vibración conforme a la norma ISO 5349-1, emite una advertencia en pantalla para detenerse y tomar una pausa activa, mensaje que se puede visualizar en la figura 51.

El cronometro anteriormente mencionado muestra el tiempo que puede durar una persona sometida a cierto rango de aceleración por la norma ISO, calculando este en base a un promedio de 100 muestras para determinar esto luego de esa toma de datos.

Figura 51 Mensaje de advertencia sobre la exposición al riesgo



Fuente: Propia de los autores

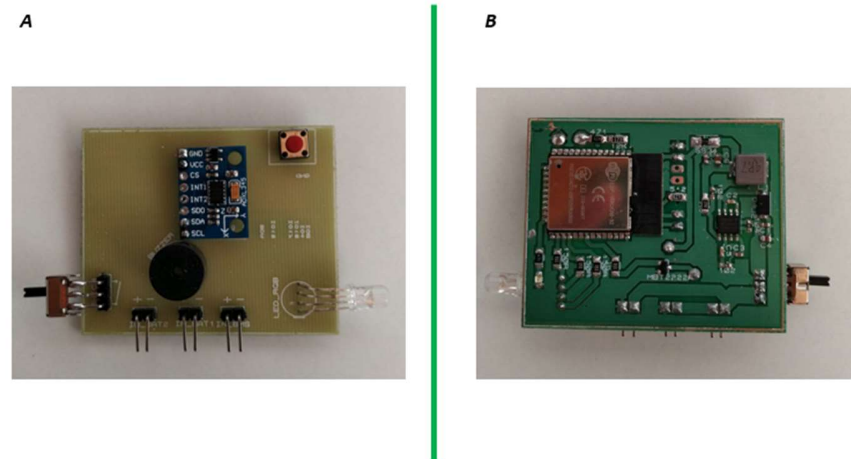
10.4. Ejecución

En esta etapa se llevará a cabo el ensamblaje y las pruebas de calibración y funcionamiento del dispositivo, integrando habilidades mecánicas, eléctricas, electrónicas y computacionales.

10.4.1. Ensamble, calibración y pruebas de funcionamiento

Tras haber fabricado la PCB según el diseño y las especificaciones de material en fibra de vidrio, con demarcaciones, rectificación de agujeros pasantes y revisión de cortos a contraluz, se procede a soldar los componentes en la placa. Se utiliza el plano esquemático para ubicar cada elemento electrónico en su lugar. Además, de programar el microcontrolador con anterioridad, para integrarlo a la tarjeta. Este proceso se visualiza en la figura 52, donde se observa el resultado final tras la soldadura.

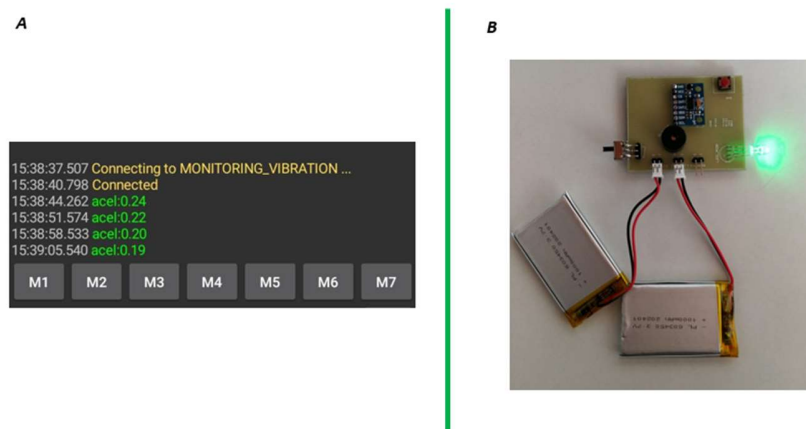
Figura 52 Visualización de la PCB soldada por la cara A) Superior y B) Inferior



Fuente: Propia de los autores

Después de completar la soldadura y verificar que todos los puntos de conexión estén en buen estado, se procede a comprobar el funcionamiento de la placa al conectar las baterías, como se muestra en la figura. Esto permite observar la programación en funcionamiento y evaluar la autonomía del dispositivo. La verificación del funcionamiento se puede apreciar en la figura 53.

Figura 53 Comprobación del funcionamiento de la placa en A) conexión Bluetooth y B) PCB



Fuente: Propia de los autores

Para evaluar la autonomía, se mide la corriente en serie desde la salida del convertidor buck hasta el ESP32 Wroom 32, obteniendo un consumo de $I_{output} = 48.7 \text{ mA}$. Considerando que las baterías también están conectadas en serie dentro de la PCB, contamos con un voltaje de 7.4 V y una capacidad de 1000 mAh . Por lo tanto, utilizaremos las ecuaciones (4) y (5) para calcular la duración en horas.

$$I_{input} = \frac{I_{output}}{Eficiencia} \quad [4]$$

$$Autonomia = \frac{Capacidad\ de\ la\ bateria\ en\ corriente\ mAh}{I_{input}\ Corriente\ de\ entrada} \quad [5]$$

$$I_{input} = \frac{48.7 \text{ mA}}{0.96} = 50.7 \text{ mA}$$

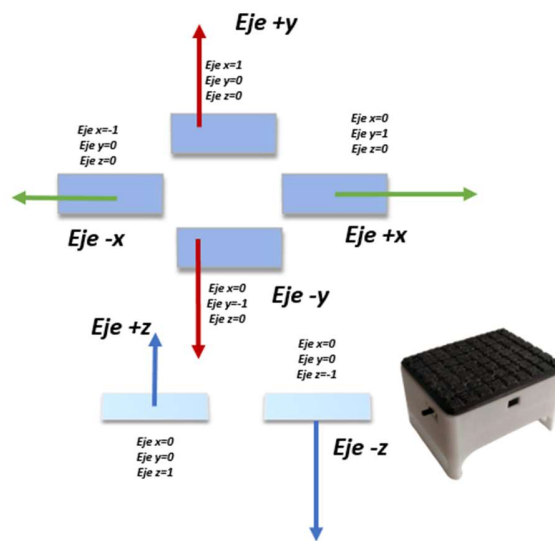
$$Autonomia = \frac{1000 \text{ mAh}}{50.7 \text{ mA}} = 19.7 \text{ h}$$

Por lo tanto, el dispositivo tiene una autonomía de 19.7 horas, lo cual es más que suficiente para cubrir una jornada laboral completa de 8 horas al día, lo que significa que necesitaría ser cargado después de aproximadamente dos días de funcionamiento continuo. Si se modificara la alimentación para conectar las baterías en paralelo y aumentar la capacidad a 2000 mAh , la autonomía podría extenderse a 39.4 horas, lo que sería más eficiente, aunque requeriría cambios en el diseño del dispositivo.

Dentro del proceso de verificación, se realizó una prueba de calibración antes de cargar la programación final del dispositivo. Utilizando el código fuente de Adafruit, se movió el sensor en todos los ejes cartesianos para asegurarse de que indicara 1 g en cada uno

de ellos a temperatura ambiente. En el funcionamiento normal, solo se considera la calibración en el eje Z positivo para iniciar el sistema, ya que se recomienda colocar el dispositivo en una superficie plana y en posición horizontal. Para minimizar el ruido del sensor y mejorar la precisión de los datos, se aplica un filtro Kalman con parámetros de 5, 5 y 0.01. La calibración se puede ver en la figura 54.

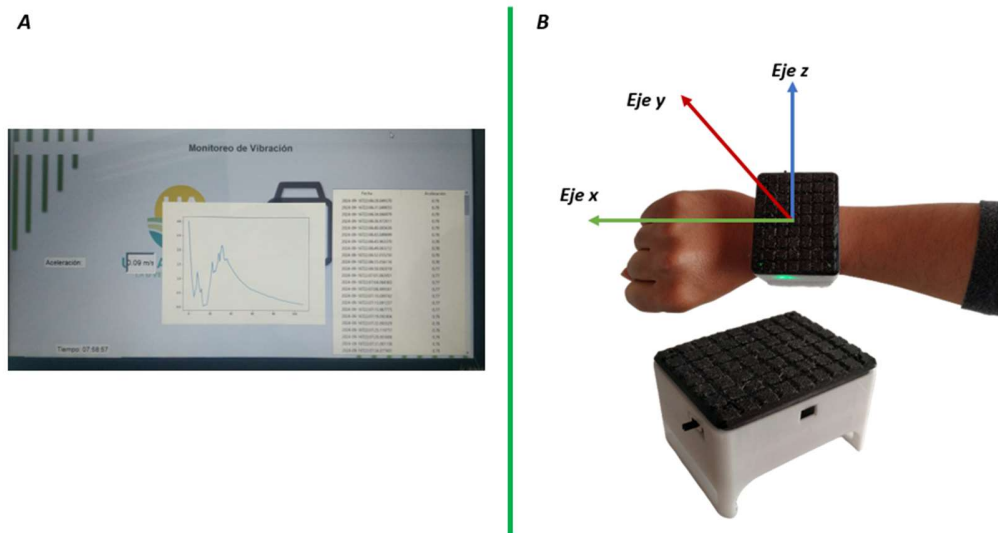
Figura 54 Visualización del proceso de calibración inicial del sensor según los ejes.



Fuente: Propia de los autores

Al completar estos pasos, se colocan las pilas en posición horizontal para que cubran la superficie de la estructura en PETG. Posteriormente, se ubica la PCB en la parte superior, asegurando que las pestañas proporcionen equilibrio en cada costado, y que el interruptor, las entradas y el LED queden en una posición accesible para conectar las baterías y, posteriormente, cerrar la tapa. Completado este proceso, se enciende el dispositivo, se espera el auto calibrado y luego se coloca en la muñeca, conectándose con la interfaz, como se muestra en la figura 55.

Figura 55 Visualización de: A) la comunicación entre el dispositivo final y la interfaz, y B) el ensamblaje y la ubicación en la muñeca mediante un velcro ajustable.



Fuente: Propia de los autores

Después de haber finalizado el ensamblaje, se procede a la elaboración del manual del usuario, disponible en el anexo 16 y la ficha técnica, junto con los aspectos diferenciadores en el anexo 17.

11. ANALISIS Y RESULTADOS

11.1. Implementación – Pruebas piloto

11.2. Toma de datos

Con el objetivo de validar el funcionamiento del prototipo en un entorno industrial real, se llevaron a cabo una serie de pruebas piloto con trabajadores que utilizan herramientas que generan vibración. El dispositivo fue diseñado para medir la aceleración en los tres ejes (X, Y, Z) y así poder censar las vibraciones generadas por cualquier máquina o herramienta operada con las extremidades superiores. Por ello, las pruebas piloto se realizaron con trabajadores de los sectores de construcción, carpintería y ebanistería, donde el uso de herramientas generadoras de vibraciones es frecuente.

La recolección de datos se lleva a cabo a través de una conexión inalámbrica Bluetooth. El sensor captura información cada 5 segundos y la envía al computador, donde la interfaz muestra y procesa los datos en tiempo real. Esto incluye una tabla y un gráfico que representa el número de muestras y el valor promedio de aceleración. Además, conforme a la norma ISO 5349 de 2012 y a los datos recopilados, se calcula y presenta el tiempo máximo de exposición a la vibración que un operario puede tolerar durante una jornada laboral de 8 horas. Los datos se almacenan en un archivo externo para su análisis posterior.

Antes de realizar las pruebas, se explicó al operario el funcionamiento básico del dispositivo y su propósito. No se dieron recomendaciones adicionales para la recolección de datos, ya que se buscaba que la información recopilada reflejara de manera fiel las condiciones laborales habituales de los trabajadores. Es por esto por lo que, los datos pueden presentar valores atípicos y estar muy dispersos.

Para el análisis de la información recolectada se calculan las medidas de dispersión y tendencia central del conjunto de datos. El prototipo está diseñado para medir la aceleración lineal en los tres ejes (X, Y, Z), haciendo esto posible comparar directamente estos resultados con la información proporcionada en las fichas técnicas de las herramientas utilizadas, ya que éstas generalmente brindan datos sobre la velocidad

angular u orbital de los motores. A continuación, se explican cada una de las pruebas y los resultados.

11.2.1. Prueba de Campo 1

Esta prueba se realizó en el sector de la construcción. El operario utilizó un taladro de concreto para perforar y romper un muro de baja altura en el jardín de un conjunto residencial. La herramienta en cuestión se muestra en la figura 56. A continuación, se muestran las evidencias de la prueba 1.

Figura 56 Taladro de concreto



Fuente: Propia de los autores

Se observa en la figura 57 que el operario utiliza Elementos de Protección Personal básicos para su trabajo como: casco y botas. Sin embargo, no hace uso de guantes anti vibrátiles para el uso del taladro percutor.

Figura 57 Prueba piloto 1 – Sector de construcción

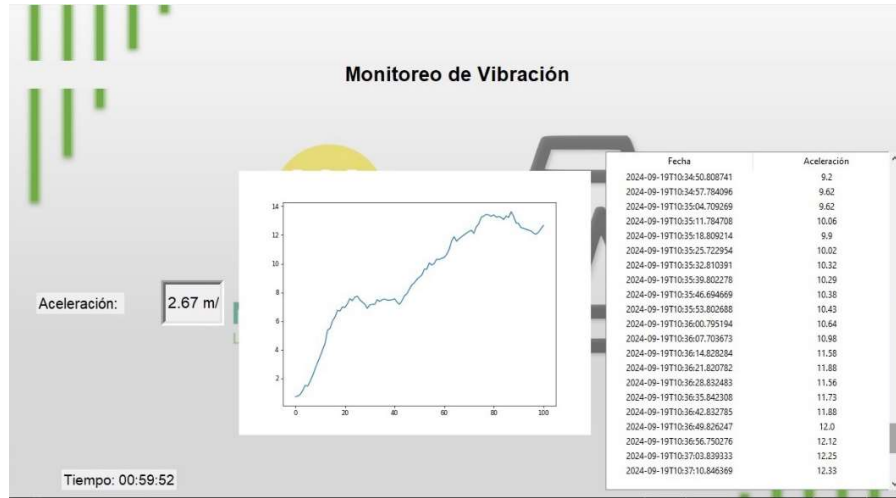


Fuente: Propia de los autores

Para la realización de la toma de datos se solicitó al operario utilizar el prototipo en su mano dominante o aquella con la que maneja la herramienta y realizar su trabajo de forma habitual. Es importante destacar que, en este caso particular, el uso de la herramienta encendida no fue constante. Además, los datos recolectados por el sensor dependen de varios factores como la posición del miembro superior al sujetar la herramienta, la fuerza de agarre, el movimiento de posición del operario y el material que se está perforando. Se debe tener en cuenta que el prototipo mide la aceleración en los tres ejes (X, Y, Z), por lo que cualquier cambio en la posición afecta los datos registrados y en este caso el trabajador se desplazó en varias ocasiones alrededor del muro a demoler.

Los datos recolectados son visualizados en tiempo real gracias a la comunicación inalámbrica. La interfaz muestra una gráfica con los valores promedio de vibración en los tres ejes (X, Y, Z), un valor promedio de aceleración de todas las muestras y una tabla donde se registran todos los datos. A continuación, se muestra la interfaz en la figura 58.

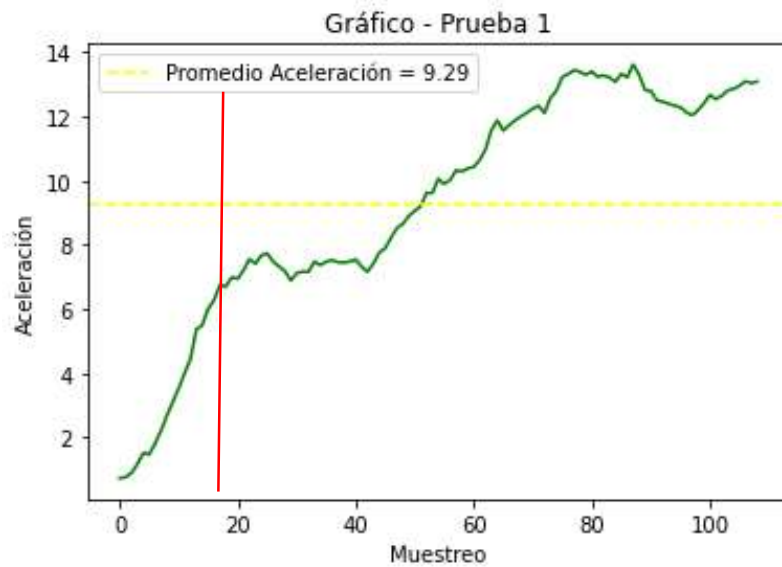
Figura 58 Prueba piloto 1 – Resultados Interfaz prototipo



Fuente: Propia de los autores

De acuerdo con los datos obtenidos de la prueba anterior, se realiza un análisis estadístico por medio de Python y las librerías de matplotlib, numpy y pandas. Se fija como valor constante el promedio de los datos muestreados y se analiza el comportamiento de los mismos, como se ilustra en la figura 59 y en la tabla 26.

Figura 59 Prueba piloto 1 Análisis



Fuente: Propia de los autores

Tabla 26 Medidas de dispersión y Tendencia Central - Prueba 1

Medida	Valor
Promedio	$9.29 \frac{m}{s^2}$
Mediana	$9.9 \frac{m}{s^2}$
Desviación Estándar	$3.58 \frac{m}{s^2}$
Varianza	$12.8 \frac{m}{s^2}$
Mínimo	$0.73 \frac{m}{s^2}$
Máximo	$13.62 \frac{m}{s^2}$

Fuente: Propia de los autores

Se debe tener en cuenta que los datos de esta prueba son bastante irregulares debido a lo mencionado anteriormente. La aceleración promedio está condicionada a los valores extremos y lo cambios de posición del operario. Se resalta que el valor máximo de aceleración censada fue de aproximadamente $13 \frac{m}{s^2}$ lo que, según los estándares de la norma ISO 5349 de 2012, indica que el tiempo máximo de exposición permitido para el operario es de una hora al día como se muestra en la interfaz en la figura 58 y en la tabla 4.

Debido a la irregularidad en el uso de la herramienta encendida, a los desplazamientos que realizo el operario alrededor del muro de concreto y la irregularidad del material los datos tienen un comportamiento muy disperso y tiende a ser impredecible. Al inicio de la prueba, el operario ajustó el dispositivo en su antebrazo y comenzó a taladrar lentamente en la parte superior del muro, donde había una capa más gruesa de cemento. Esto requería que aplicara mayor presión sobre la herramienta, lo que resultó en movimientos más lentos (línea roja vertical). Conforme avanzaba el taladrado y se alcanzaban secciones de ladrillo, el muro se volvía más fácil de perforar, lo que hizo que los movimientos del taladro fueran más rápidos y notables.

11.2.2. Prueba de Campo 2

Esta prueba se realizó en un taller de carpintería y ebanistería. El operario trabajó con una lijadora pequeña sobre una placa de madera, realizando movimientos repetitivos sobre un mismo lugar. La herramienta utilizada se visualiza en la figura 60. A continuación, se muestran las evidencias de la prueba 2.

Figura 60 Herramienta - Lijadora



Fuente: Propia de los autores

Para la realización de este trabajo el operario debe utilizar elementos de protección personal como guantes anti vibrátiles, tapabocas, tapa oídos, y gafas como mínimo. Sin embargo, solo se hace uso del tapabocas como se muestra en la figura 61. La herramienta cuenta con un motor que realiza 13.500 orbitas por segundo cada vez que es encendida. La aceleración percibida por el miembro superior del operario depende además de la fuerza de agarre a la máquina y de la madera que se está lijando.

Figura 61 Prueba piloto 2 – Sector de carpintería y ebanistería

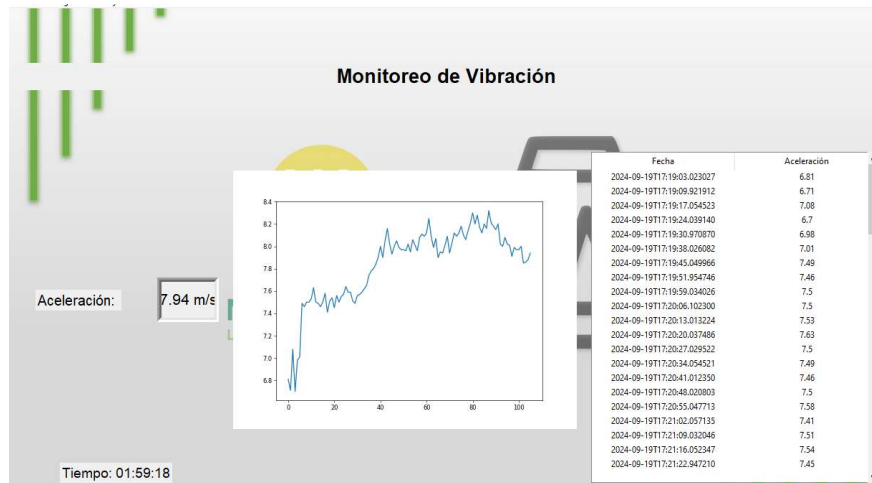


Fuente: Propia de los autores

Al igual que en la prueba anterior, se recomendó al operario utilizar el prototipo en su mano dominante, es decir, aquella con la que maneja la herramienta, y realizar su trabajo de manera normal. Para llevar a cabo un lijado adecuado de la pieza de madera, la máquina debe moverse de un lado a otro a una velocidad lo más constante posible a menos que exista una parte en especial que necesite mayor intensidad de lijado. Dado esto, el movimiento de la mano sobre la superficie de la madera también fue registrado por el sensor.

Los datos pueden variar ligeramente según el tipo de madera, la rugosidad del material, el tipo de lija utilizada, la velocidad del proceso de lijado y la fuerza de agarre del operario. Se debe tener en cuenta que el prototipo mide la aceleración en los tres ejes (X, Y, Z), por lo que cualquier cambio en la posición afecta los datos registrados, esto se puede evidenciar en la figura 62.

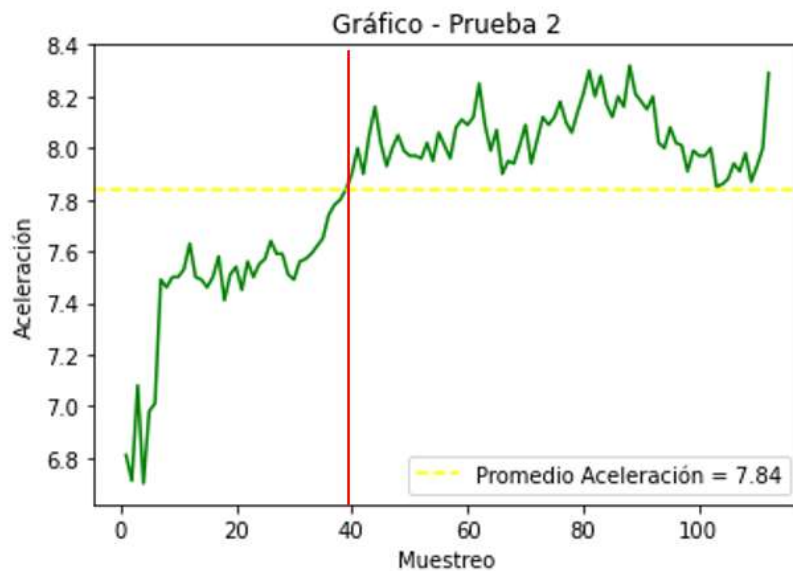
Figura 62 Prueba piloto 2 – Resultados Interfaz prototipo



Fuente: Propia de los autores

De acuerdo con los datos obtenidos de la prueba anterior, se realiza un análisis estadístico por medio de Python y las librerías de matplotlib, numpy y pandas. Se fija como valor constante el promedio de los datos muestreados y se analiza el comportamiento de los mismos, como se aprecia en la figura 63 y en la tabla 27.

Figura 63 Prueba piloto 2 Análisis



Fuente: Propia de los autores

Tabla 27 Medidas de dispersión y Tendencia Central - Prueba 2

Medida	Valor
Promedio	$7.84 \frac{m}{s^2}$
Mediana	$7.96 \frac{m}{s^2}$
Desviación Estándar	$0.33 \frac{m}{s^2}$
Varianza	$0.11 \frac{m}{s^2}$
Mínimo	$6.7 \frac{m}{s^2}$
Máximo	$8.32 \frac{m}{s^2}$

Fuente: Propia de los autores

Se observa que los datos tienden a ser más estables en la mayor parte de la prueba, después del valor número 40 (señalado por la línea roja). Los valores atípicos o irregulares registrados al inicio de la toma de datos pueden estar relacionados con factores externos, como el tipo de madera, el estado y calibre de la lija, y las condiciones iniciales de la pieza a lijar. Cuando la madera presenta una textura muy rugosa, áspera o irregular, el lijado se realiza con desplazamientos más cortos. A medida que la rugosidad disminuye, el proceso se efectúa con movimientos uniformes a lo largo de toda la pieza y a una velocidad constante. La varianza de este grupo de datos es pequeña, los valores tienden a estar menos dispersos.

Los datos recolectados en esta prueba tuvieron una aceleración promedio de aproximadamente $7.8 \frac{m}{s^2}$ lo que, según los estándares de la norma ISO 5349, indica que el tiempo máximo de exposición permitido para el operario es de dos horas, considerando una jornada laboral de 8 horas por día. Como se observa en la figura 62, la interfaz muestra el valor de tiempo máximo de exposición en la parte inferior de la pantalla e inicia el temporizador para monitorear este riesgo. Cuando el temporizador llegue a 0 se mostrará la alerta en pantalla.

11.2.3. Prueba de Campo 3

Esta prueba también fue llevada a cabo en un taller de carpintería y ebanistería. El operario trabajó con una planeadora de mesa para pulir un bloque de madera irregular hasta conseguir una superficie completamente plana, realizando movimientos repetitivos sobre un mismo lugar. La herramienta utilizada se muestra en la figura 64. A continuación, se muestran las evidencias de la prueba 3.

Figura 64 Planeadora de mesa



Fuente: Propia de los autores

La prueba consistió en la recolección de datos mediante el uso del prototipo desarrollado mientras se realizaba la actividad, tal como se muestra en la figura 65. Se le pidió al operario utilizar el prototipo en su mano dominante o aquella con la que maneja la herramienta y realizar su trabajo de forma habitual. En esta tarea, el operario debe presionar una tabla o bloque de madera contra la superficie de una máquina equipada con una cuchilla giratoria, la cual retira el exceso de material para nivelar la lámina.

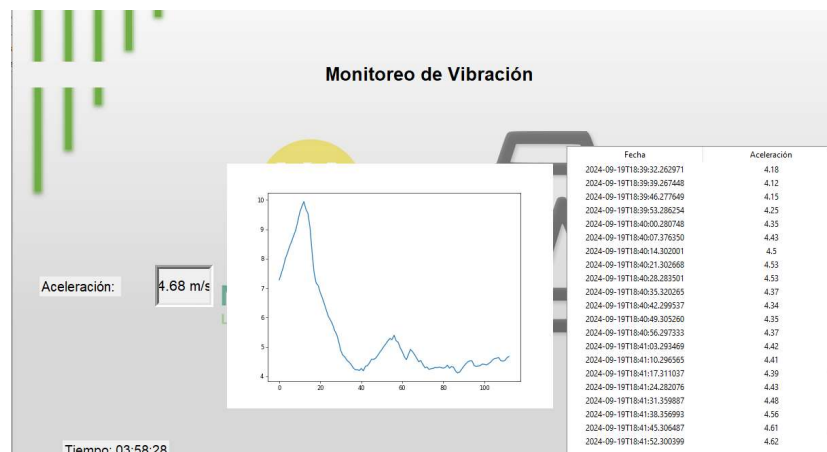
Figura 65 Prueba piloto 3 – Sector de carpintería y ebanistería



Fuente: Propia de los autores

Los datos recolectados por el sensor pueden verse influenciados por diversos factores, como el movimiento repetitivo al pasar el material varias veces por la máquina, la fuerza aplicada hacia la máquina, los cambios en la postura del operario, y las condiciones iniciales del material. A mayor cantidad de imperfecciones o rugosidades en el bloque de madera, más pasadas o tiempo serán necesarios, lo que a su vez intensificará los movimientos del operario.

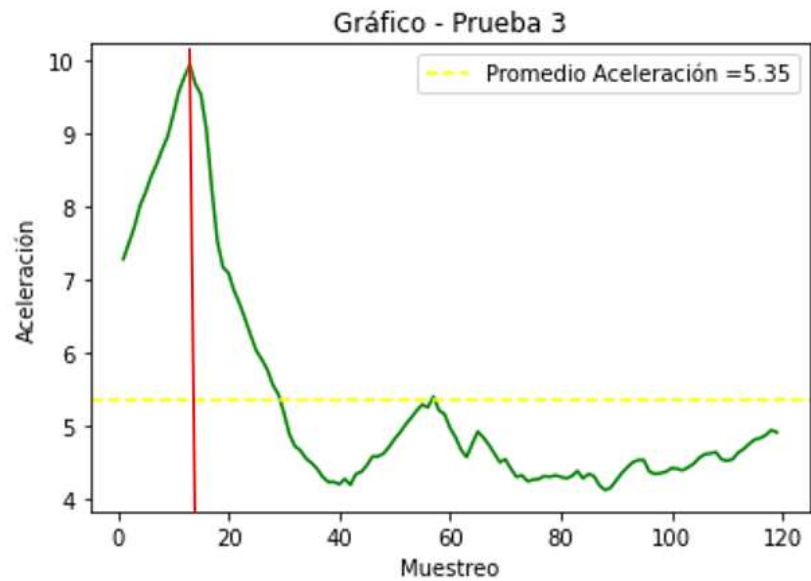
Figura 66 Prueba piloto 3 – Resultados Interfaz prototipo



Fuente: Propia de los autores

De acuerdo con los datos obtenidos de la prueba anterior, se realiza un análisis estadístico por medio de Python y las librerías de matplotlib, numpy y pandas. Se fija como valor constante el promedio de los datos muestreados y se analiza el comportamiento de los mismos, ilustrados en la figura 67 y en la tabla 28.

Figura 67 Prueba piloto 3 Análisis



Fuente: Propia de los autores

Tabla 28 Medidas de dispersión y Tendencia Central - Prueba 3

Medida	Valor
Promedio	$5.35 \frac{m}{s^2}$
Mediana	$4.63 \frac{m}{s^2}$
Desviación Estándar	$1.55 \frac{m}{s^2}$
Varianza	$2.41 \frac{m}{s^2}$
Mínimo	$4.12 \frac{m}{s^2}$
Máximo	$9.94 \frac{m}{s^2}$

Fuente: Propia de los autores

De acuerdo con la gráfica anterior se observa que al principio de la prueba los valores de vibración (aceleración) aumentan hasta llegar a un punto máximo de $9.94 \frac{m}{s^2}$ cómo se señala con la línea roja. Esto se debe a que al inicio de la prueba el operario se ajustó el prototipo al antebrazo e inicio a pulir o aplanar el bloque de madera en la máquina, cuando la pieza presenta rugosidades o imperfecciones muy marcadas, genera movimientos más bruscos al pasarla por la cuchilla. A medida que la placa de madera se sigue procesando, estas rugosidades disminuyen, lo que explica que, durante la mayor parte de la prueba, la aceleración disminuya y tienda a estabilizarse en un valor más constante.

La aceleración promedio en este caso fue de $5.35 \frac{m}{s^2}$, de acuerdo con la tabla 4 que muestra la relación estándar entre aceleración y tiempo de exposición a este riesgo el operario puede realizar este trabajo de manera continua durante máximo 4 horas al día. La interfaz muestra este valor en la parte inferior de la pantalla en la figura 65, una vez el temporizador llegue a 0 el trabajador debe cambiar de trabajo a uno que no involucre riesgo por vibración.

11.2.4. Resultado Encuesta Post - Pruebas

Teniendo en cuenta que se realizaron tres pruebas con distintos operarios y herramientas se procede a realizar una encuesta de 8 preguntas para conocer su percepción del prototipo. Las respuestas de esta encuesta se encuentran más detalladas en el anexo 14.

De acuerdo con los resultados de la encuesta, se concluye que el dispositivo es cómodo para ser utilizado durante la jornada laboral. Al ser consultados sobre el tamaño y diseño del dispositivo, los operarios respondieron que lo consideraban óptimo, ya que, si fuera más pequeño, podría resultar más frágil. Además, destacaron que el dispositivo es ligero y no interfiere con el desempeño adecuado de sus actividades.

Los operarios también consideran relevante el uso de un dispositivo que monitoree la exposición a vibraciones, con el fin de prevenir enfermedades o accidentes a futuro. Sin

embargo, no lo ven indispensable, dado que sus tareas diarias no los exponen de manera constante a este tipo de riesgo.

12. RECURSOS DISPONIBLES

Para el desarrollo del proyecto de grado se necesitan recursos materiales (tangibles e intangibles), así como mano de obra y asesoramiento. Los materiales a utilizar han sido seleccionados de acuerdo a la información recolectada a lo largo de la investigación teniendo en cuenta las características deseadas para que el prototipo sea idóneo para el monitoreo de las vibraciones a las que están expuestos los operarios en el sector industrial. A continuación, en la tabla 29, se muestran los costos estimados del proyecto dados en pesos colombianos:

Tabla 29 Recursos Disponibles

Cantidad	Rubro	Detalle	Unidad	Valor	Valor Total
2	Personal	Estudiante Investigador	Hora	Obliga	Obliga
2	Personal	Director	Hora	Obliga	Obliga
1	Personal	Asesores Externos	Hora	Obliga	Obliga
2	Materiales e insumos	Tarjeta electrónica ESP32 WROOM 32	COP \$	57.000	114.000
1	Materiales e Insumos	Sensor Acelerómetro ADLX345	COP \$	17.000	17.000
3	Materiales e Insumos	Regletas y conectores	COP \$	3.500	10.500
13	Materiales e Insumos	Resistencias superficiales, switches, pulsadores ,transistor 2n2222,led 8005	COP \$	1.500	19.500
1	Materiales e Insumos	Diodos Shockley 310	COP \$	6.000	6.000
2	Materiales e Insumos	Led RGB y Buzzer	COP \$	2.800	5.600
1	Materiales e Insumos	Módulo de carga DDTCCRUB 2S Tipo C	COP \$	20.000	20.000

Cantidad	Rubro	Detalle	Unidad	Valor	Valor Total
2	Materiales e Insumos	Termo encogible	COP \$	2.500	5.000
1	Materiales e Insumos	Módulo Buck MP1584EN	COP \$	15.000	15.000
2	Materiales e Insumos	Batería Ion Lipo de 3.7 V a 1000 mah	COP \$	28.000	56.000
30	Materiales e Insumos	Soldadura de componentes	COP \$	1.000	30.000
1	Materiales e Insumos	Fabricación en impresora 3D	COP \$	45.000	45.000
1	Materiales e Insumos	Fabricación de PCB	COP \$	20.000	20.000
2	Materiales e Insumos	PETG 250 gr	COP \$	50.000	100.000
7	Transportes	-----	COP \$	10.000	70.000
1	Libros, revistas, folletos, guías, entre otros.	----	COP \$	0	0
1	Imprevistos	-----	COP \$	50.000	50.000
TOTAL					583.600

Fuente: Propia de los autores

13. CRONOGRAMA

Según nuestra metodología de trabajo, el cronograma a definir estará dado por un lapso de 23 semanas dentro de las cuales se segmentan en cuanto a fases y etapas a través del tiempo, como se muestra a continuación:

Tabla 30 Cronograma

Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1. Diagnostico	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■													
1.1 Revisión	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■													
2. Desarrollo											■	■	■	■	■	■	■	■	■					
2.1 Diseño Electrónico											■	■	■	■	■	■								
2.2 Diseño Mecánico												■	■	■	■	■								
2.3 Diseño Computacional													■	■	■	■								
2.4 Ejecución																	■	■	■					
3. Evaluacion																		■	■	■	■	■	■	■
3.1 Implementación																		■	■	■	■	■	■	■

Fuente: Propia de los autores

En la tabla 30, se simplifica el cronograma del proyecto. La tabla completa con los detalles asociados al plan de trabajo se puede ver en el anexo 6.

14. CONCLUSIONES

- A partir de la recolección de información mediante búsquedas bibliográficas, visitas de campo y el uso de herramientas como encuestas y formatos de inspección, se establecieron los criterios fundamentales para el desarrollo de un dispositivo que monitoree la exposición de los trabajadores a vibraciones. Estos criterios abarcan aspectos como autonomía, carga, facilidad de uso, ergonomía, resistencia y peso
- Gracias al uso de software especializado en CAM, CAE y CAD, se mejoraron significativamente las versiones del diseño electrónico y el modelado tridimensional. Estas herramientas fueron fundamentales para asegurar la precisión del diseño y su funcionalidad. Además, se consideraron factores ergonómicos, como el peso y la forma del dispositivo, para garantizar un ajuste cómodo en la muñeca o antebrazo del trabajador, minimizando cualquier interferencia con sus actividades diarias
- Luego del desarrollo y las pruebas, se determinó que el prototipo recolecta y procesa fielmente los datos sobre las vibraciones (aceleración) en los tres ejes (X, Y, Z) de los trabajadores, enviándolos a un computador a través de Bluetooth. Estos datos se utilizan como registros históricos en una base de datos para monitorear el riesgo físico asociado al uso de herramientas. Sin embargo, es importante destacar que el uso del dispositivo por sí solo no garantiza la prevención de futuras enfermedades, ya que su efectividad depende de su integración en un sistema de gestión de riesgos. Además, dado que se trata de un dispositivo de bajo costo, no está diseñado para filtrar completamente el ruido ni eliminar valores no relacionados con la herramienta, y existen variables incontrolables, como cambios de posición, desplazamientos de los operarios y movimientos involuntarios.
- Se evidenció, a través de las pruebas realizadas, que en un ambiente controlado donde el operario mantiene una posición fija y limita el movimiento de los brazos, como en el caso de un operario que utiliza un taladro perforador de concreto en una obra civil, el dispositivo puede medir con mayor precisión los valores de vibración transmitidos por la herramienta. En conclusión, este prototipo representa un primer

paso hacia el desarrollo de un dispositivo inteligente que, con mejoras en su diseño, capacidad de comunicación y procesamiento de datos, podría implementarse eficazmente en la industria para proteger la salud de los operarios y los intereses de la empresa.

15. RECOMENDACIONES

- Dado que el prototipo está destinado a ser utilizado en entornos industriales reales, estará expuesto a condiciones adversas como cambios climáticos, polvo, humedad, material particulado, y posibles golpes o caídas, lo que podría comprometer su estructura y funcionalidad. Para aumentar su durabilidad, se recomienda utilizar un material de impresión 3D más resistente, como el PETG reforzado con fibra de carbono u optar por un molde para inyección de plástico. Estos materiales ofrecen mayor resistencia mecánica, durabilidad y mejor tolerancia a condiciones ambientales exigentes, proporcionando una mayor protección frente a factores externos y prolonga la vida útil del dispositivo en campo.
- El sensor mide la aceleración en los tres ejes (X, Y, Z) y transmite los datos al computador a través del módulo Bluetooth integrado en el microcontrolador. Sin embargo, en un entorno real, la comunicación vía Bluetooth puede resultar ineficiente debido a su corto alcance. Por ello, se recomienda cambiar a un sistema de comunicación Wi-Fi, lo que ampliaría significativamente el rango de operación. Además, los datos podrían almacenarse en la nube, permitiendo un procesamiento y visualización más eficiente desde cualquier dispositivo con acceso a internet. Este enfoque no solo mejoraría la accesibilidad a la información, sino que también garantizaría una mayor protección de los datos en caso de fallos en la memoria local del computador u otros imprevistos.
- Según los resultados de las pruebas piloto realizadas en entornos reales, los datos recolectados se ven afectados por los movimientos naturales del operario durante el desempeño de sus tareas, lo que introduce ruido en las mediciones. Para abordar este problema, se recomienda desarrollar un dispositivo mejorado que incorpore sensores especializados como el LIS3DSH, el BMA280 o el LSM6DS3, junto con algoritmos de inteligencia artificial capaces de filtrar el ruido de manera eficiente, como redes neuronales convolucionales, algoritmos de aprendizaje automático supervisado o análisis de series temporales. Esto permitiría su uso en diversos entornos laborales con riesgo de vibración, garantizando mayor precisión tanto en

la información como en los resultados. Además, la interfaz, actualmente en fase de prototipo y ejecutada manualmente desde el programa de desarrollo, podría convertirse en un archivo .bat o .exe para facilitar su uso por parte del consumidor final, mejorando así la accesibilidad y experiencia del usuario, y permitiendo la ejecución desde dispositivos móviles, lo que ampliaría su funcionalidad en entornos laborales.

- A futuro, sería beneficioso realizar también un análisis biodinámico en colaboración con un especialista en ergonomía o fisioterapia. Este enfoque permitiría evaluar no solo la exposición a la vibración, sino también cómo esta afecta la biomecánica del cuerpo del operario. La integración de estos análisis contribuiría a desarrollar estrategias más efectivas para mitigar el riesgo de lesiones relacionadas con la exposición a vibraciones en el lugar de trabajo.

16. REFERENCIAS

- Addabbo, T., Ada, F., Landi, E., Moretti, R., Mugnaini, M., Parri, L., & Vignoli, V. (2019). A wearable Low-cost Measurement System for Estimation of Human Exposure to Vibrations. Florence. Italy: IEEE. doi:10.1109/RTSI.2019.8895535
- Alcázar, I. G. (2020). Parametrización, modelado y simulación de baterías mediante la utilización de battery modelyn en simulink-matlab. *Universidad Publica de Navarra*.
- Alexandre, L. F., Alves, L. d., Rosário, I. R., Pessanha, F. M., & Monteiro, M. R. (2021). SÍNDROME DO TÚNEL DO CARPO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. *Revista Científica da FMC*.
- Algami, A. S., Khir, M. H., Dennis, J. O., Ahmed, A. Y., Alabsi, S. S., Hashwan, S. S., & Junaid, M. M. (2021). A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices. *Nanoscale Research Letters*.
- Alvarado, S. M. (2019). DESARROLLO DE LA SEGURIDAD Y LA SALUD EN EL TRABAJO EN COLOMBIA DESDE LA ENFERMERÍA. *Universidad Nacional De Colombia*, 336.
- American National Standard. (19 de Junio de 2020). ANSI/ASA S2.70-2006 (R2020). Obtenido de Guía Estándar Nacional Estadounidense Para La Medición Y Evaluación De La Exposición Humana A Las Vibraciones Transmitidas A La Mano: [https://webstore.ansi.org/preview-pages/ASA/preview_ANSI+ASA+S2.70-2006+\(R2020\).pdf](https://webstore.ansi.org/preview-pages/ASA/preview_ANSI+ASA+S2.70-2006+(R2020).pdf)
- American National Standard. (Enero de 2020). *Occupational Health and Safety Management Systems*. Obtenido de ANSI/ASSP Z10.0 : https://www.assp.org/docs/default-source/standards-documents/preview/ansi_assp_z10_0_2019_wms_preview.pdf?sfvrsn=4ff46946_2&ga=2.259981386.1300614629.1714225302-781702131.1714010514
- Ammad, S., & Alaloul, W. S. (2020). Uso de Equipos de Protección Personal (EPP) en Proyectos de Construcción: Un Enfoque Científico. *Journal Pre-proof*.
- Analog Devices. (2022). *Data Sheet ADL345*. Obtenido de <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf>
- Assadi, S. N., Mirzaei, R., & Esmaily, H. (2023). Actividades manuales y desórdenes. *International Journal of Medical Reviews*.
- Ayala, C. (2005). *Legislación en salud ocupacional y riesgos profesionales*. Bogotá: Ediciones Salud Ocupacional LTDA.
- Banaei, M. R., & Bonab, H. A. (2019). A High Efficiency Non-Isolated Buck-Boost Converter Based on ZETA Converter. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 8.
- Bautista, J. (2020). Evolución de los softwares de simulación para el Diseño y Construcción en la industria. *Polo del conocimiento*.
- Bazurto, L. O. (2019). Riesgo Físico Y Enfermedades En Trabajadores Que Operan Equipos De Vibración En Construcciones Civiles. *San Gregorio*. doi:<http://dx.doi.org/10.36097/rsan.v1i35.946>
- Benavides, D. L., Toapanta, J. Q., Noquez, P. P., Acosta, C. C., Collaguazo, S. R., & Caisaguano, D. T. (2023). El Síndrome de túnel carpiano diagnóstico y tratamiento: Revisión sistemática. *Revista Científica GADE*.
- Benson, C., Chukwuma, I., Akinwande, D. V., & Ile, C. (2023). The impact of interventions on health, safety and environment in the process industry. *Heliyon*.
- Blanes, I. (2002). La historia contemporánea: reflexiones de contenido propuestas de programación. *Universidad de Sevilla*.

- Bovenzi, M. (2005). Health effects of mechanical vibration. *G Ital Med Lav Ergon*, 7.
- Cano, C., & Gonzales, L. (2020). Salud ocupacional en las empresas de latinoamérica: una revisión sistemática de la literatura científica en los últimos cinco años: 2016-2020. *Facultad de Negocios-Universidad Privada del Norte Perú*.
- Cañola, F. M., & Serna, P. P. (Noviembre de 2020). EXPOSICION A LA VIBRACION EL SECTOR CONSTRUCCION Y SU IMPACTO EN LA SALUD DE LOS TRABAJADORES. Bogotá DC, Colombia: INSTITUCION UNIVERSITARIA POLITECNICO GRAN COLOMBIANO.
- Carrillo, M. C. (2021). El filtro de Kalman con aplicaciones en inversiones. *Universidad de Cantabria*, 69.
- Chawla, N. (2020). AI, IOT and Wearable Technology for Smart Healthcare –A Review. *International Journal of Recent Research Aspects*.
- Clemm, T., Nordby, K.-C., Lunde, L.-K., Ulvestad, B., & Bråtveit, M. (Noviembre de 2021). Hand-Arm Vibration Exposure in Rock Drill Workers: A Comparison between Measurements with Hand-Attached and Tool-Attached Accelerometers. *Annals of Work Exposures and Health*, 1123–1132. doi:<https://doi.org/10.1093/annweh/wxab051>
- Collaguazo, H. H. (2023). *VIBRACIONES MECÁNICAS DE CUERPO ENTERO Y SU INCIDENCIA EN LOS TRASTORNOS MUSCULOESQUELÉTICOS EN OPERADORES DE MAQUINARIA PESADA*. Ibarra - Ecuador : UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.
- Congreso de Colombia. (11 de Julio de 2012). *Ley 1562 de 2012*. Obtenido de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Ley-1562-de-2012.pdf>
- Del Sole, A. (2023). *Visual Studio Code Distilled*. Springer. Obtenido de <https://visualstudio.microsoft.com/es/>
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2014). *Decreto 1477 de 2014*.
- Dong, R. G., Sinsel, E. W., Welcome, D. E., Warren, C., Xu, X. S., McDowell, T. W., & Wu, J. Z. (2015). Review and Evaluation of Hand-Arm Coordinate Systems for Measuring Vibration Exposure, Biodynamic Responses, and Hand Forces. *Safety and Health at Work*, 15.
- Dong, R. G., Wu, J. Z., Xu, X. S., Welcome, D. E., & Krajnak, K. (2021). A Review of Hand–Arm Vibration Studies Conducted by US NIOSH since 2000. *Vibration*, 47.
- Edwards, D. J., & Holt, G. D. (2007). *A Guide to Hand-arm Vibration*. Loughborough University.
- Electronilab. (2023). *Electronilab*. Obtenido de <https://electronilab.co/tienda/adxl345-acelerometro-digital-de-tres-ejes/>
- Erazo, V. (2022). El diseño, la manufactura y análisis asistido por computadora (CAD/CAM/CAE) y otras técnicas de fabricación digital en el desarrollo de productos en América Latina. *Información Tecnológica*.
- Eriksson, K. (2020). Biomarcadores sanguíneos para dedos blancos inducidos por vibraciones. *American Journal of Industrial Medicine*.
- Espinel, K. S., & Pardo, A. N. (Noviembre de 2022). *Revisión tecnológica de las patentes existentes de dispositivos para el monitoreo y control del efecto chatter en los procesos de fresado CNC*. Obtenido de Universidad Antonio Nariño: http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/7976/1/2022_AngiePerilla_KarenSanchez.pdf
- Espressif. (2024). *Espressif*. Obtenido de https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Fernandez, A. (2024). *Instrumentos de medida de vibración Power Mi*. Obtenido de <https://power-mi.com/es/content/instrumentos-de-medida-de-vibraci%C3%B3n>

- Ferretronica. (2024). *Ferretronica* . Obtenido de <https://ferretronica.com/products>
- Frías, C., Esparza, L. y., & Margarita, D. (2023). La impresión 3D como herramienta educativa para desarrollar el pensamiento creativo. *Apertura Universidad de Guadalajara*, 16.
- Fundación Estatal para la Prevención de Riesgos Laborales. (2017). Prevención de riesgos en trabajadores expuestos a vibraciones en el sector de la construcción. *Acción ES2017-0044*. España: Fundación Estatal para la Prevención de Riesgos Laborales.
- Galbiati, A. (Junio de 2019). Impresión 3D, tecnología y polímeros. *AADECA REVISTA*, 12. Obtenido de https://www.editores.com.ar/sites/default/files/aa12_galbiati_impresion_3d_tecnologia_y_polimeros.pdf
- Gallegos, W. A. (2012). Revisión histórica de la salud ocupacional y la seguridad industrial. *Revista Cubana de Salud y Trabajo*.
- Galvis, A. E., & Ramírez, A. L. (2000). Fabricación De Circuitos Impresos. En A. E. Galvis, & A. L. Ramírez, *Fundamentos de Electrónica* (págs. 189-210). UNAD.
- Garay, E., Ávalos, L., Tovar, V., Daza, E., Coria, V., Hernandez, S., . . . Reyes, A. (2020). Consideraciones éticas en épocas de epidemias y pandemias. Una mirada de asombro en tiempos de COVID-19. *Revista Mexicana de Endocrinología, Metabolismo y Nutrición*.
- García, D., Navarro, K., & Parra, L. (2020). Desarrollo de los sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo en Colombia a apartir del Decreto 1072: una revisión sistemática. *Revista Virtual Via Inveniendi et Ludicandi-Universidad Santo Tomas*.
- Globally Protecting Worker Health. (2024). *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure*. United States: ACGIH.
- Gonzalez, I., Armas, B., Coronel, M., Vegara, O., Maldonado, N., & Granillo, R. (2021). El desarrollo tecnológico en las revoluciones industriales. *Ingenio y Conciencia Boletín científico de la escuela superior ciudad sahadun*.
- Google Earth. (10 de 10 de 2024). *Google Earth*. Obtenido de <https://earth.google.com/web/search/Cra.+55+%23170a-35,+Bogot%3%a1/@4.7540825,-74.0548206,2556.22091231a,841.97850691d,35y,0h,0t,0r/data=CogBGloSVAoIMHg4ZTNmODVhMjhkMDExODU5OjB4ZDU1YTl0YTljNjU5NDM4YRmV8e8zLgQTQCFqCUMugoNSwCoZQ3JhLiA1NSAjMTcwYS0zNSwgQm9nb>
- Guk, K., Han, G., Lim, J., Jeong, K., Kang, T., Lim, E.-K., & Jung, J. (2019). Evolution of Wearable Devices with Real-Time Disease Monitoring for Personalized Healthcare. *Nanomaterials*, 23.
- Health and Safety. (2005). *Hand-arm vibration The Control of Vibration at Work Regulations 2005 Guidance on Regulations*. HSE Books.
- Herranz, Á. B. (2019). *Desarrollo de aplicaciones para IoT con el módulo ESP32*. Obtenido de https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/35420/TFG_Benito_Herranz_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hoyos, C. C., & Diaz, V. R. (2017). Análisis de exposición a vibraciones mano-brazo en trabajadores de una constructora. *Revista Colombiana de Salud Ocupacional*, 68-71.
- Hoyos-Gutiérrez, J., J. Cardona-Aristizabal, P. Muñoz-Gutiérrez, & Ramirez-Jimenez, D. (2023). Una Revisión Sistemática a las Aplicaciones en Prototipado Rápido para Control. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*.
- ICONTEC - GTC 45. (2012). *GUÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS Y LA VALORACIÓN DE LOS RIESGOS EN SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL*. . Obtenido de

- <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/6034/ParraCuestaDianaMarcelaVasquezVeraErikaVanessa2016-AnexoA.pdf?sequence=2>
- INCONTEC-NTC 5436-1:2006. (2006). *Incontec*. Obtenido de <https://tienda.icontec.org/gp-vibracion-mecanica-y-choque-evaluacion-de-la-exposicion-de-los-seres-humanos-a-la-vibracion-en-todo-el-cuerpo-parte-1-requisitos-generales-ntc5436-1-2006.html>
- Integral Innovation Experts. (20 de Agosto de 2019). *¿Qué es un software CAD y para qué sirve?* Obtenido de <https://integralplm.com/blog/2019/08/20/que-es-cad/>
- International Electrotechnical Commission. (2017). *IEC 62133-2:2017*. Obtenido de Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications - Part 2: Lithium systems: <https://webstore.iec.ch/publication/32662>
- Iqbal, S. M., Mahgoub, I., Du, E., Leavitt, M. A., & Asghar, W. (2021). Advances in healthcare wearable devices. *npj Flexible Electronics*, 14.
- Ismailov, A. S., & Jo'rayev, Z. B. (2022). Study of arduino microcontroller board. *"Science and Education" Scientific Journal*.
- Jiménez Leen, J. M. (2017). Historia de la salud ocupacional en la dinámica del docente universitario. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*.
- José Ignacio Rojas-Sola, A. F.-S.-T., & Hernández-Díaz, D. (2011). Una revisión histórica: desde el dibujo en ingeniería hacia la ingeniería del diseño. *Dyna*.
- Khodarahmi, M., & Maihami, V. (2022). A Review on Kalman Filter Models. *Archives o Computational Methods in Engineering*, 727 - 747. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-022-09815-7>
- Kurtul, S. (2019). Enfermedad del dedo blanco relacionada con vibraciones: reporte de un caso. *The European Research Journal*.
- Li, X., Yang, K., Yuan, Z., Liu, S., Du, J., Li, C., & Meng, S. (2023). Preparation and properties of a superhydrophobic surface on the printed circuit board (PCB). *Applied Physics A Materials Science & Processing*.
- Lizarazo, C., Fajardo, J., Berrio, S., & Quintana, L. (2010). Breve historia de la salud ocupacional en Colombia. *Ingeniería Industrial Pontificia Universidad Javeriana*.
- Lopez, E., & Rodriguez, J. (2019). Revisión teorica y normativa para pymes y el acompañamiento que realizan las arl en aspectos del sistema de seguridad y salud en Colombia. *Intitución Universitaria Politécnico GranColombiano*.
- Lopez, J. D. (2020). Metodología para la implementacion de estimadores de estado tipo filtro de Kalman en procesadores industriales. *Universidad Nacional de Colombia*, 104.
- López, J. D. (2020). *Metodología para la implementación de estimadores de estado tipo filtro de Kalman en procesadores industriales*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79554/98711178.2021.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- López, K., Penagos, C., & Murillo, E. C. (2015). *SEGUROS DE RIESGOS LABORALES SURAMERICANA S.A*. Obtenido de Identificación y control de los agentes de riesgo en el lugar de trabajo: https://www.arlsura.com/files/identificacion_control_riesgo.pdf
- López, M. B., Macorra, M. Z., & Alcántara, S. M. (2019). Trastornos musculoesqueléticos en trabajadores de la manufactura de neumáticos, análisis del proceso de trabajo y riesgo de la actividad. *Acta Universitaria*.
- López, P. J. (2018). Síndrome Vibratorio Mano-Brazo: Revisión literaria. *Medicina Legal de Costa Rica Edición Virtual*.

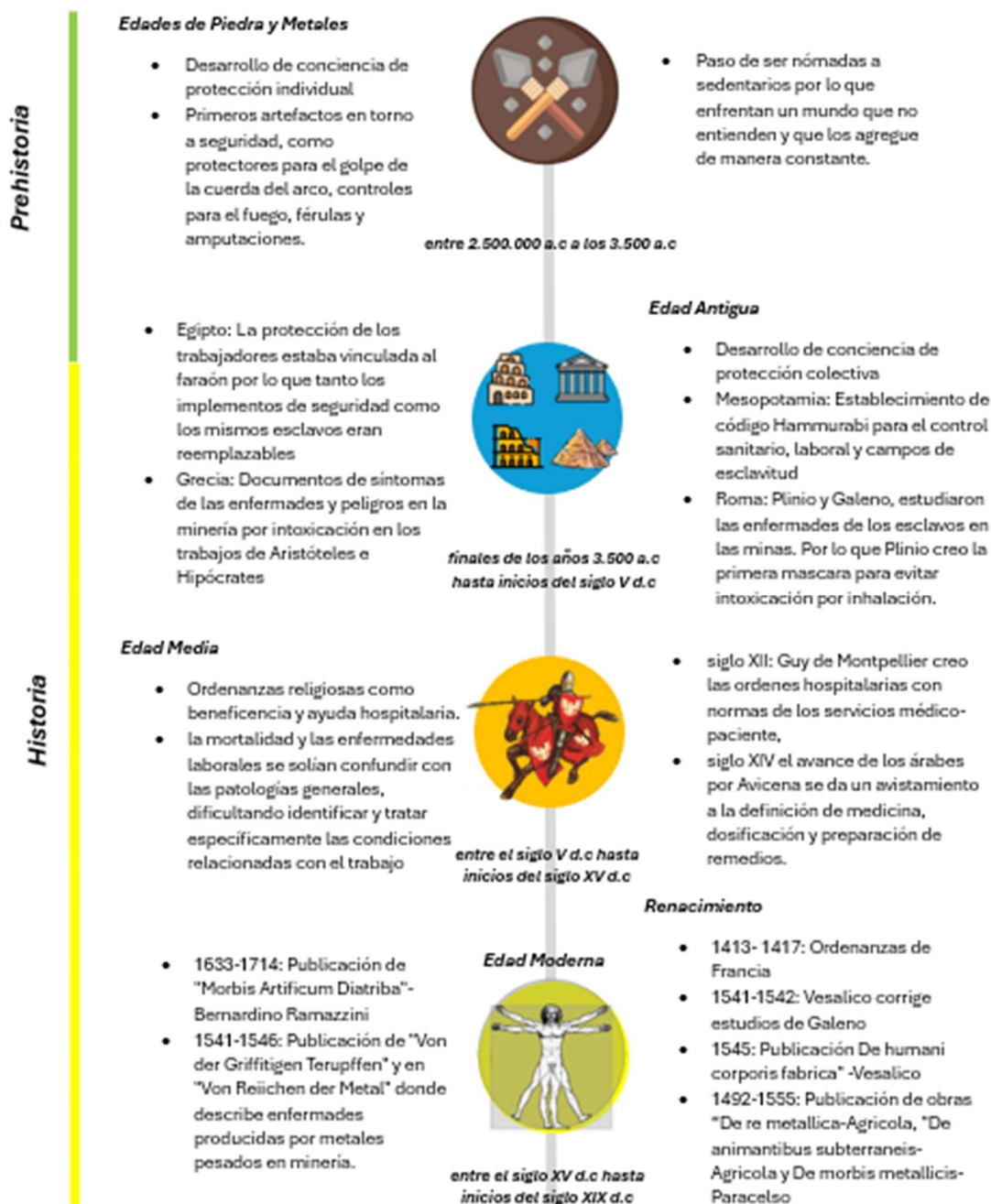
- Lorente-Pedreille, R. M., Sebastián, M. Á., & Sáenz-Nuño, M. A. (2020). 4.1.2. *Consideraciones metrológicas en los requerimientos de exposición a vibraciones en la normativa de seguridad y salud en el trabajo*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Maedaa, S., Taylor, M., Anderson, L., & McLaughlin, J. (2019). Determination of hand-transmitted vibration risk on the human. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 10.
- Manikandan, K. G., Pannirselvam, K., J. J., & Suresh, C. (2021). Investigaciones sobre la idoneidad del acelerómetro basado en MEMS para mediciones de vibraciones. *Materialstoday*, 45(7), 6183-6192. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.506>
- Mankar, J., Darode, C., Trivedi, K., Kanoje, M., & Shahare, P. (2014). REVIEW OF I2C PROTOCOL. *International Journal of Research in Advent Technology*, 6.
- Márquez-Sánchez, S., Campero-Jurado, I., Herrera-Santos, J., Rodríguez, S., & Corchado, J. M. (2021). Plataforma Inteligente Basada en EPP Inteligente para la Seguridad en los Lugares de Trabajo. *Sensors*.
- Ministerio de Salud. (10 de 10 de 2024). *minsalud*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/INTOR/contexto-migratorio-bogota-2024.pdf>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2005). *Ministerio de Salud y Protección Social*. Obtenido de DECRETO 4725 DE 2005: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18697>
- Ministerio de Trabajo de Colombia. (22 de 05 de 1979). <https://minvivienda.gov.co>. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/2400%20-%201979.pdf>
- Ministerio de Trabajo de Colombia. (13 de 02 de 2019). www.mintrabajo.gov.co. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/59995826/Resolucion+0312-2019-+Estandares+minimos+del+Sistema+de+la+Seguridad+y+Salud.pdf>
- Ministerio del Trabajo. (26 de Mayo de 2015). *DECRETO 1072 DE 2015 REGLAMENTO INTERNO DE TRABAJO*. Obtenido de <https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/0/DUR+1072+Sector+Trabajo+Actualizado+a+Marzo+25+de+2022.pdf/5d3900e5-03a7-f7e2-3b6a-2bd1e3b162cf?t=1648845402458>
- MinTrabajo. (2015). *Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo*. Obtenido de Decreto 1072 de 2015: <https://www.mintrabajo.gov.co/relaciones-laborales/riesgos-laborales/sistema-de-gestion-de-seguridad-y-salud-en-el-trabajo>
- Mohamed, K. S. (2021). Una introducción a Bluetooth. En *Diseño de módem Bluetooth 5.0 para dispositivos IoT* (págs. 1-32). Obtenido de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-88626-4_1#citeas
- Mokhtari, F., Cheng, Z., Wang, C. H., & Foroughi, J. (2023). Advances in Wearable Piezoelectric Sensors for Hazardous Workplace Environments. *Global Challenges*, 31.
- Molano, J., & Arévalo, N. (2013). De la salud ocupacional a la gestión de la seguridad y la salud en el trabajo; más que semántica, una transformación del sistema general de riesgos laborales. *Revista Innovar*.

- Morello, R., Capua, C. D., & Meduri, A. (2010). A Wireless Measurement System for Estimation of Human Exposure to Vibration During the Use of Handheld Percussion Machines. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, 9.
- MPS The future of Analog IC Technology. (2011). *MP1584*. Obtenido de <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/551593/MPS/MP1584EN.html>
- Nieradko-Iwanicka, B. (2019). Hand-arm vibration syndrome. *Reumatologia*, 347-349. doi:10.5114/reum.2019.90364
- Nieto, J. C., Rojas, T. N., & Nestiel, H. S. (2019). *MODELO PARA LA VIGILANCIA DE LA EXPOSICIÓN A VIBRACIÓN MANO-BRAZO EN TRABAJADORES DE EMPRESAS DEL SECTOR AUTOMOTOR*. Bogotá D.C: Universidad Del Bosque.
- Nieto, S. (2008). *Historia Universal*. Lexus.
- Normalización Española - Organización Internacional de Normalización. (2002). *Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1: Requisitos generales. (ISO 5349-1:2001)*. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0026649>
- Normalización Española - Organización Internacional de Normalización. (2008). *UNE-ISO 2631-1:2008*. Obtenido de ibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero.: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0041539>
- Organización Internacional de Normalización. (2018). *ISO 31000 Administración/Gestión de riesgos*. Obtenido de <https://www.ramajudicial.gov.co/documents/5454330/14491339/Norma.ISO.31000.2018.Espanol.pdf/cb482b2c-afd9-4699-b409-0732a5261486>
- Organización Internacional de Normalización. (2018). *ISO 45001:2018*. Obtenido de Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:es>
- Organización Internacional de Normalización. (2019). *Vibraciones mecánicas - Maquinaria sujeta y guiada con la mano - Principios para la evaluación de la emisión de las vibraciones*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/34244.html>
- Organización Mundial de la Salud. (17 de Septiembre de 2021). *Organización Mundial de la Salud - Comunicados de Prensa*. Obtenido de OMS/OIT: Casi 2 millones de personas mueren cada año por causas relacionadas con el trabajo: <https://www.who.int/es/news/item/16-09-2021-who-ilo-almost-2-million-people-die-from-work-related-causes-each-year>
- Orient Displays. (2022). *Orient Displays*. Obtenido de <https://www.orientdisplay.com/es/knowledge-base/pcb-basics/different-types-of-pcb/>
- PCBWAY. (2024). *PCBWAY PCB Prototype the Easy Way*. Obtenido de <https://www.pcbway.com/>
- Pino Castillo, S., & Ponce Bravo, G. (2019). *Comportamiento de la enfermedad laboral en Colombia 2015-2017*. Obtenido de Revista Fasecolda, (175), 48–55: <https://revista.fasecolda.com/index.php/revfasecolda/article/view/555>
- Polak, A., Wisniewski, Z., Walaszczyk, A., Maczewska, A., & Sopinski, P. (2019). Impacto de la industria 4.0 en la salud ocupacion y seguridad. *Universidad de Lodz Ingenieria de produccion*.
- Ponce, G. (2022). *La enfermedad laboral a nivel mundial*. Obtenido de Revista Fasecolda, (186), 60–66.: <https://revista.fasecolda.com/index.php/revfasecolda/article/view/818>

- Qamruddin, A. A., Husain, N. R., Sidek, M. Y., Hanafi, M. H., Ripin, Z. M., & Ali, N. (2019). Prevalencia del síndrome de vibración mano-brazo entre trabajadores de talleres de neumáticos en Kelantan, Malasia.
- Quinchía, R., Lizarazo, C. G., Robinson, L. A., Rincon, S. U., & Ariza, J. G. (Agosto de 2018). Herramientas Manuales Vibrátiles y Guantes Anti-Vibrátiles. *Ciencia & Trabajo*(63), 137-144. Obtenido de <https://www.scielo.cl/pdf/cyt/v20n63/0718-2449-cyt-20-63-00137.pdf>
- Rao, C. H., Avinash, K., Varaprasad, B. K., & Goe, S. (2022). A Review on Printed Electronics with Digital 3D Printing: Fabrication Techniques, Materials, Challenges and Future Opportunities. *Journal of Electronic Materials*, 19.
- Ribeiro, R. R. (2019). Evaluación de acelerómetros MEMS de bajo costo para SHM: frecuencia e identificación de amortiguación de estructuras civiles. *Latin American Journal of Solids and Structures*.
- Rivas, J. (2023). ACTUALIZACIÓN DEL DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO DE TENOSINOVITIS DE QUERVAIN, REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. *Universidad Católica de Cuenca*.
- Robledo, F. H. (2006). *Introducción a la salud ocupacional*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Robledo, F. H. (2014). *Riesgos Físicos I Ruido, vibraciones y presiones anormales*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Rodríguez, J., Cárdenas, N., Álvarez, J., Pérez, J., & Palencia, C. (2022). Estrategias para implementar sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo en empresas del sector industrial. Revisión narrativa de la literatura. *Revista de investigación en salud Universidad de Boyacá*.
- Sanchez, A., Macias, R., & Ramirez, L. (2022). La seguridad y salud ocupacional a través de los años. *Ingenio y conciencia científica de la escuela superior ciudad sabagún*.
- Santucci, F., Presti, D. L., Massaroni, C., Schena, E., & Setola, R. (2022). Precordial Vibrations: A Review of Wearable Systems, Signal Processing Techniques, and Main Applications. *Sensors*, 38.
- Sarraipa, A. A., & Castro, H. P. (2019). *Metodología De Evaluación*.
- Schmidt, D. (2023). *Arduino Curso Completo 2 Edición*. Madrid: Ra-Ma.
- Schrab, G. (2018). Bad vibes Hand-Arm Vibration Syndrome can be debilitating. *ISHN Industrial Safety & Hygiene News*.
- Secretaría Distrital de Integración Social. (04 de 2024). *integracionsocial*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.integracionsocial.gov.co/images/_docs/2024/Entidad/localidades/04062024-11-Suba-Diagnostico-2023.pdf
- Seneviratne, S., Hu, Y., Nguyen, T., Lan, G., Khalifa, S., Thilakarathna, K., . . . Seneviratne, A. (2017). A Survey of Wearable Devices and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 51.
- Senovilla, L. P. (2009). *Nota Técnica de Prevención* . Obtenido de Exposición a vibraciones mecánicas. Evaluación del riesgo : <https://www.insst.es/documents/94886/328096/839+web.pdf/eeab2c72-7d28-41f5-879c-eaf9a133270e>
- Sharma, A. (2020). Evolution of industrial revolutions: a review. *International journal of innovative technology and exploring engineering*.
- Shobhit Maruti, M. M. (Abril de 2023). Hand-arm vibration syndrome in the workplace. *BCMJ*, 65, 97-99 . Obtenido de <https://bcmj.org/worksafefbc/hand-arm-vibration-syndrome-workplace>

- Sigcha, L. (2017). Soluciones basadas en tecnología wearable para la valoración de vibraciones en el puesto de trabajo que afectan al sistema mano brazo. *Universidad Politécnica de Madrid*.
- Sikka, R. (2021). Una Visión General sobre las Aplicaciones de los Microcontroladores. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*.
- Suranthat, N., Atmajab, P., David, & Wicaksono, M. (2021). A Review of Wearable Internet-of-Things Device for Healthcare. *Procedia Computer Science*, 8.
- Swarnkar, B. (2023). El fenómeno de Raynaud: un repaso. *Indian Dermatology Online Journal*.
- TDK Electronics. (2023). *Alldatasheet*. Obtenido de <https://www.alldatasheet.com/>
- Tecknomovo. (2024). *Cargador de baterías Li-ion Lipo USB C DDTCCRUB*. Obtenido de <https://tecknomovo.com.mx/producto/cargador-de-baterias-li-ion-lipo-usb-c/>
- The Plastic People. (2013). *Technical Data Sheet*. Obtenido de PETG: <https://www.theplasticpeople.co.uk/ThePlasticPeople/media/The-Plastic-People/Products/Cut%20To%20Size/Data%20Sheets/datasheet-petg-2014.pdf?ext=.pdf>
- Thomas, O. T., & Gopalan, P. P. (2022). PCB Defects. En O. T. Thomas, & P. P. Gopalan, *Electronics Production Defects and Analysis* (págs. 39-73). Springer.
- TME Electronics Components. (2024). Obtenido de <https://www.tme.com/>
- Todtenberg, N., & Kraemer, R. (2019). A survey on Bluetooth multi-hop networks. *Ad Hoc Networks*.
- Vanfleteren, J., Gonzalez, M., Bossuyt, F., Hsu, Y.-Y., Vervust, T., Wolf, I. D., & Jablonski, M. (2012). Printed circuit board technology inspired stretchable circuits. *MRS Bulletin*.
- Velayos, A. (2023). *Filamento PETG: qué es, aplicaciones, ventajas e inconvenientes*. Obtenido de <https://republicofprinters.com/filamento-petg-que-es-aplicaciones-ventajas-e-inconvenientes/>
- Vidal, J. C. (2018). Tecnologías móviles y wearables para la autoregulación emocional de personas con trastornos del espectro autista. *Universidad Autónoma de Madrid*. Obtenido de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/684214/torrado_vidal_juan_carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- VISTRONICA S.A.S. (2020). *Vistrónica Tienda virtual de electronica*. Obtenido de <https://www.vistronica.com/sensores/>
- Worksafebc. (2023). Síndrome De Vibración Mano-Brazo En El Trabajo. *BC Medical Journal*.
- Wu, W.-L., Budianto, I. H., Wong, C.-F., & Gan, S. K.-E. (2019). A Review of Apps for Programming: programming languages and making apps with apps. *Scientific Phone Apps and Mobile Devices*, 27.
- Zhuang, Y., Zhang, C., Huai, J., Li, T., Chen, L., & Chen, R. (2022). Bluetooth Localization Technology: Principles, Applications, and Future Trends. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(23), 23506-23524.

Anexo 1 Diagrama completo de la línea de tiempo global



1 Revolución Industrial-Industria 1.0

- 1778: Edicto de Carlos III para la protección de accidentes en España,
- 1796: Creación de los primeros sindicatos de trabajadores
- En 1802 reglamentación de trabajado en fábricas y de higiene, salud y educación de los trabajadores



del año 1760 d.c al año 1890 d.c

- La creación de escuelas dentro de las fábricas para capacitar al personal
- Condiciones laborales con bastantes peligros/accidentes por el hecho de no existir en un inicio medidas de seguridad, manuales o reglamentación.
- 1848: se crea la legislación sanitaria para la industria y dos años más tarde las inspecciones para su cumplimiento con institutos.

- 1867: Nombran a los inspectores de seguridad.
- 1898: Responsabilizar a las empresas por accidentes.
- 1890: Generalización de la legislación de protección a los trabajadores contra riesgos laborales



del año 1870 d.c al año 1914 d.c

2 Revolución Industrial-Industria 2.0

- La necesidad de mano de obra barata no ofrece buenas condiciones a los empleados.
- 1871: Engels reporto que las maquinas en Manchester operaban sin protección por lo que en 1877 se vendrían a colocar estas.
- 1883: Formalización de la seguridad industrial con la institucionalización de esta.

Edad Contemporánea

Industria 3.0 y 4.0

- 1919: Creación y Funcionamiento de la Organización Internacional del Trabajo (OIT)
- 1921: Servicio de Prevención de Accidentes
- 1970: Creación de la OSHA y la NIOSH
- 1999: Normas OSHAS 18001 y ANSI Z10
- Covid-19 Expansión del SST al hogar y de forma remota



desde el siglo XIX d.c hasta la actualidad

- 2018:ISO 31000 y 45001
- Se establece el sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo desde 2015 en varios países, implementándolo bajo un sistema PHVA.
- Uso de dispositivos de medición portátiles, EPP comunes e inteligentes y wearables empresariales para monitorear variables asociadas a la carga laboral.

Fuente: Propia de los autores

Anexo 2 Metodología y Plan de trabajo Completo

Objetivo General	Objetivos Específicos	Fases	Etapas	Tarea	Detalles
Desarrollar un prototipo de dispositivo para el monitoreo de la vibración a la que están expuestos los operadores de herramientas mecánicas mediante la presentación de indicadores que permitan la gestión de este riesgo.	Recopilar información mediante la búsqueda en fuentes bibliográficas sobre las vibraciones en extremidades superiores y experimentación para la determinación de los requerimientos del mejor diseño del prototipo.	Diagnóstico	Revisión	Planteamiento y Justificación	Introducción, planteamiento o árbol del problema, causales y argumentación del por qué se abordará
				Objetivos	Plantear objetivo general y específicos
				Metodología	Según los objetivos establecer el tipo, diseño y enfoque de investigación
					Fijar muestra y población Definir el procedimiento metodológico a seguir
				Cronograma	Establecer mediante un diagrama de Gantt el tiempo estimado a realizar el proyecto en semanas para cada apartado de la metodología
				Consultar información bibliográfica	Realizar una matriz con la información, organizarla y segmentarla
				Estado del arte	Buscar dispositivos similares y colocarlos en una tabla según año /tipo de documento
				Marco teórico	Wearables y tipos /dispositivos Biomédicos
					Efectos de la vibración en el cuerpo humano
					Efectos de la vibración en la sección mano-brazo
					Estructura de los dispositivos de medición de la vibración
					Valores límites de vibración en mano-brazo en el ámbito laboral.
				Evaluación de la vibraciones y medidas preventivas	
Recursos	Realizar tabla de los recursos a disponer junto con el precio estimado inicial				
Marco histórico	Realizar búsqueda de información histórica global y nacional de la seguridad y salud ocupacional hasta SG-SST, enfatizando en los epp				
	Segmentarla en líneas cronológicas para mejor entendimiento y simplicidad				

Objetivo General	Objetivos Específicos	Fases	Etapas	Tarea	Detalles
				Marco legal	Realizar búsqueda de normativa vigente para los riesgos de vibración a nivel global y nacional
				Marco conceptual	Recopilar y definir conceptos clave que se evidencien en todo el documento para entendimiento de estos
				Marco geográfico	Brindar detalles sobre la ubicación y aspectos relevantes de la zona e industria a implementar
				Diseñar y aplicar el formato de inspección de vibraciones en el área	Evaluación del área de trabajo, bajo la norma
				Diseñar y Aplicar una encuesta para la población (diagnostica)	Organizada de acuerdo a la empresa, operario y persona encargada del SGSST
	Diseñar el sistema electrónico, mecánico y computacional utilizando los software @SolidWorks, @Proteus, @Arduino IDE, @Visual Studio y @Wowki para el desarrollo en CAD, CAE y CAM del dispositivo.	Desarrollo	Diseño Electrónico	Investigación y Selección de componentes electrónicos	Investigar sobre los procesos de manufactura de circuitos impresos, componentes electrónicos en cuanto a definición y especificaciones técnicas en datasheets o fichas técnicas
					Analizar la matriz en cuanto a características, requerimientos y precios
				Diseñar planos CAD	
				Simulación -CAE	
				Desarrollar la programación del dispositivo	
Fabricación del circuito impreso-CAM					
		Diseño Mecánico	Investigación y Selección de material a usar	Investigar sobre los procesos de manufactura, tipos de materiales y especificaciones técnicas de estos en impresión 3D	

Objetivo General	Objetivos Específicos	Fases	Etapas	Tarea	Detalles
				Diseñar planos CAD	
				Simulación-CAE	
				Impresión del diseño en 3D CAM	
			Diseño Computacional	Investigación y selección de programa/lenguaje para la interfaz	Investigar sobre los entornos de programación, lenguaje que manejan y especificaciones de su uso
				Desarrollar la interfaz grafica	
			Ejecución	Ensamblar el dispositivo	
	Calibración y pruebas piloto para verificación del funcionamiento	Realizar ajustes y correcciones			
	Implementación en campo				
	Realizar pruebas del prototipo en los trabajadores del sector industrial con el fin de la obtención de resultados y conclusiones.	Evaluación	Implementación	Implementación en campo	
				Aplicación de encuesta post prueba	
				Realizar ficha del prototipo/manual	
				Análisis de resultados	
Conclusiones					
Presentación de la investigación y documento final					

Fuente: Propia de los autores

Anexo 3 Instrumento de diagnóstico

Sección A Generalidades de la Empresa: El objetivo de esta sección es recopilar información relevante sobre la empresa que será entrevistada, lo que incluye datos generales, para poder contextualizar adecuadamente la entrevista sobre el entorno empresarial.

Nombre Completo de la Empresa:				
Nombre Persona de Contacto:		Fecha:		
Cargo:		Área:		
Correo electrónico:				
ARL:				
Página Web:				
Tamaño de la empresa:				
microempresa	Pequeña empresa	Pyme	Grande empresa	Startups
Menos de 10 trabajadores	Menos de 50 trabajadores	Mas de 50 - menos de 250	Mas de 250	Generalmente no supera los 5 trabajadores
Decreto MinCIT No 957 del 5 junio de 2019				
Ubicación de la empresa:			Departamento:	
Identificación del sector económico según la DIAN (primario, secundario, terciario):				
Agricultura, Ganadería, Caza, Silvicultura y Pesca				
Explotación de Minas y Canteras				
Industrias Manufactureras				
Suministro de Electricidad, Gas, Vapor y Aire Acondicionado				
Distribución de Agua; Evacuación y Tratamiento de Aguas Residuales				
Construcción				
Comercio al por Mayor y al por Menor; Reparación de Vehículos Automotores y Motocicletas				
Transporte y Almacenamiento				
Alojamiento y Servicios de Comida				
Información y Comunicaciones				
Actividades Financieras y de Seguros				
Actividades Inmobiliarias				
Actividades Profesionales, Científicas y Técnicas				
Actividades de Servicios Administrativos y de Apoyo				
Administración Pública y Defensa; Planes de Seguridad Social de Afiliación Obligatoria				
Educación				
Actividades de Atención de la Salud Humana y de Asistencia Social				
Actividades Artísticas, de Entretenimiento y Recreación				
Otras Actividades de Servicios				
Actividades de los Hogares Individuales en Calidad de Empleadores				
Actividades de Organizaciones y Entidades Extraterritoriales				

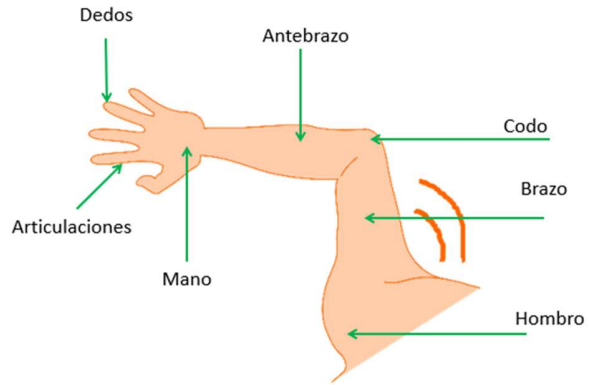
Sección B Evaluación del riesgo físico de vibraciones al trabajador: Se busca comprender cómo la empresa entrevistada está abordando actualmente el seguimiento del riesgo físico debido a las vibraciones, de acuerdo con el Sistema de Seguridad y Salud en el

Trabajo (SSST), así como la percepción y exposición de los empleados en relación con este tema. Estos hallazgos proporcionarán información crucial para identificar aspectos clave a considerar tanto en el dispositivo como en su implementación.

Nombre Completo de la Empresa:	
Nombre del empleado:	
Cargo:	
Horario del turno:	
Tipo de turno:	
Fecha:	
Tiempo de antigüedad en la empresa:	
Área:	
Realizada por:	Michelle Stefania Ortiz Sanabria David Adolfo Paez Molina
1. ¿Se implementan pausas activas o rotaciones de tareas?	
Se programan pausas regulares durante la jornada laboral.	
Se rotan las tareas que implican vibración con otras tareas menos expuestas.	
Se utilizan ambas estrategias.	
No se implementan pausas ni rotaciones de tareas específicas para reducir la exposición a la vibración.	
2. ¿Cuál es la duración de las pausas para el riesgo de vibración?	
Menos de 5 minutos	
5-10 minutos	
10-15 minutos	
15-20 Minutos	
Más de 20 minutos	
3. ¿Qué tipo de equipo de protección personal usa para reducir la exposición a la vibración?	
RTA/:	
4. ¿Cómo calificaría su uso de elementos de protección personal durante el uso de herramientas ?	
Siempre uso elementos de protección personal de manera adecuada.	
A menudo uso elementos de protección personal, pero a veces me olvido o no los utilizo correctamente.	
Uso elementos de protección personal solo cuando me lo recuerdan o cuando siento que es necesario.	
Raramente o nunca uso elementos de protección personal durante el uso de herramientas que generen vibración.	

5. ¿Con qué frecuencia se revisan y reemplazan los elementos de protección personal?	
Diario	
Semanal	
Mensual	
Cuatrimestral	
Semestral	
Anual	
No se reemplazan	
6. ¿Cuánto tiempo estima que estás expuesto a la vibración de herramientas o maquinaria durante una jornada laboral típica?	
Menos de 1 hora	
Entre 1 y 2 horas	
Entre 3 y 4 horas	
Entre 6 y 8 horas	
Más de 8 horas	
7. ¿Qué tipo de herramientas o maquinaria utilizas regularmente que podrían causar vibración en tus manos y brazos?	
RTA:	
8. ¿Ha experimentado alguno de los siguientes síntomas?	
Entumecimiento en las manos o los dedos.	
Hormigueo en las manos o los dedos.	
Sensación de pérdida de fuerza en las manos.	
Dolor en las manos, muñecas, codos o brazos.	
Cambios en la sensibilidad al frío o al calor en las manos o los dedos.	
Ninguno de los anteriores	
Otros síntomas (especificar):	
9. ¿Realiza alguna actividad fuera de su trabajo que conlleve a realizar movimientos repetitivos o con exposición a vibración? Especifique cual	
RTA:	
10. ¿Presenta alguna de las siguientes enfermedades? Especifique cual en caso de ser otra	
Síndrome de HAVS	
Fenómeno de Raynaud	
Síndrome del Dedo Blanco	
Síndrome del Túnel Carpiano	
Tendinitis de Quervain	
Túnel del carpo	
Tenosinovitis	
Trastornos musculoesqueléticos TME	
Síndrome del maguito rotador	
Otra	

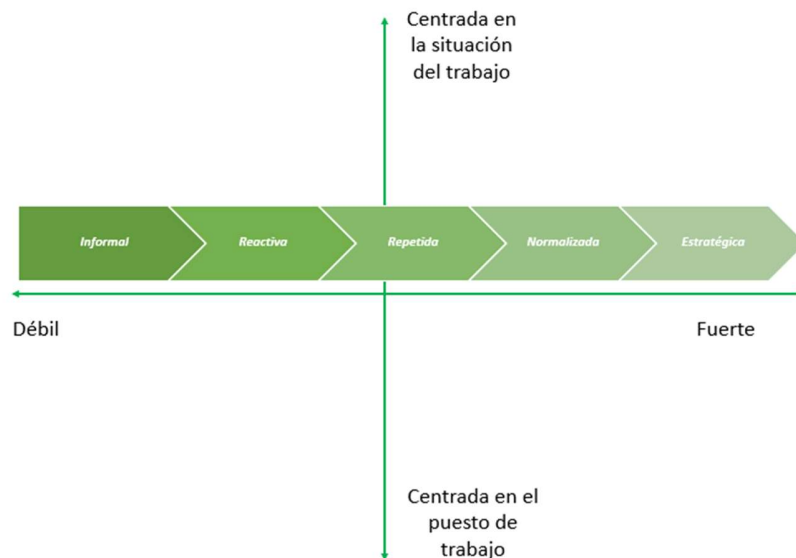
11. En caso de presentar alguno de los síntomas descritos con anterioridad, especifique con una x en la siguiente imagen en que zona lo manifiesta. A su vez indique en del 1 al 10, cual es el índice de dolor o sensación que experimenta.



1 a 4	
5 a 7	
8 a 10	

Sección C En esta sección se abordarán temas propiamente de las personas encargadas del SGSST, para tener conocimiento del estado actual del sistema, las medidas de prevención actuales y a su vez la percepción frente al proyecto.

1. ¿Cómo calificaría el grado de madurez del SGSST de su empresa? Ubique en la gráfica su opinión



2. ¿Cada cuánto realizan capacitaciones sobre la vibración o generales de seguridad?

Diarias	
Semanales	
Quincenales	
Mensuales	
Cuatrimestrales	
Semestrales	
Otro	

3. ¿Califica del 1 al 5, que tan efectivas son las medidas de protección que actualmente implementan a fin de reducir problemas en la salud del trabajador? Donde 1 son poca efectividad y 5 totalmente efectivas

1	
2	
3	
4	
5	

4. ¿Cómo crees que podrían mejorar las medidas de protección y prevención por riesgos de vibración en tu lugar de trabajo?

RTA/ _____

5. ¿Cuáles de las siguientes medidas se implementan para reducir el riesgo de vibración mano-brazo en el entorno laboral?

Evaluación de la medición mediante registros	
Diagnóstico clínico y tratamiento	
Test de sintomatología	
Selección de equipo adecuado EPP y controles para mitigar el riesgo de vibraciones	
Mantenimiento preventivo y correctivo de equipos	
Aislamiento de Vibraciones	
Controles administrativos sobre el cambio de procesos de trabajo (Jornada de trabajo- Rotación de actividades)	
Análisis de riesgo por oficio y de puestos de trabajo	
Programa o SVE de desórdenes osteomusculares siendo el énfasis las vibraciones	
MIPEVR identificando el riesgo ergonómico por vibraciones	
Programa de pausas activas	
Mediciones higiénicas por vibración	
Formación y educación (Capacitación sobre factores de riesgo (mecánico, biomecánico y del entorno) y la prevención de riesgos por vibración de herramientas)	

6. ¿Se realizan mediciones regulares de la vibración en tu lugar de trabajo para evaluar los niveles de exposición? ¿Con que frecuencia?

Diario	
Semanal	
Mensual	
Cuatrimestral	
Semestral	
Anual	
No se realizan mediciones de este tipo	
Cuando una auditoria lo requiera	

7. Seleccione 5 factores de vital importancia que determinarían el éxito o fracaso del proyecto.

Factor Clave	Facilidad	Obstáculo
Gestión de riesgos (identificación, valoración, monitoreo y seguimiento)		
Formación y capacitación sobre factores de riesgo y prevención por herramientas vibrátiles		
Se cuenta con un SG-SST (Enfocado en la vigilancia de desórdenes osteomusculares-DOMA) y un área/personal encargado de este.		
Comunicación continua		
Se evidencia compromiso de la gerencia		
Flexibilidad y adaptabilidad		
Compromiso con la mejora continua-Ciclo PHVA		
Cambio en la cultura organizacional		
Se cuenta con un programa, SVE o MIPEVR identificando el riesgo ergonómico y los desórdenes osteomusculares		
Uso de equipo de protección personal		
Complejidad de las tareas		
Conciencia de los trabajadores		
Costos del sistema de SGSST		
Cumplimiento normativo		

Fuente: Propia de los autores

Anexo 4 Formato de Inspección de las vibraciones en el área de trabajo vibraciones

		FORMATO							
		LISTA DE CHEQUEO PARA INSPECCIONES PLANEADAS Y NO PLANEADAS							
CIUDAD:		DIRECCIÓN EMPRESA:					FECHA:		
AREA O SITIO DE TRABAJO:									
No.	ASPECTOS A VERIFICAR	CUMPLIMIENTO			GRADO DE ACCIÓN *			OBSERVACIONES	
		SI	NO	NA	A	B	C		
					INME DIAT A	PRO NTA	POS TERI OR		
1 PELIGROS FISICOS									
1.1	Se utilizan herramientas percutoras en las labores								
1.2	Existe riesgo por vibración mano brazo en las actividades realizadas								
1.3	Hay rotación frecuente de operarios que manejan herramientas percutoras cada cierto tiempo								
1.4	El operario utiliza Elementos de protección personal como guantes antivibrátiles								
1.5	El operario esta capacitado para operar herramientas percutoras								
1.6									
2 PELIGRO MECANICO (HERRAMIENTAS DE OFICINA)									
2.1	Las herramientas estan en buen estado								
2.2	La maquinaria o herramientas vibratorias tienen en lamtenimiento adecuado								
2.3									
3 PREGUNTAS Y OBSERVACION DE TAREAS (Hacer verificación a través de la observación y preguntas a los trabajadores)									
3.1	Los trabajadores cumplen con las normas de seguridad de acuerdo a la actividad que realizan								
3.2	Los operarios son concietes de los peligros a los que están expuestos.								
3.3	Se realizan capacitaciones periodicas sobre el manejo de herramientas percutoras y sus consecuencias en la								
3.4									
RESPONSABLES QUE REALIZAN LA INSPECCIÓN									
NOMBRE David Paéz Molina					NOMBRE Michelle Ortiz Sanabria				
AREA					CARGO		AREA		
FIRMA					FIRMA				
NOMBRE					NOMBRE:				
CARGO		AREA			CARGO		AREA		
FIRMA					FIRMA				
*GRADO DE ACCIÓN		A -INMEDIATA: Muerte, una incapacidad			B- PRONTA: Lesión o enfermedad		C- POSTERIOR: Lesiones menores		

Fuente: Propia de los autores

Anexo 5 Instrumento de post – diagnostico

- Instrucciones: Este cuestionario está constituido por preguntas de selección múltiple cerradas. Lo fundamental es responder usando sus conocimientos, opiniones y, ante todo, sus experiencias personales y profesionales. Los resultados serán utilizados con propósitos eminentemente investigativos.
- Motivo de la encuesta: La presente encuesta tiene como objetivo recolectar datos sobre la percepción del dispositivo de monitoreo de la vibración mano-brazo, con el fin de mejorarlo y comprender mejor su opinión sobre el mismo.

1.¿Cómo se sintió al utilizar este dispositivo de monitoreo de vibración mano-brazo?	
Muy Cómodo	
Cómodo	
Neutral	
Incomodo	
Muy Incomodo	
2.¿Estaría dispuesto(a) a adquirir este producto?	
Si	
No	
3.¿Conocía este producto o alguno similar anteriormente?	
Si	
No	
4.¿Se sentiría más seguro(a) al usar el dispositivo, considerando el riesgo físico de la vibración?	
Si	
No	
5. ¿Cuánto estaría dispuesto(a) a pagar por este producto?	
Entre \$250.000 a \$450.000	
Entre \$455.000 a \$650.000	
Entre \$655.000 a \$750.000	
Entre \$755.000 a \$950.000	
6.En su opinión, ¿cómo podría mejorarse este producto?	
Mejorar la durabilidad del dispositivo	
Reducir el tamaño para mayor comodidad	
Aumentar la precisión en la medición de la vibración	
Facilitar la interpretación de los datos obtenidos	
Ampliar la batería para una mayor duración	
Ofrecer opciones de personalización según las necesidades del usuario	
Mejorar la comunicación para brindar conexión vía wifi o una app	
Optimizar el diseño ergonómico para un uso más cómodo	

7. ¿Qué características del dispositivo considera más importantes para su uso efectivo?	
Durabilidad	
Facilidad de uso	
Precisión en la medición	
Conectividad	
Tamaño	
8. ¿Con qué frecuencia utilizaría este dispositivo en su entorno laboral?	
Diariamente	
Semanalmente	
Quincenal	
Mensual	
Raramente	
Nunca	
De manera esporádica o solo para tomar muestras cuando la situación lo amerite	

Fuente: Propia de los autores

Anexo 6 Cronograma Completo

Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1. Diagnóstico																								
1.1 Revisión																								
1.1.1 Planteamiento y Justificación																								
1.1.2 Objetivos																								
1.1.3 Metodología																								
1.1.4 Cronograma																								
1.1.5 Consultar información bibliográfica																								
1.1.6 Estado del arte																								
1.1.7 Marco teorico																								
1.1.8 Recursos																								
1.1.9 Marco historico																								
1.1.10 Marco legal																								
1.1.11 Marco conceptual																								
1.1.12 Marco geografico																								
1.1.13 Diseñar una encuesta diagnostica, post prueba y formato de inspección.																								
1.1.14 Aplicación de encuesta diagnostica y formato de inspección																								
2. Desarrollo																								
2.1 Diseño Electrónico																								
2.1.1 Investigación y Selección de componentes electronicos																								
2.1.2 Diseñar planos CAD																								
2.1.3 Simulación -CAE																								
2.1.4 Desarrollar la programacion del dispositivo																								
2.1.5 Fabricación del circuito impreso-CAM																								
2.2 Diseño Mecánico																								
2.2.1 Investigación y Selección de material a usar																								
2.2.2 Diseñar planos CAD																								
2.2.3 Simulación-CAE y calculos mecanicos																								
2.2.4 Impresión del diseño en 3D CAM																								
2.3 Diseño Computacional																								
2.3.1 Investigación y selección de programa/lenguaje para la interfaz																								
2.3.2 Desarrollar la interfaz grafica																								
2.4 Ejecución																								
2.4.1 Ensamblar el dispositivo																								
2.4.2 Calibración y pruebas para la verificación del funcionamiento																								
3. Evaluación																								
3.1 Implementación																								
3.1.1 Prueba de campo																								
3.1.2 Aplicación de encuesta post prueba																								
3.1.3 Realizar ficha del prototipo/manual																								
3.1.4 Analisis de resultados																								
3.1.5 Conclusiones																								
3.1.6 Presentación de la investigación y documento final																								

Fuente: Propia de los autores

Anexo 8 Programación de la Simulación CAE ESP32, MPU6050 Y OLED SSD1306 en @Wokwi

```
1 #include <Adafruit_MPU6050.h>
2 #include <Adafruit_Sensor.h>
3 #include <Wire.h>
4 #include <Adafruit_SSD1306.h>
5 #include <Adafruit_GFX.h>
6
7 #define SCREEN_WIDTH 128
8 #define SCREEN_HEIGHT 64
9 #define OLED_RESET 4
10
11 Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire);
12 Adafruit_MPU6050 mpu;
13
14 unsigned long startTime = 0;
15 bool exposureStarted = false;
16
17 void setup() {
18   Serial.begin(115200);
19
20   if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
21     Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
22     for (;;) ; // Infinite loop
23   }
24
25   display.clearDisplay();
26   display.setTextSize(2);
27   display.setTextColor(WHITE, 0);
28   display.setCursor(35, 10);
29   display.print("ESP32");
30   display.setCursor(25, 40);
31   display.print("MPU6050");
32   display.display();
33
34   if (!mpu.begin()) {
35     Serial.println("Failed to find MPU6050 chip");
36     while (1) {
37       delay(10);
38     }
39   }
40
41   mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_8_G);
42   mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_250_DEG);
43   mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_21_HZ);
44   delay(1000);
45 }
```

```

46
47 void loop() {
48     sensors_event_t a, g, temp;
49     mpu.getEvent(&a, &g, &temp);
50
51     float accelerationMagnitude = sqrt(pow(a.acceleration.x, 2) + pow(a.acceleration.y, 2) + pow(a.acceleration.z, 2));
52
53     if (accelerationMagnitude > 1.0) { // Threshold for exposure
54         if (!exposureStarted) {
55             startTime = millis();
56             exposureStarted = true;
57         }
58     } else {
59         exposureStarted = false;
60     }
61
62     display.clearDisplay();
63     display.setTextSize(1);
64     display.setTextColor(WHITE, 0);
65
66     display.setCursor(0, 0);
67     display.print("Magnitud Aceleracion:");
68     display.setCursor(0, 10);
69     display.print(accelerationMagnitude);
70     display.println(" m/s^2");
71
72     if (exposureStarted) {
73         unsigned long elapsedTime = (millis() - startTime) / 1000; // Time in seconds
74         display.setCursor(0, 30);
75         display.print("Tiempo exp: ");
76         display.print(elapsedTime);
77         display.print(" s");
78     }
79
80     display.display();
81     delay(100); // Update display every 100 ms
82 }
83

```

Fuente: Propia de los Autores

Anexo 9 Código del microcontrolador ESP32 WROOM 32 en ®Arduino IDE

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  SerialBT.begin("MONITORING_VIBRATION"); // Nombre del dispositivo Bluetooth
  // Verificación de la conexión del sensor
  if (!accel.begin()) {
    Serial.println("Oops, no fue detectado el sensor ADXL345 ... Revisa la conexión!");
    while (1);
  }
  Serial.println("Bienvenido a MV");
  Serial.println("Trabajo de grado Mecatrónica -Industrial");
  Serial.println("David Paez-Michelle Ortiz");
  // Configuración del rango del sensor
  accel.setRange(ADXL345_RANGE_16_G);
  pinMode(buzzer, OUTPUT);
  pinMode(led1, OUTPUT);
  pinMode(led2, OUTPUT);
  pinMode(led3, OUTPUT);
  pinMode(ledon, OUTPUT);
  delay(5000);
}

void loop() {
  if (Serial.available()) {
    serialEvent();
  }

  if (dataComplete) {
    dataString = "";
    // Verifica y realiza la calibración si no se ha hecho
    if (!testcalibracion) {
      calibracion();
      testcalibracion = true;
    }
  }
}
```

```

}

sensors_event_t event;
accel.getEvent(&event);

// Aplica los offsets para los ejes X, Y, Z
float x_acc = event.acceleration.x - offsetX;
float y_acc = event.acceleration.y - offsetY;
float z_acc = event.acceleration.z - offsetZ;

float estimatedx = simpleKalmanFilter.updateEstimate(x_acc);
float estimatedy = simpleKalmanFilter.updateEstimate(y_acc);
float estimatedz = simpleKalmanFilter.updateEstimate(z_acc);

// Calcula la magnitud de la aceleración promediada
float accelerationMagnitude = sqrt(pow(estimatedx, 2) + pow(estimatedy, 2) + pow(estimatedz, 2));

// Calcula la duración de la exposición basada en la magnitud de la aceleración
Aqui va segun la norma iso5449 para el tiempo

//Serial.print("Aceleracion: ");
//Serial.println(accelerationMagnitude, 2);
SerialBT.println("acel:"+ String(accelerationMagnitude, 2));

if (exposureStarted) {
  unsigned long elapsedTime = millis() - startTime;
  //Serial.print("Tiempo exp: ");
  //Serial.print(elapsedTime / 1000); // Mostrar el tiempo en segundos
  //Serial.println(" s");

  if (elapsedTime >= exposureDuration) {
    ledthree();
    exposureStarted = false; // Desactiva el estado de exposición después de activar ledthree
  }
}
ledtwo();

```

```

delay(5000);
  dataComplete = false;
} else {
  // Verifica y realiza la calibración si no se ha hecho
if (!testcalibracion) {
  calibracion();
  testcalibracion = true;
}

sensors_event_t event;
accel.getEvent(&event);

// Aplica los offsets para los ejes X, Y, Z
float x_acc = event.acceleration.x - offsetX;
float y_acc = event.acceleration.y - offsetY;
float z_acc = event.acceleration.z - offsetZ;

float estimatedx = simpleKalmanFilter.updateEstimate(x_acc);
float estimatedy = simpleKalmanFilter.updateEstimate(y_acc);
float estimatedz = simpleKalmanFilter.updateEstimate(z_acc);

// Calcula la magnitud de la aceleración promediada
float accelerationMagnitude = sqrt(pow(estimatedx, 2) + pow(estimatedy, 2) + pow(estimatedz, 2));

// Calcula la duración de la exposición basada en la magnitud de la aceleración
Aqui va segun la norma iso5449 para el tiempo
//Serial.print("Aceleracion: ");
//Serial.println(accelerationMagnitude, 2);
Serial.println("acel:"+ String(accelerationMagnitude, 2));

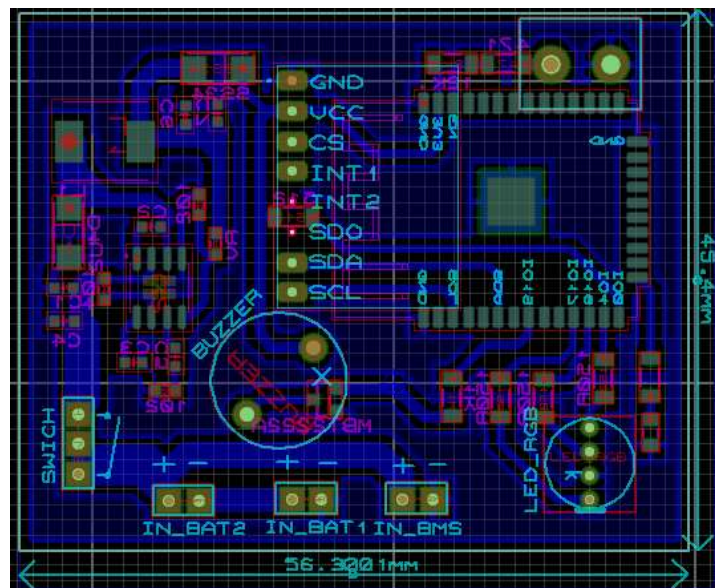
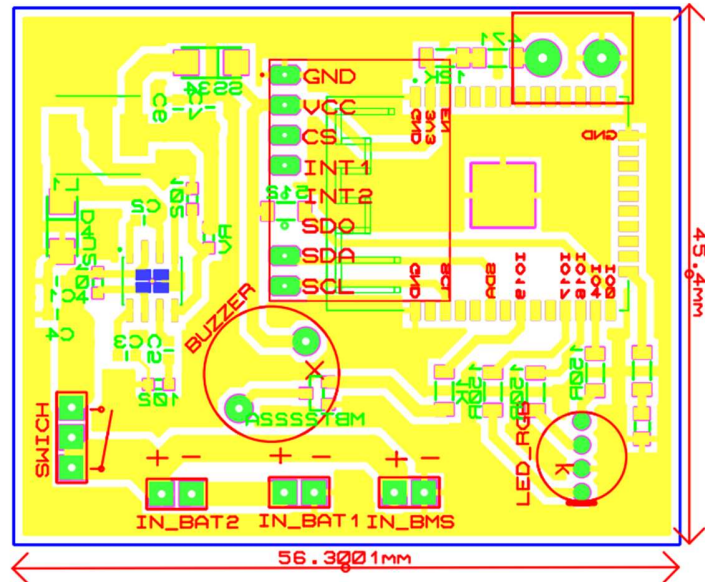
if (exposureStarted) {
  unsigned long elapsedTime = millis() - startTime;
  //Serial.print("Tiempo exp: ");
  //Serial.print(elapsedTime / 1000); // Mostrar el tiempo en segundos
  //Serial.println(" s");
}

```

```
if (elapsedTime >= exposureDuration) {  
  ledthree();  
  exposureStarted = false; // Desactiva el estado de exposición después de activar ledthree  
}  
}  
ledfour();  
delay(5000);  
Serial.println("Datos incompletos, esperando 1 para completar...");  
}  
  
}
```

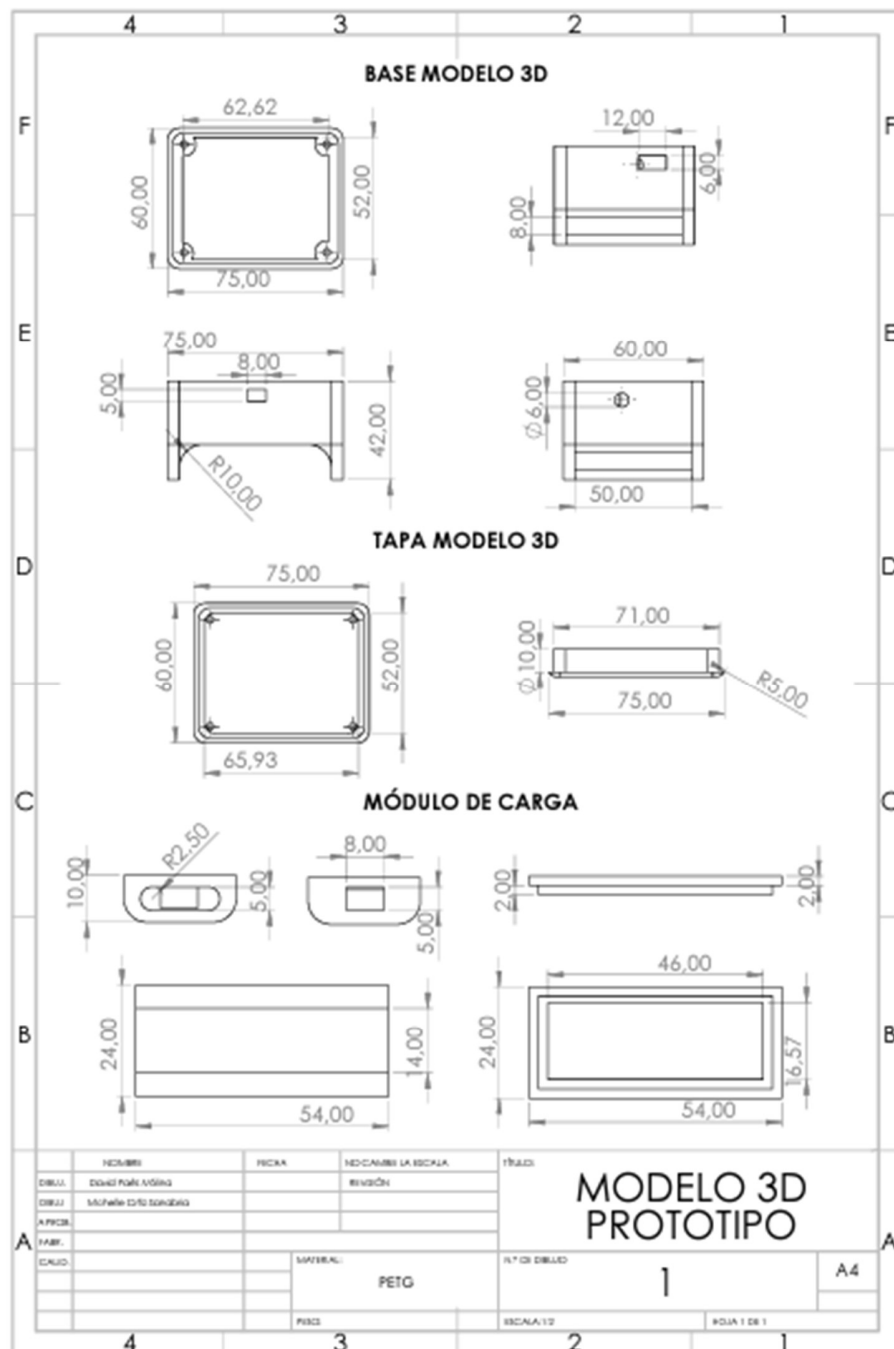
Fuente: Propia de los Autores

Anexo 10 Gerber plano general y vista de plano de tierra



Fuente: Propia de los Autores

Anexo 11 Planos de la estructura en 3D en @SolidWorks



Fuente: Propia de los Autores

Anexo 12 Código de la interfaz grafica

```
def main():
    root = tk.Tk() # Crear la instancia de la ventana principal
    root.title('Dashboard Home')

aquí va el icono

    # Obtener las dimensiones de la pantalla
    screen_width = root.winfo_screenwidth()
    screen_height = root.winfo_screenheight()

    # Establecer tamaño de la ventana, un poco más pequeño que la pantalla completa
    window_width = int(screen_width * 0.9)
    window_height = int(screen_height * 0.9)
    position_x = int((screen_width - window_width) / 2)
    position_y = int((screen_height - window_height) / 2)

    root.geometry(f'{window_width}x{window_height}+{position_x}+{position_y}')
    root.resizable(1, 1) # Permitir que la ventana sea redimensionable si es necesario

    barra_menu(root)
    dashboard = Frame(root=root)
    dashboard.pack(fill='both', expand=True)

aquí va el anidamiento

# Configuración de la barra de menú
def barra_menu(root):
    barra_menu = tk.Menu(root)
    root.config(menu=barra_menu)

    menu_inicio = tk.Menu(barra_menu, tearoff=0)
    barra_menu.add_cascade(label='Inicio', menu=menu_inicio)
    menu_inicio.add_command(label='Conectar')
    menu_inicio.add_command(label='Pausar')
    menu_inicio.add_command(label='Salir', command=root.destroy)

    barra_menu.add_cascade(label='Configuración')
    barra_menu.add_cascade(label='Ayuda')

aquí se crea la db
    # Inicializa el cronómetro
    self.tiempo_inicializado = False
```

```

# Llamamos a las funciones que requerimos
self.campos_dashboard()
self.update()
self.tabla_mediciones()

def campos_dashboard(self):
    # Crea un Label con la imagen como fondo y lo coloca detrás de todos los widgets en el Frame
    background_label = tk.Label(self, image=self.background_image)
    background_label.place(x=0, y=0, relwidth=1, relheight=1)
    background_label.lower()

    # Ajusta el tamaño del Frame
    self.grid_columnconfigure(0, weight=1)
    self.grid_rowconfigure(0, weight=1)

#-----LABELS-----

# Título del Dashboard
self.title_app = tk.Label(self, text="Monitoreo de Vibración")
self.title_app.config(font=("Arial", 20, 'bold'), justify="center")
self.title_app.grid(row=0, column=0, columnspan=7, padx=10, pady=50, sticky='ew')

# Aceleración:

# Nombre de aceleración
self.label_aceleracion = tk.Label(self, text='Aceleración: ')
self.label_aceleracion.config(font=('Arial', 15))
self.label_aceleracion.grid(row=1, column=0, padx=10, pady=10)

# Valor de aceleración
self.acel_value = tk.Label(self, text='0.0', font=('Helvetica', 16), relief="sunken",
borderwidth=6, width=6, height=2)
self.acel_value.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=10)

# Gráfico de aceleración
self.grafico_aceleracion = plt.Figure(figsize=(8, 6), dpi=60)
self.ax1 = self.grafico_aceleracion.add_subplot(111)
self.ax1.yaxis.set_major_formatter(ticker.FuncFormatter(lambda x, _: f'{x:.2f}'))
# Crear el canvas y dibujar el gráfico
self.canvas1 = FigureCanvasTkAgg(self.grafico_aceleracion, master=self)
self.canvas1.draw()
self.canvas1.get_tk_widget().grid(row=1, column=2, columnspan=2, padx=10, pady=10)
## Configurar etiquetas de los ejes
self.ax1.set_xlabel('Tiempo', fontsize=12) # Etiqueta del eje x
self.ax1.set_ylabel('Aceleración', fontsize=12) # Etiqueta del eje

```

```

# Cronómetro
self.label_cronometro = tk.Label(self, text="Tiempo: 00:00:00", font=("Helvetica", 14))
self.label_cronometro.grid(row=2, column=0, columnspan=2, padx=10, pady=10)
aquí va el calculo del promedio
def iniciar_cronometro(self):
    self.tiempo_inicializado = True
    self.inicio_tiempo = time.time()

def update_values(self, aceleracion):
    # Actualiza los valores de aceleración en las etiquetas
    self.acel_value.config(text=str(aceleracion) + ' m/s')
    self.aceleracion_valores.append(aceleracion)

# Actualiza el gráfico
y1 = self.aceleracion_valores
self.ax1.clear()
self.ax1.plot(y1)
self.canvas1.draw()

fecha_actual = # Obtiene la fecha actual en formato ISO

# Guarda los valores en la base de datos junto con la fecha
self.conn.execute('INSERT INTO mediciones (aceleracion, fecha) VALUES (?, ?)', (aceleracion,
fecha_actual))
self.conn.commit()

aquí va según la norma iso5349 y la sincronización con el dispositivo
def update(self):
# Enviar '1' si la conexión es válida, '0' si no
if self.conexion is not None:
    try:
        # Enviar '1' indicando que la conexión está activa
        self.conexion.write(b'1')
        line = self.conexion.readline().decode('utf-8').rstrip()
        if line:
            for valor in line.split():
                if 'acel' in valor:
                    aceleracion = float(valor.split(':')[1])
                    print(aceleracion)
                    self.update_values(aceleracion)
    except serial.SerialException:
        print("No se pudo leer del puerto serie. Revise la conexión o el puerto.")
        # Enviar '0' indicando que hay un problema con la conexión
        self.conexion.write(b'0')
else:
    # Si la conexión es None, enviar '0'

```

```

self.conexion.write(b'0')

# Actualiza el promedio
self.gestionar_datos()
# Actualiza el cronómetro
self.actualizar_cronometro()

# Repite la actualización cada segundo
self.after(1000, self.update)

def tabla_mediciones(self):
    # Define los encabezados de columna y las opciones de la tabla
    self.tabla = ttk.Treeview(self, column=('fecha', 'aceleracion'), show='headings')
    self.tabla.heading('fecha', text='Fecha', anchor='center')
    self.tabla.heading('aceleracion', text='Aceleración', anchor='center')
    self.tabla.column('fecha', anchor='center')
    self.tabla.column('aceleracion', anchor='center')
    self.tabla.grid(row=1, column=6, rowspan=2, sticky='nse', padx=10, pady=10)

    self.scroll = ttk.Scrollbar(self, orient='vertical', command=self.tabla.yview)
    self.scroll.grid(row=1, column=6, rowspan=2, sticky='nse', padx=10, pady=10)
    self.tabla.configure(yscrollcommand=self.scroll.set)

    # Ajusta el scrollbar al tamaño de la tabla
    self.grid_rowconfigure(1, weight=1)

    # Configura el temporizador para volver a actualizar la tabla cada segundo
    self.after(1000, self.actualizar_tabla)

def actualizar_tabla(self):
    # Borra los datos existentes en la tabla
    self.tabla.delete(*self.tabla.get_children())

    #aquí se coloca obtención los datos de la base de datos y luego se agregan

    # Configura el temporizador para volver a actualizar la tabla cada segundo
    self.after(1000, self.actualizar_tabla)

self.label_cronometro.config(text=f"Tiempo: {horas:02d}:{minutos:02d}:{segundos:02d}")
self.after(1000, self.actualizar_cronometro)

```

Fuente: Propia de los Autores

Anexo 13 Resultados Encuesta Diagnostico

Sección A

Nombre Completo de la Empresa:	GL Proyectos y Construcciones				
Nombre Persona de Contacto:	German Lopez	Fecha:	19/09/2024		
Cargo:	Ingeniero industrial	Área:	Gerencia		
Correo electrónico:	glpc.proyectos@gmail.com				
ARL:	Sura				
Página Web:	https://www.facebook.com/GLProyectosyConstrucciones/				
Tamaño de la empresa:					
microempresa	Pequeña empresa	Pyme	Grande empresa	Startups	
Menos de 10 trabajadores	Menos de 50 trabajadores	Mas de 50 - menos de 250	Mas de 250	Generalmente no supera los 5 trabajadores	
x					
Decreto MinCIT No 957 del 5 junio de 2019					
Ubicación de la empresa:		Departamento:			
Identificación del sector económico según la DIAN (primario, secundario, terciario):					
Agricultura, Ganadería, Caza, Silvicultura y Pesca					
Explotación de Minas y Canteras					
Industrias Manufactureras					x
Suministro de Electricidad, Gas, Vapor y Aire Acondicionado					
Distribución de Agua; Evacuación y Tratamiento de Aguas Residuales					
Construcción					x
Comercio al por Mayor y al por Menor; Reparación de Vehículos Automotores y Motocicletas					
Transporte y Almacenamiento					
Alojamiento y Servicios de Comida					
Información y Comunicaciones					
Actividades Financieras y de Seguros					
Actividades Inmobiliarias					
Actividades Profesionales, Científicas y Técnicas					
Actividades de Servicios Administrativos y de Apoyo					
Administración Pública y Defensa; Planes de Seguridad Social de Afiliación Obligatoria					
Educación					
Actividades de Atención de la Salud Humana y de Asistencia Social					
Actividades Artísticas, de Entretenimiento y Recreación					
Otras Actividades de Servicios					
Actividades de los Hogares Individuales en Calidad de Empleadores					
Actividades de Organizaciones y Entidades Extraterritoriales					

Sección B

ENCUESTA DIAGNOSTICO								
Nombre encuestado - Cédula de Ciudadanía - Sector								
#	Pregunta	Tipo de Pregunta	Jacobo de Jesús Bernal	Harold Fernando Aros Montano	Eduardo Barreto	Luis Alberto Ortiz	Pedro Alidoro Maipica Santos	Sileno de Dios
			79.140.085	1.113.312.679	N/A	5.550.873	79.447.539	N/A
			Construcción	Construcción	Carpintería	Carpintería	Carpintería	Carpintería
1	¿Se implementan pausas activas o rotaciones de tareas?	Opción Múltiple	No se implementan pausas ni rotaciones de tareas específicas para reducir la exposición a la vibración.	No se implementan pausas ni rotaciones de tareas específicas para reducir la exposición a la vibración.	No se implementan pausas ni rotaciones de tareas específicas para reducir la exposición a la vibración.	No se implementan pausas ni rotaciones de tareas específicas para reducir la exposición a la vibración.	No se implementan pausas ni rotaciones de tareas específicas para reducir la exposición a la vibración.	No se implementan pausas ni rotaciones de tareas específicas para reducir la exposición a la vibración.
2	¿Cuál es la duración de las pausas para el riesgo de vibración?	Opción Múltiple	5-10 minutos	Menos de 5 minutos	Menos de 5 minutos	Menos de 5 minutos	5-10 minutos	5-10 minutos
3	¿Qué tipo de equipo de protección personal usa para reducir la exposición a la vibración?	Ablerta	Guantes, Casco, Tapa oídos	Guantes, Gafas, Tapa oídos	Ninguno	Ninguno	Guantes	Ninguno
4	¿Cómo calificaría su uso de elementos de protección personal durante el uso de herramientas?	Opción Múltiple	A menudo uso elementos de protección personal, pero a veces me olvido o no los utilizo correctamente.	A menudo uso elementos de protección personal, pero a veces me olvido o no los utilizo correctamente.	Raramente o nunca uso elementos de protección personal durante el uso de herramientas que generen vibración.	Raramente o nunca uso elementos de protección personal durante el uso de herramientas que generen vibración.	A menudo uso elementos de protección personal, pero a veces me olvido o no los utilizo correctamente.	Raramente o nunca uso elementos de protección personal durante el uso de herramientas que generen vibración.
5	¿Con qué frecuencia se revisan y reemplazan los elementos de protección personal?	Opción Múltiple	Semanal	Mensual	Anual	Anual	Cuatrimstral	Anual
6	¿Cuánto tiempo estima que estás expuesto a la vibración de herramientas o maquinaria durante una jornada laboral típica?	Opción Múltiple	Entre 3 y 4 horas	Entre 1 y 2 horas	Entre 3 y 4 horas	Entre 3 y 4 horas	Entre 3 y 4 horas	Entre 1 y 2 horas
7	¿Qué tipo de herramientas o maquinaria utilizas regularmente que podrían causar vibración en tus manos y brazos?	Ablerta	Taladro de concreto, Pulidora, Taladro Percutor	Taladro percutor, Pulidora	Taladro de madera, lijadora, Caladora, Sierra, etc.	Taladro de madera, lijadora, Caladora, Sierra, etc.	Taladro de madera, lijadora, Caladora, Sierra, etc.	Taladro de madera, lijadora, Caladora, Sierra, etc.
8	¿Ha experimentado alguno de los siguientes síntomas?	Opción Múltiple	Ninguno de los anteriores	Hormigueo en las manos o los dedos.	Ninguno de los anteriores	Hormigueo en las manos o los dedos.	Ninguno de los anteriores	Ninguno de los anteriores
9	¿Realiza alguna actividad fuera de su trabajo que conlleve a realizar movimientos repetitivos o con exposición a vibración? Especifique cual	Ablerta	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno

Sección C

1. ¿Cómo calificaría el grado de madurez del SGSST de su empresa? Ubique en la gráfica su opinión

2. ¿Cada cuanto realizan capacitaciones sobre la vibración o generales de seguridad?

Dianias	
Semanales	
Quincenales	
Mensuales	X
Cuatrimestrales	
Semestrales	
Otro	Bimensuales

3. ¿Califica del 1 al 5, que tan efectivas son las medidas de protección que actualmente implementan a fin de reducir problemas en la salud del trabajador? Donde 1 son poco efectividad y 5 totalmente efectivas

1	
2	
3	
4	
5	x

4. ¿Cómo crees que podrían mejorar las medidas de protección y prevención por riesgos de vibración en tu lugar de trabajo?

RTA/Para garantizar una adecuada protección contra las vibraciones, es fundamental el uso correcto de equipos de protección personal (EPP), tales como guantes y tapones para los oídos. Además, es esencial que las herramientas utilizadas sean ergonómicas y cuenten con características de protección específicas. Este enfoque integral no solo reduce el riesgo de lesiones, sino que también promueve un entorno de trabajo más seguro y saludable

5. ¿Cuáles de las siguientes medidas se implementan para reducir el riesgo de vibración mano-brazo en el entorno laboral?

Evaluación de la medición mediante registros	
Diagnóstico clínico y tratamiento	
Test de sintomatología	
Selección de equipo adecuado EPP y controles para mitigar el riesgo de vibraciones	X
Mantenimiento preventivo y correctivo de equipos	X
Aislamiento de Vibraciones	X
Controles administrativos sobre el cambio de procesos de trabajo (Jornada de trabajo- Rotación de actividades)	
Análisis de riesgo por oficio y de puestos de trabajo	X
Programa o SVE de desórdenes osteomusculares siendo el énfasis las vibraciones	
MIPEVR identificando el riesgo ergonómico por vibraciones	
Programa de pausas activas	
Mediciones higiénicas por vibración	
Formación y educación (Capacitación sobre factores de riesgo (mecánico, biomecánico y del entorno) y la prevención de riesgos por vibración de herramientas)	

6.¿Se realizan mediciones regulares de la vibración en tu lugar de trabajo para evaluar los niveles de exposición? ¿Con que frecuencia?		
Diario		
Semanal		
Mensual		
Cuatrimestral		
Semestral		
Anuual		
No se realizan mediciones de este tipo		X
Quando una auditoria lo requiera		
7. Seleccione 5 factores de vital importancia que determinarían el éxito o fracaso del proyecto.		
Factor Clave	Facilidad	Obstáculo
Gestión de riesgos (identificación, valoración, monitoreo y seguimiento)		
Formación y capacitación sobre factores de riesgo y prevención por herramientas vibrátiles	X	
Se cuenta con un SG-SST (Enfocado en la vigilancia de desórdenes osteomusculares-DOMA) y un área/personal encargado de este.		
Comunicación continua		
Se evidencia compromiso de la gerencia		
Flexibilidad y adaptabilidad		
Compromiso con la mejora continua-Ciclo PHVA		X
Cambio en la cultura organizacional		X
Se cuenta con un programa, SVE o MPEVR identificando el riesgo ergonómico y los desórdenes osteomusculares		
Uso de equipo de protección personal	X	
Complejidad de las tareas		
Conciencia de los trabajadores		X
Costos del sistema de SGSST		
Cumplimiento normativo		

Fuente: Propia de los Autores

Anexo 14 Resultados Encuesta Prototipo

ENCUESTA PROTOTIPO				
		Nombre encuestado - Cédula de Ciudadanía - Sector		
#	Pregunta	Jacobo de Jesús Bernal	Eduardo Barreto	Luis Alberto Ortiz
		79.140.085	N/A	5.550.873
		Construcción	Carpintería	Carpintería
1	¿Cómo se sintió al utilizar este dispositivo de monitoreo de vibración mano-brazo?	Neutral	Neutral	Cómodo
2	¿Estaría dispuesto(a) a adquirir este producto?	SI	SI	SI
3	¿Conocía este producto o alguno similar anteriormente?	SI	NO	NO
4	¿Se sentiría más seguro(a) al usar el dispositivo, considerando el riesgo físico de la vibración?	SI	SI	SI
5	¿Cuánto estaría dispuesto(a) a pagar por este producto?	Entre \$250.000 a \$450.000	Entre \$455.000 a \$650.000	Entre \$250.000 a \$450.000
6	En su opinión, ¿cómo podría mejorarse este producto?	Ninguna	Reducir el tamaño para mayor comodidad	Ninguna
7	¿Qué características del dispositivo considera más importantes para su uso efectivo?	Facilidad de uso	Facilidad de uso	Facilidad de uso
8	¿Con qué frecuencia utilizaría este dispositivo en su entorno laboral?	Semanalmente	Raramente	Semanalmente

Fuente: Propia de los Autores

Anexo 15 Resultados Formato de Inspección

		FORMATO							
		LISTA DE CHEQUEO PARA INSPECCIONES PLANEADAS Y NO PLANEADAS							
CIUDAD: Bogotá		DIRECCIÓN EMPRESA: Norte de Bogotá				FECHA: Agosto 2023			
AREA O SITIO DE TRABAJO:									
No.	ASPECTOS A VERIFICAR	CUMPLIMIENTO			GRADO DE ACCIÓN *			OBSERVACIONES	
		SI	NO	NA	A INMEDIATA	B PRONTA	C POSTERIOR		
1 PELIGROS FISICOS									
1.1	Se utilizan herramientas percutoras en las labores	X							
1.2	Existe riesgo por vibración mano brazo en las actividades realizadas	X				X			
1.3	Hay rotación frecuente de operarios que manejan herramientas percutoras cada cierto tiempo	X				X			El uso de herramientas no es constante depende de la necesidad o de manda
1.4	El operario utiliza Elementos de protección personal como guantes antivibrátiles		X		X				Utilizan guantes normales y otros elementos de protección personal
1.5	El operario esta capacitado para operar herramientas percutoras	X				X			
1.6									
2 PELIGRO MECANICO									
2.1	Las herramientas estan en buen estado	X						X	
2.2	La maquinaria o herramientas vibratorias tienen en Mantenimiento adecuado	X						X	
2.3									
3 PREGUNTAS Y OBSERVACION DE TAREAS (Hacer verificación a través de la observación y preguntas a los trabajadores)									
3.1	Los trabajadores cumplen con las normas de seguridad de acuerdo a la actividad que realizan			X		X			La empresa no cuenta con un Sistema de Seguridad en el Trabajo establecido.
3.2	Los operarios son concietes de los peligros a los que están expuestos.		X			X			
3.3	Se realizan capacitaciones periodicas sobre el manejo de herramientas percutoras y sus consecuencias en la		X			X			
3.4									
RESPONSABLES QUE REALIZAN LA INSPECCIÓN									
NOMBRE David Páez Molina					NOMBRE Michelle Ortiz Sanabria				
AREA					CARGO				
FIRMA					FIRMA				
NOMBRE					NOMBRE:				
CARGO					CARGO				
FIRMA					FIRMA				
*GRADO DE ACCIÓN		A -INMEDIATA: Muerte, una incapacidad			B- PRONTA: Lesión o enfermedad			C- POSTERIOR: Lesiones menores	

Fuente: Propia de los Autores

Anexo 16 Manual del dispositivo

Manual de Usuario del Dispositivo ***Autores: David Paez y Michelle Ortiz***

1. Introducción
2. Instalación
3. Uso
4. Mantenimiento
5. Solución de Problemas

1. Introducción

El MV, está diseñado con un enfoque tanto de seguridad industrial como biomédico. Debido a que monitorea la vibración (aceleración) en los tres ejes ortogonales, proporcionando datos sobre la aceleración promedio de acuerdo con la norma ISO 5349, así como el tiempo que el usuario puede estar expuesto a ese tipo de vibración.

2. Instalación

Requisitos del sistema:

- Instalar Visual Studio y Python, asegurándose de habilitar el PATH.
- Instalar las librerías necesarias como matplotlib, numpy, pillow, matplotlib y pyserial
- Copiar y pegar los archivos de la interfaz para que los pueda ejecutar el equipo receptor, teniendo en cuenta el cambio de ruta de los archivos y el puerto de comunicación al momento de conectarse al Bluetooth. En caso de no saber el número del puerto rectificarlo con el archivo probe.
- Contar con un mínimo de 4 GB de almacenamiento para datos locales y 2 GB de memoria RAM.

3. Uso

Instrucciones:

Para un uso adecuado del dispositivo, siga las siguientes instrucciones al pie de la letra:

- Asegúrese de que el Bluetooth del dispositivo receptor (laptop o Tablet) esté encendido y habilitado.
- Coloque el dispositivo sobre una superficie horizontal para que se auto calibre.
- Encienda el dispositivo accionando el interruptor, se accionará el led blanco.
- Verifique la sincronización con el dispositivo receptor para asegurar el emparejamiento automático.
- Espere la señal de auto calibración, indicada por el color rojo del LED RGB.
- Retire el dispositivo de la superficie y colóquelo en la muñeca, asegurándolo debidamente con el velcro.
- El dispositivo funciona en dos modos: síncrono y asíncrono, Tenga en cuenta lo siguiente:
- Síncrono: En este modo, el sistema calibra automáticamente el sensor y establece la conexión con el dispositivo receptor para el envío de datos, junto con el encendido del LED en color verde. Una vez lograda esta conexión, los datos se envían cada 5 segundos durante un muestreo de 100 intervalos para determinar el tiempo que una persona puede estar expuesta. A continuación, el sistema comienza a cronometrar y a sensar de manera continua hasta que se cumpla el tiempo establecido. De forma casi simultánea, se activa la alarma del dispositivo junto con un mensaje en la interfaz, indicando que se ha alcanzado el límite de uso de la herramienta. A su vez se acciona la alarma lumínica indicada con el color azul del LED RGB y el Buzzer,
- Asíncrono: Durante este modo, no envía datos al dispositivo receptor. Pero si calibra el sensor y seguido a esto analiza los datos de aceleración promedio para cronometrar en segundos el tiempo de exposición de la persona. Al alcanzar el límite establecido, se activa una alarma mediante el color azul del LED RGB intermitente y un Buzzer. En caso contrario, el sistema continúa monitoreando, con el color morado del LED RGB, pero también intermitente.
- Ejecute la interfaz y verifique la recepción de datos.
- Al finalizar la medición, desconecte la interfaz desde la barra de menú de inicio o desde la esquina superior derecha para salir. Luego, apague el dispositivo y retírelo de la mano de la persona a la que se le realizó la medición.

4. Mantenimiento

Consejos para el mantenimiento regular:

- Limpie el exterior del dispositivo remojando un paño suave con un poco de alcohol y páselo suavemente por la superficie.
- Al abrir el dispositivo, verifique que no haya material particulado en su interior. Si es necesario, retire el PCB y limpie el interior con alcohol etílico, asegurándose de dejar secar completamente antes de volver a ensamblar.
- Realice revisiones periódicas para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo, prestando especial atención a la carga de las baterías, la comunicación y el desgaste de los componentes, en particular los puntos de soldadura, que pueden deteriorarse con el tiempo debido a la vibración constante.
- Si presenta problemas más allá de daños superficiales, como fallos de comunicación, mal funcionamiento o un deterioro excesivo de la estructura, se recomienda realizar una revisión exhaustiva con el fabricante para evaluar la necesidad de cambiar componentes y llevar a cabo el mantenimiento adecuado.

5. Solución de Problemas

Problemas comunes:

Fallos de comunicación: Si experimenta interferencia o despareamiento, restablezca la conexión o reinicie el dispositivo y vuelva a ejecutar la interfaz.

Velcro: Si el velcro se ha desgastado por uso excesivo, reemplácelo para asegurar una mejor sujeción en la muñeca.

Alarmas: Si las alarmas lumínicas o sonoras no funcionan, comuníquese con el fabricante para gestionar el cambio del dispositivo.

Descalibración del sensor: Si el sensor presenta descalibración debido a golpes, uso excesivo, temperatura ambiente o humedad, arrojará datos erráticos o en su defecto ningún dato. Por lo tanto, debe de contactar al fabricante para su reemplazo o también reinicie el dispositivo ubicándolo horizontalmente en una superficie nivelada.

Fuente: Propia de los autores

Anexo 17 Ficha técnica del dispositivo

Ficha Técnica

Nombre del Producto: MV EPP

Descripción: El MV es un dispositivo diseñado para monitorear la vibración mediante la medición de la aceleración lineal en los tres ejes ortogonales de la muñeca. Utilizando esta información, junto con las normativas ISO 5349 y ANSI 2.70, el dispositivo calcula el tiempo de exposición al riesgo, y al finalizar dicho periodo, emite una alerta tanto visual como sonora. Además, el MV opera en modo sincrónico en su interfaz, permitiendo visualizar los datos en tiempo real y almacenarlos en una base de datos local. En modo asíncrono, se contabiliza únicamente el tiempo de exposición y se emite la alerta correspondiente.

Características Técnicas:

Estructura Mecánica:

Dimensiones: 6 cm x 7.5 cm en su base, con una altura de 4.5 cm

Forma: Cuadrada

Peso estructura muñeca: 53 gr

Peso estructura cargador: 8 gr

Materiales: PET-G

Color: Negro

Estructura Electrónica:

Dimensiones: 4.54 cm x 5.63 cm x 0.2 cm

Forma: Cuadrada

Peso: 17 gr

Material: Fibra de vidrio

Color: Verde

Consumo Energético: 50.7 mA

Cantidad de Elementos Electrónicos dentro de la PCB: 30

Elementos externos: cargador, baterías 3.7 v y PCB

Interfaz Gráfica:

Funcionalidad en sistema operativo: Windows, Linux

Entorno de Desarrollo: Visual Studio

Tipo de Comunicación: Bluetooth 4.2

Librerías: pillow, matplotlib y pyserial, las demás bibliotecas están instaladas por defecto

Lenguaje de Programación: Python

7. Aspectos diferenciadores:

- **Funcionalidad:** El dispositivo, como un EPP inteligente y un dispositivo biomédico no invasivo, está diseñado para medir la vibración y aceleración en la zona mano-brazo, cumpliendo con la norma ISO 5349. Equipado con un acelerómetro triaxial ADXL345, permite un monitoreo continuo de la exposición a vibraciones en tiempo real. Su diseño ligero y ergonómico garantiza comodidad durante su uso prolongado, mientras que su sistema de alertas mediante LED y Buzzer facilita la atención del usuario en entornos laborales. Además, su mantenimiento es sencillo y económico, y permite personalizar configuraciones según las necesidades específicas del usuario, aumentando así su versatilidad y eficacia en la promoción de la salud ocupacional.
- **Conectividad:** El dispositivo usa una comunicación de Bluetooth 4.2 con el dispositivo receptor por lo que cualquier dispositivo receptor que sea laptop o Tablet puede sincronizarse para ejecutar la interfaz.
- **Sensorica:** El dispositivo está equipado únicamente con un acelerómetro triaxial ADXL345, lo que lo convierte en una opción más económica en comparación con otros dispositivos que cumplen funciones similares. Sin embargo, es importante destacar que, al igual que estos otros modelos, no se adhiere a las normas ISO en relación con los rangos de aceleración o los tiempos de exposición.
- **Ergonomía y Comodidad:** El diseño cuadrado del dispositivo permite una mejor adaptación a la muñeca, ya que reduce su volumen y proporciona un ajuste seguro y

cómodo, acorde a la forma promedio de la muñeca. Además, cuenta con una correa de velcro ajustable, lo que garantiza un buen ajuste para diferentes usuarios.

Al prescindir de una pantalla, se minimiza la distracción del usuario durante el trabajo y se aumenta la resistencia del dispositivo, lo que lo hace más ligero y menos propenso a daños. La funcionalidad se centra en la medición de vibraciones y la señalización de alertas, lo que permite al usuario concentrarse en la tarea a realizar, optimizando así el tiempo y la facilidad de uso.

- **Durabilidad y Resistencia:** Con un peso de aproximadamente 112 gr, el dispositivo se sitúa por encima del rango de otros modelos similares, que varían entre 37 g y 47 g. Sin embargo, este peso adicional refuerza su robustez, ya que, aunque otros dispositivos pueden contar con bordes de acero inoxidable, son más susceptibles a daños o golpes. Esto facilita su reparación y hace que su mantenimiento sea mucho más económico en comparación con otros dispositivos.
- **Autonomía e interfaz gráfica:** El dispositivo cuenta con una autonomía de 19 h que comparado con el Smart Watch promedio de duración de 8 h a 14 días considerando que no tienen tareas continuas bajo un entorno industrial y que considerando tareas de alto consumo suelen descargarse en un mayor tiempo.
- **Costo-beneficio:** el dispositivo, con un precio de 583,600, ofrece ventajas significativas en comparación con vibrometros, smartwatches y prototipos. A diferencia de los vibrometros, que suelen ser más costosos y complejos, este dispositivo combina funcionalidad avanzada con un diseño ergonómico y portátil, lo que lo hace accesible y fácil de usar en entornos laborales. En comparación con smartwatches, que no están diseñados específicamente para medir vibraciones en la zona mano-brazo, nuestro dispositivo proporciona mediciones continuas y cumple con la norma ISO 5349, garantizando la seguridad del usuario. Además, frente a otros prototipos, su robustez y bajo costo de mantenimiento aseguran una inversión a largo plazo eficiente y efectiva en la promoción de la salud ocupacional.

Fuente: Propia de los autores