



**UNIVERSIDAD INDOAMÉRICA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TEMA**

---

**DISEÑO DE UNA PLATAFORMA PARA CARACTERIZACIÓN DE  
ACTUADORES VIBROTÁCTILES.**

---

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial

Autor

José Roland Castillo Montoya

Tutor

Byron Paúl Remache Vinueza

QUITO - ECUADOR

2025

### **Declaración de autoría**

Quien suscribe, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Integración Curricular, como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Industrial, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor.

Quito, 30 de junio del 2025

.....

José Roland Castillo Montoya

172269287-6

## **Autorización de repositorio legal**

Yo José Roland Castillo Montoya, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular con el nombre “Diseño de una plataforma para caracterización de actuadores vibrotáctiles”, como requisito para optar al grado de Ingeniero Industrial y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI - UTI) Los usuarios del RDI – UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerda los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Par constancia de esta autorización, en la ciudad de Quito, a los 30 días del mes de junio del 2025, firmo conforme:

Autor José Roland Castillo Montoya.

Firma: .....

Número de cédula: 172269287-6.

Dirección: Pichincha, Quito, Calderón, Cuatro Esquinas, Paseos de Calderón, Casa 35.

Correo electrónico: [jcastillo27@indoamerica.edu.ec](mailto:jcastillo27@indoamerica.edu.ec) .Teléfono: 098 976 9072.

## **Aprobación de tutor**

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Integración Curricular “Diseño de una plataforma para caracterización de actuadores vibrotáctiles”, presentado por José Roland Castillo Montoya, para optar por el título de Ingeniero Industrial.

### **CERTIFICO**

Que dicho Trabajo de Integración Curricular ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte de los Lectores que se designe.

Quito, 30 de junio del 2025

.....

Byron Paúl Remache Vinuesa

## **Aprobación del tribunal**

El trabajo de Integración Curricular ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, sobre el tema: DISEÑO DE UNA PLATAFORMA PARA CARACTERIZACIÓN DE ACTUADORES VIBROTÁCTILES, en la ciudad de Quito, previo a la obtención del Título de Ingeniero Industrial, reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la sustentación del Trabajo de Integración Curricular.

Quito, 30 de junio del 2025.

.....

Ms. C. Blanca Liliana Topón Visarrea Ing.

.....

Ms. C. Fabián Alberto Sarmiento Ortiz Ing.

## **Dedicatoria**

A mi Señora Madre Clemencia Marlene Montoya Montoya; quien con su ejemplo de trabajo altamente ético, abnegado e inquebrantable, ha propiciado en mí el anhelo de titularme como Ingeniero Industrial para ponerme al servicio de la comunidad, y lograr ser un miembro activo y capaz de contribuir en su crecimiento integral y sostenible.

Dedico especialmente este trabajo de investigación a mis tías: Edna Beatriz, Clara Noemí y Carmen Augusta Montoya Montoya, por haber respaldado, motivado e impulsado este profundo anhelo de superación personal.

A los Señores Profesores de la Universidad Tecnológica Indoamérica; que en un ejercicio denodado por transmitir sus conocimientos y experiencias profesionales en diversas áreas de la ingeniería, así como de la administración financiera empresarial, animaron en mí, cursar y concretar esta carrera multidisciplinaria, innovadora, fascinante y que apasiona, para lograr convertirme en un Ingeniero Industrial.

*José Roland Castillo Montoya.*

## **Agradecimiento**

A mi Señora Madre Clemencia Marlene Montoya; la participe y coautora tras bambalinas de este triunfo académico, quien con su guía, paciencia, cariño, confianza y apoyo hercúleo ante las muy complejas y diversas vicisitudes que encontramos en este camino de profesionalización ingenieril; ha viabilizado esta exitosa culminación. Gracias por ser ejemplo de trabajo duro.

A los Sres. Profesores de la FING; Ingenieros: Arteaga G.; Remache P.; Espejo H.; Topón L., Sarmiento F. e Iza Christian quienes, me brindaron las directrices y con ahínco orientaron a este proyecto para revestirlo de una fundamentación científica, tecnológica y académica robusta, por lo cual es un recurso válido para apuntalar futuras oportunidades de mejora o nuevos estudios.

*José Roland Castillo Montoya.*

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Mecanorreceptores y Frecuencias de Percepción de Corpúsculos en la Piel Humana.....	3
<b>Tabla 2</b> Configuración de las Tres Alternativas de Diseño para Validar a la PCAV...	64
<b>Tabla 3</b> Atribuciones Funcionales de Ingeniería de la PCAV.....	74
<b>Tabla 4</b> Calificaciones de Importancia Técnica para las Atribuciones Funcionales Ingenieriles. ....	78
<b>Tabla 5</b> Definición de la Denominación más Beneficiosa del Sensor para Medir la Aceleración.....	84
<b>Tabla 6</b> Deducción del Método de Sujeción y Suspensión en el Aire para el Actuador. ....	85
<b>Tabla 7</b> Definición de la Placa más favorable para la Recepción y/o Entrega de las Señales.....	87
<b>Tabla 8</b> Análisis de la Eficiencia Energética de la Placa ESP8266 vs. la Arduino Mega 2560.....	89
<b>Tabla 9</b> Matriz de Decisión: Mejor Alternativa Técnica de Solución del Sensor de Aceleración.....	91
<b>Tabla 10</b> Matriz de Decisión: Mejor Alternativa Técnica de Solución para la Sujeción y Suspensión del Actuador Vibrotáctil en el Aire.....	92
<b>Tabla 11</b> Matriz de Decisión: Mejor Alternativa Técnica de Solución para la Placa y/o Tarjeta de Adquisición de los Datos de Aceleración.....	93
<b>Tabla 12</b> Componentes Seleccionados para la PCAV.....	96
<b>Tabla 13</b> Conexiones Electrónicas entre el Acelerómetro ADXL345 y la Placa ESP8266.....	105

<b>Tabla 14</b> Conexión entre la Pantalla HD44780 y la Placa Controladora ESP8266. ...	105
<b>Tabla 15</b> Cálculo del Tiempo estimado en Segundos para Ensamblar el Prototipo de la PCAV. ....	109
<b>Tabla 16</b> Escala para Interpretar el Valor de la $C_F$ , de acuerdo con Boothroyd y Dewhurst.....	116
<b>Tabla 17</b> Materias Primas para Manufactura Aditiva de los componentes Plásticos de la PCAV.....	120
<b>Tabla 18</b> Criterios para Calcular la Prioridad en el Planeamiento del Diseño de Materiales. ....	126
<b>Tabla 19</b> Peso Cualitativo y Cuantitativo para la Matriz de Priorización. ....	127
<b>Tabla 20</b> Asignación de Pesos Cuantitativos para cada Criterio según su Importancia Relativa.....	128
<b>Tabla 21</b> Cálculo del Puntaje Total para cada Material.....	129
<b>Tabla 22</b> Orden de Prioridad de Mayor a Menor en función del Puntaje Total. ....	130
<b>Tabla 23</b> Criterios para determinar la Prioridad en el Planeamiento del Diseño de Materiales. ....	130
<b>Tabla 24</b> Peso Cualitativo y Cuantitativo para la Matriz de Priorización. ....	131
<b>Tabla 25</b> Asignación de Pesos Cuantitativos para cada Criterio según su Importancia Relativa.....	131
<b>Tabla 26</b> Cálculo del Puntaje Total para cada Material de las Bases Nivelantes.....	132
<b>Tabla 27</b> Orden de Prioridad de Mayor a Menor en función del Puntaje Total. ....	133
<b>Tabla 28</b> Criterios para determinar la Prioridad en el planeamiento del Diseño de Materiales. ....	133
<b>Tabla 29</b> Peso Cualitativo y Cuantitativo para la Matriz de Priorización. ....	134

<b>Tabla 30</b> Asignación de Pesos Cuantitativos para cada Criterio según su Importancia Relativa.....	135
<b>Tabla 31</b> Cálculo del Puntaje Total para cada Material de la Estructura.....	135
<b>Tabla 32</b> Orden de Prioridad de Mayor a Menor en función del Puntaje Total. ....	136
<b>Tabla 33</b> Tiempos Netos de Fabricación para cada Componente del Izador del Actuador. ....	140
<b>Tabla 34</b> Tiempos Netos de Fabricación para cada Componente.....	142
<b>Tabla 35</b> Tiempos Netos de Fabricación para la Estructura de la PCAV.....	145
<b>Tabla 36</b> Costos de Materias Primas/Insumos y Recursos de Fabricación del Componente N.º 19.....	146
<b>Tabla 37</b> Costos de la Manufactura Aditiva para los Componentes de la PCAV. ....	147
<b>Tabla 38</b> Costos Preliminar de la PCAV por Insumos, Materias Primas y el Ensamble. ....	148
<b>Tabla 39</b> Costos de los Componentes de Electrónica que se Implementan en la PCAV. ....	149
<b>Tabla 40</b> Costo Total del Prototipo de la PCAV. ....	150
<b>Tabla 41</b> Magnitud de la Aceleración que se detecta en la Estructura de la PCAV...	162
<b>Tabla 42</b> Valores de la Aceleración para la Caracterización del LRA, modelo DAEXL19SL-4.....	173
<b>Tabla 43</b> Fabricantes y Características Técnicas de 4 Actuadores Vibrotáctiles, del tipo LRA. ....	176
<b>Tabla 44</b> Función de cada componente del diseño de la PCAV.....	286
<b>Tabla 45</b> Programación de códigos G para la manufactura aditiva del izador.....	298
<b>Tabla 46</b> Programación de códigos G para la manufactura aditiva de las bases nivelantes.....	299

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Curva Sinusoidal con Frecuencia de 1 [Hz].....	4
<b>Figura 2</b> Comportamiento del Mercado de la Tecnología Háptica en el Periodo 2019 a 2032. ....	6
<b>Figura 3</b> Sensación Táctil de un Conejo Saltando.....	8
<b>Figura 4</b> Representación esquemática del Método de Renderizado para evocar a la Ilusión CR.....	9
<b>Figura 5</b> Diseño de un Actuator basado en las Fuerzas Electroestáticas y Elásticas de un Elastómero.....	11
<b>Figura 6</b> Interacción Hombre – Computador mediante una TSD. Partes del ERA. Curva de Aceleración. ....	12
<b>Figura 7</b> Ilusión Táctil de Fantasma en Movimiento empleando dos Actuadores Vibrotáctiles. ....	14
<b>Figura 8</b> Actuator Vibrotáctil de Masa Giratoria Excéntrica. Modelo 314-316. Precision Microdrivers. ....	15
<b>Figura 9</b> Vista Explosionada de un Actuator Vibrotáctil ERM sin núcleo. Precision Microdrivers Ltd.....	16
<b>Figura 10</b> Actuator de Bobina Lineal modelo LA05-15-019. Sensata Technologies. ....	19
<b>Figura 11</b> Vistas Frontal y Laterales del Actuator Lineal Modelo LA05-15-019. Sensata Technologies. ....	19
<b>Figura 12</b> Especificaciones Técnicas del Actuator Piezoeléctrico Vibrante. Modelo PA5FBP3.....	21
<b>Figura 13</b> Vista Explosionada de un Actuator Resonante Lineal. Texas Instrument Incorporated.....	22

<b>Figura 14</b> Componentes idealizados para una Plataforma que Caracteriza Actuadores Vibrotáctiles. ....	27
<b>Figura 15</b> Configuración de una Plataforma para medir la Carga de Impacto. ....	30
<b>Figura 16</b> Desplazamiento de Vibración del extremo libre de la Viga de Aleación Amortiguadora Mn-Cu. ....	31
<b>Figura 17</b> Plataforma equipada con Tecnología MEMS para medición de Vibración en Rodamientos. ....	32
<b>Figura 18</b> Precisión de los Resultados de la Medición del ADXL345 versus el Tiempo de Prueba. ....	33
<b>Figura 19</b> Set Up para medición y análisis del Espectro de Aceleración de Vibraciones en Husillo CNC. ....	34
<b>Figura 20</b> Valor total de la Aceleración de la Vibración para los tres ejes en las lecturas de un Husillo. ....	35
<b>Figura 21</b> Espectro de Aceleración de Vibraciones detectado por el MEMS ADXL345 para el eje – Y. ....	35
<b>Figura 22</b> Algoritmo de Operación del Acelerómetro ADXL345. ....	37
<b>Figura 23</b> Configuración Experimental y Hardware para Caracterizar los Estímulos Vibrotáctiles. ....	38
<b>Figura 24</b> Caracterización Multimodo de un Actuador Vibrotáctil Neumático. ....	40
<b>Figura 25</b> Medición de la Aceleración en el Dominio Temporal [ms]. ....	41
<b>Figura 26</b> Medición de la Aceleración en el Dominio de la Frecuencia [Hz]. ....	41
<b>Figura 27</b> El Montaje Experimental que se utiliza para Caracterizar a un Actuador Vibrotáctil. ....	44
<b>Figura 28</b> Muestra de la Respuesta de la Intensidad de Vibración para diferentes niveles de Voltaje. ....	45

<b>Figura 29</b> Operación de un Masetero Inteligente Controlado por varios Sensores.....	47
<b>Figura 30</b> Algoritmo de Operación de la placa ESP32 que Monitorea al Masetero Inteligente .....	48
<b>Figura 31</b> Diagrama de Interconexión del NodeMCU ESP8266 con el Acelerómetro ADXL345. ....	50
<b>Figura 32</b> Ciclo de Vida del Producto bajo las perspectivas de la Ingeniería Secuencial y Concurrente. ....	56
<b>Figura 33</b> Diagrama de Flujo del Modelo Operativo de Ingeniería Concurrente para la PCAV. ....	59
<b>Figura 34</b> Diagrama de Flujo de la Metodología para la Etapa I, que incluye el QFD. ....	60
<b>Figura 35</b> Plano Cartesiano XY respecto al cual se mide la Aceleración en el Prototipo de la PCAV.....	65
<b>Figura 36</b> Diagrama de Flujo para Análisis Experimental de la Aceleración de Vibraciones en la PCAV. ....	66
<b>Figura 37</b> Componentes Estructurales del Prototipo de la PCAV.....	67
<b>Figura 38</b> 1ª Iteración de Configuración Estructural del Prototipo: Tres Resortes Ø Exterior = 12.0 [mm].....	68
<b>Figura 39</b> 2ª Iteración de Configuración Estructural del Prototipo: Tres Resortes Ø Exterior = 10.0 [mm].....	69
<b>Figura 40</b> 3ª Iteración de Configuración Estructural del Prototipo: Tres Pernos Tipo Allen M8X70.0.....	69
<b>Figura 41</b> Arreglo Experimental para Inducir Vibraciones en la Estructura del Prototipo. ....	70
<b>Figura 42</b> Diseño de señales para el Análisis de la Aceleración. ....	71

<b>Figura 43</b> Levantamiento de Datos del ADXL345, mediante Interconexión con CoolTerm64Bit.....	73
<b>Figura 44</b> Nube de Puntos provenientes desde CoolTerm64Bit en formato «.txt», cargadas a Excel 365. ....	73
<b>Figura45</b> Aplicación del Despliegue de la Función de la Calidad para la Primera Fase del Diseño del Prototipo de la PCAV.....	77
<b>Figura 46</b> Árbol de Objetivos: Jerarquía de las Atribuciones Funcionales de ingeniería de la PCAV.....	79
<b>Figura 47</b> Caja Negra de Entradas y Salidas del Proceso de Caracterización de Actuadores Vibrotáctiles. ....	80
<b>Figura 48</b> Estructura Utilitaria de las Competencias de Procedimiento Principal y Secundarias del Prototipo de la PCAV.....	82
<b>Figura 49</b> Diagrama Funcional del Sistema que constituye al Prototipo de la PCAV. ....	83
<b>Figura 50</b> Pensamiento de Diseño que se aplica al Prototipo de la PCAV. ....	97
<b>Figura 51</b> Metodologías: Diseño de Abajo hacia Arriba. Diseño del esqueleto. Diseño Paramétrico para la Concepción del Modelo Virtual de la PCAV.....	98
<b>Figura 52</b> Iteración al Pensamiento de Diseño para Regular y Ajustar la Longitud de la Fibra de Algodón.....	100
<b>Figura 53</b> Componentes N. °1 al 3: Izador del Actuador Vibrotáctil de la PCAV.....	101
<b>Figura 54</b> Componentes N. ° 6, 18, 20, 25 28 & 29: Bases nivelantes. Elementos Unión Roscada.....	102
<b>Figura 55</b> Componente N. °19: Estructura. ....	103
<b>Figura 56</b> Representación Esquemática de la Pantalla HD44780-LCD.....	104
<b>Figura 57</b> Propuesta de Diseño Final para el Prototipo de la PCAV. ....	107

<b>Figura 58</b> Iteraciones CAD y CAE para la Propuesta de Diseño de Ingeniería del Prototipo de la PCAV.....	108
<b>Figura 59</b> Medición de Tiempos y Ensamble del Prototipo de la PCAV. Ejecución del Montaje en el Laboratorio de Manufactura de UTI – FING. ....	112
<b>Figura 60</b> Diseño de Roscas para el Prototipo de la PCAV según la normativa NTE INEN-ISO4762.....	114
<b>Figura 61</b> Simulación del Ensamble del Prototipo de la PCAV.....	117
<b>Figura 62</b> Optimización en Ingeniería del Diseño para Manufactura Aditiva de Componentes de la PCAV.....	119
<b>Figura 63</b> Impresión 3D con Fibra de Carbono del Cuadro y Manubrio de una Bicicleta.....	122
<b>Figura 64</b> Componentes para diversas aplicaciones técnicas impresos en 3D con filamento PLA. ....	123
<b>Figura 65</b> Desarrollo de Productos para Ingeniería con la Aplicación del Filamento ABS. ....	124
<b>Figura 66</b> Aplicación del Filamento TPU en la Manufactura Aditiva de un Estuche para Celular. ....	126
<b>Figura 67</b> Determinación del Tiempo Neto de Fabricación del subcomponente: Izador Vertebra (N.º 3). ....	137
<b>Figura 68</b> Determinación del Tiempo Neto de Fabricación del subcomponente: Izador Conector (N.º 2).....	138
<b>Figura 69</b> Determinación del Tiempo Neto de Fabricación del subcomponente: Izador Transversal (N.º 1).....	138
<b>Figura 70</b> Ajuste Herramienta CAM aplicada en Simulación del Proceso Productivo. Resumen Tiempos. ....	139

<b>Figura 71</b> Determinación Tiempo neto de Fabricación del Comp. N. °18: Base	
Nivelante Superior.....	140
<b>Figura 72</b> Determinación Tiempo neto de Fabricación del Comp. N. °20: Base	
Nivelante Inferior.....	141
<b>Figura 73</b> Determinación Tiempo neto Fabricación del Comp. N. °25: Elemento	
Roscado Nivelador.....	141
<b>Figura 74</b> Determinación Tiempo Neto Fabricación del Componente N. °19: Trazado en Tríplex.....	143
<b>Figura 75</b> Determinación Tiempo Neto Fabricación del Componente N. °19:	
Perforación con T.C.....	143
<b>Figura 76</b> Determinación Tiempo Neto Fabricación del Componente N. °19: Aserrado Manual.....	144
<b>Figura 77</b> Determinación Tiempo Neto Fabricación del Componente N. °19:	
Avellanado.....	144

## Índice de gráficas

<b>Gráfica 1.</b> Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g (variable dependiente) vs. el dominio del tiempo (variable independiente). Muelle de Ø exterior =12.0 [mm]. Frecuencia de la onda excitadora=100[Hz].....	152
<b>Gráfica 2.</b> Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Muelle de Ø exterior =12.0 [mm]. Frecuencia de la onda excitadora=300[Hz]. .....	153
<b>Gráfica 3.</b> Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Muelle de Ø exterior =12.0 [mm]. Frecuencia de excitación =500[Hz]. .....	154
<b>Gráfica 4.</b> Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Muelle de Ø exterior =10.0 [mm]. Frecuencia de excitación =100[Hz]. .....	156
<b>Gráfica 5.</b> Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Muelle de Ø exterior =10.0 [mm]. Frecuencia de excitación =300[Hz]. .....	157
<b>Gráfica 6.</b> Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Muelle de Ø exterior =10.0 [mm]. Frecuencia de excitación =500[Hz]. .....	158
<b>Gráfica 7.</b> Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Pernos tipo Allen inoxidable 304 M8X1.5 [mm]. Frecuencia de excitación =100[Hz].....	159
<b>Gráfica 8.</b> Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Pernos tipo Allen inoxidable 304 M8X1.5 [mm]. Frecuencia de excitación =300[Hz].....	160
<b>Gráfica 9.</b> Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Pernos tipo Allen inoxidable 304 M8X1.5 [mm]. Frecuencia de excitación =500[Hz].....	161

<b>Gráfica 10.</b> Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 40[Hz].	164
<b>Gráfica 11.</b> Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 80[Hz].	165
<b>Gráfica 12.</b> Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 100[Hz].	166
<b>Gráfica 13.</b> Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 150[Hz].	167
<b>Gráfica 14.</b> Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 200[Hz].	168
<b>Gráfica 15.</b> Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 250[Hz].	169
<b>Gráfica 16.</b> Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 300[Hz].	170
<b>Gráfica 17.</b> Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 350[Hz].	171
<b>Gráfica 18.</b> Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 400[Hz].	172
<b>Gráfica 19.</b> Curva de Caracterización del Actuador Vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4. .....	175

## Índice de ecuaciones

<b>Ecuación 1</b> Modelo Matemático de la Frecuencia.....	5
<b>Ecuación 2</b> Modelo Matemático para la Conversión de la Aceleración del ADXL345.43	
<b>Ecuación 3</b> Modelo Matemático para el Cálculo de la Eficiencia del Montaje.....	113
<b>Ecuación 4</b> Modelo Matemático para el Cálculo de la Complejidad del Conjunto. ...	115

## Índice de anexos

<b>Anexo 1.</b> Módulo ADXL345 Acelerómetro Digital.....	186
<b>Anexo 2.</b> Unida de microcontrolador en red Módulo NodeMCu v3 Lua ESP 8266. .....	222
<b>Anexo 3.</b> Ficha técnica del amplificador Fosi TDA7498E 160 [Watt]. RL = 4 [ $\Omega$ ]. .....	245
<b>Anexo 4.</b> Ficha técnica del actuador vibrotáctil DAEX19SL-4 Slimline Coin Type 19 mm Exciter 4[W] 4[ $\Omega$ ]. .....	262
<b>Anexo 5.</b> Ingeniería de programación basada en la placa ESP8266 para interactuar con el sensor acelerómetro ADXL345. ....	263
<b>Anexo 6.</b> Ficha técnica de la pantalla LCD HD44780 .....	264
<b>Anexo 7.</b> Código de programación para controlar el ADXL345 y la LCD HD44780 mediante la placa NodeMCUESP8266 .....	282
<b>Anexo 8.</b> Renderizado del diseño del prototipo de la PCV. ....	284
<b>Anexo 9.</b> Planos de la vista en explosión del prototipo de la PCAV con el listado de sus componentes. En la <b>Tabla 39</b> se detalla la función que cada componente cumple.....	285
<b>Anexo 10.</b> Planos de producción mecánicos del prototipo de plataforma para caracterización de actuadores vibrotáctiles.....	288
<b>Anexo 11.</b> Códigos G para la manufactura aditiva del componente: Izador actuador. .....	298
<b>Anexo 12.</b> Códigos G para la manufactura aditiva de las bases nivelantes. ....	299
<b>Anexo 13.</b> Representación esquemática de las conexiones entre la placa ESP8266 con el acelerómetro ADXL345 y la pantalla LCD HD44780.....	300
<b>Anexo 14.</b> Facturas de los componentes de mecatrónica de la PCAV. ....	302

**Anexo 15.** Aprobación del abstract: Departamento de Idiomas, UTI - FING. .... 304

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TEMA: DISEÑO DE UNA PLATAFORMA PARA CARACTERIZACIÓN DE  
ACTUADORES VIBROTÁCTILES**

**AUTOR:** José Roland Castillo Montoya

**TUTOR:** Byron Paúl Remache Vinuesa

### **Resumen ejecutivo**

En este trabajo de titulación se presenta el diseño e implementación de un prototipo de plataforma para la caracterización de actuadores vibrotáctiles. Esta plataforma es capaz de medir satisfactoriamente la aceleración de la vibración en el eje cartesiano “z”, cumple con requisitos de bajo costo, precisión y sostenibilidad. La caracterización de actuadores vibrotáctiles es crucial para diseñar sistemas vibratorios eficientes y precisos, especialmente en aplicaciones de interacción humano - computador. Se mide la aceleración en un actuador vibrotáctil mediante el acelerómetro ADXL345, mismo que ejecuta un análisis dinámico de alta resolución en un rango de  $\pm 2$  g a  $\pm 16$  g; y es capaz de medir sin atenuación en una banda de paso de 0.05 a 1600 [Hz]. El algoritmo de operación para este sensor lo inicializa, ajusta y mide los valores de aceleración. La materia prima para fabricar el prototipo se selecciona mediante matrices de priorización. Su costo de producción es de \$626.52, se ensambla en 36 minutos y 49 segundos. Se observa que el actuador vibrotáctil, modelo DAEXL19SL-4, con el cual se valida la funcionalidad del prototipo, alcanza su máxima eficiencia de conversión electromecánica a una frecuencia de entrada igual a 200[Hz].

*Palabras clave:* Acelerómetro, Actuador Vibrotáctil, Interacción Humano-Computador.

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**INDUSTRIAL ENGINEERING DEGREE**

**TOPIC: DESIGN OF A PLATFORM FOR CHARACTERIZING  
VIBROTACTILE ACTUATORS**

**AUTHOR:** José Roland Castillo Montoya

**TUTOR:** Byron Paúl Remache Vinueza

### **ABSTRACT**

This thesis presents the design and implementation of a prototype platform for characterizing vibrotactile actuators. This platform is capable of satisfactorily measuring vibration acceleration along the Cartesian “z” axis, meeting the requirements of low cost, accuracy, and sustainability. The characterization of vibrotactile actuators is crucial for designing efficient and accurate vibratory systems, especially in human-computer interaction applications. Acceleration is measured in a vibrotactile actuator using the ADXL345 accelerometer, which performs high-resolution dynamic analysis in a range from  $\pm 2$  g to  $\pm 16$  g and is capable of measuring without attenuation in a passband from 0.05 to 1600 [Hz]. The operating algorithm of this sensor initializes, adjusts, and measures acceleration values. The raw material for manufacturing the prototype is selected using prioritization matrices. Its production cost is \$626.52, and it is assembled in 36 minutes and 49 seconds. It is observed that the vibrotactile actuator, model DAEXL19SL-4, with which the functionality of the prototype was validated, reaches its maximum electromechanical conversion efficiency at an input frequency equal to 200 [Hz].

*Keywords:* Accelerometer, Human-Computer Interaction, Vibrotactile Actuator.

*(Anexo 15. Aprobación del abstract: Departamento de Idiomas, UTI - FING)*

## Tabla de contenido

1	DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	I
1	AUTORIZACIÓN DE REPOSITORIO LEGAL .....	II
1	APROBACIÓN DE TUTOR.....	III
1	APROBACIÓN DEL TRIBUNAL .....	IV
1	DEDICATORIA.....	V
1	AGRADECIMIENTO .....	VI
1	ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
1	ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
1	ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	XVI
1	ÍNDICE DE ECUACIONES .....	XVIII
1	ÍNDICE DE ANEXOS .....	XIX
1	RESUMEN EJECUTIVO .....	XXI
1	TABLA DE CONTENIDO .....	XXIII
1	CAPÍTULO I.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.1	Sentido del tacto.....	1
1.1.2	Frecuencia de vibración .....	2
1.1.3	Aceleración de las vibraciones.....	3
1.1.4	Modelo matemático de la frecuencia .....	4
1.1.5	Mercado de tecnología háptica.....	5
1.1.6	Interfaces vibrotáctiles .....	9

<b>1.2</b>	<b>ACTUADORES VIBROTÁCTILES.....</b>	<b>14</b>
1.2.1	<b>Tipo de actuador vibrotáctil N. °1: Motor de masa excéntrica rotatoria.....</b>	<b>14</b>
1.2.2	<b>Tipo de actuador vibrotáctil N°.2: Actuador de bobina móvil (VCA, por sus siglas en inglés). .....</b>	<b>18</b>
1.2.3	<b>Tipo de actuador vibrotáctil N°.3: Actuador piezoeléctrico.....</b>	<b>20</b>
1.2.4	<b>Tipo de actuador vibrotáctil N°.4: Actuador por resonancia lineal (LRA, por sus siglas en inglés). .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE ACTUADORES VIBROTÁCTILES.....</b>	<b>25</b>
<b>1.4</b>	<b>PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>26</b>
<b>1.5</b>	<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>29</b>
<b>1.6</b>	<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>52</b>
<b>1.7</b>	<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>54</b>
1.7.1	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>54</b>
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>55</b>
2.1	<b>INGENIERÍA DEL PROYECTO.....</b>	<b>55</b>
2.1.1	<b>Área de estudio .....</b>	<b>55</b>
2.1.2	<b>Modelo operativo .....</b>	<b>55</b>
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>60</b>
3.1	<b>PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA.....</b>	<b>60</b>
3.1.1	<b>Metodología para la etapa I con el despliegue de la función de la calidad</b>	<b>60</b>
3.1.2	<b>Metodología de la etapa II para la selección de la mejor alternativa</b>	<b>62</b>
3.1.3	<b>Metodología para la etapa III: DFMA mediante Boothroyd &amp; Dewhurst .....</b>	<b>62</b>

3.1.4	<b>Metodología para la validación de la estructura del prototipo .....</b>	63
3.2	<b>RESULTADOS ESPERADOS.....</b>	74
3.2.1	<b>Resultados de la etapa I, alcanzados mediante el QFD.....</b>	74
3.2.2	<b>Resultados de la etapa II para la selección de la mejor alternativa...</b>	90
3.2.3	<b>Resultados etapa III: Aplicación metodología Boothroyd &amp; Dewhurst</b>	
	98	
3.2.4	<b>Resultados del experimento para validar a la PCAV.....</b>	151
3.2.5	<b>Resultados de la Caracterización del Actuador Vibrotáctil LRA,</b>	
	<b>modelo DAEX19SL-4.....</b>	164
4	<b>CAPÍTULO IV .....</b>	178
4.1	<b>CONCLUSIONES.....</b>	178
4.2	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	180
1	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	182
5	<b>ANEXOS .....</b>	186

## Capítulo I

### 1.1 Introducción

#### 1.1.1 *Sentido del tacto*

Para percibir e interactuar con el entorno los seres humanos empleamos los sentidos, por ejemplo, al sostener una taza con café caliente, el sentido del tacto que reside en la piel de la mano nos ayuda a evaluar la presión que se aplica para sujetarla de manera segura, y que no caiga. Al mismo tiempo percibimos con los labios cuan caliente está el café y si su temperatura es excesiva no lo bebemos.

Con respecto a la interacción con la tecnología, un ejemplo claro es la transmisión de información desde un teléfono celular, una tablet o un reloj inteligente por medio de vibraciones. Esto nos permite saber que hay una llamada, correo, o un mensaje entrante sin necesidad de escuchar un sonido de notificación o de mirar el dispositivo.

El sentido del tacto se encuentra en la piel, y esta es a su vez el órgano de mayor tamaño en el cuerpo humano. La piel a través de sus receptores nos permite sentir diversas sensaciones como la presión, la temperatura o la vibración. Nuestra piel juega un papel esencial en cómo experimentamos el mundo a través del sentido del tacto. Es como un raudo mensajero que envía información sobre las sensaciones o percepciones táctiles directamente a nuestro sistema nervioso (Enciclopedia Humanidades, 2024).

Las vibraciones detectadas por la piel humana tienen umbrales de percepción táctil con un límite inferior tan bajo como 0.3 [Hz] y un límite superior máximo de 1000 [Hz]. La apreciación óptima de estas frecuencias de vibración fluctúa en función de la región corporal en donde se aplican (Remache-Vinueza B. et al., 2021), o de la capacidad de

percepción de cada usuario; lo que provoca que exista un rango de sensibilidad táctil que puede diferir de persona a persona (Yeganeh et al., 2023).

Se han realizado estudios comparativos de los umbrales de susceptibilidad táctil en el abdomen, el antebrazo, y la punta del dedo; revelando que esta última tiene una mayor sensibilidad, que es de aproximadamente 0.05 fuerzas - g (Mason et al., 2020), por lo cual puede percibir estímulos de menor intensidad con mayor eficiencia. Esto representa un menor consumo de energía para que la yema del dedo detecte estímulos vibrotáctiles. Los investigadores proponen que la frecuencia de 250 [Hz] es la mejor percibida por el sentido del tacto (Remache-Vinueza et al., 2021).

### **1.1.2 Frecuencia de vibración**

La frecuencia de vibración es una característica técnica en los actuadores vibrotáctiles, en el SI se mide en [Hz]. Representa el número de veces que se completa un ciclo de una onda excitadora, medida contra una unidad de tiempo (Rosales, 2023).

La forma de percibir a las frecuencias de vibración que genera un actuador vibrotáctil varía en función de la magnitud que estas poseen, y ciertas magnitudes pueden ser más notables para la piel humana que otras (Yeganeh et al., 2023).

El rango de frecuencias de vibración de entre 20 a 400 [Hz] es principalmente distinguido por la piel humana, con el sentido del tacto, mediante dos clases de mecanorreceptores cutáneos fundamentales para la comprensión sensorial vibrotáctil (Kenhub, 2023).

El primer mecanorreceptor es el Corpúsculo de Meissner que transmite percepciones de tacto ligero y vibraciones en baja frecuencia. El segundo es el Corpúsculo de Pacini que es sensible a las vibraciones de alta frecuencia (Caroline et al., 2014).

La localización corporal, rango de frecuencia, función y adaptabilidad de los mecanorreceptores responsables de la comprensión sensorial vibrotáctil que tiene el sentido del tacto están detallados en la **Tabla 1**.

**Tabla 1**

*Mecanorreceptores y Frecuencias de Percepción de Corpúsculos en la Piel Humana.*

<b>Tipo de receptor encapsulado</b>	<b>Localización y Frecuencia</b>	<b>Función</b>	<b>Adaptabilidad</b>
<b>Corpúsculo de Meissner</b>	Piel Glabra. 20 a 50 [Hz]	Tacto y posición	Rápida/Lenta
<b>Corpúsculo de Pacini</b>	Tejido Subcutáneo, membranas interóseas y Visceras. 60 a 400 [Hz]	Presión profunda, vibraciones rápidas	Rápida
<b>Discos de Merkel</b>	Superficial y en el folículo piloso 5 a 15 [Hz]	Presión sostenida, textura	Lenta

*Nota.* Adaptado de *Fisiología de la vibración* (p.165), por (Malamud-Kessler et al., 2014), Revista Mexicana de Neurociencia. Laboratorio de Neurofisiología Clínica.

### **1.1.3 Aceleración de las vibraciones**

A la aceleración de la vibración se la define como la rapidez con la que cambia una onda excitadora, medida contra una unidad de tiempo. Se expresa en metros por segundo al cuadrado  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ . Por ejemplo: Una tasa de cambio en la aceleración igual a un metro por segundo al cuadrado implica que las oscilaciones se modifican en un metro

por segundo, durante cada segundo que está en funcionamiento un actuador vibrotáctil (Bureau International des Poids et Mesures, 2024).

La forma en que la piel percibe la aceleración de una onda excitadoras puede ser influenciada por la magnitud que se transfiere al usuario de un actuador vibrotáctil (García-Valle, 2020).

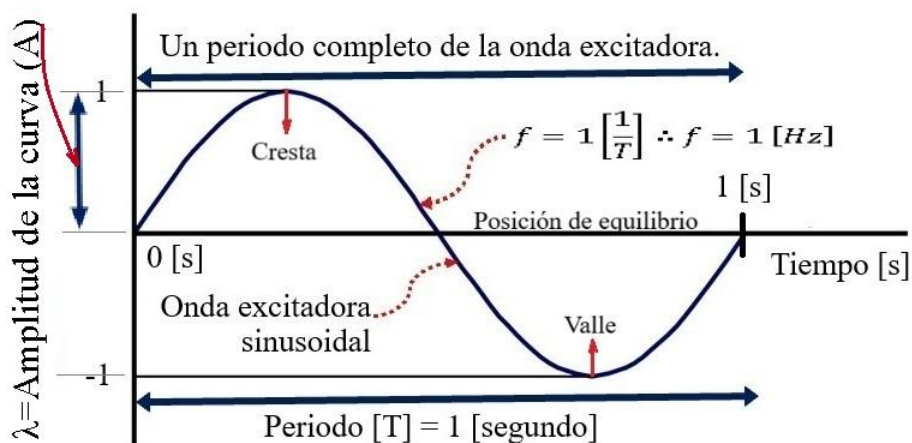
En el movimiento oscilatorio la aceleración es una cantidad vectorial que siempre apunta hacia el punto de equilibrio. Su valor es directamente proporcional a la distancia desde el punto de equilibrio y cambia de dirección cuando el objeto cruza dicho punto de equilibrio. Esto implica que la aceleración alcanza su valor máximo en los extremos del movimiento (donde la velocidad es nula); y es mínima, es decir cero, en el punto de equilibrio (cuando la velocidad es máxima) (studocu, 2024).

#### 1.1.4 Modelo matemático de la frecuencia

En la **Figura 1** se ilustra una curva sinusoidal con una *frecuencia* = 1 [Hz]. El modelo matemático de esta curva está definido por la **Ecuación 1**. Su amplitud se determina al dividir entre dos, a la distancia vertical entre la cresta y el valle. Este valor indica la altura máxima de la onda desde su posición de equilibrio. (LibreTexts, 2022).

**Figura 1**

*Curva Sinusoidal con Frecuencia de 1 [Hz].*



**Ecuación 1** *Modelo Matemático de la Frecuencia.*

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

En donde:  $f$  = frecuencia [Hz].

$T$  = periodo [s].

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Esta relación matemática directa implica también que la frecuencia es el inverso del periodo, o, en otros términos, indica el número de ciclos medidos por unidad de tiempo.

### **1.1.5 Mercado de tecnología háptica**

Actualmente las aplicaciones que implementan estímulos vibrotáctiles se agrupan, pero no se limitan a las siguientes: Realidad extendida, inmersiva e interactiva, entretenimiento, la industria automotriz o la simulación en medicina de la textura de tejidos y representación realista de intervenciones quirúrgicas en humanos, entre otras.

En 2022 el mercado mundial de tecnología háptica logró un valor de \$2.900 millones de dólares estadounidenses, y se prevé que crezca a un ritmo anual compuesto del 12,0% (Emergen Research, 2024).

El crecimiento sostenido en los ingresos del mercado háptico se debe en gran medida a la incorporación cada vez mayor de esta tecnología en dispositivos de consumo masivo.

El uso de tecnologías táctiles y de detección de dedos en dispositivos electrónicos de consumo colectivo ofrece una ventaja significativa, ya que proporciona

retroalimentación contextual al identificar el lugar exacto donde un dedo toca una superficie (Emergen Research, 2024).

La funcionalidad de retroalimentación contextual permite nuevas experiencias táctiles, ofreciendo a los usuarios retroalimentación significativa en aplicaciones como controles de juegos en tiempo real y teclados sensibles al tacto.

Para los fabricantes de dichos dispositivos electrónicos, esta tecnología representa nuevas oportunidades en el diseño de productos. En la **Figura 2** se observa el comportamiento del mercado de la tecnología háptica en el periodo de pronóstico de 2019 a 2032 (Emergen Research, 2024).

**Figura 2**

*Comportamiento del Mercado de la Tecnología Háptica en el Periodo 2019 a 2032.*



*Nota. Adaptado de Mercado de tecnología háptica, por tipo de dispositivo (hápticos activos y hápticos pasivos), por tipo de tecnología de pantalla táctil (capacitiva, resistiva, otros), por componente, por tipo de retroalimentación, por aplicación y por región prevista para 2032 (p. 14), por (Emergen Research, 2024),*

Se anticipa también que el mercado europeo experimente un crecimiento sostenido en sus ingresos durante el mismo periodo de pronóstico de 2019 al 2032, lo cual se debe a la intensificación de las actividades de los actores clave del mercado en los países de esa región (Emergen Research, 2024).

Una forma eficiente de transmitir información por medio de vibraciones es el uso de ilusiones táctiles. Una ilusión táctil es análoga a una ilusión óptica y consiste en la discrepancia entre el estímulo físico y qué es lo que se percibe o se procesa en el cerebro. Las ilusiones de tipo espacio – temporal permiten transmitir información de ubicación, movimiento y dirección.

Una ilusión táctil que se aplica en la producción de controladores como el DualSense, desarrollado por la empresa global PlayStation, está diseñada para proporcionar estimulación vibrotáctil; con lo que se logra hacer a sus videojuegos más inmersivos (Remache-Vinueza . et al., 2024).

Los controladores como el DualSense de Play Station, o el ecosistema háptico: HyperSense de Razer; emplean la ilusión táctil del conejo cutáneo (CR, por sus siglas en inglés), que representa a un conejo saltando (Remache-Vinueza, Trujillo-Leon, et al., 2024).

La ilusión táctil del conejo cutáneo se representa en la **Figura 3**.

### Figura 3

*Sensación Táctil de un Conejo Saltando.*



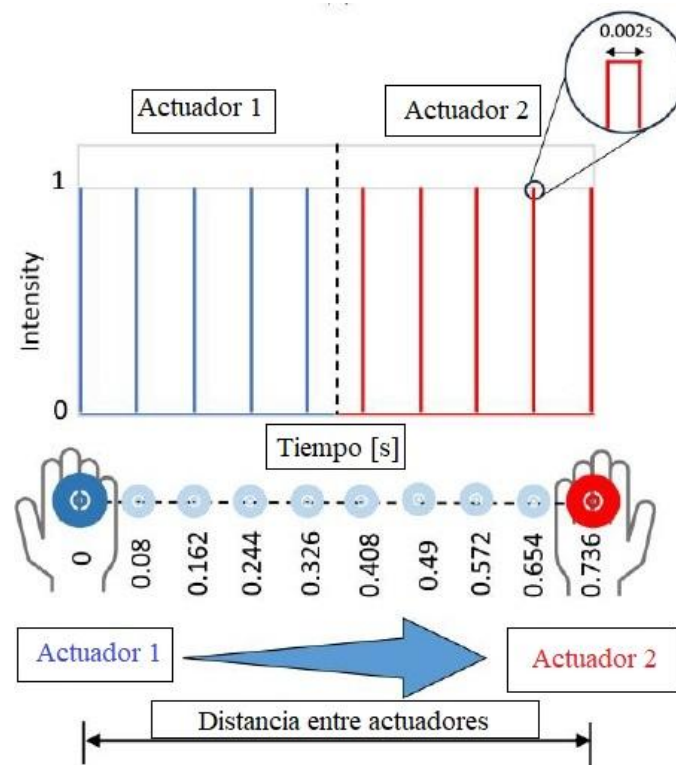
*Nota.* Adaptado de *Una investigación comparativa de ilusiones táctiles cutáneas de conejo y de canalización para su implementación en pantallas vibrotáctiles*, (p. 87300 de 87308), por (Remache-Vinueza, Trujillo-Leon, et al., 2024), Revista IEEEAccess.

Para lograr la sensación táctil de un conejo saltando se aplican dos métodos. El primero consiste en emplear diez actuadores vibrotáctiles reales que se activan secuencialmente para recrear la percepción de los saltos sobre la piel. El segundo método crea actuadores vibrotáctiles virtuales mediante la ilusión CR, reduciendo drásticamente la cantidad de actuadores vibrotáctiles reales; a únicamente dos (Remache-Vinueza, Trujillo-Leon, et al., 2024).

La ilusión CR se produce cuando se sujetan con las manos a dos actuadores vibrotáctiles (uno en cada mano), según lo indica esquemáticamente la **Figura 4**. Esta ilusión táctil está constituida por diez saltos, que se dan fuera del cuerpo, específicamente, en el aire que separa a las manos.

**Figura 4**

*Representación esquemática del Método de Renderizado para evocar a la Ilusión CR.*



Tanto la mano izquierda como la derecha en la **Figura 4** reciben cinco impulsos cortos que se inducen con los dos actuadores vibrotáctiles, a intervalos de tiempo regulares. La sensación que se genera es la de un punto que brinca progresivamente entre los dos actuadores reales que el usuario está sujetando (Remache-Vinueza, Trujillo-Leon, et al., 2024).

### **1.1.6 Interfaces vibrotáctiles**

Así como la percepción táctil trabaja en situaciones cotidianas, como lo es en el caso que se explica con la taza de café, también se puede aprovechar esta capacidad sensorial para comunicar información detallada a un usuario. Esto se puede lograr con artefactos electrónicos portátiles denominados actuadores vibrotáctiles (Li et al., 2023).

Los actuadores vibrotáctiles se ensamblan en interfaces vibrotáctiles que son sistemas concebidos para brindar retroalimentación táctil usando vibraciones

(P. Vimal, 2024).

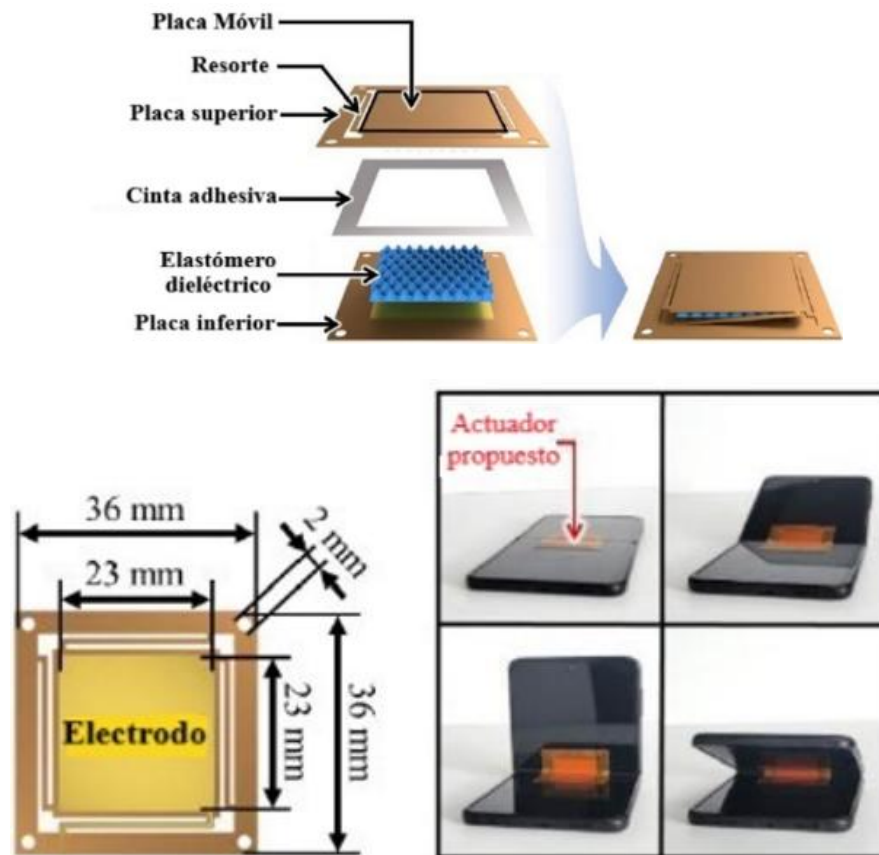
Un ejemplo de la capacidad que tienen las interfaces vibrotáctiles para estimular la percepción táctil humana se detalla en un estudio sobre un actuador vibrotáctil flexible que está fundamentado en un elastómero dieléctrico-mecánico diseñado para ser integrado en dispositivos portátiles inteligentes. Puede simular sensaciones vibrotáctiles con un tiempo de respuesta de 18 [ms], convirtiéndolo en una herramienta potencialmente revolucionaria en la relación entre el hombre y el computador, al momento de aplicar retroalimentación vibrotáctil (Heo et al., 2021).

En la parte superior de la **Figura 5** se observa la estructura de este actuador vibrotáctil flexible y en la parte inferior sus dimensiones e instalación en un dispositivo portátil.

Las placas superior e inferior tienen un espesor de 100 [ $\mu\text{m}$ ], mientras que el elastómero dieléctrico-mecánico tiene un espesor de 450 [ $\mu\text{m}$ ].

**Figura 5**

*Diseño de un Actuador basado en las Fuerzas Electroestáticas y Elásticas de un Elastómero.*



*Nota.* Adaptado de *Actuador vibrotáctil flexible basado en Elastómero dieléctrico para dispositivos portátiles inteligentes* (p. 3 de 12), por (Heo et al., 2021), Revista de Ciencias Aplicadas.

En otro estudio, investigadores diseñaron una pantalla táctil de un tamaño mayor a 12 [pulgadas]. La investigación busca mejorar la experiencia del usuario que utiliza sus cinco sentidos para interactuar con la interfaz en pantalla; o para transmitir información a personas con discapacidad visual, haciendo que los recursos informáticos sean más accesibles para las personas que tienen dificultades con los métodos de entrada típicos, como teclados o ratones (Mason et al., 2020).

En la parte superior de la **Figura 6** se observa un sistema que consta de múltiples actuadores resonantes electrostáticos (ERA, por sus siglas en inglés) acompañados de una masa en movimiento y operados mediante un controlador personalizado.

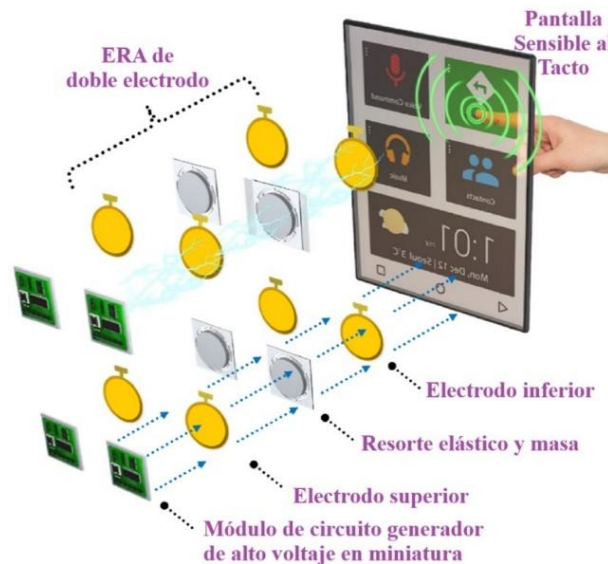
Los ERA están instalados en una pantalla sensible al tacto (TSD, por sus siglas en inglés) de gran tamaño. En la mitad de la misma **Figura 6** se observan las partes y dimensiones del ERA que consta de un electrodo dual que tiene el potencial de producir vibraciones en el área íntegra de la pantalla.

En la parte inferior de la **Figura 6** se aprecia la curva de caracterización del ERA, misma que se determinada experimentalmente utilizando acelerómetros. Mediante la lectura de esta curva de caracterización se puede concluir que un ERA es capaz de proporcionar una retroalimentación de vibración con un pico máximo de

14.32 *fuerzas – g*<sup>1</sup>  $\approx 140.431 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  y con ello sensaciones hápticas suficientemente fuertes (Mason et al., 2020).

**Figura 6**

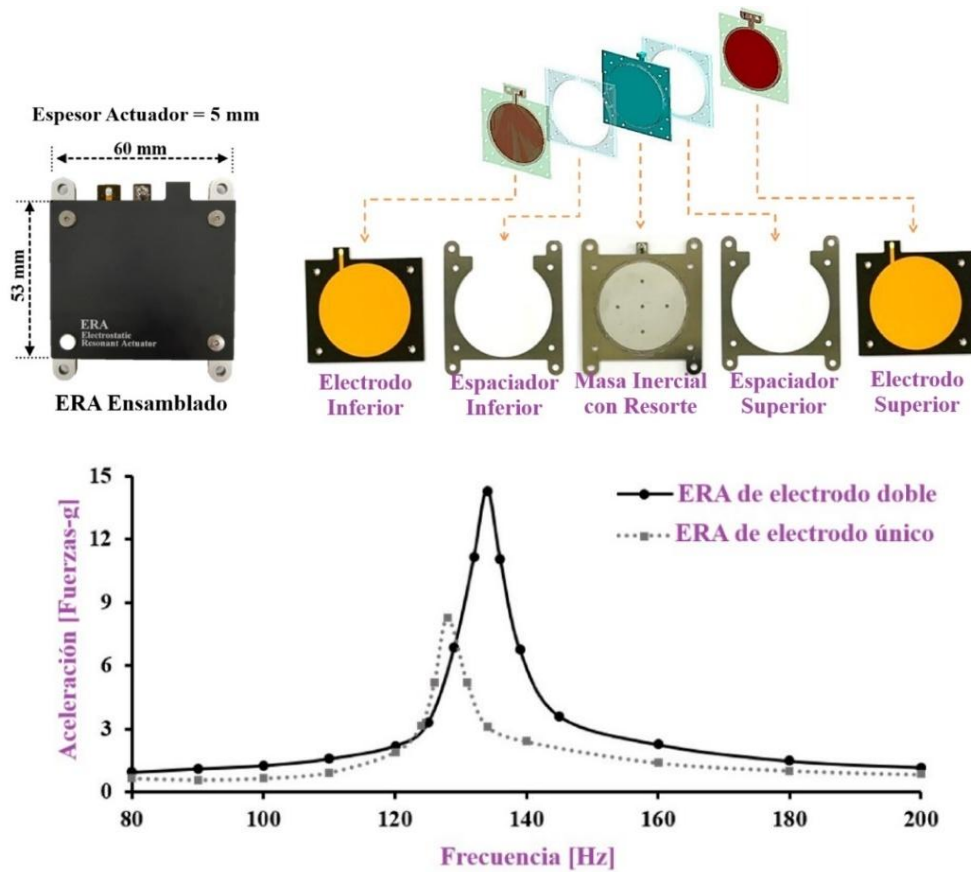
*Interacción Hombre – Computador mediante una TSD. Partes del ERA. Curva de Aceleración.*



<sup>1</sup> La fuerza-g es una medida de la fuerza de atracción que un objeto experimenta debido a la aceleración que genera la fuerza de la gravedad en el planeta tierra. La aceleración que genera la fuerza de la gravedad es constante.

La fuerza-g más familiar es la de 1 fuerza-g, que corresponde a la aceleración que se experimenta en la superficie terrestre al nivel del mar 0.000 [msnm].

El valor de la gravedad terrestre estándar es igual a  $9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ . En el espacio exterior un objeto experimenta 0 fuerzas-g, debido a la ausencia de la gravedad (Fernández y otros, 2016) .



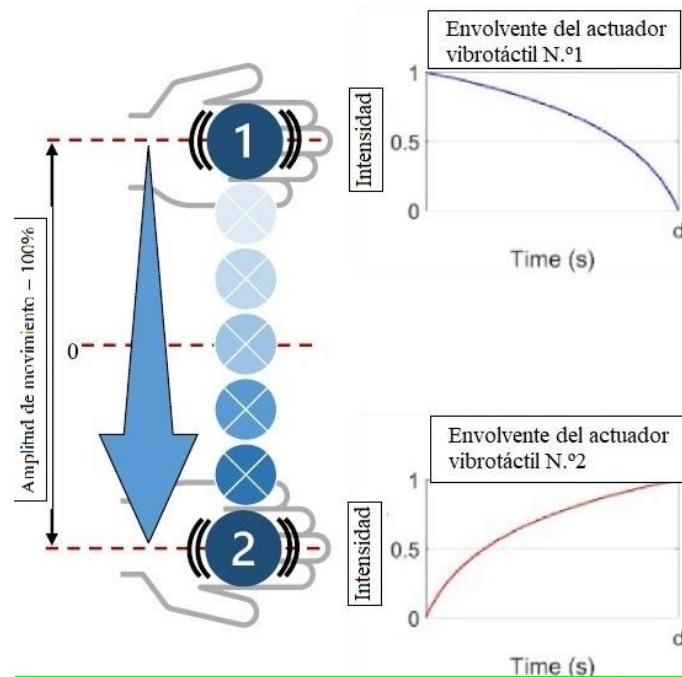
Nota. Adaptado de *Evaluación experimental del efecto de la configuración de electrodos en actuadores electrostáticos para aumentar la intensidad de la retroalimentación vibrotáctil* (p. 11, 09 y 06), por (Mason et al., 2020), Revista: Ciencias Aplicadas.

Las ilusiones táctiles transmiten información esencial mediante una pequeña cantidad de actuadores vibrotáctiles, lo cual contribuye a que los investigadores puedan optimizar la resolución en sus diseños y crear interfaces vibrotáctiles relativamente compactas (Remache-Vinueza, Trujillo-León, et al., 2024).

En los diseños que desarrollan los ingenieros se puede implementar la percepción de una ilusión táctil de fantasma en movimiento como se ilustra en la **Figura 7**.

**Figura 7**

*Ilusión Táctil de Fantasma en Movimiento empleando dos Actuadores Vibrotáctiles.*



*Nota.* Adaptado de *Sensación fantasma: Indicadores de umbral y calidad de una ilusión táctil de movimiento*, (p. 2), por (Remache-Vinueza, Trujillo-León, et al., 2024), Revista Displays.

En los experimentos llevados a cabo en un estudio que busca mejorar la audición en personas sordociegas o con visión limitada, se reproducen archivos hápticos, o archivos de estéreo unificados sobre la piel desnuda del brazo. Para esto se emplean actuadores vibrotáctiles que transforman la esencia del sonido en una experiencia vibrotáctil basada en sensaciones de tipo ilusorio. Este es un método que se emplea para percibir elementos musicales mediante el sentido del tacto (Jadán et al., 2024).

## 1.2 Actuadores vibrotáctiles

### 1.2.1 Tipo de actuador vibrotáctil N.º1: Motor de masa excéntrica rotatoria

El actuador vibrotáctil de masa excéntrica rotatoria (ERM, por sus siglas en inglés) se usa con regularidad por su versatilidad ya que puede producir un espectro de

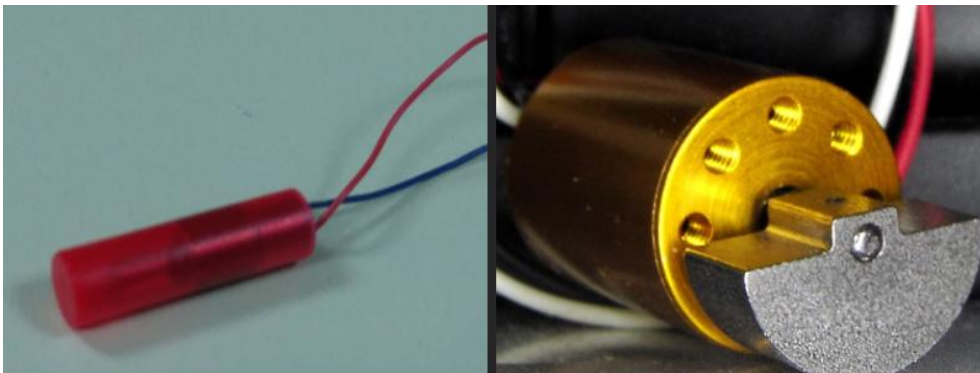
patrones vibratorios perceptibles por la piel humana desde 80 a 330 [Hz] (García-Valle, 2020) .

El ERM se puede hallar en una variedad de aplicaciones, instalándose en teléfonos móviles y trabajando adecuadamente en interfaces hápticas (García-Valle, 2020).

En la **Figura 8** se observan: A la izquierda un ERM comercial y a la derecha su masa excéntrica en color plata-mate, misma que al rotar genera las vibraciones. La frecuencia de vibración del ERM se ajusta cambiando su velocidad de rotación (Precision Microdrivers, 2021).

### **Figura 8**

*Actuador Vibrotáctil de Masa Giratoria Excéntrica. Modelo 314-316. Precision Microdrivers.*

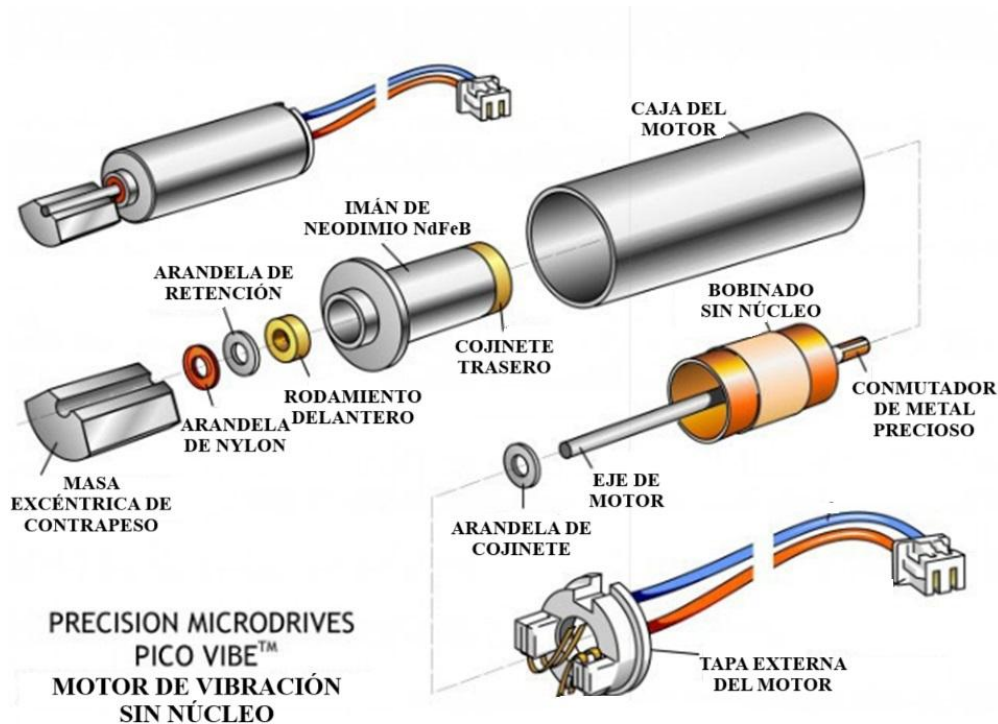


*Nota. Adaptado de Caracterización del diseño y aplicación de Sistema de Interacción Háptica Multimodal para el torso en entornos virtuales (p. 72), por (García-Valle, 2020), Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.*

En la **Figura 9** se observa una vista explosionada de los componentes de un ERM.

**Figura 9**

*Vista Explosionada de un Actuador Vibrotáctil ERM sin núcleo. Precision Microdrivers Ltd.*



*Nota.* Adaptado de (Precision Microdrivers, 2021).

Los principales componentes de un actuador tipo ERM son:

- Imán de Neodimio ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) o imán permanente, que se encarga de generar un campo magnético constante. Son los más potentes disponibles comercialmente y pueden producir campos magnéticos intensos (Innovatec , 2024). La intensidad del campo magnético en la superficie de un imán de Neodimio de grado N42 es de aproximadamente  $0.33 \text{ [Teslas]}^2 = 3300 \text{ [Gauss]}$  (La web de Física, 2023).
- Bobina sin núcleo o bobina con núcleo de aire, en la cual, al aplicarle corriente eléctrica se genera un campo magnético variable (Ingeniería Mecafenix, 2024).

---

<sup>2</sup> El Tesla, es la unidad de medida estándar para la intensidad del campo magnético en el Sistema Internacional de Unidades (SI), es una unidad derivada que se define como  $1 \text{ T} = 1 \text{ [(Wb)(m}^{-2}\text{)]} = 1 \text{ [(kg)(s}^{-2}\text{)(A}^{-1}\text{)]}$ . Aunque el [Tesla] es una unidad de gran magnitud para medir la intensidad del campo magnético, en la práctica, se suelen utilizar unidades más pequeñas como el [Gauss], donde  $1 \text{ [Tesla]} \text{ equivale a } 10000 \text{ [Gauss]}$  (Electricity - Magnetism, 2024).

Cuando interactúa con el campo magnético permanente del imán se genera una fuerza magnética resultante que propicia la fuerza centrípeta para inducir e iniciar un movimiento circular uniforme (MCU) (openstax, 2024).

Se dice que el ERM posee MCU en su árbol rotatorio dado que cuando entra en funcionamiento su masa excéntrica rota a una velocidad angular constante, lo que implica que la velocidad de la masa (y consecuentemente la frecuencia de las vibraciones que genera) permanece inalterada a lo largo del tiempo (Progresive Automations, 2024).

- Masa excéntrica o masa giratoria, es un peso metálico unido al eje del motor o árbol rotatorio. Es responsable de provocar el movimiento oscilatorio. Este desplazamiento excéntrico produce las vibraciones requeridas para que el actuador vibrotáctil funcione (Precision Microdrivers TM, 2021).
- El conmutador de metal precioso o contacto de metal precioso es un interruptor eléctrico que emplea materiales altamente conductores como el Paladio, el Oro o la Plata en sus contactos, que son los encargados de activar o desactivar al motor (Precision Microdrivers TM, 2021).
- Rodamientos posterior y delantero, están instalados en los puntos de apoyo del eje o árbol giratorio, teniendo la función principal de reducir la fricción y soportar cargas (radiales y axiales), permitiendo que el giro de la masa excéntrica rotatoria sea suave y eficiente (Bdi Express, 2024).
- Arandelas de retención o arandelas de bloqueo, se utilizan para mantener firmemente en su lugar a los rodamientos del ERM, garantizando una operación segura al prevenir deslizamientos no deseados, por las mismas vibraciones generadas por este actuador vibrotáctil (Essentra Components, 2024).

Ventajas de utilizar el ERM (ineedmotors, 2024):

- 1) Fácil de implementar y utilizar.
- 2) Los actuadores ERM son económicamente ventajosos debido a su diseño simple y el uso de componentes estándar, lo que reduce sus costos de fabricación (Precision Microdrivers, 2024).
- 3) Comúnmente se utiliza en la industria, lo que facilita su adquisición y soporte.

Desventajas del uso de un ERM (ineedmotors, 2024):

- 1) La calidad y precisión de las vibraciones pueden ser inferiores en comparación con otros tipos de actuadores vibrotáctiles.
- 2) Puede consumir más energía en comparación con sus competidores.

### **1.2.2 Tipo de actuador vibrotáctil N°.2: Actuador de bobina móvil (VCA, por sus siglas en inglés).**

Este tipo de actuador vibrotáctil se implementa en aplicaciones que necesitan una transmisión precisa de señales vibratorias hacia el ser humano (Yeganeh et al., 2023). En la **Figura 10** se observa un actuador de bobina lineal caracterizado por una operación de accionamiento directo sin retroceso lo que permite un movimiento exacto y una aceleración elevada (Linear Motion, 2024).

## Figura 10

Actuador de Bobina Lineal modelo LA05-15-019. Sensata Technologies.

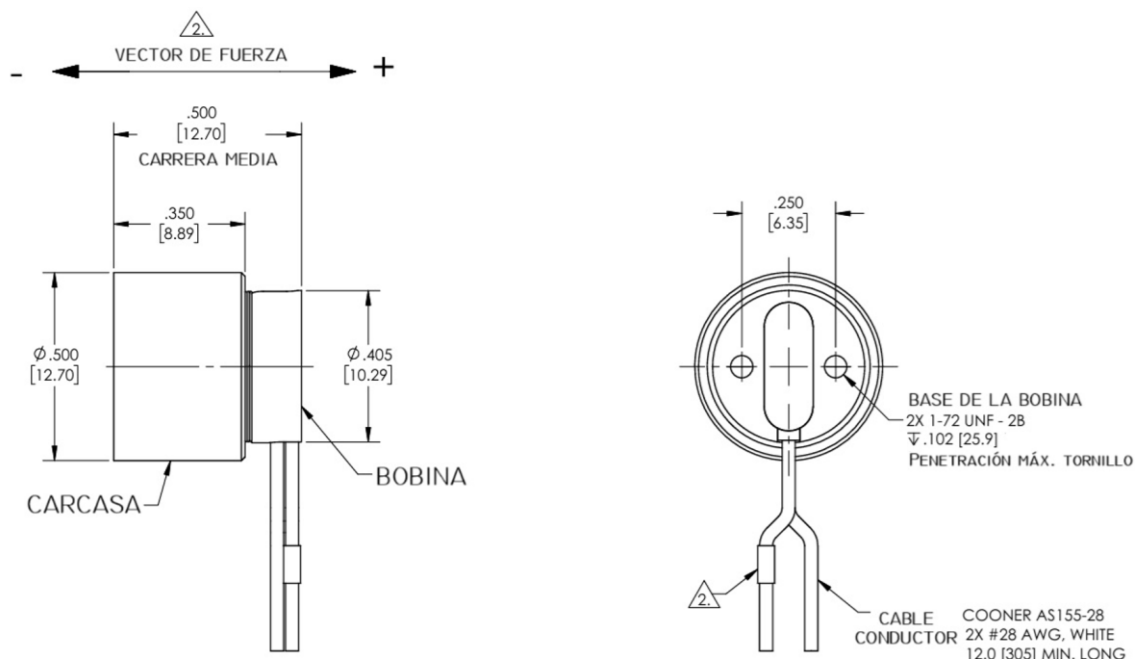


Nota. Adaptado de (Sensata Technologies, 2024).

En la **Figura 11** se observa el diseño de este VCA desarrollado por la empresa Sensata Technologies. Se ven sus dimensiones, la dirección del vector desplazamiento con un valor máximo de 0.82 [N], carrera media de  $\pm 0.508$  [mm] y una aceleración teórica de  $440.9 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  (Sensata Technologies, 2024).

## Figura 11

Vistas Frontal y Laterales del Actuador Lineal Modelo LA05-15-019. Sensata Technologies.



Similar al ERM la frecuencia de vibración del VCA se regula modificando la intensidad de la corriente eléctrica que se le suministra. (Yeganeh et al., 2023).

Ventajas de emplear VCA's:

- 1) Genera movimientos rápidos y precisos (Electricidad - Magnetismo, 2024).
- 2) Los actuadores equipados con tecnología VCA tienen la capacidad de soportar miles de millones de ciclos de operación y están fabricados con imanes de tierras raras de alta eficiencia energética (Sensata Technologies, Inc, 2018).

Desventajas para la implementación del VCA (Electricidad - Magnetismo, 2024):

- 1) Puede ser más costoso que otros tipos de actuadores.
- 2) Requiere mantenimiento regular y cuidadoso para asegurar rendimiento óptimo.

### **1.2.3 Tipo de actuador vibrotáctil N°.3: Actuador piezoeléctrico.**

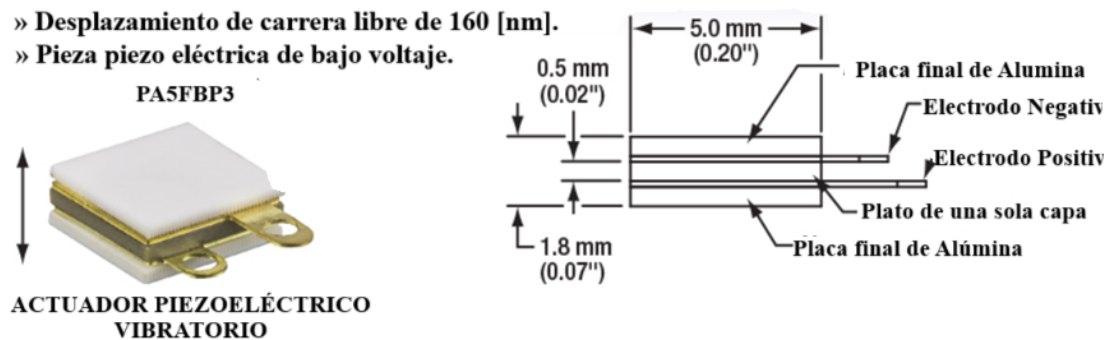
El actuador vibrotáctil piezoeléctrico es una solución para proyectos que trabajan con vibraciones de alta frecuencia. Supera al ERM y VCA por su adecuación en sistemas que requieren una discriminación precisa de vibraciones. La aceleración de las vibraciones se calibra modificando la intensidad de la corriente eléctrica aplicada (Yeganeh et al., 2023).

Este actuador vibrotáctil opera gracias a la propiedad piezoeléctrica del material que lo compone. Cuando se aplica una tensión eléctrica el material piezoeléctrico se deforma mecánicamente de manera lineal o torsional según su diseño (electrositio, 2024).

En la **Figura 12** se observan las dimensiones, dirección del vector desplazamiento, carrera libre de  $160 \text{ [nm]} = 0.16 \text{ [}\mu\text{m]}$  y partes que lo componen.

## Figura 12

Especificaciones Técnicas del Actuador Piezoeléctrico Vibrante. Modelo PA5FBP3.



Nota. Adaptado de (Thor Labs, Inc., 2024).

Ventajas de la utilización del actuador piezoeléctrico:

- 1) Destaca por su diseño simple y confiable con pocas partes móviles, ofrecen precisión a nivel submicrométrico o nanométrico de entre 35 y 65 [ $\mu\text{m}$ ] y son energéticamente eficientes (DigiKey, 2024).
- 2) El dispositivo alcanza una aceleración máxima de 30 *fuerzas* –  $g \approx 294.198 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$  en tan solo 1 [ms]. Su capacidad para operar en un espectro de frecuencia de 1 a 1000 [Hz] facilita a los ingenieros la creación de perfiles personalizados de retroalimentación vibrotáctil de alta resolución (DigiKey, 2024).

Desventajas del actuador piezoeléctrico:

- 1) Pueden verse afectados por las variaciones de temperatura y humedad. Estos cambios pueden alterar su precisión lo que los hace menos fiables en condiciones extremas de temperatura (Roborevolucion, 2024).
- 2) Uno de los materiales piezoeléctricos más comunes como el Cuarzo tienen un límite de temperatura de alrededor de 200 [°C] (Hottinger Brüel & Kjaer, 2024).

#### 1.2.4 Tipo de actuador vibrotáctil N°4: Actuador por resonancia lineal (LRA, por sus siglas en inglés).

Esta clase de actuador vibrotáctil emplea al electromagnetismo como fuerza motriz. Esto se logra induciendo un voltaje de corriente continua (CC) a través del conductor que configura a su bobina de voz (Texas Instruments Incorporated, 2023).

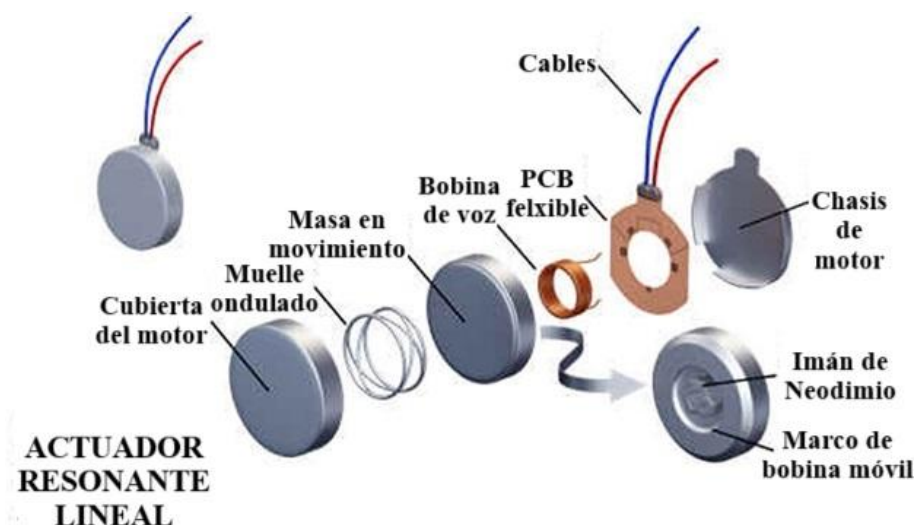
Para transformar la corriente eléctrica que se suministra al LRA en un movimiento mecánico regulado se utiliza la fuerza proveniente de la interacción entre los campos magnéticos de la bobina de voz y del imán permanente (Visual Core, 2023).

La fuerza que proviene de los campos magnéticos se transmite a través del marco de la bobina móvil y el muelle ondulado, causando que el actuador vibre con movimientos oscilatorios en torno a un punto de equilibrio, que es la ubicación de la masa móvil, antes de aplicarle el voltaje de excitación de CC (oposinet, 2022).

En la **Figura 13** se observa la vista explosionada de las partes características del LRA, luego se define la interacción y operación en conjunto de sus principales componentes.

**Figura 13**

*Vista Explosionada de un Actuador Resonante Lineal. Texas Instrument Incorporated.*



*Nota.* Adaptado de (Texas Instruments Incorporated, 2023).

Los principales componentes de un actuador vibrotáctil tipo LRA son:

- El chasis del motor, que es la estructura base del actuador vibrotáctil. Les proporciona soporte y estabilidad a sus componentes internos. Se fabrica con materiales robustos y duraderos, como metales o plásticos de alta resistencia (Urany, 2023).
- La PCB flexible o circuito impreso flexible es quien regula la corriente eléctrica enviada a la bobina de voz. Su diseño flexible permite que se adapte a la forma del actuador (ineedmotors, 2020).
- La bobina de voz es el componente que recibe la corriente eléctrica regulada de la PCB. Al pasar la corriente eléctrica a través de la bobina se genera un campo magnético variable, que interactúa con el campo magnético permanente del imán de Neodimio ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) (similar a como opera el ERM) (Cooper, 2024).
- El marco de bobina móvil sirve de soporte para la bobina de voz que se mueve en respuesta a la interacción electromagnética que tiene con el imán permanente. Puede estar fabricado con un material ligero pero resistente, como el Aluminio (Smac, 2018).
- La masa en movimiento se convierte en la pieza que se desplaza para generar la vibración. Su desplazamiento es el resultado directo de la interacción entre la bobina de voz y el imán de Neodimio (ineedmotors, 2020).
- Por su parte el muelle ondulado trabaja mecánicamente como un resorte a compresión permitiendo que la masa en movimiento regrese a su posición original después de cada ciclo de vibración (Lisheng Spring, 2024).
- La cubierta del motor o carcasa externa es la encargada de proteger a todos los elementos internos. Debe fabricarse con un material duradero y resistente al desgaste (Urany, 2023).

- Finalmente, está el imán permanente que interactúa con el campo magnético inducido en la bobina de voz. Juntos crean una fuerza resultante responsable del funcionamiento del motor (ineedmotors, 2024).

La fuerza resultante de la interacción entre ambos campos magnéticos se define a su vez como una fuerza de restauración, y es directamente proporcional a la distancia con respecto al punto de equilibrio (la posición inicial de la masa móvil). La fuerza de restauración provoca que la masa móvil oscile o vibre de forma periódica. Si no existen fuerzas disipativas, el movimiento oscilatorio o vibración se puede llegar a perpetuar (FisicaLab, 2022).

Ventajas del LRA:

- 1) El LRA supera al ERM por optimizar el consumo de energía, su capacidad de entregar un tiempo de respuesta más rápido, la fiabilidad de mantener vibraciones a frecuencias constantes y por una vida útil más prolongada (Precision Microdrivers, 2021).
- 2) Este actuador es rentable en términos de costos y ofrece una retroalimentación vibrotáctil de excelente calidad (Texas Instruments Incorporated, 2023).
- 3) Además de canalizar directamente la energía producida por la bobina de voz hacia la piel, el artefacto también mejora la eficiencia energética aprovechando la frecuencia de resonancia del resorte (ineedmotors, 2020).

Desventajas del LRA:

- 1) Estos actuadores están optimizados para funcionar de manera eficaz en una frecuencia particular, conocida como su frecuencia de resonancia. Esta característica puede representar un inconveniente en situaciones donde se

necesita trabajar con frecuencias fuera de sus límites de operación prediseñados (HVHIndustrial, 2024).

### 1.3 Caracterización de actuadores vibrotáctiles

La caracterización de actuadores vibrotáctiles permite:

- Determinar la aceleración de las vibraciones al administrarle distintos valores de frecuencias. Esta información es esencial para conocer si los actuadores vibrotáctiles cumplen con los requisitos necesarios para aplicaciones de ingeniería específicas (Progressive Automations, 2023).
- La caracterización ayuda a diseñar sistemas vibratorios más eficientes y precisos. Al conocer las propiedades de los actuadores vibrotáctiles, partiendo del censo de su aceleración es factible implementar estrategias de control adecuadas para que su operación se optimice (Roborevolucion, 2022).
- Validación y certificación: En aplicaciones críticas como dispositivos médicos o aeroespaciales, la caracterización de los actuadores vibrotáctiles es fundamental para confirmar su funcionamiento seguro y confiable, con lo que logran obtener las certificaciones y competencias necesarias para cada caso de implementación (TechFormation, 2024).
- Control preciso en la toma de muestras: Una plataforma especializada permite aplicar señales de excitación con alta precisión, lo que simplifica la medición del componente de aceleración, en los actuadores vibrotáctiles (electropreguntas.com, 2023).
- Reproducibilidad: La consistencia en las pruebas es esencial para obtener resultados confiables. Una plataforma diseñada específicamente garantiza condiciones uniformes y repetibles en el tiempo para realizar las pruebas de caracterización (admin, 2021).

- **Eficiencia:** Una plataforma diseñada adecuadamente reduce el tiempo y los recursos necesarios para llevar a cabo los ensayos, y lograr obtener lecturas confiables mediante el análisis dinámico que realiza un sensor acelerómetro, cuando se instala sobre un actuador vibrotáctil activado (TechFormation, 2024).
- **Personalización:** La plataforma se puede adaptar a las necesidades específicas del cliente quien puede tener en cuenta factores operativos como la amplitud y tiempo de duración de las frecuencias de excitación aplicables durante la fase experimental.

En la fase de diseño es factible analizar y modelar las características técnicas de los elementos mecatrónicos u otros parámetros relevantes como protocolos de comunicación, dimensiones generales de la plataforma de caracterización; o los procesos de manufactura que se aplican con sus métodos de ensamble asociados, tal que permitan alcanzar un prototipo técnicamente viable y ajustado para brindar una respuesta de trabajo eficiente.

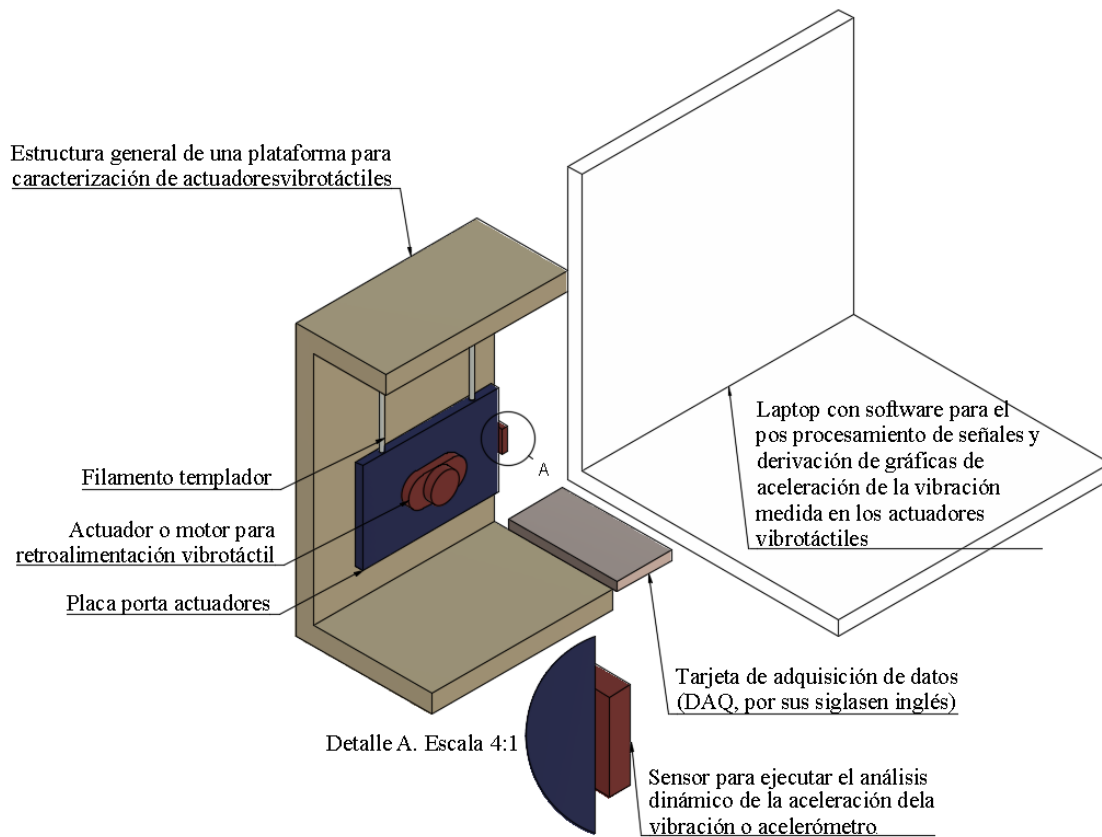
#### **1.4 Pregunta de investigación**

¿Es posible construir una plataforma de caracterización de actuadores vibrotáctiles funcional y de bajo costo?

La plataforma para caracterización se concibe entonces como una metodología y una herramienta para medir las vibraciones en actuadores vibrotáctiles respecto a su componente de aceleración. En la **Figura 14** se ilustran las partes que un fabricante de actuadores vibrotáctiles idealiza para lograr caracterizarlos (Tactile Labs, 2024).

## Figura 14

*Componentes idealizados para una Plataforma que Caracteriza Actuadores Vibrotáctiles.*



*Nota.* Esquema desarrollado por el investigador con herramienta CAD. Adaptado de (TactileLabs, 2024).

Los principales componentes de la plataforma son:

- Una estructura que debe ser sólida y duradera para resistir las vibraciones de los actuadores vibrotáctiles. Los materiales para fabricarla pueden ser acero inoxidable, aluminio o polímeros de alta durabilidad. No obstante, se ha investigado la aplicación de materiales compuestos de bajo peso tales como una mezcla de madera y Kevlar con el objetivo de disminuir la masa de la estructura general, pero manteniendo su resistencia (Eduardo et al., 2013).
- El filamento templador tiene el trabajo de suspender a la placa porta actuadores en la estructura general. Es necesario que absorba ínfimamente, las vibraciones

generadas en las pruebas para así lograr acercarse con la mayor precisión a los valores reales de la aceleración que genera el actuador vibrotáctil, cuando es accionado y entra en funcionamiento.

- La placa porta actuadores debe facilitar su colocación y extracción. Tiene que minimizar cualquier perturbación con las vibraciones generadas, sin dejar de ser resistente y capaz de tolerar las fuerzas oscilatorias producidas en la fase experimental (Transductor.net, 2023).

Se puede utilizar a esta placa siempre y cuando su influencia en la respuesta que entrega el actuador vibrotáctil al ser censado, se conozca o sea posible modelarla en el algoritmo de medición.

- El acelerómetro es un dispositivo que se utiliza para realizar el análisis dinámico de vibraciones en su componente de aceleración.

Se realiza más adelante en la revisión del **Estado del arte** un estudio pormenorizado de este último dispositivo (el acelerómetro) por ser clave en la operación eficiente del prototipo que propone la presente investigación.

Este sensor transforma la aceleración mecánica que entrega el actuador vibrotáctil en una señal eléctrica que se registra y analiza para derivar a las curvas de caracterización basadas en la aceleración (Thierry , 2022).

- Para la obtención en tiempo real de estas señales eléctricas (corrientes o voltajes) que provienen de las lecturas dinámicas del acelerómetro, se usa una tarjeta de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés) que se encarga de la conversión analógica a digital (ADC, por sus siglas en inglés).

La DAQ suprime interferencias, calibra amplificaciones y define los intervalos de medición. Las tarjetas de adquisición de datos pueden variar en términos de la

cantidad de canales de entrada, la velocidad de muestreo, su resolución y también su precisión (Villegas et al., 2013).

- El trabajo que realiza el acelerómetro y la DAQ se entregan finalmente a un computador responsable del post procesamiento de los datos levantados en los experimentos.

Con estos datos se pueden obtener gráficas o curvas de caracterización del comportamiento mecánico del actuador vibrotáctil en función de su aceleración dinámica. Es recomendable que sea un equipo con un procesador de alto rendimiento y una buena cantidad de memoria RAM (Nvidia Corporation, 2024).

## 1.5 Estado del arte

En esta sección del documento se revisa el estado del arte acerca de equipos diseñados para el análisis de sistemas vibratorios. Se hace especial énfasis en investigaciones que proponen plataformas para caracterizar propiedades en actuadores vibrotáctiles.

Se repasa también el procedimiento para la adquisición de datos provenientes del análisis vibracional. Con esta exploración se busca determinar los recursos mecatrónicos y computacionales adaptables al diseño de nuestro prototipo.

En la **Figura 15** se observa una plataforma diseñada para medir la carga de impacto aplicada en un tiempo igual a 0.002 [s], sobre una aleación de alta amortiguación

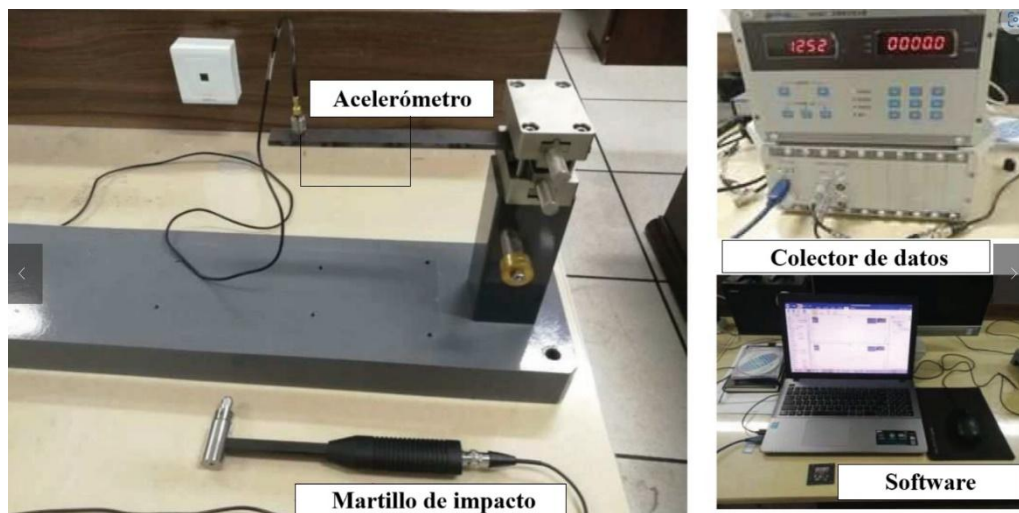
Mn-Cu. La plataforma utiliza un acelerómetro 1A101 con sensibilidad =

$4.945 \left[ \frac{\text{miliVolt}}{\frac{m}{s^2}} \right]^3$ . El sensor está conectado a un colector de datos modelo DH5922N

(Zhu et al., 2021).

### Figura 15

*Configuración de una Plataforma para medir la Carga de Impacto.*



*Nota.* Adaptado de *Características dinámicas de una aleación de alto amortiguamiento Mn-Cu sometida a carga de impacto* (p. 04), por (Zhu y otros, 2021), Avances en Ingeniería Mecánica.

El acelerómetro 1A101 está calibrado en unidades de medida de  $\left[ \frac{\text{miliVolt}}{\frac{m}{s^2}} \right]$ , sin embargo

los acelerómetros implementados en sistemas microelectromecánicos (MEMS, por sus

siglas en inglés) usan la unidad de medida  $\left[ \frac{\text{miliVolt}}{g} \right]$  para indicar su sensibilidad, en

donde la  $g$  del denominador es igual a la aceleración estándar de la gravedad terrestre.

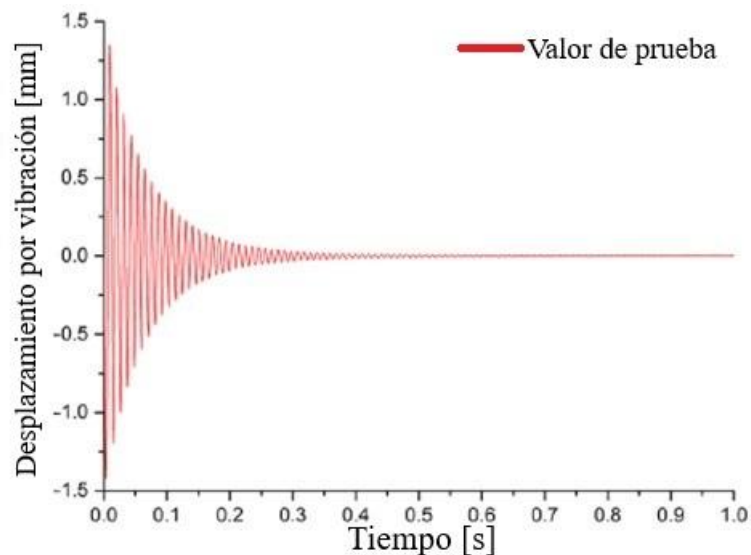
<sup>3</sup> En el numerador de esta unidad de medida se halla el [miliVolt] (milivoltio) que es la milésima parte de un voltio, es decir  $1 \text{ [mV]} = 0.001 \text{ [Volt]}$ . Mide pequeñas variaciones de potencial eléctrico. En el denominador se mide la aceleración con las unidades del SI. Representa al cambio de la rapidez en metros por segundo, durante cada segundo. Esta sensibilidad quiere decir entonces que por cada incremento de  $1 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  en la aceleración, el sensor entrega una salida de una cantidad determinada de [miliVolt]

La unidad de medida  $\left[\frac{\text{miliVolt}}{g}\right]$  representa al diferencial ( $\Delta$ ) de la cantidad de la señal eléctrica medida en  $[\text{miliVolt}] \equiv [mV]$ , que se produce por cada unidad de aceleración, medida esta última en relación con la gravedad, es decir:  $g = 9.8066 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ .

Los investigadores levantan 10 muestras aplicadas con un martillo de impacto de denominación LC02-3A102E de sensibilidad igual a  $4.36 \left[\frac{Pc}{N}\right]$  para calcular la relación de amortiguamiento del haz que se aprecia en la **Figura 16** (Zhu et al., 2021).

### Figura 16

*Desplazamiento de Vibración del extremo libre de la Viga de Aleación Amortiguadora Mn-Cu.*



*Nota.* Adaptado de *Características dinámicas de una aleación de alto amortiguamiento Mn-Cu sometida a carga de impacto* (p. 05), por (Zhu et al, 2021), *Avances en Ingeniería Mecánica*.

La unidad de medida  $\left[\frac{Pc}{N}\right]$  de esta investigación hace referencia a la cantidad de pico Culombios que se generan por cada Newton de fuerza, que se ejerce en un dispositivo piezoeléctrico, como es el caso del martillo que usan estos científicos (Lu et al., 2021).

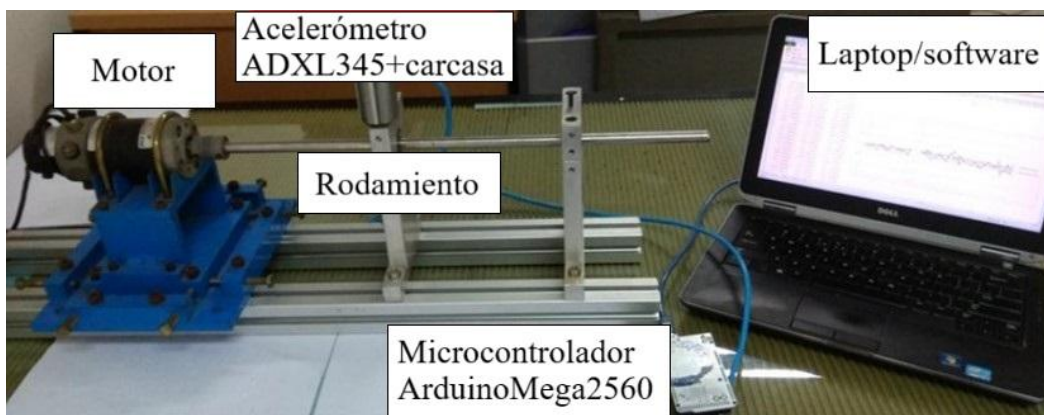
De acuerdo con los autores se concluye que la carpeta estructural idónea para reducir la vibración en estructuras de vigas en voladizo debe ser una capa amortiguadora adherida

en ambos lados, superior e inferior, de la viga (tipo sándwich) o una capa amortiguadora en un solo lado.(Zhu et al., 2021).

En la **Figura 17** se observa una plataforma diseñada con tecnología MEMS para medir la vibración en rodamientos que giran con valores fijos de 500, 1000 y 1500 [rpm] (revoluciones por minuto) y con periodos de duración de cada testeo o prueba de 5, 10 y 20 [segundos], respectivamente (Feriadi et al., 2019).

### Figura 17

*Plataforma equipada con Tecnología MEMS para medición de Vibración en Rodamientos.*

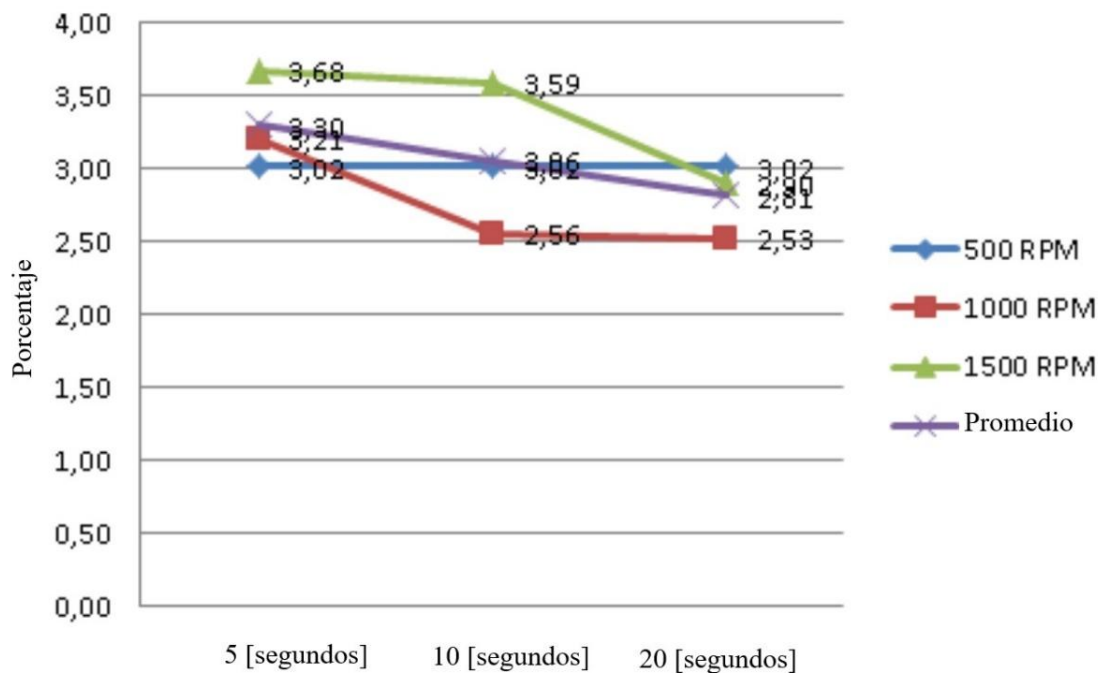


*Nota.* Adaptado de *Análisis del sistema de medición de vibraciones acelerómetro MEMS ADXL345* (p. 65), por (Feriadi et al., 2019), Revista Manutech.

Se observa que esta plataforma utiliza el acelerómetro ADXL345 (ver especificaciones del fabricante en el **Anexo 1**). El sensor está conectado al microcontrolador Arduino Mega 2560 ejecutado por Arduino IDE 1.08. La precisión de los resultados de las mediciones de vibración a distintos valores de [rpm] se muestra en la **Figura 18** (Feriadi et al., 2019).

**Figura 18**

*Precisión de los Resultados de la Medición del ADXL345 versus el Tiempo de Prueba.*



*Nota.* Adaptado de *Análisis del sistema de medición de vibraciones acelerómetro MEMS ADXL345* (p. 67), por (Feriadi et al., 2019), Manutech: Revista de tecnología de fabricación.

Los resultados de la gráfica en la **Figura 18** muestran que cuanto mayor es el tiempo de medición, la tendencia es que la desviación de las lecturas del acelerómetro disminuya. Así, a los 5 [s] el promedio es 3.30%, a los 10 [s] el promedio es 3.06 %, y a los 20 [s] la media es del 2.81% con lo que se constata la reducción de 0.49 puntos porcentuales. Esto indica que a mayor tiempo de medición mejor será la precisión de los resultados.

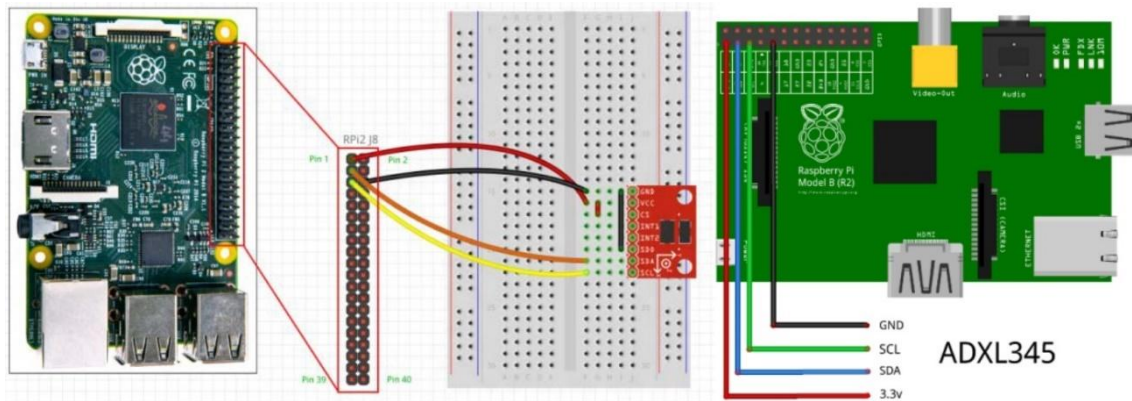
Esta investigación produce un sistema de medición de vibración simple, usando el sensor ADXL345, mismo que demuestra su capacidad para medir datos de vibración, su precisión puede ser optimizada al establecer un tiempo de prueba igual a 20 [segundos] (Feriadi et al., 2019).

La configuración del equipo de otra investigación se lleva a cabo con este mismo acelerómetro ADXL345. Se observa en la **Figura 19** una plataforma diseñada para

medir el espectro de aceleración de vibraciones en el husillo de una máquina herramienta CNC. El sensor se conecta a una tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B (Holovaty et al., 2018).

**Figura 19**

*Set Up para medición y análisis del Espectro de Aceleración de Vibraciones en Husillo CNC.*

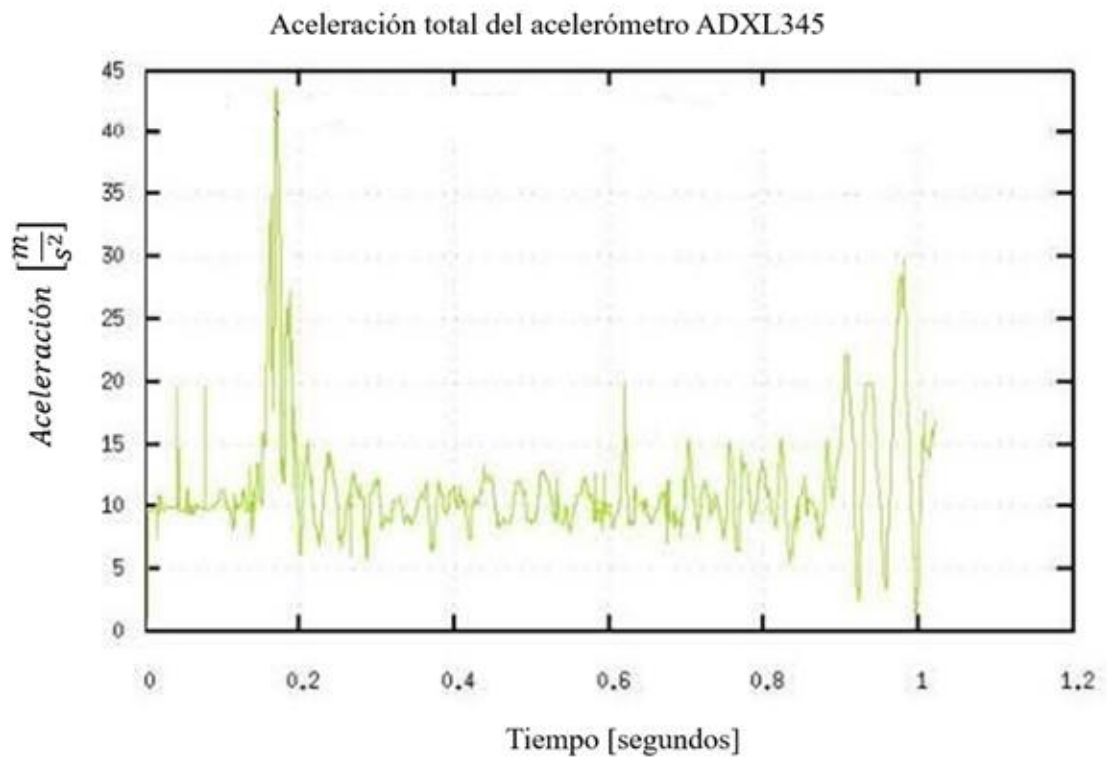


*Nota.* Adaptado de *Desarrollo de un sistema para monitoreo de vibraciones aceleraciones basadas sobre la Raspberry PI, microcomputador y el acelerómetro ADXL345* (p. 54), por (Holovaty et al., 2018), Revista de tecnologías empresariales de Europa del Este.

Las gráficas de las mediciones alcanzadas se muestran en la **Figura 20** con el valor total de aceleración de vibración para los tres ejes. A continuación, en la **Figura 21** se observa el espectro de la señal de aceleración de vibración, a lo largo del *eje – Y*.

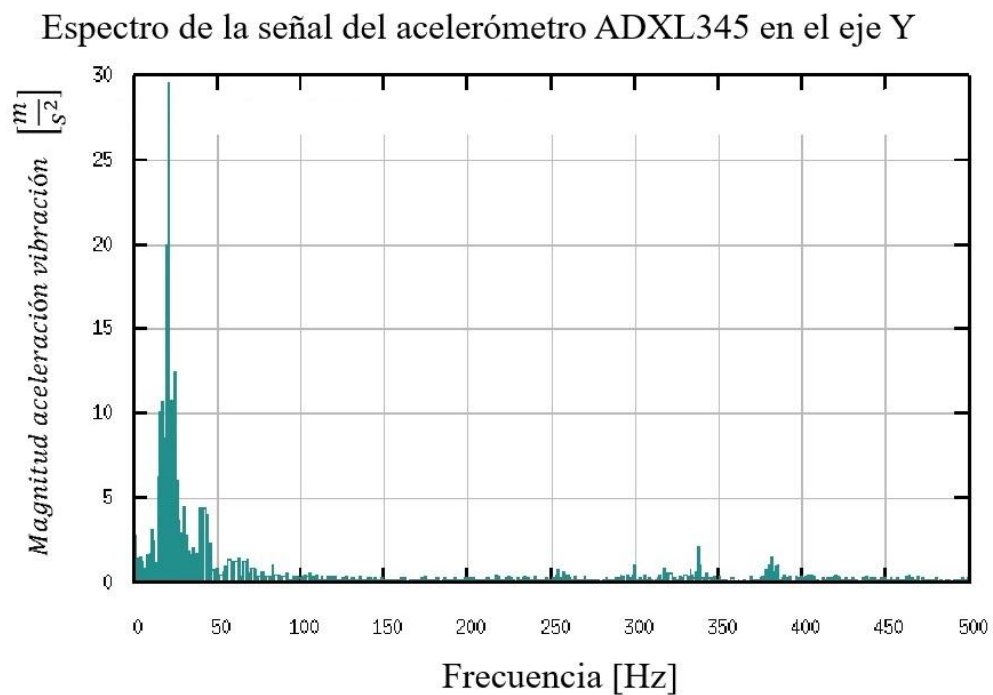
**Figura 20**

*Valor total de la Aceleración de la Vibración para los tres ejes en las lecturas de un Husillo.*



**Figura 21**

*Espectro de Aceleración de Vibraciones detectado por el MEMS ADXL345 para el eje – Y.*



*Nota.* Adaptado de *Desarrollo de un sistema para monitoreo de vibraciones aceleraciones basadas sobre la Raspberry PI, microcomputador y el acelerómetro ADXL345* (p. 60), por (Holovatyy et al., 2018), Revista de tecnologías empresariales de Europa del Este.

Los resultados del espectro de aceleración en la **Figura 21**, para la vibración que se lee en el eje y, permiten afirmar que este es el pico más prominente de la amplitud de la aceleración de la vibración hallado en la investigación. Se establece en un rango de frecuencias de 10 a 40 [Hz], dado que el experimento se realiza con vibraciones ajustadas a una frecuencia de 20 [Hz]. El resultado del análisis espectral es confiable.

Los investigadores recomiendan calibrar el acelerómetro y realizar ensayos con múltiples sensores de aceleración montados en el cabezal de la fresadora CNC. Los hallazgos de este estudio de campo respaldan la viabilidad del sistema diseñado para el monitoreo de vibraciones, al implementarse la tecnología MEMS, específicamente con el uso del acelerómetro ADXL345.

En este mismo estudio se desarrolla un software especializado que incluye un controlador para ajustar la adquisición y procesamiento de datos del sensor, así como herramientas gráficas para representar las señales de aceleración de las vibraciones en los dominios del tiempo [s] y la frecuencia [Hz].

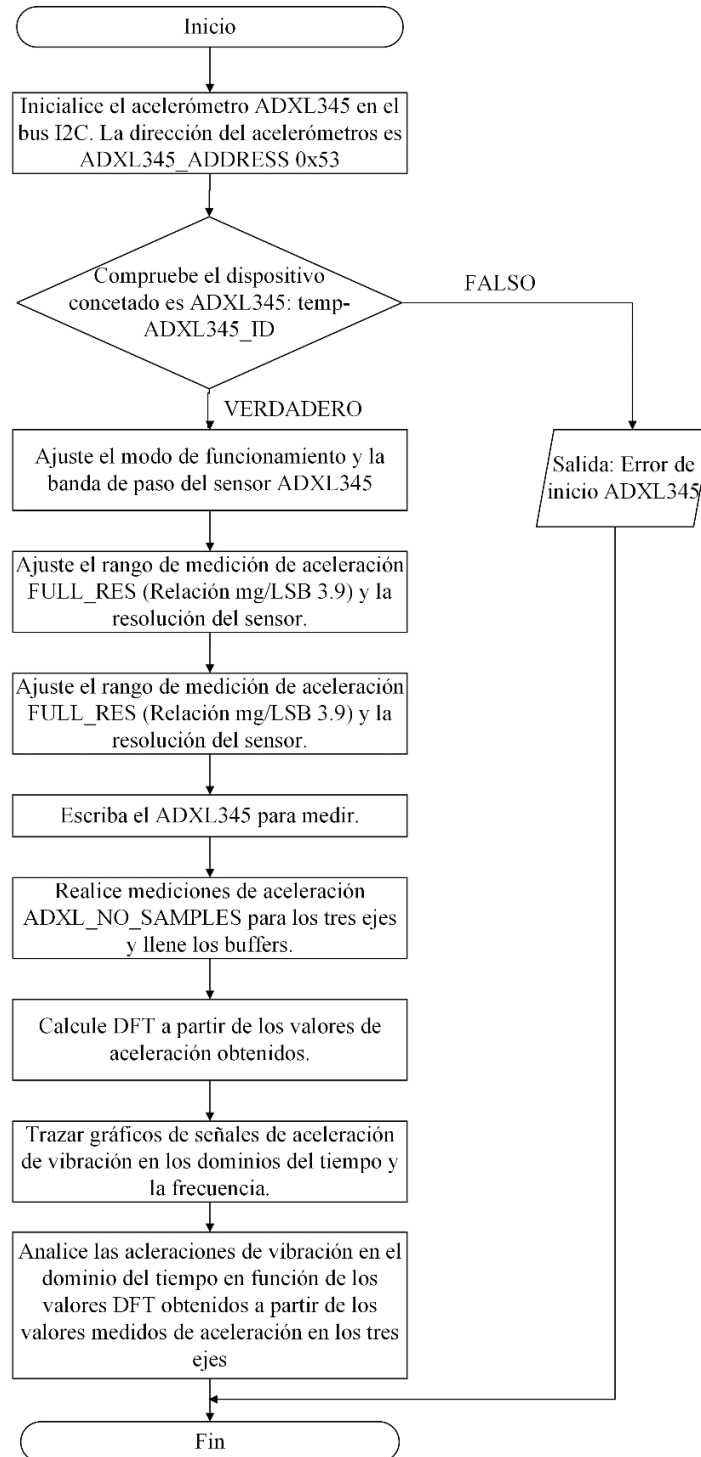
El software ofrece una amplia funcionalidad y es gratuito para el usuario. Este sistema de monitorización y análisis del espectro de aceleración de vibraciones es de enfoque modular, lo que permite hacer mejoras y modificaciones rápidas. Su diseño permite analizar los parámetros de vibración para predecir y prevenir posibles accidentes, reduciendo así los costos asociados a fallos en herramientas de corte, componentes y conjuntos costosos para maquinaria CNC.

En la **Figura 22** se observa el algoritmo de operación que compone a su software. El algoritmo describe el proceso que permite receptor datos y graficar la señal de la

aceleración de las vibraciones que lee el acelerómetro. El sensor mide sin atenuación el rango de  $\pm 16$  fuerzas g, en una banda de paso de entre 0.05 hasta 1600 [Hz].

**Figura 22**

*Algoritmo de Operación del Acelerómetro ADXL345.*



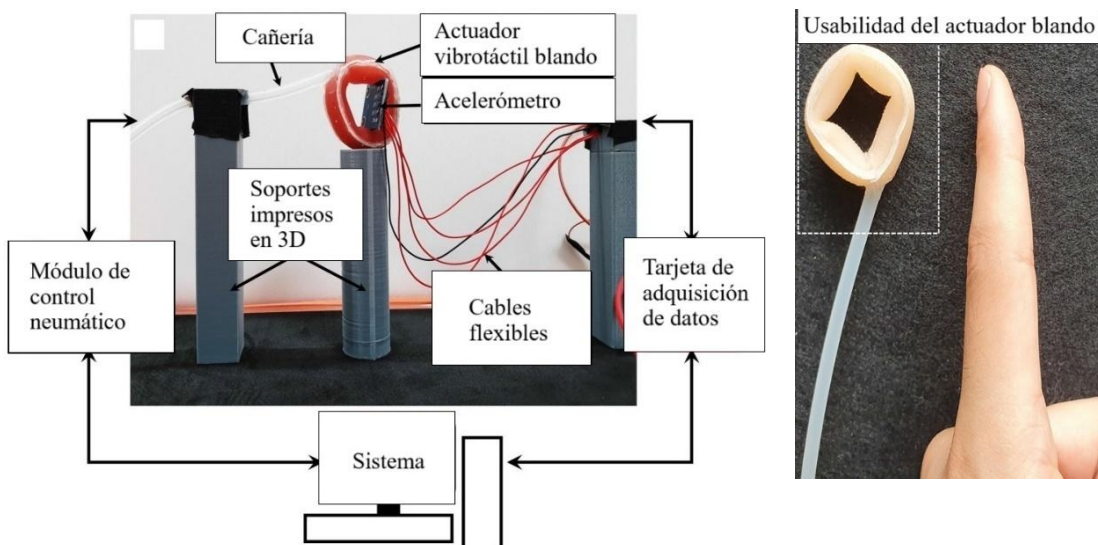
*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Desarrollo de un sistema para monitoreo de vibraciones aceleraciones basadas sobre la Raspberry PI, microcomputador y el acelerómetro ADXL345* (p. 55), por (Holovatyy et al., 2018), Revista de tecnologías empresariales de Europa del Este.

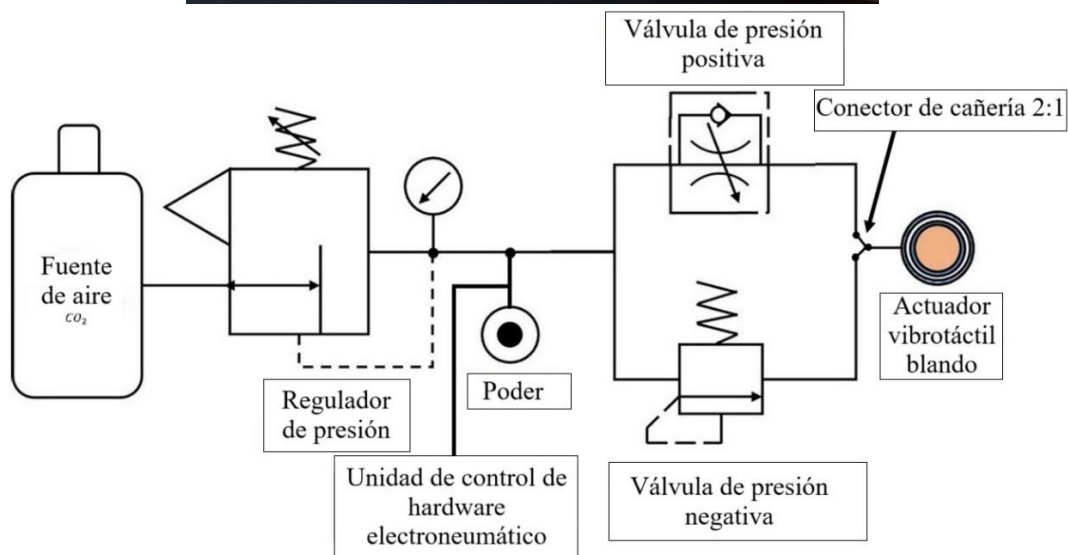
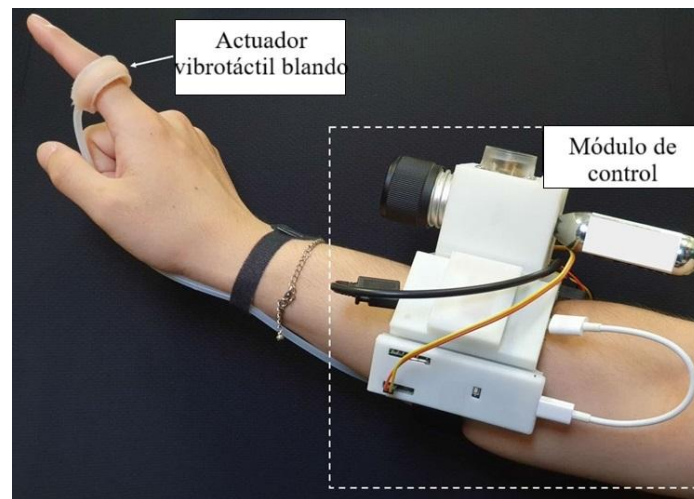
El algoritmo de operación inicializa el acelerómetro, lo ajusta, calcula los valores reales de aceleración para cada uno de los *ejes*  $\rightarrow X, Y, Z$ , registra los archivos de aceleración calculados, reconoce los datos de espectros obtenidos y traza las funciones de dependencia de la aceleración en  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ , en el dominio del tiempo y la frecuencia, y, concluye con el análisis de los resultados obtenidos a partir de los valores medidos de aceleración en los tres ejes.

En la **Figura 23** se presenta una plataforma diseñada para medir tres estímulos vibrotáctiles distintos que son: La presión estática, vibración de alta frecuencia; y el impacto. La plataforma utiliza un acelerómetro ADXL335. El sensor está conectado a una tarjeta NI-DAQ 6009. Las señales se procesan mediante el software Matlab con su módulo Analog Input Recorder (Talhan et al., 2020).

### Figura 23

*Configuración Experimental y Hardware para Caracterizar los Estímulos Vibrotáctiles.*





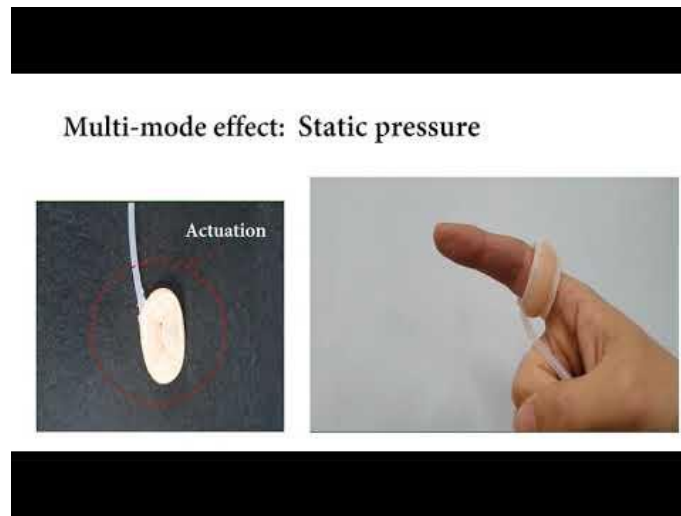
*Nota.* Adaptado de *Anillo táctil: Actuador suave multimodo que se coloca en los dedos para una rica retroalimentación háptica*, (p. 963), por (Talhan et al., 2020), IEEE Access.

Para propiciar los estímulos vibrotáctiles en la piel del dedo, el circuito utiliza un módulo de control central de hardware electroneumático, como se observa en la **Figura 23**, que se monta en un microcontrolador relativamente pequeño, que se puede usar en la muñeca, lo que le confiere la cualidad de portabilidad a este diseño.

El actuador vibrotáctil blando que se caracteriza en esta investigación, como se indica en la **Figura 24** (dar clic en el centro del recurso para reproducirlo), tiene la forma de una dona; se instala en el dedo del usuario y es de consistencia suave dado que se fabrica con silicona flexible.

## Figura 24

*Caracterización Multimodo de un Actuador Vibrotáctil Neumático.*

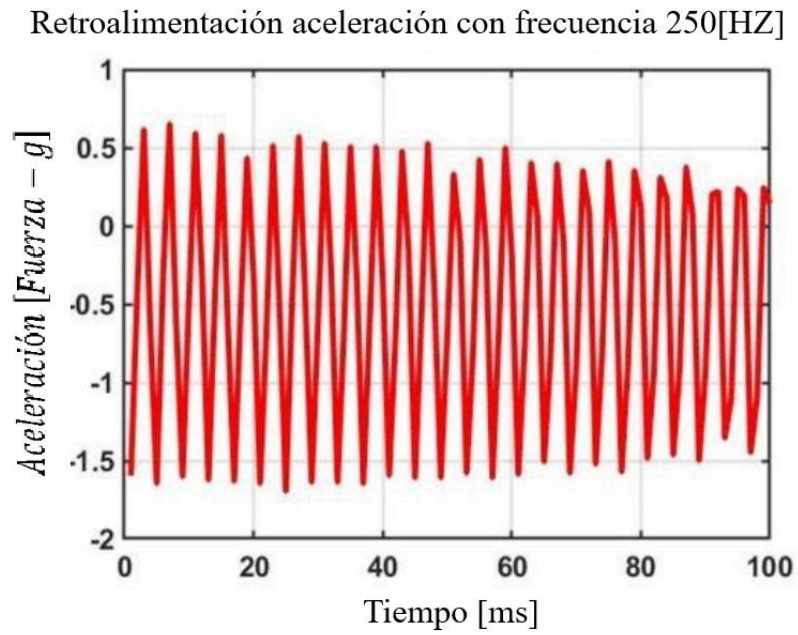


*Nota.* Adaptado de *Anillo táctil: Actuador suave multimodo que se coloca en los dedos para una rica retroalimentación háptica*, (p. 957), por (Talhan et al., 2020), IEEE Access.

En las **Figuras 25** y **26** están las mediciones de aceleración reales en el espacio de dominio temporal y dominio de la frecuencia, respectivamente. El rendimiento máximo de la aceleración se logra a 50 [Hz], y la amplitud máxima disminuye a medida que aumenta la frecuencia hasta 250 [Hz] (Talhan et al., 2020).

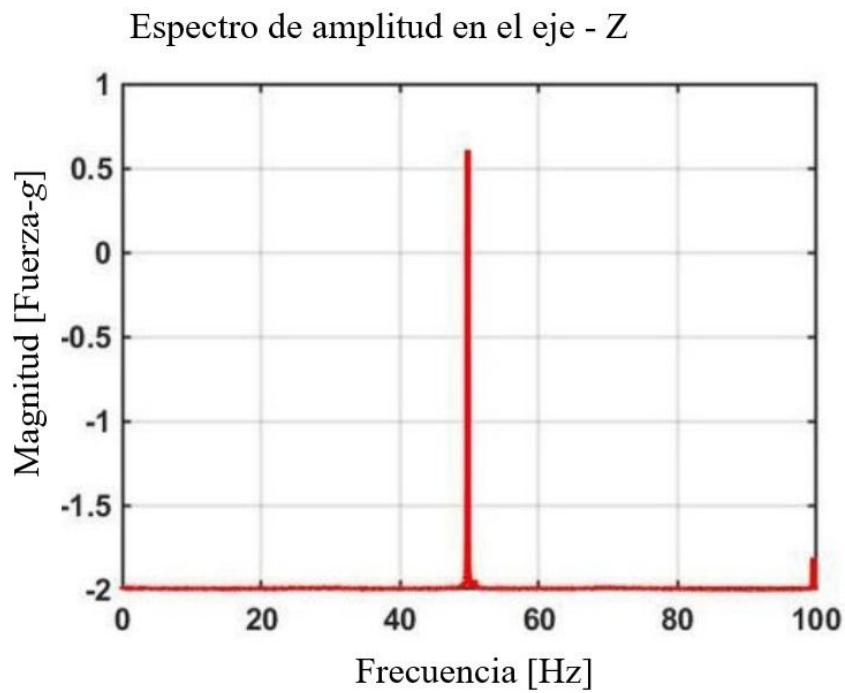
**Figura 25**

*Medición de la Aceleración en el Dominio Temporal [ms].*



**Figura 26**

**Medición de la Aceleración en el Dominio de la Frecuencia [Hz].**



*Nota.* Adaptado de *Anillo táctil: Actuador suave multimodo que se coloca en los dedos para una rica retroalimentación háptica*, (p. 963), por (Talhan et al., 2020), IEEE Access.

Los investigadores concluyen que el sistema para medir estímulos vibrotáctiles tiene algunas limitaciones. Por ejemplo: Se necesitan instalar dos válvulas neumáticas para controlar a cada actuador vibrotáctil, por lo que la escalabilidad del sistema a múltiples dedos en un usuario se complica en términos de tamaño y peso.

Además, el tanque recargable de  $CO_2$  comprimido que alimenta al circuito no es permanente, ya que dura 20 minutos con un uso continuo, como en el caso de los experimentos para medir los efectos de las vibraciones en la piel, y dura aproximadamente una hora con un uso en un escenario de interacción regular.

Sin embargo, un actuador vibrotáctil blando como el testeado en esta investigación es seguro para la piel humana y puede estimular una gran área de aquella. Esta característica es beneficiosa si se necesita estimulación en una parte muy sensible de la piel humana.

De esta misma investigación se puede rescatar también el modelo matemático que se aplica para obtener el valor de la aceleración en unidades de  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$  ya que se conoce que los sensores MEMS leen la aceleración en función de la gravedad terrestre estándar.

De la curva de aceleración en el dominio del tiempo que se observa en la **Figura 25**, se multiplica a su amplitud, que como se define en la subsección 1.1.4: Es la altura máxima de la onda desde su posición de equilibrio, por el valor estándar de la aceleración de la gravedad terrestre.

Se puede generalizar que para presentar los resultados de las mediciones que entrega un sensor acelerómetro del tipo ADXL345, es procedente aplicar la **Ecuación 2**.

**Ecuación 2** *Modelo Matemático para la Conversión de la Aceleración del ADXL345.*

$$aceleración_{ADXL345} = \left( \frac{y_{m\acute{a}xima} - y_{m\acute{i}nima}}{2} \right) \cdot (gravedad_{terrestre}) \quad (2)$$

En donde:  $y_{m\acute{a}xima}$  = *Cresta de la curva (valor máximo en "g")*.

$y_{m\acute{i}nima}$  = *Valle de la curva (valor mínimo en "g")*.

$$gravedad_{terrestre} = 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right].$$

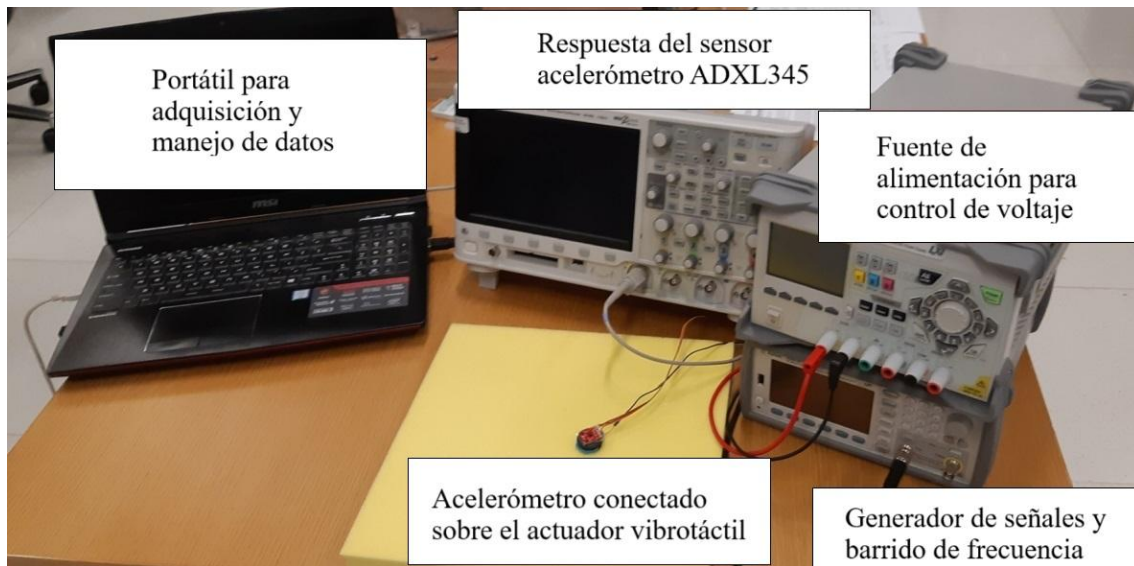
*Nota.* Desarrollado por el investigador.

La fuerza "g" de este modelo matemático es una magnitud adimensional que representa a la aceleración como un múltiplo de la gravedad terrestre, lo que permite una lectura directa y estandarizada en sensores inerciales como los acelerómetros. Una lectura de 2 "g" indica una aceleración equivalente al doble de la gravedad terrestre. La aceleración que genera la fuerza de la gravedad es constante (Doebelin et al., 2024).

La propuesta de la **Figura 27** permite a los investigadores caracterizar a un actuador vibrotáctil mediante el acelerómetro ADXL335. El sensor est conectado a un osciloscopio digital MSOX2024A. Las señales se procesan mediante un script de Matlab (Korres & Eid, 2019).

## Figura 27

*El Montaje Experimental que se utiliza para Caracterizar a un Actuador Vibrotáctil.*



*Nota.* Adaptado de *Diseño de un actuador táctil de perfil bajo con rica estimulación vibrotáctil para aplicaciones portátiles*, (p. 4), por (Korres y Mohamad, 2019), IEE.

Esta plataforma desarrolla el análisis del rendimiento de un actuador vibrotáctil mediante un experimento de caracterización que mide su respuesta en frecuencia frente a un rango de voltajes de entre 1 a 3 [Volt].

Para medir la intensidad de la vibración el acelerómetro se acopla en la parte superior del actuador vibrotáctil, para así levantar la señal de aceleración que se genera con el osciloscopio digital MSOX2024A. El actuador vibrotáctil y el ADXL335 descansan sobre espuma amortiguadora para filtrar cualquier otra fuente de ruido vibratorio.

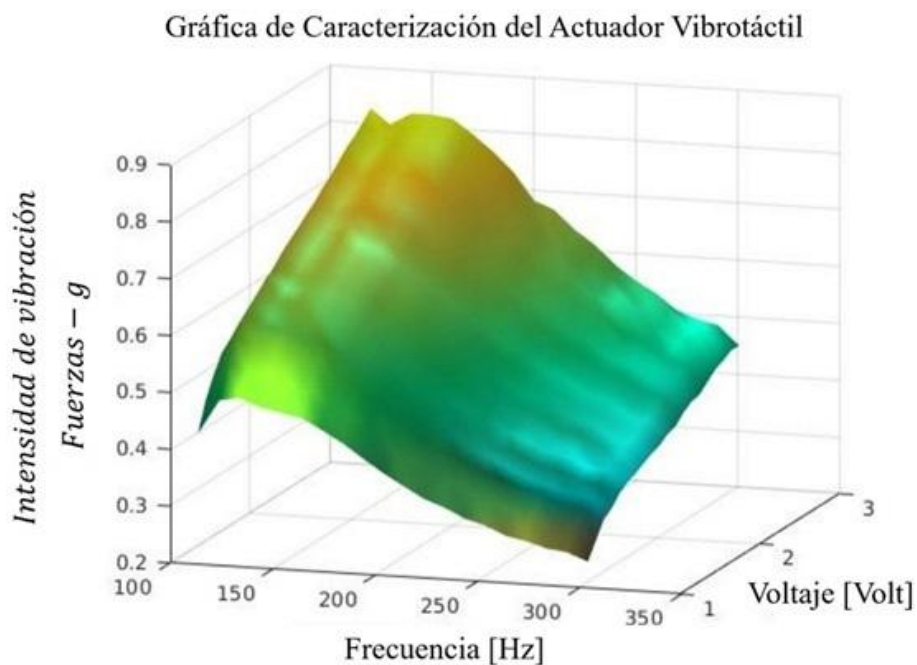
La frecuencia que se entrega al actuador vibrotáctil se impulsa con un generador de señal arbitraria 33521A y la intensidad de la señal se controla a través de un MOSFET de canal N desde una unidad de fuente de alimentación digital DP831. Todos los instrumentos se conectan a una laptop con cable USB, allí un script de Matlab controla la instrumentación y la adquisición de datos del osciloscopio.

El script se establece en un voltaje inicial, luego se barre un rango de frecuencias entre 110 a 300 [Hz], adquiriendo el punto pico de la respuesta del acelerómetro ADXL335; luego se repite el mismo procedimiento aumentando el voltaje en un diferencial ( $\Delta$ ) de 0,1 [Volts].

Los resultados que se muestran en la **Figura 28** representan a la caracterización hecha con la configuración del equipo descrito.

### Figura 28

*Muestra de la Respuesta de la Intensidad de Vibración para diferentes niveles de Voltaje.*



*Nota.* Adaptado de *Diseño de un actuador táctil de perfil bajo con rica estimulación vibrotáctil para aplicaciones portátiles*, (p. 4), por (Korres y Mohamad, 2019), IEE.

Esta gráfica de superficie muestra la respuesta del actuador frente a las entradas de frecuencia [Hz] y voltaje [Volt] aplicadas en el experimento, en el eje vertical se mide la intensidad de la vibración en múltiplos de la aceleración gravitacional terrestre (fuerzas “g”). La gráfica de superficie indica que dentro del rango de frecuencia de 110 a 300

[Hz] el actuador vibrotáctil entrega una intensidad de vibración  $> 0.4$  fuerzas “g”, por lo que puede servir a la mayoría de las aplicaciones de estimulación vibrotáctil.

También, los investigadores miden la respuesta transitoria del actuador vibrotáctil para determinar la idoneidad del diseño para aplicaciones en tiempo real (aplicación vibrotáctil de pulso corto donde se desea una respuesta transitoria rápida).

La respuesta transitoria del actuador vibrotáctil a una frecuencia de 300 [Hz], es de aproximadamente 5 [ms]. El actuador vibrotáctil necesita aproximadamente 2 ciclos de funcionamiento para alcanzar la respuesta de estado estable (Korres & Eid, 2019).

Como resultado de este estudio, se diseña e implementa una plataforma para caracterizar y evaluar el estímulo perceptual que un actuador vibrotáctil de perfil bajo puede entregar, al controlar la frecuencia y el voltaje de forma independiente.

Se determina también que el actuador vibrotáctil testado supera a los actuadores ERM y LRA, que ya se analizaron previamente en los antecedentes, en términos de control.

Además, su costo es menor que el de los actuadores vibrotáctiles que se basan en bobinas móviles. Con esta investigación los científicos concluyen que su actuador vibrotáctil tiene un rendimiento satisfactorio (Korres & Eid, 2019).

Como lo recomiendan los investigadores que analizan el sistema vibratorio compuesto por el usillo de la fresadora CNC o como se observa en el algoritmo de operación del ADXL345 en la **Figura 22**, para proporcionar mediciones de vibración confiables antes de cada experimento es necesario realizar la calibración del sensor acelerómetro.

(Kokuyama et al., 2022).

De acuerdo con lo revisado en la bibliografía el acelerómetro ADXL345 es de uso común y verificado para implementación en el análisis de sistemas vibratorios. Además, es un

sensor de bajo costo y disponible en el mercado local, por lo que se selecciona para su aplicación en el presente proyecto de investigación.

En un estudio que se realiza para optimizar el cuidado de una planta, mediante la implementación de una plataforma escalable que se gestiona con un sistema inteligente IoT; el investigador Francisco (García Álvarez, 2020) emplea una placa para recolectar lecturas de diversos sensores que pueden medir la temperatura del entorno, la luminosidad, la humedad del suelo, entre otros, el boceto de su diseño se observa en la **Figura 29**.

**Figura 29**

*Operación de un Masetero Inteligente Controlado por varios Sensores.*

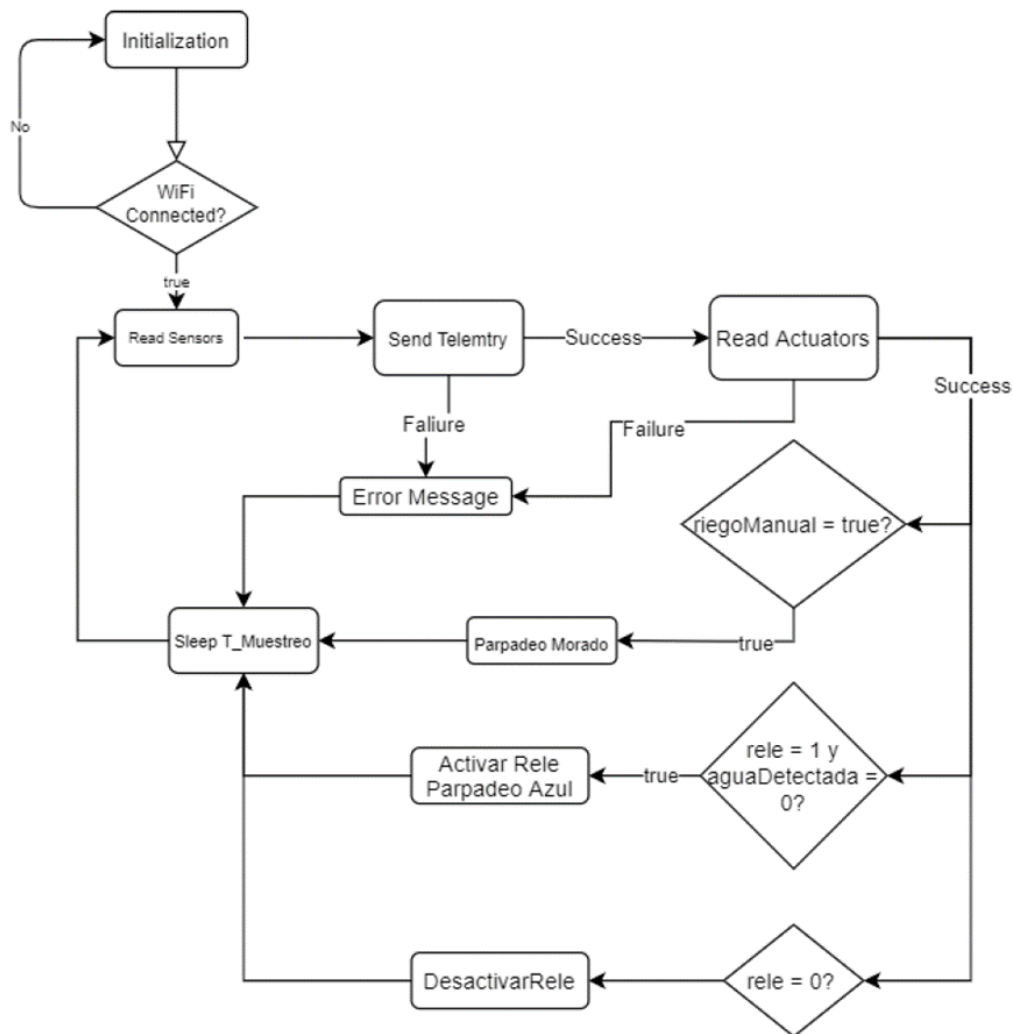


*Nota.* Adaptado de *Diseño e implementación de una plataforma escalable para la gestión de sistemas IOT*, (p.19), por (García Álvarez, 2020), Universidad Politécnica de Madrid.

Además de recolectar estas mediciones, las transmite a la plataforma IoT (internet de las cosas, por sus siglas en inglés): ThingsBoard para ser procesadas y analizadas. El algoritmo que opera a la placa controladora que se implementa en esta investigación se observa en la **Figura 30** (García Álvarez, 2020).

**Figura 30**

*Algoritmo de Operación de la placa ESP32 que Monitorea al Masetero Inteligente*



*Nota.* Adaptado de *Diseño e implementación de una plataforma escalable para la gestión de sistemas IOT*, (p.75), por (García Álvarez, 2020), Universidad Politécnica de Madrid.

Los resultados permiten automatizar la tarea del cuidado de una planta con el objetivo de fomentar el desarrollo sostenible.

Un módulo compatible con la placa que se utiliza para automatizar y optimizar el cuidado de una planta, como una opción para la fase de implementación en nuestro estudio, es la NodeMCU (unidad de microcontrolador en red, por sus siglas en inglés) V3 Lua Wifi ESP8266 (ver especificaciones del fabricante en el **Anexo 2**).

La ESP8266 funciona a 3.3 [Volt] y posee una memoria flash de estado sólido de 4 [MB], que almacena el código de arranque y archivos de datos. La memoria puede ser borrada y reprogramada electrónicamente, lo que le otorga aplicabilidad ingenieril para múltiples proyectos.

La placa ESP8266 de desarrollo de fuente abierta, está diseñada puntualmente para trabajar en proyectos que involucren al internet de las cosas. Esta tarjeta incluye el módulo ESP IC, basado en el chip ESP8266, que permite conectarla y comunicarla con otros dispositivos como periféricos, pantallas o sensores (Components 101, 2023).

La ESP8266 incorpora también la CPU Tensilica de 32 [bit], que es capaz de ejecutar instrucciones y realizar cálculos de manera eficiente, así como un microprocesador compatible con los sistemas operativos Windows y Safari. Puede funcionar a una frecuencia de reloj que se puede ajustar entre 80 y 160 [MHz] para adaptarse con flexibilidad a diversas aplicaciones y necesidades de rendimiento (Components 101, 2023).

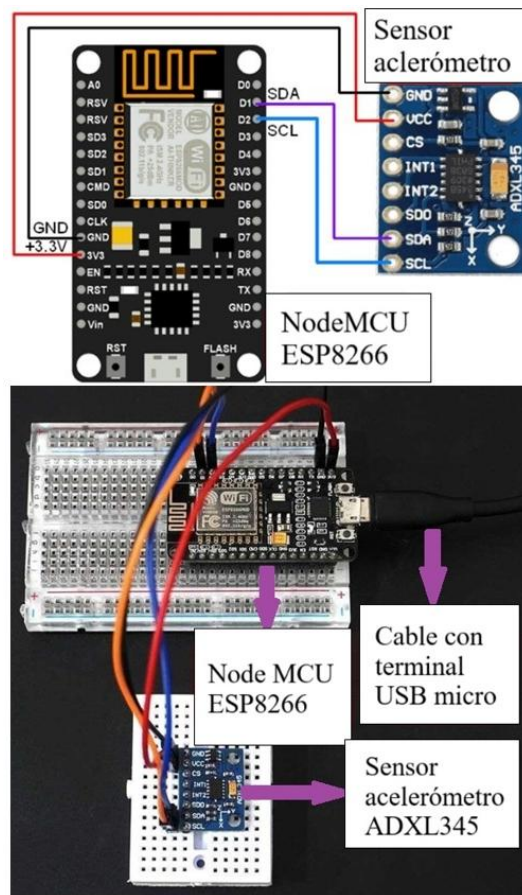
El módulo ESP8266 usa dos protocolos de comunicación para el intercambio de datos. El primero es el circuito interintegrado ( $I^2C$ , por sus siglas en inglés), el cual es un protocolo de comunicación ampliamente empleado en sistemas electrónicos para establecer conexiones entre dispositivos y periféricos, caracterizado por su simplicidad de conexión que se hace únicamente a través de dos líneas (ElectronicWings, 2024).

Para desarrollar la interfaz de programación entre el acelerómetro ADXL345 y la placa ESP8266 y lograr mostrar los resultados en una ventana de comunicación serial y/o en un servidor web local, se puede utilizar el entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) de Arduino, mediante las bibliotecas de Adafruit.

En la **Figura 31** se observa la conexión de hardware de estos componentes mecatrónicos, donde el ADXL345 utiliza el protocolo de comunicación  $I^2C$ , para transmitir datos de aceleración de los 3 ejes  $\rightarrow X, Y, Z$  al módulo ESP8266 (ElectronicWings, 2024).

**Figura 31**

*Diagrama de Interconexión del NodeMCU ESP8266 con el Acelerómetro ADXL345.*



*Nota. Adaptado de Interfaz del acelerómetro ADXL345 con el NodeMCU, por (ElectronicWings, 2024), Recuperado de <https://www.electronicwings.com>.*

Como se observa en el esquema de conexión de la **Figura 31** el módulo ESP8266 puede ser energizado a través de un cable con terminal de tipo USB micro, proveniente de una portátil, por ejemplo, el ADXL345 se conecta al pin VCC del módulo ESP8266 para obtener los 3.3 [Volt] necesarios para funcionar.

Los pines SDA (línea  $I^2C$  – N<sup>o</sup>. 1, de datos) y SCL (línea  $I^2C$  – N<sup>o</sup>. 2, del reloj) se utilizan para la comunicación con el acelerómetro mediante el protocolo  $I^2C$ , que ofrece las ventajas de ser de múltiple acción (diversos dispositivos conectados a la vez al mismo bus) y una baja velocidad que es idónea precisamente para comunicarse con sensores como el ADXL345. El módulo puede también recibir y enviar datos convirtiéndose así en una placa bidireccional (ArunEworld Copyright , 2024).

Se han desarrollado varios proyectos que emplean el protocolo  $I^2C$ , para conectar el sensor de aceleración ADXL345 al microcontrolador en red ESP8266. La mayoría de estos proyectos se enfocan en aplicaciones de detección de movimiento como la identificación de caídas, el seguimiento de actividad física y el monitoreo de vibraciones; siendo este último el ámbito de mayor interés para nuestro prototipo.

Los ingenieros y científicos han reconocido que  $I^2C$  es una opción confiable para establecer comunicación con el ADXL345, debido a su simplicidad y eficiencia (ArunEworld Copyright , 2024).

El otro protocolo de comunicación que usa la ESP8266 es el  $SPI$  (interfaz periférica serial, por sus siglas en inglés), que es una interfaz de transmisión síncrona de uso extendido para sistemas electrónicos.

El  $SPI$  es especialmente adecuado para aplicaciones que requieren alta velocidad para el intercambio de datos, aunque esto conlleve a un mayor consumo de energía por trabajar en modo dúplex completo (envío y recepción simultánea). Opera eficientemente en conexiones punto a punto (conectado a un único sensor) y necesita de una configuración más compleja ya que requiere una línea adicional ( $SC/CS$ ), para la elección del instrumento esclavo (seedstudio, 2024).

Con este repaso bibliográfico se establece que el ESP8266 trabaja con dos protocolos de comunicación el *SPI* e *I<sup>2</sup>C*, siendo este último el más adecuado en términos de diseño de programación y eficiencia energética para la interconexión con el ADXL345.

La programación de la ESP8266 con Arduino IDE es sencilla. Lo que se necesita es el Arduino IDE, un cable USB micro y el módulo. La placa ESP8266 es una opción viable para implementar en el prototipo de plataforma para caracterización de actuadores vibrotáctiles, debido a sus capacidades técnicas, su compatibilidad con las aplicaciones de IoT, un completo manual del fabricante, la abundancia de recursos de investigación contenidos en una comunidad con foros de programadores activos y documentación disponible en las bibliotecas de Adafruit (Components 101, 2023).

## 1.6 Justificación

El diseño del prototipo de plataforma para caracterización de actuadores vibrotáctiles es **importante** para adaptar los procesos investigativos a un mercado dinámico que muestra una creciente demanda de actuadores para retroalimentación vibrotáctil, impulsada por el aumento en la utilización de dispositivos que incorporan esta tecnología para diversas aplicaciones (Electricity - Magnetism, 2024).

Estas aplicaciones se fundamentan en el concepto de la sustitución sensorial con raíces en los años 60, cuando Paul Bach, un innovador en el estudio de la neuro plasticidad creó el primer dispositivo capaz de convertir datos visuales en estímulos vibrotáctiles, para ayudar a personas con discapacidad visual (Valence Vibrations, Inc., s.f.).

La plataforma para caracterizar actuadores vibrotáctiles tiene un **impacto** en la investigación que realiza la Facultad de Ingenierías (FING), al ser accesible para docentes y estudiantes. De acuerdo con la coordinación de investigación de la FING, sede Quito, se espera que al menos el 60% de los usuarios de los laboratorios la utilicen en sus experimentos y que al menos el 20% de los proyectos de investigación en ingeniería lo implementen en sus estudios.

La **utilidad** de la plataforma para caracterización radica en conocer la respuesta que tienen los actuadores vibrotáctiles en función de su aceleración para el dominio del tiempo. La plataforma se usa para contrastar a actuadores vibrotáctiles diseñados y fabricados en la facultad de ingenierías, versus los actuadores vibrotáctiles disponibles en el mercado, para conducir a mejoras en su eficiencia, rendimiento, operatividad y funcionalidad; y que así puedan entregar una mejor retroalimentación vibrotáctil.

El **beneficiario** de este trabajo de integración curricular son los usuarios de la plataforma, tanto investigadores y docentes como estudiantes que realizan pruebas de laboratorio para caracterizar actuadores para retroalimentación vibrotáctil.

La **factibilidad** técnica y científica se fundamentan en la **Introducción** y el **Estado del arte**, mediante los cuales se determina la disponibilidad en el mercado de las herramientas mecatrónicas y computacionales para el diseño, implementación y validación de la operatividad de la plataforma. La metodología y modelo operativo que se aborda son los lineamientos teóricos de la ingeniería concurrente, cuyos fundamentos se han desarrollado a lo largo de la carrera y son de dominio del investigador.

## **1.7 Objetivo general**

- Desarrollar un prototipo de plataforma para la caracterización de actuadores vibrotáctiles basado en los lineamientos de la ingeniería concurrente.

### **1.7.1 *Objetivos específicos***

1. Convertir a los requerimientos del cliente en los criterios de diseño, evaluándolos mediante la función de la calidad para conocer cuáles tienen mayor puntuación técnica en el diseño.
2. Diseñar la plataforma de caracterización de actuadores vibrotáctiles aplicando una metodología para manufactura y ensamble que permita que los componentes sean fabricables, se ensamblen en un tiempo eficiente y con comodidad, para simplicidad y economía de los procesos productivos.
3. Validar mediante pruebas de laboratorio que el dispositivo puede ser operado fácilmente por un usuario y que es capaz de entregar medidas de caracterización satisfactorias, para ser un primer prototipo.

## Capítulo II

### 2.1 Ingeniería del proyecto

#### 2.1.1 *Área de estudio*

**Área de estudio:** Gestión sostenible de productos.

**Dominio:** Tecnología y sociedad.

**Línea de investigación:** Gestión sostenible de productos.

**Sub-Línea:** Diseño concurrente, que integra los métodos herramientas y procesos de manera holística para la resolución de problemas industriales de ingeniería.

**Campo:** Ingeniería Industrial.

**Área:** Procesos de manufactura.

**Aspecto:** Calidad de diseño, ingeniería asistida por computador y manufactura aditiva.

**Objetivo de estudio:** Desarrollar un prototipo de plataforma para la caracterización de actuadores vibrotáctiles basado en los lineamientos de la ingeniería concurrente.

**Periodo de análisis:** 2023 - 2025.

#### 2.1.2 *Modelo operativo*

En lo concerniente al desarrollo de la plataforma para caracterización de actuadores vibrotáctiles, que en adelante se representa por las siglas: PCAV, se aplica el modelo operativo de ingeniería concurrente, que es una metodología integral que combina métodos, herramientas y procesos para abordar desafíos en el ámbito industrial y de ingeniería. Esta filosofía facilita la unificación de las habilidades empresariales necesarias para producir un producto (Aroca Aparicio, 2020).

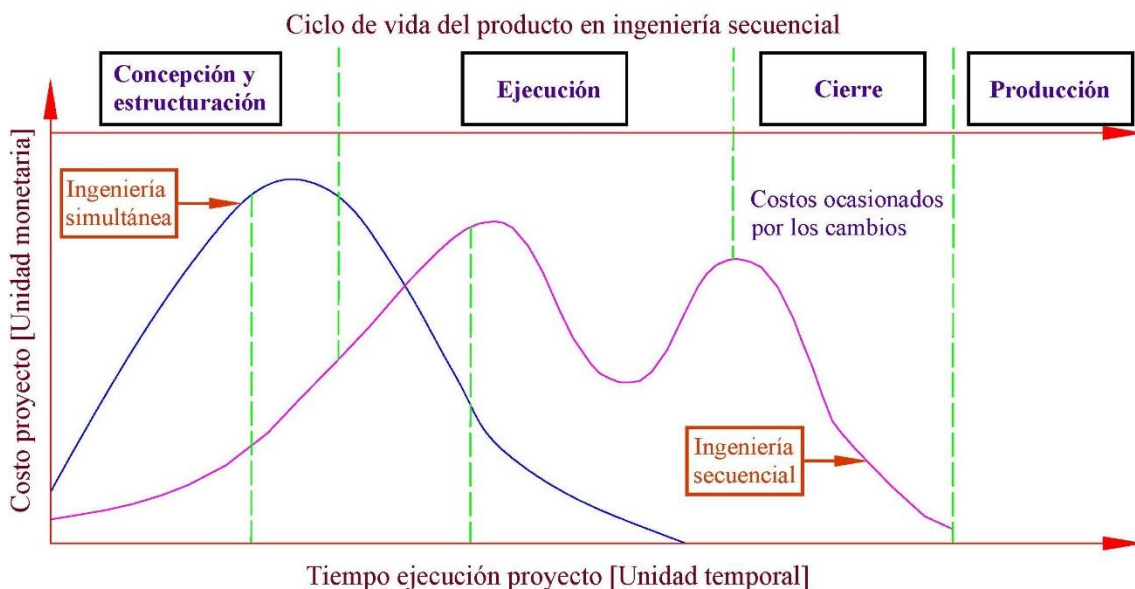
En la práctica de la ingeniería concurrente se deben integrar herramientas asistidas por computador para diseñar, manufacturar u obtener cálculos y criterios ingenieriles.

Convencionalmente estas herramientas se abrevian como CAD, CAM & CAE respectivamente (Lean Components, 2024).

En la **Figura 32** se muestra la trayectoria de un proyecto que desarrolla un producto cualquiera con dos perspectivas. La primera es la ingeniería secuencial que consiste en un enfoque habitual donde cada departamento que recibe la información inevitablemente detecta errores desde su especialidad y devuelve la información al departamento inicial que ahora se debe encargar de solventar las correcciones necesarias. La segunda perspectiva es la de la ingeniería concurrente; cuyas curvas de rendimiento al compararse demuestran una notable reducción en el tiempo de desarrollo para el ciclo de vida del producto (Lean Components, 2024).

**Figura 32**

*Ciclo de Vida del Producto bajo las perspectivas de la Ingeniería Secuencial y Concurrente.*



*Nota.* Elaborado por el investigador con software CAD. *Adaptado de Ingeniería Concurrente. 6 metodologías de implantación*, (p. 3), por (Lean Components, 2024). Lean Components.

En el modelo operativo de la ingeniería concurrente diferentes disciplinas y fases del proyecto trabajan juntas para la obtención del producto. Para el caso de la PCAV se integran conocimientos de diversas ingenierías, tales como: Mecánica, electrónica, control y/o programación, diseño, y ciencias de la computación para su concepción, desarrollo, implementación y validación. El diseño iterativo se aplica en este modelo operativo por ser necesario desarrollar pruebas y refinamientos continuos entre todos los componentes de hardware y software del prototipo (Ingeniería Industrial, 2023).

En cuanto a la optimización de los procesos productivos también puede ser resuelta por los principios de este modelo operativo, ya que tiene en cuenta factores como costos, tiempo y calidad, de tal manera que los recursos que se destinan se aprovechan de mejor manera en la materialización del producto (Lean Components, 2024).

La ingeniería concurrente pone un énfasis especial en satisfacer los requerimientos del cliente. Para el caso de la PCAV, se reflexiona también acerca de cómo entregar al usuario un sistema que sea de fácil operación (Aroca Aparicio, 2020).

Para el diseño de la PCAV se propone la unificación de dos procedimientos provenientes de la ingeniería concurrente: El primero es el diseño para la fabricación y el ensamble (DFMA, por sus siglas en inglés) que contribuye a la mejora en la fabricación y el proceso de montaje. El segundo es el despliegue de la función de la calidad (QFD, por sus siglas en inglés) que prioriza a las necesidades del cliente. Juntos conforman una herramienta para que el diseñador logre asegurar una mayor eficiencia, un menor gasto y una calidad superior (Coba-Salcedo et al., 2020).

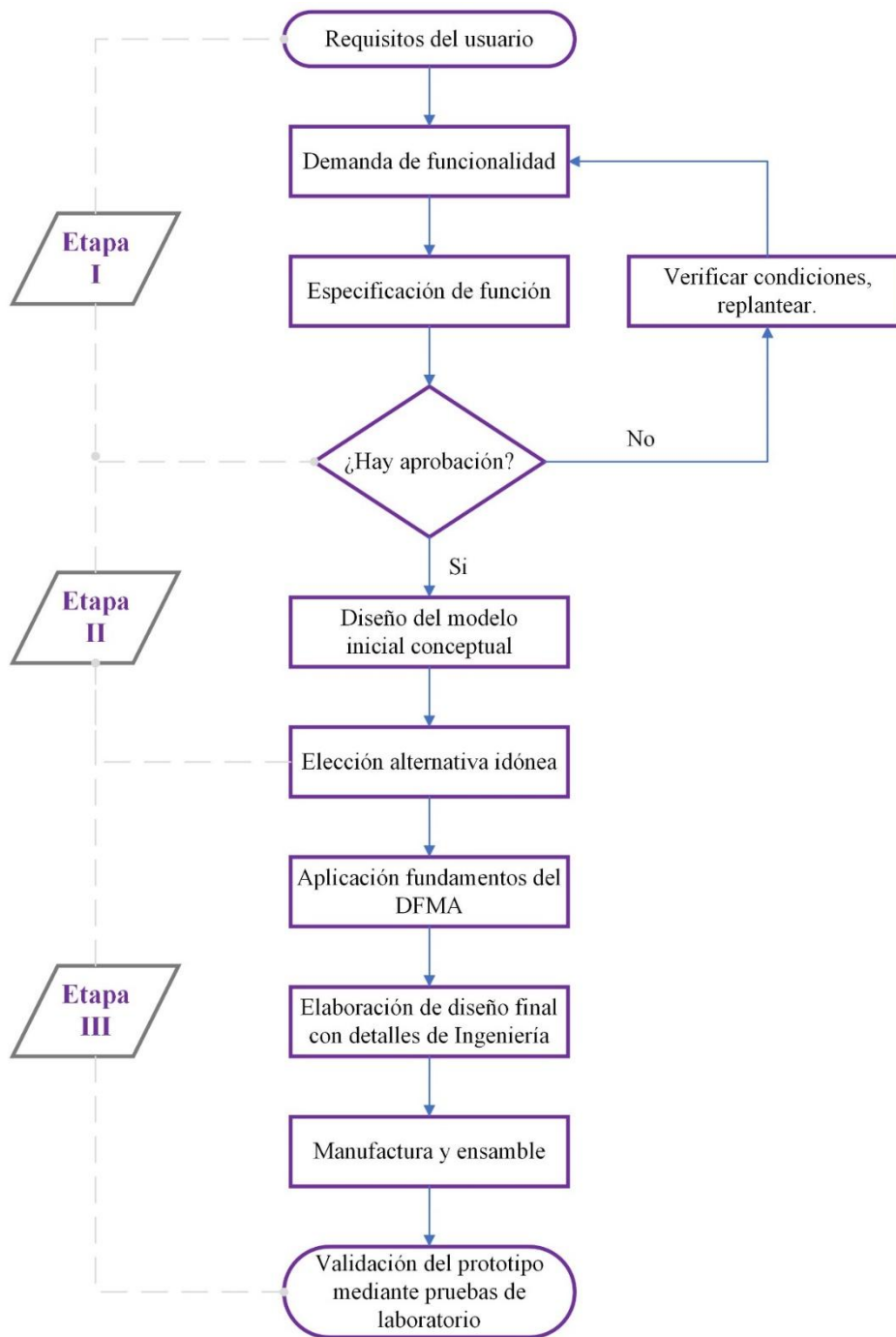
Ambos procedimientos de la ingeniería concurrente se dividen en tres fases que son:

- I. Etapa del QFD: Reflejar los requerimientos del cliente que se reúnen y ponderan en un rango del 1 al 5. Los calculados con mayor peso se mudan a requerimientos funcionales ingenieriles.
- II. Etapa de selección de la mejor alternativa, mediante el cálculo de matrices de decisión.
- III. Etapa del DFMA: Consiste en la configuración inicial del prototipo para conferirle una estructura operativa y garantizar el potencial de fabricación, acompañado de un ensamble fácil. Finaliza con pruebas de laboratorio que se aplican al prototipo para validar su operatividad.

En la **Figura 33** se observa el diagrama de flujo que se aplica para el desarrollo de la PCAV, basado en el modelo operativo de ingeniería concurrente, que se compone a su vez de los fundamentos del QFD y DFMA.

**Figura 33**

*Diagrama de Flujo del Modelo Operativo de Ingeniería Concurrente para la PCAV.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador con normativa ANSI. Adaptado de *Aplicación de la Ingeniería Concurrente orientada a la fabricación de una herramienta para la extracción de tuerca-corona en una excavadora* (p. 199 de 212), por (Coba-Salcedo et al., 2020), Revista UIS Ingenierías.

## Capítulo III

### 3.1 Propuesta de la metodología

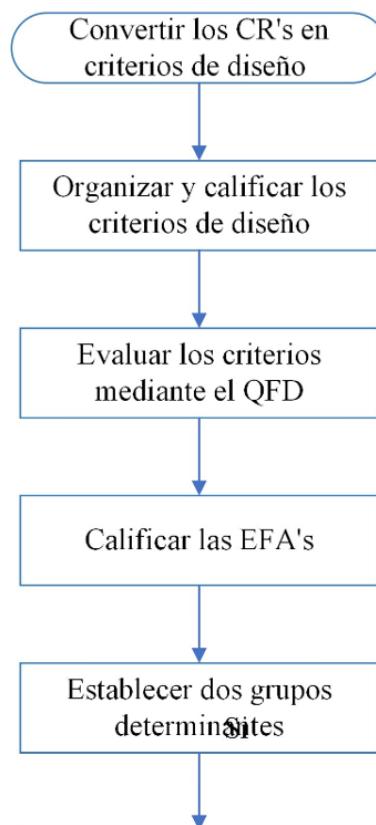
Con la integración del QFD y el DFMA en el modelo operativo de la ingeniería concurrente, se propone una metodología que articula a los lineamientos teóricos e ingenieriles para acuñar el diseño, fabricación, ensamble y validación de la operatividad del prototipo.

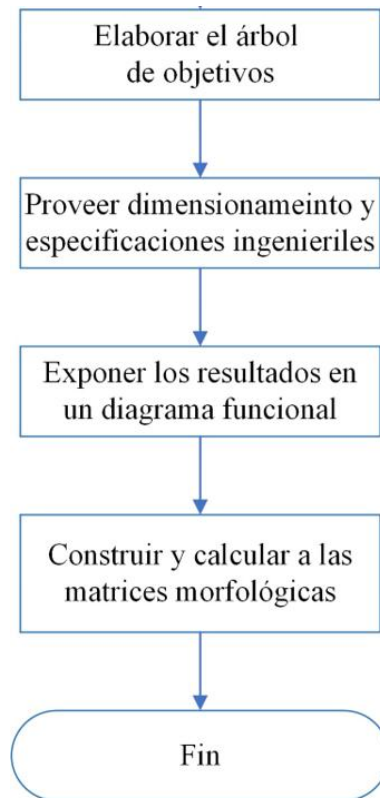
#### 3.1.1 Metodología para la etapa I con el despliegue de la función de la calidad

En la **Figura 34** se expone el diagrama de flujo con la metodología de la etapa I.

**Figura 34**

*Diagrama de Flujo de la Metodología para la Etapa I, que incluye el QFD.*





*Nota.* Desarrollado por el investigador con normativa ANSI.

El paso inicial es convertir a los requerimientos del cliente (CR's, por sus siglas en inglés) en los criterios de diseño. Estos criterios se organizan y califican con una escala cuantitativa de 1 a 5 para evaluarlos mediante la función de la calidad.

Las atribuciones funcionales ingenieriles (EFA's, por sus siglas en inglés) se califican para conocer cuáles tienen mayor puntuación técnica en el diseño.

A partir de dichas calificaciones se establecen dos grupos determinantes que tienen la mayor relevancia en el diseño. También se elabora un árbol de objetivos que muestra la jerarquía de las EFA's. Esta jerarquía determina las funciones primordiales de la PCAV y su estructura práctica.

Los bloques de la estructura práctica se proveen de dimensionamiento y especificaciones ingenieriles, tales que solventen a las demandas impuestas por las competencias de

procedimiento principal y secundarias del sistema. Los resultados que se alcanzan se exponen en un diagrama funcional.

Para analizar y determinar las ventajas o inconvenientes en las configuraciones expuestas en el diagrama de funcionalidad se construyen y calculan matrices morfológicas.

### ***3.1.2 Metodología de la etapa II para la selección de la mejor alternativa***

En la segunda fase del modelo operativo se selecciona a la mejor opción mediante matrices de decisiones. Cada alternativa se evalúa con un puntaje del 1 al 9 para conocer su relevancia.

Posteriormente se multiplica el valor del criterio por la calificación de la alternativa, para obtener un acumulado. Se finaliza con la sumatoria de los totales y se elige la alternativa de mayor puntuación. Hasta esta instancia el diseño conceptual presenta el modelamiento de la PCAV y los mecanismos necesarios para desarrollarla.

### ***3.1.3 Metodología para la etapa III: DFMA mediante Boothroyd & Dewhurst***

En la tercera fase se aplica la metodología de Boothroyd & Dewhurst para garantizar que los componentes sean fabricables y se ensamblen con comodidad para simplicidad y economía de los procesos productivos ( Boothroyd et al., 2021).

Se realiza un estudio ingenieril de las propiedades fundamentales de los filamentos para impresión 3D, que tienen el potencial de implementación en la PCAV. Con la información de esta investigación se construyen matrices de priorización mediante los criterios de Ashby & Jones (Ashby y Jones, 2008).

La ponderación de los materiales que constituyen a la PCAV se realiza mediante el análisis de cada criterio y de su importancia relativa en el contexto de la evaluación.

### ***3.1.4 Metodología para la validación de la estructura del prototipo***

Para este análisis experimental se consideran las siguientes propiedades del prototipo: Su rigidez, cómo se transmiten las cargas entre las partes que se unen, así como sus secciones, longitudes y método de ensamble; por ser todos estos factores que afectan a las frecuencias naturales con las que trabaja el sistema (Picazo, 2017).

#### **3.1.4.1 Diseño del experimento para conocer la respuesta de la aceleración**

**de las vibraciones en la estructura del prototipo.** Con el diseño del experimento se busca conocer si los picos de las ondas se generen antes o después de que la frecuencia de conducción, alcance a la frecuencia de resonancia (StudySmarter, 2024).

Es importante tener en cuenta que la presencia de amortiguamiento en el sistema puede afectar la relación entre la frecuencia de conducción y la frecuencia de resonancia, y por lo tanto, el momento en que ocurren los picos de las ondas (StudySmarter, 2024).

Para el diseño del experimento se emplea el análisis dinámico modal experimental, por ser una técnica que permite evaluar la respuesta en frecuencia y amortiguamiento del sistema. Consiste en determinar las frecuencias naturales y los modos de vibración de la estructura (Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales (CATEC), 2023).

El análisis dinámico modal experimental consta del siguiente proceso: Excitar a la estructura, mensurar el estímulo con un sensor acelerómetro, procesar los datos medidos, y conocer el valor de la aceleración de las vibraciones.

**3.1.4.2 Respuesta de la PCAV ante la simulación de las vibraciones.** El diseño de las bases nivelantes originalmente proporciona estabilidad estructural, siendo conectadas a través de elementos de unión mecánica. Luego este pensamiento de diseño se itera y modifica, para hacer que las bases nivelantes se ensamblen a través de resortes o muelles para absorber las vibraciones que se produzcan en la ejecución de los experimentos.

Las frecuencias de vibración que se simulan en el experimento de validación representan eventos tales como: Herramientas eléctricas menores que operan cerca de la PCAV, impactos leves en la mesa de trabajo, tipeo de información en el teclado del ordenador o laptop, funcionamiento de parlantes o de teléfonos celulares, etcétera.

Al iterar el pensamiento de diseño se generan las tres alternativas de la **Tabla 2**.

**Tabla 2**

*Configuración de las Tres Alternativas de Diseño para Validar a la PCAV.*

Denominación de la alternativa	Componente iterado	Características	
		mecánicas del componente	Dimensiones
Iteración N. ° 1	Muelle de compresión	$k \approx 1.395 \left[ \frac{N}{m} \right]$	Ø del alambre =
			1.8 [mm].
Iteración N. ° 2	Muelle de compresión	$k \approx 13.55 \times 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$	Ø exterior =
			12.0 [mm]
Iteración N. ° 2	Muelle de compresión	$k \approx 13.55 \times 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$	Ø del alambre =
			1.0 [mm].
Iteración N. ° 2	Muelle de compresión	$k \approx 13.55 \times 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$	Ø exterior =

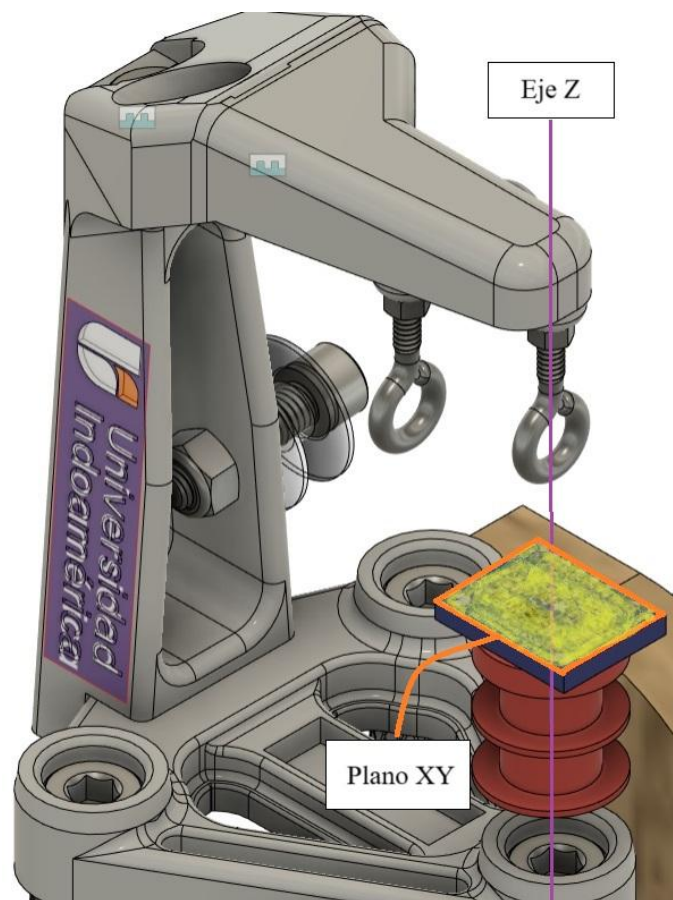
			10.0 [mm]
<b>Iteración N. ° 3</b>	Perno tipo Allen	$k \approx 138.57 \left[ \frac{kN}{m} \right]$	M8X70.0X 1.25 [mm]

*Nota.* Elaborado por el investigador.

En las bases nivelantes se instala la instrumentación que consta de un nivel tubular y otro circular, mismos que garantizan que la medición de la aceleración se evalúe en el *eje*  $\rightarrow Z$ ; para lograr que la aceleración sea normal o perpendicular al *plano XY* con respecto al sensor que mide la aceleración, tal como se representa en la **Figura 35**.

**Figura 35**

*Plano Cartesiano XY respecto al cual se mide la Aceleración en el Prototipo de la PCAV.*

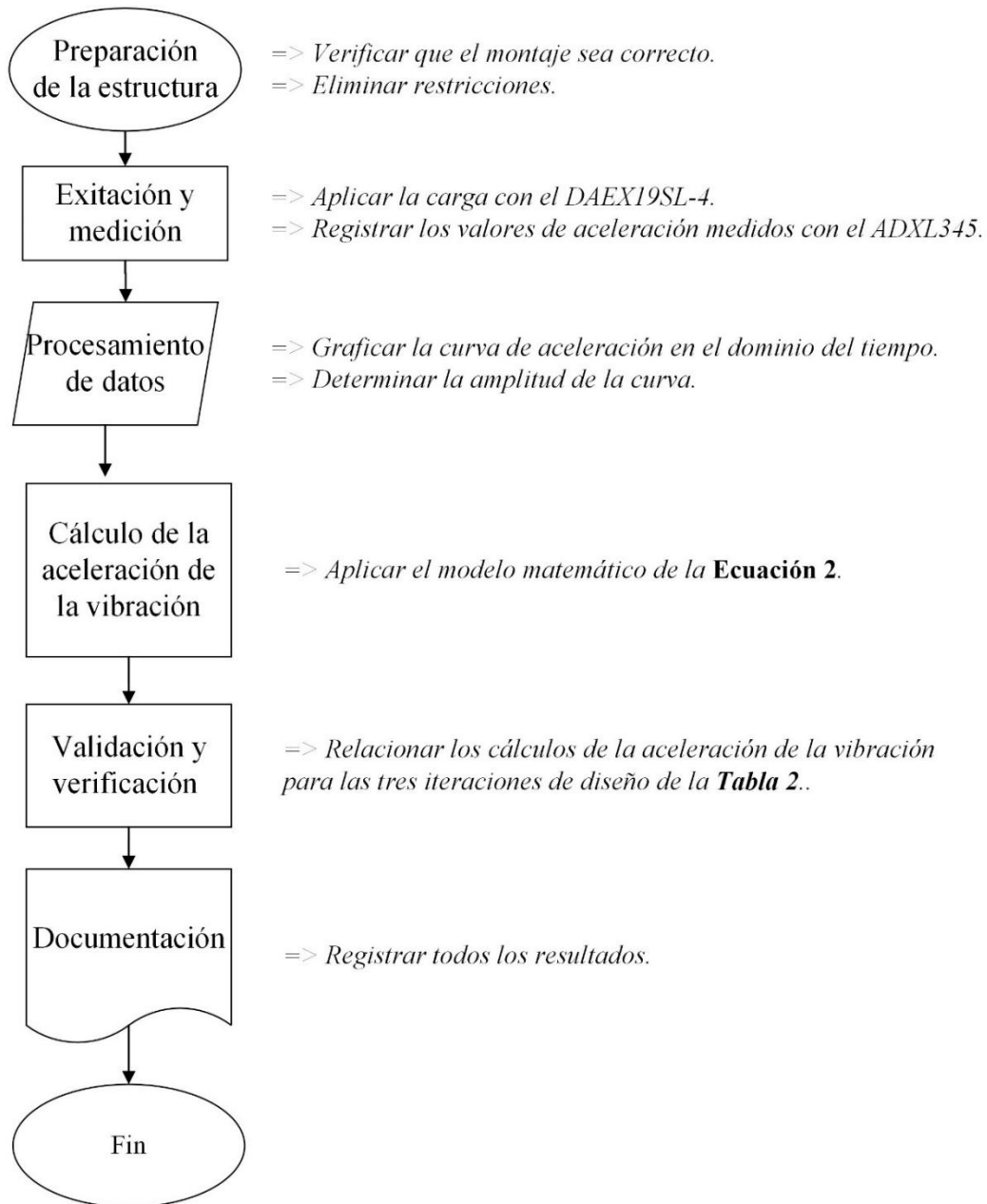


*Nota.* Elaborado por el investigador con herramienta CAD.

En la **Figura 36** se presenta el diagrama de flujo del experimento para conocer la respuesta de la aceleración de las vibraciones en la estructura de la PCAV.

**Figura 36**

*Diagrama de Flujo para Análisis Experimental de la Aceleración de Vibraciones en la PCAV.*

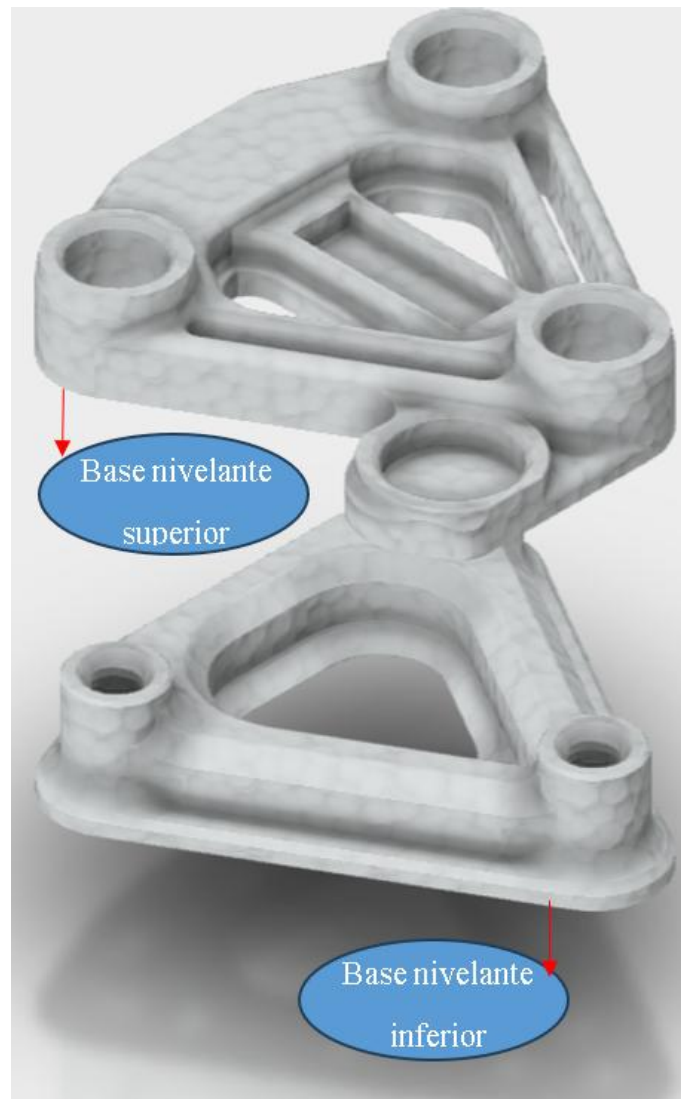


*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Pruebas de carga estáticas y dinámicas en una plataforma de madera estructural* (p. 71), por (Ruiz Diaz, 2022), Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales.

**3.1.4.3 Preparación de la estructura.** Para la iteración de los tres arreglos estructurales diferentes, se varía el ensamble entre los componentes de la PCAV que se observan en la **Figura 37**.

**Figura 37**

*Componentes Estructurales del Prototipo de la PCAV.*



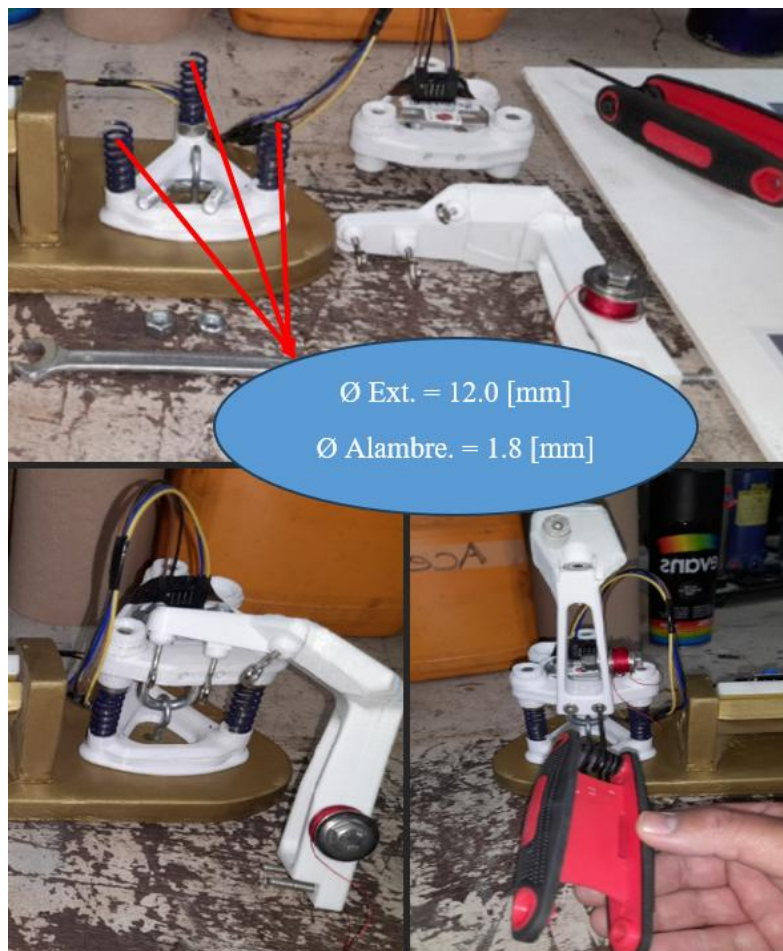
*Nota.* Elaborado por el investigador con herramienta CAD.

Entre estos dos componentes se instalan progresivamente dos juegos de resortes cilíndricos (trabajan a compresión) con distintos diámetros exteriores y de alambre.

El primer juego de muelles posee un diámetro del alambre de 1.8 [mm], su diámetro exterior es igual a 12.0 [mm] y su  $k \approx 1.395 \left[ \frac{N}{m} \right]$ , esta configuración se observa en la **Figura 38**. El siguiente juego de resortes tiene un diámetro de alambre igual a 1.0 [mm], su diámetro exterior es 10.0 [mm] y el valor de  $k \approx 13.55 \times 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$ , esta iteración se presenta en la **Figura 39**. Finalmente se experimenta con tres pernos de cabeza tipo Allen M8X70.0X1.25 [mm], acordes a la **Figura 40**.

### Figura 38

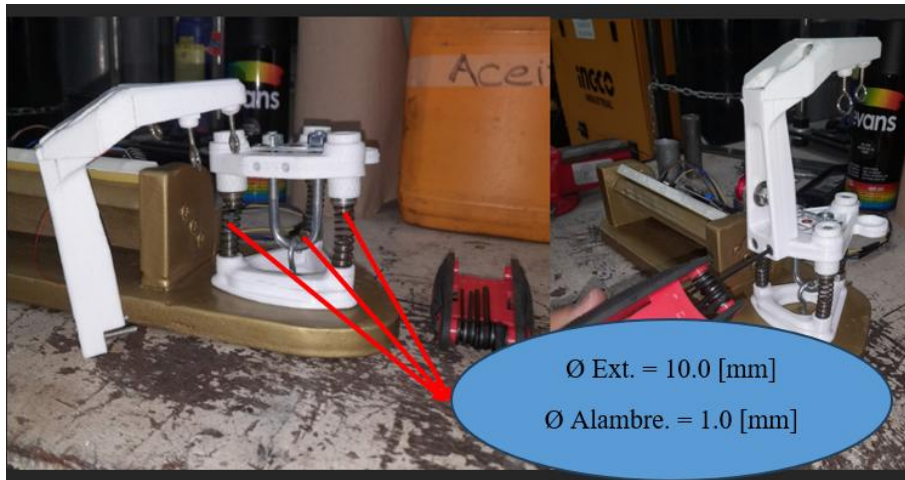
*1ª Iteración de Configuración Estructural del Prototipo: Tres Resortes  $\varnothing$  Exterior = 12.0 [mm].*



*Nota.* Elaborado por el investigador. Laboratorio de Manufactura UTI – FAING (marzo 2024).

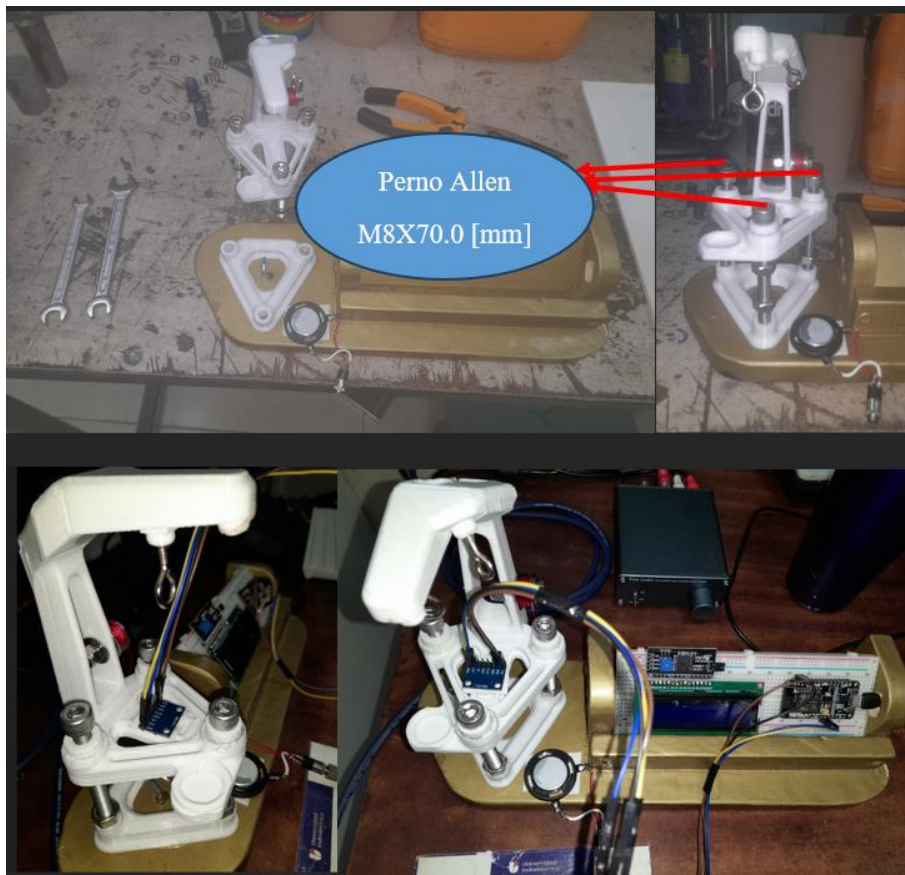
**Figura 39**

*2ª Iteración de Configuración Estructural del Prototipo: Tres Resortes  $\varnothing$  Exterior = 10.0 [mm].*



**Figura 40**

*3ª Iteración de Configuración Estructural del Prototipo: Tres Pernos Tipo Allen M8X70.0.*



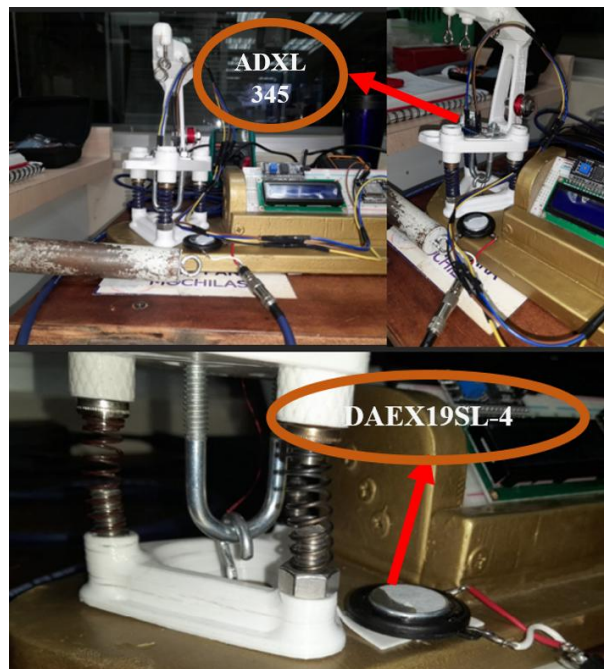
*Nota. Elaborado por el investigador. Laboratorio de Manufactura UTI – FAING (marzo 2024).*

**3.1.4.4 Excitación y medición.** Se ajusta el rango de medición del ADXL345 a  $\pm 2g$  y una resolución de  $10 \text{ [bit]}^4$ , vinculados a una sensibilidad de  $31.2 \left[ \frac{mg}{LSB} \right]^5$ . Esta sensibilidad implica que por cada  $31.2 \text{ [mg]}$  de aceleración detectado el  $\Delta$  de la salida digital es igual a  $1 \text{ [LSB]}$ .

Para excitar a la PCAV se aplican vibraciones con diferentes frecuencias. La configuración del montaje para el experimento se observa en la **Figura 41**.

**Figura 41**

*Arreglo Experimental para Inducir Vibraciones en la Estructura del Prototipo.*



*Nota. Elaborado por el investigador. Laboratorio de Manufactura UTI – FAING (marzo 2024).*

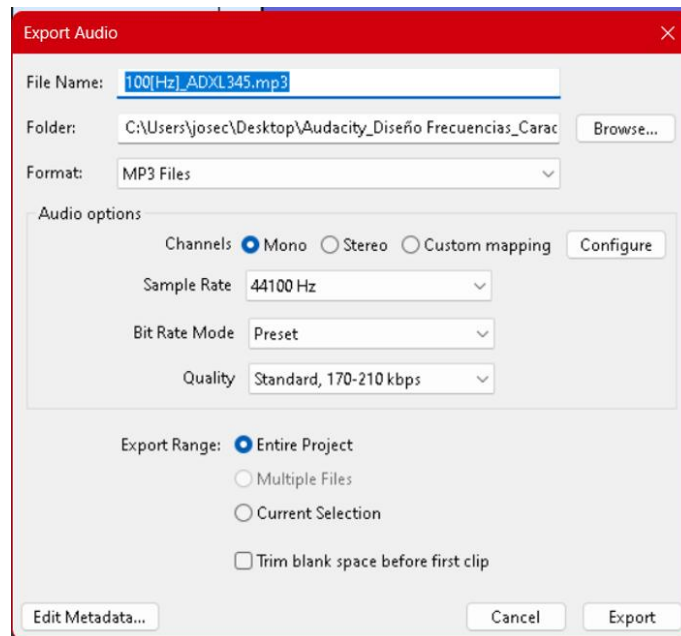
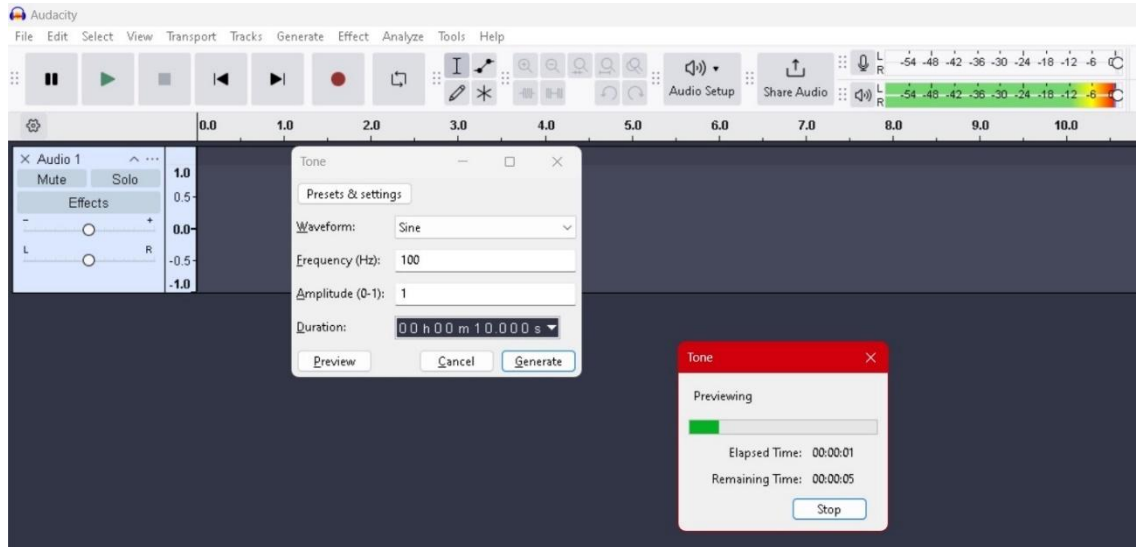
<sup>4</sup>  $1 \text{ [bit]}$  simboliza a la variación más pequeña en la salida digital que puede reflejar un cambio en la aceleración detectada por el aparato (Engineering, 2024).

<sup>5</sup> La unidad de medida  $\left[ \frac{mg}{LSB} \right]$  se emplea para indicar la sensibilidad del acelerómetro. El numerador se compone de  $[mg]$ : Miligravedad, que es la medida de una milésima parte de la fuerza de la aceleración gravitatoria terrestre, es decir  $1 \text{ [mg]} = 0.001 \times 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \equiv 0.00981 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ . En el denominador se encuentra el  $[LSB]$ : Es el acrónimo de “Bit Menos Significativo”. La sensibilidad indica que el  $\Delta$  de aceleración está vinculado al incremento de  $1 \text{ [bit]}$  en la salida digital.

Las señales de excitación que se aplican en el experimento son sinusoidales y se diseñan con diferentes frecuencias en el software Audacity, para luego exportarlas a formato .mp3, como se indica en la **Figura 42**.

**Figura 42**

*Diseño de señales para el Análisis de la Aceleración.*



*Nota. Elaborado por el investigador. Laboratorio de Manufactura UTI – FAING (marzo 2024).*

Las frecuencias que se modelan corresponden a: 100 [Hz], 300 [Hz] y 500 [Hz] para simular vibraciones externas al experimento; estas se almacenan en un Smart Phone

Samsung Galaxy A12. Luego la señal eléctrica se magnifica utilizando el amplificador del fabricante ST Microelectronics, modelo TDA7498E (ver ficha técnica en **Anexo 3**).

Las señales amplificadas se reproducen sobre la estructura del prototipo empleando el actuador vibrotáctil de Dytonaudio, modelo DAEX19SL-4 (ver la ficha técnica en el **Anexo 4**).

Durante todo el procedimiento es importante controlar que el volumen de la salida de audio del teléfono celular sea el mismo, que en este caso se fija en un nivel de 10.

La programación en el **Anexo 5**, instala el controlador <Adafruit\_ADXL345\_Unified>, para poder interactuar con el ADXL345. Más adelante en la línea N°27 de éste mismo código se llama a la función <getEvent>, que devuelve un objeto <event>; mismo que alberga en magnitudes de *fuerzas g* = {[*aceleración estática*]} + {[*aceleración dinámica*]}, a las aceleraciones de cada *eje* → X, Y & Z.

Para adquirir la aceleración se utiliza el ejecutable CoolTerm de 64Bit, como se representa en la **Figura 43**, que es compatible con Windows 11. Al interconectarse con el IDE de Arduino se logra obtener una nube de puntos como la de la **Figura 44**. Los valores en esta nube de puntos son las mediciones del ADXL345.

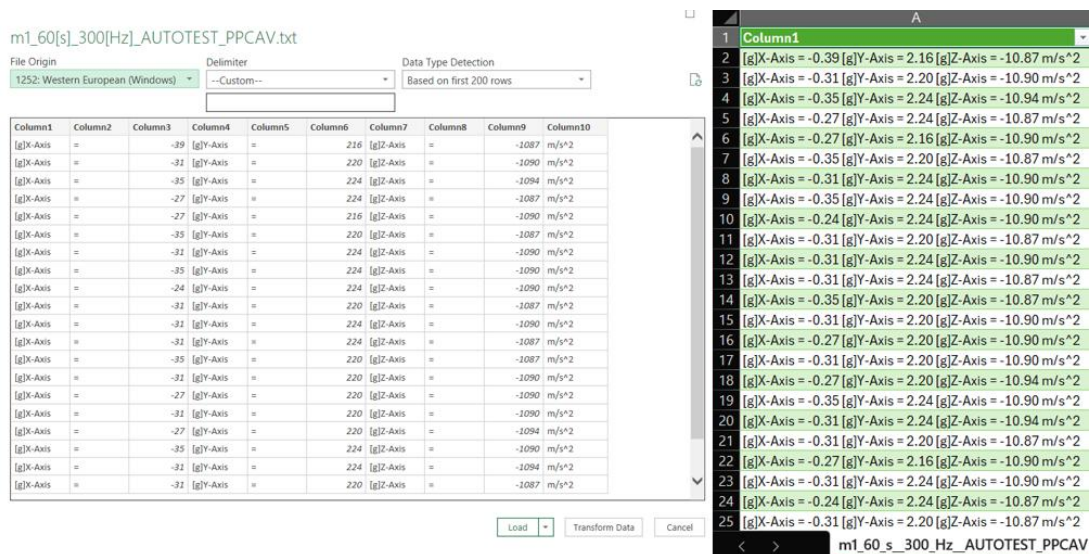
**Figura 43**

*Levantamiento de Datos del ADXL345, mediante Interconexión con CoolTerm64Bit.*



**Figura 44**

*Nube de Puntos provenientes desde CoolTerm64Bit en formato «.txt», cargadas a Excel 365.*



*Nota.* Elaborado por el investigador. Laboratorio de Manufactura UTI – FAING (marzo 2024).

## 3.2 Resultados esperados

### 3.2.1 Resultados de la etapa I, alcanzados mediante el QFD

Los requerimientos del cliente para el diseño del prototipo de la PCAV son cuatro: Bajo costo, precisión, enfoque en la fabricación-ensamble y orientación hacia la sostenibilidad. Los CR's derivan en las atribuciones funcionales ingenieriles. Los resultados alcanzados están en la **Tabla 3** (Coba et al., 2021).

**Tabla 3**

*Atribuciones Funcionales de Ingeniería de la PCAV.*

Requerimientos del cliente (CR's)	Atribuciones funcionales ingenieriles (EFA's)
1) <b>Bajo costo</b>	a) Costo tope producción \$500.00.
	b) Materia prima y tecnología disponibles en mercado local.
2) <b>Precisión</b>	a) Error admisible del 10% para un primer prototipo de la PCAV.
	b) Instalar un vibrómetro o acelerómetro compatible con el IDE (entorno de desarrollo integrado, por sus siglas en inglés) de Arduino.
	c) Sensor con ancho de banda o respuesta en frecuencia en el rango de 0.3 a 1000 [Hz]

---

(Remache-Vinueza B. et al.,  
2021).

---

**3) Enfoque en la  
fabricación y el  
ensamble**

- a) Materias primas de buenas propiedades como resistencia, elasticidad y amortiguación.
- b) Tolerancias dimensionales normalizadas.
- c) Diseño modular que se aplica con el enfoque de dividir a la PCAV en partes más pequeñas y manejables, para lograr independencia, reutilización, flexibilidad y escalabilidad.
- d) Uso de componentes estándar.

---

**4) Orientación hacia  
la sostenibilidad**

- a) Eficiencia energética mediante la definición del protocolo de comunicación idóneo entre la placa controladora y los sensores que se instalan en la PCAV.
  - b) Materiales sostenibles.
  - c) Durabilidad.
  - d) Facilidad de mantenimiento.
  - e) Enfoque holístico que analiza a la PCAV con una visión integral para considerar todos sus
-

---

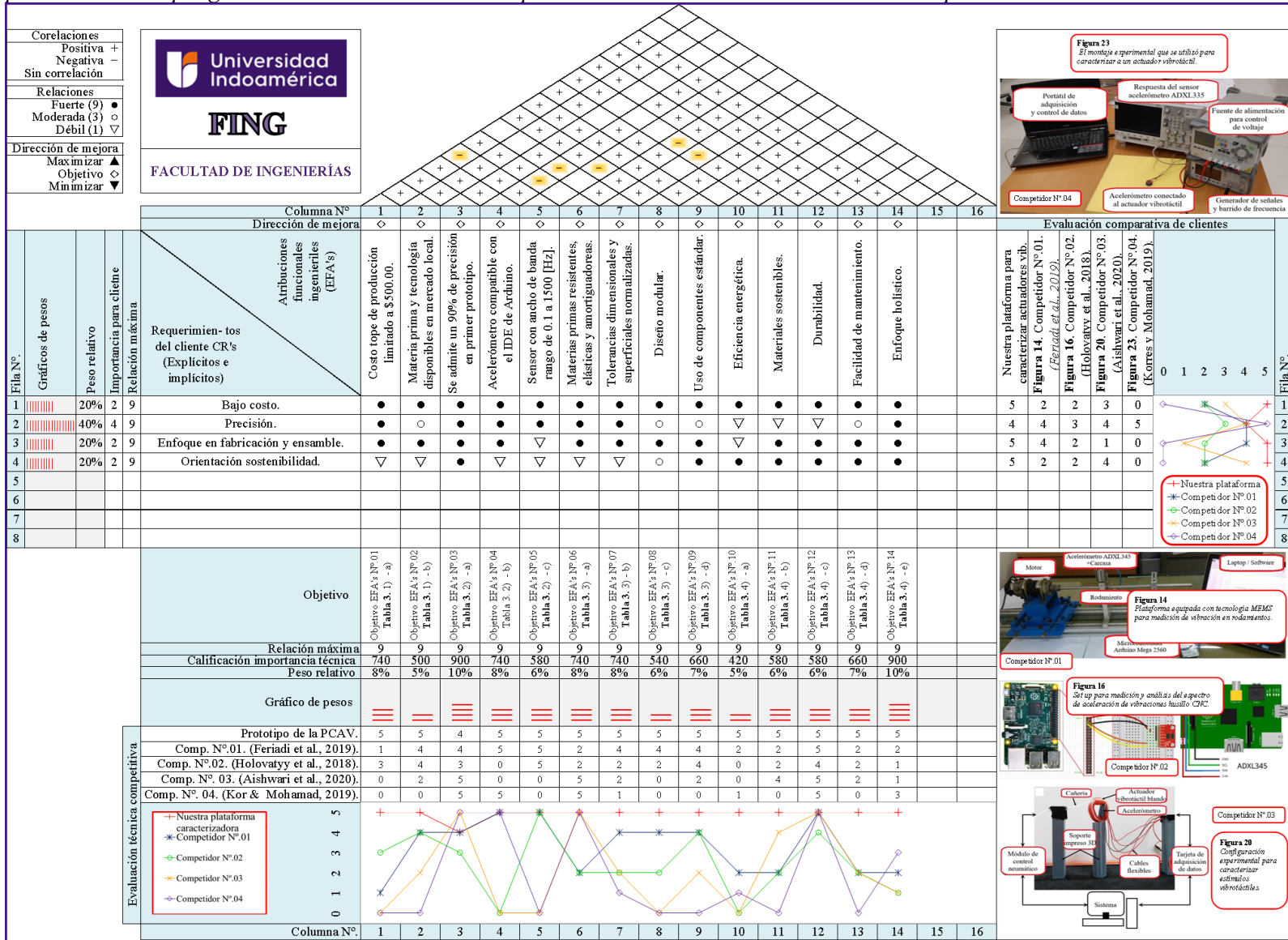
componentes y cómo interactúan  
e interconectan entre sí, en el  
entorno en el que operan.

---

*Nota.* Elaborado por el investigador.

Los resultados alcanzados con el QFD están disponibles en la **Figura 45**.

Figura45 Aplicación del Despliegue de la Función de la Calidad para la Primera Fase del Diseño del Prototipo de la PCAV.



Nota. Estrategia del QFD desarrollada por el investigador. Enlace: [https://indoamericaedu-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/jcastillo27\\_indoamerica\\_edu\\_ec/ETdrX7FN-wtNnKqK-rF7OOsBw1kY7xozv7C2lshx\\_K5IUw?e=zXNVHH](https://indoamericaedu-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/jcastillo27_indoamerica_edu_ec/ETdrX7FN-wtNnKqK-rF7OOsBw1kY7xozv7C2lshx_K5IUw?e=zXNVHH)

Estos resultados indican: Por una parte, que el requerimiento del cliente que tiene mayor peso relativo (40%) es la precisión del sistema, y por otra parte definen a las atribuciones funcionales de ingeniería con las mayores calificaciones de importancia técnica, que en orden descendente se presentan en la **Tabla 4**.

**Tabla 4**

*Calificaciones de Importancia Técnica para las Atribuciones Funcionales Ingenieriles.*

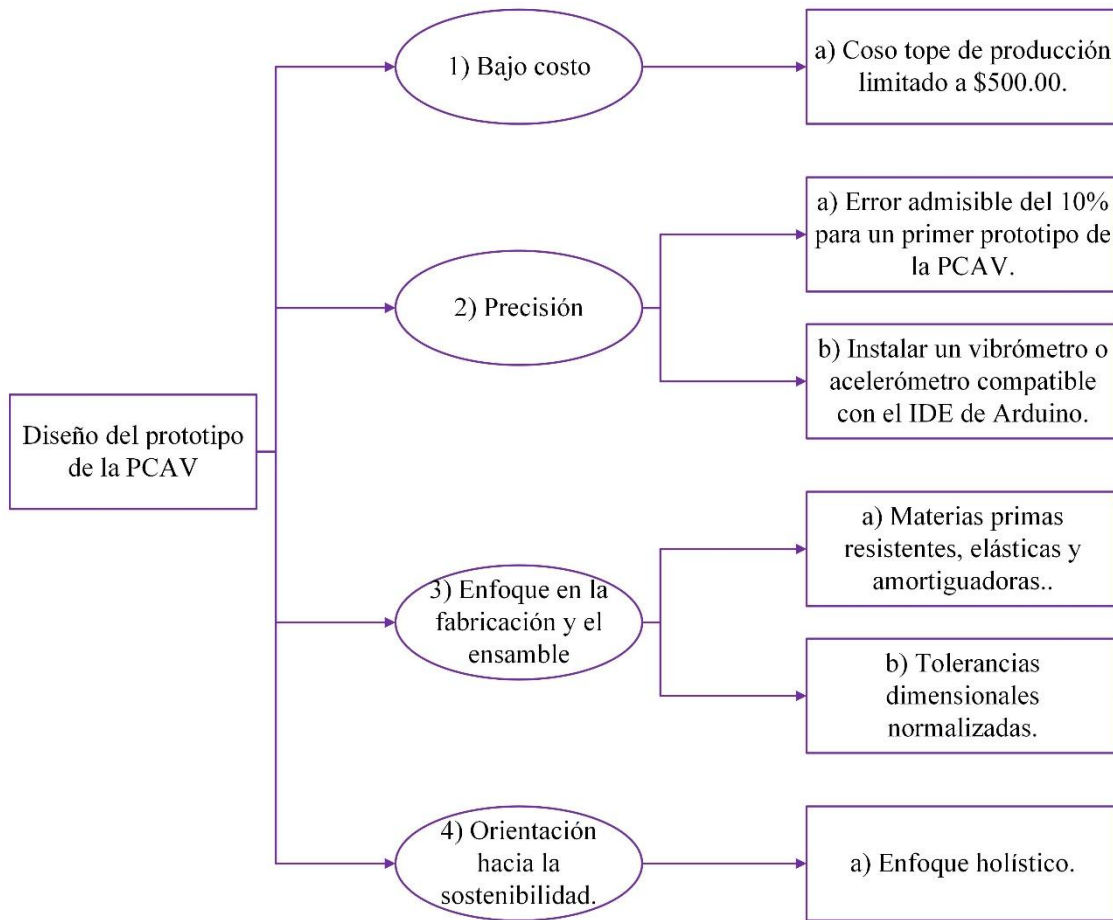
<b>Atribuciones funcionales ingenieriles</b>	<b>Calificación de importancia técnica</b>	<b>Peso relativo del QFD</b>
<b>Error admisible del 10% para un primer prototipo de la PCAV.</b>	900	10%
<b>Enfoque holístico.</b>	900	10%
<b>Costo tope de producción \$500.00.</b>	740	8%
<b>Acelerómetro compatible con el IDE de Arduino.</b>	740	8%
<b>Materias primas resistentes, elásticas y amortiguadoras.</b>	740	8%
<b>Tolerancias dimensionales normalizadas.</b>	740	8%

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Conforme a lo detallado en la casa de la calidad de la **Figura 45**, y según la **Tabla 4**, se elabora el árbol de objetivos de la **Figura 46**, que muestra la jerarquía de las atribuciones funcionales ingenieriles que tienen la importancia técnica más significativa para la eficiencia de la PCAV.

**Figura 46**

*Árbol de Objetivos: Jerarquía de las Atribuciones Funcionales de ingeniería de la PCAV.*

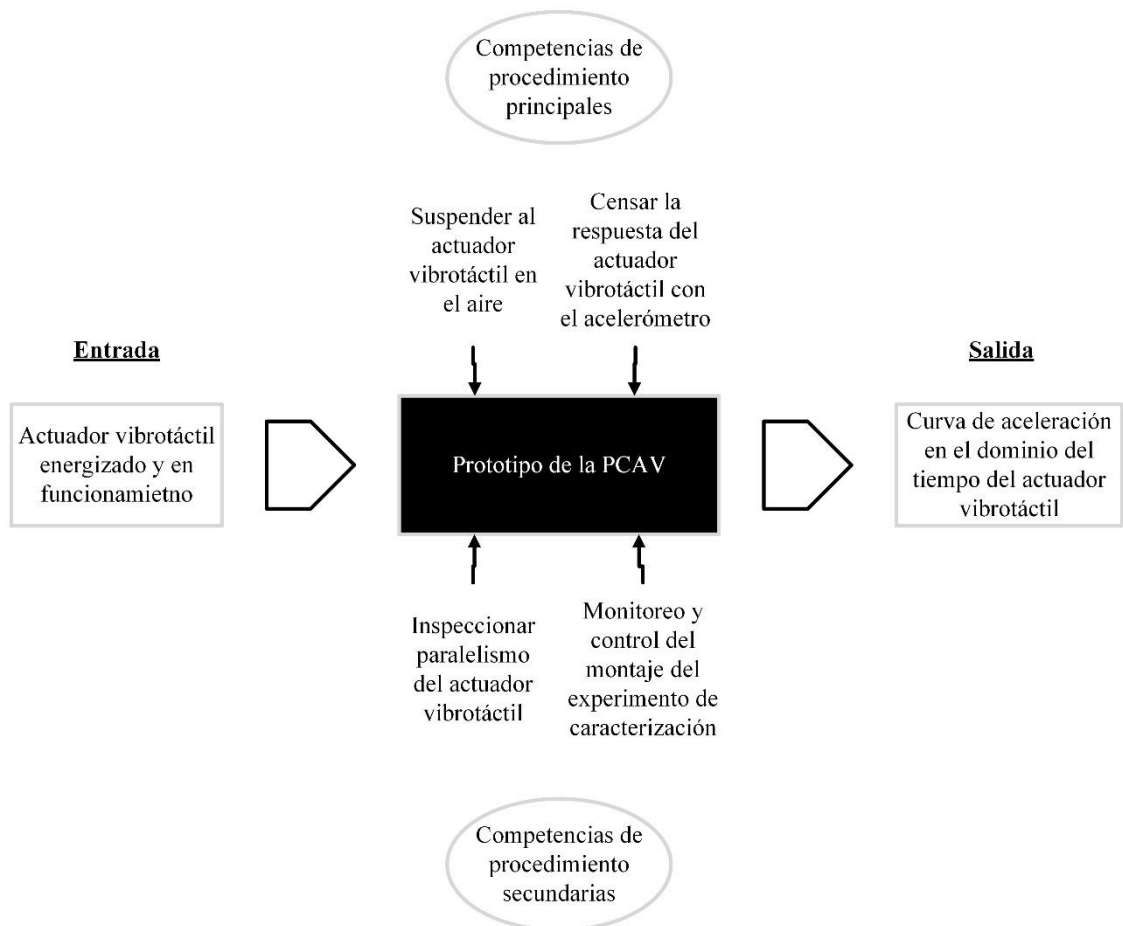


*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Mediante el método de la caja negra se indica la función principal de la PCAV, para poder relacionarla con las entradas y salidas del proceso. La caja negra utiliza competencias de procedimiento principales y secundarias para satisfacer a la función principal, como se indica en la **Figura 47**.

**Figura 47**

*Caja Negra de Entradas y Salidas del Proceso de Caracterización de Actuadores Vibrotáctiles.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Las competencias de procedimiento principales son: Suspender y sujetar en el aire al actuador vibrotáctil, administrarle una señal excitadora, censar la respuesta que entrega mediante el acelerómetro, almacenar la información en un archivo de texto plano (.txt) o valores separados por comas (.csv), graficar los valores levantados y en función de las curvas de aceleración que se grafican lograr caracterizar la aceleración dinámica en el dominio del tiempo, que tiene el actuador vibrotáctil.

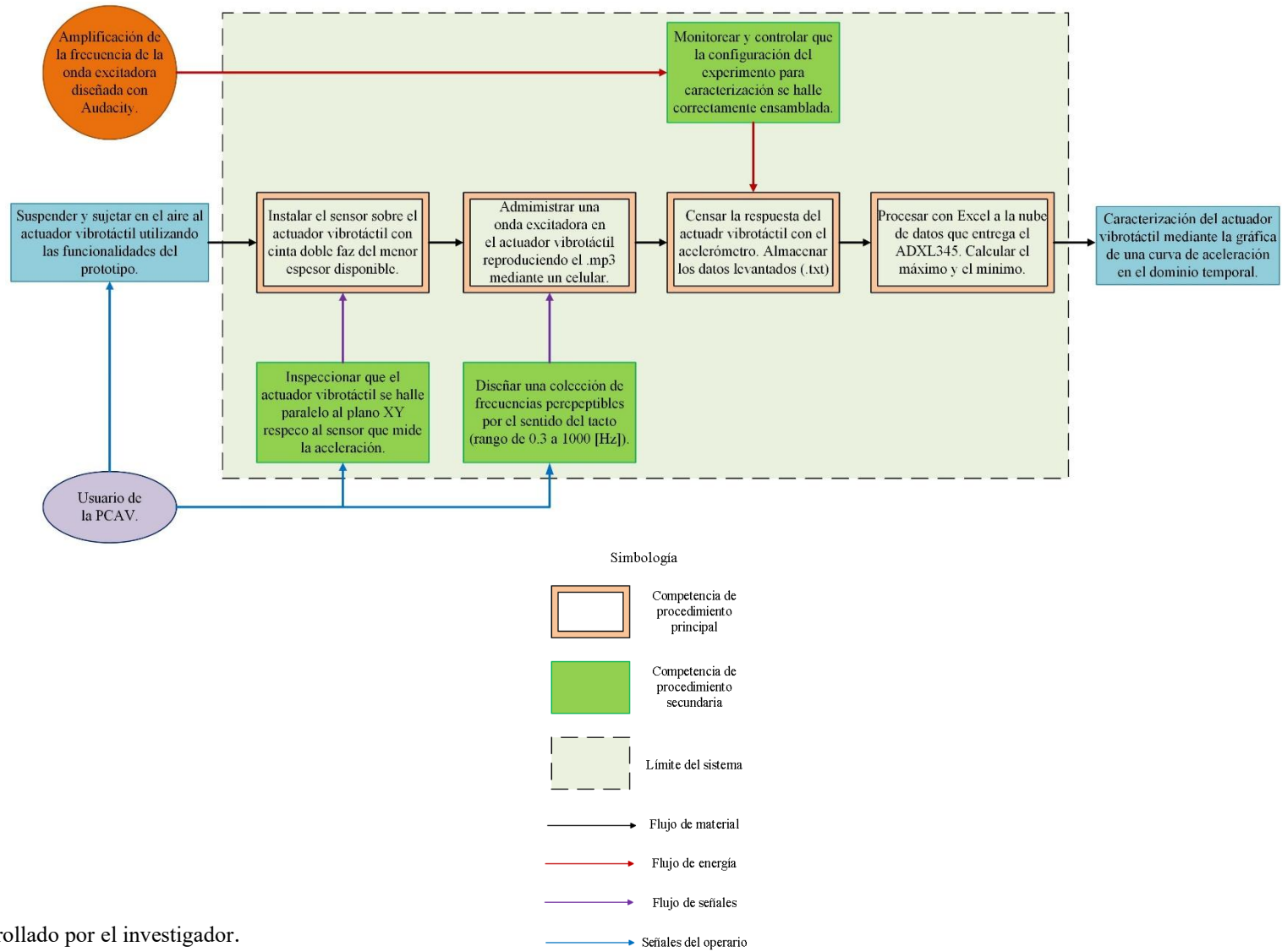
Las competencias de procedimiento secundarias son: Inspeccionar que el actuador vibrotáctil se halle paralelo al plano XY (respecto al sensor que mide la aceleración),

diseñar una colección de frecuencias perceptibles por el sentido del tacto (0.3 a 1000 [Hz]), monitorear y controlar que la configuración del experimento para caracterización se halle correctamente ensamblada en cuanto a conexiones entre equipos y dispositivos; o el funcionamiento eficiente del protocolo de comunicación para adquisición de datos.

Con la definición de ambas competencias de procedimiento se confecciona a la estructura utilitaria de la **Figura 48**.

**Figura 48**

*Estructura Utilitaria de las Competencias de Procedimiento Principal y Secundarias del Prototipo de la PCAV.*

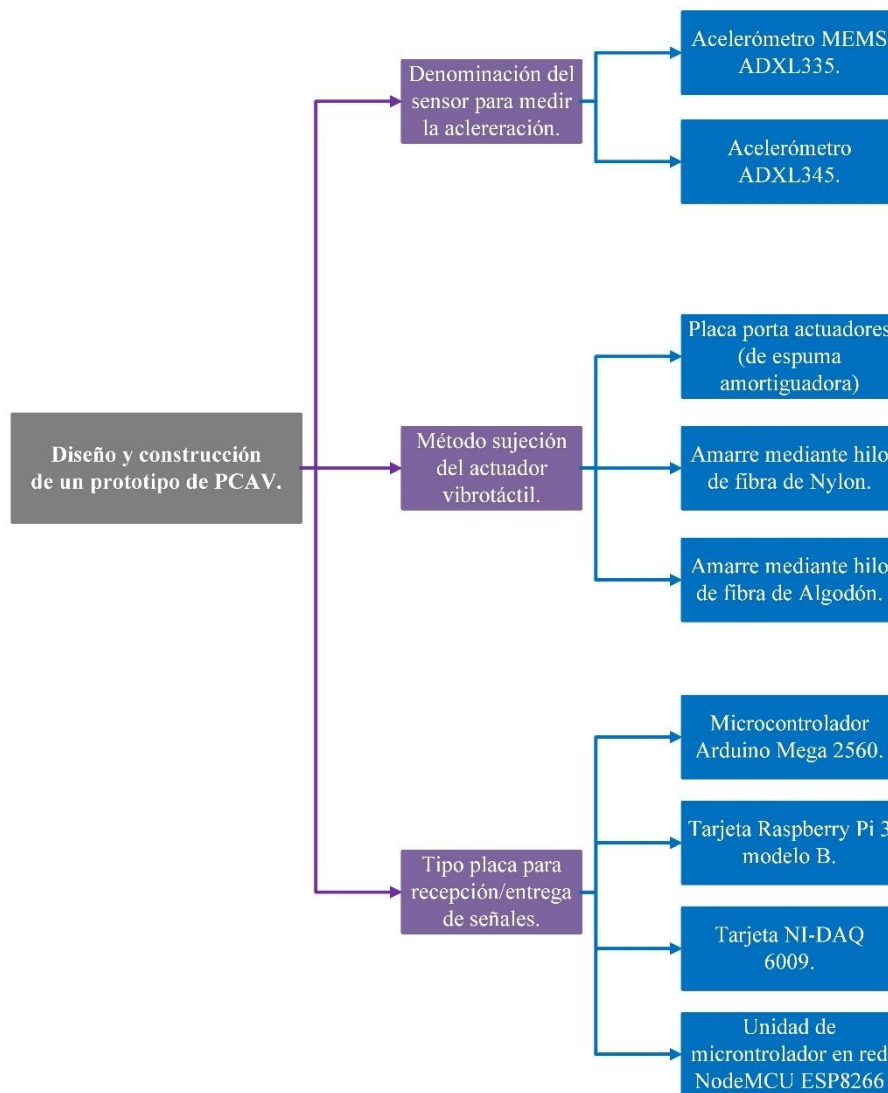


*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Esta estructura utilitaria brinda un vistazo general del sistema, con el límite de su campo de acción y los diversos bloques que lo integran, sin embargo, estos bloques deben ser provistos de dimensionamientos y características ingenieriles, de tal manera que se garantice una puesta en operación eficiente y que pueda brindar la calidad de precisión necesaria en los resultados esperados en los experimentos de laboratorio, que se detallan más adelante en esta misma investigación. La herramienta para presentar esta gama de atributos del sistema es el diagrama funcional de la **Figura 49**.

**Figura 49**

*Diagrama Funcional del Sistema que constituye al Prototipo de la PCAV.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Para analizar las ventajas e inconvenientes de las alternativas de este diagrama funcional se elaboran las matrices morfológicas de las **Tablas 5** a la **7**, para determinar las interacciones y dependencias más beneficiosas para la PCAV.

**Tabla 5**

*Definición de la Denominación más Beneficiosa del Sensor para Medir la Aceleración.*

<b>Denominación del sensor</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Acelerómetro MEMS ADXL335.</b>	Su implementación es beneficiosa en sistemas que emplean señales analógicas, por ser él mismo de naturaleza analógica.	Entrega mediciones con buena calidad de precisión en un rango corto que es igual a las $\pm 3$ [Fuerzas-g].	Orientación de dispositivos móviles (ajusta pantalla de modo vertical a horizontal).
		La banda de paso para los <i>ejes</i> $\rightarrow X, Y$ está en el rango de los 0.5 a 1600 [Hz].	
<b>Acelerómetro ADXL345.</b>	La frecuencia de salida es configurable hasta los 3200 [Hz]. La banda de paso en su límite inferior es igual a 0.1 [Hz].	El <i>eje</i> $\rightarrow Z$ posee una frecuencia de salida de 0.5 a 550 [Hz]	Es apto para instrumentación médica por tener una
		Puede llegar a consumir una mayor cantidad de energía si se lo compara con el	

Tiene un amplio rango de medición ofreciendo: $\pm 2g$ , $\pm 4g$ , $\pm 8g$ & $\pm 16g$ .	sensor analógico MEMS ADXL335.	resolución de hasta 13 [bits].
--	--------------------------------	--------------------------------

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

De acuerdo con el análisis de la **Tabla 5** el sensor ADXL345 tiene el potencial de ser más beneficioso porque su rango de medición es más amplio, es poseedor de una alta resolución y de funciones avanzadas. Estas ventajas pueden ofrecer datos de mayor precisión (un requerimiento del cliente) que aportan positivamente a la relación morfológica de un sistema eficiente.

**Tabla 6**

*Deducción del Método de Sujeción y Suspensión en el Aire para el Actuador.*

<b>Método de sujeción y suspensión.</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
<b>Placa porta actuadores (fabricada de espuma amortiguadora).</b>	Reduce el ruido vibratorio al absorber un porcentaje de las vibraciones no deseadas. Brinda estabilidad al minimizar desplazamientos con la combinación espuma más filamento.	Aporta un peso añadido al sistema y afecta la precisión en las mediciones. Requiere de un montaje complejo. La vida útil de la espuma se degrada con el tiempo.

	Esta fibra es ligera con lo que se suprime pesos adicionales.	Transmite vibraciones no deseadas, lo que perjudica la precisión en las mediciones.
<b>Amarre mediante hilo de fibra de Nylon.</b>	El Nylon es duradero, resistente y sujeta con seguridad al actuador. Facilita ajustar la longitud de la fibra para ubicar idóneamente al actuador.	Por su elasticidad puede elongar con el tiempo y modificar la posición del actuador. Tiene una baja aptitud amortiguadora.
<b>Amarre mediante hilo de fibra de Algodón.</b>	El algodón posee menos capacidad para transmitir vibraciones si se lo contrasta con el Nylon. Tiene mayor flexibilidad para ayudar en el aislamiento de vibraciones exteriores al actuador. Es biodegradable por lo que aporta al enfoque sostenible que es un requerimiento del cliente.	Puede desgastarse con mayor rapidez en comparación con el Nylon. Absorbe humedad con lo que se afecta su durabilidad y rendimiento. La consistencia en la sujeción y suspensión se puede alterar por la propia calidad de la fabricación de la fibra de algodón.

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

En las dos últimas propuestas de diseño conceptual el aire funciona como un medio natural para amortiguación, por tener propiedades como baja densidad, la capacidad de

reducir ondas vibratorias y/o sonoras, o su potencial de disminuir resonancias que amplifican el ruido (Mortimer et al., 2007).

Por ende, al suspender al actuador vibrotáctil en el aire se reduce el contacto con superficies rígidas que trasladan vibraciones no deseadas, e intrínsecamente el aire mejora la precisión de las mediciones durante el experimento.

De acuerdo con el análisis de la **Tabla 6** el método de sujeción y suspensión en el aire que más favorece a una medición precisa del comportamiento del actuador vibrotáctil en su componente de aceleración, es la fibra de Algodón, por transmitir vibraciones con menor intensidad, no aporta peso al sistema, se puede regular la longitud de la fibra y con ello la posición del actuador vibrotáctil, es biodegradable y de bajo costo.

**Tabla 7**

*Definición de la Placa más favorable para la Recepción y/o Entrega de las Señales.*

<b>Clase de placa/tarjeta.</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
<b>Microcontrolador Arduino Mega 2560.</b>	Uso fácil y recibe soporte de una extensa comunidad. Compatible con Arduino IDE para crear proyectos. Su costo en el mercado actual bordea los \$48.40.	No es aplicable en proyectos que demandan de gran precisión. Si se compara capacidad de procesamiento con Raspberry Pi es menor.
<b>Tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B.</b>	Puede manejar proyectos complejos de procesar y lo hace en tiempo real.	A julio 2024 su valor llega a los \$40.00. Alto consumo de energía.

	<p>Está provista de conectividad Bluetooth y Wifi (comm. inalámbrica). Se puede correr en sistema operativo total.</p>	<p>No tiene programación directa con el IDE de Arduino aunque se programa en diversos lenguajes.</p>
<p><b>Tarjeta NI-DAQ 6009.</b></p>	<p>También entrega alta precisión incluso para aplicaciones científicas. Es capaz de utilizar diversos canales de entrada y salida de señales (adquiere datos de algunos sensores a la vez).</p>	<p>Para este análisis es la más costosa llegando al monto de los \$ 250.00. Para implementarla en proyectos se requiere conocimientos especializados. Por sus dimensiones no es portable y demanda alimentación externa. Para analizar y visualizar datos se necesita el programa de LabVIEW o Matlab.</p>
<p><b>Unidad de microcontrolador en red NodeMCU ESP8266.</b></p>	<p>Trae integrada conexión mediante Wifi y tiene vinculación a redes IoT. Tiene un costo máximo a julio 2024 igual a \$10.00.</p>	<p>Si se contrasta con Raspberry Pi su procesamiento es pobre. No tiene una gran capacidad para memorizar datos.</p>

---

Fácil de programar con el entorno de desarrollo integrado de Arduino. Es factible conectar al sensor acelerómetro ADXL345 mediante el protocolo I<sup>2</sup>C.

---

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Dadas las atribuciones funcionales de ingeniería en la **Tabla 3**, y ya que la calificación de importancia técnica en la **Tabla 4** para el enfoque holístico es de 900 (10%), se hace el análisis dimensional de la placa Arduino Mega 2560 que tiene valores  $\approx 102 \times 54$  [mm] versus la ESP8266 con medidas de  $49 \times 26$  [mm], lo que resulta en que esta última es significativamente más pequeña para integrarse al sistema que constituye a la PCAV.

También se hace un análisis de la eficiencia energética de estas dos placas, como se observa en la **Tabla 8**.

**Tabla 8**

*Análisis de la Eficiencia Energética de la Placa ESP8266 vs. la Arduino Mega 2560.*

Denominación de la placa de electrónica	Voltaje de operación	Gasto de corriente	Eficiencia energética
Unidad de microcontrolador	3.3 [Volt]	De 15 [ $\mu A$ ] a 400 [ $mA$ ].En modo	Altamente eficiente en su consumo de energía ideal

<b>en red NodeMCU</b>		sueño profundo el	en proyectos que usan
<b>ESP8266.</b>		gasto es = $0.5 [\mu A]$	conectividad Wifi.
<b>Microcontrolador</b>			Menor que ESP8266
<b>Arduino Mega</b>	5.0 [Volt]	En operación normal	especialmente en
<b>2560.</b>		$\approx 50 [mA]$ .	proyectos que emplean
			conectividad permanente.

---

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

De acuerdo con el análisis de la **Tablas 8** la placa ESP8266 tiene mayor eficiencia energética que la placa Arduino Mega 2560 por su menor consumo de corriente y capacidad de operar con 3.3 [Volt].

Aparte de estas ventajas energéticas se destaca el menor tamaño de la ESP8266, lo que facilita su incorporación en el prototipo que se pretende sea modular, compacto y por ende más económico. La placa ESP8266 cumple también con la EFA de compatibilidad con el IDE de Arduino, en donde se trabaja su programación.

### **3.2.2 Resultados de la etapa II para la selección de la mejor alternativa**

Establecidas las consideraciones preliminares, se desarrolla ahora un procedimiento ingenieril mediante matrices de decisión para la selección de la denominación del sensor para medir la aceleración como se muestra en la **Tabla 9**.

**Tabla 9**

*Matriz de Decisión: Mejor Alternativa Técnica de Solución del Sensor de Aceleración.*

Valor del criterio	Alternativa Criterio	Acelerómetro MEMS		Acelerómetro	
		ADXL335	ADXL345	ADXL335	ADXL345
65%	Banda de paso	$C = 7.5$	$A = 4.88$	$C = 9.0$	$A = 5.85$
45%	Rango de medición	$C = 5.8$	$A = 2.61$	$C = 8.5$	$A = 3.83$
$\sum = 100\%$	Calificación total	$\sum = 7.49$		$\sum = 9.68$	
Leyenda		<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ : C=Calificación entre 1 al 9;</li> <li>➤ <math>A = Acumulado =</math></li> <li>➤ <math>C \times Valor del criterio.</math></li> </ul>			

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Por ende la alternativa de solución técnica de mayor calificación corresponde al acelerómetro ADXL345 con 9.68.

La matriz de decisión para la selección del método de sujeción y suspensión en al aire del actuador vibrotáctil se observa en la **Tabla 10**.

**Tabla 10**

*Matriz de Decisión: Mejor Alternativa Técnica de Solución para la Sujeción y Suspensión del Actuador Vibrotáctil en el Aire.*

Valor del criterio	Alternativa Criterio	Placa porta	Amarre y	
		actuadores (fabricada en espuma amortiguadora y filamento)	suspensión en el aire mediante fibra de Nylon.	Amarre y suspensión en el aire mediante fibra de Algodón
35%	Reduce ruido vibratorio	$C = 8.75$	$C = 7.5$	$C = 8.5$
		$A = 3.06$	$A = 2.63$	$A = 2.98$
25%	Bajo peso	$C = 4.5$	$C = 8.5$	$C = 9.0$
		$A = 1.13$	$A = 2.13$	$A = 2.25$
20%	Facilita ajuste/ubicación ideal de la posición del actuador	$C = 7.0$	$C = 9.0$	$C = 9.0$
		$A = 1.40$	$A = 1.80$	$A = 1.80$
10%	Biodegradable	$C = 6.5$	$C = 7.5$	$C = 9.0$
		$A = 0.65$	$A = 0.75$	$A = 0.90$
10%	Durabilidad	$C = 7.0$	$C = 8.5$	$C = 8.0$
		$A = 0.70$	$A = 0.85$	$A = 0.80$

---


$$\sum = 100\% \quad \text{Calificación total} \quad \sum = 6.94 \quad \sum = 8.16 \quad \sum = 8.73$$


---

Leyenda

- : C=Calificación entre 1 al 9;
  - $A = \text{Acumulado} = C \times \text{Valor del criterio}$ .
- 

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Para la PCAV la alternativa de mayor calificación corresponde al método de sujeción y suspensión mediante fibra de Algodón con un puntaje de 8.73.

Finalmente, se calcula la matriz de decisión que define a la selección de la clase de placa/tarjeta más adecuada en la **Tabla 11**.

**Tabla 11**

*Matriz de Decisión: Mejor Alternativa Técnica de Solución para la Placa y/o Tarjeta de Adquisición de los Datos de Aceleración.*

Valor del criterio	Alternativa Criterio	Microcontrolador Arduino Mega 2560	Tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B	Tarjeta NI-DAQ 6009	Unidad de microcontrolador en red NodeMCU ESP8266.
20%	Compatible con				
	Arduino IDE para crear proyectos	$C = 9.0$	$C = 3.50$	$C = 0.0$	$C = 9.0$
		$A = 1.80$	$A = 0.70$	$A = 0.00$	$A = 1.80$

<b>20%</b>	Precisión en la recepción/ entrega de señales analógicas o digitales	$C = 6.0$ $A = 1.20$	$C = 7.0$ $A = 1.40$	$C = 9.0$ $A = 1.80$	$C = 5.5$ $A = 1.10$
	Costo en mercado actual	$C = 6.0$ $A = 0.90$	$C = 7.0$ $A = 1.05$	$C = 3.0$ $A = 0.45$	$C = 9.0$ $A = 1.35$
<b>15%</b>	Compatible con el sensor acelerómetr o ADXL345	$C = 8.0$ $A = 1.20$	$C = 9.0$ $A = 1.35$	$C = 3.0$ $A = 0.45$	$C = 8.0$ $A = 1.20$
	Capacidad de procesamie nto	$C = 6.0$ $A = 0.30$	$C = 9.0$ $A = 0.45$	$C = 4.0$ $A = 0.20$	$C = 8.0$ $A = 0.40$
<b>5.0%</b>	Voltaje de operación	$C = 8.0$ $A = 0.40$	$C = 7.0$ $A = 0.35$	$C = 6.0$ $A = 0.30$	$C = 9.0$ $A = 0.45$
<b>5.0%</b>	Gasto de corriente.	$C = 6.0$ $A = 0.30$	$C = 5.0$ $A = 0.25$	$C = 7.0$ $A = 0.35$	$C = 8.5$ $A = 0.43$

5.0%	Eficiencia	$C = 5.0$	$C = 4.0$	$C = 6.0$	$C = 8.5$
	energética.	$A = 0.25$	$A = 0.20$	$A = 0.30$	$A = 0.43$
5.0%	Durabilidad	$C = 7.0$	$C = 6.0$	$C = 9.0$	$C = 6.5$
		$A = 0.35$	$A = 0.30$	$A = 0.45$	$A = 0.33$
5.0%	Conexión				
	inalámbrica	$C = 4.0$	$C = 9.0$	$C = 2.0$	$C = 8.5$
	(Wifi o Bluetooth)	$A = 0.20$	$A = 0.45$	$A = 0.10$	$A = 0.43$
$\sum = 100'$	Calificación total	$\sum = 6.90$	$\sum = 6.50$	$\sum = 4.40$	$\sum = 7.92$

Leyenda:

- $C$ =Calificación entre 1 al 9;
- $A = Acumulado = C \times Valor\ del\ criterio.$

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Para la PCAV, la alternativa de mayor eficiencia corresponde a la unidad de microcontrolador en red NodeMCU ESP8266 con un puntaje de 7.92.

Con base en los resultados que se obtienen desde la **Tabla 9** a la **11**, se define la combinación de componentes que se especifican en la **Tabla 12**.

**Tabla 12***Componentes Seleccionados para la PCAV.*

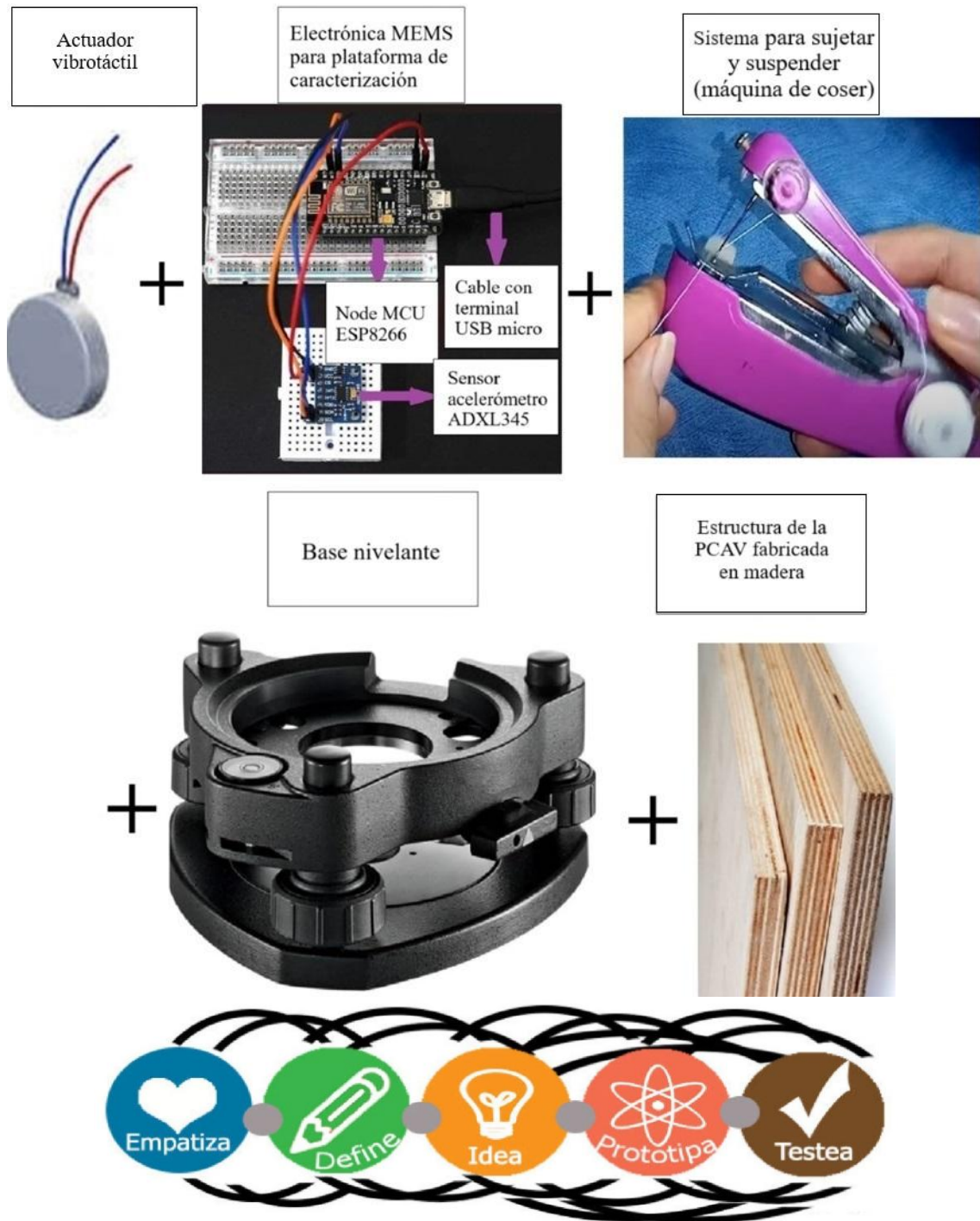
<b>Componente seleccionado mediante la matriz de decisión</b>	<b>Unidad de microcontrolador en red NodeMCU ESP8266</b>	<b>Acelerómetro ADXL345</b>	<b>Amarre y suspensión en el aire mediante fibra de Algodón</b>
<b>Función técnica ingenieril en el sistema</b>	Adquisición de los datos de caracterización.	Censar comportamiento estático/dinámico en fuerzas g.	Suspender y sujetar en el aire al actuador vibrotáctil.

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Con la consideración de que el usuario de la PCAV debe monitorear y controlar la configuración del experimento; y además la necesidad de integrar en una misma estructura a los componentes que se indican en la **Tabla 12**, se propone el diseño conceptual de la **Figura 50**, en el que se aplica el enfoque de resolución creativa que se usa en ingeniería, conocido como pensamiento de diseño o design thinking en inglés.

**Figura 50**

*Pensamiento de Diseño que se aplica al Prototipo de la PCAV.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador.

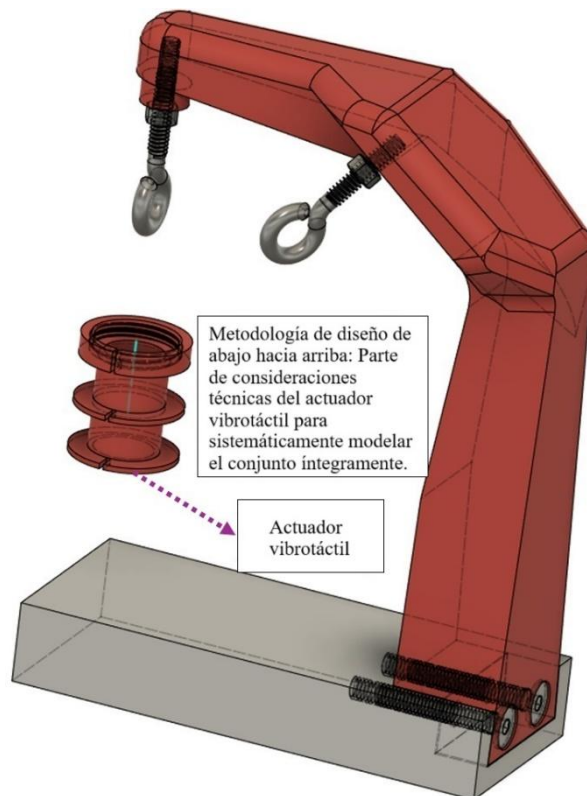
### 3.2.3 Resultados etapa III: Aplicación metodología Boothroyd & Dewhurst

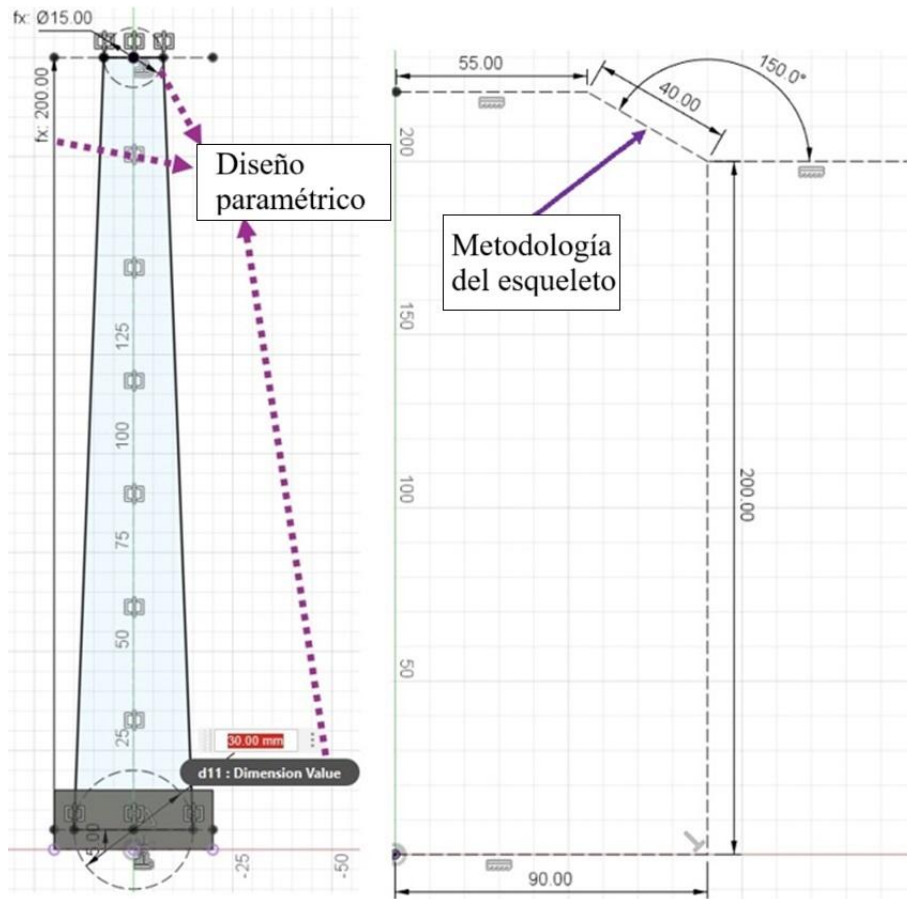
La fase previa sirve de referencia para dar forma al diseño de ingeniería, cuyo desarrollo se basa en las atribuciones funcionales de ingeniería de la **Tabla 3**. El resultado se traduce en un modelo 3D, que se genera mediante herramientas CAD, del cual se deriva una vista explosionada.

El investigador sustenta su planeamiento con las siguientes metodologías: Diseño paramétrico, diseño de esqueleto (se nutre de las relaciones morfológicas que anteceden) y finalmente la metodología de diseño de ingeniería conocida como: “De abajo hacia arriba” (botton-up); para así modelar al prototipo de la PCAV. Las iteraciones y combinaciones de diseño se exponen en la **Figura 51**.

#### Figura 51

*Metodologías: Diseño de Abajo hacia Arriba. Diseño del esqueleto. Diseño Paramétrico para la Concepción del Modelo Virtual de la PCAV.*



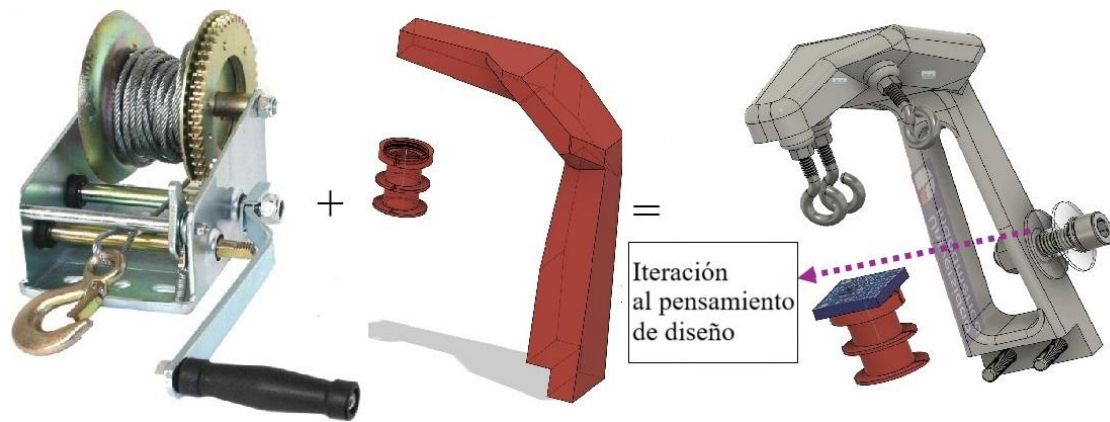


*Nota.* Desarrollado por el investigador.

La matriz de decisión en la **Tabla 6** otorga la calificación de 8.73 para el método de sujeción, suspensión y amarre del actuador vibrotáctil con fibra de Algodón; que debe permitir la regulación de su longitud y posición, por lo que se hace una iteración y refinamiento para incorporar un subsistema tipo winche como se observa en la **Figura 52**.

**Figura 52**

*Iteración al Pensamiento de Diseño para Regular y Ajustar la Longitud de la Fibra de Algodón.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Las pautas para el diseño geométrico de los componentes de la PCAV se detallan en las siguientes subsecciones:

### 3.2.3.1 Criterio para el diseño geométrico del izador del actuador

**vibrotáctil.** Para el diseño geométrico de este componente (ver **Figura 53**) se valoran aspectos como las medidas del carrete que contiene a la fibra de algodón y el método para sujetar y suspender en el aire al actuador vibrotáctil.

La posición de este último proporciona la dimensión en altura del diseño geométrico del izador. Se consideran además los calibres y demandas de montaje de los elementos de unión roscada (pernos tipo Allen, de cabeza avellanada, cáncamos, etcétera).

#### **Figura 53**

*Componentes N. °1 al 3: Izador del Actuador Vibrotáctil de la PCAV.*



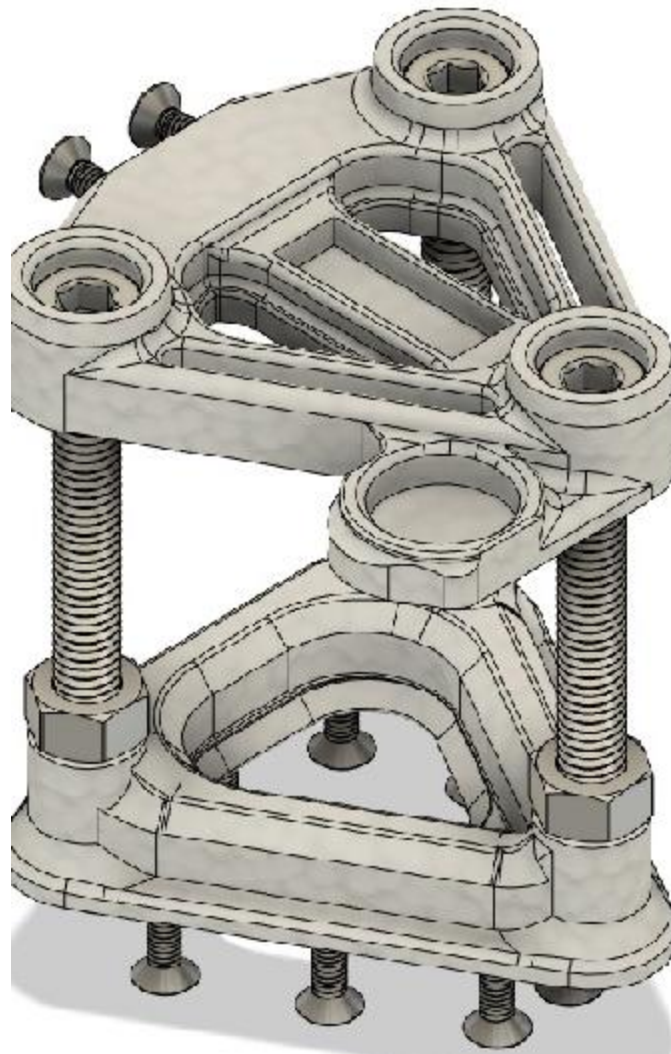
*Nota.* Desarrollado por el investigador.

**3.2.3.2 Criterio para el diseño geométrico de las bases nivelantes.** Para el diseño geométrico de estos componentes (ver **Figura 54**) se aplican los requerimientos del cliente de la **Tabla 3**.

Además, se aplican criterios como: Medidas de los instrumentos niveladores que enriquecen la precisión de la PCAV y las dimensiones de la pernería con la que se ensamblan al Izador del actuador vibrotáctil (componentes N.º 1 al 3), así como también a la estructura (componente N.º 19).

**Figura 54**

*Componentes N.º 6, 18, 20, 25 28 & 29: Bases nivelantes. Elementos Unión Roscada.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador.

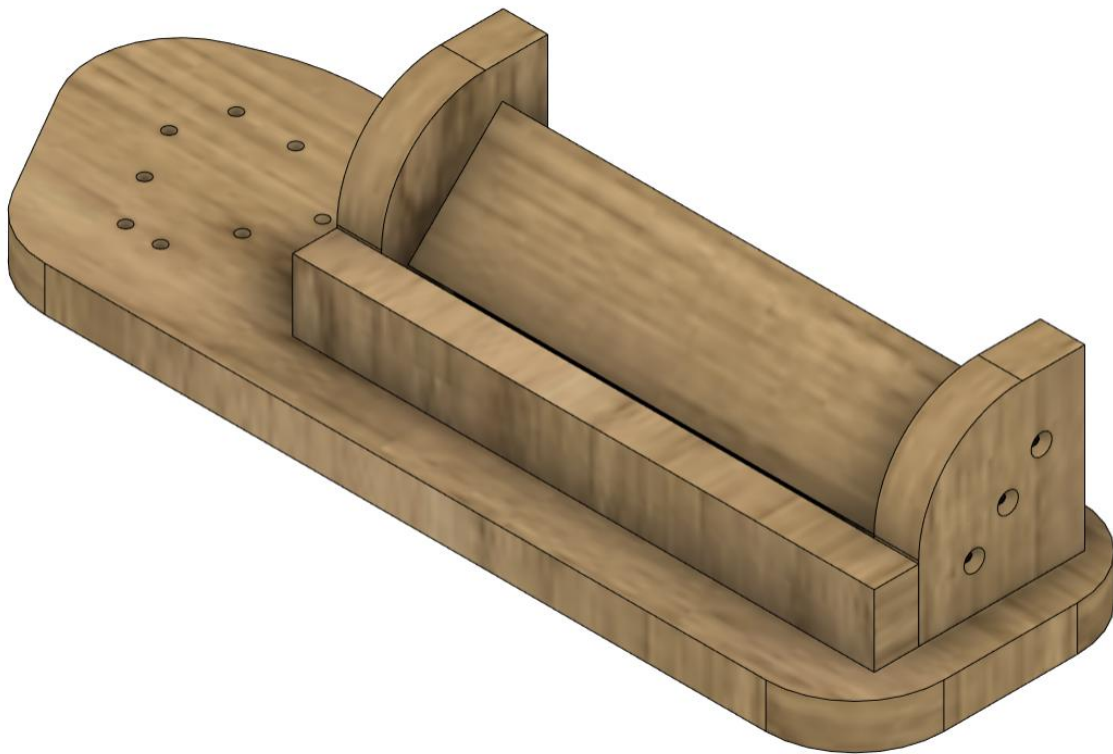
### 3.2.3.3 Criterio para el diseño geométrico de la estructura de la PCAV. El

diseño geométrico de este componente (ver **Figura 55**) se realiza en función de otras partes del prototipo, como lo son:

Su tablero de electrónica junto con la carcasa y la base nivelante inferior. La estructura se ensambla mediante tornillos avellanados para madera 3.5X25 [mm]. Se instala en esta estructura el componente N. °21 (tablero de electrónica) para conectar la pantalla LCD y la placa ESP8266 para la entrega y recepción de las señales de aceleración.

#### **Figura 55**

*Componente N. °19: Estructura.*



*Nota.* Elaborado por el investigador.

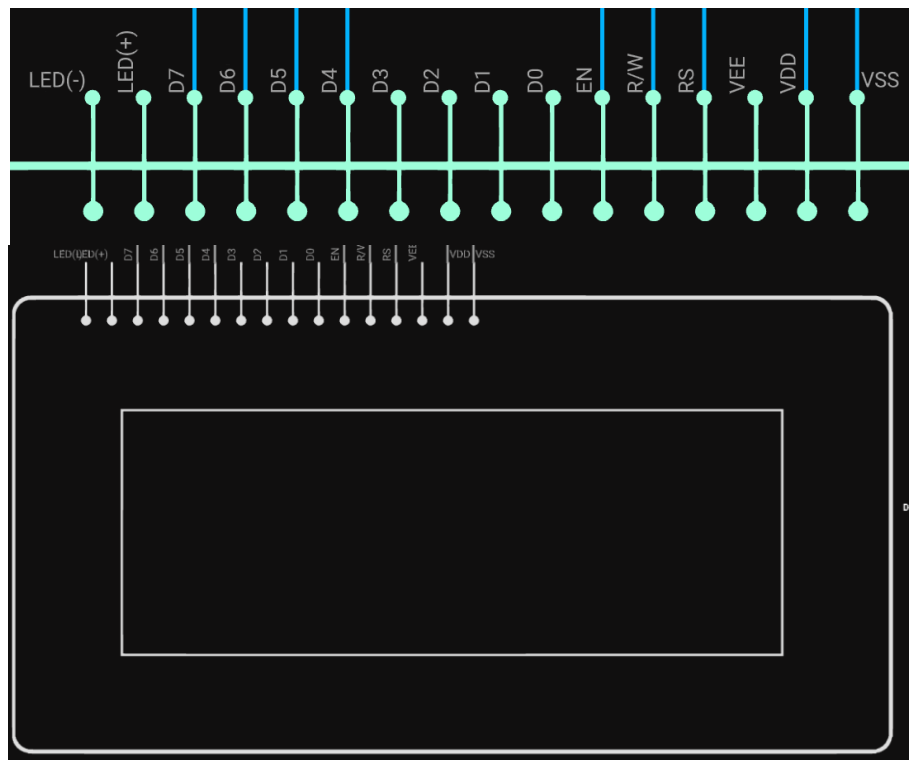
A continuación, se definen a los criterios de diseño para la ingeniería electrónica y de programación que usa la PCAV.

### 3.2.3.4 Criterios de diseño para la ingeniería electrónica y de programación.

Se emplea una placa ESP8266 que controla a la pantalla HD44780-LCD (ver la representación esquemática en la **Figura 56** y la ficha técnica en el **Anexo 6**), así como también al acelerómetro ADXL345.

**Figura 56**

*Representación Esquemática de la Pantalla HD44780-LCD.*



*Nota.* Elaborado por el investigador con herramienta CAE.

Para optimizar el consumo energético y presentar el mensaje del **Anexo 7** en la LCD se conecta como lo indican las **Tablas 13** y **14**.

**Tabla 13***Conexiones Electrónicas entre el Acelerómetro ADXL345 y la Placa ESP8266.*

<b>Pin acelerómetro ADXL345 (U1)</b>	<b>Pin NodeMCUESP8266 (U2)</b>
VDDIO	3V3
SCL/SCLK	D1GPIO5SCL
SDA/SDI/SDIO	D2GPIO4SDA
GND@1	GND

*Nota.* Elaborado por el investigador.**Tabla 14***Conexión entre la Pantalla HD44780 y la Placa Controladora ESP8266.*

<b>Pin HD44780-LCD (DS1)</b>	<b>Pin NodeMCUESP8266 (U2)</b>
VDD	3V3
VSS	GND
RS	D4GPIO2
R/W	GND
EN	D5GPIO14
D4	D6GPIO12
D5	D7GPIO13
D6	D8GPIO15
D7	D0GPIO16

*Nota.* Elaborado por el investigador.

El código de programación que está en el **Anexo 7** inicializa a la pantalla LCD y al sensor ADXL345. El loop muestra el mensaje en la pantalla a intervalos de 3 [s]. La

eficiencia energética se logra al colocar a la ESP8266 en modo de sueño profundo cuando no se realizan conexiones inalámbricas.

La representación esquemática de las conexiones descritas en las **Tablas 13 y 14** se halla diagramada en el **Anexo 13**.

Para la comunicación con el protocolo I<sup>2</sup>C, que controla con la ESP8266 al ADXL345 y a la LCD, se utiliza el expansor de pines I<sup>2</sup>C con denominación PCF8574, que permite conectar a más dispositivos en las mismas líneas SDA y SCL.

Luego de realizar el estudio de la cantidad mínima de componentes funcionales se alcanza un diseño que cuenta con: Izador transversal (1 ud.), izador conector (1 ud.), izador vertebral (1 ud.), base nivelante superior (1 ud.), base nivelante inferior (1 ud.), acelerómetro ADXL345 (1 ud.), tablero de electrónica (1 ud.) en el que se instala y opera la placa ESP8266 (1 ud.) que se acompaña de una pantalla HD4470-LCD (1 ud.) de 16X2 [pulgadas].

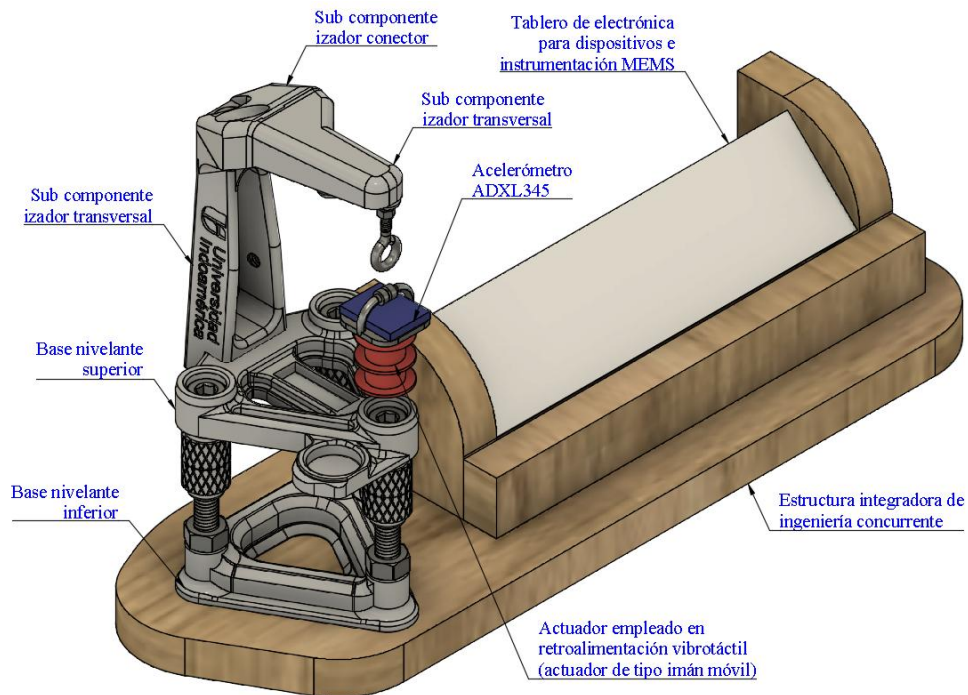
Todo lo descrito se integra, ensambla y conecta en el componente de madera que se denomina: Estructura (1 ud.), mediante pernos Allen en acero inoxidable M8X75 [mm] (3 uds.), tuercas en acero inoxidable M8X1.25 [mm] (3 uds.), pernos de cabeza avellanada tipo Allen en acero inoxidable M4X25 [mm] (9 uds.), tornillos avellanados para madera 3.5X25 [mm] (17 uds.), cáncamos de 1/8 [pulgada] (3 uds.), cables dupont macho-macho de 10 [cm] (jumpers) (20 uds.), cables dupont macho-hembra de 10 [cm] (20 uds.).

El resultado del DFMA que se alcanza está expuesto en la **Figura 57** y su correspondiente renderizado en el **Anexo8**. En el **Anexo 9** se presenta el plano de la vista explosionada con el listado de componentes que constituyen a la PCAV,

acompañado de la **Tabla 43** con la función que cada uno de ellos cumple y el proceso productivo mediante el cual se fabrican.

### Figura 57

*Propuesta de Diseño Final para el Prototipo de la PCAV.*

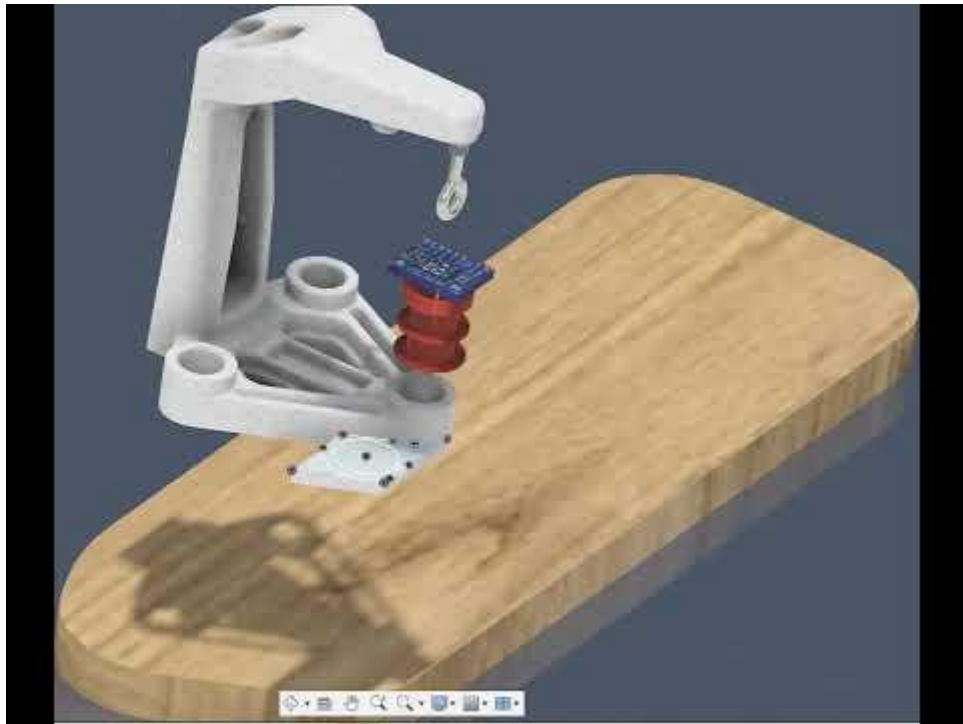


*Nota.* Desarrollado por el investigador con herramienta CAD.

Se presenta en el recurso multimedia de la **Figura 58** (dar clic en el centro del recurso para reproducirlo) a las iteraciones de diseño CAD y CAE que producen la propuesta en la figura que precede.

## Figura 58

*Iteraciones CAD y CAE para la Propuesta de Diseño de Ingeniería del Prototipo de la PCAV.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador.

En la **Tabla 15** se calcula el tiempo teórico que se estima para el montaje de la PCAV. En la **Figuras 59** se presenta la simulación del proceso del montaje.

**Tabla 15***Cálculo del Tiempo estimado en Segundos para Ensamblar el Prototipo de la PCAV.*

N.º	Denominación del componente	C a n t	Cod. M a p.	T. Map M a n.	Cod. de inserción	Tiempo de inserción manual	Tiempo de montaje	Piezas funciona les
1	Izador transversal	1	R	4 [s]	I1	0 [s]	4 [s]	1
2	Izador conector	1	R	12 [s]	I2	8 [s]	20 [s]	1
3	Izador vertebral	1	R	15 [s]	I3	9 [s]	24 [s]	1
4	Actuador VCA	1	H	75 [s]	I1	55 [s]	130 [s]	1
5	Perno de ojo 3/32 [pulgada]	3	H	24 [s]	I1	18 [s]	42 [s]	3
6	Perno cabeza avellanada M4X25	9	R	162 [s]	I2	135 [s]	297 [s]	9
15	Acelerómetro ADXL345	1	H	170 [s]	I3	45 [s]	215 [s]	1
16	Perno cabeza avellanada M6X20	2	R	16 [s]	I2	12 [s]	28 [s]	2
18	Base nivelante superior	1	R	180 [s]	I2	115 [s]	295 [s]	1
19	Estructura integradora de ingeniería concurrente	1	R	510 [s]	I1	270 [s]	780 [s]	5

20	Base nivelante inferior	1	R	90 [s]	I2	35 [s]	125 [s]	1
21	Tablero de electrónica	1	H	5 [s]	I3	3 [s]	8 [s]	1
22	Carcasa tablero electrónica frontal	1	R		I2			1
23	Carcasa tablero electrónica posterior	1	R		I2			1
24	Base tablero electrónica	1	R		I2			1
25	Elemento roscado nivelador	6	H	42 [s]	I2	30 [s]	72 [s]	1
28	Perno cabeza Allen M8X75	3	R	45 [s]	I2	30 [s]	75 [s]	1
29	Tuerca hexagonal M8X1.25	3	R	24 [s]	I2	15 [s]	39 [s]	1
32	Carrete	1	H	16 [s]	I1	6 [s]	22 [s]	1
33	Perno cabeza Allen M6X1.0	1	R	6 [s]	I2	2 [s]	8 [s]	1
34	Arandela plana Ø 6.0	2	H	3s [s]	I2	1 [s]	4 [s]	1
35	Tuerca de seguridad M6X1.0	1	H	7 [s]	I3	2 [s]	9 [s]	1

36	NodeMCU ESP8266	1	H	4 [s]	I3	2 [s]	6 [s]	1
37	Pantalla LCD HD44780	1	H	4[s]	I3	2 [s]	6 [s]	1

---

						2209 [s]		
N.º total de componentes		4		Tiempo total de montaje		00[horas]:36[minutos]		
		5				:49[segundos]		

---

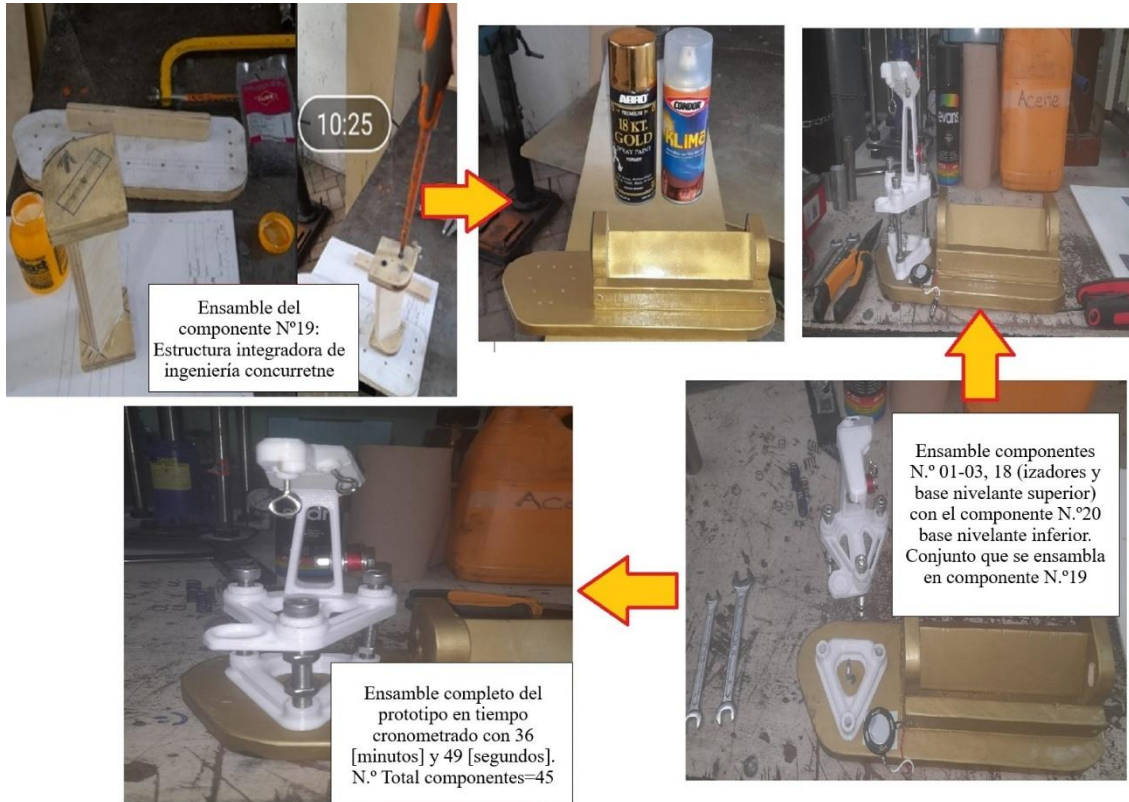
Leyenda ( Boothroyd et al., 2021)	Código de manipulación	H: Manipulación manual.
		R: Hermanitas (llaves).
		A: Automatizado
	Código de inserción	I1: Insertar primero, I2: Insertar segundo, I3: Insertar tercero.

---

*Nota.* Desarrollado por el investigador de acuerdo con el diseño para la fabricación y el ensamble de ( Boothroyd et al., 2021).

**Figura 59**

*Medición de Tiempos y Ensamble del Prototipo de la PCAV. Ejecución del Montaje en el Laboratorio de Manufactura de UTI – FING.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Con los cálculos y evidencias que preceden se determina cuan eficiente es el montaje del sistema mediante la **Ecuación 3**.

**Ecuación 3** *Modelo Matemático para el Cálculo de la Eficiencia del Montaje.*

$$E_m = \frac{N_{min} \times t_a}{t_m} \quad (3)$$

En donde:  $E_m$  = *eficiencia del montaje.*

$N_{min}$  = *cantidad mínima de piezas en el sistema, es adimensional, y;*

*se excluyen a los componentes que no son funcionales.*

$t_a$  = *Tiempo promedio de ensamble por pieza. Cálculo = 49.09 [s].*

$t_m$  = *tiempo real (cronometrado en el ensamble real de la PCAV)*

*Nota.* Adaptado de *Diseño para productos de fabricación y montaje* (p. 317), por (Boothroyd et al., 2021). CRC Press.

Aplicando la **Ecuación 3**, se tiene:

$$E_m = \frac{N_{min} \times t_a}{t_m} = \frac{45 \times 49.1 \text{ [s]}}{1917 \text{ [s]}} = \frac{2209.5}{1917} = 1.15 \approx 1.2$$

$$\therefore E_m \approx 1.2$$

De acuerdo con Boothroyd & Dewhurst, una eficiencia en el montaje igual a 1.0 indica que el tiempo real de instalación se aproxima mucho al tiempo ideal calculado. En el caso que la eficiencia es mayor que uno el montaje real es más rápido que el proyectado.

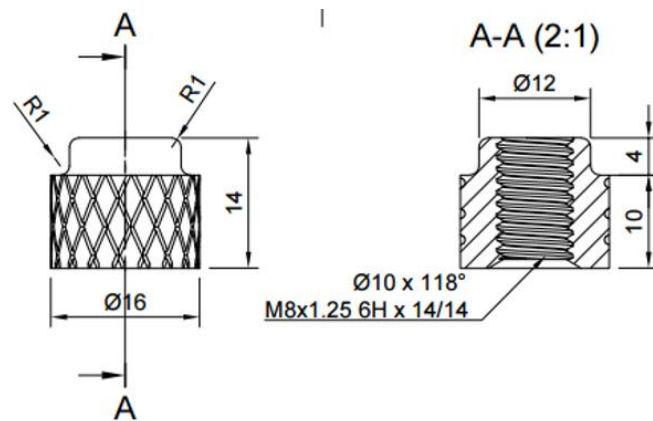
Para el caso de la PCAV se obtiene una  $E_m \approx 1.2$ , lo que se traduce a un

$\Delta = 4$  [minutos] y 57 [segundos] a favor en el tiempo de ensamble del prototipo.

Este fenómeno es atribuible a lo que se estipula en la **Tabla 3** (tolerancias dimensionales normalizadas y componentes estándar), dado que en el diseño de la PCAV se incluyen roscas, como la de la **Figura 60**, para ensamblar mecánicamente a sus componentes.

### Figura 60

*Diseño de Roscas para el Prototipo de la PCAV según la normativa NTE INEN-ISO4762.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador con herramienta CAD.

Para el diseño de las roscas se sigue la normativa ISO 4762 equivalente a la NTE INEN-ISO4762 (Normas Técnicas Ecuatorianas) y los criterios de cálculo de ajustes del prontuario de Larburú (Arrizabalga , 2003).

En la octava sección del: Prontuario de Técnicas y Máquinas Herramientas de Nicolás Larburú, puntualmente en la tabla 10.8 de la página 291, se define a la serie de tolerancia para el sistema de eje base =  $h9 - E8 \rightarrow$  *esmerado*, mismo que para calcular la desviación del agujero en micras especifica un rango de 0 a  $-520 [\mu m]$ .

En función de estos valores se diseñan con herramienta CAD a las roscas que posteriormente se fabrican mediante impresión 3D, con un  $\Delta = -0.5 [mm]$  (ajuste giratorio), para facilitar los montajes en todo el prototipo.

Con base en estos cálculos, se destaca también la eficiencia en la manufactura y el ensamble ya que no se realizan reprocesos, como el rectificado de las roscas mediante machuelos para los componentes concebidos con manufactura aditiva.

Los resultados de estos cálculos del diseño de ingeniería mecánica son los planos de producción disponibles en el **Anexo 10**.

Ahora se realiza el cálculo para determinar el factor de complejidad del conjunto mediante la **Ecuación 4**.

**Ecuación 4** *Modelo Matemático para el Cálculo de la Complejidad del Conjunto.*

$$C_f = f \times \sqrt[3]{N_p \times N_t \times N_i} \quad (4)$$

En donde:  $C_f =$  complejidad del conjunto.

$N_p =$  representa al número total de componentes del conjunto.

$N_t =$  cantidad de elementos distintos en el conjunto.

$N_i =$  cantidad de enlaces, conexiones o interfases del sistema.

$f =$  cantidad de procesos que solventa el sistema.

*Nota.* Adaptado de *Diseño para productos de fabricación y montaje* (p. 323), por ( Boothroyd et al., 2021). CRC Press.

Al aplicar la **Ecuación 4** se tiene:

$$C_f = 1 \times \sqrt[3]{45 \times 24 \times 18}$$

$$C_f = 1 \times \sqrt[3]{19440}$$

$$\therefore C_f \approx 26.89$$

Aunque Boothroyd y Dewhurst no definen una escala estandarizada para interpretar el valor del factor de complejidad  $C_f$ , algunos estudios en ingeniería de producto y manufactura han generado rangos de referencia con base en análisis comparativos y casos de estudio en entornos industriales. (Geoffrey, 1996).

La escala que se aplica para esta investigación se halla detallada en la **Tabla 16**.

**Tabla 16**

*Escala para Interpretar el Valor de la  $C_f$ ; de acuerdo con Boothroyd y Dewhurst.*

<b>Rango de la <math>C_f</math></b>	<b>Nivel de la complejidad</b>	<b>Interpretación</b>
<b>1 a 10</b>	Bajo	Ensamble simple. Tiene pocas funciones y piezas.
<b>11 a 20</b>	Moderado	El ensamble es moderadamente cambiante en términos de cantidad de componentes y tipos de conexiones.
<b>21 a 30</b>	Alto	El sistema dispone de múltiples funciones, interfaces y una gama de piezas distintas. Posee diversas conexiones.
<b>mayor que 30</b>	Muy alto	El ensamble es altamente complejo y por ello propenso a errores de fabricación y/o montaje. Se recomienda modulación y/o rediseñar la ingeniería del proyecto.

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Diseño para fabricación y montaje: La experiencia Boothroyd-Dewhurst* (p. 39), por (Geoffrey, 1996), Springer Science + Business Media Dordrecht.

De acuerdo con la **Tabla 16**, un nivel de complejidad con un  $C_f \approx 26.89$  sugiere que el prototipo tiene un valor de complejidad alto, por su variedad de componentes, la diversidad de funciones integradas al sistema o un significativo número y tipo de conexiones, necesarias para integrar y poner en operación a la PCAV.

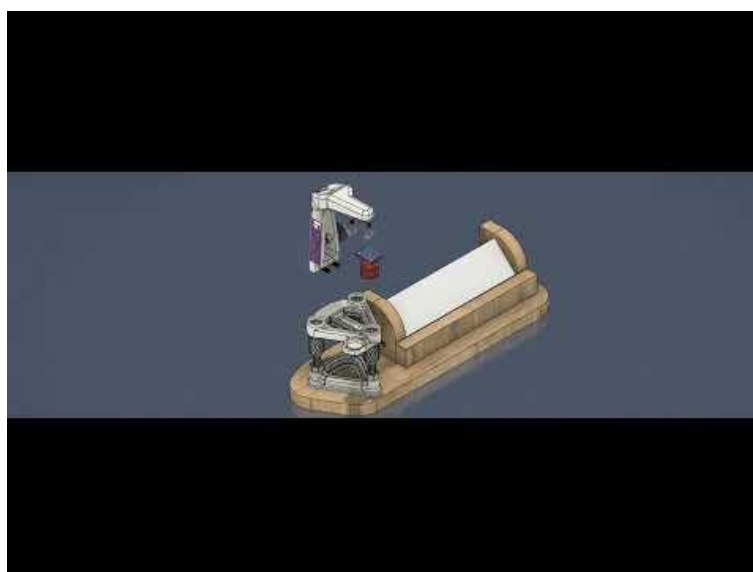
Un valor más alto para el  $C_f$  indica que el producto es más difícil de ensamblar por el incremento de componentes y conexiones, por lo que cual se ha de aplicar una reingeniería al proyecto; a lo que se asocia un consecuente incremento de costos.

Los valores de eficiencia y complejidad calculados mediante las **Ecuaciones 3 y 4** son aceptables, lo que sugiere que el diseño tiene margen de mejora, por lo que al iterar nuevamente la metodología DFMA de Boothroyd y Dewhurst se podría alcanzar esta optimización.

Se presenta en el recurso multimedia de la **Figura 61** (dar clic en el centro del recurso para reproducirlo) a la simulación del ensamble del prototipo de la PCAV.

### **Figura 61**

*Simulación del Ensamble del Prototipo de la PCAV.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador.

Para la selección de las materias primas que brindan una mayor eficiencia al sistema se definen en las siguientes subsecciones a los criterios de diseño de ingeniería para el material de los componentes de la PCAV.

### **3.2.3.5 Criterios de diseño de materiales para los componentes de la PCAV.**

En la impresión 3D o manufactura aditiva es necesario generar soportes para ayudar a mantener y garantizar la integridad estructural del producto mientras se imprime. Dado que dichos soportes no son parte del diseño original representan un gasto extra al ser un desperdicio de materia prima y del tiempo de fabricación (Aditiva3D, 2023).

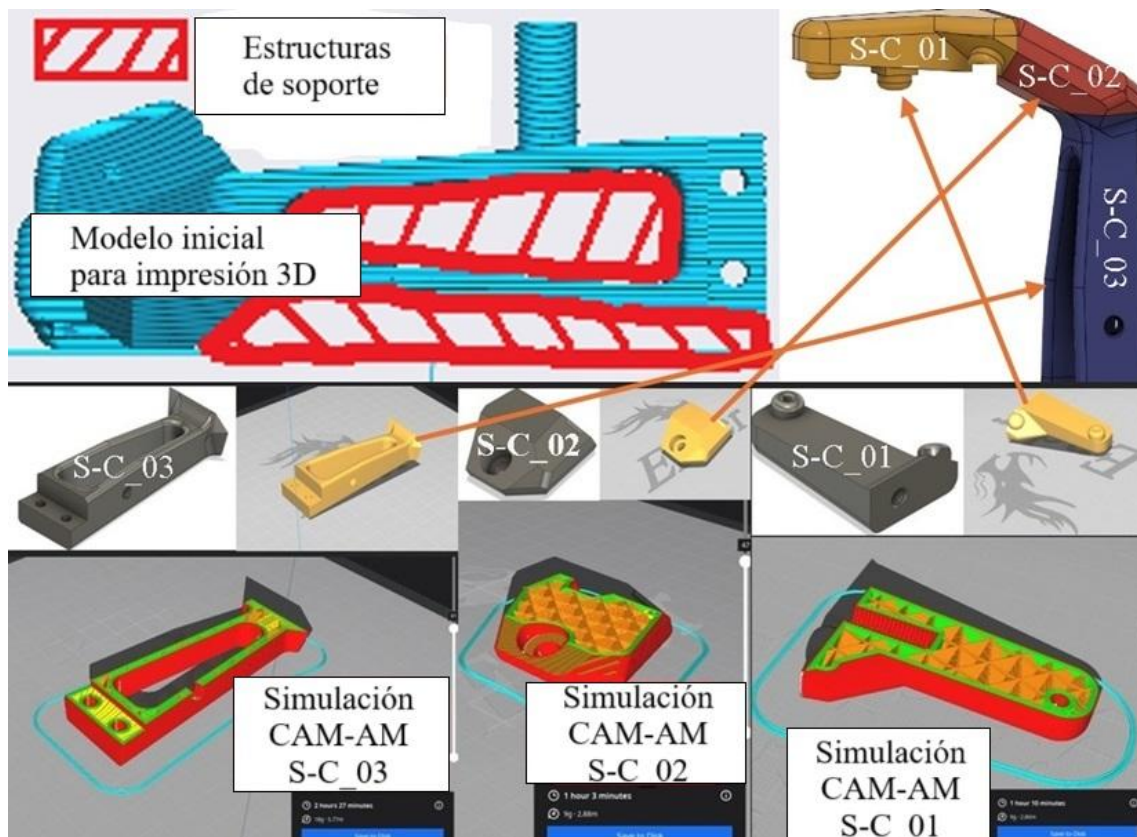
El colapso de este proceso productivo se da cuando el ángulo del modelo para fabricación tiene un  $\alpha \geq 45^\circ$ , esto ocasiona que el filamento caiga por acción de la fuerza gravitatoria.

En la ingeniería para la manufactura y ensamble de la PCAV, se presenta el reto de eliminar a dichos soportes, ya que al prescindir de aquellos se alcanza una optimización en el consumo de tiempo y filamento. Esto conlleva a la mayor eficiencia económica que indica la estrategia DFMA

En la **Figura 62** se evidencia la optimización del proceso productivo de manufactura aditiva, en donde a la izquierda se constata que el modelo inicial requiere incorporar estructuras de soporte, luego a la derecha se tiene al componente, descompuesto en tres subcomponentes, finalmente, en la parte inferior de la figura se indica la simulación de la manufactura aditiva, que es asistida por computador, con los resultados de las mejoras alcanzadas, que son el 0% de instalación de estructuras de soporte.

**Figura 62**

*Optimización en Ingeniería del Diseño para Manufactura Aditiva de Componentes de la PCAV.*



*Nota.* Desarrollado por el investigador con software CAD-CAM.

Se analiza también que el diseño de la **Figura 57** está compuesto fundamentalmente de materiales como: Aceros, plásticos y madera o composiciones de estos. Para establecer los lineamientos que determinen el tipo específico de material se desarrollan comparaciones entre algunas materias primas y sus propiedades físicas, tecnológicas, mecánicas y amortiguadoras (Dávila Cárdenas, 2023).

Para elegir al material se consideran las siguientes variables (Ashby y Jones, 2008):

- **Propiedades:** Físicas, tecnológicas, mecánicas y amortiguadoras.
- **Proceso productivo:** La manera en la que se materializa cada componente.
- **Existencias:** Las ofertadas en el mercado local.
- **Precios:** Variedad de costos disponibles en el mercado local.

Según el requerimiento del cliente en la **Tabla 3** (precisión), para garantizar exactitud en las mediciones hay que considerar materiales con alta capacidad amortiguadora (Cai & Sun, 2010).

- **Respuesta ante la vibración:** La capacidad de asimilar y amortiguar a las vibraciones.

Con el conocimiento de estas cinco variables se establece que para fabricar los componentes de la PCAV, que requieren de manufactura aditiva, potencialmente se pueden utilizar las materias primas enlistadas en la **Tabla 17**.

**Tabla 17**

*Materias Primas para Manufactura Aditiva de los componentes Plásticos de la PCAV.*

<b>Materia prima para manufactura aditiva</b>	
<b>1</b>	Fibra de carbono
<b>2</b>	Plástico PLA
<b>3</b>	Plástico ABS
<b>4</b>	Plástico TPU

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería I: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 396), por (Ashby y Jones, 2008).

A continuación se hace un análisis de cada una de estas cuatro materias primas.

*Fibra de carbono.* -

Tiene una gran resistencia y rigidez lo que la hace ideal para aplicaciones que optimizan el rendimiento del producto. Es el caso de sectores como el aeroespacial,

automotriz, militar o de la ingeniería civil que aprovechan sus propiedades tecnológicas, físicas y mecánicas (3Dnatives, 2023).

Los componentes de fibra de carbono impresos en 3D tienen propiedades mecánicas que superan a las de casi todos los demás polímeros en cuestión de tenacidad y resistencia a la temperatura. El filamento está estructurado por hebras pequeñas de carbono cuya longitud es menor a 1 [mm] que se aglutinan en un medio termoplástico denominado material base (3Dnatives, 2023).

En cuanto a las propiedades físicas el filamento en estado puro puede tener una resistencia a la tracción hasta cinco veces mayor que la del acero y superarlo por el doble en rigidez, teniendo a su vez un menor peso. Además la fibra de carbono tiene buena resistencia química, capacidad de soportar altas temperaturas y baja expansión térmica (3Dprinters-Shop, 2017).

A pesar de su firmeza la fibra de carbono destaca por su habilidad para mitigar vibraciones. Esta característica es particularmente valiosa en situaciones donde se necesita un manejo suave y se intenta minimizar la fatiga inducida por las vibraciones. Un ejemplo de esto son las bicicletas de fibra de carbono donde esta habilidad de atenuar vibraciones incrementa el confort del ciclista (Walma Dynamic Group, 2024).

En la **Figura 63** se observan el manubrio y el cuadro de una bicicleta que están impresos en 3D, empleando el filamento de fibra de carbono.

## Figura 63

*Impresión 3D con Fibra de Carbono del Cuadro y Manubrio de una Bicicleta.*



*Nota.* Adaptado de (3Dprinters-Shop, 2017).

### *Plástico PLA. -*

El ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés) es un polímero termoplástico que se utiliza como filamento para impresión 3D. Es un material biodegradable/compostable lo que quiere decir que sus orígenes son restituibles como por ejemplo: La tapioca, el maíz o la caña de azúcar. Tiene gran popularidad en la impresión 3D debido a su facilidad de uso, bajo punto de fusión y alta calidad al momento de la fabricación (primebiopolymers, 2022).

En cuanto a las propiedades físicas el PLA es un material rígido y quebradizo con un punto de fusión que oscila entre los 150 a 160 [° C] pudiendo deformarse a partir de los 65 [° C]. Su resistencia es superior si se lo compara con filamentos como el ABS. Su dureza varía según el fabricante y su composición pero normalmente se encuentra entre los 65 a 80 Rockwell [HRC]. Es un material ignífugo, resistente a rayos UV y absorbe humedad en una pequeña medida (primebiopolymers, 2022).

Para sus propiedades tecnológicas el PLA es un material fácil de imprimir y no necesita una cama caliente para hacerlo. Al ser una materia prima biodegradable y

compostable califica para aplicaciones que tengan un enfoque sostenible; como es el caso de la PCAV. Se aplica principalmente para la fabricación de prototipos y piezas de baja resistencia mecánica (primebiopolymers, 2022).

Aunque el PLA no se considera como un material con alta capacidad amortiguadora esta propiedad se puede mejorar si se lo somete a un proceso de recocido con lo que incrementa no solo su resistencia térmica, sino también la resistencia al impacto (Impresoras 3D, 2023).

En la **Figura 64** se observan diversos componentes impresos con el filamento PLA.

#### **Figura 64**

*Componentes para diversas aplicaciones técnicas impresos en 3D con filamento PLA.*



*Nota.* Adaptado de (Impresoras 3D, 2023).

#### *Plástico ABS. -*

El acrilonitrilo butadieno estireno (ABS, por sus siglas en inglés) es un material termoplástico amorfo que entrega una elevada resistencia al impacto, posee altos valores de rigidez y facilidad de uso siendo estas propiedades las que lo hacen de extendida y popular aplicación para la impresión 3D. (3d insider, 2022).

En cuanto a sus propiedades físicas, el punto de fusión del ABS suele estar entre 200 y 250 [° C]. Es un material ignífugo y resistente a los rayos UV. También es higroscópico que significa que puede absorber humedad del aire (3d insider, 2022).

Sus propiedades mecánicas indican que es resistente al impacto y a la fatiga, tiene una alta resistencia a la tracción y una buena resistencia al desgaste. Su dureza varía según el fabricante y la composición pero normalmente se ubica en un rango de 65 a 80 Rockwell [HRC] (3d insider, 2022).

Es fácil de imprimir y si requiere una cama caliente a la hora de la fabricación. Se utiliza especialmente en la creación de piezas de ingeniería y prototipos (3d insider, 2022).

Tampoco es considerado como un material con alta capacidad de amortiguación, pero es durable y resistente al impacto lo que puede favorecer la respuesta dinámica para el prototipo. La ingeniería de diseño con la que se modelan las geometrías a imprimir puede aportar a mejorar su capacidad amortiguadora (3DS pro, 2024).

En la **Figura 65** se exponen algunos desarrollos de ingeniería con el uso del ABS.

### **Figura 65**

*Desarrollo de Productos para Ingeniería con la Aplicación del Filamento ABS.*



*Nota.* Adaptado de (rpelectronics, 2023).

### *Plástico TPU. -*

El termoplástico de poliuretano comúnmente conocido por sus siglas inglés como TPU es un tipo de material plástico que ha ganado gran popularidad en diversas industrias debido a sus propiedades únicas y versatilidad. Se sitúa en la intersección entre los elastómeros y los plásticos, lo que le confiere propiedades de ambos. El TPU es un material flexible y resistente que se utiliza en la impresión 3D para crear piezas que requieren flexibilidad extrema y también resistencia al impacto (Periodic Table, 2023).

En cuanto a sus propiedades físicas el punto de fusión esta entre los 180 a 220 [° C]. El TPU es un material higroscópico. Originalmente es transparente y puede ser coloreado fácilmente (Periodic Table, 2023).

Tiene una alta resistencia a la tracción y una buena resistencia al desgaste. Su dureza varía según el fabricante y la composición, pero normalmente está en un rango de entre 70 a 98 en la escala de dureza Shore [A] (Periodic Table, 2023).

Las propiedades tecnológicas indican que es un material fácil de imprimir y si requiere de una cama caliente para hacerlo. Es una materia prima ampliamente utilizada en la manufactura aditiva especialmente en la generación de piezas de alta flexibilidad (Periodic Table, 2023).

En la **Figura 66** se evidencia la flexibilidad del TPU.

**Figura 66**

*Aplicación del Filamento TPU en la Manufactura Aditiva de un Estuche para Celular.*



*Nota.* Adaptado de (Pick 3Dprinter, 2023).

Se han dejado establecidas las propiedades fundamentales de las materias primas probables para la fabricación de algunos componentes de la PCAV. Los criterios que se siguen para calcular la matriz de priorización están disponibles en la **Tabla 18**.

**Tabla 18**

*Criterios para Calcular la Prioridad en el Planeamiento del Diseño de Materiales.*

<b>Criterios</b>	
<b>1</b>	Durabilidad
<b>2</b>	Económico
<b>3</b>	Sostenibilidad
<b>4</b>	Rigidez
<b>5</b>	Resistencia a la tracción

6 Flexibilidad

7 Amortiguamiento

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería I: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 415), por (Ashby y Jones, 2008) Editorial Reverté.

Con los criterios de la **Tabla 18** se calculan en las siguientes subsecciones a las matrices de priorización que determinan la materia prima mejor calificada para la fabricación de los componentes de la PCAV.

**3.2.3.6 Valoración para la selección de la materia prima del izador.** Para realizar una evaluación adecuada de los criterios que se definen en la **Tabla 18**, se asigna un peso a cada uno de ellos de acuerdo con la escala de la **Tabla 19**. El peso que se asigna está en función de las propiedades fundamentales ya estudiadas. Con este proceso de ponderación se garantiza una evaluación objetiva (Ashby y Jones, 2008).

**Tabla 19**

*Peso Cualitativo y Cuantitativo para la Matriz de Priorización.*

Peso cualitativo	Peso cuantitativo
Altamente importante	9
Más importante	7
Igual de importante	5
Menos importante	3
Levemente importante	1

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 433), por (Ashby y Jones, 2008) Editorial Reverté.

La asignación de pesos que se otorga a cada criterio según su importancia relativa sirve para realizar el cálculo del puntaje total que se obtiene al multiplicar las puntuaciones por los pesos. Al sumar estos resultados se obtiene el puntaje total para cada materia prima.

Para la priorización se ordenan los materiales según el cálculo de los puntajes totales para determinar el que más se adecúa al prototipo de la PCAV y así poder tomar una decisión basada en criterios de ingeniería.

Los resultados de estos procedimientos se exponen en las **Tabla 20** a la **Tabla 22**.

**Tabla 20**

*Asignación de Pesos Cuantitativos para cada Criterio según su Importancia Relativa.*

<b>Criterio</b>	<b>Durabili</b>	<b>Econó</b>	<b>Soste</b>	<b>Rigi</b>	<b>Resisten</b>	<b>Flexibi</b>	<b>Amortigua</b>
<b>Materia prima</b>	<b>dad</b>	<b>mico</b>	<b>nibili</b>	<b>dez</b>	<b>cia a la</b>	<b>lidad</b>	<b>miento</b>
			<b>dad</b>		<b>tracción</b>		
<b>Fibra de carbono</b>	9	3	5	9	9	3	1
<b>Plástico PLA</b>	5	7	9	3	6	7	3
<b>Plástico ABS</b>	7	5	3	8	8	4	2
<b>Plástico TPU</b>	8	3	7	2	7	9	9

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería 1:*

*Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 433), por (Ashby y Jones, 2008) Editorial Reverté.

**Tabla 21**

*Cálculo del Puntaje Total para cada Material.*

<b>Criterio</b>	<b>Dur</b>	<b>Econó</b>	<b>Soste</b>	<b>Resisten</b>	<b>Flexibil</b>	<b>Amor</b>	<b>Σ</b>
<b>Materia</b>	<b>abili</b>	<b>mico</b>	<b>nibili</b>	<b>Rigidez</b>	<b>cia a la</b>	<b>itud</b>	<b>puntaje</b>
<b>prima</b>	<b>dad</b>		<b>dad</b>		<b>tracción</b>	<b>mient.</b>	<b>total</b>
<b>Fibra de</b>	(9	(3 × 7)	(5	(9 × 3)	(9 × 6)	(3 × 7)	(1
<b>carbono</b>	× 5)	+	× 5)	+	+	+	× 1)
	+		+				=
<b>Plástico</b>	(5	(7 × 7)	(9	(3 × 3)	(6 × 7)	(7 × 1)	(3
<b>PLA</b>	× 5)	+	× 5)	+	+	+	× 1)
	+		+				=
<b>Plástico</b>	(7	(5 × 7)	(3	(8 × 3)	(8 × 6)	(4 × 7)	(2
<b>ABS</b>	× 5)	+	× 5)	+	+	+	× 1)
	+		+				=
<b>Plástico</b>	(8	(3 × 7)	(7	(2 × 3)	(7 × 6)	(9 × 7)	(9
<b>TPU</b>	× 5)	+	× 5)	+	+	+	× 1)
	+		+				=

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería I:*

*Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 435), por (Ashby y Jones, 2008) Editorial Reverté.

**Tabla 22**

*Orden de Prioridad de Mayor a Menor en función del Puntaje Total.*

<b>Materia prima (filamento)</b>	<b>Prioridad (puntaje total)</b>
Plástico TPU	216
Fibra de carbono	194
Plástico ABS	187
Plástico PLA	189

*Nota.* Elaborado por el investigador.

### **3.2.3.7 Valoración para la selección de la materia prima de las bases**

**nivelantes.** Los criterios de diseño del material se definen como lo indica la **Tabla 23** y se le asocia un peso a cada uno de ellos de acuerdo con la escala en la **Tabla 24**.

**Tabla 23**

*Criterios para determinar la Prioridad en el Planeamiento del Diseño de Materiales.*

<b>Criterios</b>	
1	Durabilidad
2	Económico
3	Sostenibilidad
4	Rigidez
5	Resistencia a la tracción

**Tabla 24***Peso Cualitativo y Cuantitativo para la Matriz de Priorización.*

<b>Peso cualitativo</b>	<b>Peso cuantitativo</b>
Altamente importante	9
Más importante	7
Igual de importante	5
Menos importante	3
Levemente importante	1

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería I:*

*Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 396), por (Ashby y Jones, 2008) Editorial Reverté.

La asignación de pesos y sumatorios totales están en las **Tablas 25 y 26** respectivamente.

**Tabla 25***Asignación de Pesos Cuantitativos para cada Criterio según su Importancia Relativa.*

<b>Criterio</b>	<b>Resistencia</b>				
<b>materia prima</b>	<b>Durabilidad</b>	<b>Económico</b>	<b>Sostenibilidad</b>	<b>Rigidez</b>	<b>a la tracción</b>
<b>Fibra de carbono</b>	9	3	5	9	9
<b>Plástico PLA</b>	5	7	9	3	6

<b>Plástico</b>	7	5	3	8	8
<b>ABS</b>					
<b>Plástico</b>	8	3	7	2	7
<b>TPU</b>					

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 396), por (Ashby y Jones, 2008) Editorial Reverté.

**Tabla 26**

*Cálculo del Puntaje Total para cada Material de las Bases Nivelantes.*

<b>Criterio</b>	<b>Durabi</b>	<b>Econó</b>	<b>Sostenib</b>	<b>Rigidez</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Σ puntaje</b>
<b>Materia</b>	<b>lidad</b>	<b>mico</b>	<b>ilidad</b>		<b>tracción</b>	<b>total</b>
<b>prima</b>						
<b>Fibra de</b>	(9 × 5)	(3 × 7)	(5 × 5)	(9 × 3)	(9 × 6)	172
<b>carbono</b>						
<b>Plástico</b>	(5 × 5)	(7 × 7)	(9 × 5)	(3 × 3)	(6 × 6)	164
<b>PLA</b>						
<b>Plástico</b>	(7 × 5)	(5 × 7)	(3 × 5)	(8 × 3)	(8 × 6)	157
<b>ABS</b>						
<b>Plástico</b>	(8 × 5)	(3 × 7)	(7 × 5)	(2 × 3)	(7 × 6)	144
<b>TPU</b>						

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 396), por (Ashby y Jones, 2008) Editorial Reverté.

El orden de prioridad del filamento para impresión 3D se expone en la **Tabla 27**.

**Tabla 27**

*Orden de Prioridad de Mayor a Menor en función del Puntaje Total.*

<b>Materia prima (filamento)</b>	<b>Prioridad (puntaje total)</b>
Fibra de carbono	172
Plástico PLA	164
Plástico ABS	157
Plástico TPU	144

*Nota.* Elaborado por el investigador.

### **3.2.3.8 Valoración para la selección de la materia prima para la estructura.**

Para satisfacer los requerimientos de bajo costo y disponibilidad en el mercado local se ponderan a estas tres clases de materias primas:

Aglomerado, cartón prensado y madera tipo triplex. Los criterios de diseño del material se hallan en la **Tabla 28** y los pesos asociados están en la **Tabla 29**.

**Tabla 28**

*Criterios para determinar la Prioridad en el planeamiento del Diseño de Materiales.*

<b>Criterios</b>	
1	Durabilidad
2	Económico
3	Sostenibilidad
4	Rigidez
5	Resistencia a la tracción
6	Flexibilidad
7	Resistencia al impacto

8	Amortiguamiento
9	Resistencia a la tracción

---

**Tabla 29**

*Peso Cualitativo y Cuantitativo para la Matriz de Priorización.*

<b>Peso cualitativo</b>	<b>Peso cuantitativo</b>
Altamente importante	9
Más importante	7
Igual de importante	5
Menos importante	3
Levemente importante	1

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 396), por (Ashby y Jones, 2008) Editorial Reverté.

La asignación de pesos y sumatorios totales están disponibles en las **Tablas 30 y 31** respectivamente.

**Tabla 30**

*Asignación de Pesos Cuantitativos para cada Criterio según su Importancia Relativa.*

<b>Criterio</b>	<b>Dura</b>	<b>Econó</b>	<b>Sosteni</b>	<b>Rigi</b>	<b>Resist.</b>	<b>Flexi</b>	<b>Resist.</b>	<b>Amortigua</b>
<b>Materia</b>	<b>bilid</b>	<b>mico</b>	<b>bilidad</b>	<b>dez</b>	<b>a la</b>	<b>bilidad</b>	<b>al</b>	<b>miento</b>
<b>prima</b>	<b>ad</b>				<b>tracción</b>		<b>impacto</b>	
<b>Aglomerado</b>	7	9	5	6	6	3	4	2
<b>Cartón</b>								
<b>prensado</b>	6	8	7	4	5	4	3	2
<b>Madera tipo</b>								
<b>tríplex</b>	8	6	8	7	7	5	5	3

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería 1:*

*Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 396), por (Ashby y Jones, 2008) Editorial Reverté.

**Tabla 31**

*Cálculo del Puntaje Total para cada Material de la Estructura.*

<b>Criterio</b>	<b>Dur</b>	<b>Econó</b>	<b>Soste</b>	<b>Rigi</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Flexibi</b>	<b>Amor</b>	<b>Resist.</b>	<b>Σ</b>
<b>Materia</b>	<b>abili</b>	<b>mico</b>	<b>nibili</b>	<b>dez</b>	<b>a la tracción</b>	<b>lidad</b>	<b>tigua</b>	<b>al</b>	<b>puntaje</b>
<b>prima</b>	<b>dad</b>		<b>dad</b>				<b>mient.</b>	<b>impacto</b>	<b>total</b>
<b>Aglome</b>	(7	(9	(5	(6		(3	(4		
<b>rado</b>	× 5)	× 7)	× 5)	× 3)	(6 × 6) +	× 7)	× 1)	(2 × 1)	204
	+	+	+	+		+	+	=	
<b>Cartón</b>	(6	(8	(7	(4		(4	(3		
<b>prensa</b>	× 5)	× 7)	× 5)	× 3)	(5 × 6) +	× 7)	× 1)	(2 × 1)	196
<b>do</b>	+	+	+	+		+	+	=	

$$\begin{array}{rcccccccc}
 \text{Mader.} & (8 & (6 & (8 & (7 & & (5 & (5 & & \\
 \text{tipo} & \times 5) & \times 7) & \times 5) & \times 3) & (7 \times 6) + & \times 7) & \times 1) & (3 \times 1) & \\
 \text{trípex} & + & + & + & + & & + & + & = & 228
 \end{array}$$

---

*Nota.* Elaborado por el investigador. Adaptado de *Materiales para Ingeniería 1:*

*Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (p. 396), por (Ashby y Jones, 2008) Editorial Reverté.

El orden de prioridad del material para la fabricación del componente N. °19:

Estructura, está disponibles en la **Tabla 32**.

### **Tabla 32**

*Orden de Prioridad de Mayor a Menor en función del Puntaje Total.*

<b>Materia prima (madera)</b>	<b>Prioridad (puntaje total)</b>
Madera tipo trípex	228
Aglomerado	204
Cartón prensado	196

*Nota.* Elaborado por el investigador.

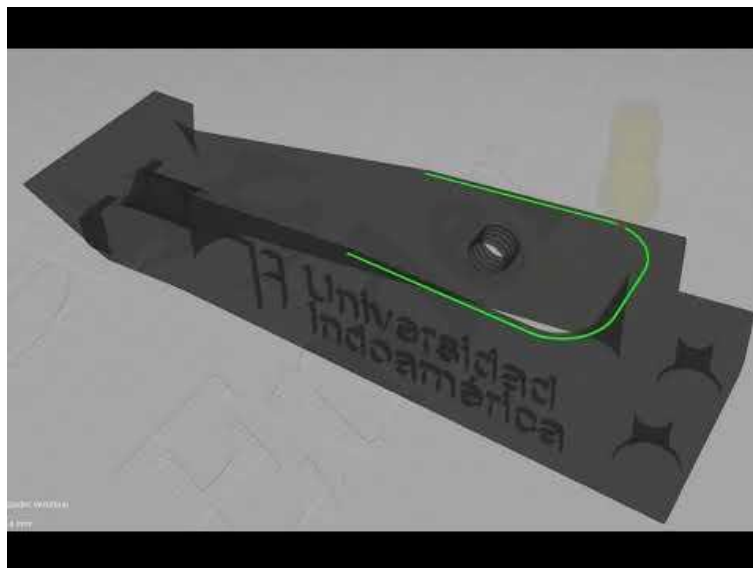
Se determina en las siguientes subsecciones el tiempo neto de fabricación para los componentes de la PCAV.

### 3.2.3.9 Cálculo del tiempo neto de fabricación del izador del actuador

**vibrotáctil.** Para conocer el tiempo neto de producción del izador (que para eficiencia de la fabricación se divide en 3 subcomponentes) se aplica una herramienta de manufactura asistida por computador, como se observa en los recursos multimedia de la **Figura 67** a la **69** (dar clic en el centro del recurso para reproducirlo).

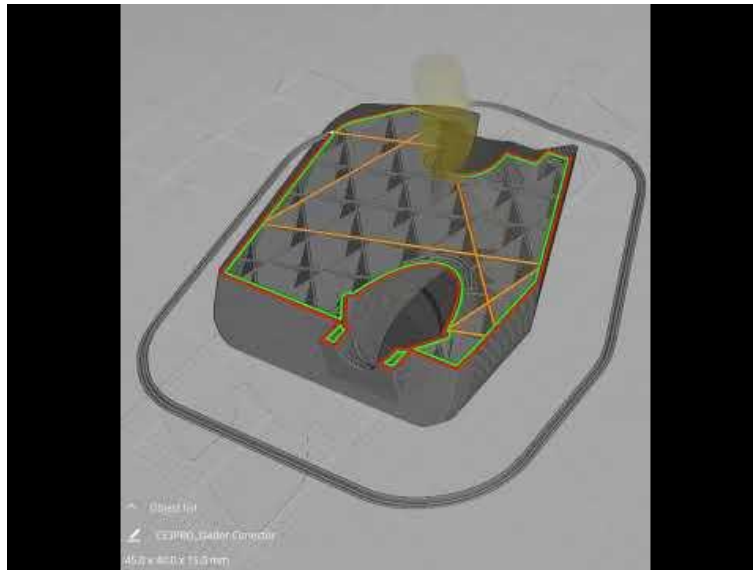
**Figura 67**

*Determinación del Tiempo Neto de Fabricación del subcomponente: Izador Vertebra (N.º 3).*



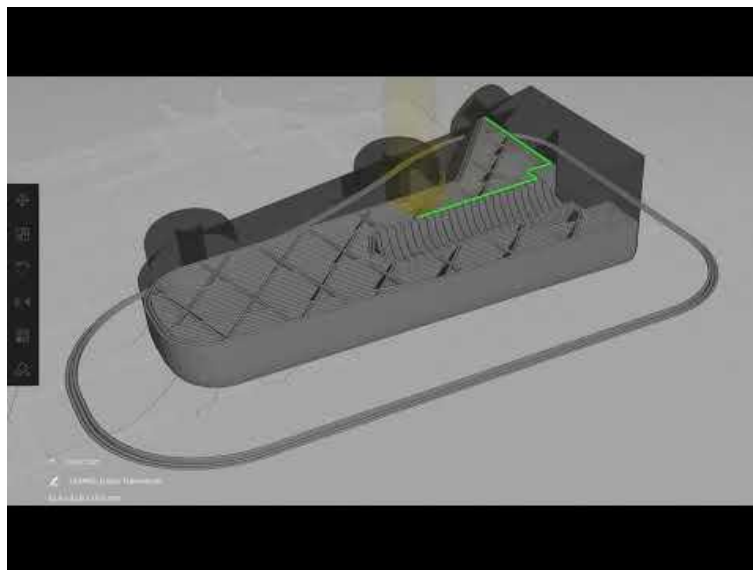
**Figura 68**

*Determinación del Tiempo Neto de Fabricación del subcomponente: Izador Conector (N.º 2).*



**Figura 69**

*Determinación del Tiempo Neto de Fabricación del subcomponente: Izador Transversal (N.º 1).*

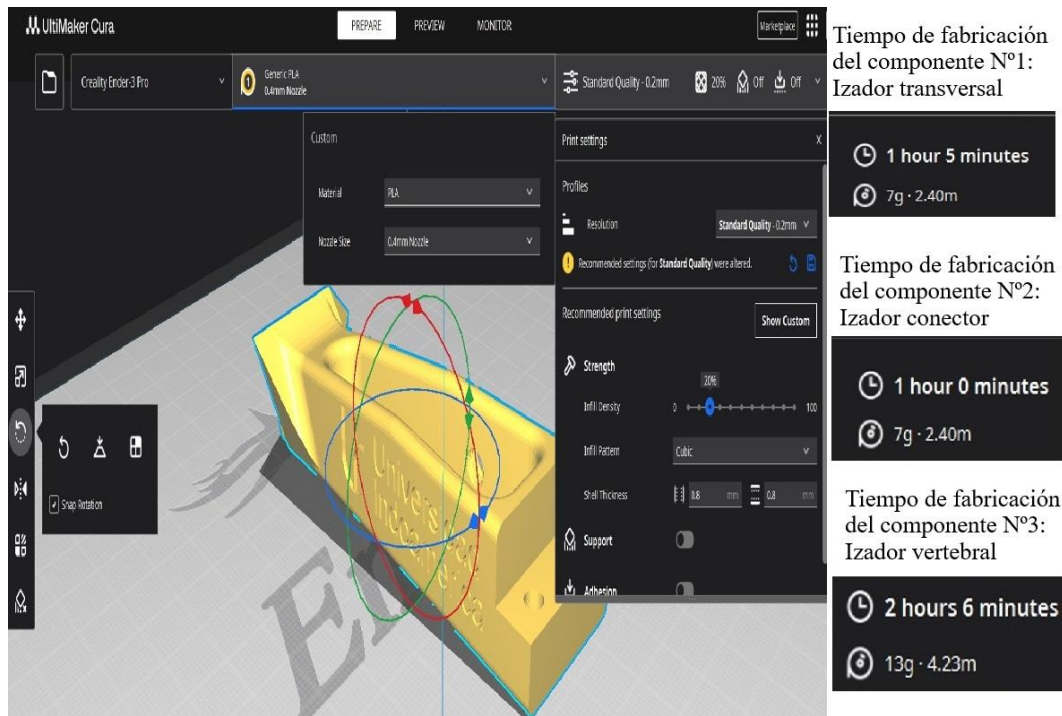


*Nota.* Elaborado por el investigador.

En la **Figura 70** se presenta el resumen de tiempos y el ajuste de la herramienta CAM.

**Figura 70**

*Ajuste Herramienta CAM aplicada en Simulación del Proceso Productivo. Resumen Tiempos.*



*Nota.* Elaborado por el investigador.

Es importante destacar de la **Figura 70** que la manufactura aditiva se programa con una densidad de relleno del 20% con lo cual se alcanza una mayor eficiencia en el proceso productivo (tiempo para impresión 3D y economía del filamento) y al estar el otro 80% constituido por aire se aprovechan sus propiedades, que lo hacen un medio natural para amortiguación, mejorando así la precisión de la PCAV.

Los códigos de programación que se obtiene para la fabricación de los tres subcomponentes del izador están disponibles en el **Anexo 11**.

En la **Tabla 33** se resumen los tiempos netos de fabricación de cada componente.

**Tabla 33**

*Tiempos Netos de Fabricación para cada Componente del Izador del Actuador.*

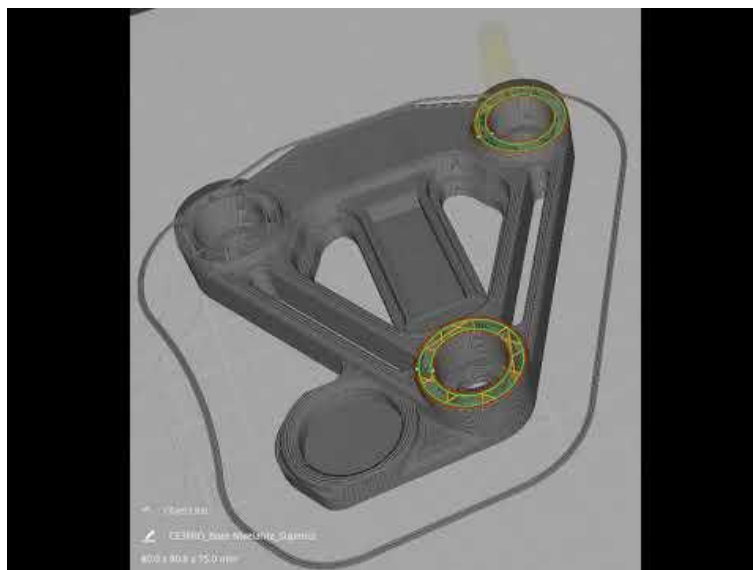
N.º Componente y denominación	Tiempo manufactura aditiva [horas: minutos: segundos]
N. º1: Izador transversal	01:05:00
N. º2: Izador conector	01:00:00
N. º3: Izador vertebral	02:06:00
Tiempo total de impresión 3D	04:11:00

*Nota.* Elaborado por el investigador.

**3.2.3.10 Cálculo del tiempo neto de fabricación de las bases nivelantes y los elementos roscados niveladores.** El tiempo neto de producción se determina con CAM como se expone en los recursos multimedia de las **Figuras 71** a la **73** (dar clic en el centro del recurso para reproducirlo).

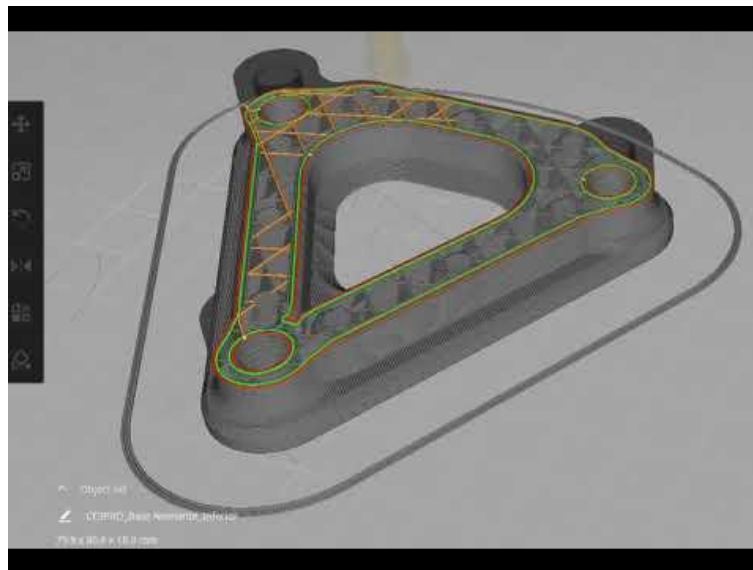
**Figura 71**

*Determinación Tiempo neto de Fabricación del Comp. N. º18: Base Nivelante Superior.*



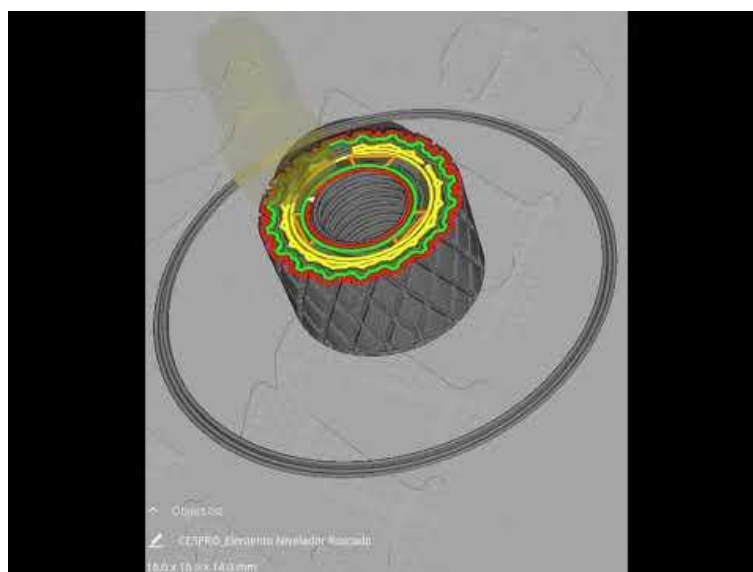
**Figura 72**

*Determinación Tiempo neto de Fabricación del Comp. N. °20: Base Nivelante Inferior.*



**Figura 73**

*Determinación Tiempo neto Fabricación del Comp. N. °25: Elemento Roscado Nivelador.*



*Nota.* Elaborado por el investigador.

Se mantienen los criterios de programación para manufactura aditiva con una densidad de relleno del 20%. Los códigos de programación para la fabricación de las bases nivelantes están disponibles en el **Anexo 12**.

En la **Tabla 34** se resumen los tiempos netos de fabricación de cada componente.

**Tabla 34**

*Tiempos Netos de Fabricación para cada Componente.*

<b>N.º Componente y denominación</b>	<b>Tiempo manufactura aditiva [horas: minutos: segundos]</b>
N. º18: Base nivelante superior	03:09:00
N. º20: Base nivelante inferior	02:53:00
N. º25: Elemento roscado nivelador	00:57:00
Tiempo total de impresión 3D	06:59:00

*Nota.* Elaborado por el investigador.

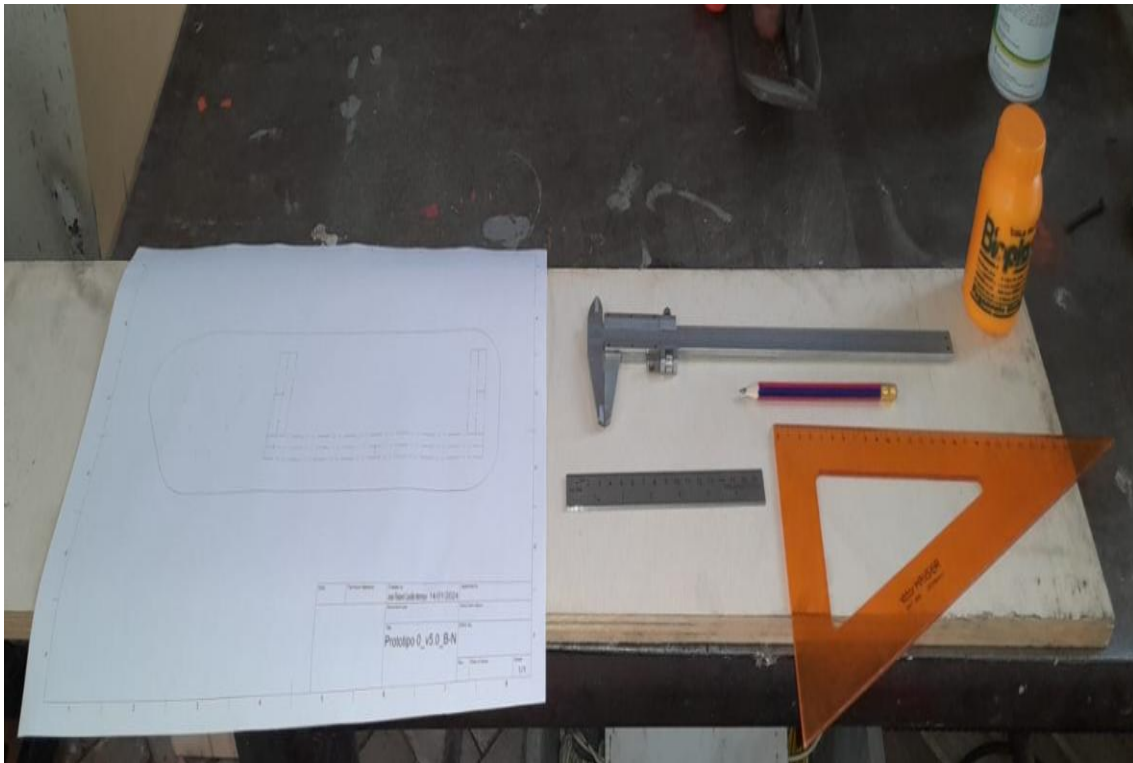
### **3.2.3.11 Cálculo del tiempo neto de fabricación de la estructura de la**

**PCAV.** Para determinar el tiempo neto de producción de este componente se cronometra la duración de los procesos productivos con arranque de viruta que son:

Aserrado manual y perforación con taladro de columna según las **Figuras 74** a la **77**, respectivamente. Se ponderan también los tiempos planos, como es el caso del trazado.

**Figura 74**

*Determinación Tiempo Neto Fabricación del Componente N. °19: Trazado en Tríplex.*



**Figura 75**

*Determinación Tiempo Neto Fabricación del Componente N. °19: Perforación con T.C.*



*Nota.* Elaborado por el investigador. Laboratorio de Manufactura UTI – FING (marzo 2024).

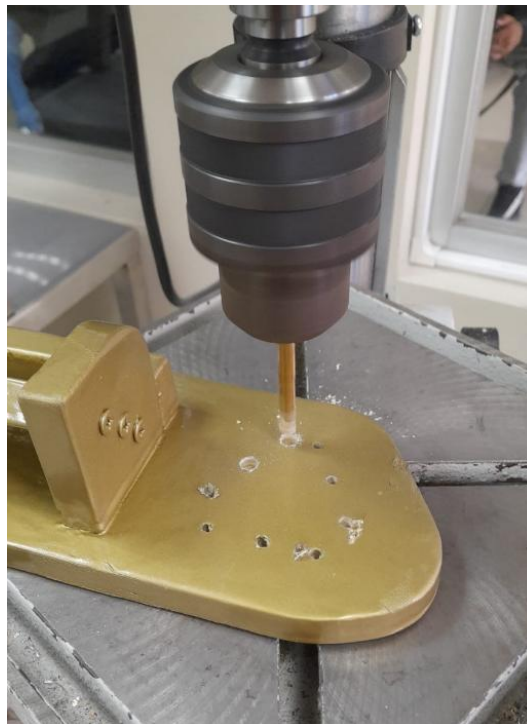
**Figura 76**

*Determinación Tiempo Neto Fabricación del Componente N. °19: Aserrado Manual.*



**Figura 77**

*Determinación Tiempo Neto Fabricación del Componente N. °19: Avellanado.*



*Nota.* Elaborado por el investigador. Laboratorio de Manufactura UTI – FING (marzo 2024).

En la **Tabla 35** se resumen los tiempos de fabricación para este componente.

**Tabla 35**

*Tiempos Netos de Fabricación para la Estructura de la PCAV.*

<b>Denominación de la operación</b>	<b>Tiempo proceso productivo con arranque de viruta [horas: minutos: segundos]</b>
Trazado del diseño geométrico de ingeniería en la materia prima seleccionada	00:18:00
Mecanizado de perforaciones para el ensamble de componentes N.º 22, 23 y 24	00:24:00
Fabricación total de la geometría del componente, mediante aserrado manual	00:35:00
Mecanizado perforaciones para unión empernada con el componente N.º 20	00:26:00
Aplicación de tratamiento superficial mediante barniz y esmalte brillante	00:21:00
Tiempo total de fabricación	01:16:00

*Nota.* Elaborado por el investigador.

Con el cálculo de los tiempos necesarios para el desarrollo de la PCAV, se determinan en las siguientes subsecciones a los costos de producción asociados.

**3.2.3.12 Cálculo de los costos de la materia prima y recursos para la fabricación de la estructura.** El gasto que demanda la fabricación de este componente se halla en la **Tabla 36**:

**Tabla 36**

*Costos de Materias Primas/Insumos y Recursos de Fabricación del Componente N.º 19.*

<b>Denominación del recurso/insumo o materia prima</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo [\$]</b>
Madera tipo tríplex	800X250 [mm], espesor 15 [mm]	10.00
Mecanizado perforaciones para ensamble de componentes N.º 22, 23 y 24	1 hora hombre/máquina	4.50
Fabricación total geometría componente con aserrado manual	1 hora hombre/máquina	4.50
Aplicación tratamiento superficial	1 hora hombre/máquina	4.50
Pegamento blanco	1 [unidad]	1.15
Barniz	1 [unidad]	2.00

Esmalte brillante	1 [unidad]	2.25
Pernos de cabeza avellanada		
tipo Allen en acero inoxidable M4X25 [mm]	9 [unidades]	0.65
Tornillos para madera avellanados 3.5X25 [mm]		
	17 [unidades]	0.25
Tiempo total ensamble del prototipo (ver <b>Tabla 13</b> )	1 hora hombre/máquina	4.50
Costo total de materias primas/insumos y recursos		34.30

*Nota.* Elaborado por el investigador.

**3.2.3.13 Cálculo de los costos para la manufactura aditiva.** A los costos de la **Tabla 36** se deben sumar los valores de la impresión 3D. Los cálculos que involucran a este proceso productivo están en la **Tabla 37**:

**Tabla 37**

*Costos de la Manufactura Aditiva para los Componentes de la PCAV.*

<b>Denominación del componente fabricado con manufactura aditiva</b>	<b>Cantidad [unidad]</b>	<b>Costo total [\$]</b>
Componente N.º 1: Izador transversal	1	27.27
Componente N.º 2: Izador conector	1	26.26

Componente N.º 3: Izador vertebral	1	35.44
Componente N.º 18: Base nivelante superior	1	38.21
Componente N.º 20: Base nivelan inferior	1	41.34
Componente N. º25: Elementos roscado nivelador	3	28.05
<hr/>		
Costo total por componentes en manufactura aditiva		196.57
<hr/>		

La suma de los valores totales indicados en las **Tablas 36 y 37**, entregan el costo preliminar de la PCAV, que se expone en la **Tabla 38**.

**Tabla 38**

*Costos Preliminar de la PCAV por Insumos, Materias Primas y el Ensamble.*

<b>Rubro</b>	<b>Costo calculado</b>
	<b>[\$]</b>
<hr/>	
Costo total materias primas/insumos y recursos	34.30
Costo total por componentes en manufactura aditiva	196.57
<hr/>	
Costo preliminar de los recursos productivos + la manufactura aditiva	230.87
<hr/>	

### 3.2.3.14 Cálculo de los costos relacionados a los componentes MEMS.

Los costos de estas implementaciones a la PCAV están detallados en la **Tabla 39** y se respaldan en con una factura electrónica en el **Anexo 14**.

**Tabla 39**

*Costos de los Componentes de Electrónica que se Implementan en la PCAV.*

<b>Cantidad</b>	<b>Denominación del componente</b>	<b>Costo facturado [\$]</b>
1	Módulo NodeMCU V3 Lua WiFi ESP8266	7.50
1	Acelerómetro ADXL345 CJMCU- 105	4.20
1	Display HD44780-LCD	12.25
40	40 cables Dupont Macho-Hembra 20cm	2.90
1	Consumibles y costos variables	10.00
4	Horas de técnico para el armado	9.00
Costos totales de los componentes mecatrónicos		45.85

*Nota.* Elaborado por el investigador.

Integrando desde la **Tablas 36** hasta la **Tabla 39** (precedente) se calcula el costo total del proyecto en la **Tabla 40**.

**Tabla 40**

*Costo Total del Prototipo de la PCAV.*

<b>Cantidad</b>	<b>Rubro</b>	<b>Costo unitario [\$]</b>	<b>Costo total [\$]</b>
30	Diseño de ingeniería mecánica	\$5/hora	150.00
15	Diseño de ingeniería electrónica	\$5/hora	75.00
22	Diseño de ingeniería de programación	\$5/hora	110.00
1	Costos totales de los componentes mecatrónicos	36.85	45.85
1	Costo de los recursos productivos + fabricación con impresión 3D	230.87	230.87
60	40 cables Dupont Macho-Hembra con longitud de 20 [cm]	0.08	4.80
1	Consumibles y costos variables	1	10.00
Costo total de producción y puesta en operación de la PCAV			626.52

*Nota.* Elaborado por el investigador.

El costo del prototipo de la PCAV se incrementa en un valor de \$126.52, equivalentes al 25.30%, respecto al costo proyectado en la **Tabla 3** (\$500.00). Este  $\Delta$  obedece al mayor uso del recurso tiempo de diseño y el desarrollo de trabajos y pruebas de laboratorio.

### **3.2.4 Resultados del experimento para validar a la PCAV.**

A continuación, se presenta el procesamiento de los datos levantados mediante la excitación a la estructura de la PCAV.

#### **3.2.4.1 Cálculo de la aceleración de la vibración en la PCAV; para la**

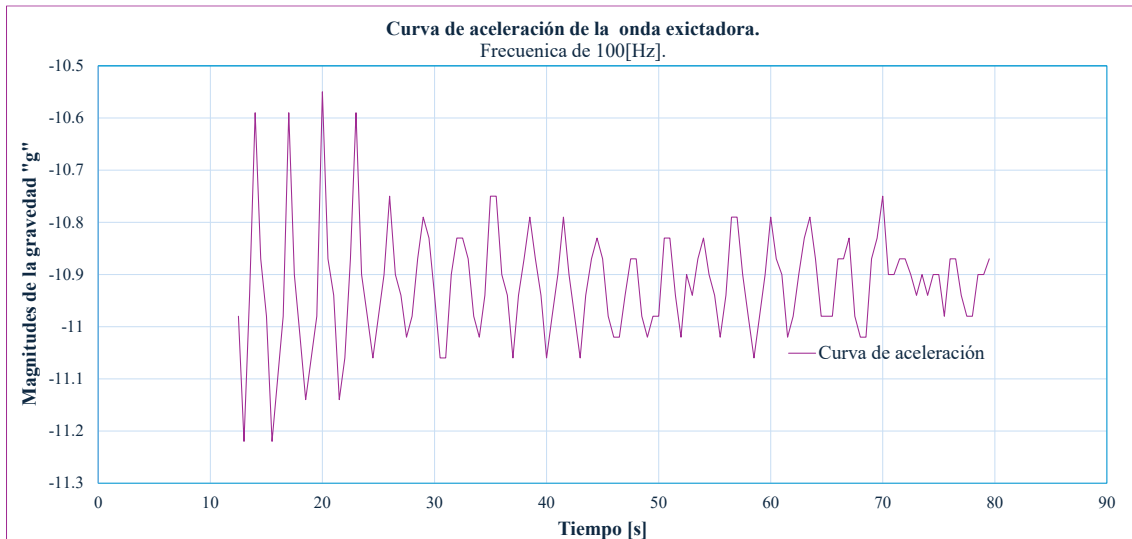
**alternativa de diseño N. °1 (Tabla 2).** El arreglo estructural que se implementa es igual al de la **Figura 38**, para el cual el alambre del muelle que trabaja a compresión tiene un  $\varnothing = 1.8$  [mm], y su  $\varnothing$  exterior es de 12.0 [mm].

La **Gráfica 1** indica el comportamiento de la curva de aceleración en el dominio del tiempo medido en [s], versus la aceleración que está evaluada en función de [g]. La onda excitadora que se induce sobre la estructura es de 100 [Hz].

### Gráfica 1.

Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g (variable dependiente) vs. el dominio del tiempo (variable independiente). Muelle de  $\varnothing$  exterior = 12.0 [mm].

Frecuencia de la onda excitadora = 100[Hz].



Nota. Elaborado por el investigador.

El pico máximo (cresta) de la **Gráfica 1** se sitúa en -10.55, mientras que su pico mínimo (valle) tiene un valor de -11.22 (estos valores son negativos por la posición en la que opera el ADXL345).

Se aplica la **Ecuación 2** para conocer la magnitud de la aceleración, en unidades de  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ , que genera una onda excitadora de 100[Hz] en la estructura de la PCAV.

$$aceleración_{ADXL345} = \left(\frac{y_{m\acute{a}xima} - y_{m\acute{i}nima}}{2}\right) \cdot (gravedad_{terrestre})$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{-10.55 - (-11.27)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{0.67}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

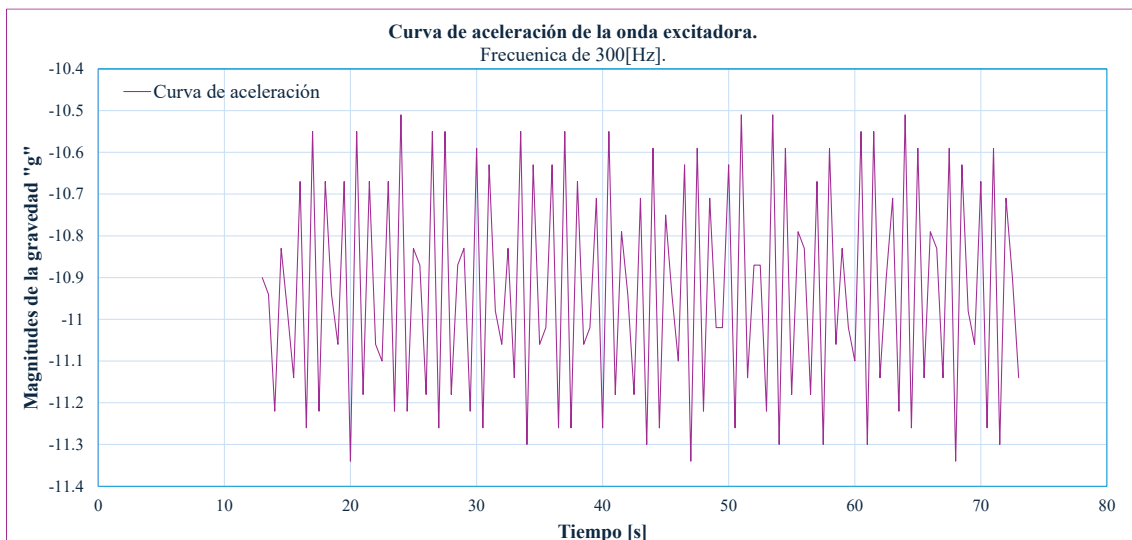
$$aceleración_{ADXL345} = 0.335 g \cdot 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$aceleración_{ADXL345} = 3.285 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

La **Gráfica 2** indica el comportamiento de la PCAV cuando se aplica una onda excitadora igual a 300 [Hz].

### Gráfica 2.

*Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Muelle de  $\varnothing$  exterior =12.0 [mm]. Frecuencia de la onda excitadora=300[Hz].*



*Nota.* Elaborado por el investigador.

El pico máximo(cresta) de la **Gráfica 2** se sitúa en -10.51, mientras que su pico mínimo (valle) tiene un valor de -11.34.

Se aplica nuevamente la **Ecuación 2** para conocer la magnitud de la aceleración que genera una onda excitadora de 300[Hz] en la estructura de la PCAV.

$$aceleración_{ADXL345} = \left( \frac{y_{m\acute{a}xima} - y_{m\acute{i}nima}}{2} \right) \cdot (gravedad_{terrestre})$$

$$aceleraci3n_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{-10.51 - (-11.34)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleraci3n_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{0.83}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

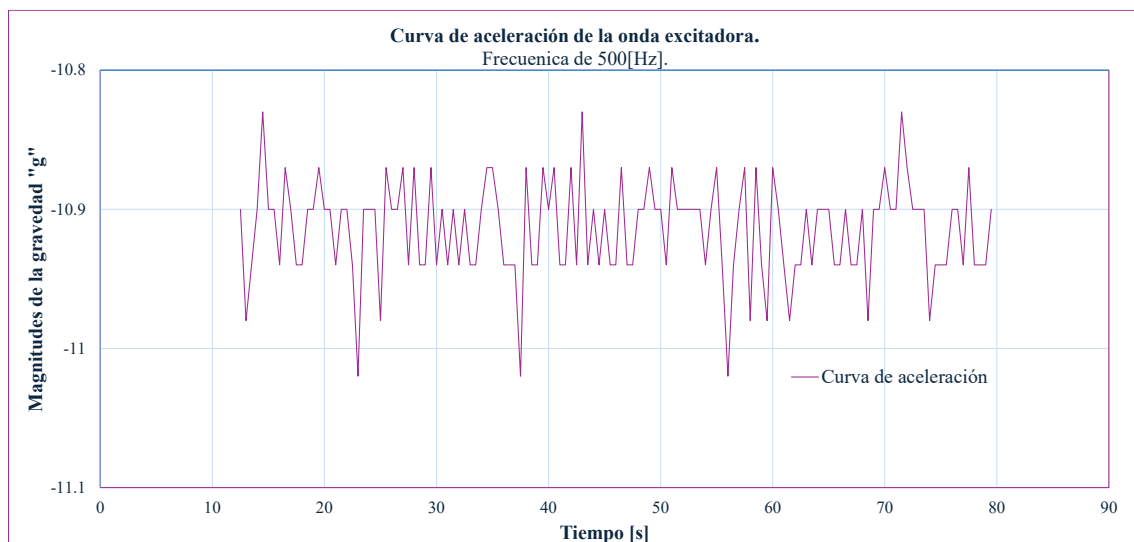
$$aceleraci3n_{ADXL345} = 0.335 g \cdot 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$aceleraci3n_{ADXL345} = 4.070 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

La **Gráfica 3** muestra la reacci3n de la PCAV cuando la onda excitadora es de 500 [Hz], para el mismo juego de muelles que tienen una  $k \approx 1.395 \left[ \frac{N}{m} \right]$ .

### Gráfica 3.

Curva de aceleraci3n para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Muelle de  $\varnothing$  exterior = 12.0 [mm]. Frecuencia de excitaci3n = 500[Hz].



*Nota.* Elaborado por el investigador.

El pico máximo de la **Gráfica 3** se sitúa en -10.82, mientras que su pico mínimo tiene un valor de -11.02. La sustracción *pico* ↔ *pico* es →  $[-10.82 - (-11.02)] =$

0.20. La amplitud de la curva de aceleración es ∴  $A = 0.20$ .

$$aceleración_{ADXL345} = \left( \frac{y_{máxima} - y_{mínima}}{2} \right) \cdot (gravedad_{terrestre})$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{-10.82 - (-11.02)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{0.2}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 0.100 g \cdot 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$aceleración_{ADXL345} = 0.981 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

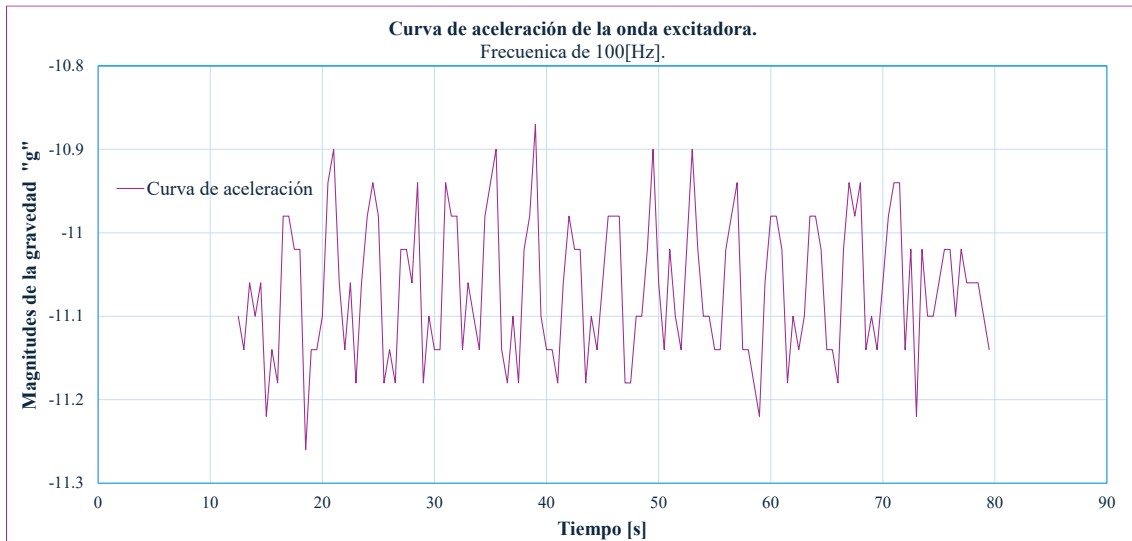
#### 3.2.4.2 Cálculo de la aceleración de la vibración en la PCAV; para la

**alternativa de diseño N. °2 (Tabla 2).** El arreglo estructural que se implementa es igual al de la **Figura 39**, para el cual el alambre del muelle que trabaja a compresión tiene un  $\varnothing = 1.0$  [mm], y su  $\varnothing$  exterior es de 10.0 [mm].

La onda de excitación que se induce sobre la PCAV para la **Gráfica 4** es de 100 [Hz].

**Gráfica 4.**

*Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Muelle de Ø exterior =10.0 [mm]. Frecuencia de excitación =100[Hz].*



*Nota.* Elaborado por el investigador.

Con la **Ecuación 2** se calcula la magnitud de la aceleración que genera la onda excitadora de 100[Hz] en la PCAV.

$$aceleración_{ADXL345} = \left( \frac{y_{máxima} - y_{mínima}}{2} \right) \cdot (gravedad_{terrestre})$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{-10.87 - (-11.27)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{0.40}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

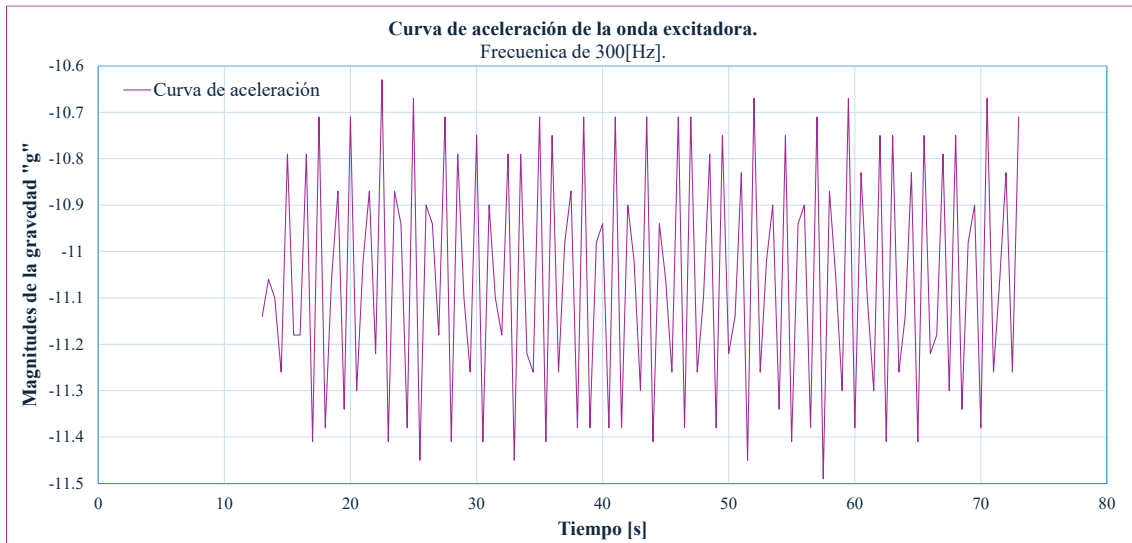
$$aceleración_{ADXL345} = 0.200 g \cdot 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$aceleración_{ADXL345} = 1.961 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

En la **Gráfica 5** está disponible el comportamiento de la PCAV, cuando la onda excitadora es de 300 [Hz].

**Gráfica 5.**

*Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Muelle de Ø exterior =10.0 [mm]. Frecuencia de excitación =300[Hz].*



*Nota.* Elaborado por el investigador.

Se aplica nuevamente la **Ecuación 2** para calcular la magnitud de la aceleración que genera la onda excitadora de 300[Hz].

$$aceleración_{ADXL345} = \left( \frac{y_{máxima} - y_{mínima}}{2} \right) \cdot (gravedad_{terrestre})$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{-10.62 - (-11.49)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{0.87}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

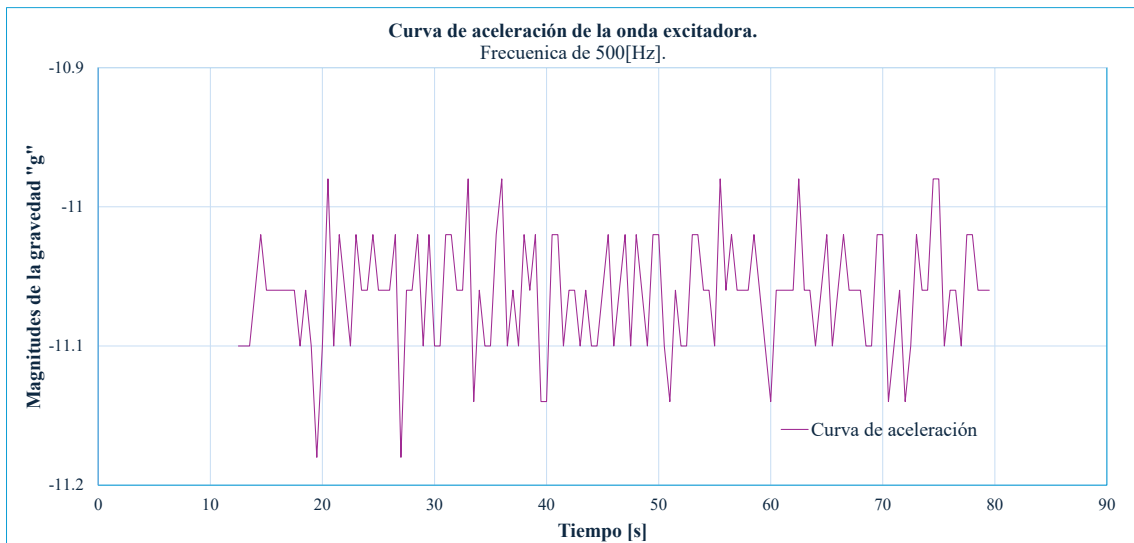
$$aceleración_{ADXL345} = 0.435 g \cdot 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$aceleración_{ADXL345} = 4.266 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

La **Gráfica 6** deja ver el comportamiento de la PCAV cuando se le induce una onda excitadora igual a 500 [Hz], cuando los muelles tienen una  $k \approx 13.55 \times 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$ .

**Gráfica 6.**

*Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Muelle de  $\varnothing$  exterior = 10.0 [mm]. Frecuencia de excitación = 500[Hz].*



*Nota.* Elaborado por el investigador.

Se desarrolla la sustracción *pico*  $\leftrightarrow$  *pico*  $\rightarrow [-10.97 - (-11.18)] = 0.21$ ; para calcular la amplitud de la aceleración de esta curva, que es  $\therefore A = 0.21$ .

Mediante la **Ecuación 2** se calcula la magnitud de la aceleración que genera la onda excitadora de 500[Hz] en la PCAV.

$$aceleración_{ADXL345} = \left( \frac{y_{m\acute{a}xima} - y_{m\acute{i}nima}}{2} \right) \cdot (gravedad_{terrestre})$$

$$aceleraci3n_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{-10.97 - (-11.18)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleraci3n_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{0.21}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 0.105 g \cdot 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

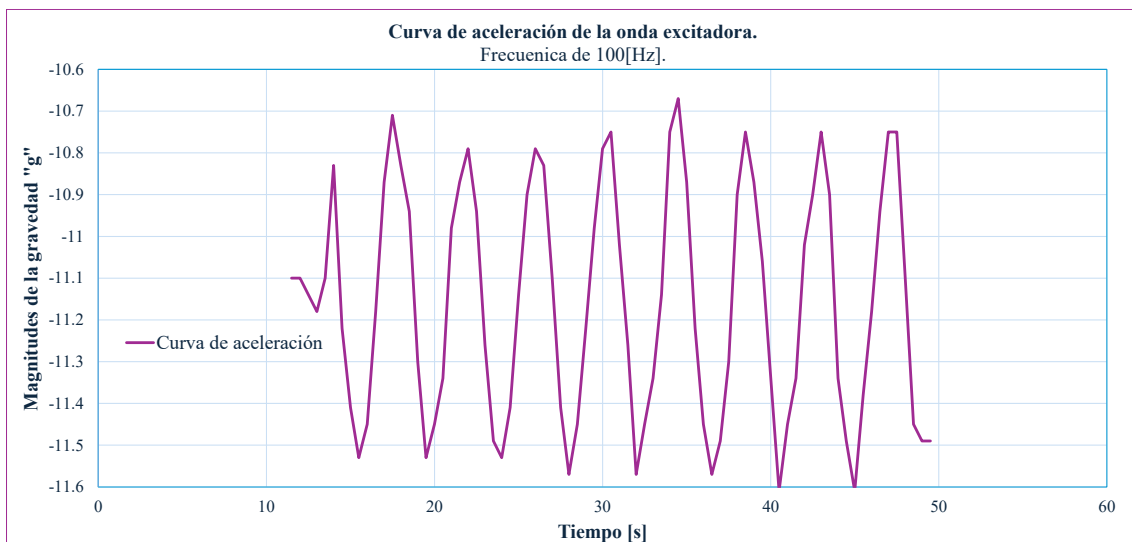
$$aceleración_{ADXL345} = 1.030 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

**3.2.4.3 Cálculo de la aceleración de la vibración en la PCAV; para la alternativa de diseño N. °3 (Tabla 2).** El arreglo estructural que se implementa es igual al de la **Figura 40**, para el cual se ensambla al prototipo con pernos tipo Allen de acero inoxidable M8X70X1.25.

Ahora, para excitar a la PCAV, se induce una frecuencia de 100 [Hz]. El resultado es la curva en la **Gráfica 7**.

**Gráfica 7.**

*Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Pernos tipo Allen inoxidable 304 M8X1.5 [mm]. Frecuencia de excitación =100[Hz].*



*Nota.* Elaborado por el investigador.

Con la **Ecuación 2** se calcula la magnitud de la aceleración que genera la onda excitadora de 100[Hz] en la PCAV.

$$aceleración_{ADXL345} = \left( \frac{y_{m\acute{a}xima} - y_{m\acute{i}nima}}{2} \right) \cdot (gravedad_{terrestre})$$

$$aceleraci3n_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{-10.67 - (-11.60)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleraci3n_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{0.93}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

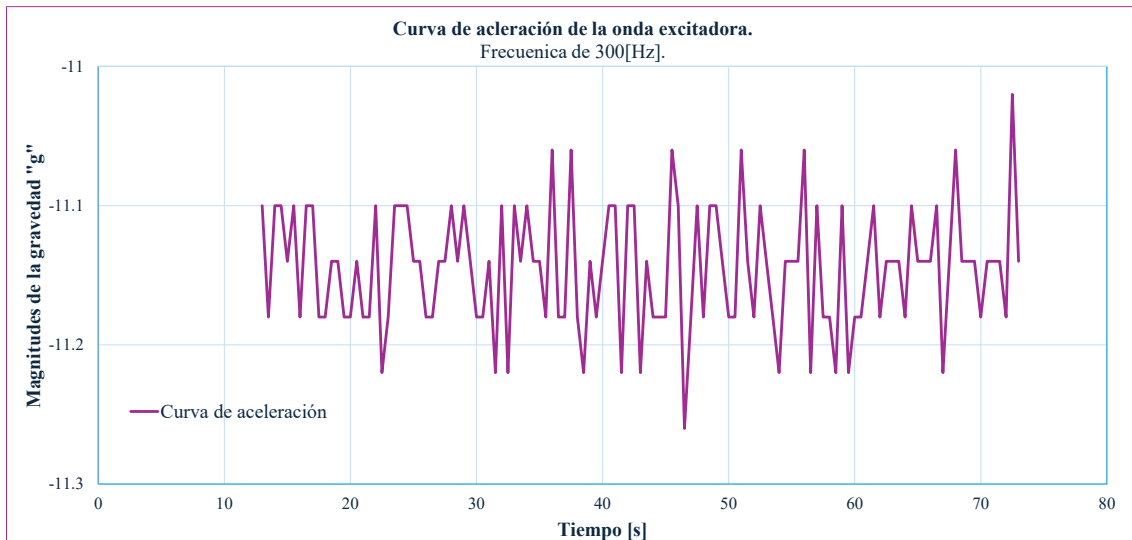
$$aceleraci3n_{ADXL345} = 0.465 g \cdot 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$aceleraci3n_{ADXL345} = 4.560 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

En la **Gráfica 8** está disponible el comportamiento de la PCAV, al aplicarle una frecuencia excitadora de 300 [Hz].

### Gráfica 8.

*Curva de aceleraci3n para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Pernos tipo Allen inoxidable 304 M8X1.5 [mm]. Frecuencia de excitaci3n =300[Hz].*



Empleando otra vez la **Ecuaci3n 2** se calcula la magnitud de la aceleraci3n que genera la onda excitadora de 300[Hz] en la PCAV.

$$aceleración_{ADXL345} = \left( \frac{y_{máxima} - y_{mínima}}{2} \right) \cdot (gravedad_{terrestre})$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{-11.05 - (-11.22)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{0.17}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

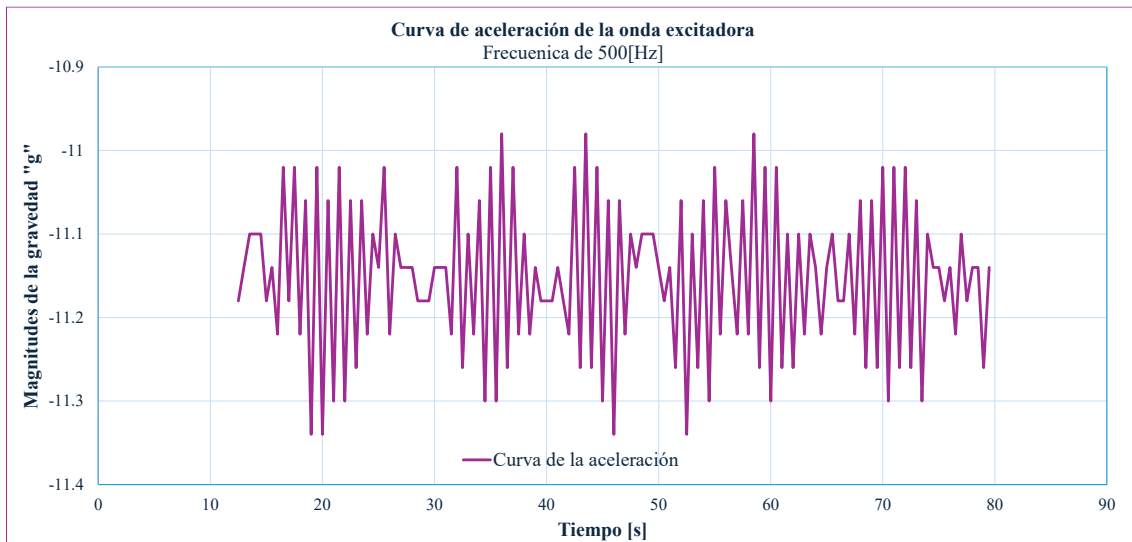
$$aceleración_{ADXL345} = 0.085 g \cdot 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$aceleración_{ADXL345} = 0.834 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

En la **Gráfica 9** está el comportamiento de la PCAV para una frecuencia=500 [Hz].

### Gráfica 9.

Curva de aceleración para el rango de las fuerzas-g vs. el dominio del tiempo. Pernos tipo Allen inoxidable 304 M8X1.5 [mm]. Frecuencia de excitación =500[Hz].



*Nota.* Elaborado por el investigador.

Al aplicar la **Ecuación 2** se determina la magnitud de la aceleración que genera la onda excitadora de 500[Hz] en la PCAV.

$$aceleración_{ADXL345} = \left( \frac{y_{m\acute{a}xima} - y_{m\acute{i}nima}}{2} \right) \cdot (gravedad_{terrestre})$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{-10.97 - (-11.34)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{0.37}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 0.185 g \cdot 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$aceleración_{ADXL345} = 1.814 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

### 3.2.4.4 Evaluación de las mediciones de la aceleración de la onda excitadora

que se aplica en la estructura de la PCAV. Para conocer el

comportamiento de cada alternativa de diseño se resume en la **Tabla 41** a

las mediciones que se levantan con el sensor ADXL345.

**Tabla 41**

*Magnitud de la Aceleración que se detecta en la Estructura de la PCAV.*

Configuración de la estructura de la PCAV	Aceleración cuando la onda excitadora=	Aceleración cuando la onda excitadora=	Aceleración cuando la onda excitadora=	Media aritmética de la aceleración de la onda excitadora
	100 [Hz]	300 [Hz]	500 [Hz]	$\left[ \frac{m}{s^2} \right]$
Tres muelles con Ø exterior = 12.0	3.285 $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$ .	4.070 $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$	0.981 $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$	2.799

---

<b>[mm] y <math>k \approx</math></b>				
<b>1.395 <math>\left[\frac{N}{m}\right]</math></b>				

---

<b>Tres muelles con</b>				
<b><math>\varnothing</math> exterior = 12.0</b>				
<b>[mm] y <math>k \approx</math></b>	1.961 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	4.266 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	1.030 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	2.419
<b><math>13.55 \times 10^3</math></b>				

---

<b>Tres pernos tipo</b>				
<b>Allen</b>				
<b>M8X70.0X1.25</b>	4.560 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	0.834 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	1.814 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	2.403
<b>[mm]</b>				

---

*Nota.* Elaborado por el investigador.

Se evalúa con la **Tabla 41** qué configuración estructural ofrece una respuesta estable, amortiguadora, y/o con garantías de operatividad.

La menor aceleración media sugiere que el uso de pernos proporciona una estructura rígida y no resonante, que limite la transmisión de vibraciones hacia el sensor ADXL345. Esta configuración mejora la estabilidad del sistema y evita que las mediciones del actuador vibrotáctil se vean afectadas por defectos estructurales.

Se selecciona la métrica de 2.403  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ , con pernos M8x70 [mm], por aportar con estabilidad operativa, repetibilidad experimental y robustez estructural. Los pernos evitan desplazamientos no deseados o deformaciones que alteraren las mediciones, también se ensamblan fácil, están normalizados y son comerciales.

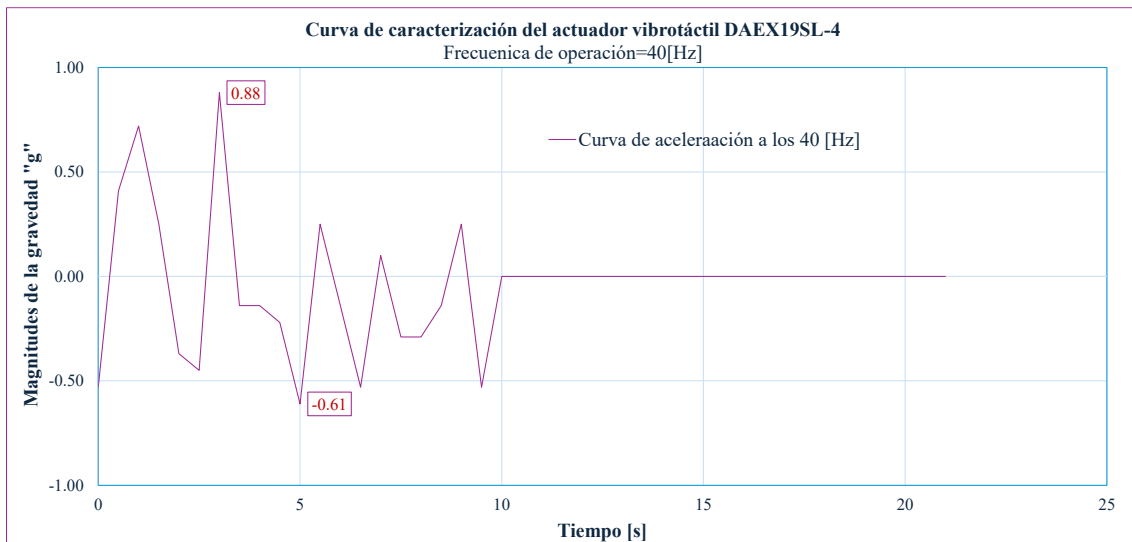
**3.2.5 Resultados de la Caracterización del Actuador Vibrotáctil LRA, modelo DAEX19SL-4.**

Para presentar los resultados de esta caracterización se sigue el procedimiento que se indica en la estructura utilitaria de la **Figura 48**.

Con la **Gráfica 10** se calcula la amplitud de su curva de aceleración:

**Gráfica 10.**

*Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 40[Hz].*



*Nota.* Elaborado por el investigador.

Con la **Ecuación 2** se obtiene el valor de la curva de aceleración:

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{0.88 - (-0.61)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{1.49}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 7.306 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

Con la **Gráfica 11** se calcula la amplitud de la curva:

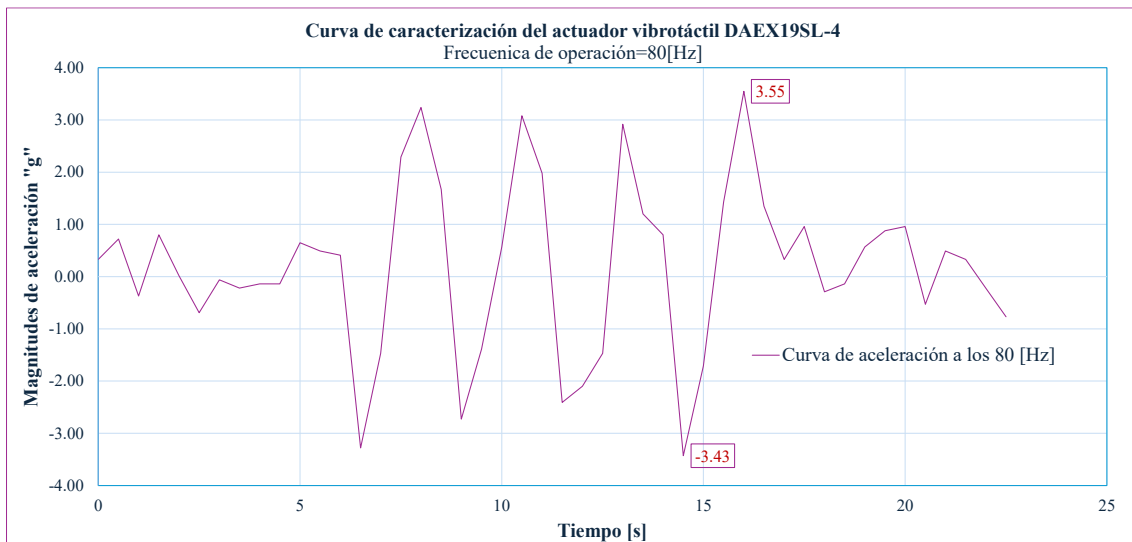
$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{3.55 - (-3.43)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{6.98}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 34.225 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

### Gráfica 11.

Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 80[Hz].



Se emplea la **Gráfica 12** y la **Ecuación 2** para calcular la amplitud de la curva:

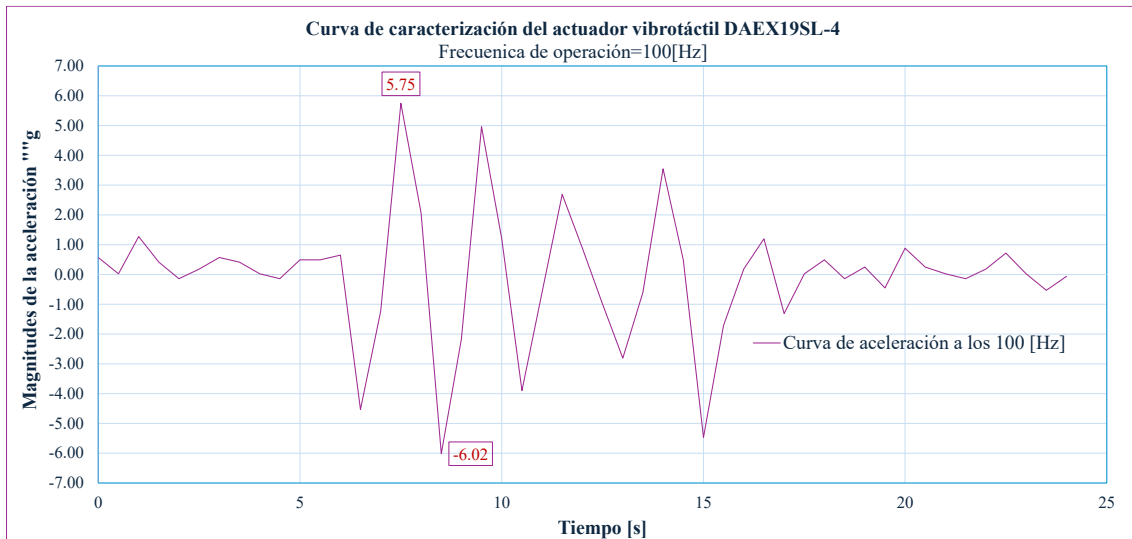
$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{5.75 - (-6.02)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{11.77}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 57.711 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

## Gráfica 12.

Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 100[Hz].



De la Gráfica 13 se calcula la amplitud de la curva:

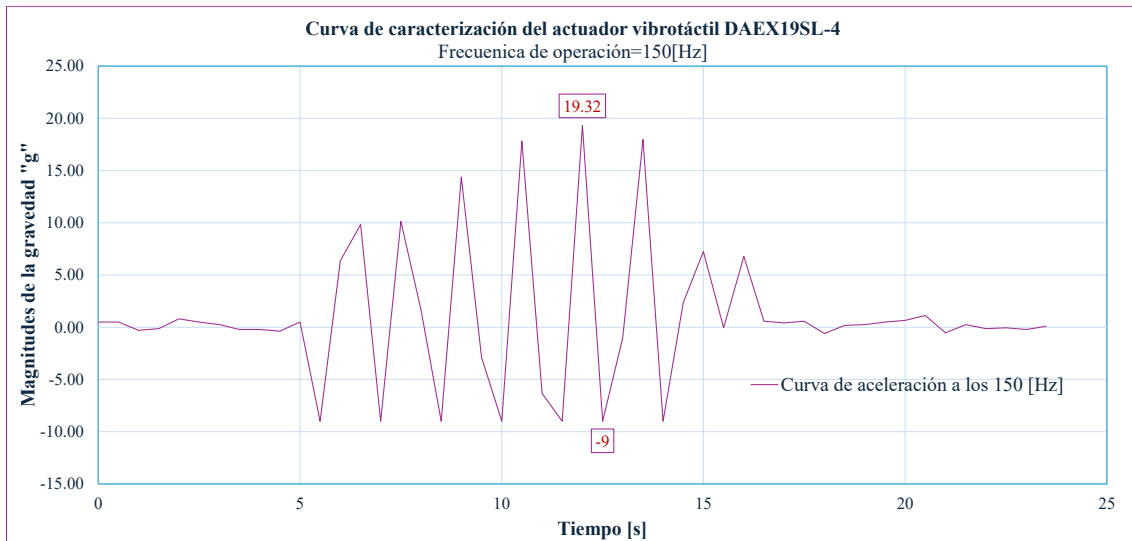
$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{19.32 - (-9.00)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{28.32}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 138.861 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

### Gráfica 13.

Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 150[Hz].



Con la Gráfica 14 se calcula la amplitud de la curva:

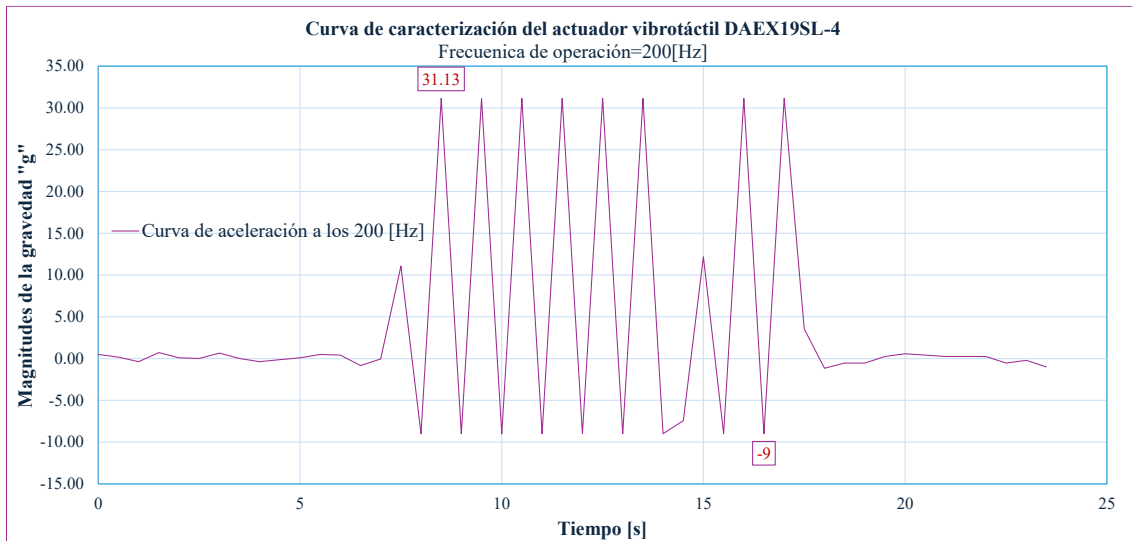
$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{31.13 - (-9.00)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{40.13}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 196.770 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

### Gráfica 14.

Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 200[Hz]



Con la Gráfica 15 se calcula la amplitud de la curva:

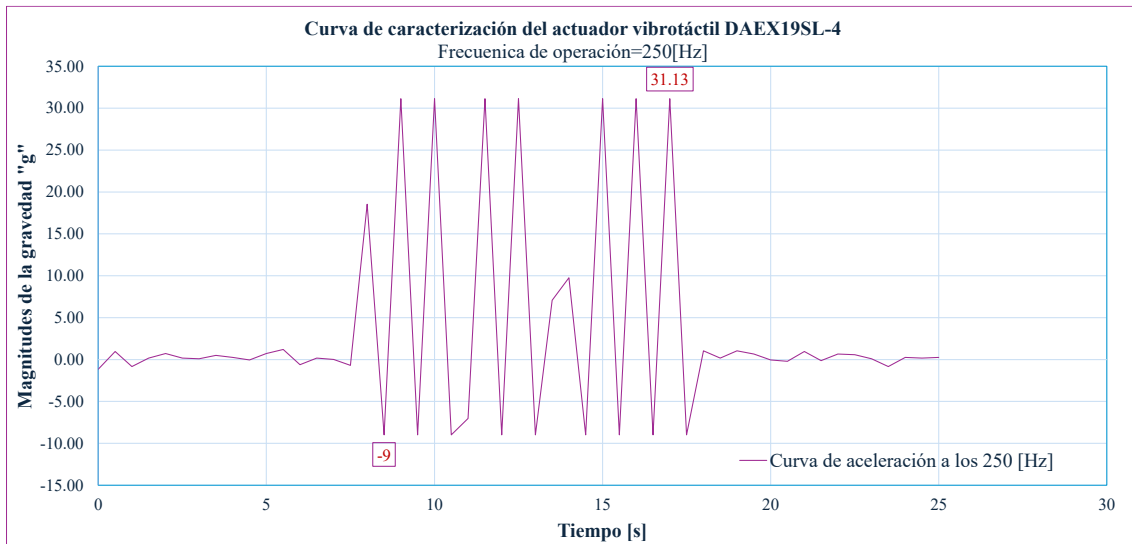
$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{31.13 - (-9.00)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{40.13}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 196.770 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

### Gráfica 15.

Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 250[Hz].



Con la **Gráfica 16** se calcula la amplitud de la curva:

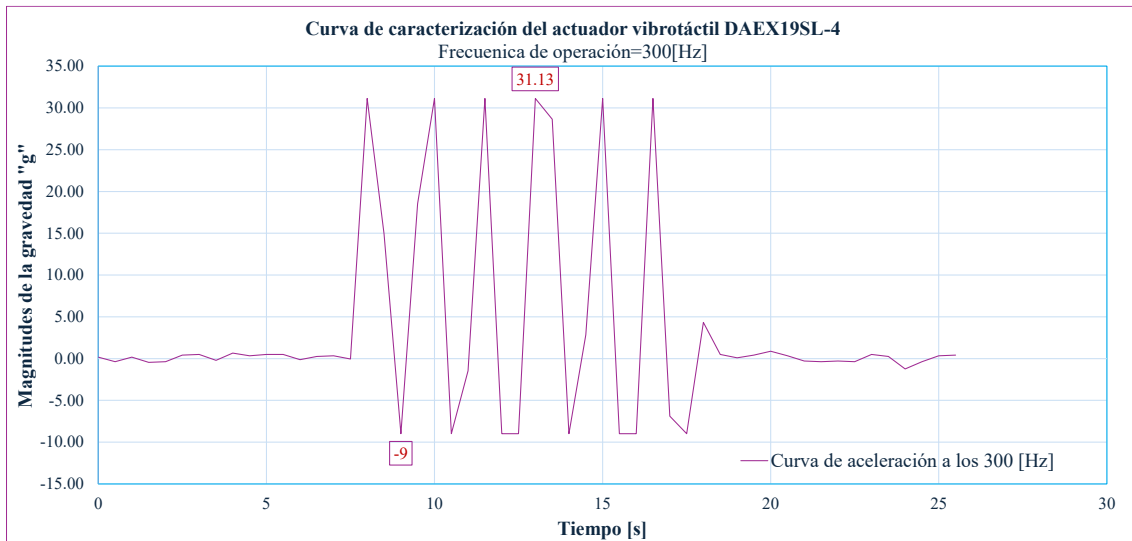
$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{31.13 - (-9.00)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{40.13}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 196.770 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

## Gráfica 16.

Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 300[Hz].



Con la Gráfica 17 se calcula la amplitud de la curva:

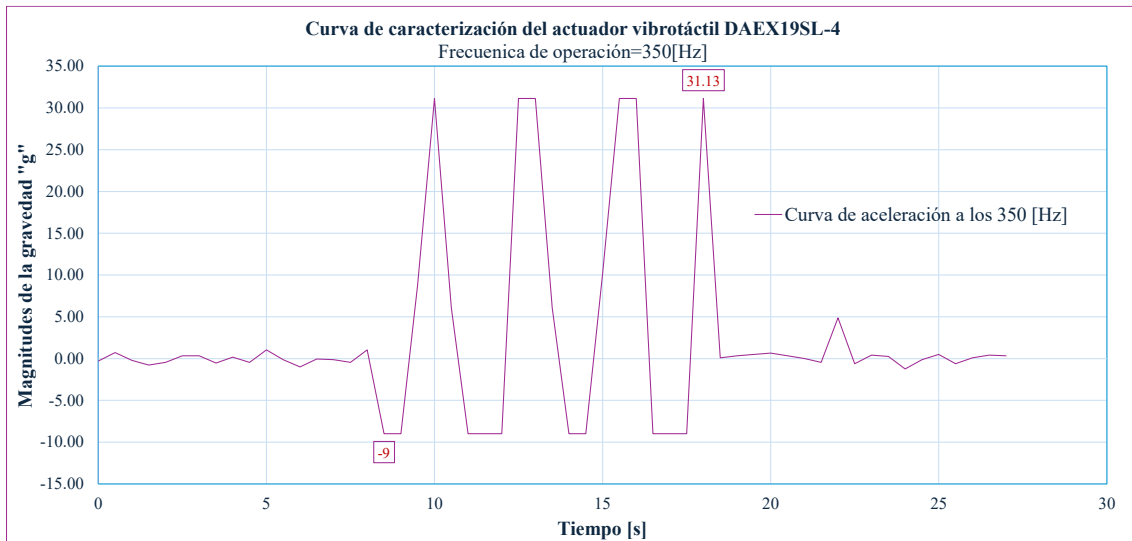
$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{31.13 - (-9.00)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{40.13}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 196.770 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

### Gráfica 17.

Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 350[Hz].



Con la Gráfica 18 se calcula la amplitud de la curva:

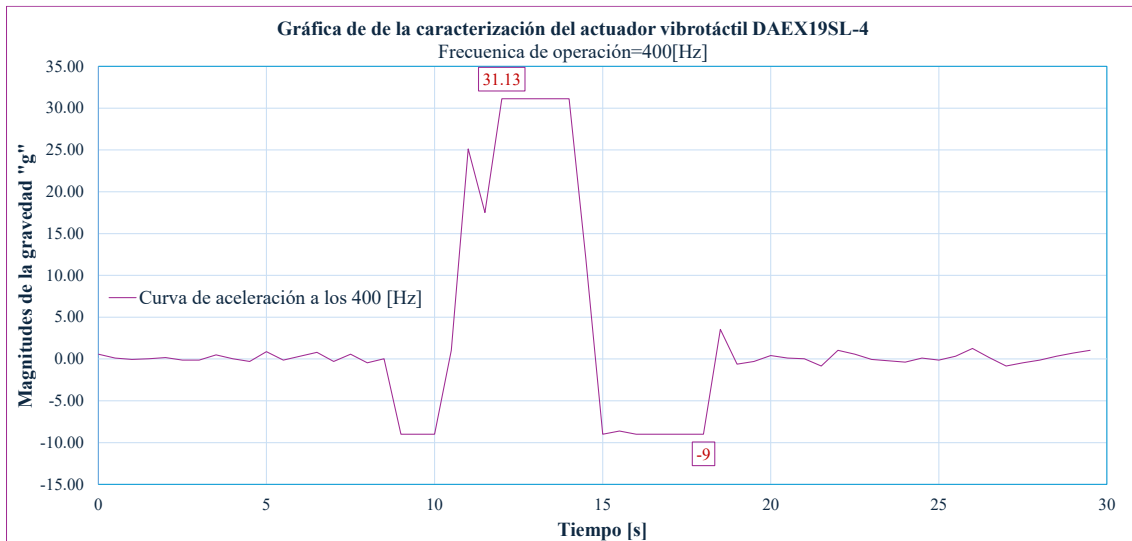
$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{31.13 - (-9.00)}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = \left\{ \left( \frac{40.13}{2} \right) g \right\} \cdot \left\{ 9.8066 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right\}$$

$$aceleración_{ADXL345} = 196.770 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

### Gráfica 18.

Curva de aceleración para la caracterización del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4, a una frecuencia de funcionamiento de 400[Hz].



#### 3.2.5.1 Análisis del comportamiento del actuador vibrotáctil, modelo

**DAEX19SL-4.** Para conocer el comportamiento de este actuador vibrotáctil, se resume en la **Tabla 42** al cálculo del valor de la aceleración para cada frecuencia observada.

**Tabla 42**

*Valores de la Aceleración para la Caracterización del LRA, modelo DAEXL19SL-4.*

<b>N.º de observación</b>	<b>Frecuencia de operación del actuador vibrotáctil</b>	<b>Aceleración que se mide con la PCAV</b>
1	40 [Hz]	$aceleración_{DAEX19SL-4 \rightarrow 40 [Hz]} = 7.306 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$
2	80 [Hz]	$aceleración_{DAEX19SL-4 \rightarrow 80 [Hz]} = 34.225 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$
3	100 [Hz]	$aceleración_{DAEX19SL-4 \rightarrow 100 [Hz]} = 57.712 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$
4	150 [Hz]	$aceleración_{DAEX19SL-4 \rightarrow 150 [Hz]} = 138.861 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$
5	200 [Hz]	$aceleración_{DAEX19SL-4 \rightarrow 200 [Hz]} = 196.770 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$
6	250 [Hz]	$aceleración_{DAEX19SL-4 \rightarrow 250 [Hz]} = 196.770 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$
7	300 [Hz]	$aceleración_{DAEX19SL-4 \rightarrow 300 [Hz]} = 196.770 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$
8	350 [Hz]	$aceleración_{DAEX19SL-4 \rightarrow 350 [Hz]} = 196.770 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$

---

9	400 [Hz]	$aceleración_{DAEX19SL-4 \rightarrow 400 [Hz]} = 196.770 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$
---	----------	--

---

*Nota.* Elaborado por el investigador.

El comportamiento que se observa en la **Tabla 42** (una aceleración constante a partir de los 200 Hz) es característico de un fenómeno conocido como saturación dinámica del actuador vibrotáctil (Rzadkowski, 2025).

En los actuadores del tipo LRA, existe una frecuencia de resonancia mecánica específica que generalmente está entre 170 y 250 [Hz], y corresponde al rango en el cual el sistema alcanza su máxima eficiencia de conversión electromecánica.

Cuando el actuador vibrotáctil opera en; o cerca de esta frecuencia de resonancia, la amplitud de vibración (y por tanto la aceleración) alcanza su valor máximo posible. Aumentar la frecuencia más allá de este punto no incrementa la aceleración, ya que el sistema ha alcanzado su límite físico de respuesta.

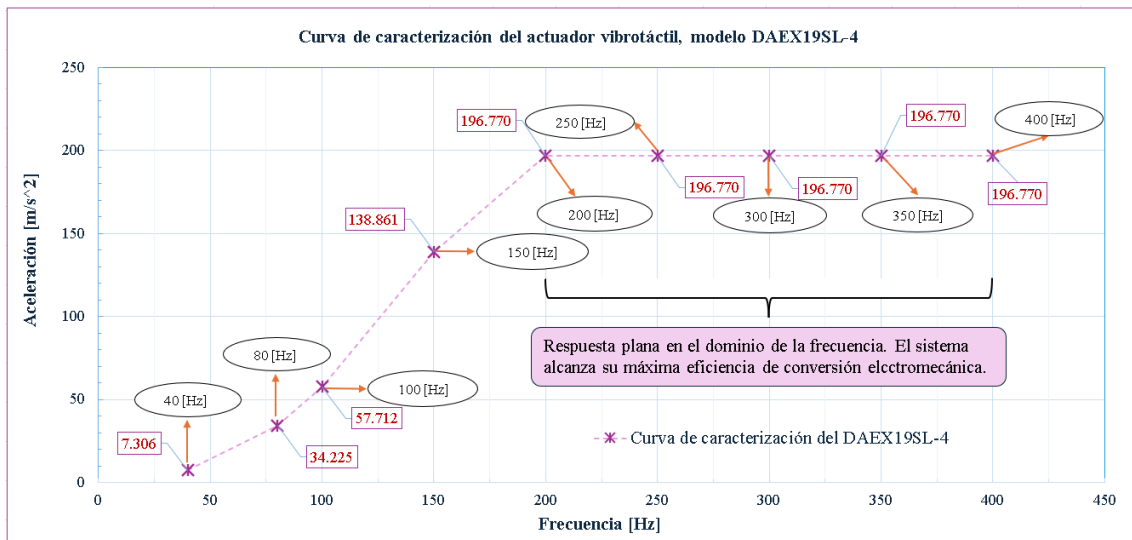
Este límite puede estar determinado por la amplitud máxima del desplazamiento de la masa móvil (ver la **Figura 13**), o la capacidad del amplificador (TDA7498E).

Este comportamiento se representa como una respuesta plana en el dominio de frecuencia, donde la salida (aceleración) se mantiene constante a pesar del aumento en la frecuencia de entrada.

En la **Gráfica 20**, se presentan los resultados de las mediciones que se alcanzan durante los experimentos de caracterización del LRA, modelo DAEX19SL-4.

## Gráfica 19.

Curva de Caracterización del Actuador Vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4.



Nota. Elaborado por el investigador.

En la **Tabla 43** se expone una síntesis de algunos fabricantes de actuadores vibrotáctiles (tipo LRA) que son reconocidos, estos son: Daytona Audio, Precision Microdrivers, Jinlog Machinery y Tactile Labs, cuyos productos son utilizados en la investigación y el desarrollo de sistemas hápticos.

**Tabla 43**

*Fabricantes y Características Técnicas de 4 Actuadores Vibrotáctiles, del tipo LRA.*

<b>Nombre del fabricante y modelo del actuador</b>	<b>Frecuencia de resonancia [Hz]</b>	<b>Rango operativo eficiente [Hz]</b>	<b>Observación</b>	<b>Enlace a la ficha técnica</b>
<b>Precision Microdriver 10mm LRA Model 10mm-RES-LRA</b>	~175	160 a 190	La aceleración máxima se alcanza cerca de los 175 [Hz], más allá la eficiencia cae abruptamente.	<a href="https://www.precisonmicrodrives.com/datasheets/C10-100%20-%20datasheet-006.pdf">https://www.precisonmicrodrives.com/datasheets/C10-100%20-%20datasheet-006.pdf</a>
<b>Jinlong Machinery LRA Model LRA1030</b>	~200	190 a 220	El actuador entra en saturación dinámica cerca de 200 [Hz].	<a href="https://cdn.sparkfun.com/assets/d/0/4/c/d/G1040003D.pdf">https://cdn.sparkfun.com/assets/d/0/4/c/d/G1040003D.pdf</a>
<b>Tactile Labs LRA Model Haptuator Mark II</b>	~235	230 a 260	Mantiene una aceleración constante en un rango estrecho.	<a href="https://www.researchgate.net/publication/357381880_Evaluation_of_Vibrotactile_Output_From_a">https://www.researchgate.net/publication/357381880_Evaluation_of_Vibrotactile_Output_From_a</a>

<b>Dayton Audio DAEX25FH E-4. Modelo superior al DAEX19SL4</b>	~230	220 a 240	Comportamiento de saturación dinámica superior, a partir de los 230 [Hz]	<a href="https://www.daytonaudio.com/images/resources/295-224--dayton-audio-daex25fhe-4-specifications.pdf">https://www.dayton audio.com/images/r esources/295-224-- dayton-audio- daex25fhe-4- specifications.pdf</a>
--	------	-----------	--	--

---

*Nota.* Elaborado por el investigador.

Los datos de la **Tabla 43** respaldan que los actuadores vibrotáctiles del tipo LRA, incluyendo al DAEX19SL-4, presentan una zona de saturación dinámica a partir de su frecuencia de resonancia, que típicamente se encuentra entre 170 y 250 [Hz].

El comportamiento que se observa en los experimentos de caracterización, aceleración constante desde los 200 [Hz], es coherente con el rendimiento dinámico documentado en la misma **Tabla 43** para otros modelos LRA de características semejantes.

## Capítulo IV

### 4.1 Conclusiones

1. Mediante la aplicación de la función de la calidad se obtuvieron los criterios de diseño para el desarrollo de la PCAV, mismos que se detallaron en la **Tabla 3**.

El QFD indica que por una parte el requerimiento del cliente que tiene mayor peso relativo (40%) es la precisión del sistema; y por otra parte define a las atribuciones funcionales de ingeniería con las mayores calificaciones de importancia técnica, que en orden descendente se presentaron en la **Tabla 4**.

2. La PCAV se diseñó a través de la metodología del DFMA de Boothroyd y Dewhurst, que entregó los indicadores de  $E_m=1.2$ , para la eficiencia del montaje y de  $C_f=26.89$ , para la complejidad del conjunto.

Una  $E_m=1.2$  implica que la eficiencia en el montaje real es más rápida que la proyectada. Para el caso de la PCAV se obtiene un  $\Delta=4$  [minutos] y 57 [segundos] a favor en el tiempo de ensamble del prototipo. Este fenómeno es atribuible a lo que se estipuló en la **Tabla 3** (tolerancias dimensionales normalizadas y componentes estándar), dado que se diseñaron roscas, como la de la **Figura 60**, según la normativa INEN-ISO4762 (Normas Técnicas Ecuatorianas) y los criterios de cálculo de ajustes del prontuario de Larburú, para ensamblar mecánicamente a algunos de los componentes.

De acuerdo con la **Tabla 16**, un nivel de complejidad con un  $C_f=26.89$  sugiere que el prototipo tiene un valor de complejidad alto, por su variedad de componentes, la diversidad de funciones integradas al sistema o un

significativo número y tipo de conexiones, necesarias para integrar y poner en operación a la PCAV.

Las materias primas necesarias para fabricar el prototipo se seleccionaron mediante matrices de priorización. El diseño final constó de un total de 45 componentes, cuya denominación se detalló en la **Tabla 15**. Su costo de producción es de \$626.52, se ensambló en 36 minutos y 49 segundos

3. Se validó la operatividad de la PCAV al realizarse 27 muestreos de aceleración con el sensor ADXL345, con un tiempo de duración individual para cada experimento igual a 20 [segundos]. Se obtuvieron los gráficos de las curvas de aceleración, desde el **Gráfico 10** hasta el **18**.

A estas curvas se les aplicó el modelo matemático definido en la **Ecuación 2** para luego determinar que el actuador vibrotáctil tipo LRA, modelo DAEX19SL-4, manifiesta una aceleración constante a partir de los 200 [Hz], con lo cual a partir de esta frecuencia entra en una zona de saturación dinámica, en donde alcanzó su máxima eficiencia de conversión electromecánica.

Los datos entregados en la **Tabla 43** respaldan que los actuadores vibrotáctiles del tipo LRA, incluyendo al DAEX19SL-4, presentan una zona de saturación dinámica a partir de su frecuencia de resonancia, que típicamente se encuentra entre los 170 y los 250 [Hz].

## 4.2 Recomendaciones

- 1) Desarrollar más experimentos de caracterización con la finalidad de generar cartas de control estadístico de la calidad para evaluar a los gráficos de las curvas de aceleración del actuador vibrotáctil, modelo DAEX19SL-4.
- 2) Realizar los diseños esquemáticos y foot print de la placa ESP8266, el ADXL345 y la LCD, en la herramienta CAD F360 que se empleó en esta investigación, para poder integrar los modelos esquemáticos de la ingeniería electrónica de la PCAV en la carpeta colaborativa del macroproyecto.  
  
En la presente investigación ya se aporta con los modelos 3D de la placa de control ESP8266 y de la pantalla LCD HD44780.
- 3) Realizar el diseño geométrico y de los materiales para lograr implementar una carcasa que proteja a los componentes electrónicos y de control que se hallan instalados en la PCAV.
- 4) Para uniones mecánicas roscadas bajo la norma ISO 4762 equivalente a la NTE INEN-ISO4762 (Normas Técnicas Ecuatorianas) y de acuerdo con los cálculos realizados mediante el prontuario de máquinas herramientas de Nicolas Larburú, se recomienda modelar las roscas para impresión 3D con un ajuste de holgura giratorio que tenga un  $\Delta = -0.5$  [mm].
- 5) Diseñar y fabricar una PCB (placa de circuito impreso, por sus siglas en inglés) que contenga a los componentes mecatrónicos de la PCAV y verificar que se puede optimizar el diseño con este nuevo componente, a través de la Metodología de Boothroyd y Dewhurst.
- 6) Implementar y mejorar la programación del **Anexo 5**, para que permita realizar el procesamiento de los datos de caracterización mediante un tratamiento de datos en una nube de Microsoft y herramientas especializadas como Power BI

- 7) Desarrollar una aplicación móvil (para teléfono celular) mediante Arduino IDE, que logre recibir los datos y/o graficar las curvas de aceleración del actuador vibrotáctil, y visualizarlas en tiempo real en una pantalla.
- 8) Diseñar modelos matemáticos que permitan conocer cómo derivar la aceleración registrada con la PCAV en un vector de fuerza y lograr caracterizar al actuador vibrotáctil en función de la carga mecánica que es capaz de transmitir sobre la piel humana, para la retroalimentación vibrotáctil.
- 9) Desarrollar un modelo matemático tal que permita conocer la energía cinética que alcanza el actuador vibrotáctil cuando opera a su frecuencia de resonancia y entra en la zona de saturación dinámica.
- 10) Implementar instrumentación en la PCAV que permita monitorear la temperatura a la que opera el actuador vibrotáctil cuando está funcionando, y definir si esta es segura y eficiente para una determinada aplicación de ingeniería.

## Referencias bibliográficas

- Cai, C., & Sun, Q. (2010). Measurement and evaluation of damping properties of damping material. *21st Conference on Measurement of Force, Mass and Torque Together with HARDMEKO 2010 and 2nd Meeting on Vibration Measurement, IMEKO TC3, TC5 and TC22 Conferences*, 213-216.
- Caroline, M.-K., Bruno, E.-V., Samuel, A.-A., Horacio, S.-M., & Marco Abiel, H.-C. (2014). Fisiología de la vibración REVISIÓN INTRODUCCIÓN FISIOLÓGÍA DE LA SENSIBILIDAD VIBRATORIA. *Artículo, 15(3)*, 163-170.
- Coba-Salcedo, M. F., Vanegas-Rojas, G., Vargas-Henríquez, L., & Rodríguez-Peña, A. (2020). Aplicación de la ingeniería concurrente orientada a la fabricación de una herramienta para la extracción tuerca-corona en una excavadora. *Revista UIS Ingenierías, 20(1)*. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021017>
- Diseño E Implementación De Una Plataforma Escalable Para La Gestion De Sistemas Iot (2020).
- Eduardo, B.-J., Miguel Pedro, R.-O., Bogart Camille, M.-U., & Claudia Marcela, G.-B. (2013). Desarrollo de un material compuesto ultraligero para construir la plataforma de una mesa vibradora. *Ingeniería, Investigación y Tecnología, 14(4)*, 595-611.
- Feriadi, I., Aswin, F., & Nugraha, M. I. (2019). Analisis Sistem Pengukuran Getaran Mems Accelerometer ADXL345. *Manutech : Jurnal Teknologi Manufaktur, 9(02)*, 63-67. <https://doi.org/10.33504/manutech.v9i02.48>
- Heo, Y. H., Choi, D. S., Kim, D. E., & Kim, S. Y. (2021). Flexible Vibrotactile Actuator Based on Dielectric Elastomer for Smart Handheld Devices. *Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 12020, 11(24)*, 12020. <https://doi.org/10.3390/APP112412020>

- Holovatyy, A., Teslyuk, V., Iwaniec, M., & Mashevskaya, M. (2017). Development of a system for monitoring vibration accelerations based on the Raspberry Pi microcomputer and the ADXL345 accelerometer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(9-90), 52-62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.116082>
- Jadán, J., Zapata, M., & Remache, P. (2024). Sensory Substitution in Music: Enhancing Deaf Perception Through Vibrotactile Feedback. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1013 LNNS, 19-29. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-3559-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-97-3559-4_2)
- Kokuyama, W., Shimoda, T., & Nozato, H. (2022). Primary accelerometer calibration with two-axis automatic positioning stage. *Measurement*, 204, 112044. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2022.112044>
- Korres, G., & Eid, M. (2019). Design of Low-Profile Tactile Actuator with Rich Vibrotactile Stimulation for Wearable Applications. *HAVE 2019 - IEEE International Symposium on Haptic, Audio-Visual Environments and Games, Proceedings*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/HAVE.2019.8921319>
- Li, Z., Ma, Y., Zhang, K., Wan, J., Zhao, D., Pi, Y., Chen, G., Zhang, J., Tang, W., Lin, L., & Zhong, J. (2023). Air Permeable Vibrotactile Actuators for Wearable Wireless Haptics. *Advanced Functional Materials*, 33(8), 2211146. <https://doi.org/10.1002/ADFM.202211146>
- Liang, T., Liu, B., Chen, M., Lu, Y., Chen, J., Chen, D., & Wang, J. (2022). A micromachined electrochemical angular accelerometer with highly integrated sensitive microelectrodes. *Microsystems & Nanoengineering 2022 8:1*, 8(1), 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41378-022-00418-7>
- Mason, T., Koo, J. H., Kim, Y. M., & Yang, T. H. (2020). Experimental evaluation on the effect of electrode configuration in electrostatic actuators for increasing vibrotactile

feedback intensity. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(15).

<https://doi.org/10.3390/APP10155375>

Remache-Vinueza, B., Trujillo-Leon, A., & Vidal-Verdu, F. (2024). A Comparative Investigation of Cutaneous Rabbit and Funneling Tactile Illusions for Implementation in Vibrotactile Displays. *IEEE Access*, 12(May), 87299-87308.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3416741>

Remache-Vinueza, B., Trujillo-León, A., & Vidal-Verdú, F. (2024). Phantom sensation: Threshold and quality indicators of a tactile illusion of motion. *Displays*, 83(February).

<https://doi.org/10.1016/j.displa.2024.102676>

Remache-Vinueza, B., Trujillo-León, A., Zapata, M., Sarmiento-Ortiz, F., & Vidal-Verdú, F. (2021). Audio-tactile rendering: A review on technology and methods to convey musical information through the sense of touch. *Sensors*, 21(19).

<https://doi.org/10.3390/s21196575>

Talhan, A., Kim, H., & Jeon, S. (2020). Tactile Ring: Multi-Mode Finger-Worn Soft Actuator for Rich Haptic Feedback. *IEEE Access*, 8, 957-966.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961430>

Torres Castillo, J. R., Pérez Lomelí, J. S., Camargo Casallas, E., & Padilla Castañeda, M. Á. (2018). Dispositivo háptico vibrotáctil inalámbrico para asistencia de actividades motoras. *Visión electrónica*, 12(1), 58-64. <https://doi.org/10.14483/22484728.13310>

Villegas, A. L., Melillo, K. A., & Ramírez, C. E. (2013). Sistema de adquisición de datos vía web para el monitoreo de sensores industriales. *Décima Segunda Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática: CИСCI 2013, June, 6.*

Yeganeh, N., Makarov, I., Unnthorsson, R., & Kristjánsson, Á. (2023). Effects of Stimulus Frequency and Location on Vibrotactile Discrimination Performance Using Voice Coil Actuators on the Forearm. *Actuators*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/act12060224>

Zhu, R., Mao, B., Zhao, Q., Wang, Z., Han, X., Yang, Y., & Li, H. (2021). Dynamic characteristics of Mn-Cu high damping alloy subjected to impact load. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(4), 1-20. <https://doi.org/10.1177/16878140211013616>

## Anexos

### Anexo 1. Módulo ADXL345 Acelerómetro Digital



Data Sheet  
ADXL345

#### 3-Axis, $\pm 2 g/\pm 4 g/\pm 8 g/\pm 16 g$ Digital Accelerometer

#### FEATURES

- ▶ Ultralow power: as low as 23  $\mu\text{A}$  in measurement mode and 0.1  $\mu\text{A}$  in standby mode at  $V_S = 2.5\text{ V}$  (typical)
- ▶ Power consumption scales automatically with bandwidth
- ▶ User-selectable resolution
  - ▶ Fixed 10-bit resolution
  - ▶ Full resolution, where resolution increases with  $g$  range, up to 13-bit resolution at  $\pm 16 g$  (maintaining 4 mg/LSB scale factor in all  $g$  ranges)
- ▶ Embedded memory management system with FIFO technology minimizes host processor load
- ▶ Single tap/double tap detection
- ▶ Activity/inactivity monitoring
- ▶ Free-fall detection
- ▶ Supply voltage range: 2.0 V to 3.6 V
- ▶ I/O voltage range: 1.7 V to  $V_S$
- ▶ SPI (3- and 4-wire) and I<sup>2</sup>C digital interfaces
- ▶ Flexible interrupt modes mappable to either interrupt pin
- ▶ Measurement ranges selectable via serial command
- ▶ Bandwidth selectable via serial command
- ▶ Wide temperature range ( $-40^\circ\text{C}$  to  $+85^\circ\text{C}$ )
- ▶ 10,000  $g$  shock survival
- ▶ Pb free/RoHS compliant
- ▶ Small and thin: 3 mm  $\times$  5 mm  $\times$  1 mm LGA package

#### APPLICATIONS

- ▶ Handsets
- ▶ Medical instrumentation

#### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

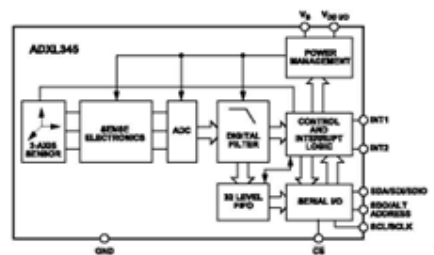


Figure 1.

- ▶ Gaming and pointing devices
- ▶ Industrial instrumentation
- ▶ Personal navigation devices
- ▶ Hard disk drive (HDD) protection

#### GENERAL DESCRIPTION

The ADXL345 is a small, thin, ultralow power, 3-axis accelerometer with high resolution (13-bit) measurement at up to  $\pm 16 g$ . Digital output data is formatted as 16-bit two's complement and is accessible through either a SPI (3- or 4-wire) or I<sup>2</sup>C digital interface.

The ADXL345 is well suited for mobile device applications. It measures the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion or shock. Its high resolution (3.9 mg/LSB) enables measurement of inclination changes less than  $1.0^\circ$ .

Several special sensing functions are provided. Activity and inactivity sensing detect the presence or lack of motion by comparing the acceleration on any axis with user-set thresholds. Tap sensing detects single and double taps in any direction. Free-fall sensing detects if the device is falling. These functions can be mapped individually to either of two interrupt output pins. An integrated memory management system with a 32-level first in, first out (FIFO) buffer can be used to store data to minimize host processor activity and lower overall system power consumption.

Low power modes enable intelligent motion-based power management with threshold sensing and active acceleration measurement at extremely low power dissipation.

The ADXL345 is supplied in a small, thin, 3 mm  $\times$  5 mm  $\times$  1 mm, 14-lead, plastic package.

Rev. G

#### DOCUMENT FEEDBACK

#### TECHNICAL SUPPORT

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable "as is". However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

## TABLE OF CONTENTS

Features.....	1	Bypass Mode.....	21
Applications.....	1	FIFO Mode.....	21
General Description.....	1	Stream Mode.....	21
Functional Block Diagram.....	1	Trigger Mode.....	21
Specifications.....	3	Retrieving Data from FIFO.....	21
Absolute Maximum Ratings.....	5	Self-Test.....	22
Thermal Resistance.....	5	Register Map.....	23
Recommended Soldering Profile.....	5	Register Definitions.....	24
ESD Caution.....	5	Applications Information.....	29
Pin Configuration and Function Descriptions.....	6	Power Supply Decoupling.....	29
Typical Performance Characteristics.....	7	Mechanical Considerations for Mounting.....	29
Theory of Operation.....	12	Tap Detection.....	29
Power Sequencing.....	12	Threshold.....	30
Power Savings.....	13	Link Mode.....	30
Serial Communications.....	14	Sleep Mode vs. Low Power Mode.....	30
SPI.....	14	Offset Calibration.....	30
I <sup>2</sup> C.....	17	Using Self-Test.....	31
Interrupts.....	19	Asynchronous Data Readings.....	32
DATA_READY.....	20	Data Formatting of Upper Data Rates.....	32
SINGLE_TAP.....	20	Noise Performance.....	33
DOUBLE_TAP.....	20	Operation at Voltages Other Than 2.5 V.....	34
Activity.....	20	Offset Performance at Lowest Data Rates.....	34
Inactivity.....	20	Axes of Acceleration Sensitivity.....	35
FREE_FALL.....	20	Layout and Design Recommendations.....	35
Watermark.....	20	Outline Dimensions.....	36
Overrun.....	20	Ordering Guide.....	36
FIFO.....	21	Evaluation Boards.....	36

## REVISION HISTORY

<b>5/2022—Rev. F to Rev. G</b>	
Deleted Package Information Section.....	5
Added Recommended Soldering Profile Section.....	5
Moved Figure 2 and Table 4.....	5
Moved Table 13.....	19
Change to Using Self-Test Section.....	31
Added Asynchronous Data Readings Section.....	32

## SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 2.5\text{ V}$ ,  $V_{DD10} = 1.8\text{ V}$ , acceleration =  $0\text{ g}$ ,  $C_S = 10\text{ }\mu\text{F}$  tantalum,  $C_{I0} = 0.1\text{ }\mu\text{F}$ , output data rate (ODR) =  $800\text{ Hz}$ , unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Test Conditions	Min	Typ <sup>1</sup>	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>					
Measurement Range	Each axis User selectable		$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$		<i>g</i>
Nonlinearity	Percentage of full scale		$\pm 0.5$		%
Inter-Axis Alignment Error			$\pm 0.1$		Degrees
Cross-Axis Sensitivity <sup>2</sup>			$\pm 1$		%
<b>OUTPUT RESOLUTION</b>					
All <i>g</i> Ranges	Each axis 10-bit resolution		10		Bits
$\pm 2\text{ g}$ Range	Full resolution		10		Bits
$\pm 4\text{ g}$ Range	Full resolution		11		Bits
$\pm 8\text{ g}$ Range	Full resolution		12		Bits
$\pm 16\text{ g}$ Range	Full resolution		13		Bits
<b>SENSITIVITY</b>					
Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	Each axis All <i>g</i> -ranges, full resolution	230	256	282	LSB/ <i>g</i>
	$\pm 2\text{ g}$ , 10-bit resolution	230	256	282	LSB/ <i>g</i>
	$\pm 4\text{ g}$ , 10-bit resolution	115	128	141	LSB/ <i>g</i>
	$\pm 8\text{ g}$ , 10-bit resolution	57	64	71	LSB/ <i>g</i>
	$\pm 16\text{ g}$ , 10-bit resolution	29	32	35	LSB/ <i>g</i>
Sensitivity Deviation from Ideal	All <i>g</i> -ranges		$\pm 1.0$		%
Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	All <i>g</i> -ranges, full resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	$\pm 2\text{ g}$ , 10-bit resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	$\pm 4\text{ g}$ , 10-bit resolution	7.1	7.8	8.7	mg/LSB
	$\pm 8\text{ g}$ , 10-bit resolution	14.1	15.6	17.5	mg/LSB
	$\pm 16\text{ g}$ , 10-bit resolution	28.6	31.2	34.5	mg/LSB
Sensitivity Change Due to Temperature			$\pm 0.01$		%/ $^\circ\text{C}$
<b>0 g OFFSET</b>					
0 <i>g</i> Output for $X_{OUT}, Y_{OUT}$	Each axis	-150	0	+150	mg
0 <i>g</i> Output for $Z_{OUT}$		-250	0	+250	mg
0 <i>g</i> Output Deviation from Ideal, $X_{OUT}, Y_{OUT}$			$\pm 35$		mg
0 <i>g</i> Output Deviation from Ideal, $Z_{OUT}$			$\pm 40$		mg
0 <i>g</i> Offset vs. Temperature for X-, Y-Axes			$\pm 0.4$		mg/ $^\circ\text{C}$
0 <i>g</i> Offset vs. Temperature for Z-Axis			$\pm 1.2$		mg/ $^\circ\text{C}$
<b>NOISE</b>					
X-, Y-Axes	ODR = 100 Hz for $\pm 2\text{ g}$ , 10-bit resolution or all <i>g</i> -ranges, full resolution	0.75			LSB rms
		1.1			LSB rms
Z-Axis	ODR = 100 Hz for $\pm 2\text{ g}$ , 10-bit resolution or all <i>g</i> -ranges, full resolution	1.1			LSB rms
<b>OUTPUT DATA RATE AND BANDWIDTH</b>					
Output Data Rate (ODR) <sup>3, 4, 5</sup>	User selectable	0.1		3200	Hz
<b>SELF-TEST<sup>6</sup></b>					
Output Change in X-Axis		0.20		2.10	<i>g</i>

## SPECIFICATIONS

Table 1.

Parameter	Test Conditions	Min	Typ <sup>1</sup>	Max	Unit
Output Change in Y-Axis		-2.10		-0.20	g
Output Change in Z-Axis		0.30		3.40	g
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range (V <sub>S</sub> )		2.0	2.5	3.6	V
Interface Voltage Range (V <sub>DDIO</sub> )		1.7	1.8	V <sub>S</sub>	V
Supply Current	ODR ≥ 100 Hz		140		μA
	ODR < 10 Hz		30		μA
Standby Mode Leakage Current			0.1		μA
Turn-On and Wake-Up Time <sup>7</sup>	ODR = 3200 Hz		1.4		ms
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		-40		+85	°C
WEIGHT					
Device Weight			30		mg

<sup>1</sup> The typical specifications shown are for at least 68% of the population of parts and are based on the worst case of mean  $\pm 1\sigma$ , except for 0 g output and sensitivity, which represents the target value. For 0 g offset and sensitivity, the deviation from the ideal describes the worst case of mean  $\pm 1\sigma$ .

<sup>2</sup> Cross-axis sensitivity is defined as coupling between any two axes.

<sup>3</sup> Bandwidth is the -3 dB frequency and is half the output data rate, bandwidth = ODR/2.

<sup>4</sup> The output format for the 3200 Hz and 1600 Hz ODRs is different than the output format for the remaining ODRs. This difference is described in the [Data Formatting of Upper Data Rates](#) section.

<sup>5</sup> Output data rates below 6.25 Hz exhibit additional offset shift with increased temperature, depending on selected output data rate. Refer to the [Offset Performance at Lowest Data Rates](#) section for details.

<sup>6</sup> Self-test change is defined as the output (g) when the SELF\_TEST bit = 1 (in the DATA\_FORMAT register, Address 0x31) minus the output (g) when the SELF\_TEST bit = 0. Due to device filtering, the output reaches its final value after  $4 \times \tau$  when enabling or disabling self-test, where  $\tau = 1/(\text{data rate})$ . The part must be in normal power operation (LOW\_POWER bit = 0 in the BW\_RATE register, Address 0x2C) for self-test to operate correctly.

<sup>7</sup> Turn-on and wake-up times are determined by the user-defined bandwidth. At a 100 Hz data rate, the turn-on and wake-up times are each approximately 11.1 ms. For other data rates, the turn-on and wake-up times are each approximately  $\tau + 1.1$  in milliseconds, where  $\tau = 1/(\text{data rate})$ .

**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

**Table 2.**

Parameter	Rating
Acceleration	
Any Axis, Unpowered	10,000 g
Any Axis, Powered	10,000 g
V <sub>S</sub>	-0.3 V to +3.9 V
V <sub>DD I/O</sub>	-0.3 V to +3.9 V
Digital Pins	-0.3 V to V <sub>DD I/O</sub> + 0.3 V or 3.9 V, whichever is less
All Other Pins	-0.3 V to +3.9 V
Output Short-Circuit Duration (Any Pin to Ground)	Indefinite
Temperature Range	
Powered	-40°C to +105°C
Storage	-40°C to +105°C

Stresses at or above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the product. This is a stress rating only; functional operation of the product at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Operation beyond the maximum operating conditions for extended periods may affect product reliability.

**THERMAL RESISTANCE**

**Table 3. Package Characteristics**

Package Type	$\theta_{JA}$	$\theta_{JC}$	Device Weight
14-Terminal LGA	150°C/W	85°C/W	30 mg

**RECOMMENDED SOLDERING PROFILE**

Figure 2 and Table 4 provide details about the recommended soldering profile.

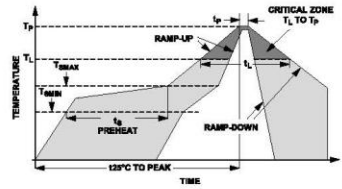


Figure 2. Recommended Soldering Profile

Table 4. Recommended Soldering Profile<sup>1,2</sup>

Profile Feature	Condition	
	Sn63/Pb37	Pb-Free
Average Ramp Rate from Liquid Temperature (T <sub>L</sub> ) to Peak Temperature (T <sub>P</sub> )	3°C/sec maximum	3°C/sec maximum
Preheat		
Minimum Temperature (T <sub>S MIN</sub> )	100°C	150°C
Maximum Temperature (T <sub>S MAX</sub> )	150°C	200°C
Time from T <sub>S MIN</sub> to T <sub>S MAX</sub> (t <sub>S</sub> )	60 sec to 120 sec	60 sec to 180 sec
T <sub>S MAX</sub> to T <sub>L</sub> Ramp-Up Rate	3°C/sec maximum	3°C/sec maximum
Liquid Temperature (T <sub>L</sub> )	183°C	217°C
Time Maintained Above T <sub>L</sub> (t <sub>L</sub> )	60 sec to 150 sec	60 sec to 150 sec
Peak Temperature (T <sub>P</sub> )	240 + 0/-5°C	280 + 0/-5°C
Time of Actual T <sub>P</sub> - 5°C (t <sub>P</sub> )	10 sec to 30 sec	20 sec to 40 sec
Ramp-Down Rate	6°C/sec maximum	6°C/sec maximum
Time 25°C to Peak Temperature	6 minutes maximum	8 minutes maximum

<sup>1</sup> Based on JEDEC Standard J-STD-020D.1.

<sup>2</sup> For best results, the soldering profile should be in accordance with the recommendations of the manufacturer of the solder paste used.

**ESD CAUTION**



**ESD (electrostatic discharge) sensitive device.** Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

## PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS

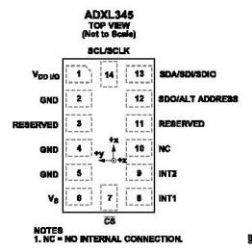


Figure 3. Pin Configuration (Top View)

Table 5. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	V <sub>DD I/O</sub>	Digital Interface Supply Voltage.
2	GND	This pin must be connected to ground.
3	RESERVED	Reserved. This pin must be connected to V <sub>S</sub> or left open.
4	GND	This pin must be connected to ground.
5	GND	This pin must be connected to ground.
6	V <sub>S</sub>	Supply Voltage.
7	CS	Chip Select.
8	INT1	Interrupt 1 Output.
9	INT2	Interrupt 2 Output.
10	NC	Not Internally Connected.
11	RESERVED	Reserved. This pin must be connected to ground or left open.
12	SDO/ALT ADDRESS	Serial Data Output (SPI 4-Wire)/Alternate I <sup>2</sup> C Address Select (I <sup>2</sup> C).
13	SDA/SDI/SDIO	Serial Data (I <sup>2</sup> C)/Serial Data Input (SPI 4-Wire)/Serial Data Input and Output (SPI 3-Wire).
14	SCL/SCLK	Serial Communications Clock. SCL is the clock for I <sup>2</sup> C, and SCLK is the clock for SPI.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

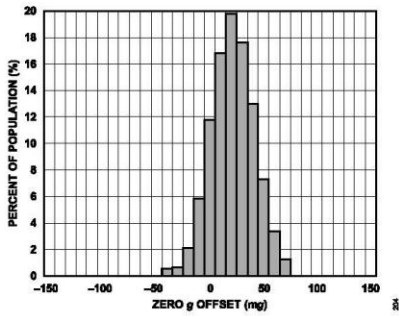


Figure 4. X-Axis Zero g Offset at 25°C,  $V_S = 2.5 V$

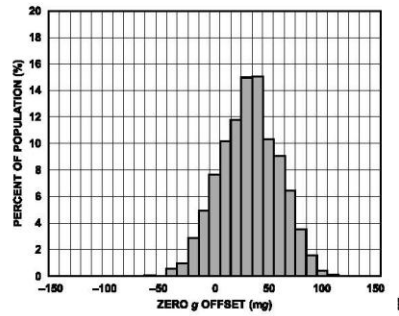


Figure 7. X-Axis Zero g Offset at 25°C,  $V_S = 3.3 V$

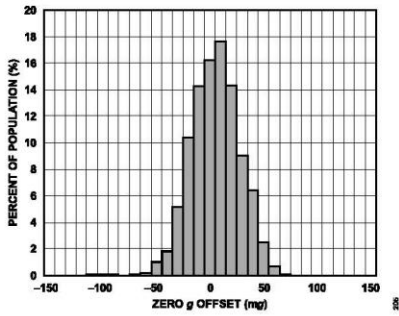


Figure 5. Y-Axis Zero g Offset at 25°C,  $V_S = 2.5 V$

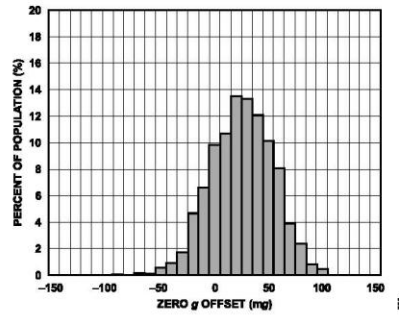


Figure 8. Y-Axis Zero g Offset at 25°C,  $V_S = 3.3 V$

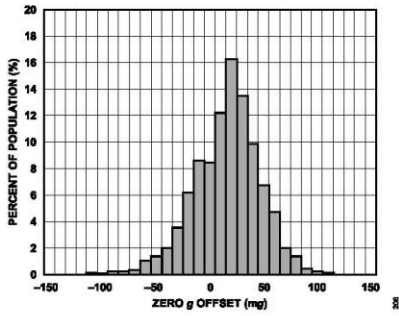


Figure 6. Z-Axis Zero g Offset at 25°C,  $V_S = 2.5 V$

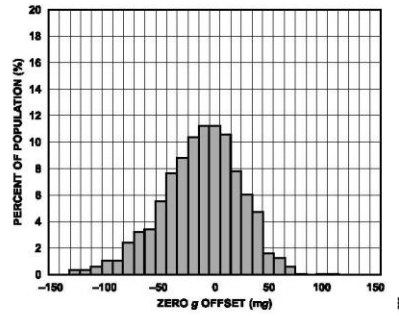


Figure 9. Z-Axis Zero g Offset at 25°C,  $V_S = 3.3 V$

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

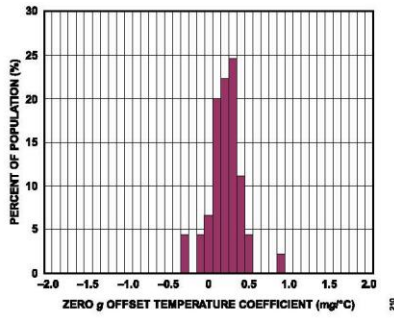


Figure 10. X-Axis Zero g Offset Temperature Coefficient,  $V_S = 2.5\text{ V}$

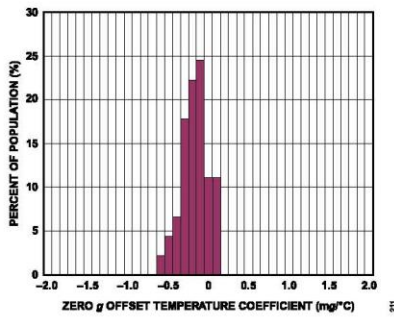


Figure 11. Y-Axis Zero g Offset Temperature Coefficient,  $V_S = 2.5\text{ V}$

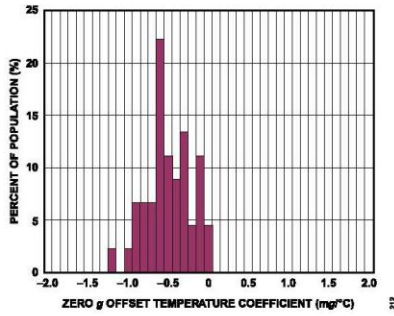


Figure 12. Z-Axis Zero g Offset Temperature Coefficient,  $V_S = 2.5\text{ V}$

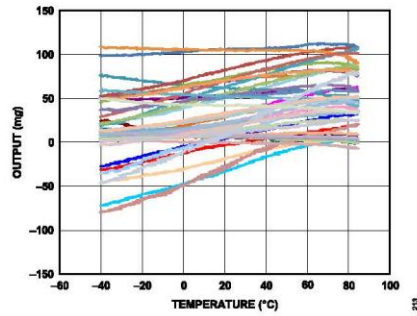


Figure 13. X-Axis Zero g Offset vs. Temperature—45 Parts Soldered to PCB,  $V_S = 2.5\text{ V}$

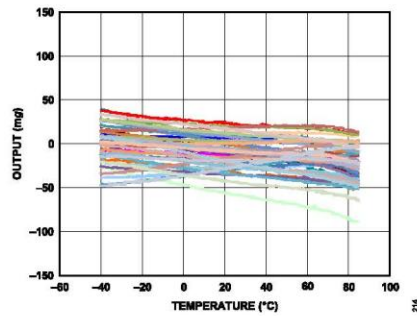


Figure 14. Y-Axis Zero g Offset vs. Temperature—45 Parts Soldered to PCB,  $V_S = 2.5\text{ V}$

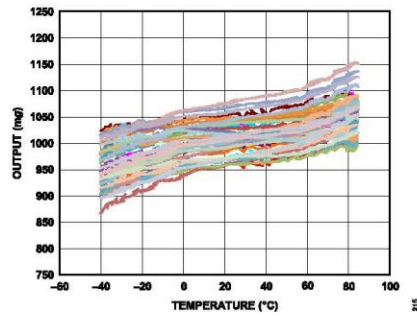


Figure 15. Z-Axis One g Offset vs. Temperature—45 Parts Soldered to PCB,  $V_S = 2.5\text{ V}$

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

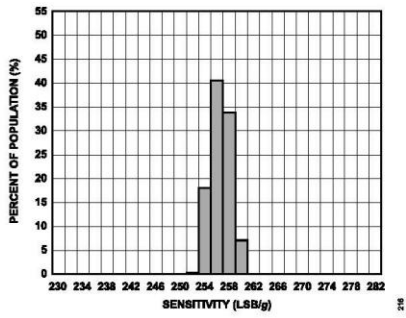


Figure 16. X-Axis Sensitivity at 25°C,  $V_S = 2.5 V$ , Full Resolution

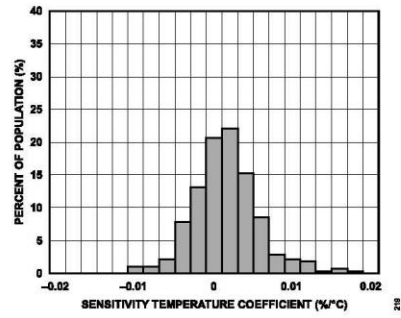


Figure 19. X-Axis Sensitivity Temperature Coefficient,  $V_S = 2.5 V$

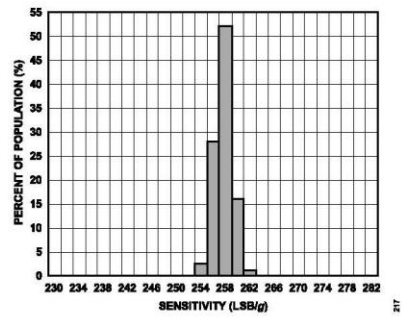


Figure 17. Y-Axis Sensitivity at 25°C,  $V_S = 2.5 V$ , Full Resolution

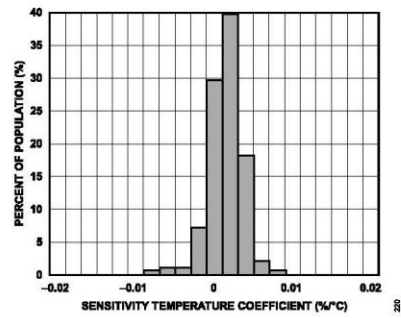


Figure 20. Y-Axis Sensitivity Temperature Coefficient,  $V_S = 2.5 V$

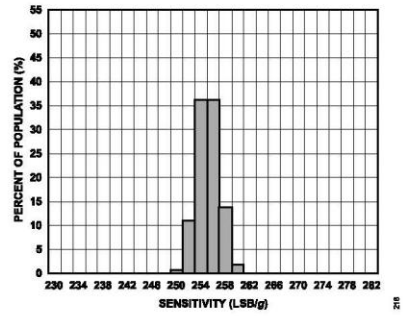


Figure 18. Z-Axis Sensitivity at 25°C,  $V_S = 2.5 V$ , Full Resolution

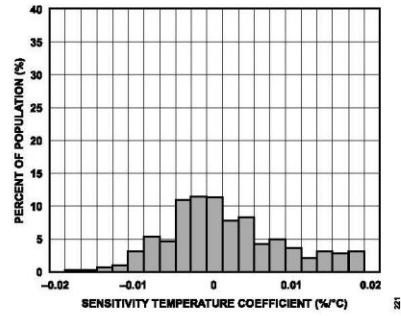


Figure 21. Z-Axis Sensitivity Temperature Coefficient,  $V_S = 2.5 V$

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

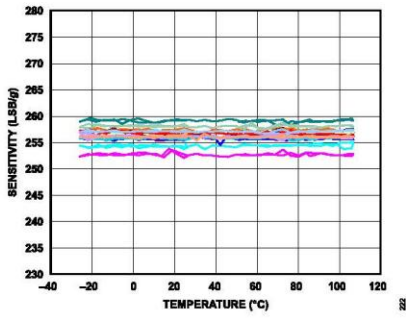


Figure 22. X-Axis Sensitivity vs. Temperature—Eight Parts Soldered to PCB,  $V_S = 2.5\text{ V}$ , Full Resolution

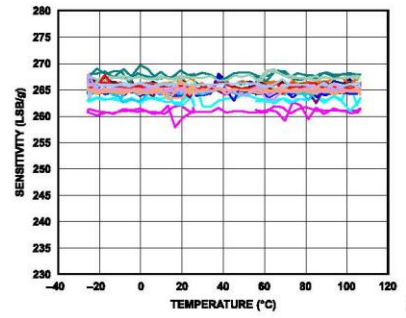


Figure 25. X-Axis Sensitivity vs. Temperature—Eight Parts Soldered to PCB,  $V_S = 3.3\text{ V}$ , Full Resolution

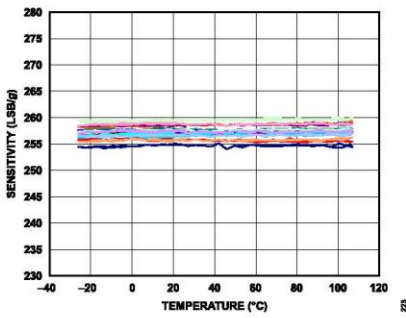


Figure 23. Y-Axis Sensitivity vs. Temperature—Eight Parts Soldered to PCB,  $V_S = 2.5\text{ V}$ , Full Resolution

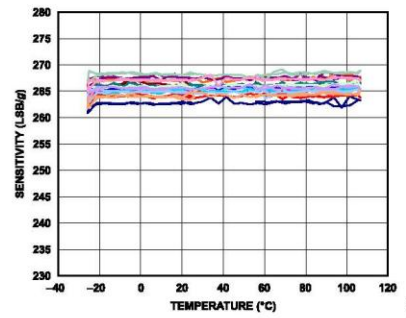


Figure 26. Y-Axis Sensitivity vs. Temperature—Eight Parts Soldered to PCB,  $V_S = 3.3\text{ V}$ , Full Resolution

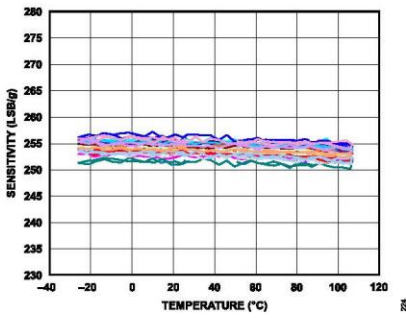


Figure 24. Z-Axis Sensitivity vs. Temperature—Eight Parts Soldered to PCB,  $V_S = 2.5\text{ V}$ , Full Resolution

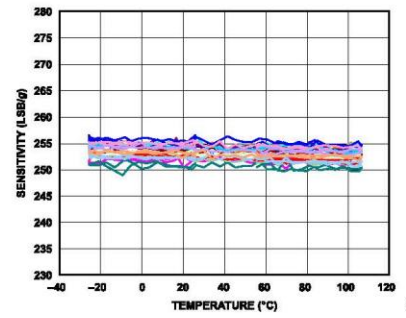


Figure 27. Z-Axis Sensitivity vs. Temperature—Eight Parts Soldered to PCB,  $V_S = 3.3\text{ V}$ , Full Resolution

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

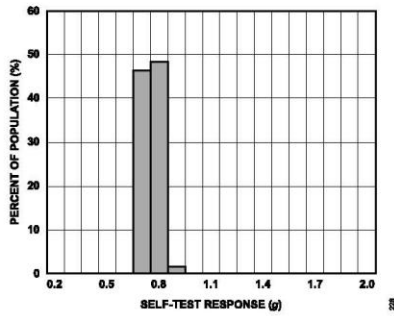


Figure 28. X-Axis Self-Test Response at 25°C,  $V_S = 2.5\text{ V}$

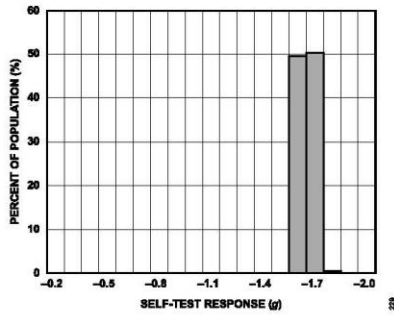


Figure 29. Y-Axis Self-Test Response at 25°C,  $V_S = 2.5\text{ V}$

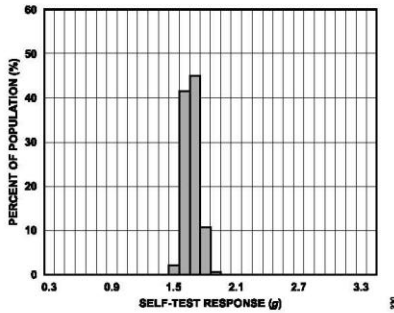


Figure 30. Z-Axis Self-Test Response at 25°C,  $V_S = 2.5\text{ V}$

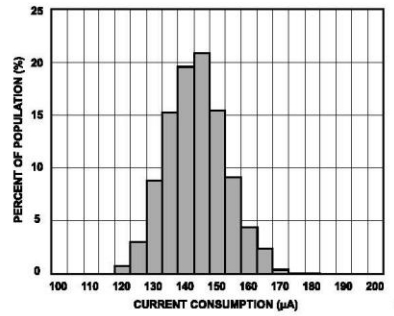


Figure 31. Current Consumption at 25°C, 100 Hz Output Data Rate,  $V_S = 2.5\text{ V}$

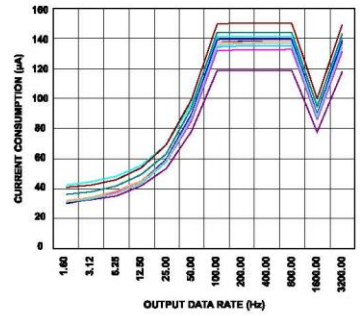


Figure 32. Current Consumption vs. Output Data Rate at 25°C—10 Parts,  $V_S = 2.5\text{ V}$

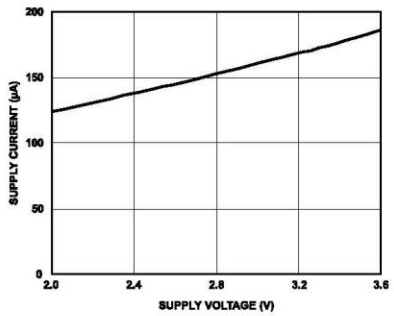


Figure 33. Supply Current vs. Supply Voltage,  $V_S$  at 25°C

## THEORY OF OPERATION

The ADXL345 is a complete 3-axis acceleration measurement system with a selectable measurement range of  $\pm 2 g$ ,  $\pm 4 g$ ,  $\pm 8 g$ , or  $\pm 16 g$ . It measures both dynamic acceleration resulting from motion or shock and static acceleration, such as gravity, that allows the device to be used as a tilt sensor.

The sensor is a polysilicon surface-micromachined structure built on top of a silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against forces due to applied acceleration.

Deflection of the structure is measured using differential capacitors that consist of independent fixed plates and plates attached to the moving mass. Acceleration deflects the proof mass and unbalances the differential capacitor, resulting in a sensor output whose amplitude is proportional to acceleration. Phase-sensitive demodulation is used to determine the magnitude and polarity of the acceleration.

### POWER SEQUENCING

Power can be applied to  $V_S$  or  $V_{DD I/O}$  in any sequence without damaging the ADXL345. All possible power-on modes are summarized in Table 6.

**Table 6. Power Sequencing**

Condition	$V_S$	$V_{DD I/O}$	Description
Power Off	Off	Off	The device is completely off, but there is a potential for a communication bus conflict.
Bus Disabled	On	Off	The device is on in standby mode, but communication is unavailable and creates a conflict on the communication bus. The duration of this state should be minimized during power-up to prevent a conflict.
Bus Enabled	Off	On	No functions are available, but the device does not create a conflict on the communication bus.
Standby or Measurement	On	On	At power-up, the device is in standby mode, awaiting a command to enter measurement mode, and all sensor functions are off. After the device is instructed to enter measurement mode, all sensor functions are available.

ized in Table 6. The interface voltage level is set with the interface supply voltage,  $V_{DD I/O}$ , which must be present to ensure that the ADXL345 does not create a conflict on the communication bus. For single-supply operation,  $V_{DD I/O}$  can be the same as the main supply,  $V_S$ . In a dual-supply application, however,  $V_{DD I/O}$  can differ from  $V_S$  to accommodate the desired interface voltage, as long as  $V_S$  is greater than or equal to  $V_{DD I/O}$ . When power cycling is required,  $V_S$  and  $V_{DD I/O}$  must be completely discharged (to GND) before powering the device back on.

After  $V_S$  is applied, the device enters standby mode, where power consumption is minimized and the device waits for  $V_{DD I/O}$  to be applied and for the command to enter measurement mode to be received. (This command can be initiated by setting the measure bit (Bit D3) in the POWER\_CTL register (Address 0x2D).) In addition, while the device is in standby mode, any register can be written to or read from to configure the part. It is recommended to configure the device in standby mode and then to enable measurement mode. Clearing the measure bit returns the device to the standby mode.

## THEORY OF OPERATION

## POWER SAVINGS

## Power Modes

The ADXL345 automatically modulates its power consumption in proportion to its output data rate, as outlined in Table 7. If additional power savings is desired, a lower power mode is available. In this mode, the internal sampling rate is reduced, allowing for power savings in the 12.5 Hz to 400 Hz data rate range at the expense of slightly greater noise. To enter low power mode, set the LOW\_POWER bit (Bit 4) in the BW\_RATE register (Address 0x2C). Table 8 shows the current consumption in low power mode for cases where there is an advantage to using low power mode. Use of low power mode for a data rate not shown in Table 8 does not provide any advantage over the same data rate in normal power mode. Therefore, it is recommended that only data rates shown in Table 8 be used in low power mode. The current consumption values shown in Table 7 and Table 8 are for a  $V_S$  of 2.5 V.

Table 7. Typical Current Consumption vs. Data Rate ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 2.5\text{ V}$ ,  $V_{DDIO} = 1.8\text{ V}$ )

Output Data Rate (Hz)	Bandwidth (Hz)	Rate Code	$I_{DD}$ ( $\mu\text{A}$ )
3200	1600	1111	140
1600	800	1110	90
800	400	1101	140
400	200	1100	140
200	100	1011	140
100	50	1010	140
50	25	1001	90
25	12.5	1000	60
12.5	6.25	0111	50
6.25	3.13	0110	45
3.13	1.56	0101	40
1.56	0.78	0100	34
0.78	0.39	0011	23
0.39	0.20	0010	23
0.20	0.10	0001	23
0.10	0.05	0000	23

Table 8. Typical Current Consumption vs. Data Rate, Low Power Mode ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 2.5\text{ V}$ ,  $V_{DDIO} = 1.8\text{ V}$ )

Output Data Rate (Hz)	Bandwidth (Hz)	Rate Code	$I_{DD}$ ( $\mu\text{A}$ )
400	200	1100	90
200	100	1011	60
100	50	1010	50
50	25	1001	45
25	12.5	1000	40
12.5	6.25	0111	34

## Auto Sleep Mode

Additional power can be saved if the ADXL345 automatically switches to sleep mode during periods of inactivity. To enable this feature, set the THRESH\_INACT register (Address 0x25) and the TIME\_INACT register (Address 0x26) each to a value that signifies inactivity (the appropriate value depends on the application), and then set the AUTO\_SLEEP bit (Bit D4) and the link bit (Bit D5) in the POWER\_CTL register (Address 0x2D). Current consumption at the sub-12.5 Hz data rates that are used in this mode is typically 23  $\mu\text{A}$  for a  $V_S$  of 2.5 V.

## Standby Mode

For even lower power operation, standby mode can be used. In standby mode, current consumption is reduced to 0.1  $\mu\text{A}$  (typical). In this mode, no measurements are made. Enter standby mode by clearing the measure bit (Bit D3) in the POWER\_CTL register (Address 0x2D). Placing the device into standby mode preserves the contents of FIFO.

## SERIAL COMMUNICATIONS

I<sup>2</sup>C and SPI digital communications are available. In both cases, the ADXL345 operates as a slave. I<sup>2</sup>C mode is enabled if the  $\overline{CS}$  pin is tied high to  $V_{DD I/O}$ . The  $\overline{CS}$  pin should always be tied high to  $V_{DD I/O}$  or be driven by an external controller because there is no default mode if the  $\overline{CS}$  pin is left unconnected. Therefore, not taking these precautions may result in an inability to communicate with the part. In SPI mode, the  $\overline{CS}$  pin is controlled by the bus master. In both SPI and I<sup>2</sup>C modes of operation, data transmitted from the ADXL345 to the master device should be ignored during writes to the ADXL345.

## SPI

For SPI, either 3- or 4-wire configuration is possible, as shown in the connection diagrams in Figure 34 and Figure 35. Clearing the SPI bit (Bit D6) in the DATA\_FORMAT register (Address 0x31) selects 4-wire mode, whereas setting the SPI bit selects 3-wire mode. The maximum SPI clock speed is 5 MHz with 100 pF maximum loading, and the timing scheme follows clock polarity (CPOL) = 1 and clock phase (CPHA) = 1. If power is applied to the ADXL345 before the clock polarity and phase of the host processor are configured, the  $\overline{CS}$  pin should be brought high before changing the clock polarity and phase. When using 3-wire SPI, it is recommended that the SDO pin be either pulled up to  $V_{DD I/O}$  or pulled down to GND via a 10 k $\Omega$  resistor.

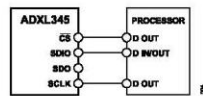


Figure 34. 3-Wire SPI Connection Diagram

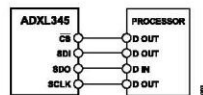


Figure 35. 4-Wire SPI Connection Diagram

$\overline{CS}$  is the serial port enable line and is controlled by the SPI master. This line must go low at the start of a transmission and high at the end of a transmission, as shown in Figure 37. SCLK is the serial port clock and is supplied by the SPI master. SCLK should idle high during a period of no transmission. SDI and SDO are the serial data input and output, respectively. Data is updated on the falling edge of SCLK and should be sampled on the rising edge of SCLK.

To read or write multiple bytes in a single transmission, the multiple-byte bit, located after the R/W bit in the first byte transfer

(MB in Figure 37 to Figure 39), must be set. After the register addressing and the first byte of data, each subsequent set of clock pulses (eight clock pulses) causes the ADXL345 to point to the next register for a read or write. This shifting continues until the clock pulses cease and  $\overline{CS}$  is deasserted. To perform reads or writes on different, nonsequential registers,  $\overline{CS}$  must be deasserted between transmissions and the new register must be addressed separately.

The timing diagram for 3-wire SPI reads or writes is shown in Figure 39. The 4-wire equivalents for SPI writes and reads are shown in Figure 37 and Figure 38, respectively. For correct operation of the part, the logic thresholds and timing parameters in Table 9 and Table 10 must be met at all times.

Use of the 3200 Hz and 1600 Hz output data rates is only recommended with SPI communication rates greater than or equal to 2 MHz. The 800 Hz output data rate is recommended only for communication speeds greater than or equal to 400 kHz, and the remaining data rates scale proportionally. For example, the minimum recommended communication speed for a 200 Hz output data rate is 100 kHz. Operation at an output data rate above the recommended maximum may result in undesirable effects on the acceleration data, including missing samples or additional noise.

## Preventing Bus Traffic Errors

The ADXL345  $\overline{CS}$  pin is used both for initiating SPI transactions, and for enabling I<sup>2</sup>C mode. When the ADXL345 is used on a SPI bus with multiple devices, its  $\overline{CS}$  pin is held high while the master communicates with the other devices. There may be conditions where a SPI command transmitted to another device looks like a valid I<sup>2</sup>C command. In this case, the ADXL345 would interpret this as an attempt to communicate in I<sup>2</sup>C mode, and could interfere with other bus traffic. Unless bus traffic can be adequately controlled to assure such a condition never occurs, it is recommended to add a logic gate in front of the SDI pin as shown in Figure 36. This OR gate will hold the SDA line high when  $\overline{CS}$  is high to prevent SPI bus traffic at the ADXL345 from appearing as an I<sup>2</sup>C start command.

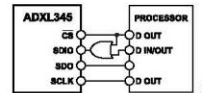


Figure 36. Recommended SPI Connection Diagram when Using Multiple SPI Devices on a Single Bus

SERIAL COMMUNICATIONS

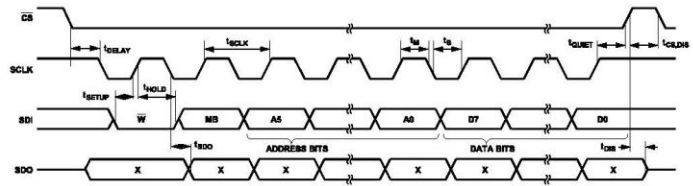


Figure 37. SPI 4-Wire Write

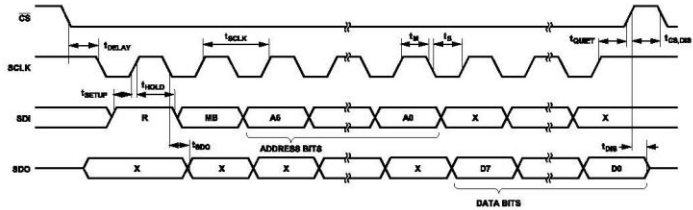
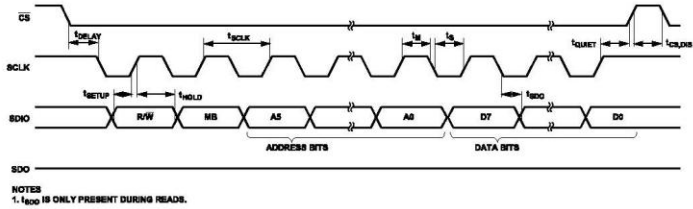


Figure 38. SPI 4-Wire Read



NOTES  
1.  $t_{DO}$  IS ONLY PRESENT DURING READS.

Figure 39. SPI 3-Wire Read/Write

Table 9. SPI Digital Input/Output

Parameter	Test Conditions	Limit <sup>1</sup>		Unit
		Min	Max	
<b>Digital Input</b>				
Low Level Input Voltage ( $V_{IL}$ )			$0.3 \times V_{DD I/O}$	V
High Level Input Voltage ( $V_{IH}$ )		$0.7 \times V_{DD I/O}$		V
Low Level Input Current ( $I_{IL}$ )	$V_{IN} = V_{DD I/O}$		0.1	$\mu$ A
High Level Input Current ( $I_{IH}$ )	$V_{IN} = 0$ V	-0.1		$\mu$ A
<b>Digital Output</b>				
Low Level Output Voltage ( $V_{OL}$ )	$I_{OL} = 10$ mA		$0.2 \times V_{DD I/O}$	V
High Level Output Voltage ( $V_{OH}$ )	$I_{OH} = -4$ mA	$0.8 \times V_{DD I/O}$		V
Low Level Output Current ( $I_{OL}$ )	$V_{OL} = V_{OL, max}$	10		mA
High Level Output Current ( $I_{OH}$ )	$V_{OH} = V_{OH, min}$		-4	mA
Pin Capacitance	$f_{IN} = 1$ MHz, $V_{IN} = 2.5$ V		8	pF

<sup>1</sup> Limits based on characterization results, not production tested.

## SERIAL COMMUNICATIONS

Table 10. SPI Timing ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 2.5\text{ V}$ ,  $V_{DD,IO} = 1.8\text{ V}$ )<sup>1</sup>

Parameter	Limit <sup>2,3</sup>		Unit	Description
	Min	Max		
$f_{\text{SCLK}}$		5	MHz	SPI clock frequency
$t_{\text{SCLK}}$	200		ns	1/(SPI clock frequency) mark-space ratio for the SCLK input is 40/60 to 60/40
$t_{\text{DELAY}}$	5		ns	$\overline{\text{CS}}$ falling edge to SCLK falling edge
$t_{\text{QUIET}}$	5		ns	SCLK rising edge to $\overline{\text{CS}}$ rising edge
$t_{\text{DIS}}$		10	ns	$\overline{\text{CS}}$ rising edge to SDO disabled
$t_{\text{CS,DIS}}$	150		ns	$\overline{\text{CS}}$ deassertion between SPI communications
$t_{\text{S}}$	$0.3 \times t_{\text{SCLK}}$		ns	SCLK low pulse width (space)
$t_{\text{H}}$	$0.3 \times t_{\text{SCLK}}$		ns	SCLK high pulse width (mark)
$t_{\text{SETUP}}$	5		ns	SDI valid before SCLK rising edge
$t_{\text{HOLD}}$	5		ns	SDI valid after SCLK rising edge
$t_{\text{SDO}}$		40	ns	SCLK falling edge to SDO/SDIO output transition
$t_{\text{r}}^4$		20	ns	SDO/SDIO output high to output low transition
$t_{\text{f}}^4$		20	ns	SDO/SDIO output low to output high transition

<sup>1</sup> The  $\overline{\text{CS}}$ , SCLK, SDI, and SDO pins are not internally pulled up or down; they must be driven for proper operation.

<sup>2</sup> Limits based on characterization results, characterized with  $f_{\text{SCLK}} = 5\text{ MHz}$  and bus load capacitance of 100 pF; not production tested.

<sup>3</sup> The timing values are measured corresponding to the input thresholds ( $V_{IL}$  and  $V_{IH}$ ) given in Table 9.

<sup>4</sup> Output rise and fall times measured with capacitive load of 150 pF.

SERIAL COMMUNICATIONS

I<sup>2</sup>C

With  $\overline{CS}$  tied high to  $V_{DD\ I/O}$ , the ADXL345 is in I<sup>2</sup>C mode, requiring a simple 2-wire connection, as shown in Figure 40. The ADXL345 conforms to the *UM10204 I<sup>2</sup>C-Bus Specification and User Manual*, Rev. 03—19 June 2007, available from NXP Semiconductors. It supports standard (100 kHz) and fast (400 kHz) data transfer modes if the bus parameters given in Table 11 and Table 12 are met. Single- or multiple-byte reads/writes are supported, as shown in Figure 41. With the ALT ADDRESS pin high, the 7-bit I<sup>2</sup>C address for the device is 0x1D, followed by the R/W bit. This translates to 0x3A for a write and 0x3B for a read. An alternate I<sup>2</sup>C address of 0x53 (followed by the R/W bit) can be chosen by grounding the SDO/ALT ADDRESS pin (Pin 12). This translates to 0xA6 for a write and 0xA7 for a read.

There are no internal pull-up or pull-down resistors for any unused pins; therefore, there is no known state or default state for the  $\overline{CS}$  or ALT ADDRESS pin if left floating or unconnected. It is required that the  $\overline{CS}$  pin be connected to  $V_{DD\ I/O}$  and that the ALT ADDRESS pin be connected to either  $V_{DD\ I/O}$  or GND when using I<sup>2</sup>C.

Due to communication speed limitations, the maximum output data rate when using 400 kHz I<sup>2</sup>C is 800 Hz and scales linearly with a

change in the I<sup>2</sup>C communication speed. For example, using I<sup>2</sup>C at 100 kHz would limit the maximum ODR to 200 Hz. Operation at an output data rate above the recommended maximum may result in undesirable effect on the acceleration data, including missing samples or additional noise.

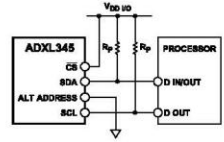


Figure 40. I<sup>2</sup>C Connection Diagram (Address 0x53)

If other devices are connected to the same I<sup>2</sup>C bus, the nominal operating voltage level of these other devices cannot exceed  $V_{DD\ I/O}$  by more than 0.3 V. External pull-up resistors,  $R_p$ , are necessary for proper I<sup>2</sup>C operation. Refer to the *UM10204 I<sup>2</sup>C-Bus Specification and User Manual*, Rev. 03—19 June 2007, when selecting pull-up resistor values to ensure proper operation.

Table 11. I<sup>2</sup>C Digital Input/Output

Parameter	Test Conditions	Limit <sup>1</sup>		Unit
		Min	Max	
Digital Input				
Low Level Input Voltage ( $V_{IL}$ )			$0.3 \times V_{DD\ I/O}$	V
High Level Input Voltage ( $V_{IH}$ )		$0.7 \times V_{DD\ I/O}$		V
Low Level Input Current ( $I_{IL}$ )	$V_{IN} = V_{DD\ I/O}$		0.1	$\mu$ A
High Level Input Current ( $I_{IH}$ )	$V_{IN} = 0\text{ V}$	-0.1		$\mu$ A
Digital Output				
Low Level Output Voltage ( $V_{OL}$ )	$V_{DD\ I/O} < 2\text{ V}, I_{OL} = 3\text{ mA}$		$0.2 \times V_{DD\ I/O}$	V
	$V_{DD\ I/O} \geq 2\text{ V}, I_{OL} = 3\text{ mA}$		400	mV
Low Level Output Current ( $I_{OL}$ )	$V_{OL} = V_{OL, max}$	3		mA
Pin Capacitance	$f_{IN} = 1\text{ MHz}, V_{IN} = 2.5\text{ V}$		8	pF

<sup>1</sup> Limits based on characterization results; not production tested.

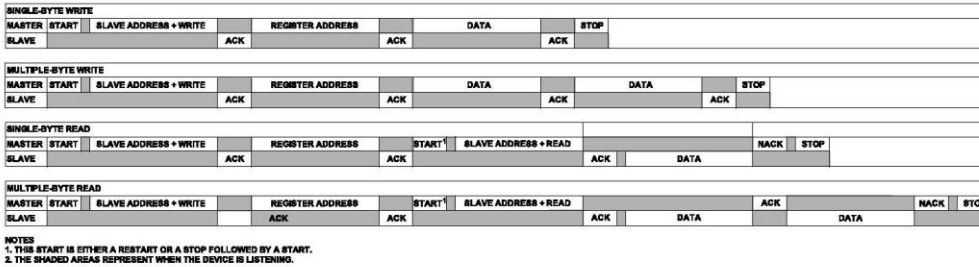


Figure 41. I<sup>2</sup>C Device Addressing

SERIAL COMMUNICATIONS

Table 12. I<sup>2</sup>C Timing (T<sub>A</sub> = 25°C, V<sub>S</sub> = 2.5 V, V<sub>DD/IO</sub> = 1.8 V)

Parameter	Limit <sup>1,2</sup>		Unit	Description
	Min	Max		
f <sub>SCL</sub>		400	kHz	SCL clock frequency
t <sub>1</sub>	2.5		μs	SCL cycle time
t <sub>2</sub>	0.6		μs	t <sub>HIGH</sub> , SCL high time
t <sub>3</sub>	1.3		μs	t <sub>LOW</sub> , SCL low time
t <sub>4</sub>	0.6		μs	t <sub>HD, STA</sub> , start/repeated start condition hold time
t <sub>5</sub>	100		ns	t <sub>SU, DAT</sub> , data setup time
t <sub>6</sub> <sup>3,4,5,6</sup>	0	0.9	μs	t <sub>HD, DAT</sub> , data hold time
t <sub>7</sub>	0.6		μs	t <sub>SU, STA</sub> , setup time for repeated start
t <sub>8</sub>	0.6		μs	t <sub>SU, STO</sub> , stop condition setup time
t <sub>9</sub>	1.3		μs	t <sub>BUF</sub> , bus-free time between a stop condition and a start condition
t <sub>10</sub>		300	ns	t <sub>R</sub> , rise time of both SCL and SDA when receiving
	0		ns	t <sub>F</sub> , fall time of both SCL and SDA when receiving or transmitting
t <sub>11</sub>		300	ns	t <sub>F</sub> , fall time of SDA when receiving
		250	ns	t <sub>F</sub> , fall time of both SCL and SDA when transmitting
C <sub>b</sub>		400	pF	Capacitive load for each bus line

- <sup>1</sup> Limits based on characterization results, with f<sub>SCL</sub> = 400 kHz and a 3 mA sink current; not production tested.
- <sup>2</sup> All values referred to the V<sub>IH</sub> and the V<sub>IL</sub> levels given in Table 11.
- <sup>3</sup> t<sub>6</sub> is the data hold time that is measured from the falling edge of SCL. It applies to data in transmission and acknowledge.
- <sup>4</sup> A transmitting device must internally provide an output hold time of at least 300 ns for the SDA signal (with respect to V<sub>IH(min)</sub>) of the SCL signal) to bridge the undefined region of the falling edge of SCL.
- <sup>5</sup> The maximum t<sub>6</sub> value must be met only if the device does not stretch the low period (t<sub>3</sub>) of the SCL signal.
- <sup>6</sup> The maximum value for t<sub>6</sub> is a function of the clock low time (t<sub>3</sub>), the clock rise time (t<sub>10</sub>), and the minimum data setup time (t<sub>5(min)</sub>). This value is calculated as t<sub>6(max)</sub> = t<sub>3</sub> - t<sub>10</sub> - t<sub>5(min)</sub>.

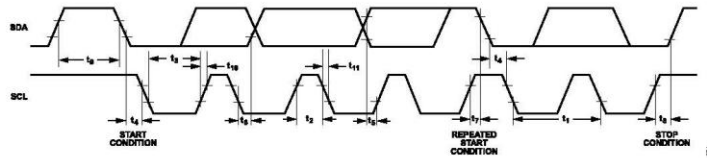


Figure 42. I<sup>2</sup>C Timing Diagram

## INTERRUPTS

The ADXL345 provides two output pins for driving interrupts: INT1 and INT2. Both interrupt pins are push-pull, low impedance pins with output specifications shown in Table 13. The default configuration of the interrupt pins is active high. This can be changed to active low by setting the INT\_INVERT bit in the DATA\_FORMAT (Address 0x31) register. All functions can be used simultaneously, with the only limiting feature being that some functions may need to share interrupt pins.

Interrupts are enabled by setting the appropriate bit in the INT\_ENABLE register (Address 0x2E) and are mapped to either the INT1 pin or the INT2 pin based on the contents of the INT\_MAP register (Address 0x2F). When initially configuring the interrupt pins, it is recommended that the functions and interrupt mapping be done before enabling the interrupts. When changing the configuration of an

interrupt, it is recommended that the interrupt be disabled first, by clearing the bit corresponding to that function in the INT\_ENABLE register, and then the function be reconfigured before enabling the interrupt again. Configuration of the functions while the interrupts are disabled helps to prevent the accidental generation of an interrupt before desired.

The interrupt functions are latched and cleared by either reading the data registers (Address 0x32 to Address 0x37) until the interrupt condition is no longer valid for the data-related interrupts or by reading the INT\_SOURCE register (Address 0x30) for the remaining interrupts. This section describes the interrupts that can be set in the INT\_ENABLE register and monitored in the INT\_SOURCE register.

Table 13. Interrupt Pin Digital Output

Parameter	Test Conditions	Limit <sup>1</sup>		Unit
		Min	Max	
Digital Output				
Low Level Output Voltage ( $V_{OL}$ )	$I_{OL} = 300 \mu\text{A}$		$0.2 \times V_{DD I/O}$	V
High Level Output Voltage ( $V_{OH}$ )	$I_{OH} = -150 \mu\text{A}$	$0.8 \times V_{DD I/O}$		V
Low Level Output Current ( $I_{OL}$ )	$V_{OL} = V_{OL, max}$	300		$\mu\text{A}$
High Level Output Current ( $I_{OH}$ )	$V_{OH} = V_{OH, min}$		-150	$\mu\text{A}$
Pin Capacitance	$f_{IN} = 1 \text{ MHz}, V_{IN} = 2.5 \text{ V}$		8	pF
Rise/Fall Time				
Rise Time ( $t_r$ ) <sup>2</sup>	$C_{LOAD} = 150 \text{ pF}$		210	ns
Fall Time ( $t_f$ ) <sup>3</sup>	$C_{LOAD} = 150 \text{ pF}$		150	ns

<sup>1</sup> Limits based on characterization results, not production tested.

<sup>2</sup> Rise time is measured as the transition time from  $V_{OL, max}$  to  $V_{OH, min}$  of the interrupt pin.

<sup>3</sup> Fall time is measured as the transition time from  $V_{OH, min}$  to  $V_{OL, max}$  of the interrupt pin.

**INTERRUPTS****DATA\_READY**

The DATA\_READY bit is set when new data is available and is cleared when no new data is available.

**SINGLE\_TAP**

The SINGLE\_TAP bit is set when a single acceleration event that is greater than the value in the THRESH\_TAP register (Address 0x1D) occurs for less time than is specified in the DUR register (Address 0x21).

**DOUBLE\_TAP**

The DOUBLE\_TAP bit is set when two acceleration events that are greater than the value in the THRESH\_TAP register (Address 0x1D) occur for less time than is specified in the DUR register (Address 0x21), with the second tap starting after the time specified by the latent register (Address 0x22) but within the time specified in the window register (Address 0x23). See the [Tap Detection](#) section for more details.

**ACTIVITY**

The activity bit is set when acceleration greater than the value stored in the THRESH\_ACT register (Address 0x24) is experienced on any participating axis, set by the ACT\_INACT\_CTL register (Address 0x27).

**INACTIVITY**

The inactivity bit is set when acceleration of less than the value stored in the THRESH\_INACT register (Address 0x25) is ex-

perienced for more time than is specified in the TIME\_INACT register (Address 0x26) on all participating axes, as set by the ACT\_INACT\_CTL register (Address 0x27). The maximum value for TIME\_INACT is 255 sec.

**FREE\_FALL**

The FREE\_FALL bit is set when acceleration of less than the value stored in the THRESH\_FF register (Address 0x28) is experienced for more time than is specified in the TIME\_FF register (Address 0x29) on all axes (logical AND). The FREE\_FALL interrupt differs from the inactivity interrupt as follows: all axes always participate and are logically AND'ed, the timer period is much smaller (1.28 sec maximum), and the mode of operation is always dc-coupled.

**WATERMARK**

The watermark bit is set when the number of samples in FIFO equals the value stored in the samples bits (Register FIFO\_CTL, Address 0x38). The watermark bit is cleared automatically when FIFO is read, and the content returns to a value below the value stored in the samples bits.

**OVERRUN**

The overrun bit is set when new data replaces unread data. The precise operation of the overrun function depends on the FIFO mode. In bypass mode, the overrun bit is set when new data replaces unread data in the DATA\_X, DATA\_Y, and DATA\_Z registers (Address 0x32 to Address 0x37). In all other modes, the overrun bit is set when FIFO is filled. The overrun bit is automatically cleared when the contents of FIFO are read.

**FIFO**

The ADXL345 contains technology for an embedded memory management system with 32-level FIFO that can be used to minimize host processor burden. This buffer has four modes: bypass, FIFO, stream, and trigger (see Table 37). Each mode is selected by the settings of the FIFO\_MODE bits (Bits[D7:D6]) in the FIFO\_CTL register (Address 0x38).

**BYPASS MODE**

In bypass mode, FIFO is not operational and, therefore, remains empty.

**FIFO MODE**

In FIFO mode, data from measurements of the x-, y-, and z-axes are stored in FIFO. When the number of samples in FIFO equals the level specified in the samples bits of the FIFO\_CTL register (Address 0x38), the watermark interrupt is set. FIFO continues accumulating samples until it is full (32 samples from measurements of the x-, y-, and z-axes) and then stops collecting data. After FIFO stops collecting data, the device continues to operate; therefore, features such as tap detection can be used after FIFO is full. The watermark interrupt continues to occur until the number of samples in FIFO is less than the value stored in the samples bits of the FIFO\_CTL register.

**STREAM MODE**

In stream mode, data from measurements of the x-, y-, and z-axes are stored in FIFO. When the number of samples in FIFO equals the level specified in the samples bits of the FIFO\_CTL register (Address 0x38), the watermark interrupt is set. FIFO continues accumulating samples and holds the latest 32 samples from measurements of the x-, y-, and z-axes, discarding older data as new data arrives. The watermark interrupt continues occurring until the number of samples in FIFO is less than the value stored in the samples bits of the FIFO\_CTL register.

**TRIGGER MODE**

In trigger mode, FIFO accumulates samples, holding the latest 32 samples from measurements of the x-, y-, and z-axes. After a trigger event occurs and an interrupt is sent to the INT1 or INT2 pin (determined by the trigger bit in the FIFO\_CTL register), FIFO keeps the last *n* samples (where *n* is the value specified by the samples bits in the FIFO\_CTL register) and then operates in FIFO mode, collecting new samples only when FIFO is not full. A delay of at least 5  $\mu$ s should be present between the trigger event occurring and the start of reading data from the FIFO to allow the FIFO to discard and retain the necessary samples. Additional trigger events cannot be recognized until the trigger mode is reset. To reset the trigger mode, set the device to bypass mode and then set the device back to trigger mode. Note that the FIFO data should be read first because placing the device into bypass mode clears FIFO.

**RETRIEVING DATA FROM FIFO**

The FIFO data is read through the DATA\_X, DATA\_Y, and DATA\_Z registers (Address 0x32 to Address 0x37). When the FIFO is in FIFO, stream, or trigger mode, reads to the DATA\_X, DATA\_Y, and DATA\_Z registers read data stored in the FIFO. Each time data is read from the FIFO, the oldest x-, y-, and z-axes data are placed into the DATA\_X, DATA\_Y, and DATA\_Z registers.

If a single-byte read operation is performed, the remaining bytes of data for the current FIFO sample are lost. Therefore, all axes of interest should be read in a burst (or multiple-byte) read operation. To ensure that the FIFO has completely popped (that is, that new data has completely moved into the DATA\_X, DATA\_Y, and DATA\_Z registers), there must be at least 5  $\mu$ s between the end of reading the data registers and the start of a new read of the FIFO or a read of the FIFO\_STATUS register (Address 0x39). The end of reading a data register is signified by the transition from Register 0x37 to Register 0x38 or by the  $\overline{CS}$  pin going high.

For SPI operation at 1.6 MHz or less, the register addressing portion of the transmission is a sufficient delay to ensure that the FIFO has completely popped. For SPI operation greater than 1.6 MHz, it is necessary to deassert the  $\overline{CS}$  pin to ensure a total delay of 5  $\mu$ s; otherwise, the delay is not sufficient. The total delay necessary for 5 MHz operation is at most 3.4  $\mu$ s. This is not a concern when using I<sup>2</sup>C mode because the communication rate is low enough to ensure a sufficient delay between FIFO reads.

**SELF-TEST**

The ADXL345 incorporates a self-test feature that effectively tests its mechanical and electronic systems simultaneously. When the self-test function is enabled (via the SELF\_TEST bit in the DATA\_FORMAT register, Address 0x31), an electrostatic force is exerted on the mechanical sensor. This electrostatic force moves the mechanical sensing element in the same manner as acceleration, and it is additive to the acceleration experienced by the device. This added electrostatic force results in an output change in the X-, Y-, and Z-axes. Because the electrostatic force is proportional to  $V_S^2$ , the output change varies with  $V_S$ . This effect is shown in Figure 43. The scale factors shown in Table 14 can be used to adjust the expected self-test output limits for different supply voltages,  $V_S$ . The self-test feature of the ADXL345 also exhibits a bimodal behavior. However, the limits shown in Table 1 and Table 15 to Table 18 are valid for both potential self-test values due to bimodality. Use of the self-test feature at data rates less than 100 Hz or at 1600 Hz may yield values outside these limits. Therefore, the part must be in normal power operation (LOW\_POWER bit = 0 in BW\_RATE register, Address 0x2C) and be placed into a data rate of 100 Hz through 800 Hz or 3200 Hz for the self-test function to operate correctly.

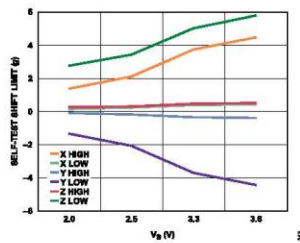


Figure 43. Self-Test Output Change Limits vs. Supply Voltage

Table 14. Self-Test Output Scale Factors for Different Supply Voltages,  $V_S$

Supply Voltage, $V_S$ (V)	X-Axis, Y-Axis	Z-Axis
2.00	0.64	0.8
2.50	1.00	1.00
3.30	1.77	1.47
3.60	2.11	1.69

Table 15. Self-Test Output in LSB for  $\pm 2$  g, 10-Bit or Full Resolution ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 2.5$  V,  $V_{DDIO} = 1.8$  V)

Axis	Min	Max	Unit
X	50	540	LSB
Y	-540	-50	LSB
Z	75	875	LSB

Table 16. Self-Test Output in LSB for  $\pm 4$  g, 10-Bit Resolution ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 2.5$  V,  $V_{DDIO} = 1.8$  V)

Axis	Min	Max	Unit
X	25	270	LSB
Y	-270	-25	LSB
Z	38	438	LSB

Table 17. Self-Test Output in LSB for  $\pm 8$  g, 10-Bit Resolution ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 2.5$  V,  $V_{DDIO} = 1.8$  V)

Axis	Min	Max	Unit
X	12	135	LSB
Y	-135	-12	LSB
Z	19	219	LSB

Table 18. Self-Test Output in LSB for  $\pm 16$  g, 10-Bit Resolution ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 2.5$  V,  $V_{DDIO} = 1.8$  V)

Axis	Min	Max	Unit
X	6	67	LSB
Y	-67	-6	LSB
Z	10	110	LSB

## REGISTER MAP

Table 19.

Address		Name	Type	Reset Value	Description
Hex	Dec				
0x00	0	DEVID	R	11100101	Device ID
0x01 to 0x1C	1 to 28	Reserved			Reserved; do not access
0x1D	29	THRESH_TAP	R $\bar{W}$	00000000	Tap threshold
0x1E	30	OFSX	R $\bar{W}$	00000000	X-axis offset
0x1F	31	OFSY	R $\bar{W}$	00000000	Y-axis offset
0x20	32	OFSZ	R $\bar{W}$	00000000	Z-axis offset
0x21	33	DUR	R $\bar{W}$	00000000	Tap duration
0x22	34	Latent	R $\bar{W}$	00000000	Tap latency
0x23	35	Window	R $\bar{W}$	00000000	Tap window
0x24	36	THRESH_ACT	R $\bar{W}$	00000000	Activity threshold
0x25	37	THRESH_INACT	R $\bar{W}$	00000000	Inactivity threshold
0x26	38	TIME_INACT	R $\bar{W}$	00000000	Inactivity time
0x27	39	ACT_INACT_CTL	R $\bar{W}$	00000000	Axis enable control for activity and inactivity detection
0x28	40	THRESH_FF	R $\bar{W}$	00000000	Free-fall threshold
0x29	41	TIME_FF	R $\bar{W}$	00000000	Free-fall time
0x2A	42	TAP_AXES	R $\bar{W}$	00000000	Axis control for single tap/double tap
0x2B	43	ACT_TAP_STATUS	R	00000000	Source of single tap/double tap
0x2C	44	BW_RATE	R $\bar{W}$	00001010	Data rate and power mode control
0x2D	45	POWER_CTL	R $\bar{W}$	00000000	Power-saving features control
0x2E	46	INT_ENABLE	R $\bar{W}$	00000000	Interrupt enable control
0x2F	47	INT_MAP	R $\bar{W}$	00000000	Interrupt mapping control
0x30	48	INT_SOURCE	R	00000010	Source of interrupts
0x31	49	DATA_FORMAT	R $\bar{W}$	00000000	Data format control
0x32	50	DATA0	R	00000000	X-Axis Data 0
0x33	51	DATA1	R	00000000	X-Axis Data 1
0x34	52	DATA0	R	00000000	Y-Axis Data 0
0x35	53	DATA1	R	00000000	Y-Axis Data 1
0x36	54	DATA0	R	00000000	Z-Axis Data 0
0x37	55	DATA1	R	00000000	Z-Axis Data 1
0x38	56	FIFO_CTL	R $\bar{W}$	00000000	FIFO control
0x39	57	FIFO_STATUS	R	00000000	FIFO status

## REGISTER MAP

## REGISTER DEFINITIONS

## Register 0x00—DEVID (Read Only)

Table 20. Register 0x00

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
1	1	1	0	0	1	0	1

The DEVID register holds a fixed device ID code of 0xE5 (345 octal).

## Register 0x1D—THRESH\_TAP (Read/Write)

The THRESH\_TAP register is eight bits and holds the threshold value for tap interrupts. The data format is unsigned, therefore, the magnitude of the tap event is compared with the value in THRESH\_TAP for normal tap detection. The scale factor is 62.5 mg/LSB (that is, 0xFF = 16 g). A value of 0 may result in undesirable behavior if single tap/double tap interrupts are enabled.

## Register 0x1E, Register 0x1F, Register 0x20—OFSX, OFSY, OFSZ (Read/Write)

The OFSX, OFSY, and OFSZ registers are each eight bits and offer user-set offset adjustments in twos complement format with a scale factor of 15.6 mg/LSB (that is, 0x7F = 2 g). The value stored in the offset registers is automatically added to the acceleration data, and the resulting value is stored in the output data registers. For additional information regarding offset calibration and the use of the offset registers, refer to the [Offset Calibration](#) section.

## Register 0x21—DUR (Read/Write)

The DUR register is eight bits and contains an unsigned time value representing the maximum time that an event must be above the THRESH\_TAP threshold to qualify as a tap event. The scale factor is 625  $\mu$ s/LSB. A value of 0 disables the single tap/ double tap functions.

## Register 0x22—Latent (Read/Write)

The latent register is eight bits and contains an unsigned time value representing the wait time from the detection of a tap event to the start of the time window (defined by the window register) during which a possible second tap event can be detected. The scale factor is 1.25 ms/LSB. A value of 0 disables the double tap function.

## Register 0x23—Window (Read/Write)

The window register is eight bits and contains an unsigned time value representing the amount of time after the expiration of the latency time (determined by the latent register) during which a second valid tap can begin. The scale factor is 1.25 ms/LSB. A value of 0 disables the double tap function.

## Register 0x24—THRESH\_ACT (Read/Write)

The THRESH\_ACT register is eight bits and holds the threshold value for detecting activity. The data format is unsigned, so the magnitude of the activity event is compared with the value in the THRESH\_ACT register. The scale factor is 62.5 mg/LSB. A value of 0 may result in undesirable behavior if the activity interrupt is enabled.

## Register 0x25—THRESH\_INACT (Read/Write)

The THRESH\_INACT register is eight bits and holds the threshold value for detecting inactivity. The data format is unsigned, so the magnitude of the inactivity event is compared with the value in the THRESH\_INACT register. The scale factor is 62.5 mg/LSB. A value of 0 may result in undesirable behavior if the inactivity interrupt is enabled.

## Register 0x26—TIME\_INACT (Read/Write)

The TIME\_INACT register is eight bits and contains an unsigned time value representing the amount of time that acceleration must be less than the value in the THRESH\_INACT register for inactivity to be declared. The scale factor is 1 sec/LSB. Unlike the other interrupt functions, which use unfiltered data (see the [Threshold](#) section), the inactivity function uses filtered output data. At least one output sample must be generated for the inactivity interrupt to be triggered. This results in the function appearing unresponsive if the TIME\_INACT register is set to a value less than the time constant of the output data rate. A value of 0 results in an interrupt when the output data is less than the value in the THRESH\_INACT register.

## Register 0x27—ACT\_INACT\_CTL (Read/Write)

Table 21. Register 0x27—Bits[D7:D4]

D7	D6	D5	D4
ACT ac/dc	ACT_X enable	ACT_Y enable	ACT_Z enable

Table 22. Register 0x27—Bits[D3:D0]

D3	D2	D1	D0
INACT ac/dc	INACT_X enable	INACT_Y enable	INACT_Z enable

## ACT AC/DC and INACT AC/DC Bits

A setting of 0 selects dc-coupled operation, and a setting of 1 enables ac-coupled operation. In dc-coupled operation, the current acceleration magnitude is compared directly with THRESH\_ACT and THRESH\_INACT to determine whether activity or inactivity is detected.

In ac-coupled operation for activity detection, the acceleration value at the start of activity detection is taken as a reference value. New samples of acceleration are then compared to this reference value,

**REGISTER MAP**

and if the magnitude of the difference exceeds the THRESH\_ACT value, the device triggers an activity interrupt.

Similarly, in ac-coupled operation for inactivity detection, a reference value is used for comparison and is updated whenever the device exceeds the inactivity threshold. After the reference value is selected, the device compares the magnitude of the difference between the reference value and the current acceleration with THRESH\_INACT. If the difference is less than the value in THRESH\_INACT for the time in TIME\_INACT, the device is considered inactive and the inactivity interrupt is triggered.

**ACT\_x Enable Bits and INACT\_x Enable Bits**

A setting of 1 enables x-, y-, or z-axis participation in detecting activity or inactivity. A setting of 0 excludes the selected axis from participation. If all axes are excluded, the function is disabled. For activity detection, all participating axes are logically OR'ed, causing the activity function to trigger when any of the participating axes exceeds the threshold. For inactivity detection, all participating axes are logically AND'ed, causing the inactivity function to trigger only if all participating axes are below the threshold for the specified time.

**Register 0x28—THRESH\_FF (Read/Write)**

The THRESH\_FF register is eight bits and holds the threshold value, in unsigned format, for free-fall detection. The acceleration on all axes is compared with the value in THRESH\_FF to determine if a free-fall event occurred. The scale factor is 62.5 mg/LSB. Note that a value of 0 mg may result in undesirable behavior if the free-fall interrupt is enabled. Values between 300 mg and 600 mg (0x05 to 0x09) are recommended.

**Register 0x29—TIME\_FF (Read/Write)**

The TIME\_FF register is eight bits and stores an unsigned time value representing the minimum time that the value of all axes must be less than THRESH\_FF to generate a free-fall interrupt. The scale factor is 5 ms/LSB. A value of 0 may result in undesirable behavior if the free-fall interrupt is enabled. Values between 100 ms and 350 ms (0x14 to 0x46) are recommended.

**Register 0x2A—TAP\_AXES (Read/Write)**

Table 23.

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	0	0	0	Suppress	TAP_X enable	TAP_Y enable	TAP_Z enable

**Suppress Bit**

Setting the suppress bit suppresses double tap detection if acceleration greater than the value in THRESH\_TAP is present between taps. See the [Tap Detection](#) section for more details.

**TAP\_x Enable Bits**

A setting of 1 in the TAP\_X enable, TAP\_Y enable, or TAP\_Z enable bit enables x-, y-, or z-axis participation in tap detection. A setting of 0 excludes the selected axis from participation in tap detection.

**Register 0x2B—ACT\_TAP\_STATUS (Read Only)**

Table 24. Register 0x2B

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	ACT_X source	ACT_Y source	ACT_Z source	Asleep	TAP_X source	TAP_Y source	TAP_Z source

**ACT\_x Source and TAP\_x Source Bits**

These bits indicate the first axis involved in a tap or activity event. A setting of 1 corresponds to involvement in the event, and a setting of 0 corresponds to no involvement. When new data is available, these bits are not cleared but are overwritten by the new data. The ACT\_TAP\_STATUS register should be read before clearing the interrupt. Disabling an axis from participation clears the corresponding source bit when the next activity or single tap/double tap event occurs.

**Asleep Bit**

A setting of 1 in the asleep bit indicates that the part is asleep, and a setting of 0 indicates that the part is not asleep. This bit toggles only if the device is configured for auto sleep. See the [AUTO\\_SLEEP Bit](#) section for more information on autosleep mode.

**Register 0x2C—BW\_RATE (Read/Write)**

Table 25. Register 0x2C

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	0	0	LOW_POWER			Rate	

**LOW\_POWER Bit**

A setting of 0 in the LOW\_POWER bit selects normal operation, and a setting of 1 selects reduced power operation, which has somewhat higher noise (see the [Power Modes](#) section for details).

**Rate Bits**

These bits select the device bandwidth and output data rate (see [Table 7](#) and [Table 8](#) for details). The default value is 0x0A, which translates to a 100 Hz output data rate. An output data rate should be selected that is appropriate for the communication protocol and frequency selected. Selecting too high of an output data rate with a low communication speed results in samples being discarded.

## REGISTER MAP

## Register 0x2D—POWER\_CTL (Read/Write)

Table 26. Register 0x2D

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	0	Link	AUTO_SLEEP	Measure	Sleep	WakeUp	

## Link Bit

A setting of 1 in the link bit with both the activity and inactivity functions enabled delays the start of the activity function until inactivity is detected. After activity is detected, inactivity detection begins, preventing the detection of activity. This bit serially links the activity and inactivity functions. When this bit is set to 0, the inactivity and activity functions are concurrent. Additional information can be found in the [Link Mode](#) section.

When clearing the link bit, it is recommended that the part be placed into standby mode and then set back to measurement mode with a subsequent write. This is done to ensure that the device is properly biased if sleep mode is manually disabled; otherwise, the first few samples of data after the link bit is cleared may have additional noise, especially if the device was asleep when the bit was cleared.

## AUTO\_SLEEP Bit

If the link bit is set, a setting of 1 in the AUTO\_SLEEP bit enables the auto-sleep functionality. In this mode, the ADXL345 automatically switches to sleep mode if the inactivity function is enabled and inactivity is detected (that is, when acceleration is below the THRESH\_INACT value for at least the time indicated by TIME\_INACT). If activity is also enabled, the ADXL345 automatically wakes up from sleep after detecting activity and returns to operation at the output data rate set in the BW\_RATE register. A setting of 0 in the AUTO\_SLEEP bit disables automatic switching to sleep mode. See the [Sleep Bit](#) section for more information on sleep mode.

If the link bit is not set, the AUTO\_SLEEP feature is disabled and setting the AUTO\_SLEEP bit does not have an impact on device operation. Refer to the [Link Bit](#) section or the [Link Mode](#) section for more information on utilization of the link feature.

When clearing the AUTO\_SLEEP bit, it is recommended that the part be placed into standby mode and then set back to measurement mode with a subsequent write. This is done to ensure that the device is properly biased if sleep mode is manually disabled; otherwise, the first few samples of data after the AUTO\_SLEEP bit is cleared may have additional noise, especially if the device was asleep when the bit was cleared.

## Measure Bit

A setting of 0 in the measure bit places the part into standby mode, and a setting of 1 places the part into measurement mode. The ADXL345 powers up in standby mode with minimum power consumption.

## Sleep Bit

A setting of 0 in the sleep bit puts the part into the normal mode of operation, and a setting of 1 places the part into sleep mode. Sleep mode suppresses DATA\_READY, stops transmission of data to FIFO, and switches the sampling rate to one specified by the wakeup bits. In sleep mode, only the activity function can be used. When the DATA\_READY interrupt is suppressed, the output data registers (Register 0x32 to Register 0x37) are still updated at the sampling rate set by the wakeup bits (D1:D0).

When clearing the sleep bit, it is recommended that the part be placed into standby mode and then set back to measurement mode with a subsequent write. This is done to ensure that the device is properly biased if sleep mode is manually disabled; otherwise, the first few samples of data after the sleep bit is cleared may have additional noise, especially if the device was asleep when the bit was cleared.

## Wakeup Bits

These bits control the frequency of readings in sleep mode as described in [Table 27](#).

Table 27. Frequency of Readings in Sleep Mode

Setting		
D1	D0	Frequency (Hz)
0	0	8
0	1	4
1	0	2
1	1	1

## Register 0x2E—INT\_ENABLE (Read/Write)

Table 28. Register 0x2E—Bits[D7:D0]

D7	D6	D5	D4
DATA_READY	SINGLE_TAP	DOUBLE_TAP	Activity

Table 29. Register 0x2E—Bits[D3:D0]

D3	D2	D1	D0
Inactivity	FREE_FALL	Watermark	Overrun

Setting bits in this register to a value of 1 enables their respective functions to generate interrupts, whereas a value of 0 prevents the functions from generating interrupts. The DATA\_READY, watermark, and overrun bits enable only the interrupt output; the functions are always enabled. It is recommended that interrupts be configured before enabling their outputs.

## Register 0x2F—INT\_MAP (R/W)

Table 30. Register 0x2F—Bits[D7:D4]

D7	D6	D5	D4
DATA_READY	SINGLE_TAP	DOUBLE_TAP	Activity

## REGISTER MAP

Table 31. Register 0x2F—Bits[D3:D0]

D3	D2	D1	D0
Inactivity	FREE_FALL	Watermark	Overrun

Any bits set to 0 in this register send their respective interrupts to the INT1 pin, whereas bits set to 1 send their respective interrupts to the INT2 pin. All selected interrupts for a given pin are OR'ed.

## Register 0x30—INT\_SOURCE (Read Only)

Table 32. Register 0x30—Bits[D7:D4]

D7	D6	D5	D4
DATA_READY	SINGLE_TAP	DOUBLE_TAP	Activity

Table 33. Register 0x30—Bits[D3:D0]

D3	D2	D1	D0
Inactivity	FREE_FALL	Watermark	Overrun

Bits set to 1 in this register indicate that their respective functions have triggered an event, whereas a value of 0 indicates that the corresponding event has not occurred. The DATA\_READY, watermark, and overrun bits are always set if the corresponding events occur, regardless of the INT\_ENABLE register settings, and are cleared by reading data from the DATA\_X, DATA\_Y, and DATA\_Z registers. The DATA\_READY and watermark bits may require multiple reads, as indicated in the FIFO mode descriptions in the FIFO section. Other bits, and the corresponding interrupts, are cleared by reading the INT\_SOURCE register.

## Register 0x31—DATA\_FORMAT (Read/Write)

Table 34. Register 0x31

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
SELF_TEST	SPI	INT_INVERT	0	FULL_RES	Justify	Range	

The DATA\_FORMAT register controls the presentation of data to Register 0x32 through Register 0x37. All data, except that for the  $\pm 16 g$  range, must be clipped to avoid rollover.

## SELF\_TEST Bit

A setting of 1 in the SELF\_TEST bit applies a self-test force to the sensor, causing a shift in the output data. A value of 0 disables the self-test force.

## SPI Bit

A value of 1 in the SPI bit sets the device to 3-wire SPI mode, and a value of 0 sets the device to 4-wire SPI mode.

## INT\_INVERT Bit

A value of 0 in the INT\_INVERT bit sets the interrupts to active high, and a value of 1 sets the interrupts to active low.

## FULL\_RES Bit

When this bit is set to a value of 1, the device is in full resolution mode, where the output resolution increases with the  $g$  range set by the range bits to maintain a 4 mg/LSB scale factor. When the FULL\_RES bit is set to 0, the device is in 10-bit mode, and the range bits determine the maximum  $g$  range and scale factor.

## Justify Bit

A setting of 1 in the justify bit selects left-justified (MSB) mode, and a setting of 0 selects right-justified mode with sign extension.

## Range Bits

These bits set the  $g$  range as described in Table 35.

Table 35.  $g$  Range Setting

Setting		$g$ Range
D1	D0	
0	0	$\pm 2 g$
0	1	$\pm 4 g$
1	0	$\pm 8 g$
1	1	$\pm 16 g$

## Register 0x32 to Register 0x37—DATA\_X0, DATA\_X1, DATA\_Y0, DATA\_Y1, DATA\_Z0, DATA\_Z1 (Read Only)

These six bytes (Register 0x32 to Register 0x37) are eight bits each and hold the output data for each axis. Register 0x32 and Register 0x33 hold the output data for the x-axis, Register 0x34 and Register 0x35 hold the output data for the y-axis, and Register 0x36 and Register 0x37 hold the output data for the z-axis. The output data is two's complement, with DATA\_X0 as the least significant byte and DATA\_X1 as the most significant byte, where x represent X, Y, or Z. The DATA\_FORMAT register (Address 0x31) controls the format of the data. It is recommended that a multiple-byte read of all registers be performed to prevent a change in data between reads of sequential registers.

## Register 0x38—FIFO\_CTL (Read/Write)

Table 36. Register 0x38

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
FIFO_MODE	Trigger					Samples	

## REGISTER MAP

## FIFO\_MODE Bits

These bits set the FIFO mode, as described in [Table 37](#).

Table 37. FIFO Modes

Setting			
D7	D6	Mode	Function
0	0	Bypass	FIFO is bypassed.
0	1	FIFO	FIFO collects up to 32 values and then stops collecting data, collecting new data only when FIFO is not full.
1	0	Stream	FIFO holds the last 32 data values. When FIFO is full, the oldest data is overwritten with newer data.
1	1	Trigger	When triggered by the trigger bit, FIFO holds the last data samples before the trigger event and then continues to collect data until full. New data is collected only when FIFO is not full.

## Trigger Bit

A value of 0 in the trigger bit links the trigger event of trigger mode to INT1, and a value of 1 links the trigger event to INT2.

## Samples Bits

The function of these bits depends on the FIFO mode selected (see [Table 38](#)). Entering a value of 0 in the samples bits immediately sets the watermark status bit in the INT\_SOURCE register, regardless of which FIFO mode is selected. Undesirable operation may occur if a value of 0 is used for the samples bits when trigger mode is used.

Table 38. Samples Bits Functions

FIFO Mode	Samples Bits Function
Bypass	None.
FIFO	Specifies how many FIFO entries are needed to trigger a watermark interrupt.
Stream	Specifies how many FIFO entries are needed to trigger a watermark interrupt.
Trigger	Specifies how many FIFO samples are retained in the FIFO buffer before a trigger event.

## Register 0x39—FIFO\_STATUS (Read Only)

Table 39. Register 0x39

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
FIFO_TRIG	0						Entries

## FIFO\_TRIG Bit

A 1 in the FIFO\_TRIG bit corresponds to a trigger event occurring, and a 0 means that a FIFO trigger event has not occurred.

## Entries Bits

These bits report how many data values are stored in FIFO. Access to collect the data from FIFO is provided through the DATA\_X, DATA\_Y, and DATA\_Z registers. FIFO reads must be done in burst or multiple-byte mode because each FIFO level is cleared after any read (single- or multiple-byte) of FIFO. FIFO stores a maximum of 32 entries, which equates to a maximum of 33 entries available at any given time because an additional entry is available at the output filter of the device.

APPLICATIONS INFORMATION

POWER SUPPLY DECOUPLING

A 1  $\mu\text{F}$  tantalum capacitor ( $C_S$ ) at  $V_S$  and a 0.1  $\mu\text{F}$  ceramic capacitor ( $C_{10}$ ) at  $V_{DD10}$  placed close to the ADXL345 supply pins is recommended to adequately decouple the accelerometer from noise on the power supply. If additional decoupling is necessary, a resistor or ferrite bead, no larger than 100  $\Omega$ , in series with  $V_S$  may be helpful. Additionally, increasing the bypass capacitance on  $V_S$  to a 10  $\mu\text{F}$  tantalum capacitor in parallel with a 0.1  $\mu\text{F}$  ceramic capacitor may also improve noise.

Care should be taken to ensure that the connection from the ADXL345 ground to the power supply ground has low impedance because noise transmitted through ground has an effect similar to noise transmitted through  $V_S$ . It is recommended that  $V_S$  and  $V_{DD10}$  be separate supplies to minimize digital clocking noise on the  $V_S$  supply. If this is not possible, additional filtering of the supplies, as previously mentioned, may be necessary.

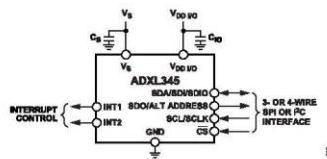


Figure 44. Application Diagram

MECHANICAL CONSIDERATIONS FOR MOUNTING

The ADXL345 should be mounted on the PCB in a location close to a hard mounting point of the PCB to the case. Mounting the ADXL345 at an unsupported PCB location, as shown in Figure 45, may result in large, apparent measurement errors due to undamped PCB vibration. Locating the accelerometer near a hard mounting point ensures that any PCB vibration at the accelerometer is above the accelerometer’s mechanical sensor resonant frequency and, therefore, effectively invisible to the accelerometer. Multiple mounting points, close to the sensor, and/or a thicker PCB also help to reduce the effect of system resonance on the performance of the sensor.

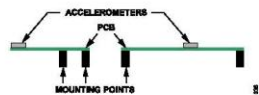


Figure 45. Incorrectly Placed Accelerometers

TAP DETECTION

The tap interrupt function is capable of detecting either single or double taps. The following parameters are shown in Figure 46 for a valid single and valid double tap event:

- ▶ The tap detection threshold is defined by the THRESH\_TAP register (Address 0x1D).
- ▶ The maximum tap duration time is defined by the DUR register (Address 0x21).
- ▶ The tap latency time is defined by the latent register (Address 0x22) and is the waiting period from the end of the first tap until the start of the time window, when a second tap can be detected, which is determined by the value in the window register (Address 0x23).
- ▶ The interval after the latency time (set by the latent register) is defined by the window register. Although a second tap must begin after the latency time has expired, it need not finish before the end of the time defined by the window register.

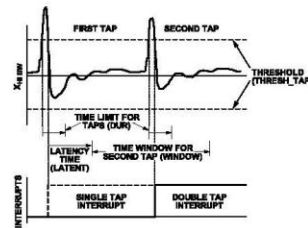


Figure 46. Tap Interrupt Function with Valid Single and Double Taps

If only the single tap function is in use, the single tap interrupt is triggered when the acceleration goes below the threshold, as long as DUR has not been exceeded. If both single and double tap functions are in use, the single tap interrupt is triggered when the double tap event has been either validated or invalidated.

Several events can occur to invalidate the second tap of a double tap event. First, if the suppress bit in the TAP\_AXES register (Address 0x2A) is set, any acceleration spike above the threshold during the latency time (set by the latent register) invalidates the double tap detection, as shown in Figure 47.

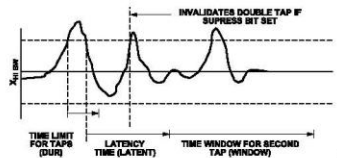


Figure 47. Double Tap Event Invalid Due to High g Event When the Suppress Bit is Set

A double tap event can also be invalidated if acceleration above the threshold is detected at the start of the time window for the second tap (set by the window register). This results in an invalid double tap at the start of this window, as shown in Figure 48. Additionally, a double tap event can be invalidated if an acceleration exceeds the time limit for taps (set by the DUR register), resulting in an invalid

## APPLICATIONS INFORMATION

double tap at the end of the DUR time limit for the second tap event, also shown in Figure 48.

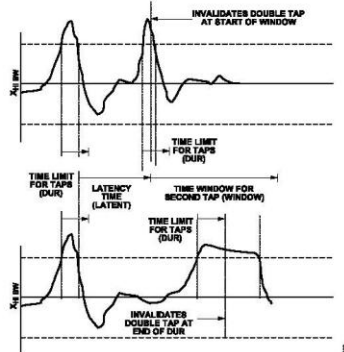


Figure 48. Tap Interrupt Function with Invalid Double Taps

Single taps, double taps, or both can be detected by setting the respective bits in the INT\_ENABLE register (Address 0x2E). Control over participation of each of the three axes in single tap/double tap detection is exerted by setting the appropriate bits in the TAP\_AXES register (Address 0x2A). For the double tap function to operate, both the latent and window registers must be set to a nonzero value.

Every mechanical system has somewhat different single tap/double tap responses based on the mechanical characteristics of the system. Therefore, some experimentation with values for the DUR, latent, window, and THRESH\_TAP registers is required. In general, a good starting point is to set the DUR register to a value greater than 0x10 (10 ms), the latent register to a value greater than 0x10 (20 ms), the window register to a value greater than 0x40 (80 ms), and the THRESH\_TAP register to a value greater than 0x30 (3 g). Setting a very low value in the latent, window, or THRESH\_TAP register may result in an unpredictable response due to the accelerometer picking up echoes of the tap inputs.

After a tap interrupt has been received, the first axis to exceed the THRESH\_TAP level is reported in the ACT\_TAP\_STATUS register (Address 0x2B). This register is never cleared but is overwritten with new data.

#### THRESHOLD

The lower output data rates are achieved by decimating a common sampling frequency inside the device. The activity, free-fall, and single tap/double tap detection functions without improved tap enabled are performed using undecimated data. Because the bandwidth of the output data varies with the data rate and is lower than the bandwidth of the undecimated data, the high frequency and high g data that is used to determine activity, free-fall, and single tap/double tap events may not be present if the output of the

accelerometer is examined. This may result in functions triggering when acceleration data does not appear to meet the conditions set by the user for the corresponding function.

#### LINK MODE

The function of the link bit is to reduce the number of activity interrupts that the processor must service by setting the device to look for activity only after inactivity. For proper operation of this feature, the processor must still respond to the activity and inactivity interrupts by reading the INT\_SOURCE register (Address 0x30) and, therefore, clearing the interrupts. If an activity interrupt is not cleared, the part cannot go into autosleep mode. The asleep bit in the ACT\_TAP\_STATUS register (Address 0x2B) indicates if the part is asleep.

#### SLEEP MODE VS. LOW POWER MODE

In applications where a low data rate and low power consumption is desired (at the expense of noise performance), it is recommended that low power mode be used. The use of low power mode preserves the functionality of the DATA\_READY interrupt and the FIFO for postprocessing of the acceleration data. Sleep mode, while offering a low data rate and power consumption, is not intended for data acquisition.

However, when sleep mode is used in conjunction with the AUTO\_SLEEP mode and the link mode, the part can automatically switch to a low power, low sampling rate mode when inactivity is detected. To prevent the generation of redundant inactivity interrupts, the inactivity interrupt is automatically disabled and activity is enabled. When the ADXL345 is in sleep mode, the host processor can also be placed into sleep mode or low power mode to save significant system power. When activity is detected, the accelerometer automatically switches back to the original data rate of the application and provides an activity interrupt that can be used to wake up the host processor. Similar to when inactivity occurs, detection of activity events is disabled and inactivity is enabled.

#### OFFSET CALIBRATION

Accelerometers are mechanical structures containing elements that are free to move. These moving parts can be very sensitive to mechanical stresses, much more so than solid-state electronics. The 0 g bias or offset is an important accelerometer metric because it defines the baseline for measuring acceleration. Additional stresses can be applied during assembly of a system containing an accelerometer. These stresses can come from, but are not limited to, component soldering, board stress during mounting, and application of any compounds on or over the component. If calibration is deemed necessary, it is recommended that calibration be performed after system assembly to compensate for these effects.

A simple method of calibration is to measure the offset while assuming that the sensitivity of the ADXL345 is as specified in Table 1. The offset can then be automatically accounted for by

## APPLICATIONS INFORMATION

using the built-in offset registers. This results in the data acquired from the DATA registers already compensating for any offset.

In a no-turn or single-point calibration scheme, the part is oriented such that one axis, typically the z-axis, is in the 1 g field of gravity and the remaining axes, typically the x- and y-axis, are in a 0 g field. The output is then measured by taking the average of a series of samples. The number of samples averaged is a choice of the system designer, but a recommended starting point is 0.1 sec worth of data for data rates of 100 Hz or greater. This corresponds to 10 samples at the 100 Hz data rate. For data rates less than 100 Hz, it is recommended that at least 10 samples be averaged together. These values are stored as  $X_{0g}$ ,  $Y_{0g}$ , and  $Z_{+1g}$  for the 0 g measurements on the x- and y-axis and the 1 g measurement on the z-axis, respectively.

The values measured for  $X_{0g}$  and  $Y_{0g}$  correspond to the x- and y-axis offset, and compensation is done by subtracting those values from the output of the accelerometer to obtain the actual acceleration:

$$X_{ACTUAL} = X_{MEAS} - X_{0g}$$

$$Y_{ACTUAL} = Y_{MEAS} - Y_{0g}$$

Because the z-axis measurement was done in a +1 g field, a no-turn or single-point calibration scheme assumes an ideal sensitivity,  $S_z$  for the z-axis. This is subtracted from  $Z_{+1g}$  to attain the z-axis offset, which is then subtracted from future measured values to obtain the actual value:

$$Z_{0g} = Z_{+1g} - S_z$$

$$Z_{ACTUAL} = Z_{MEAS} - Z_{0g}$$

The ADXL345 can automatically compensate the output for offset by using the offset registers (Register 0x1E, Register 0x1F, and Register 0x20). These registers contain an 8-bit, two's complement value that is automatically added to all measured acceleration values, and the result is then placed into the DATA registers. Because the value placed in an offset register is additive, a negative value is placed into the register to eliminate a positive offset and vice versa for a negative offset. The register has a scale factor of 15.6 mg/LSB and is independent of the selected g-range.

As an example, assume that the ADXL345 is placed into full-resolution mode with a sensitivity of typically 256 LSB/g. The part is oriented such that the z-axis is in the field of gravity and x-, y-, and z-axis outputs are measured as +10 LSB, -13 LSB, and +9 LSB, respectively. Using the previous equations,  $X_{0g}$  is +10 LSB,  $Y_{0g}$  is -13 LSB, and  $Z_{0g}$  is +9 LSB. Each LSB of output in full-resolution is 3.9 mg or one-quarter of an LSB of the offset register. Because the offset register is additive, the 0 g values are negated and rounded to the nearest LSB of the offset register:

$$X_{OFFSET} = -\text{Round}(10/4) = -3 \text{ LSB}$$

$$Y_{OFFSET} = -\text{Round}(-13/4) = 3 \text{ LSB}$$

$$Z_{OFFSET} = -\text{Round}(9/4) = -2 \text{ LSB}$$

analog.com

These values are programmed into the OFSX, OFSY, and OFXZ registers, respectively, as 0xFD, 0x03 and 0xFE. As with all registers in the ADXL345, the offset registers do not retain the value written into them when power is removed from the part. Power-cycling the ADXL345 returns the offset registers to their default value of 0x00.

Because the no-turn or single-point calibration method assumes an ideal sensitivity in the z-axis, any error in the sensitivity results in offset error. For instance, if the actual sensitivity was 250 LSB/g in the previous example, the offset would be 15 LSB, not 9 LSB. To help minimize this error, an additional measurement point can be used with the z-axis in a 0 g field and the 0 g measurement can be used in the  $Z_{ACTUAL}$  equation.

## USING SELF-TEST

The self-test change is defined as the difference between the acceleration output of an axis with self-test enabled and the acceleration output of the same axis with self-test disabled (see Endnote 6 of Table 1). This definition assumes that the sensor does not move between these two measurements, because if the sensor moves, a non-self-test related shift corrupts the test.

Proper configuration of the ADXL345 is also necessary for an accurate self-test measurement. The part should be set with a data rate of 100 Hz through 800 Hz, or 3200 Hz. This is done by ensuring that a value of 0x0A through 0x0D, or 0x0F is written into the rate bits (Bit D3 through Bit D0) in the BW\_RATE register (Address 0x2C). The part also must be placed into normal power operation by ensuring the LOW\_POWER bit in the BW\_RATE register is cleared (LOW\_POWER bit = 0) for accurate self-test measurements. It is recommended that the part be set to full-resolution, 16 g mode to ensure that there is sufficient dynamic range for the entire self-test shift. This is done by setting Bit D3 of the DATA\_FORMAT register (Address 0x31) and writing a value of 0x03 to the range bits (Bit D1 and Bit D0) of the DATA\_FORMAT register (Address 0x31). This results in a high dynamic range for measurement and a 3.9 mg/LSB scale factor.

After the part is configured for accurate self-test measurement, several samples of x-, y-, and z-axis acceleration data should be retrieved from the sensor and averaged together. The number of samples averaged is a choice of the system designer, but a recommended starting point is 0.1 sec worth of data for data rates of 100 Hz or greater. This corresponds to 10 samples at the 100 Hz data rate. For data rates less than 100 Hz, it is recommended that at least 10 samples be averaged together. The averaged values should be stored and labeled appropriately as the self-test disabled data, that is,  $X_{ST\_OFF}$ ,  $Y_{ST\_OFF}$ , and  $Z_{ST\_OFF}$ .

Next, self-test should be enabled by setting Bit D7 (SELF\_TEST) of the DATA\_FORMAT register (Address 0x31). The output needs some time (about four samples) to settle after enabling self-test. After allowing the output to settle, several samples of the x-, y-, and z-axis acceleration data should be taken again and averaged. It is recommended that the same number of samples be taken for this

Rev. G | 31 of 36

APPLICATIONS INFORMATION

average as was previously taken. These averaged values should again be stored and labeled appropriately as the value with self-test enabled, that is,  $X_{ST\_ON}$ ,  $Y_{ST\_ON}$ , and  $Z_{ST\_ON}$ . Self-test can then be disabled by clearing Bit D7 (SELF\_TEST) of the DATA\_FORMAT register (Address 0x31).

With the stored values for self-test enabled and disabled, the self-test change is as follows:

$$X_{ST} = X_{ST\_ON} - X_{ST\_OFF}$$

$$Y_{ST} = Y_{ST\_ON} - Y_{ST\_OFF}$$

$$Z_{ST} = Z_{ST\_ON} - Z_{ST\_OFF}$$

Because the measured output for each axis is expressed in LSBs,  $X_{ST}$ ,  $Y_{ST}$ , and  $Z_{ST}$  are also expressed in LSBs. These values can be converted to g's of acceleration by multiplying each value by the 3.9 mg/LSB scale factor, if configured for full-resolution mode. Additionally, Table 15 through Table 18 correspond to the self-test range converted to LSBs and can be compared with the measured self-test change when operating at a  $V_S$  of 2.5 V. For other voltages, the minimum and maximum self-test output values should be adjusted based on (multiplied by) the scale factors shown in Table 14. If the part was placed into  $\pm 2$  g, 10-bit or full-resolution mode, the values listed in Table 15 should be used. Although the fixed 10-bit mode or a range other than  $\pm 16$  g can be used, a different set of values, as indicated in Table 16 through Table 18, would need to be used. Using a range below 8 g may result in insufficient dynamic range and should be considered when selecting the range of operation for measuring self-test.

If the self-test change is within the valid range, the test is considered successful. Generally, a part is considered to pass if the minimum magnitude of change is achieved. However, a part that changes by more than the maximum magnitude is not necessarily a failure.

Another effective method for using the self-test to verify accelerometer functionality is to toggle the self test at a certain rate and then perform an FFT on the output. The FFT should have a correspond-

ing tone at the frequency the self-test was toggled. Using an FFT like this removes the dependency of the test on supply voltage and on self-test magnitude, which can vary within a rather wide range.

ASYNCHRONOUS DATA READINGS

Asynchronous readings of acceleration data can lead to accessing the acceleration data registers while they are being updated. To avoid this, it is recommended to either enable stream mode (see Table 37) or to synchronize the SPI/I<sup>2</sup>C transaction to the DATA\_READY interrupt functionality, so that the host processor samples immediately after the DATA\_READY interrupt goes high.

DATA FORMATTING OF UPPER DATA RATES

Formatting of output data at the 3200 Hz and 1600 Hz output data rates changes depending on the mode of operation (full-resolution or fixed 10-bit) and the selected output range.

When using the 3200 Hz or 1600 Hz output data rates in full-resolution or  $\pm 2$  g, 10-bit operation, the LSB of the output data-word is always 0. When data is right justified, this corresponds to Bit D0 of the DATAx0 register, as shown in Figure 49. When data is left justified and the part is operating in  $\pm 2$  g, 10-bit mode, the LSB of the output data-word is Bit D6 of the DATAx0 register. In full-resolution operation when data is left justified, the location of the LSB changes according to the selected output range.

For a range of  $\pm 2$  g, the LSB is Bit D6 of the DATAx0 register; for  $\pm 4$  g, Bit D5 of the DATAx0 register; for  $\pm 8$  g, Bit D4 of the DATAx0 register; and for  $\pm 16$  g, Bit D3 of the DATAx0 register. This is shown in Figure 50.

The use of 3200 Hz and 1600 Hz output data rates for fixed 10-bit operation in the  $\pm 4$  g,  $\pm 8$  g, and  $\pm 16$  g output ranges provides an LSB that is valid and that changes according to the applied acceleration. Therefore, in these modes of operation, Bit D0 is not always 0 when output data is right justified and Bit D6 is not always 0 when output data is left justified. Operation at any data rate of 800 Hz or lower also provides a valid LSB in all ranges and modes that changes according to the applied acceleration.

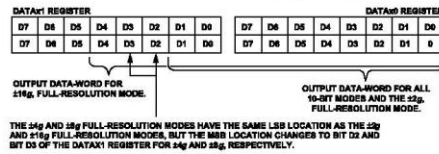


Figure 49. Data Formatting of Full-Resolution and  $\pm 2$  g, 10-Bit Modes of Operation When Output Data Is Right Justified

APPLICATIONS INFORMATION

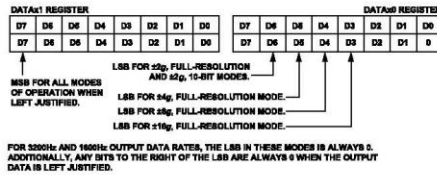


Figure 50. Data Formatting of Full-Resolution and ±2g, 10-Bit Modes of Operation When Output Data Is Left Justified

NOISE PERFORMANCE

The specification of noise shown in Table 1 corresponds to the typical noise performance of the ADXL345 in normal power operation with an output data rate of 100 Hz (LOW\_POWER bit (D4) = 0, rate bits (D3:D0) = 0xA in the BW\_RATE register, Address 0x2C). For normal power operation at data rates below 100 Hz, the noise of the ADXL345 is equivalent to the noise at 100 Hz ODR in LSBs. For data rates greater than 100 Hz, the noise increases roughly by a factor of  $\sqrt{2}$  per doubling of the data rate. For example, at 400 Hz ODR, the noise on the x- and y-axes is typically less than 1.5 LSB rms, and the noise on the z-axis is typically less than 2.2 LSB rms.

For low power operation (LOW\_POWER bit (D4) = 1 in the BW\_RATE register, Address 0x2C), the noise of the ADXL345 is constant for all valid data rates shown in Table 8. This value is typically less than 1.8 LSB rms for the x- and y-axes and typically less than 2.6 LSB rms for the z-axis.

The trend of noise performance for both normal power and low power modes of operation of the ADXL345 is shown in Figure 51.

Figure 52 shows the typical Allan deviation for the ADXL345. The 1/f corner of the device, as shown in this figure, is very low, allowing absolute resolution of approximately 100  $\mu$ g (assuming that there is sufficient integration time). Figure 52 also shows that the noise density is 290  $\mu$ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$  for the x-axis and y-axis and 430  $\mu$ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$  for the z-axis.

Figure 53 shows the typical noise performance trend of the ADXL345 over supply voltage. The performance is normalized to the tested and specified supply voltage,  $V_S = 2.5$  V. In general, noise decreases as supply voltage is increased. It should be noted, as shown in Figure 51, that the noise on the z-axis is typically higher than on the x-axis and y-axis; therefore, while they change roughly the same in percentage over supply voltage, the magnitude of change on the z-axis is greater than the magnitude of change on the x-axis and y-axis.

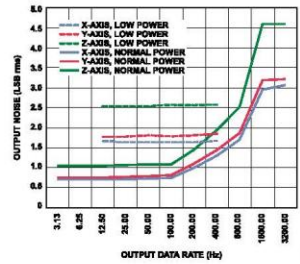


Figure 51. Noise vs. Output Data Rate for Normal and Low Power Modes, Full-Resolution (256 LSB/g)

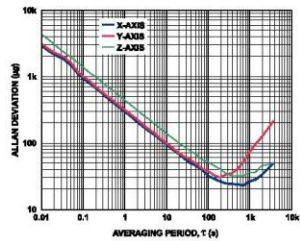


Figure 52. Root Allan Deviation

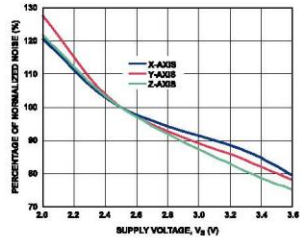


Figure 53. Normalized Noise vs. Supply Voltage,  $V_S$

## APPLICATIONS INFORMATION

## OPERATION AT VOLTAGES OTHER THAN 2.5 V

The ADXL345 is tested and specified at a supply voltage of  $V_S = 2.5$  V; however, it can be powered with  $V_S$  as high as 3.6 V or as low as 2.0 V. Some performance parameters change as the supply voltage changes: offset, sensitivity, noise, self-test, and supply current.

Due to slight changes in the electrostatic forces as supply voltage is varied, the offset and sensitivity change slightly. When operating at a supply voltage of  $V_S = 3.3$  V, the x- and y-axis offset is typically 25 mg higher than at  $V_S = 2.5$  V operation. The z-axis is typically 20 mg lower when operating at a supply voltage of 3.3 V than when operating at  $V_S = 2.5$  V. Sensitivity on the x- and y-axes typically shifts from a nominal 256 LSB/g (full-resolution or  $\pm 2$  g, 10-bit operation) at  $V_S = 2.5$  V operation to 265 LSB/g when operating with a supply voltage of 3.3 V. The z-axis sensitivity is unaffected by a change in supply voltage and is the same at  $V_S = 3.3$  V operation as it is at  $V_S = 2.5$  V operation. Simple linear interpolation can be used to determine typical shifts in offset and sensitivity at other supply voltages.

Changes in noise performance, self-test response, and supply current are discussed elsewhere throughout the data sheet. For noise performance, the [Noise Performance](#) section should be reviewed. The [Using Self-Test](#) section discusses both the operation of self-test over voltage, a square relationship with supply voltage, as well as the conversion of the self-test response in  $g$ 's to LSBs. Finally, [Figure 33](#) shows the impact of supply voltage on typical current consumption at a 100 Hz output data rate, with all other output data rates following the same trend.

## OFFSET PERFORMANCE AT LOWEST DATA RATES

The ADXL345 offers a large number of output data rates and bandwidths, designed for a large range of applications. However, at the lowest data rates, described as those data rates below 6.25 Hz, the offset performance over temperature can vary significantly from the remaining data rates. [Figure 54](#), [Figure 55](#), and [Figure 56](#) show the typical offset performance of the ADXL345 over temperature for the data rates of 6.25 Hz and lower. All plots are normalized to the offset at 100 Hz output data rate; therefore, a nonzero value corresponds to additional offset shift due to temperature for that data rate.

When using the lowest data rates, it is recommended that the operating temperature range of the device be limited to provide

minimal offset shift across the operating temperature range. Due to variability between parts, it is also recommended that calibration over temperature be performed if any data rates below 6.25 Hz are in use.

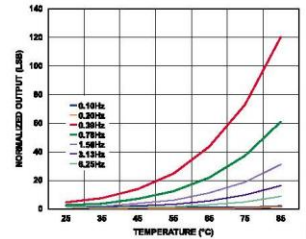


Figure 54. Typical X-Axis Output vs. Temperature at Lower Data Rates, Normalized to 100 Hz Output Data Rate,  $V_S = 2.5$  V

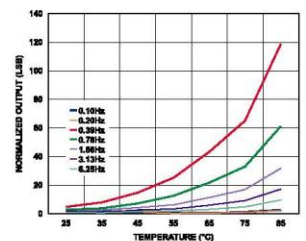


Figure 55. Typical Y-Axis Output vs. Temperature at Lower Data Rates, Normalized to 100 Hz Output Data Rate,  $V_S = 2.5$  V

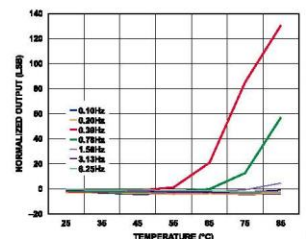


Figure 56. Typical Z-Axis Output vs. Temperature at Lower Data Rates, Normalized to 100 Hz Output Data Rate,  $V_S = 2.5$  V

APPLICATIONS INFORMATION

AXES OF ACCELERATION SENSITIVITY

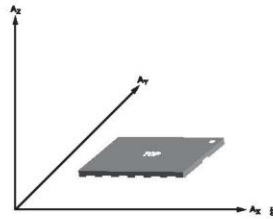


Figure 57. Axes of Acceleration Sensitivity (Corresponding Output Voltage Increases When Accelerated Along the Sensitive Axis)

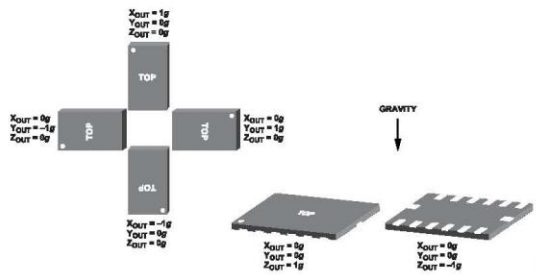


Figure 58. Output Response vs. Orientation to Gravity

LAYOUT AND DESIGN RECOMMENDATIONS

Figure 59 shows the recommended printed wiring board land pattern.

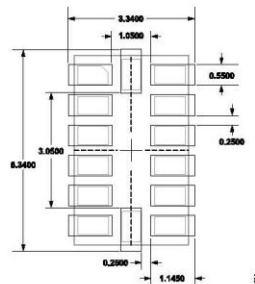


Figure 59. Recommended Printed Wiring Board Land Pattern (Dimensions shown in millimeters)

OUTLINE DIMENSIONS

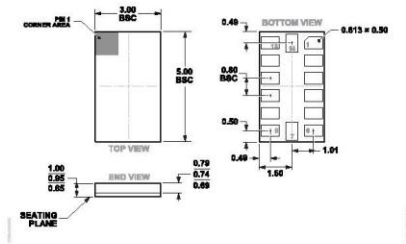


Figure 60. 14-Terminal Land Grid Array [LGA] (CC-14-1)  
Dimensions shown in millimeters

Updated: May 10, 2022

ORDERING GUIDE

Model <sup>1</sup>	Temperature Range	Package Description	Packing Quantity	Package Option
ADXL345BCCZ	-40°C to +85°C	14-Lead LGA (5mm x 3mm)	Tray	CC-14-1
ADXL345BCCZ-RL	-40°C to +85°C	14-Lead LGA (5mm x 3mm)	Reel, 5000	CC-14-1
ADXL345BCCZ-RL7	-40°C to +85°C	14-Lead LGA (5mm x 3mm)	Reel, 1500	CC-14-1

<sup>1</sup> Z = RoHS Compliant Part.

EVALUATION BOARDS

Model <sup>1</sup>	Description
EVAL-ADXL345Z	Evaluation Board
EVAL-ADXL345-DB	Evaluation Board
EVAL-ADXL345-M	Analog Devices Inertial Sensor Evaluation System, Includes ADXL345 Satellite
EVAL-ADXL345-S	ADXL345 Satellite, Standalone

<sup>1</sup> Z = RoHS Compliant Part.

<sup>1</sup>2C refers to a communications protocol originally developed by Philips Semiconductors (now NXP Semiconductors).



**Anexo 2.** Unida de microcontrolador en red Módulo NodeMCu v3 Lua ESP 8266.

ESP8266 802.11bgn Smart Device



**CONFIDENTIAL**

**ESPRESSIF SMART  
CONNECTIVITY  
PLATFORM: ESP8266**

#### **Disclaimer and Copyright Notice**

Information in this document, including URL references, is subject to change without notice.

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS" WITH NO WARRANTIES WHATSOEVER, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY, NONINFRINGEMENT, FITNESS FOR ANY PARTICULAR PURPOSE, OR ANY WARRANTY OTHERWISE ARISING OUT OF ANY PROPOSAL, SPECIFICATION OR SAMPLE. All liability, including liability for infringement of any proprietary rights, relating to use of information in this document is disclaimed. No licenses express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights are granted herein.

The Wi-Fi Alliance Member Logo is a trademark of the Wi-Fi Alliance.

All trade names, trademarks and registered trademarks mentioned in this document are property of their respective owners, and are hereby acknowledged.

Copyright © 2013 Espressif Systems Inc. All rights reserved.

## Table of Contents

---

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>TECHNOLOGY OVERVIEW</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>FEATURES</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>APPLICATION DIAGRAM</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>ULTRA LOW POWER TECHNOLOGY</b>	<b>8</b>
5.1	HIGHEST LEVEL OF INTEGRATION	8
<b>6</b>	<b>ESP8266 APPLICATIONS</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>SPECIFICATIONS</b>	<b>10</b>
7.1	CURRENT CONSUMPTION	10
7.2	RF PERFORMANCE	11
<b>8</b>	<b>CPU, MEMORY AND INTERFACES</b>	<b>12</b>
8.1	CPU	12
8.2	MEMORY CONTROLLER	12
8.3	AHB AND AHB BLOCKS	12
8.4	INTERFACES	13
8.4.1	<i>Master SI / SPI Control (Optional)</i>	13
8.4.2	<i>General Purpose IO</i>	14
8.4.3	<i>Digital IO Pads</i>	14
<b>9</b>	<b>FIRMWARE &amp; SOFTWARE DEVELOPMENT KIT</b>	<b>16</b>
9.1	FEATURES	16
<b>10</b>	<b>POWER MANAGEMENT</b>	<b>18</b>
<b>11</b>	<b>CLOCK MANAGEMENT</b>	<b>19</b>
11.1	HIGH FREQUENCY CLOCK	19
11.2	EXTERNAL REFERENCE REQUIREMENTS	20
<b>12</b>	<b>RADIO</b>	<b>21</b>
12.1	CHANNEL FREQUENCIES	21
12.2	2.4GHZ RECEIVER	21
12.3	2.4GHZ TRANSMITTER	22
12.4	CLOCK GENERATOR	22
<b>APP.</b>	<b>QFN32 PACKAGE DRAWING</b>	<b>23</b>

## 1 Introduction

Espressif Systems' Smart Connectivity Platform (ESCP) of high performance wireless SOCs, for mobile platform designers, provides unsurpassed ability to embed Wi-Fi capabilities within other systems, at the lowest cost with the greatest functionality.

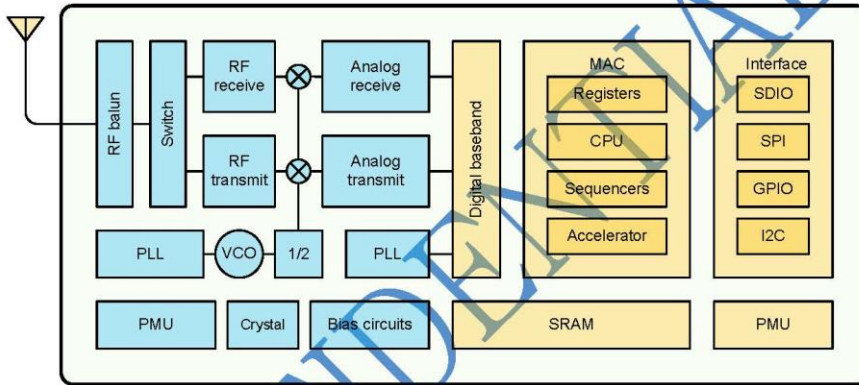


Figure 1: ESP8266 Block Diagram

## 2 Technology Overview

---

ESP8266 offers a complete and self-contained Wi-Fi networking solution, allowing it to either host the application or to offload all Wi-Fi networking functions from another application processor.

When ESP8266 hosts the application, and when it is the only application processor in the device, it is able to boot up directly from an external flash. It has integrated cache to improve the performance of the system in such applications, and to minimize the memory requirements.

Alternately, serving as a Wi-Fi adapter, wireless internet access can be added to any microcontroller-based design with simple connectivity through UART interface or the CPU AHB bridge interface.

ESP8266 on-board processing and storage capabilities allow it to be integrated with the sensors and other application specific devices through its GPIOs with minimal development up-front and minimal loading during runtime. With its high degree of on-chip integration, which includes the antenna switch balun, power management converters, it requires minimal external circuitry, and the entire solution, including front-end module, is designed to occupy minimal PCB area.

Sophisticated system-level features include fast sleep/wake context switching for energy-efficient VoIP, adaptive radio biasing for low-power operation, advance signal processing, and spur cancellation and radio co-existence features for common cellular, Bluetooth, DDR, LVDS, LCD interference mitigation.

### 3 Features

---

- 802.11 b/g/n protocol
- Wi-Fi Direct (P2P), soft-AP
- Integrated TCP/IP protocol stack
- Integrated TR switch, balun, LNA, power amplifier and matching network
- Integrated PLL, regulators, and power management units
- +19.5dBm output power in 802.11b mode
- Integrated temperature sensor
- Supports antenna diversity
- Power down leakage current of < 10uA
- Integrated low power 32-bit CPU could be used as application processor
- SDIO 2.0, SPI, UART
- STBC, 1×1 MIMO, 2×1 MIMO
- A-MPDU & A-MSDU aggregation & 0.4μs guard interval
- Wake up and transmit packets in < 2ms
- Standby power consumption of < 1.0mW (DTIM3)



## 5 Ultra Low Power Technology

---

ESP8266 has been designed for mobile, wearable electronics and Internet of Things applications with the aim of achieving the lowest power consumption with a combination of several proprietary techniques. The power saving architecture operates in 3 modes: active mode, sleep mode and deep sleep mode.

By using advance power management techniques and logic to power-down functions not required and to control switching between sleep and active modes, ESP8266 consumes less than 12uA in sleep mode and less than 1.0mW (DTIM=3) or less than 0.5mW (DTIM=10) to stay connected to the access point.

When in sleep mode, only the calibrated real-time clock and watchdog remains active. The real-time clock can be programmed to wake up the ESP8266 at any required interval.

The ESP8266 can be programmed to wake up when a specified condition is detected. This minimal wake-up time feature of the ESP8266 can be utilized by mobile device SOCs, allowing them to remain in the low-power standby mode until Wi-Fi is needed.

In order to satisfy the power demand of mobile and wearable electronics, ESP8266 can be programmed to reduce the output power of the PA to fit various application profiles, by trading off range for power consumption.

### 5.1 Highest Level of Integration

By integrating the costliest components such as power management unit, TR switch, RF balun, high power PA capable of delivering +25dBm (peak), ESP8266 ensures that the BOM cost is the lowest possible, and ease of integration into any system.

With ESP8266, the only external BOM are resistors, capacitors, and crystal.

## 6 ESP8266 Applications

---

- Smart power plugs
- Home automation
- Mesh network
- Industrial wireless control
- Baby monitors
- IP Cameras
- Sensor networks
- Wearable electronics
- Wi-Fi location-aware devices
- Security ID tags
- Wi-Fi position system beacons

CONFIDENTIAL

## 7 Specifications

### 7.1 Current Consumption

The following current consumption is based on 3.3V supply, and 25°C ambient, using internal regulators. Measurements are done at antenna port without SAW filter. All the transmitter's measurements are based on 90% duty cycle, continuous transmit mode.

Mode	Min	Typ	Max	Unit
Transmit 802.11b, CCK 1Mbps, P <sub>OUT</sub> =+19.5dBm		215		mA
Transmit 802.11b, CCK 11Mbps, P <sub>OUT</sub> =+18.5dBm		197		mA
Transmit 802.11g, OFDM 54Mbps, P <sub>OUT</sub> =+16dBm		145		mA
Transmit 802.11n, MCS7, P <sub>OUT</sub> =+14dBm		135		mA
Receive 802.11b, packet length=1024 byte, -80dBm		60		mA
Receive 802.11g, packet length=1024 byte, -70dBm		60		mA
Receive 802.11n, packet length=1024 byte, -65dBm		62		mA
Standby		0.9		mA
Deep sleep		10		uA
Power save mode DTIM 1		1.2		mA
Power save mode DTIM 3		0.86		mA
Total shutdown		0.5		uA

## 7.2 RF Performance

The following are measured under room temperature conditions with 3.3V and 1.1V power supplies.

Description	Min	Typical	Max	Unit
Input frequency	2412		2484	MHz
Input impedance		50		$\Omega$
Input reflection			-10	dB
Output power of PA for 72.2Mbps	14	15	16	dBm
Output power of PA for 11b mode	17.5	18.5	19.5	dBm
Sensitivity				
CCK, 1Mbps		-98		dBm
CCK, 11Mbps		-91		dBm
6Mbps (1/2 BPSK)		-93		dBm
54Mbps (3/4 64-QAM)		-75		dBm
HT20, MCS7 (65Mbps, 72.2Mbps)		-71		dBm
Adjacent Channel Rejection				
OFDM, 6Mbps		37		dB
OFDM, 54Mbps		21		dB
HT20, MCS0		37		dB
HT20, MCS7		20		dB

## 8 CPU, Memory and Interfaces

---

### 8.1 CPU

This chip embeds an ultra low power Micro 32-bit CPU, with 16-bit thumb mode. This CPU can be interfaced using:

- code RAM/ROM interface (iBus) that goes to the memory controller, that can also be used to access external flash memory,
- data RAM interface (dBus), that also goes to the memory controller
- AHB interface, for register access, and
- JTAG interface for debugging

### 8.2 Memory Controller

The memory controller contains ROM, and SRAM. It is accessed by the CPU using the iBus, dBus and AHB interface. Any of these interfaces can request access to the ROM or RAM modules, and the memory controller arbiters serve these 3 interfaces on a first-come-first-serve basis.

### 8.3 AHB and AHB Blocks

The AHB blocks performs the function of an arbiter, controls the AHB interfaces from the MAC, SDIO (host) and CPU. Depending on the address, the AHB data requests can go into one of the two slaves:

- APB block, or
- flash controller (usually for standalone applications).

Data requests to the memory controller are usually high speed requests, and requests to the APB block are usually register access.

The APB block acts as a decoder. It is meant only for access to programmable registers within ESP8266's main blocks. Depending on the address, the APB request can go to the radio, SI/SPI, SDIO (host), GPIO, UART, real-time clock (RTC), MAC or digital baseband.

## 8.4 Interfaces

The ESP8266 contains several analog and digital interfaces described in the following sections.

### 8.4.1 Master SI / SPI Control (Optional)

The master serial interface (SI) can operate in two, three or four-wire bus configurations to control the EEPROM or other I2C/SPI devices. Multiple I2C devices with different device addresses are supported by sharing the 2-wire bus.

Multiple SPI devices are supported by sharing the clock and data signals, using separate software controlled GPIO pins as chip selects.

The SPI can be used for controlling external devices such as serial flash memories, audio CODECs, or other slave devices. It is set up as a standard master SPI device with 3 different enable pins:

- SPI\_EN0,
- SPI\_EN1,
- SPI\_EN2.

Both SPI master and SPI slave are supported with the latter being used as a host interface.

SPI\_EN0 is used as an enable signal to an external serial flash memory for downloading patch code and/or MIB-data to the baseband in an embedded application. In a host based application, patch code and MIB-data can alternatively be downloaded via the host interface. This pin is active low and should be left open if not used.

SPI\_EN1 is usually used for a user application, e.g. to control an external audio codec or sensor ADC, in an embedded application. This pin is active low and should be left open if not used.

SPI\_EN2 usually controls an EEPROM to store individual data, such as MIB information, MAC address, and calibration data, or for general use. This pin is active low and should be left open if not used.

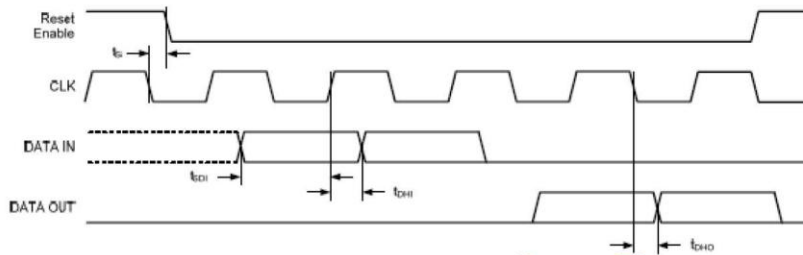


Figure 2: SPI timing characteristics

#### 8.4.2 General Purpose IO

There are up to 16 GPIO pins. They can be assigned to various functions by the firmware. Each GPIO can be configured with internal pull-up/down, input available for sampling by a software register, input triggering an edge or level CPU interrupt, input triggering a level wakeup interrupt, open-drain or push-pull output driver, or output source from a software register, or a sigma-delta PWM DAC.

These pins are multiplexed with other functions such as host interface, UART, SI, Bluetooth coexistence, etc.

#### 8.4.3 Digital IO Pads

The digital IO pads are bidirectional, non-inverting and tri-state. It includes input and an output buffer with tristate control inputs. Besides this, for low power operations, the IO can also be set to hold. For instance, when we power down the chip, all output enable signals can be set to hold low.

Optional hold functionality can be built into the IO if requested. When the IO is not driven by the internal or external circuitry, the hold functionality can be used to hold the state to the last used state.

The hold functionality introduces some positive feedback into the pad. Hence, the external driver that drives the pad must be stronger than the positive feedback. The required drive strength is however small – in the range of 5uA.

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit
Input low voltage	$V_{IL}$	-0.3	$0.25 \times V_{IO}$	V
Input high voltage	$V_{IH}$	$0.75 \times V_{IO}$	3.6	V
Input leakage current	$I_{IL}$		50	nA
Output low voltage	$V_{OL}$		$0.1 \times V_{IO}$	V
Output high voltage	$V_{OH}$	$0.8 \times V_{IO}$		V
Input pin capacitance	$C_{pad}$		2	pF
VDDIO	$V_{IO}$	1.7	3.6	V
Maximum drive capability	$I_{MAX}$		12	mA
Temperature	$T_{amb}$	-20	100	°C

All digital IO pins are protected from over-voltage with a snap-back circuit connected between the pad and ground. The snap back voltage is typically about 6V, and the holding voltage is 5.8V. This provides protection from over-voltages and ESD. The output devices are also protected from reversed voltages with diodes.

## 9 Firmware & Software Development Kit

The application and firmware is executed in on-chip ROM and SRAM, which loads the instructions during wake-up, through the SDIO interface, from the external flash.

The firmware implements TCP/IP, the full 802.11 b/g/n/e/i WLAN MAC protocol and Wi-Fi Direct specification. It supports not only basic service set (BSS) operations under the distributed control function (DCF) but also P2P group operation compliant with the latest Wi-Fi P2P protocol. Low level protocol functions are handled automatically by ESP8266:

- RTS/CTS,
- acknowledgement,
- fragmentation and defragmentation,
- aggregation,
- frame encapsulation (802.11h/RFC 1042),
- automatic beacon monitoring / scanning, and
- P2P Wi-Fi direct,

Passive or active scanning, as well as P2P discovery procedure is performed autonomously once initiated by the appropriate command. Power management is handled with minimum host interaction to minimize active duty period.

### 9.1 Features

The SDK includes the following library functions:

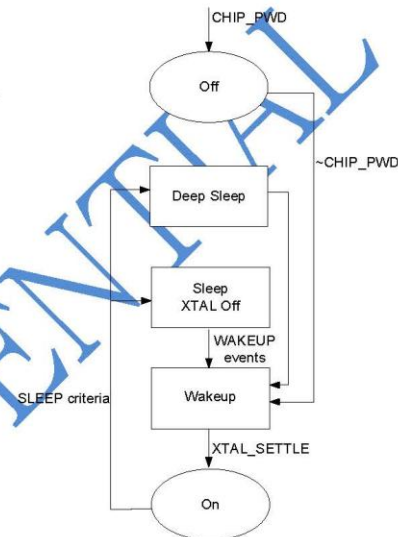
- 802.11 b/g/n/d/e/i/k/r support;
- Wi-Fi Direct (P2P) support:
  - P2P Discovery, P2P Group Owner mode, P2P Power Management
  - Infrastructure BSS Station mode / P2P mode / softAP mode support;
  - Hardware accelerators for CCMP (CBC-MAC, counter mode), TKIP (MIC, RC4), WAPI (SMS4), WEP (RC4), CRC;

- WPA/WPA2 PSK, and WPS driver;
- Additional 802.11i security features such as pre-authentication, and TSN;
- Open Interface for various upper layer authentication schemes over EAP such as TLS, PEAP, LEAP, SIM, AKA, or customer specific;
- 802.11n support (2.4GHz / 5GHz);
- Supports MIMO 1×1 and 2×1, STBC, A-MPDU and A-MSDU aggregation and 0.4μs guard interval;
- WMM power save U-APSD;
- Multiple queue management to fully utilize traffic prioritization defined by 802.11e standard;
- UMA compliant and certified;
- 802.1h/RFC1042 frame encapsulation;
- Scattered DMA for optimal CPU off load on Zero Copy data transfer operations;
- Antenna diversity and selection (software managed hardware);
- Clock/power gating combined with 802.11-compliant power management dynamically adapted to current connection condition providing minimal power consumption;
- Adaptive rate fallback algorithm sets the optimum transmission rate and Tx power based on actual SNR and packet loss information;
- Automatic retransmission and response on MAC to avoid packet discarding on slow host environment;
- Seamless roaming support;
- Configurable packet traffic arbitration (PTA) with dedicated slave processor based design provides flexible and exact timing Bluetooth co-existence support for a wide range of Bluetooth Chip vendors;
- Dual and single antenna Bluetooth co-existence support with optional simultaneous receive (Wi-Fi/Bluetooth) capability.

## 10 Power Management

The chip can be put into the following states:

- **OFF:** CHIP\_PD pin is low. The RTC is disabled. All registers are cleared.
- **DEEP\_SLEEP:** Only RTC is powered on – the rest of the chip is powered off. Recovery memory of RTC can keep basic Wi-Fi connecting information.
- **SLEEP:** Only the RTC is operating. The crystal oscillator is disabled. Any wakeup events (MAC, host, RTC timer, external interrupts) will put the chip into the WAKEUP state.
- **WAKEUP:** In this state, the system goes from the sleep states to the PWR state. The crystal oscillator and PLLs are enabled.
- **ON state:** the high speed clock is operational and sent to each block enabled by the clock control register. Lower level clock gating is implemented at the block level, including the CPU, which can be gated off using the WAITI instruction, while the system is on.



## 11 Clock Management

### 11.1 High Frequency Clock

The high frequency clock on ESP8266 is used to drive both the Tx and Rx mixers. This clock is generated from the internal crystal oscillator and an external crystal. The crystal frequency can range from 26MHz to 52MHz.

While internal calibration of the crystal oscillator ensures that a wide range of crystals can be used, in general, the quality of the crystal is still a factor to consider, to obtain reasonable phase noise. When the crystal selected is sub-optimal due to large frequency drifts or poor Q-factor, the maximum throughput and sensitivity of the Wi-Fi system is degraded. Please refer to the application notes on how the frequency offset can be measured.

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit
Frequency	$F_{XO}$	26	52	MHz
Loading capacitance	$C_L$		32	pF
Motional capacitance	$C_M$	2	5	pF
Series resistance	$R_S$	0	65	$\Omega$
Frequency tolerance	$\Delta F_{XO}$	-15	15	ppm
Frequency vs temperature (-25°C ~ 75°C)	$\Delta F_{XO,Temp}$	-15	15	ppm

## 11.2 External Reference Requirements

For an externally generated clock, the frequency can range from 26MHz to 52MHz can be used.

For good performance of the radio, the following characteristics are expected of the clock:

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit
Clock amplitude	$V_{XO}$	0.2	1	V <sub>pp</sub>
External clock accuracy	$\Delta F_{XO,EXT}$	-15	15	ppm
Phase noise @1kHz offset, 40MHz clock			-120	dBc/Hz
Phase noise @10kHz offset, 40MHz clock			-130	dBc/Hz
Phase noise @100kHz offset, 40MHz clock			-138	dBc/Hz

## 12 Radio

The ESP8266 radio consists of the following main blocks:

- 2.4GHz receiver
- 2.4GHz transmitter
- High speed clock generators and crystal oscillator
- Real time clock
- Bias and regulators
- Power management

### 12.1 Channel Frequencies

The RF transceiver supports the following channels according to the IEEE802.11bgn standards.

Channel No	Frequency (MHz)	Channel No	Frequency (MHz)
1	2412	8	2447
2	2417	9	2452
3	2422	10	2457
4	2427	11	2462
5	2432	12	2467
6	2437	13	2472
7	2442	14	2484

### 12.2 2.4GHz Receiver

The 2.4GHz receiver downconverts the RF signal to quadrature baseband signals and converts them to the digital domain with 2 high resolution high speed ADCs. To adapt to varying signal channel conditions, RF filters, automatic gain control, DC offset cancelation circuits and baseband filters are integrated within the radio.

### 12.3 2.4GHz Transmitter

The 2.4GHz transmitter upconverts the quadrature baseband signals to 2.4GHz, and drives the antenna with a high powered CMOS power amplifier. The use of digital calibration further improves the linearity of the power amplifier, enabling a state of art performance of delivering +19dBm average power for 802.11b transmission and +16dBm for 802.11n transmission.

Additional calibrations are integrated to cancel any imperfections of the radio, such as:

- carrier leakage,
- I/Q phase matching, and
- baseband nonlinearities

This reduces the amount of time required and test equipment required for production testing.

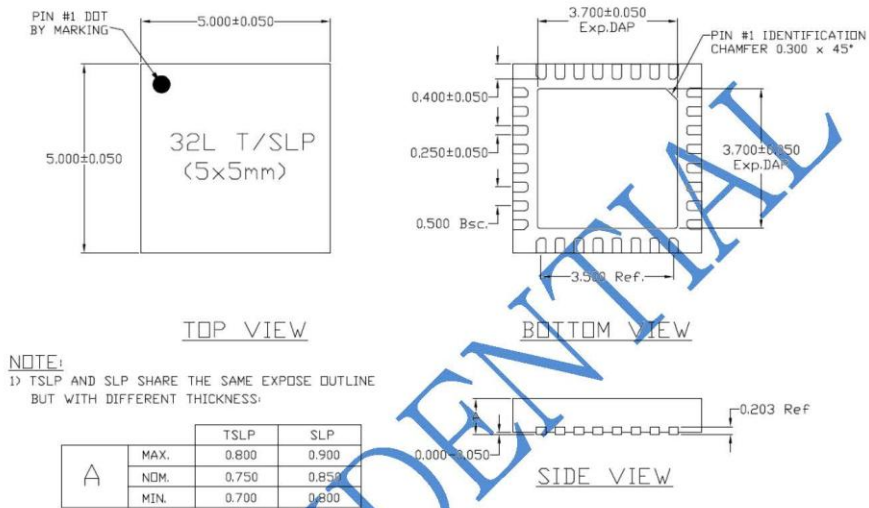
### 12.4 Clock Generator

The clock generator generates quadrature 2.4GHz clock signals for the receiver and transmitter. All components of the clock generator are integrated on-chip, including:

- inductor,
- varactor, and
- loop filter.

The clock generator has built-in calibration and self test circuits. Quadrature clock phases and phase noise are optimized on-chip with patented calibration algorithms to ensure the best receiver and transmitter performance.

## App. QFN32 Package Drawing



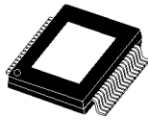
## Anexo 3. Ficha técnica del amplificador Fosi TDA7498E 160 [Watt]. $R_L = 4 [\Omega]$ .



TDA7498E

Datasheet

### 160-watt + 160-watt dual BTL class-D audio amplifier



PowerSSO-36  
exposed pad up

#### Features

- 160-W + 160-W output power at THD = 10% with  $R_L = 4 \Omega$  and  $V_{CC} = 36 \text{ V}$
- 1 x 220 W output power mono parallel BTL at THD = 10% with  $R_L = 3 \Omega$  and  $V_{CC} = 36 \text{ V}$
- Wide-range single-supply operation (14 - 36 V)
- High efficiency ( $\eta = 85\%$ )
- Parallel BTL function using the MODE pin
- Four selectable, fixed gain settings of nominally 23.8 dB, 29.8 dB, 33.3 dB and 35.8 dB
- Differential inputs minimize common-mode noise
- Standby and mute features
- Smart protection
- Thermal overload protection
- Small offset less than 20 mV

#### Description

The TDA7498E is a dual BTL class-D audio amplifier with a single power supply designed for home systems and active speaker applications.

It comes in a 36-pin PowerSSO package with exposed pad up (EPU) to facilitate mounting a separate heatsink.

#### Maturity status link

TDA7498E

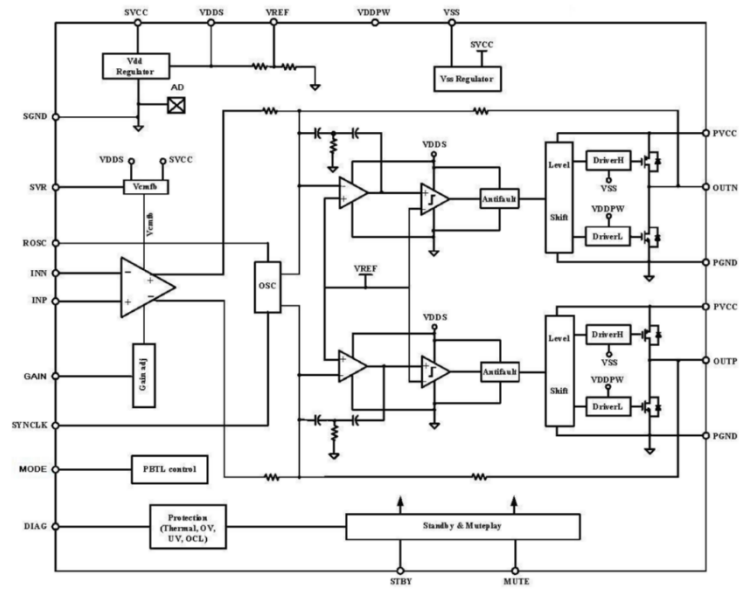
#### Device summary

Order code	TDA7498ETR
Operating temperature range	0 to 70 °C
Package	PowerSSO36 (EPU)
Packing	Tape and reel

## 1 Device block diagram

The figure below shows the block diagram of one of the two identical channels of the TDA7498E.

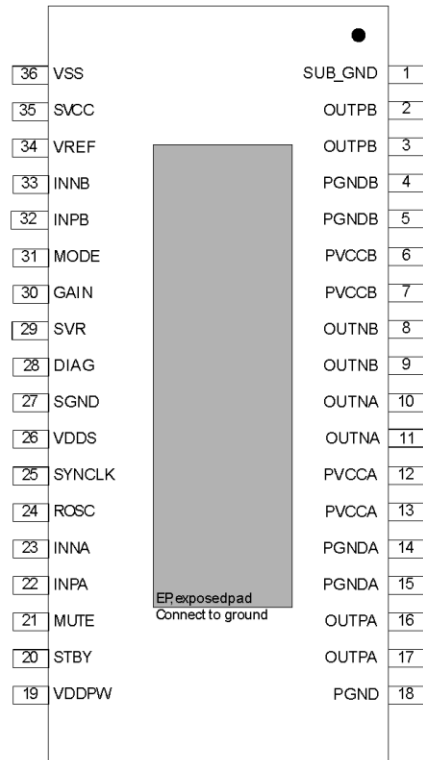
Figure 1. Internal block diagram (showing one channel only)



## 2 Pin description

### 2.1 Pinout

Figure 2. Pin connections (top view, PCB view)



## 2.2 Pin list

**Table 1. Pin description list**

Number	Name	Type	Description
1	SUB_GND	PWR	Connect to the frame
2,3	OUTPB	O	Positive PWM for right channel
4,5	PGNDB	PWR	Power stage ground for right channel
6,7	PVCCB	PWR	Power supply for right channel
8,9	OUTNB	O	Negative PWM output for right channel
10,11	OUTNA	O	Negative PWM output for left channel
12,13	PVCCA	PWR	Power supply for left channel
14,15	PGNDA	PWR	Power stage ground for left channel
16,17	OUTPA	O	Positive PWM output for left channel
18	PGND	PWR	Power stage ground
19	VDDPW	O	3.3-V (nominal) regulator output referred to ground for power stage
20	STBY	I	Standby mode control
21	MUTE	I	Mute mode control
22	INPA	I	Positive differential input of left channel
23	INNA	I	Negative differential input of left channel
24	ROSC	O	Master oscillator frequency-setting pin
25	SYNCLK	I/O	Clock in/out for external oscillator
26	VDDS	O	3.3-V (nominal) regulator output referred to ground for signal blocks
27	SGND	PWR	Signal ground
28	DIAG	O	Open-drain diagnostic output
29	SVR	O	Supply voltage rejection
30	GAIN	I	Gain setting input
31	MODE	I	Enables stereo or mono BTL mode of operation
32	INPB	I	Positive differential input of right channel
33	INNB	I	Negative differential input of right channel
34	VREF	O	Half VDDS (nominal) referred to ground
35	SVCC	PWR	Signal power supply
36	VSS	O	3.3-V (nominal) regulator output referred to power supply
-	EP	-	Exposed pad for heatsink, to be connected to ground

### 3 Electrical specifications

#### 3.1 Absolute maximum ratings

**Table 2. Absolute maximum ratings**

Symbol	Parameter	Value	Unit
V <sub>CC</sub>	DC supply voltage for pins PVCCA, PVCCB, SVCC	45	V
V <sub>I</sub>	Voltage limits for input pins STBY, MUTE, INNA, INPA, INNB, INPB, GAIN, MODE	-0.3 to 4.0	V
T <sub>J</sub>	Operating junction temperature	0 to 150	°C
T <sub>op</sub>	Operating ambient temperature	0 to 70	°C
T <sub>stg</sub>	Storage temperature	-40 to 150	°C

#### 3.2 Thermal data

**Table 3. Thermal data**

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
R <sub>th j-case</sub>	Thermal resistance, junction to case	-	3.0		°C/W

#### 3.3 Recommended operating conditions

**Table 4. Recommended operating conditions**

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
V <sub>CC</sub>	Supply voltage for pins PVCCA, PVCCB, SVCC	14	-	39	V
T <sub>amb</sub>	Ambient operating temperature	0	-	70	°C

#### 3.4 Electrical specifications

Unless otherwise stated, the values in the table below are specified for the conditions: V<sub>CC</sub> = 36 V, R<sub>L</sub> = 4 Ω, R<sub>OSC</sub> = R3 = 39 kΩ, C8 = 100 nF, f = 1 kHz, G<sub>V</sub> = 23.6 dB, T<sub>amb</sub> = 25 °C.

**Table 5. Electrical specifications**

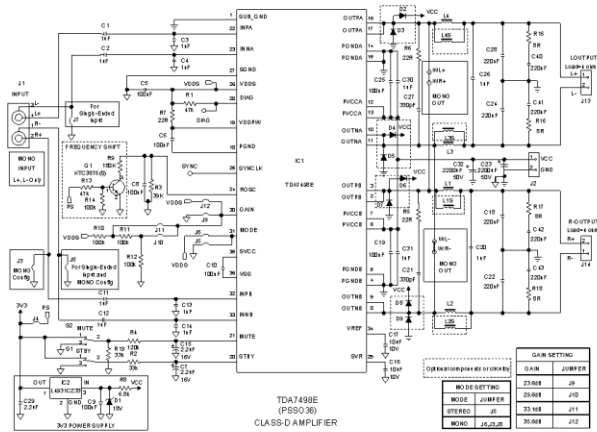
Symbol	Parameter	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
I <sub>q</sub>	Total quiescent current	No LC filter, no load	-	60		mA
I <sub>qSTBY</sub>	Quiescent current in standby	-	-	1		μA
V <sub>OS</sub>	Output offset voltage	V <sub>I</sub> = 0, A <sub>v</sub> = 23.6 dB, no load	-20	-	20	mV
I <sub>OCP</sub>	Overcurrent protection threshold	R <sub>L</sub> = 0 Ω	10	11	14	A
T <sub>J</sub>	Junction temperature at thermal shutdown	-	140	150	160	°C
R <sub>I</sub>	Input resistance	Differential input		69	-	kΩ
V <sub>UVP</sub>	Undervoltage protection threshold	-	-	-	8	V
R <sub>dsON</sub>	Power transistor on-resistance	High side	-	0.15	-	Ω

Symbol	Parameter	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
(Continued) $R_{dsON}$	(Continued) Power transistor on-resistance	Low side	-	0.15	-	(Continued) $\Omega$
$P_o$	Output power	THD = 10%	-	160	-	W
		THD = 1%	-	125	-	
$P_o$	Parallel BTL (mono) output power, $R_L = 3 \text{ ohm}$ , $V_{CC} = 36 \text{ V}$	THD = 10%	-	220	-	W
		THD = 1%	-	170	-	
$\eta$	Efficiency		-	85	-	%
THD	Total harmonic distortion	$P_o = 1 \text{ W}$	-	0.05	-	%
$G_V$	Closed-loop gain	GAIN < 0.25*VDD		23.8		dB
		0.25*VDD < GAIN < 0.5*VDD		29.8		
		0.5*VDD < GAIN < 0.75*VDD		33.3		
		GAIN > 0.75*VDD		35.8		
$\Delta G_V$	Gain matching	-	-1	-	1	dB
$C_T$	Crosstalk	$f = 1 \text{ kHz}$ , $P_o = 1 \text{ W}$	50	60	-	dB
$V_n$	Total output noise	Inputs shorted and to ground, A Curve		231		$\mu\text{V}$
		Inputs shorted and to ground, $f = 20 \text{ Hz}$ to $20 \text{ kHz}$		400		
SVRR	Supply voltage rejection ratio	$f_r = 100 \text{ Hz}$ , $V_r = 0.5 \text{ Vpp}$ , $C_{SVR} = 10 \mu\text{F}$	-	55	-	dB
$T_r$ , $T_f$	Rise and fall times	-	-	35	-	ns
$f_{SW}$	Switching frequency	Internal oscillator	240	310	400	kHz
$f_{SWR}$	Output switching frequency range	With internal oscillator by changing $R_{OSC}^{(1)}$	240	-	-	kHz
$V_{inH}$	Digital input high (H)		2.0	-	-	V
$V_{inL}$	Digital input low (L)		-	-	0.8	
Function mode	Standby & mute & play	STBY < 0.5 V; MUTE = X	Standby			
		STBY > 2.5 V; MUTE < L	Mute			
		STBY > 2.5 V; MUTE > H	Play			
$A_{MUTE}$	Mute attenuation	$V_{MUTE} < L$ , $V_{STBY} = H$	-	75	-	dB

1.  $f_{SW} = 10^6 / ((16 * R_{OSC} + 182) * 4) \text{ kHz}$ ,  $f_{SYNCLK} = 2 * f_{SW}$  with  $R3 = 39 \text{ k}\Omega$  (see Figure 3. Test circuit stereo application and mono BTL mode).

3.5 Test circuit

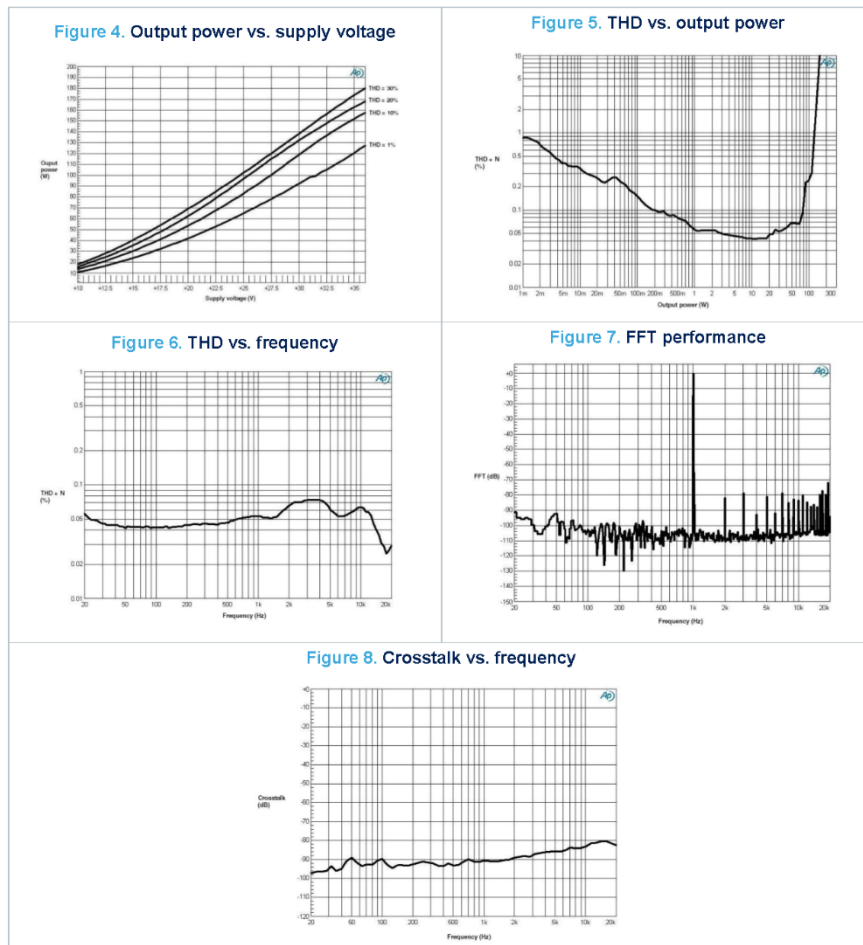
Figure 3. Test circuit stereo application and mono BTL mode



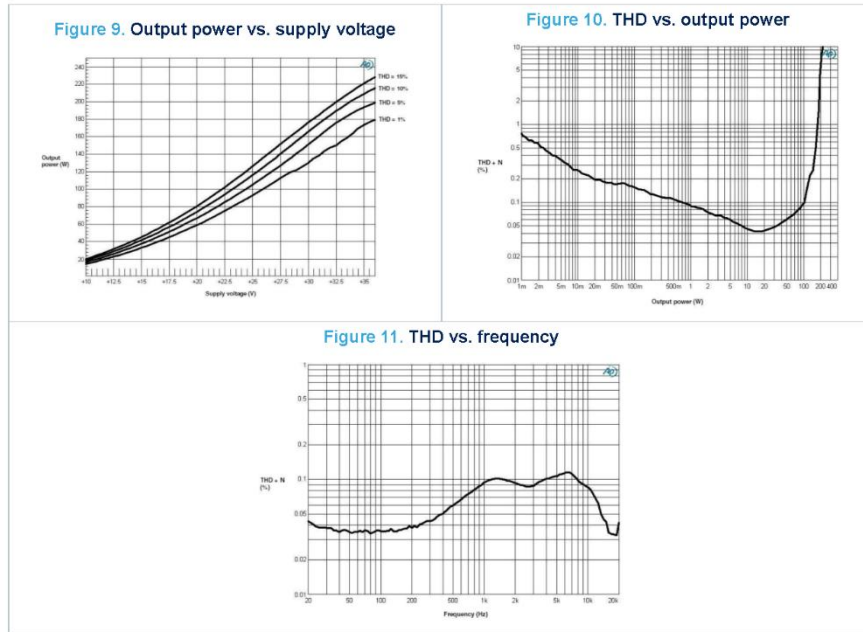
## 4 Characterization curves

Unless otherwise stated the measurements were made under the following conditions:  
 $V_{CC} = 36\text{ V}$ ,  $f = 1\text{ kHz}$ ,  $G_V = 23.6\text{ dB}$ ,  $R_{OSC} = 39\text{ k}\Omega$ ,  $C_{OSC} = 100\text{ nF}$ ,  $T_{amb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$

### 4.1 For $R_L = 4\ \Omega$ , stereo configuration



#### 4.2 For $R_L = 3 \Omega$ , mono BTL configuration



## 5 Application information

### 5.1 Stereo and mono BTL operation selection using the MODE pin

The TDA7498E can be used in stereo applications or mono BTL applications. Connecting the MODE pin to the VDDS pin configures the device in mono BTL. The output of the two channels can be paralleled. When the MODE pin is connected to ground or floating (pulled down internally) the device works as a stereo amplifier.

### 5.2 Gain setting

The gain of the TDA7498E is set by GAIN (pin 30).

Table 6. Gain settings

GAIN	Total gain	Application recommendation
$VGAIN < 0.25 \cdot VDDS$	23.6 dB	GAIN pin connected to SGND
$0.25 \cdot VDDS < VGAIN < 0.5 \cdot VDDS$	29.6 dB	$Rc10 = Rc11 = Rc12 = 100 \text{ K max}$
$0.5 \cdot VDDS < VGAIN < 0.75 \cdot VDDS$	33.1 dB	$Rc10 = Rc11 = Rc12 = 100 \text{ K max}$
$VGAIN > 0.75 \cdot VDDS$	35.6 dB	GAIN pin connected to VDDS

### 5.3 Smart protection

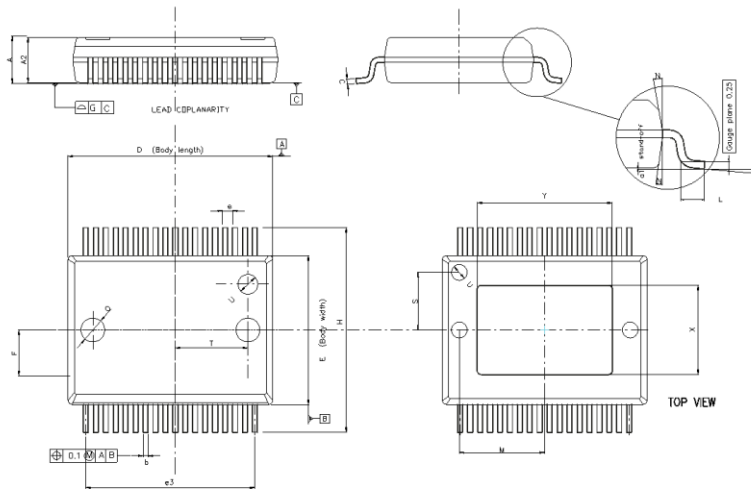
The TDA7498E embeds an overcurrent protection circuitry to protect the device from unwanted current peaks. If the overcurrent protection threshold (Table 5. Electrical specifications) is exceeded, the power stage will be shut down immediately. The device will recover automatically once the fault is removed.

## 6 Package information

In order to meet environmental requirements, ST offers these devices in different grades of **ECOPACK** packages, depending on their level of environmental compliance. ECOPACK specifications, grade definitions and product status are available at: [www.st.com](http://www.st.com). ECOPACK is an ST trademark.

### 6.1 PowerSSO-36 EPU package information

Figure 12. PowerSSO-36 EPU package outline



**Table 7. PowerSSO-36 EPU package mechanical data**

Symbol	mm			inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A	2.15	-	2.45	0.085	-	0.096
A2	2.15	-	2.35	0.085	-	0.093
a1	0	-	0.10	0	-	0.004
b	0.18	-	0.36	0.007	-	0.014
c	0.23	-	0.32	0.009	-	0.013
D	10.10	-	10.50	0.398	-	0.413
E	7.40	-	7.60	0.291	-	0.299
e	-	0.5	-	-	0.020	-
e3	-	8.5	-	-	0.335	-
F	-	2.3	-	-	0.091	-
G	-	-	0.10	-	-	0.004
H	10.10	-	10.50	0.398	-	0.413
h	-	-	0.40	-	-	0.016
k	0	-	8 degrees	0	-	8 degrees
L	0.55	-	0.85	0.022	-	0.033
M	-	4.30	-	-	0.169	-
N	-	-	10 degrees	-	-	10 degrees
O	-	1.20	-	-	0.047	-
Q	-	0.80	-	-	0.031	-
S	-	2.90	-	-	0.114	-
T	-	3.65	-	-	0.144	-
U	-	1.00	-	-	0.039	-
X	4.10	-	4.70	0.161	-	0.185
Y	6.50	-	7.10	0.193	-	0.280

## Revision history

Table 8. Document revision history

Date	Revision	Changes
12-Dec-2011	1	Initial release.
16-Jun-2015	2	Updated $V_{CC}$ in Table 3: "Absolute maximum ratings" , updated Section 6.3: "Smart protection", and updated dimension L in Table 8: "PowerSSO-36 EPU package mechanical data".
10-Dec-2018	3	Updated device summary on the cover page.
25-Jun-2020	4	Updated Figure 12 and Y min. value in Table 7

## Contents

<b>1</b>	<b>Device block diagram</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Pin description</b> .....	<b>3</b>
2.1	Pinout .....	3
2.2	Pin list .....	4
<b>3</b>	<b>Electrical specifications</b> .....	<b>5</b>
3.1	Absolute maximum ratings.....	5
3.2	Thermal data .....	5
3.3	Recommended operating conditions .....	5
3.4	Electrical specifications .....	5
3.5	Test circuit .....	7
<b>4</b>	<b>Characterization curves</b> .....	<b>8</b>
4.1	For $R_L = 4 \Omega$ , stereo configuration .....	8
4.2	For $R_L = 3 \Omega$ , mono BTL configuration .....	9
<b>5</b>	<b>Application information</b> .....	<b>10</b>
5.1	Stereo and mono BTL operation selection using the MODE pin .....	10
5.2	Gain setting .....	10
5.3	Smart protection .....	10
<b>6</b>	<b>Package information</b> .....	<b>11</b>
6.1	PowerSSO-36 EPU package information.....	11
	<b>Revision history</b> .....	<b>13</b>
	<b>Contents</b> .....	<b>14</b>
	<b>List of tables</b> .....	<b>15</b>
	<b>List of figures</b> .....	<b>16</b>



## List of tables

Table 1.	Pin description list . . . . .	4
Table 2.	Absolute maximum ratings . . . . .	5
Table 3.	Thermal data . . . . .	5
Table 4.	Recommended operating conditions . . . . .	5
Table 5.	Electrical specifications . . . . .	5
Table 6.	Gain settings . . . . .	10
Table 7.	PowerSSO-36 EPU package mechanical data . . . . .	12
Table 8.	Document revision history . . . . .	13



## List of figures

Figure 1.	Internal block diagram (showing one channel only)	2
Figure 2.	Pin connections (top view, PCB view)	3
Figure 3.	Test circuit stereo application and mono BTL mode	7
Figure 4.	Output power vs. supply voltage	8
Figure 5.	THD vs. output power	8
Figure 6.	THD vs. frequency	8
Figure 7.	FFT performance	8
Figure 8.	Crosstalk vs. frequency	8
Figure 9.	Output power vs. supply voltage	9
Figure 10.	THD vs. output power	9
Figure 11.	THD vs. frequency	9
Figure 12.	PowerSSO-36 EPU package outline	11

**IMPORTANT NOTICE – PLEASE READ CAREFULLY**

STMicroelectronics NV and its subsidiaries ("ST") reserve the right to make changes, corrections, enhancements, modifications, and improvements to ST products and/or to this document at any time without notice. Purchasers should obtain the latest relevant information on ST products before placing orders. ST products are sold pursuant to ST's terms and conditions of sale in place at the time of order acknowledgement.

Purchasers are solely responsible for the choice, selection, and use of ST products and ST assumes no liability for application assistance or the design of Purchasers' products.

No license, express or implied, to any intellectual property right is granted by ST herein.

Resale of ST products with provisions different from the information set forth herein shall void any warranty granted by ST for such product.

ST and the ST logo are trademarks of ST. For additional information about ST trademarks, please refer to [www.st.com/trademarks](http://www.st.com/trademarks). All other product or service names are the property of their respective owners.

Information in this document supersedes and replaces information previously supplied in any prior versions of this document.

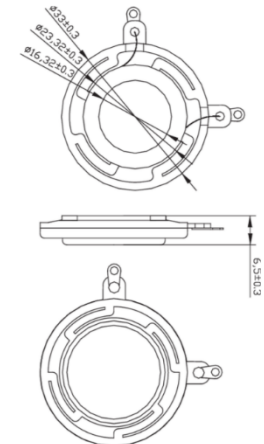
© 2020 STMicroelectronics – All rights reserved

**Anexo 4.** Ficha técnica del actuador vibrotáctil DAEX19SL-4 Slimline Coin Type 19 mm Exciter 4[W] 4[Ω].



DAEX19SL 4 Slimline Coin Type 19mm Exciter 4W 4 Ohm

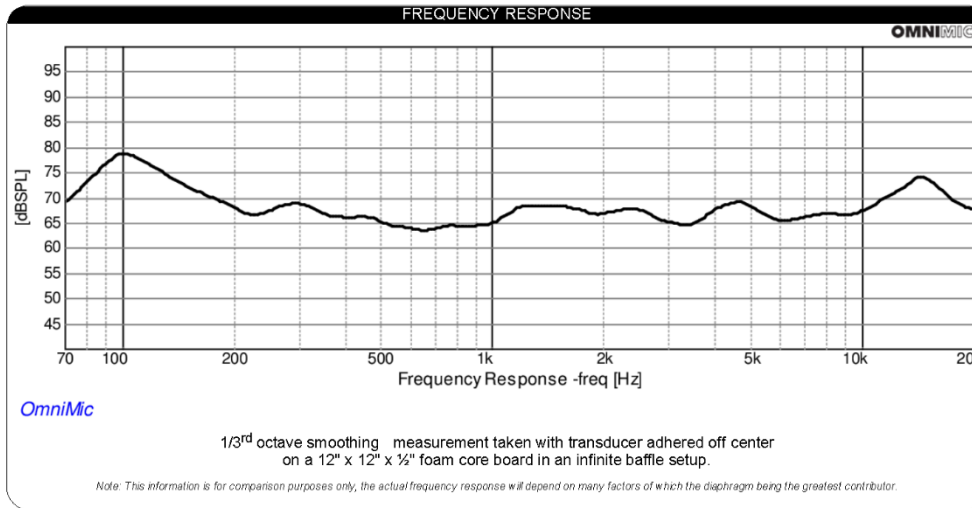
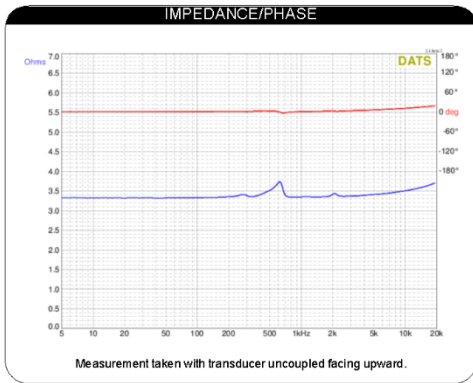
DAEX19SL 4



PARAMETERS	
Impedance	4 ohms
Re	2.94 ohms
Le	0.01 mH
Fs	630 Hz
Qms	N/A
Qes	N/A
Qts	N/A
Mms	N/A
Cms	N/A
Sd	N/A
Vd	N/A
BL	N/A
Vas	N/A
Xmax	N/A
VC Diameter	19 mm
SPL	N/A
RMS Power Handling	4 watts
Usable Frequency Range (Hz)	N/A

- FEATURES**
- Only 1.3" diameter by 0.26" high, can be installed almost anywhere
  - Dual suspension for linear operation and lower distortion
  - 4 ohms impedance for use with small, Class D amplifiers
  - Pre applied 3M™ VHB™ adhesive for quick, durable installation

- APPLICATIONS**
- Invisible home theater and multi room audio
  - Electronic gaming machines
  - Advertising signage
  - Point of purchase displays
  - Multimedia exhibits
  - Commercial distributed audio
  - Kiosks
  - Automotive audio
  - Bathroom tubs and showers



**Anexo 5.** Ingeniería de programación basada en la placa ESP8266 para interactuar con el sensor acelerómetro ADXL345.

```
Proto_Programming_ADXL345.ino
1 // Universidad Tecnológica Indoamérica
2 // Facultad de Ingeniería, Industria y Producción: FAINPRO
3 // Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial
4 // Ingeniería de Programación para la Caracterización de Actuadores Vibrotáctiles, leyendo su aceleración:
5 // Implementación del Sensor Acelerómetro de tres ejes: ADXL345 & el Módulo NodeMcu v3 Lua WiFi ESP8266.
6 // Tutor: PhD. Ms. Byron Paúl Remache Vinuesa Ing. Mecánico Industrial.
7 // Alumno: José Roland Castillo Montoya.
8
9 #include <Wire.h>
10 #include <Adafruit_Sensor.h>
11 #include <Adafruit_ADXL345_U.h>
12
13
14 Adafruit_ADXL345_Unified acceler = Adafruit_ADXL345_Unified ();
15
16
17 void setup() {
18   Serial.begin(9600);
19   if(!acceler.begin()){
20     Serial.println("El Sensor Acelermetro ADXL 345, no ha inicializado");
21     while(1);
22   }
23 }
24
25 void loop() {
26   sensors_event_t event;
27   acceler.getEvent (&event);
28   Serial.print("[g]X-Axis = "); Serial.print(event.acceleration.x); Serial.print(" ");
29   Serial.print("[g]Y-Axis = "); Serial.print(event.acceleration.y); Serial.print(" ");
30   Serial.print("[g]Z-Axis = "); Serial.print(event.acceleration.z); Serial.print(" ");
31   Serial.println("m/s^2");
32   delay(500);
33 }
34 }
```

*Nota. Elaborado por el investigador. Laboratorio de Manufactura UTI – FAINPRO (marzo 2024).*

---

# HD44780U (LCD-II)

(Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver)

# HITACHI

ADE-207-272(Z)

'99.9

Rev. 0.0

---

## Description

The HD44780U dot-matrix liquid crystal display controller and driver LSI displays alphanumerics, Japanese kana characters, and symbols. It can be configured to drive a dot-matrix liquid crystal display under the control of a 4- or 8-bit microprocessor. Since all the functions such as display RAM, character generator, and liquid crystal driver, required for driving a dot-matrix liquid crystal display are internally provided on one chip, a minimal system can be interfaced with this controller/driver.

A single HD44780U can display up to one 8-character line or two 8-character lines.

The HD44780U has pin function compatibility with the HD44780S which allows the user to easily replace an LCD-II with an HD44780U. The HD44780U character generator ROM is extended to generate 208  $5 \times 8$  dot character fonts and 32  $5 \times 10$  dot character fonts for a total of 240 different character fonts.

The low power supply (2.7V to 5.5V) of the HD44780U is suitable for any portable battery-driven product requiring low power dissipation.

## Features

- $5 \times 8$  and  $5 \times 10$  dot matrix possible
- Low power operation support:
  - 2.7 to 5.5V
- Wide range of liquid crystal display driver power
  - 3.0 to 11V
- Liquid crystal drive waveform
  - A (One line frequency AC waveform)
- Correspond to high speed MPU bus interface
  - 2 MHz (when  $V_{CC} = 5V$ )
- 4-bit or 8-bit MPU interface enabled
- $80 \times 8$ -bit display RAM (80 characters max.)
- 9,920-bit character generator ROM for a total of 240 character fonts
  - 208 character fonts ( $5 \times 8$  dot)
  - 32 character fonts ( $5 \times 10$  dot)

HITACHI

1

---

## HD44780U

---

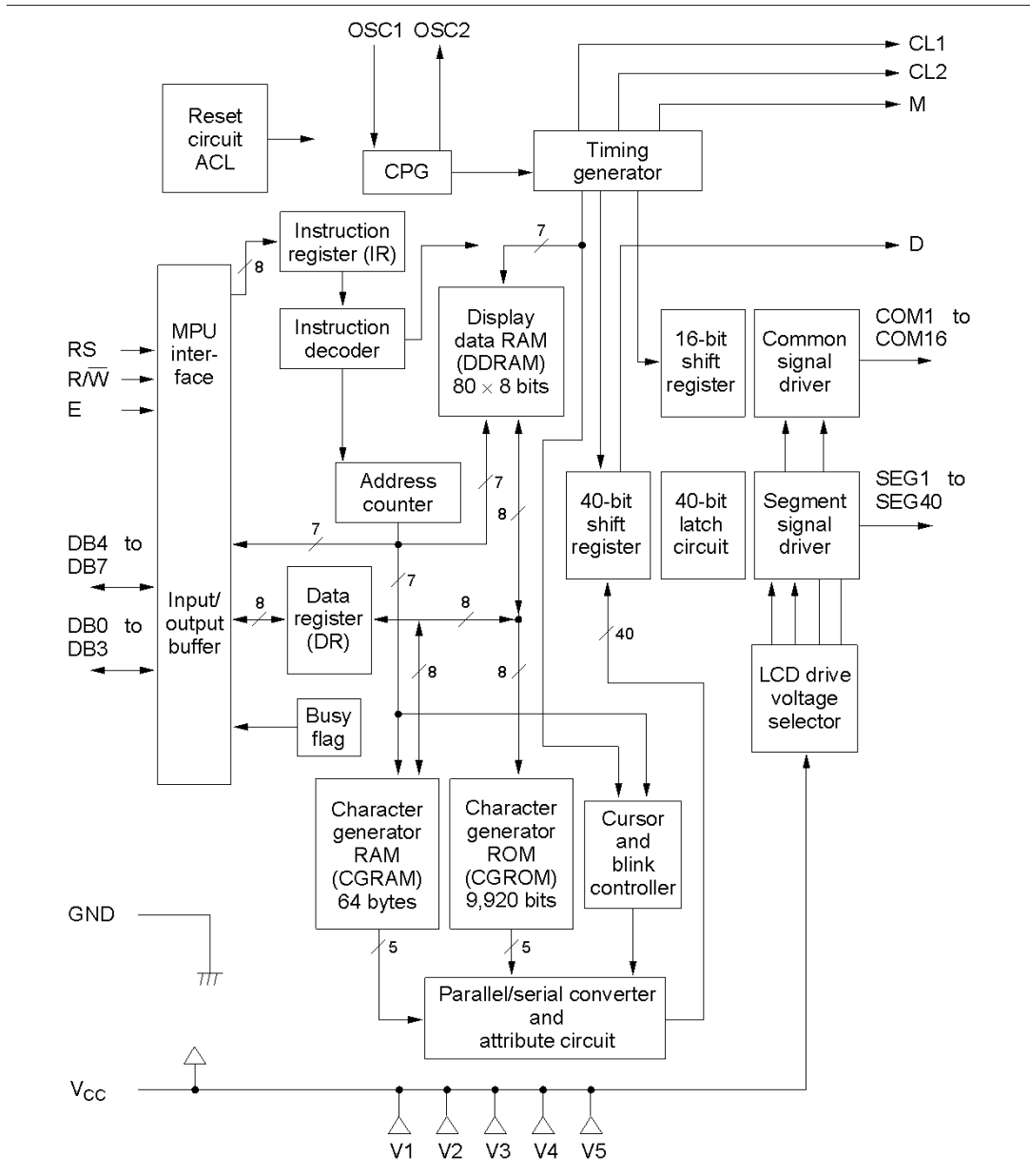
- 64 × 8-bit character generator RAM
  - 8 character fonts (5 × 8 dot)
  - 4 character fonts (5 × 10 dot)
- 16-common × 40-segment liquid crystal display driver
- Programmable duty cycles
  - 1/8 for one line of 5 × 8 dots with cursor
  - 1/11 for one line of 5 × 10 dots with cursor
  - 1/16 for two lines of 5 × 8 dots with cursor
- Wide range of instruction functions:
  - Display clear, cursor home, display on/off, cursor on/off, display character blink, cursor shift, display shift
- Pin function compatibility with HD44780S
- Automatic reset circuit that initializes the controller/driver after power on
- Internal oscillator with external resistors
- Low power consumption

### Ordering Information

Type No.	Package	CGROM
HD44780UA00FS	FP-80B	Japanese standard font
HCD44780UA00	Chip	
HD44780UA00TF	TFP-80F	
HD44780UA02FS	FP-80B	European standard font
HCD44780UA02	Chip	
HD44780UA02TF	TFP-80F	
HD44780UBxxFS	FP-80B	Custom font
HCD44780UBxx	Chip	
HD44780UBxxTF	TFP-80F	

Note: xx: ROM code No.

HD44780U Block Diagram





## HD44780U

**Table 11 8-Bit Operation, 8-Digit × 1-Line Display Example with Internal Reset**

Step No.	Instruction										Display	Operation
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0		
1	Power supply on (the HD44780U is initialized by the internal reset circuit)										<input type="text"/>	Initialized. No display.
2	0	0	0	0	1	1	0	0	*	*	<input type="text"/>	Sets to 8-bit operation and selects 1-line display and 5 × 8 dot character font. (Number of display lines and character fonts cannot be changed after step #2.)
3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	<input type="text" value="-"/>	Turns on display and cursor. Entire display is in space mode because of initialization.
4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	<input type="text" value="-"/>	Sets mode to increment the address by one and to shift the cursor to the right at the time of write to the DD/CGRAM. Display is not shifted.
5	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	<input type="text" value="H_"/>	Writes H. DDRAM has already been selected by initialization when the power was turned on. The cursor is incremented by one and shifted to the right.
6	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	<input type="text" value="HI_"/>	Writes I.
7											<input type="text"/>	
8	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	<input type="text" value="HITACHI_"/>	Writes I.
9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	<input type="text" value="HITACHI_"/>	Sets mode to shift display at the time of write.
10	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	<input type="text" value="ITACHI _"/>	Writes a space.

Table 11 8-Bit Operation, 8-Digit × 1-Line Display Example with Internal Reset (cont)

Step No.	Instruction										Display	Operation
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0		
11	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	TACHI M_	Writes M.
12											.	.
											.	.
											.	.
											.	.
13	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	MICROKO_	Writes O.
14	0	0	0	0	0	1	0	0	*	*	MICROK <u>O</u>	Shifts only the cursor position to the left.
15	0	0	0	0	0	1	0	0	*	*	MICRO <u>K</u> O	Shifts only the cursor position to the left.
16	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	ICROCO_	Writes C over K. The display moves to the left.
17	0	0	0	0	0	1	1	1	*	*	MICROCO <u>Q</u>	Shifts the display and cursor position to the right.
18	0	0	0	0	0	1	0	1	*	*	MICROCO <u>Q</u>	Shifts the display and cursor position to the right.
19	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	ICROCOM_	Writes M.
20											.	.
											.	.
											.	.
											.	.
21	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	HITACHI	Returns both display and cursor to the original position (address 0).

## HD44780U

**Table 12 4-Bit Operation, 8-Digit × 1-Line Display Example with Internal Reset**

Step No.	Instruction						Display	Operation
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4		
1	Power supply on (the HD44780U is initialized by the internal reset circuit)						<input type="text"/>	Initialized. No display.
2	Function set 0 0 0 0 1 0						<input type="text"/>	Sets to 4-bit operation. In this case, operation is handled as 8 bits by initialization, and only this instruction completes with one write.
3	Function set 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 * *						<input type="text"/>	Sets 4-bit operation and selects 1-line display and 5 × 8 dot character font. 4-bit operation starts from this step and resetting is necessary. (Number of display lines and character fonts cannot be changed after step #3.)
4	Display on/off control 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0						<input type="text" value="-"/>	Turns on display and cursor. Entire display is in space mode because of initialization.
5	Entry mode set 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0						<input type="text" value="-"/>	Sets mode to increment the address by one and to shift the cursor to the right at the time of write to the DD/CGRAM. Display is not shifted.
6	Write data to CGRAM/DDRAM 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0						<input type="text" value="H_"/>	Writes H. The cursor is incremented by one and shifts to the right.

Note: The control is the same as for 8-bit operation beyond step #6.

**Table 13 8-Bit Operation, 8-Digit × 2-Line Display Example with Internal Reset**

Step		Instruction										Display	Operation
No.	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0			
1													Initialized. No display.
2									*	*			Sets to 8-bit operation and selects 2-line display and 5 × 8 dot character font.
3													Turns on display and cursor. All display is in space mode because of initialization.
4													Sets mode to increment the address by one and to shift the cursor to the right at the time of write to the DD/CGRAM. Display is not shifted.
5													Writes H. DDRAM has already been selected by initialization when the power was turned on. The cursor is incremented by one and shifted to the right.
6													
7													Writes I.
8													Sets DDRAM address so that the cursor is positioned at the head of the second line.

# HD44780U

**Table 13 8-Bit Operation, 8-Digit × 2-Line Display Example with Internal Reset (cont)**

Step No.	Instruction										Display	Operation
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0		
9	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	HITACHI M_	Writes M.
10											· · · ·	
11	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	HITACHI MICROCO_	Writes O.
12	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	HITACHI MICROCO_	Sets mode to shift display at the time of write.
13	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	ITACHI ICROCOM_	Writes M. Display is shifted to the left. The first and second lines both shift at the same time.
14											· · · ·	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	HITACHI MICROCOM	Returns both display and cursor to the original position (address 0).

### Initializing by Instruction

If the power supply conditions for correctly operating the internal reset circuit are not met, initialization by instructions becomes necessary.

Refer to Figures 23 and 24 for the procedures on 8-bit and 4-bit initializations, respectively.

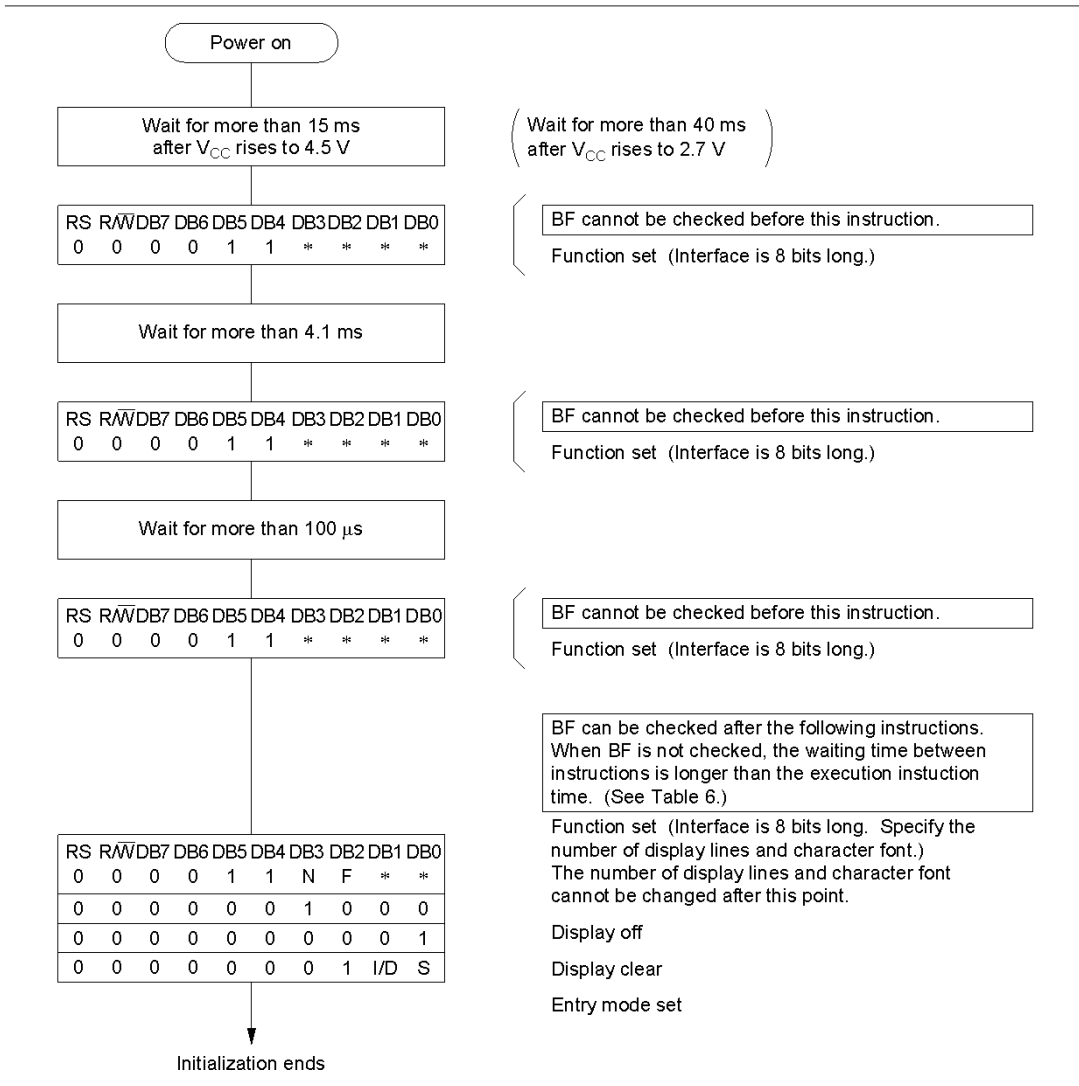


Figure 23 8-Bit Interface

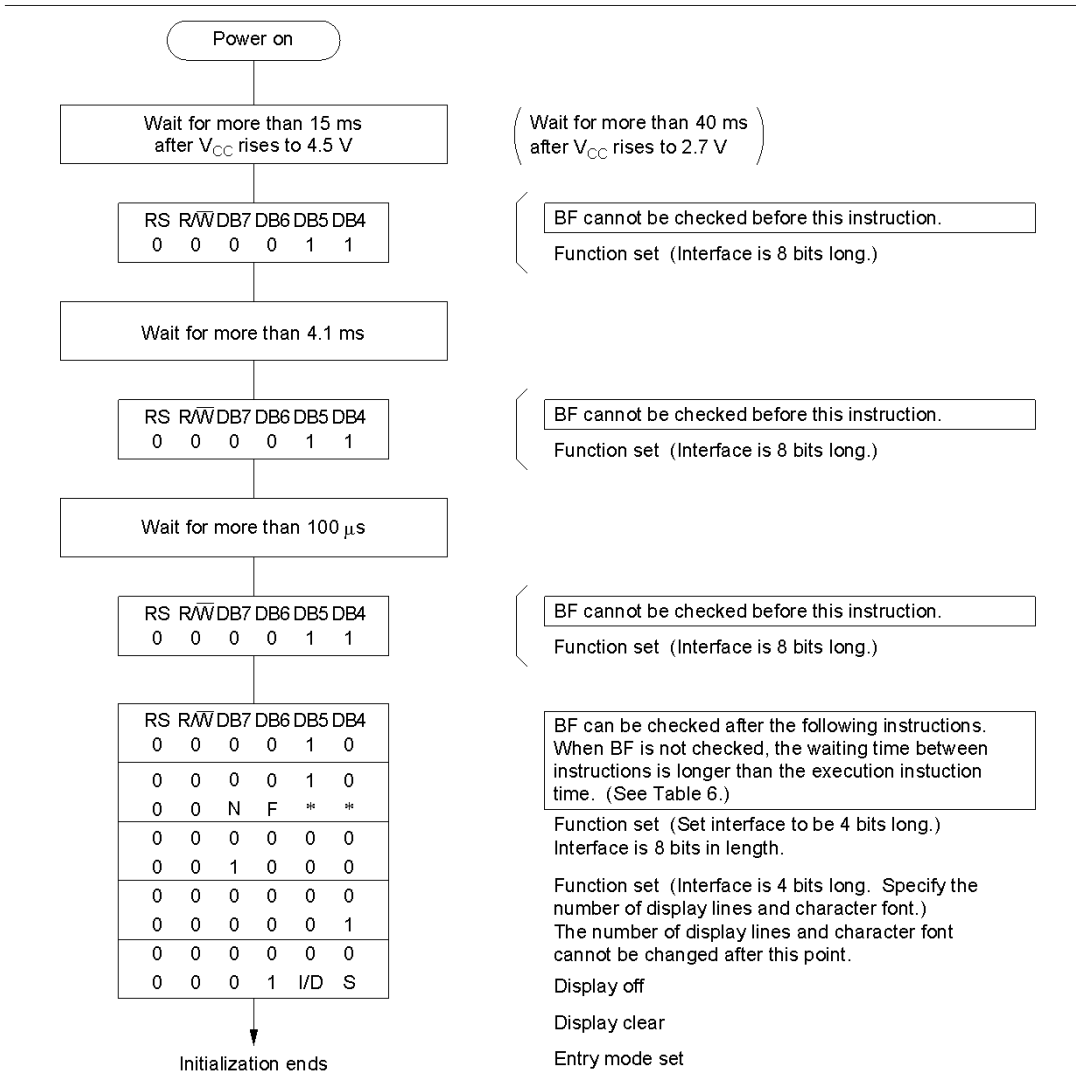


Figure 24 4-Bit Interface

**Absolute Maximum Ratings\***

Item	Symbol	Value	Unit	Notes
Power supply voltage (1)	$V_{CC-GND}$	-0.3 to +7.0	V	1
Power supply voltage (2)	$V_{CC-V5}$	-0.3 to +13.0	V	1, 2
Input voltage	$V_t$	-0.3 to $V_{CC} + 0.3$	V	1
Operating temperature	$T_{opr}$	-30 to +75	°C	
Storage temperature	$T_{stg}$	-55 to +125	°C	4

Note: \* If the LSI is used above these absolute maximum ratings, it may become permanently damaged. Using the LSI within the following electrical characteristic limits is strongly recommended for normal operation. If these electrical characteristic conditions are also exceeded, the LSI will malfunction and cause poor reliability.

## HD44780U

### DC Characteristics ( $V_{CC} = 2.7$ to $4.5$ V, $T_a = -30$ to $+75^\circ\text{C}^{*3}$ )

Item	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Test Condition	Notes*
Input high voltage (1) (except OSC1)	VIH1	$0.7V_{CC}$	—	$V_{CC}$	V		6
Input low voltage (1) (except OSC1)	VIL1	-0.3	—	0.55	V		6
Input high voltage (2) (OSC1)	VIH2	$0.7V_{CC}$	—	$V_{CC}$	V		15
Input low voltage (2) (OSC1)	VIL2	—	—	$0.2V_{CC}$	V		15
Output high voltage (1) (DB0–DB7)	VOH1	$0.75V_{CC}$	—	—	V	$-I_{OH} = 0.1$ mA	7
Output low voltage (1) (DB0–DB7)	VOL1	—	—	$0.2V_{CC}$	V	$I_{OL} = 0.1$ mA	7
Output high voltage (2) (except DB0–DB7)	VOH2	$0.8V_{CC}$	—	—	V	$-I_{OH} = 0.04$ mA	8
Output low voltage (2) (except DB0–DB7)	VOL2	—	—	$0.2V_{CC}$	V	$I_{OL} = 0.04$ mA	8
Driver on resistance (COM)	$R_{COM}$	—	2	20	k $\Omega$	$\pm I_d = 0.05$ mA, VLCD = 4 V	13
Driver on resistance (SEG)	$R_{SEG}$	—	2	30	k $\Omega$	$\pm I_d = 0.05$ mA, VLCD = 4 V	13
Input leakage current	$I_{LI}$	-1	—	1	$\mu\text{A}$	VIN = 0 to $V_{CC}$	9
Pull-up MOS current (DB0–DB7, RS, R/W)	$-I_p$	10	50	120	$\mu\text{A}$	$V_{CC} = 3$ V	
Power supply current	$I_{CC}$	—	150	300	$\mu\text{A}$	R, oscillation, external clock $V_{CC} = 3$ V, $f_{OSC} = 270$ kHz	10, 14
LCD voltage	VLCD1	3.0	—	11.0	V	$V_{CC} - V_5$ , 1/5 bias	16
	VLCD2	3.0	—	11.0	V	$V_{CC} - V_5$ , 1/4 bias	16

Note: \* Refer to the Electrical Characteristics Notes section following these tables.

**AC Characteristics ( $V_{CC} = 2.7$  to  $4.5$  V,  $T_a = -30$  to  $+75^\circ\text{C}^{*3}$ )**
**Clock Characteristics**

Item		Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Test Condition	Note*
External clock operation	External clock frequency	$f_{cp}$	125	250	350	kHz		11
	External clock duty	Duty	45	50	55	%		
	External clock rise time	$t_{rcp}$	—	—	0.2	$\mu\text{s}$		
	External clock fall time	$t_{fcp}$	—	—	0.2	$\mu\text{s}$		
$R_f$ oscillation	Clock oscillation frequency	$f_{OSC}$	190	270	350	kHz	$R_f = 75 \text{ k}\Omega$ , $V_{CC} = 3 \text{ V}$	12

Note: \* Refer to the Electrical Characteristics Notes section following these tables.

**Bus Timing Characteristics**
**Write Operation**

Item	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Test Condition
Enable cycle time	$t_{cycE}$	1000	—	—	ns	Figure 25
Enable pulse width (high level)	$PW_{EH}$	450	—	—		
Enable rise/fall time	$t_{Er}$ $t_{Ef}$	—	—	25		
Address set-up time (RS, R/W to E)	$t_{AS}$	60	—	—		
Address hold time	$t_{AH}$	20	—	—		
Data set-up time	$t_{DSW}$	195	—	—		
Data hold time	$t_H$	10	—	—		

**Read Operation**

Item	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Test Condition
Enable cycle time	$t_{cycE}$	1000	—	—	ns	Figure 26
Enable pulse width (high level)	$PW_{EH}$	450	—	—		
Enable rise/fall time	$t_{Er}$ $t_{Ef}$	—	—	25		
Address set-up time (RS, R/W to E)	$t_{AS}$	60	—	—		
Address hold time	$t_{AH}$	20	—	—		
Data delay time	$t_{DDR}$	—	—	360		
Data hold time	$t_{DHR}$	5	—	—		

---

## HD44780U

---

### Interface Timing Characteristics with External Driver

Item		Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Test Condition
Clock pulse width	High level	$t_{CWH}$	800	—	—	ns	Figure 27
	Low level	$t_{CWL}$	800	—	—		
Clock set-up time		$t_{CSU}$	500	—	—		
Data set-up time		$t_{SU}$	300	—	—		
Data hold time		$t_{DH}$	300	—	—		
M delay time		$t_{DM}$	-1000	—	1000		
Clock rise/fall time		$t_{dt}$	—	—	200		

### Power Supply Conditions Using Internal Reset Circuit

Item		Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Test Condition
Power supply rise time		$t_{PCC}$	0.1	—	10	ms	Figure 28
Power supply off time		$t_{OFF}$	1	—	—		

Timing Characteristics

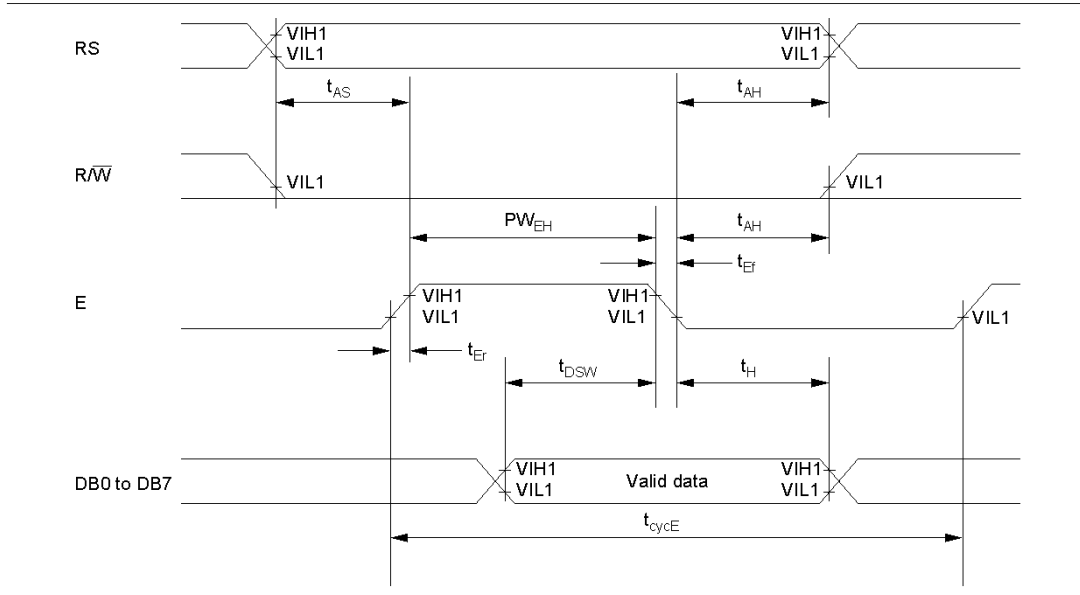
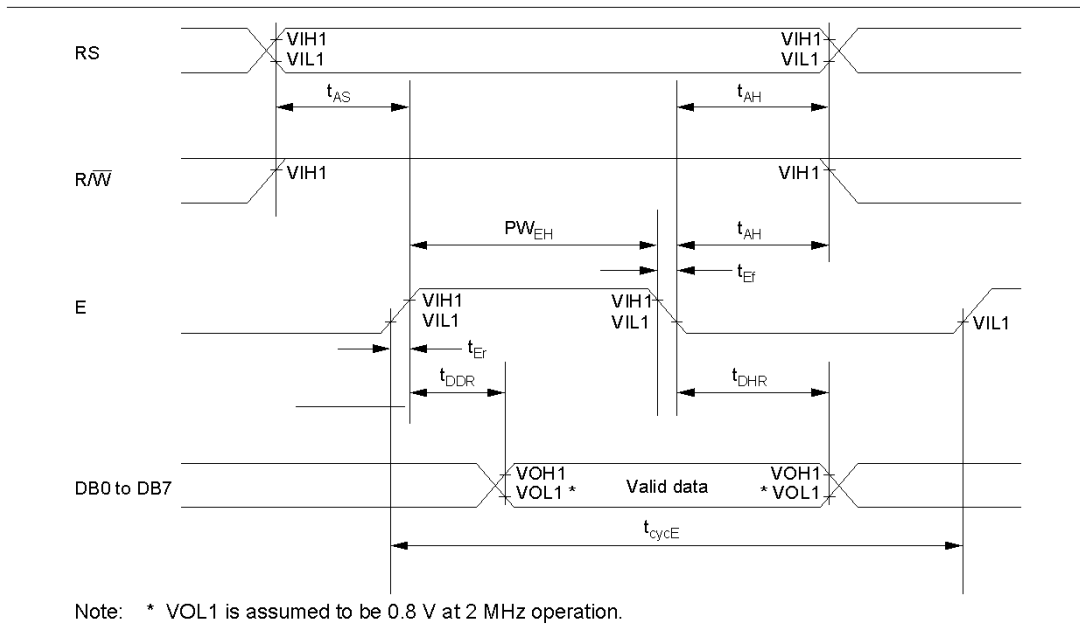


Figure 25 Write Operation



Note: \* VOL1 is assumed to be 0.8 V at 2 MHz operation.

Figure 26 Read Operation

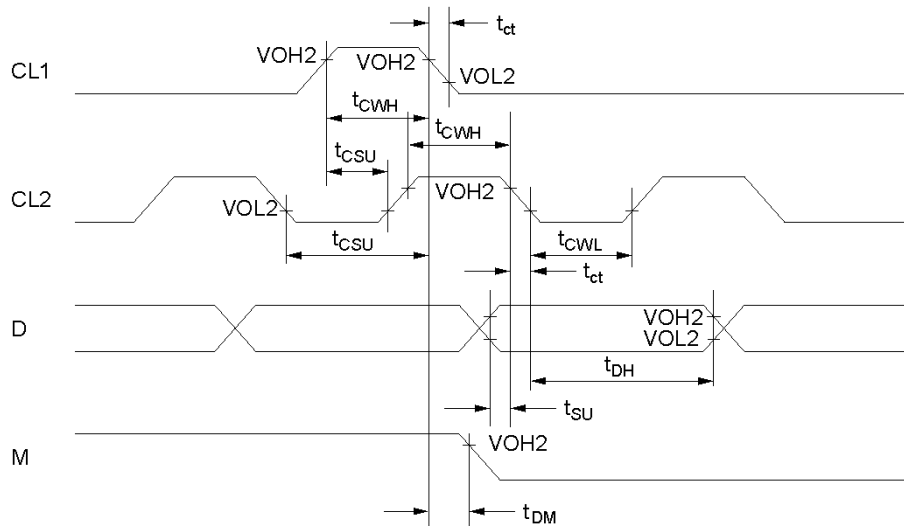
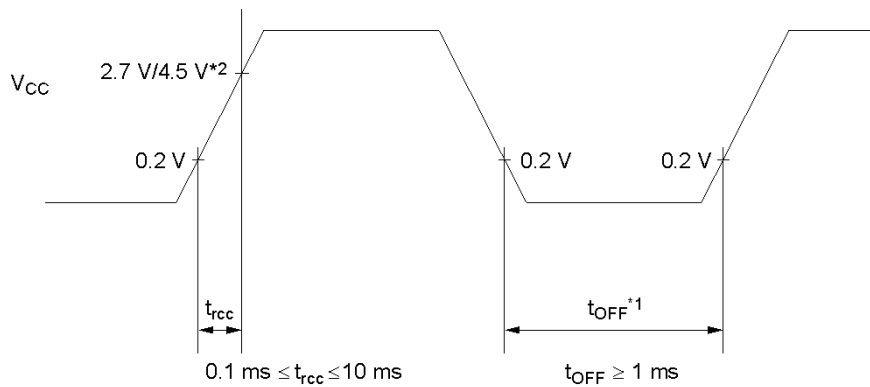


Figure 27 Interface Timing with External Driver



- Notes:
1. t<sub>OFF</sub> compensates for the power oscillation period caused by momentary power supply oscillations.
  2. Specified at 4.5 V for 5-V operation, and at 2.7 V for 3-V operation.
  3. For if 4.5 V is not reached during 5-V operation, the internal reset circuit will not operate normally.  
In this case, the LSI must be initialized by software. (Refer to the Initializing by Instruction section.)

Figure 28 Internal Power Supply Reset

**Cautions**

1. Hitachi neither warrants nor grants licenses of any rights of Hitachi's or any third party's patent, copyright, trademark, or other intellectual property rights for information contained in this document. Hitachi bears no responsibility for problems that may arise with third party's rights, including intellectual property rights, in connection with use of the information contained in this document.
2. Products and product specifications may be subject to change without notice. Confirm that you have received the latest product standards or specifications before final design, purchase or use.
3. Hitachi makes every attempt to ensure that its products are of high quality and reliability. However, contact Hitachi's sales office before using the product in an application that demands especially high quality and reliability or where its failure or malfunction may directly threaten human life or cause risk of bodily injury, such as aerospace, aeronautics, nuclear power, combustion control, transportation, traffic, safety equipment or medical equipment for life support.
4. Design your application so that the product is used within the ranges guaranteed by Hitachi particularly for maximum rating, operating supply voltage range, heat radiation characteristics, installation conditions and other characteristics. Hitachi bears no responsibility for failure or damage when used beyond the guaranteed ranges. Even within the guaranteed ranges, consider normally foreseeable failure rates or failure modes in semiconductor devices and employ systemic measures such as fail-safes, so that the equipment incorporating Hitachi product does not cause bodily injury, fire or other consequential damage due to operation of the Hitachi product.
5. This product is not designed to be radiation resistant.
6. No one is permitted to reproduce or duplicate, in any form, the whole or part of this document without written approval from Hitachi.
7. Contact Hitachi's sales office for any questions regarding this document or Hitachi semiconductor products.

---

---

**HITACHI****Hitachi, Ltd.**

Semiconductor & Integrated Circuits.  
Nippon Bldg., 2-6-2, Ohte-machi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0004, Japan  
Tel: Tokyo (03) 3270-2111 Fax: (03) 3270-5109

URL    NorthAmerica    : <http://semiconductor.hitachi.com/>  
       Europe            : <http://www.hitachi-eu.com/hel/ecg>  
       Asia (Singapore) : <http://www.has.hitachi.com.sg/grp3/sicd/index.htm>  
       Asia (Taiwan)     : [http://www.hitachi.com.tw/E/Product/SICD\\_Frame.htm](http://www.hitachi.com.tw/E/Product/SICD_Frame.htm)  
       Asia (HongKong)  : <http://www.hitachi.com.hk/eng/bo/grp3/index.htm>  
       Japan             : <http://www.hitachi.co.jp/Sicd/index.htm>

**For further information write to:**

Hitachi Semiconductor  
(America) Inc.  
179 East Tasman Drive,  
San Jose, CA 95134  
Tel: <1> (408) 433-1990  
Fax: <1> (408) 433-0223

Hitachi Europe GmbH  
Electronic components Group  
Dornacher Straße 3  
D-85622 Feldkirchen, Munich  
Germany  
Tel: <49> (89) 9 9180-0  
Fax: <49> (89) 9 29 30 00

Hitachi Europe Ltd.  
Electronic Components Group.  
Whitebrook Park  
Lower Cookham Road  
Maidenhead  
Berkshire SL6 8YA, United Kingdom  
Tel: <44> (1628) 585000  
Fax: <44> (1628) 778322

Hitachi Asia Pte. Ltd.  
16 Collyer Quay #20-00  
Hitachi Tower  
Singapore 049318  
Tel: 535-2100  
Fax: 535-1533

Hitachi Asia Ltd.  
Taipei Branch Office  
3F, Hung Kuo Building, No.167,  
Tun-Hwa North Road, Taipei (105)  
Tel: <886> (2) 2718-3666  
Fax: <886> (2) 2718-8180

Hitachi Asia (Hong Kong) Ltd.  
Group III (Electronic Components)  
7/F., North Tower, World Finance Centre,  
Harbour City, Canton Road, Tsim Sha Tsui,  
Kowloon, Hong Kong  
Tel: <852> (2) 735 9218  
Fax: <852> (2) 730 0281  
Telex: 40815 HITEC HX

Copyright © Hitachi, Ltd., 1998. All rights reserved. Printed in Japan.

*Anexo 7. Código de programación para controlar el ADXL345 y la LCD HD44780 mediante la placa NodeMCUESP8266*

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_ADXL345_U.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <ESP8266WiFi.h>

// Definición de pines para la pantalla LCD
const int rs = 2, en = 14, d4 = 12, d5 = 13, d6 = 15, d7 = 16;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);

// Definición del sensor ADXL345
Adafruit_ADXL345_Unified accel = Adafruit_ADXL345_Unified(12345);
long interval = 3000;
unsigned long prevMillis = 0;

String messages[] = {
  "Universidad Tecnológica Indoamérica.",
  "Facultad de Ingeniería Industria y Producción.",
  "FAINPRO.",
  "Plataforma de Caracterización de actuadores vibrotáctiles.",
  "Alumno investigador: José Castillo Montoya.",
  "Tutor. Ing. Paúl Remache Vinueza PhD."
};
int currentMessageIndex = 0;
```

```

int currentMessageIndex = 0;

void setup()
{
  // Iniciando la pantalla LCD
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.clear();

  // Configuración del acelerómetro
  if (!accel.begin())
  {
    lcd.print("ADXL345 Error!");
    while (1);
  }
  accel.setRange(ADXL345_RANGE_2_G);
  accel.setDataRate(ADXL345_DATARATE_100_HZ);

  // Iniciando conexión serial (opcional para debug)
  Serial.begin(115200);

  // Configurar el modo de sueño profundo del ESP8266 para optimizar el consumo energético
  WiFi.forceSleepBegin();
}

void loop()
{
  unsigned long currentMillis = millis();
  if (currentMillis - prevMillis >= interval)
  {
    prevMillis = currentMillis;
    showNextMessage();
  }
}

void showNextMessage()
{
  lcd.clear();
  String message = messages[currentMessageIndex];

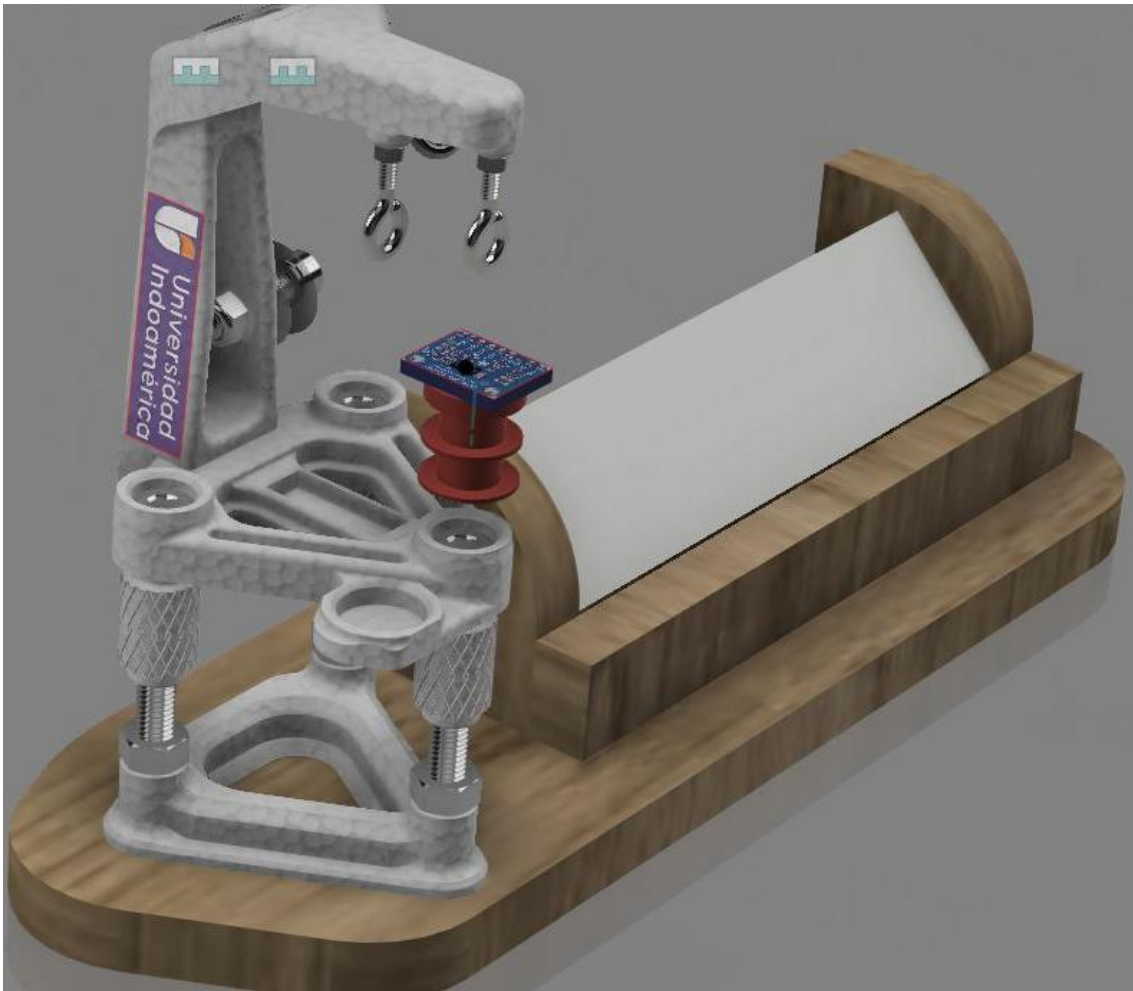
  // Si el mensaje es más largo que la pantalla, desplazarse
  for (int i = 0; i < message.length(); i++) {
    lcd.clear();
    lcd.print(message.substring(i, min(i+16, message.length())));
    delay(300);
  }

  currentMessageIndex++;
  if (currentMessageIndex == sizeof(messages) / sizeof(messages[0])) {
    currentMessageIndex = 0;
  }
}

```

*Nota.* Elaborado por el investigador. Laboratorio de Manufactura UTI – FAINPRO (marzo 2024).

*Anexo 8. Renderizado del diseño del prototipo de la PCV.*





**Tabla 44***Función de cada componente del diseño de la PCAV.*

N.º	Denominación	Cant.	Función	Proceso de fabricación
1	Izador transversal	1	Sujetar y suspender en aire actuador vibrotáctil	Manufactura aditiva
2	Izador conector	1	Sujetar y suspender en aire actuador vibrotáctil	Manufactura aditiva
3	Izador vertebral	1	Sujetar y suspender en aire actuador vibrotáctil	Manufactura aditiva
4	Actuador VCA	1	Artefacto para caracterizar	Estándar
5	Cáncamo de 1/8 [“]	3	Sujetar y suspender en aire actuador vibrotáctil	Estándar
6	Perno cabeza avellanada M4X25	9	Ensamblar base nivelante inferior a estructura integradora	Estándar
15	Acelerómetro ADXL345	1	Censar la aceleración del actuador vibrotáctil	Estándar
16	Perno cabeza avellanada M6X20	2	Ensamblar a los izadores vertebral, conector y transversal	Estándar

18	Base nivelante superior	1	Conectar estructura integradora al izador del actuador vibrotáctil	Manufactura aditiva
19	Estructura integra ingeniería concurrente	1	Albergar a todos los procesos de operación y control de la caracterización	Proceso de manufactura con arranque de viruta
20	Base nivelante inferior	1	Se ensambla a la estructura integradora de ingenierías	Manufactura aditiva
21	Tablero de electrónica	1	Contiene a la placa ESP8266	Estándar
22	Carcasa tablero electrónica frontal	1	Protege al tablero de electrónica	Proceso de manufactura con arranque de viruta
23	Carcasa tablero electrónica posterior	1	Protege al tablero de electrónica	Proceso de manufactura con arranque de viruta
24	Base tablero electrónica	1	Protege al tablero de electrónica	Proceso de manufactura con arranque de viruta

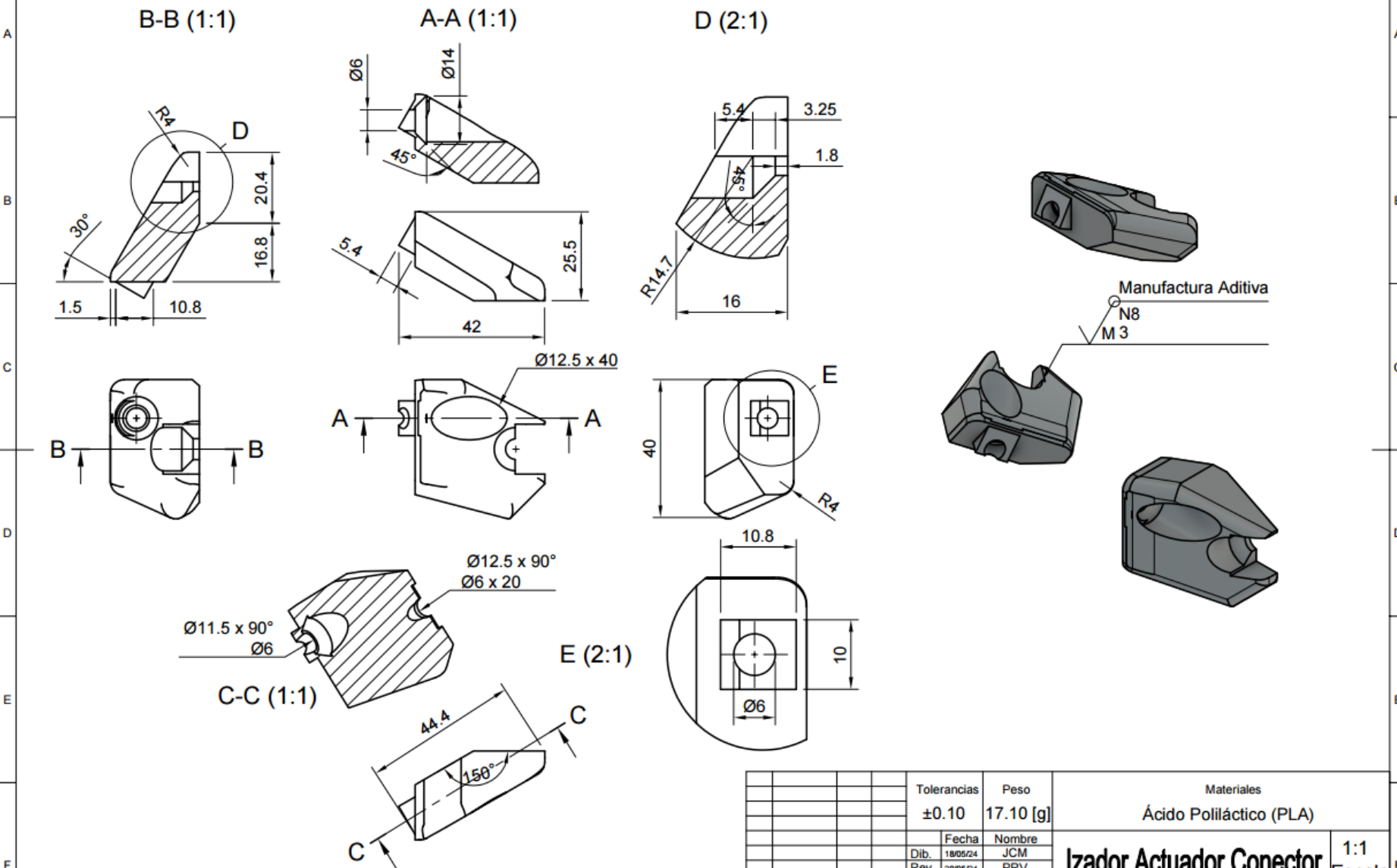
25	Elemento roscado nivelador	6	Nivela el prototipo de caracterización	Manufactura aditiva
28	Perno cabeza Allen M8X75	3	Conecta a la base nivelante superior con la base nivelante inferior	Estándar
29	Tuerca hexagonal M8X1.25	3	Restringe el giro de los pernos M8X75 a modo de contratuerca	Estándar
32	Carrete	1	Contiene y regula el uso de filamento de algodón para suspender en el aire al actuador vibrotáctil	Estándar
33	Perno cabeza Allen M6X1.0	1	Eje de giro del carrete	Estándar
34	Arandela plana Ø 6.0	2	Mantiene al carrete en la posición ideal	Estándar
35	Tuerca de seguridad M6X1.0		Regula el ajuste para que gire con facilidad el carrete	Estándar

---

*Nota.* Desarrollado por el investigador.

**Anexo 10.** Planos de producción mecánicos del prototipo de plataforma para caracterización de actuadores vibrotáctiles.

1 2 3 4 5 6 7 8

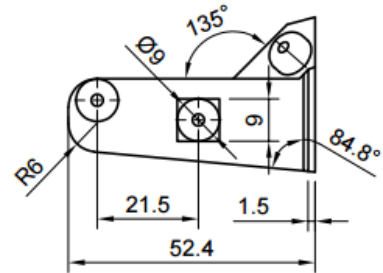


Tolerancias		Peso		Materiales	
±0.10		17.10 [g]		Ácido Poliláctico (PLA)	
Fecha		Nombre		<b>Izador Actuador Conector</b> 1:1 Escala	
Dib. 18/05/24		JCM			
Rev. 20/05/24		PRV			
Apro.		PRV			
E-1 1ª Emisión 18/05/24		JCM		COD.: PCAV-PD-IAC_PARTE N°02	
Edición		Fecha		Sustituye a: No aplica.	
Modificación		Nombre		FAINPRO	

1 2 3 4 5 6 7 8

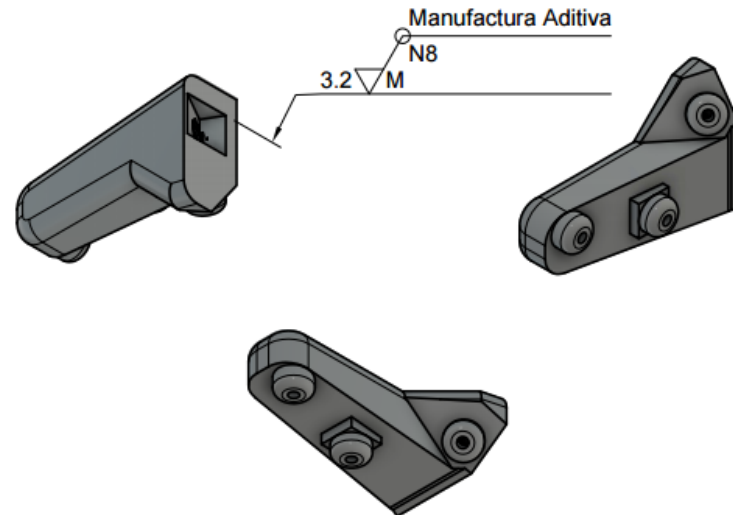
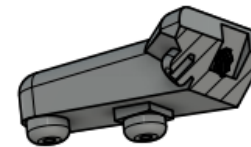
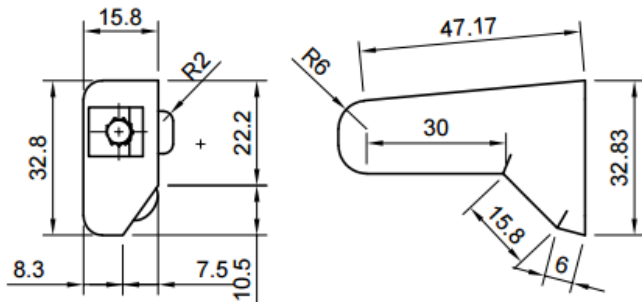
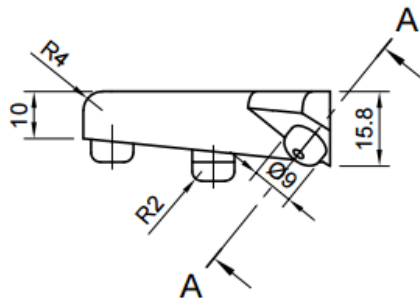
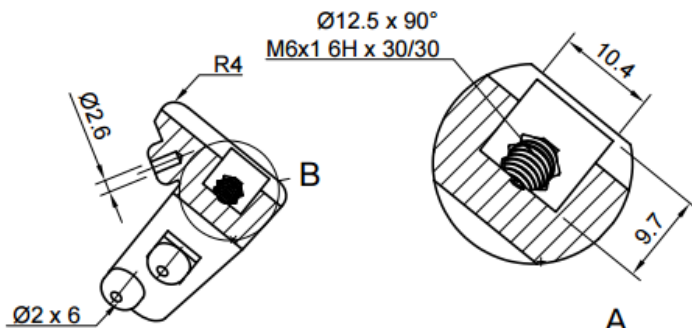
1 2 3 4 5 6 7 8

A  
B  
C  
D  
E  
F



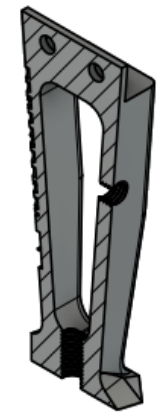
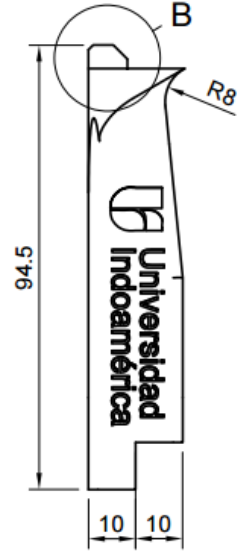
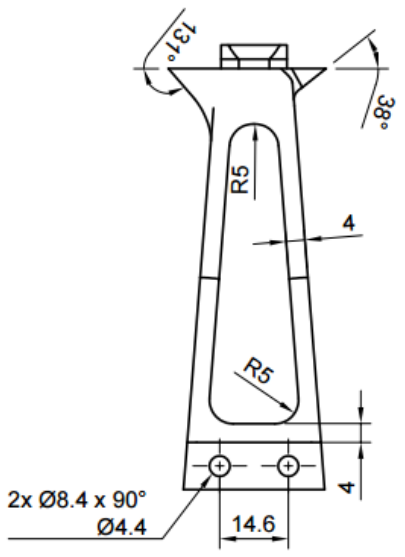
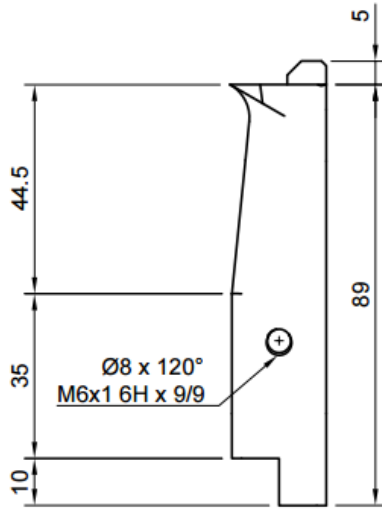
A-A (1:1)

B (2:1)

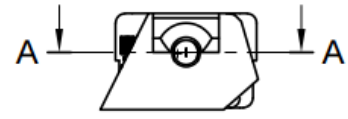
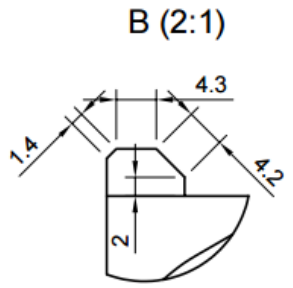


				Tolerancias	Peso	Materiales			
				±0.10	15.70 [g]	Ácido Poliláctico (PLA)			
				Fecha	Nombre	<b>Izador Actuador Transversal</b>	1:1 Escala		
				Dib. 18/05/24	JCM				
				Rev. 20/05/24	PRV				
				Apro.	PRV	COD.: PCAV-PD-IAT_PARTE N°02	Universidad Tecnológica Iberoamericana		
E-1	1ª Emisión	18/05/24	JCM					Sustituye a: No aplica.	FAINPRO
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						

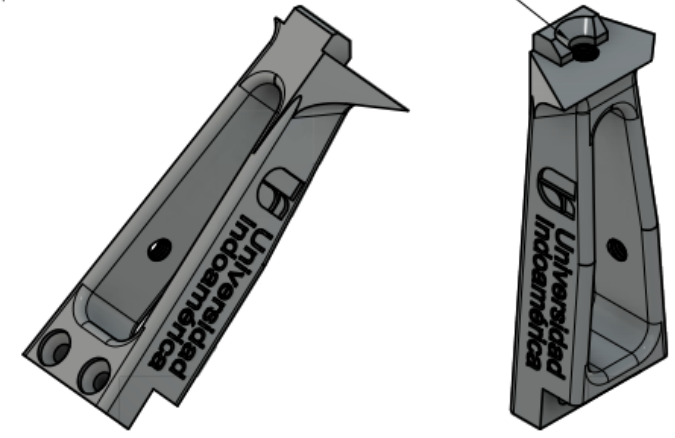
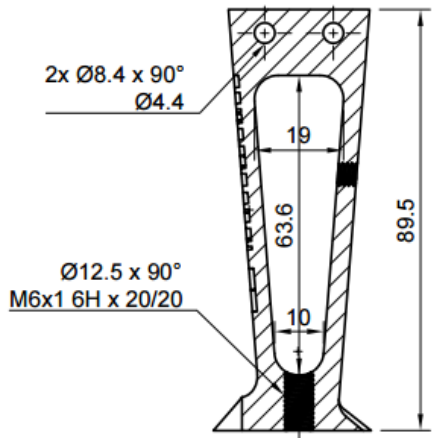
1 2 3 4 5 6 7 8



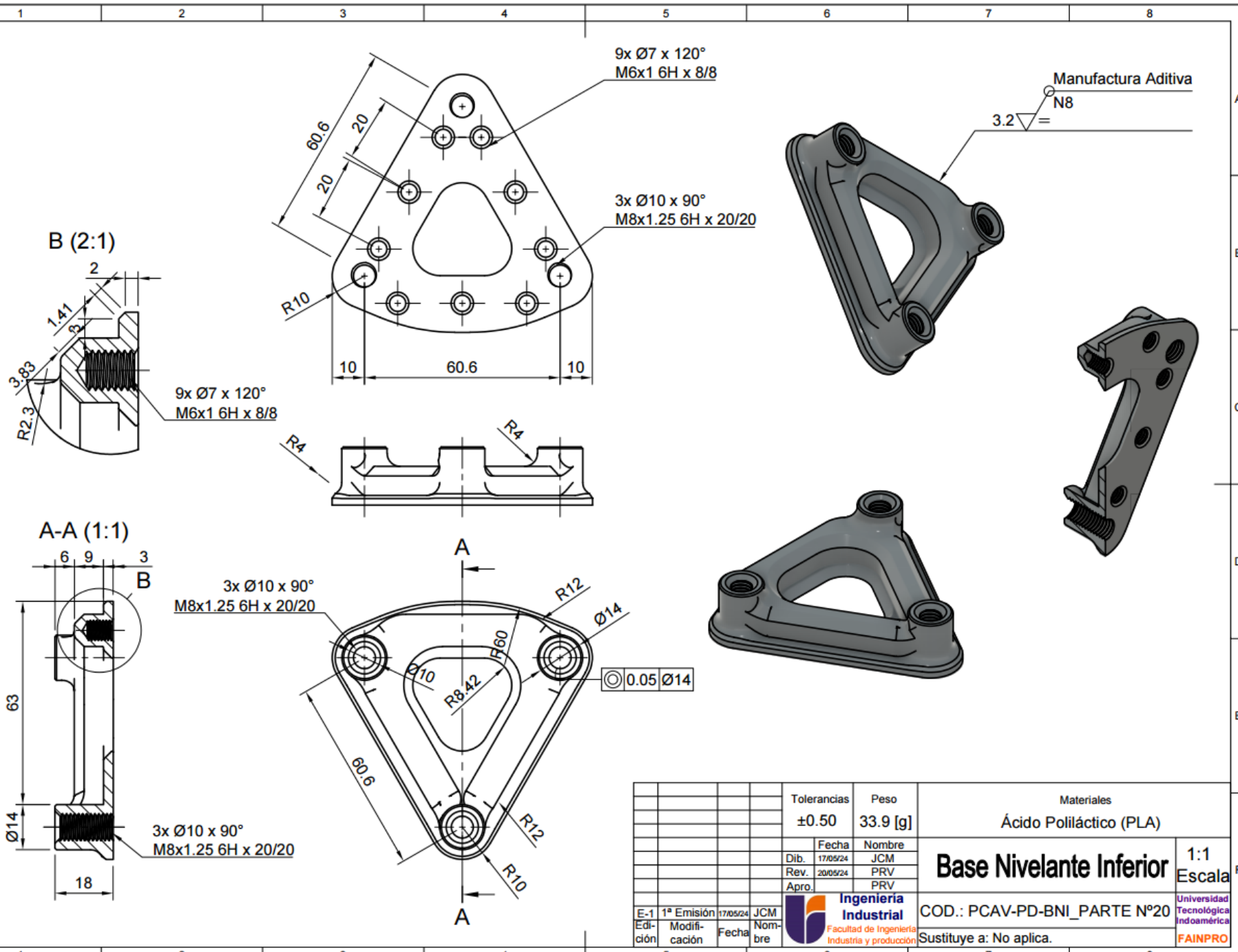
Manufatura Aditiva  
N8  
3.2



A-A (1:1)

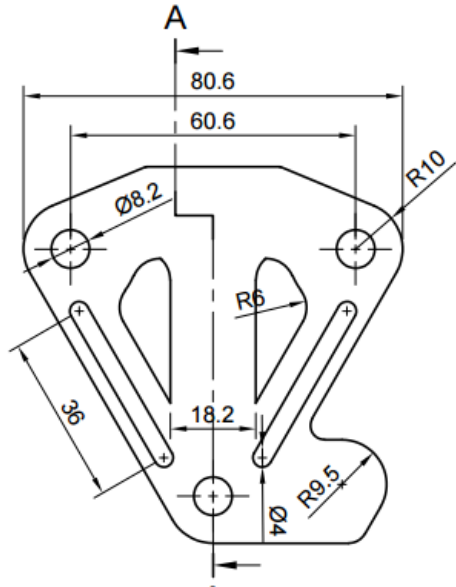
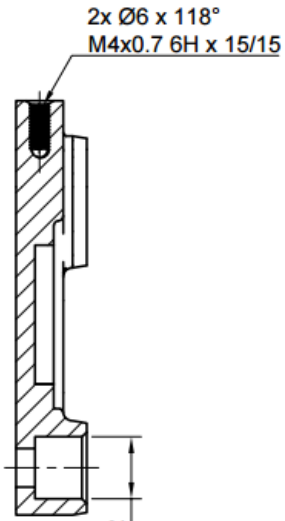


				Tolerancias	Peso	Materiales	
				±0.10	23.50 [g]	Ácido Poliláctico (PLA)	
				Fecha	Nombre	<b>Izador Actuator Vertebral</b>	1:1 Escala
				Dib. 18/05/25	JCM		
				Rev. 20/05/24	PRV		
				Apro.	PRV	COD.: PCAV-PD-IAV_PARTE N°02	Universidad Tecnológica Indoamérica
E-1	1ª Emisión	18/05/24	JCM		Sustituye a: No aplica.		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



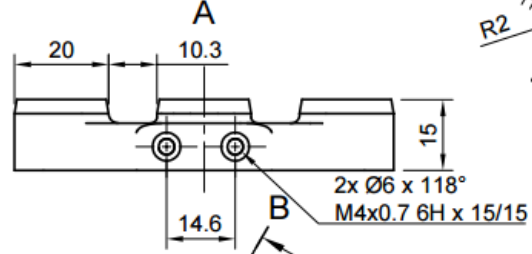
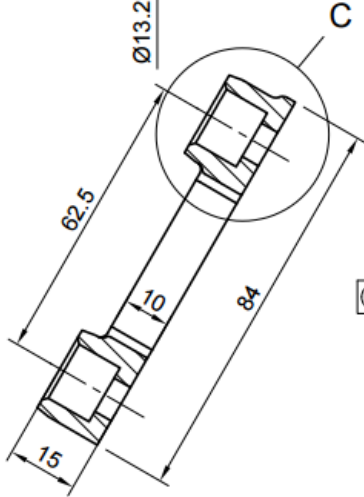
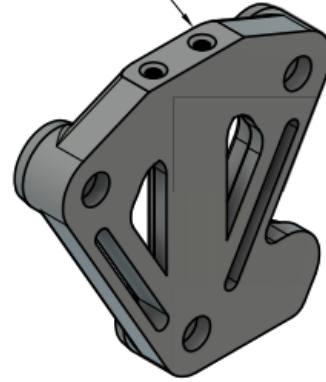
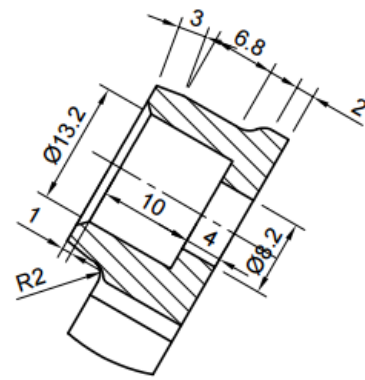
				Tolerancias	Peso	Materiales	
				±0.50	33.9 [g]	Ácido Poliláctico (PLA)	
				Fecha	Nombre	<b>Base Nivelante Inferior</b>	1:1 Escala
				Dib. 17/05/24	JCM		
				Rev. 20/05/24	PRV		
				Apro.	PRV		
E-1	1ª Emisión	17/05/24	JCM			COD.: PCAV-PD-BNI PARTE N°20	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustituye a: No aplica.	

A-A (1:1)

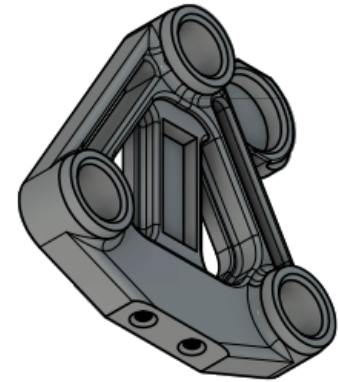
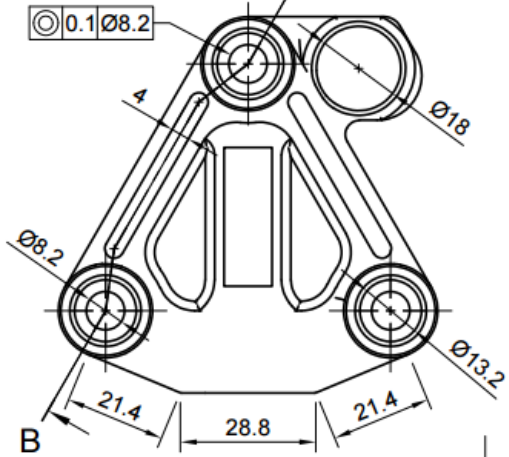


Manufatura Aditiva  
N8  
3.2

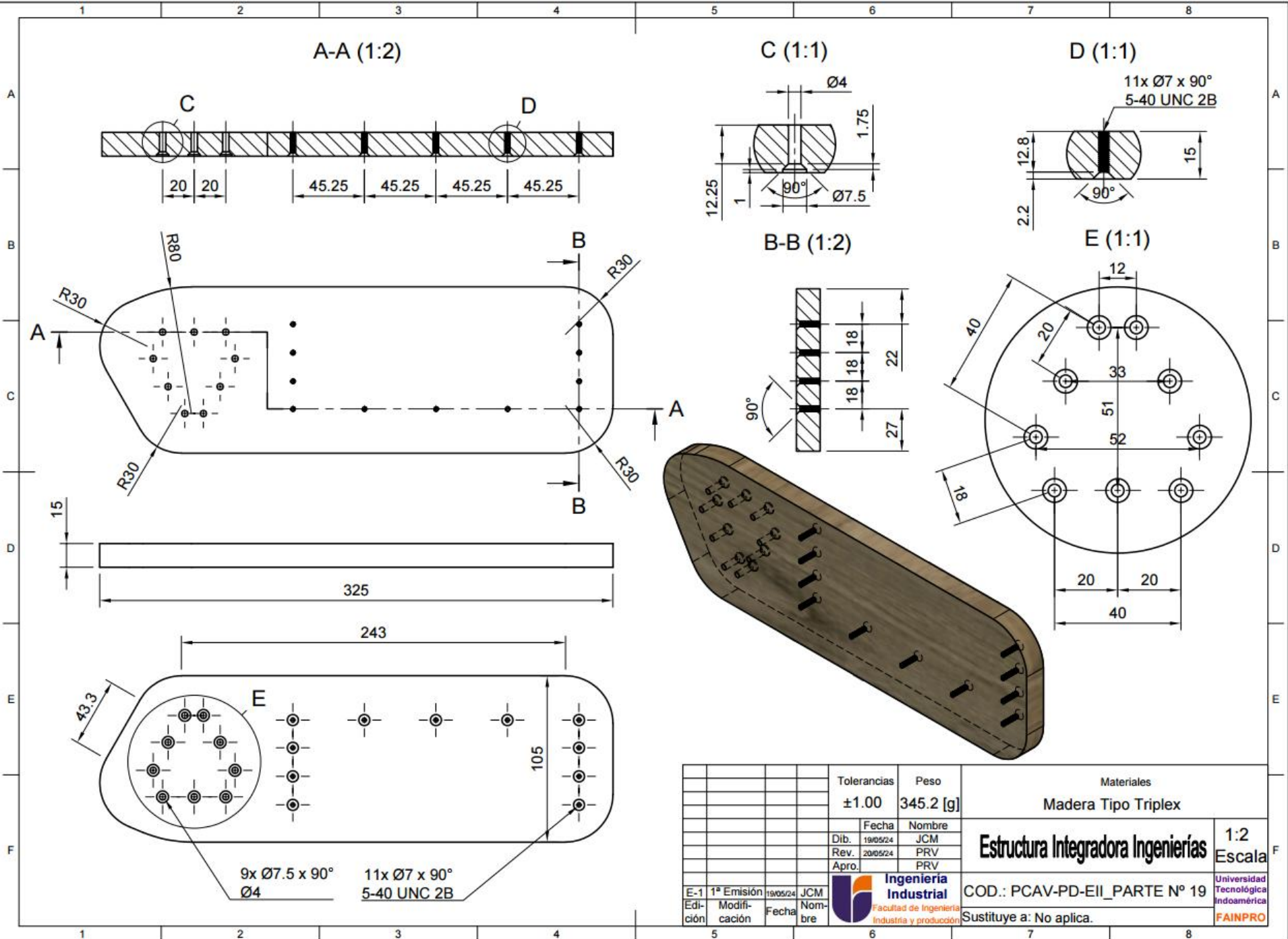
C (2:1)



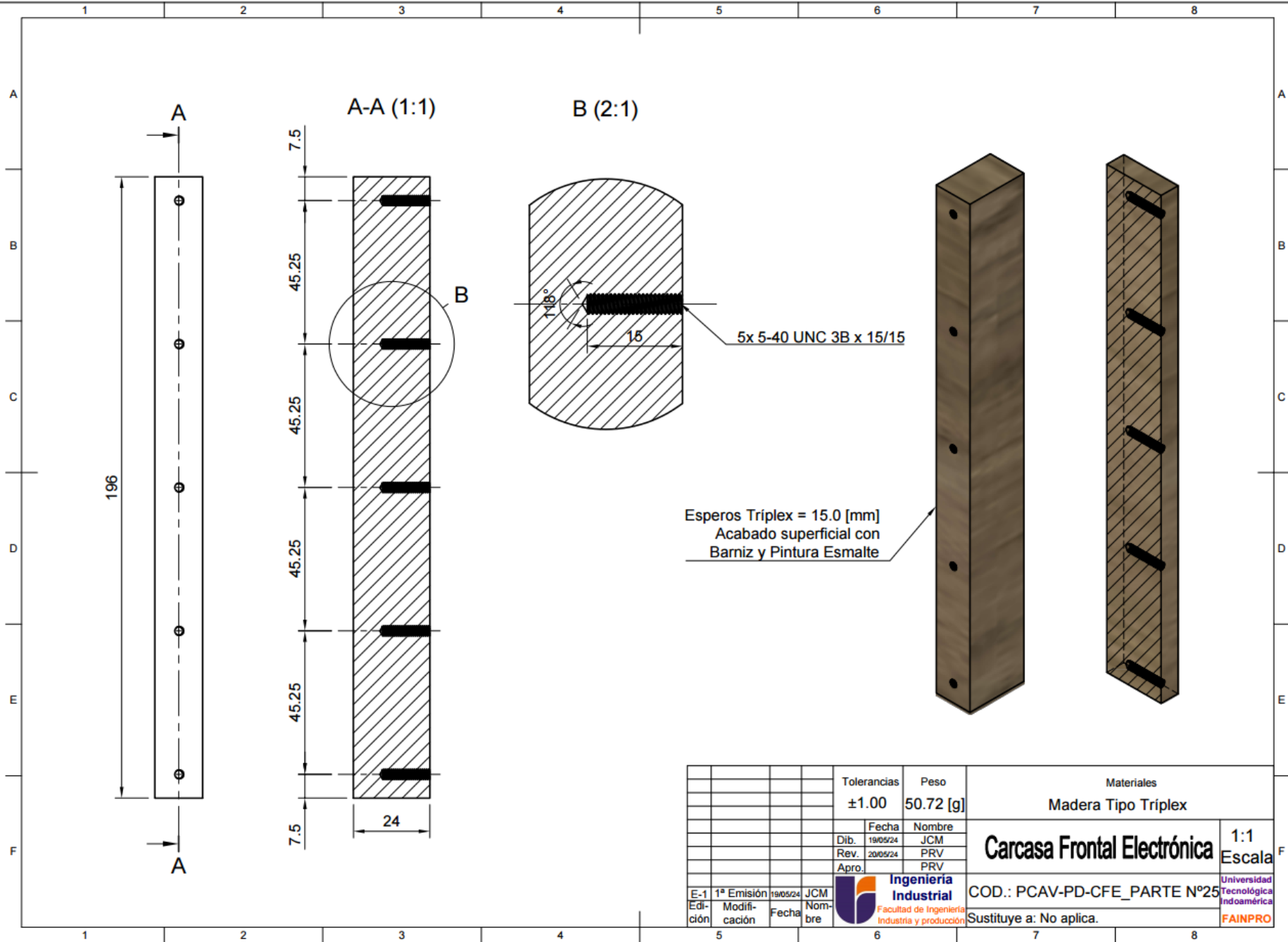
B-B (1:1)



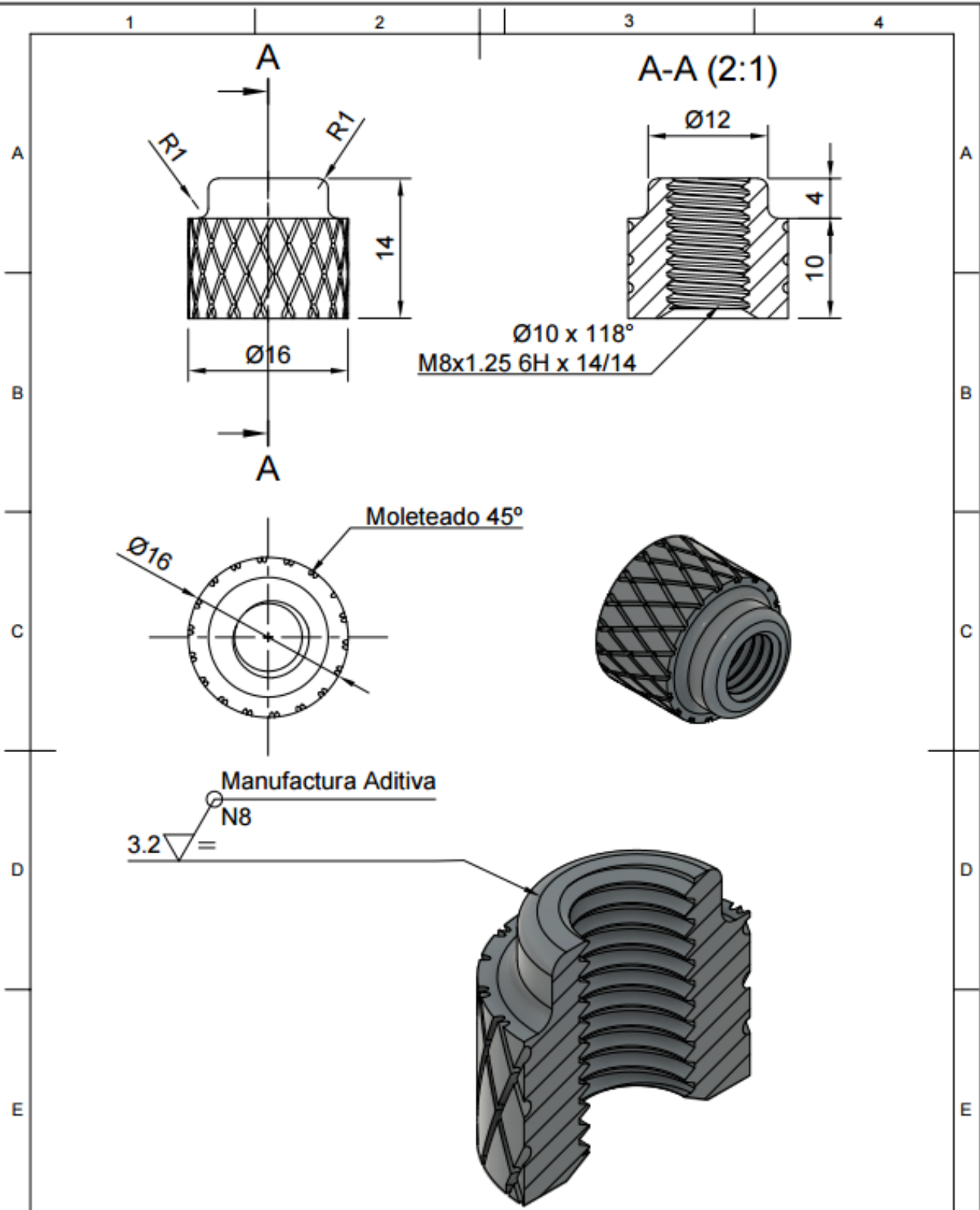
				Tolerancias	Peso	Materiales	
				±0.10	39.0 [g]	Ácido Poliláctico (PLA)	
				Fecha	Nombre	<b>Base Nivelante Superior</b>	1:1 Escala
				Dib. 17/05/24	JCM		
				Rev. 20/05/24	PRV		
				Apro.	PRV	<b>COD.: PCAV-PD-BNS_PARTE N°18</b>	Universidad Tecnológica Indoamérica
E-1	1ª Emisión	17/05/24	JCM				
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



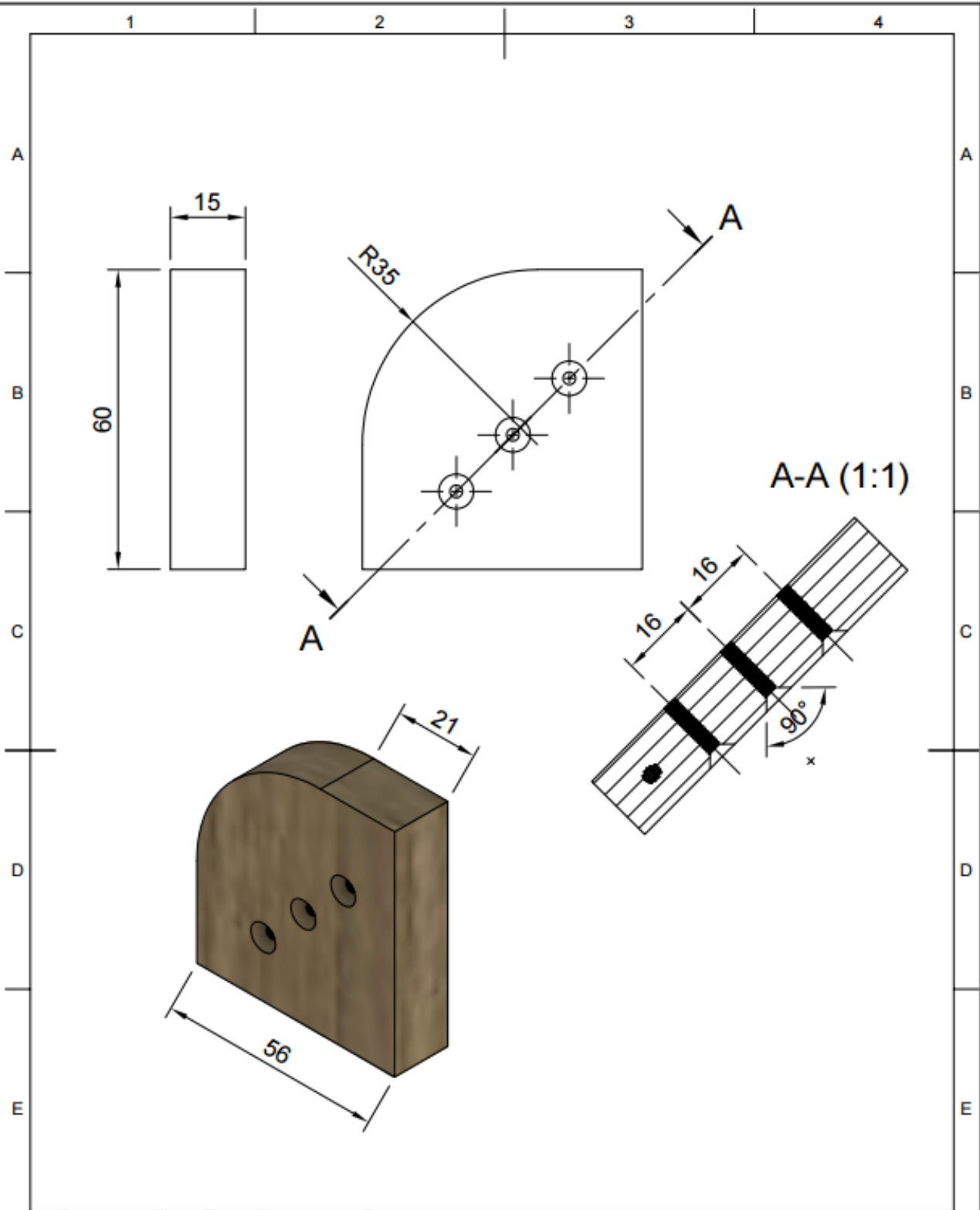
				Tolerancias	Peso	Materiales	
				±1.00	345.2 [g]	Madera Tipo Triplex	
				Fecha	Nombre		
				Dib. 19/05/24	JCM		
				Rev. 20/05/24	PRV		
				Apro.	PRV		
						<b>Estructura Integradora Ingenierías</b>	
E-1	1ª Emisión	19/05/24	JCM				
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Universidad Tecnológica Indoamérica Sustituye a: No aplica.	FAINPRO		



		Tolerancias		Peso		Materiales	
		±1.00		50.72 [g]		Madera Tipo Triplex	
		Fecha		Nombre		<b>Carcasa Frontal Electrónica</b> 1:1 Escala	
		19/05/24		JCM			
		20/05/24		PRV			
		Apro.		PRV		COD.: PCAV-PD-CFE_PARTE N°25 Sustituye a: No aplica.	
E-1	1ª Emisión	19/05/24	JCM			Universidad Tecnológica Indoamérica <b>FAINPRO</b>	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



				Tolerancias	Peso	Materiales	
				±0.10	2.30 [g]	Ácido Poliláctico (PLA)	
				Fecha	Nombre	<b>Elemento Nivelador Roscado</b>	2:1 Escala
				Dib. 19/05/24	JCM		
				Rev. 20/05/24	PRV		
				Apro.	PRV	Universidad Tecnológica Indoamérica	
E-1	1ª Emisión	18/05/24	JCM			COD.: PCAV-PD-ENR_PARTE N°26	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustituye a: No aplica.	






				Tolerancias	Peso	Materiales	
				±1.00	33.02 [g]	Madera Tipo Triplex	
				Fecha	Nombre	<b>Carcasa Tablero Electrónica</b>	1:1 Escala
				Dib.			
				Rev.			
				Apro.			
E-1	1ª Edición	19/05/24	JCM			COD.: PCAV-PD-CTE_PARTE N°23	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustituye a:	

**Anexo 11.** Códigos G para la manufactura aditiva del componente: Izador actuador.

**Tabla 45**

*Programación de códigos G para la manufactura aditiva del izador.*




N.º Componente y denominación	Código G para producción
N. °1: Izador transversal	 CE3PRO_Izador Transversal.gcode
N. °2: Izador conector	 CE3PRO_Izador Conector.gcode
N. °3: Izador vertebral	 CE3PRO_Izador Vertebral.gcode

*Nota.* Elaborado por el investigador.

*Anexo 12.* Códigos G para la manufactura aditiva de las bases nivelantes.

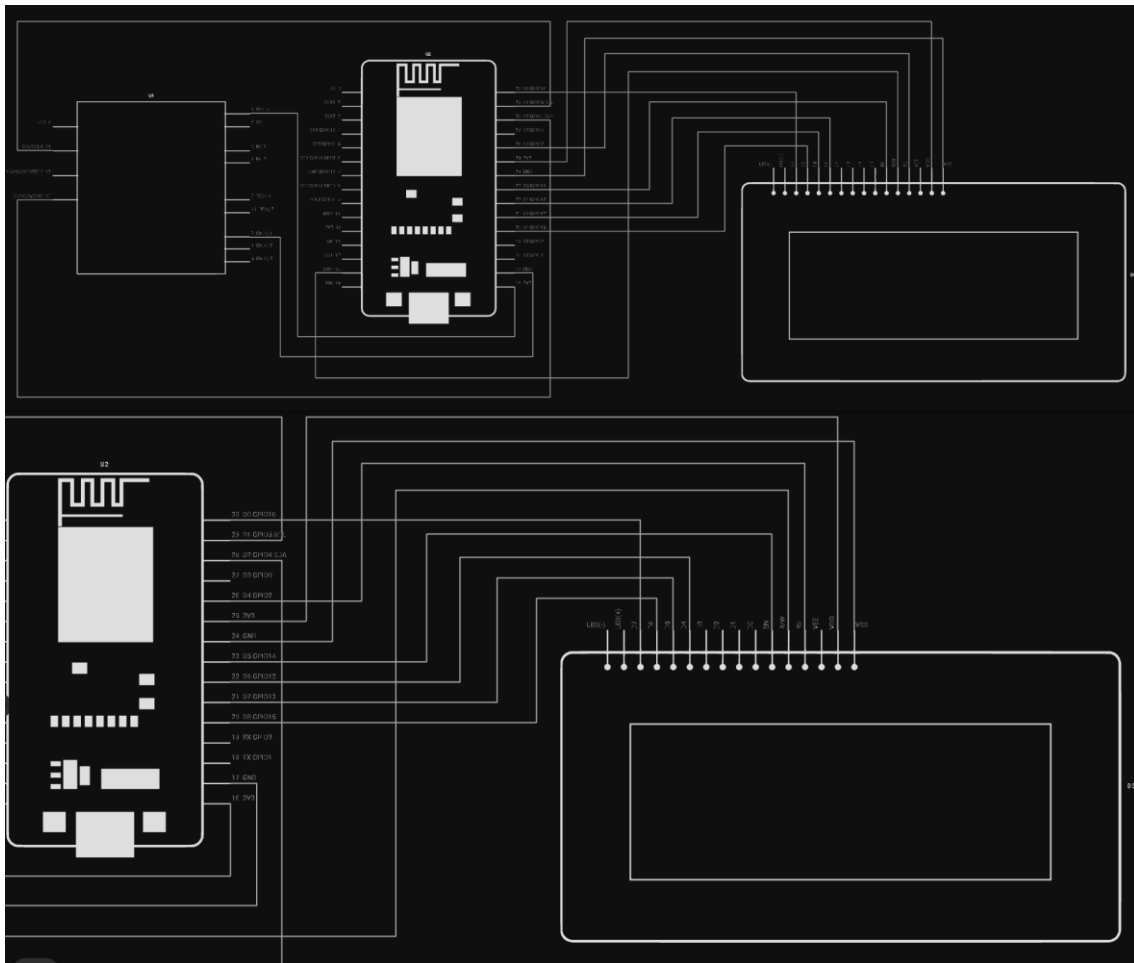
**Tabla 46**

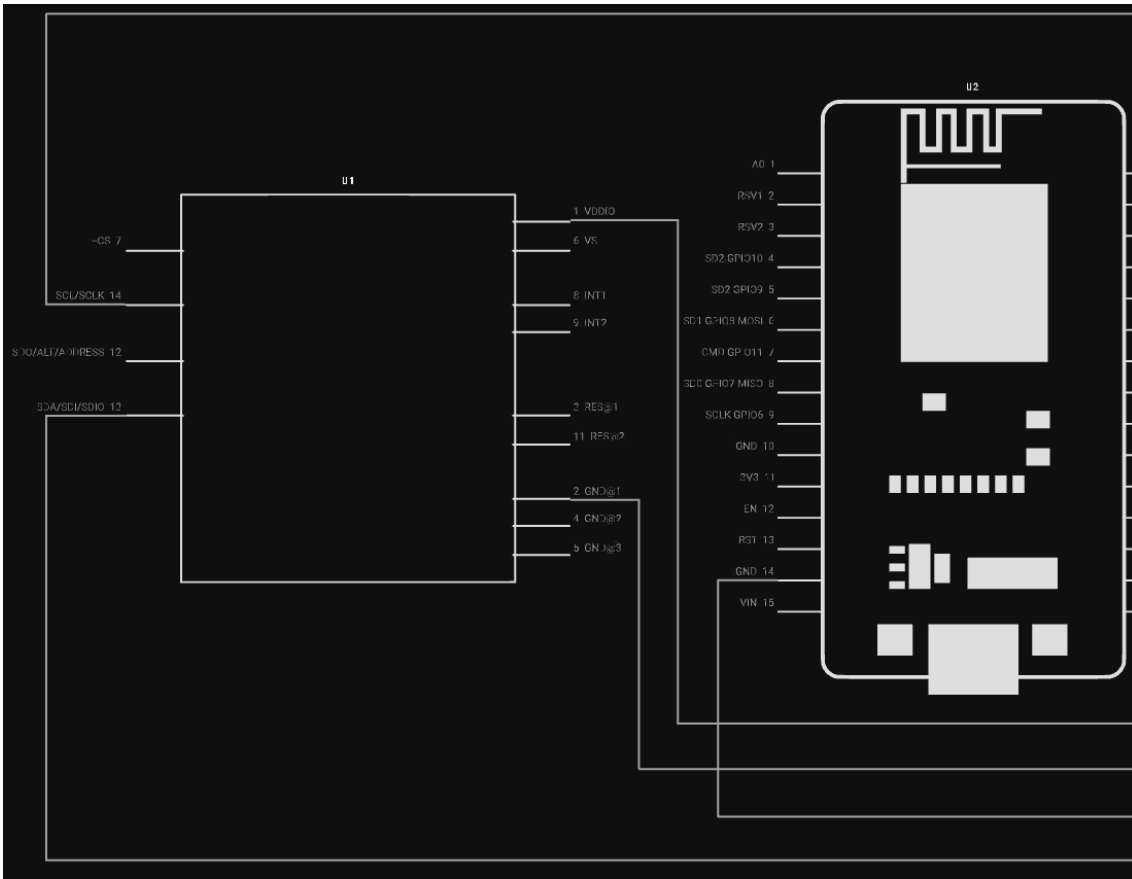
*Programación de códigos G para la manufactura aditiva de las bases nivelantes.*

N.º Componente y denominación	Código G para producción
N. º18: Base nivelante superior	 CE3PRO_Base Nivelante_Superior.gc
N. º20: Base nivelante inferior	 CE3PRO_Base Nivelante_Inferior.gco
N. º25: Elemento roscado nivelador	 CE3PRO_Elemento Nivelador Roscado.gc

*Nota.* Elaborado por el investigador.

**Anexo 13.** Representación esquemática de las conexiones entre la placa ESP8266 con el acelerómetro ADXL345 y la pantalla LCD HD44780.





*Nota.* Elaborado por el investigador.

**Anexo 14.** Facturas de los componentes de mecatrónica de la PCAV.

Hola José Roland,

Hemos terminado de procesar tu pedido.

**[Pedido #26546] (20 diciembre, 2023)**

Producto	Cantidad	Precio
Módulo NodeMcu V3 Lua WiFi ESP8266	1	\$7.50
Acelerometro ADXL345 CJMCU-105	3	\$12.60
40 Cables Dupont Macho-Hembra 20cm	1	\$2.90
<b>Subtotal:</b>		\$23.00
<b>Descuento:</b>		-\$1.50
<b>Métodos de pago:</b>		Efectivo
<b>Total:</b>		\$21.50

**Dirección de facturación**

José Roland Castillo Montoya  
Llano Grande  
1722692876  
Quito  
[0990570412](tel:0990570412)  
[jcastillo27@indoamerica.edu.ec](mailto:jcastillo27@indoamerica.edu.ec)






## Pricing & Availability Changes

Cost trends and availability changes of your **Flux** projects in a recurring summary.

### Platafomra\_Caracterización

[OPEN IN FLUX](#)

Changes Since	Qty	Project Price
Last week	1	\$2.35 – \$8.59
		-\$0.065 \$0.000
		3% 0%

MPN	Qty	DPN	Stock	Unit Price
<b>ADXL345BCCZ-RL</b>	1	 C579457	4916	\$2.35
			-36 (0%)	-\$0.065 (3%)
	1	 62189891	10K	\$4.54
			0 (0%)	\$0.000 (0%)
	1	 81710546	5000	\$8.59
			0 (0%)	\$0.000 (0%)
	1	 82698219	5000	\$8.59
			0 (0%)	\$0.000 (0%)
	1	 83151753	10K	\$3.87
			0 (0%)	\$0.000 (0%)

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**Industrial Engineering**

**AUTHOR:** CASTILLO MONTOYA JOSE ROLAND

**TUTOR:** PHD. REMACHE VINUEZA BYRON PAUL

**ABSTRACT**

**DESIGN OF A PLATFORM FOR CHARACTERIZING VIBROTACTILE ACTUATORS**

This thesis presents the design and implementation of a prototype platform for characterizing vibrotactile actuators. This platform is capable of satisfactorily measuring vibration acceleration along the Cartesian “z” axis, meeting the requirements of low cost, accuracy, and sustainability. The characterization of vibrotactile actuators is crucial for designing efficient and accurate vibratory systems, especially in human-computer interaction applications. Acceleration is measured in a vibrotactile actuator using the ADXL345 accelerometer, which performs high-resolution dynamic analysis in a range from  $\pm 2$  g to  $\pm 16$  g and is capable of measuring without attenuation in a passband from 0.05 to 1600 [Hz]. The operating algorithm of this sensor initializes, adjusts, and measures acceleration values. The raw material for manufacturing the prototype is selected using prioritization matrices. Its production cost is \$626.52, and it is assembled in 36 minutes and 49 seconds. It is observed that the vibrotactile actuator, model DAEXL19SL-4, with which the functionality of the prototype was validated, reaches its maximum electromechanical conversion efficiency at an input frequency equal to 200 [Hz].

**KEYWORDS:** Accelerometer, Human-Computer Interaction, Vibrotactile Actuator

