

# Desarrollo y Aplicación de un Dispositivo de Alineación de Ejes con Sondas de Proximidad de Alta Precisión: Un Enfoque Innovador Basado en Transductores

David Alvarez<sup>1</sup>, Nelson Jara-Cobos<sup>2</sup>, Fran Reinoso-Avecillas<sup>3</sup>, Olena Leonidivna Naidiuk<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación, Optimización y Toma de Decisiones, Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: [dalvarez@est.ups.edu.ec](mailto:dalvarez@est.ups.edu.ec)

<sup>2</sup>Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación, Optimización y Toma de Decisiones, Maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: [njara@ups.edu.ec](mailto:njara@ups.edu.ec)

<sup>3</sup>Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación, Optimización y Toma de Decisiones, Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: [freinoso@ups.edu.ec](mailto:freinoso@ups.edu.ec)

<sup>4</sup>Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación, Optimización y Toma de Decisiones, Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: [oneira@ups.edu.ec](mailto:oneira@ups.edu.ec)

## Resumen

Este estudio presenta el diseño de un dispositivo de alineación de ejes innovador para el montaje de máquinas rotativas enlazadas horizontalmente; el diseño se desarrolla con un enfoque en la precisión y la facilidad de uso del dispositivo de alineación con un interfaz adaptable a diversas plataformas tecnológicas.

En este sentido, el dispositivo diseñado se fabricó utilizando técnicas de impresión 3D en resina y al implementar dos sondas de proximidad de tipo transductor de precisión, se verificó una mejora significativamente en la precisión de alineación de ejes; además, este dispositivo es pionero en ofrecer una interfaz de servidor web universal, facilitando su uso en sistemas operativos como Android, IOS, Windows y Linux, lo que permite realizar un monitoreo en tiempo real y generar informes de alineación precisos utilizando cálculos de geometría euclidiana.

**Palabras clave:** dispositivo para alineación de ejes, máquinas rotativas montadas horizontalmente, sondas de proximidad, monitoreo en tiempo real.

## Abstract

This study presents the design of an innovative shaft alignment device for the assembly of horizontally linked rotating machines; The design is developed with a focus on the precision and ease of use of the alignment device with an interface adaptable to various technological platforms.

In this sense, the designed device was manufactured using 3D resin printing techniques and by implementing two precision transducer-type proximity probes, a significant improvement in axis alignment precision was verified; In addition, this device is a pioneer in offering a universal web server interface, facilitating its use on operating systems such as Android, IOS, Windows and Linux, allowing real-time monitoring and generating accurate alignment reports using Euclidean geometry calculations.

**Keywords:** device for shaft alignment, horizontally mounted rotating machines, proximity probes, real-time monitoring.

## 1. Introducción

La alineación precisa de ejes para el montaje de máquinas rotativas enlazadas horizontalmente es un desafío técnico fundamental en diversas aplicaciones mecánicas y de ingeniería, crucial para el rendimiento

óptimo y la longevidad de la maquinaria. Las metodologías convencionales a menudo carecen de la precisión deseada o requieren equipos costosos y procesos complejos. Este trabajo aborda estas limitaciones presentando un dispositivo innovador que combina la alta precisión, facilidad de uso, y

compatibilidad universal con diferentes sistemas operativos, representando un avance significativo en el campo de la mecánica de precisión.

### 1.1. Efectos de desalineación en máquinas rotativas

La desalineación en las máquinas se produce cuando las líneas centrales de los ejes de rotación de dos o más máquinas acopladas no coinciden entre sí, explicado de una manera clara, los componentes no están al mismo nivel que el centro. Es uno de los problemas más comunes en la industria general, cabe mencionar que esto provoca aproximadamente la mitad de todos los daños prematuros de la máquina, causando cerca del 60% de las fallas [1], [2].

Concretamente provoca efectos hidrodinámicos en el lubricante de los cojinetes de fricción, desgastándolos por gravitación [3], también provoca fuerzas de acción en el acoplamiento, aumenta la temperatura como consecuencia del crecimiento de la fatiga y genera importantes pérdidas de capacidad de carga dinámica en los rodamientos [4], afectando significativamente la vida útil de los elementos que funcionan en contacto con el eje.

Uno de los principales efectos que la desalineación provoca es la vibración de la maquinaria [5], generando el 70% de los problemas en los elementos de máquinas que constituyen sobre todo el sistema de transmisión de movimiento y potencia, asimismo puede producir manifestaciones en la corriente eléctrica que alimenta a los motores de inducción [6], por lo que la fiabilidad y seguridad se ve reducida.

La desalineación causa otros problemas técnicos como la disminución de la eficiencia energética, provocando el incremento de consumo hasta en un 11%, ya que se requiere de más energía para mover el acoplamiento [7], estas observaciones descritas por White, coinciden con publicaciones realizadas por el fabricante de equipos de alineación laser Pruftechnik Alignment Systems [8], son la referencia para estimar que en máquinas desalineadas se puede alcanzar una disminución del 5% del consumo eléctrico de los motores acoplados mediante la alineación de sus ejes.

Por consiguiente, una solución eficaz para incrementar la fiabilidad y seguridad de las máquinas es la alineación de ejes, lo que contribuye de manera significativa la eficiencia energética de los sistemas motrices; por consiguiente, es una alternativa viable para los países que buscan modificar y fortalecer su matriz productiva y energética, como es el caso de Ecuador y de países en vías de desarrollo.

Existen 2 tipos de métodos para solucionar el problema de desalineación:

- Métodos sensoriales. - se ejecuta utilizando reglas o calibres y depende de la apreciación visual de

cada persona para obtener el resultado, por lo que es un método impreciso.

- Métodos instrumentales. - se ejecuta utilizando dispositivos adicionales que permiten realizar la medición y determinar los valores de desalineación existente, entre ellos está el sistema láser (más rápida y precisa) y el de reloj comparador [9], sin embargo, sus costos pueden llegar a ser muy elevados.

Por lo antes mencionado, en el presente trabajo se plantea el desarrollo de un método económico para la alineación de ejes de máquinas rotacionales, en el que se emplean 2 sensores de proximidad, colocados en 2 acoplamientos realizados por impresión 3D en resina, mismos que están anclados a la base de las columnas también impresas en 3D. Mediante 2 pernos colocados a la base de cada una de las columnas que se ajustan al eje, mediante cadena se consigue el giro de 180° del acoplamiento para obtener las lecturas de los sensores, datos que ingresan en una aplicación informática diseñada mediante el IDE Arduino que proporciona los valores de corrección para la alineación.

### 1.2. Casos analizados de equipos desarrollados.

A nivel industrial, se considera como una falla común la desalineación de ejes en máquinas rotatorias, lo que puede provocar graves complicaciones de vibraciones, llegando a ocasionar una falla prematura de los elementos mecánicos involucrados.

En este sentido varios investigadores y desarrolladores han realizado distintos trabajos de investigación que han llevado a desarrollar sistemas de alineación de ejes de alta precisión para aplicaciones industriales, como es el caso del prototipo desarrollado por Mendoza y Zurita [10], el cual utiliza un sensor inductivo en un equipo sin contacto y con indicador electrónico, en la figura 1 se puede observar el prototipo desarrollado.



Figura 1. Prototipo desarrollado [10].

En las figuras 2 se presentan el sistema de adquisición de datos en tres posiciones diferentes.



Figura 2. Interfaz desarrollado [10].

El trabajo desarrollado por Ascarruz y Cruz [11], quienes propusieron la técnica de alineamiento láser en ejes de ventiladores de tipo tiro, ejecutados en el acoplamiento motor y eje del ventilador como la mejor opción. Identificaron tres técnicas de alineamientos de ejes: técnica de las galgas extensiométricas con celdas de carga, técnica de reloj comparador (rin - fase) y la técnica de alineamiento láser. Se enfocaron en la condición del equipo luego del resultado del análisis de vibraciones, además de los tiempos de ejecución de la alineación; en este sentido, la aplicación de la propuesta de la técnica de alineamiento láser resultó la más eficiente (ver Figura 3).



**Figura 3.** Alineamiento de ejes por sistema láser [11].

Haciendo el análisis del trabajo desarrollado por Hernández, Moyano y Barahona [9], quienes desarrollaron un método de bajo costo para alineación de ejes de máquinas rotacionales. Para el diseño del prototipo emplearon 2 relojes palpadores soportados sobre dispositivos de acoplamiento fabricados en poliláctico, los cuales se aseguran sobre un soporte metálico ajustado en cada eje, se requiere un giro de 180° del acoplamiento para obtener los valores de lecturas que se almacenan y organizan en un interfaz, el cual proporciona los valores de corrección para la alineación, así como el nivel de desalineación alcanzado (ver figura 4).



**Figura 4.** Montaje de los dispositivos de alineación [9].

En el trabajo desarrollado por Garg et al [12], determinan que la alineación óptica con láser de ejes en maquinaria rotativa, es mucho más eficiente frente a los métodos mecánicos convencionales. Diseñaron un sistema de alineación láser de alta precisión con PSDs (detector para detección de posición) e IPS (sensor de proximidad inductivo).

El sistema se compone de dos pequeñas unidades de medición (transmisor y detector láser) y un PDA

(asistente digital personal) con software de medición. El sistema de alineación láser con PSD ha tenido éxito en el diseño e implementación de la alineación de ejes que oferta SKF, que puede medir errores y mostrar una resolución inferior al 2%/10  $\mu\text{m}$  (ver figura 5).

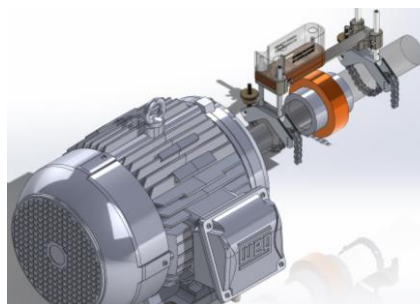


**Figura 5.** Informe de alineación de ejes diseñado mediante Software [12].

## 2. Diseño del dispositivo de alineación

### 2.1. Prototipo









Como se puede observar en la figura 6, se presentan la estructura general del sistema de alineación de ejes para máquinas rotativas con templador de cadena para ejes de variedad de tamaños desde 10 mm hasta 50 mm y con acoples telescópicos de acuerdo con la necesidad. Este diseño requiere el desarrollo de algunos elementos que son fundamentales para el buen funcionamiento, esto hace necesario contar con elementos de sujeción a los ejes, elementos de medición y comparación y una estructura soportante principalmente (ver figura 6).



**Figura 6.** Estructura general del sistema de alineación.  
Fuente: Autores.

Para el desarrollo de las distintas partes del prototipo, se utilizaron varios materiales y elementos normalizados, los cuales se mencionan en la tabla 1.

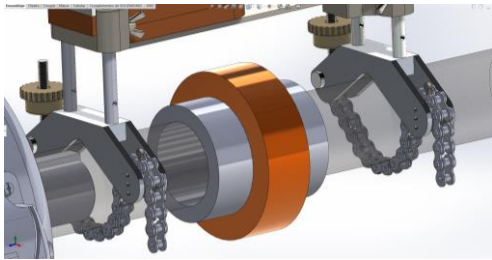
**Tabla 1.** Materiales y elementos normalizados utilizados para el prototipo.

Material	Imagen	Descripción
Resina de ingeniería		Viscosidad: 430±30cps Densidad del líquido: 1.05~1.25g/cm³ Resistencia a la flexión: 60-85MPa
Cadena de transmisión		Paso por pulgada de la cadena. Paso 0,35 pulg.
Imán de neodimio		
3 módulos inalámbricos		Modelo ESP32
1 fuente conmutable		24 V, 5 A
Web server		Para ESP32
Acondicionadores		TM0182
2 sensores proximiores		TM0105

**Fuente:** Elaboración propia

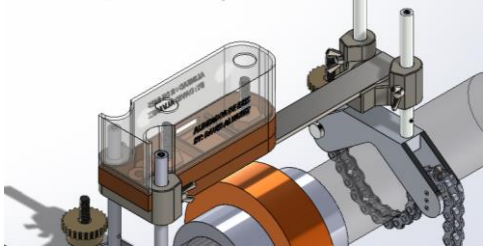
Para la fabricación de algunas partes y la adaptación de materiales normalizados que permitan crear el prototipo de alineador de ejes fue necesario dividir en dos fases la construcción del prototipo.

- Mecanizado: Para la elaboración de varios elementos de geometría y acabados superficiales acorde al alineador de ejes es necesario utilizar un torno convencional y centro de mecanizado CNC de 3 ejes, además, se utilizó suelda SMAW para el acondicionamiento de templadores de la cadena, corte láser para las partes y la fabricación de ejes roscados y tuercas de sujeción (ver figura 7).



**Figura 7.** Elementos de sujeción a ejes para alineación.  
Fuente: Autores.

- Electrónica: Uno de los elementos que fue diseñado mediante el software SolidWork, es una caja base, cuya función es sujetar los sensores proximiores sobre el soporte de la cadena, misma que se ajusta sobre el eje de la máquina fija (ver figuras 8 y 9).



**Figura 8.** Ubicación de la base porta sensores. Fuente: Autores.



**Figura 9.** Base porta sensores proximiores. Fuente: Autores.

Los 2 soportes de cadena que sujetan los ejes que se desea alinear fueron elaborados en una máquina CNC de 3 ejes, las varillas que cruzan por los soportes son de 8 mm de diámetro separadas a una distancia de 66,8 mm (ver figura 10).



**Figura 10.** Soporte triangular y cadena de sujeción. Fuente: Autores.

Para el montaje en la máquina móvil se colocó la guía seguidora, los sensores proximiores se colocaron en la máquina móvil, como se indica en la figura 11. Es de suma importancia verificar que los sensores se encuentren situados a la mitad de la carrera.

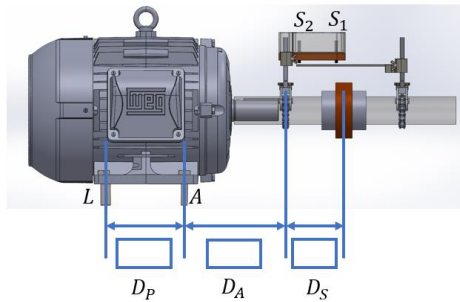




**Figura 11.** Montaje de prototipo. Fuente: Autores.

Para mejorar el proceso de alineación se colocaron los sensores proximítores en sentido horizontal, los cuales indican con precisión el desplazamiento horizontal de la máquina móvil.

Al tener montados los dispositivos de alineación y con la ayuda de un flexómetro se extrajo las medidas de las distancias entre el soporte de cada cadena y el centro del acople ( $D_s$ ), la siguiente medida desde el centro del acople hasta el perno del lado del acople de la máquina móvil ( $D_A$ ) y la distancia entre pernos de anclaje ( $D_p$ ), tal como se muestra en la figura 12.

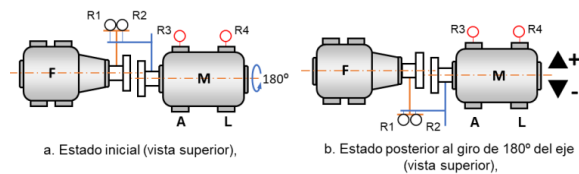


**Figura 12.** Medida de las variables. Fuente: Autores.

Se consideró los métodos de alineación tanto horizontal como vertical, para la alineación de los sensores proximítores, de acuerdo con lo establecido a continuación.

## 2.2. Método de alineación horizontal

Si los ejes se encuentran desalineados, es necesario obtener los valores de corrección horizontal, y se enceran. Se gira los ejes  $180^\circ$  como se muestra en la figura 13 y se anotan los valores que revelan los sensores ( $LH_M$  y  $LH_F$ ).



**Figura 13.** Proceso de alineación horizontal. Fuente: Adaptado de [9].

Las ecuaciones aplicadas para obtener los valores de corrección horizontal son determinadas en función de la geometría Euclidiana (ecuaciones 1 y 2) [9].

$$H_A = \frac{(D_A - D_S) * (LH_M - LH_F)}{2 * R} + \frac{(LH_M + LH_F)}{4} \quad (1)$$

$$H_L = \frac{(D_A + D_P - D_S) * (LH_M - LH_F)}{2 * R} + \frac{(LH_M + LH_F)}{4} \quad (2)$$

Donde:

$H_A$  = Valor de corrección para la alineación horizontal para el perno A.

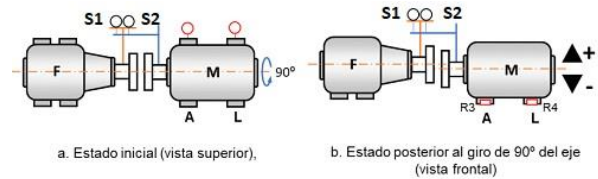
$H_L$  = Valor de corrección para la alineación horizontal para el perno L.

$LH_M$  = Variación producida en la lectura del sensor del lado de la máquina móvil después de girar  $180^\circ$ .

$LH_F$  = Variación producida en la lectura del sensor del lado de la máquina fija luego de girar  $180^\circ$ .

## 2.3. Método de alineación vertical

Luego de que la desalineación horizontal se encuentra dentro de tolerancias se inicia el proceso de alineación vertical (ver figura 14). Primero se debe retirar cualquier alza que se encuentre debajo de la máquina móvil y colocar el conjunto armado en sentido horizontal.



**Figura 14.** Proceso de alineación vertical. Fuente: Adaptado de [9].

Cuando el conjunto obtiene el plano horizontal, se disponen en cero los sensores S1 y S2, consecuentemente, se gira  $90^\circ$  el dispositivo de alineación hasta estar en sentido vertical y se anotan los valores que arrojan los sensores ( $LV_F$  y  $LV_M$ ).

Para encontrar los valores de corrección vertical se aplican las ecuaciones 3 y 4 [9].

$$V_A = \frac{(D_A - D_S) * (LV_F - LV_M)}{R} - \frac{(LV_M + LV_F)}{2} \quad (3)$$

$$V_L = \frac{(D_A + D_P - D_S) * (LV_F - LV_M)}{R} - \frac{(LV_M + LV_F)}{2} \quad (4)$$

Donde:

$V_A$  = Valor de corrección para la alineación vertical para el perno A.

$V_L$  = Valor de corrección para la alineación vertical para el perno L.

$LV_F$  = Variación producida en la lectura del sensor de la máquina fija después de girar  $90^\circ$ .

$LV_M$  = Variación producida en la lectura del sensor del lado de la máquina móvil después de girar  $90^\circ$ .

$V_A$  y  $V_L$  reflejan la variación de la altura que se debe compensar colocando o retirando láminas de acero

*inoxidable austenítico AISI304 calibradas, se las encaja en la parte de los pernos A y L según lo necesario. Para obtener valores positivos se debe aumentar la altura y para negativos disminuir.*

La alineación horizontal y vertical debe ser repetida hasta llegar al grado de tolerancia requerido. Es necesario aplicar para ello las ecuaciones 5 a la 8 [9].

$$DP_H = \left| \frac{H_A + H_L}{2} \right| \quad (5)$$

$$DA_H = 1000 * \arctan \left| \frac{LH_M - LH_F}{2 * R} \right| \quad (6)$$

$$DP_V = \left| \frac{V_A + V_L}{2} \right| \quad (7)$$

$$DA_V = 1000 * \arctan \left| \frac{LV_M - LV_F}{R} \right| \quad (8)$$

Donde:

$DP_H$  = Nivel de desalineación paralelo horizontal en mm.

$DA_H$  = Nivel de desalineación angular horizontal en mm rad.

Los valores calculados con las ecuaciones 5 a la 8, se deben comparar con los valores presentados en la tabla 2, esto con la intención de verificar que se alcanzaron las tolerancias deseables.

**Tabla 2.** Tolerancias de desalineación paralela y angular.

Frecuencia rotación de ejes acoplados [rpm]	Nivel aceptable de desali- neación paralela [mm]	Nivel excelente de desali- neación paralela [mm]	Nivel aceptable de desali- neación angular [mrad]	Nivel excelente de desali- neación angular [mrad]
600	0,23	0,13	3,80	2,50
750	0,19	0,09	2,50	1,80
900	0,15	0,08	2,10	1,30
1200	0,10	0,07	1,30	0,90
1500	0,09	0,06	1,30	0,50
1800	0,08	0,05	0,80	0,50
3000	0,06	0,03	0,70	0,50
3600	0,04	0,03	0,50	0,30
6000	0,03	0,02	0,40	0,30
7200	0,03	0,01	0,30	0,20

**Fuente:** [9]

Para la obtención de resultados con mayor precisión se puede utilizar una aplicación informática elaborada, que cuenta con las ecuaciones requeridas.

## 2.4. Sistema Electrónico

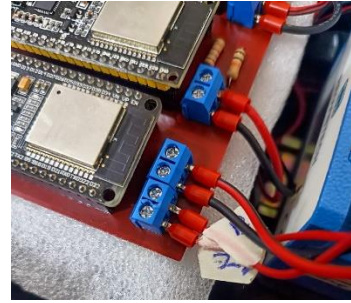
Para el buen funcionamiento del alineador de ejes, se implementó un sistema electrónico que está

compuesto por un giroscopio (ver figura 15), una placa de controladores instalados que permitan la conversión de datos analógicos a digitales mediante el uso de 3 unidades ESP-32 (ver figura 16), además se estableció la posibilidad de conexión wifi para el uso del equipo.



**Figura 15.** Instalación de giroscopio y conexión a drivers.

Fuente: Autores.



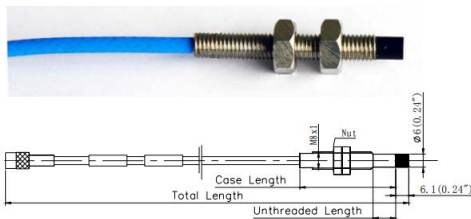
**Figura 16.** Conexión a placa de controladores, unidades ESP-32 3. Fuente: Autores.

A continuación, se presentan de manera general algunos de los elementos electrónicos constitutivos y sus características.

**Transductores.** – El proceso de censado se lo desarrolla mediante el controlador TM0182-A55-B00-C00, el cual cuenta con un algoritmo predictivo avanzado que analiza patrones de datos complejos en tiempo real, proporcionando pronósticos e información precisa, con un diseño compacto y liviano.

**Controlador TM0182.** - se utiliza en los sistemas de sonda de proximidad TM0180 y TM0105. El aislamiento del circuito con respecto a la tierra es una característica estándar para todos los controladores. La longitud total del cable entre la sonda y el controlador debe ser de 5 m o 9 m. La distancia entre el controlador y el monitor de vibración puede ser de hasta 300 m

La sonda TM0180 y el cable de extensión están equipados con una funda protectora de goma estándar, que cubre los conectores y evita la penetración de aceite y suciedad (ver figura 17).

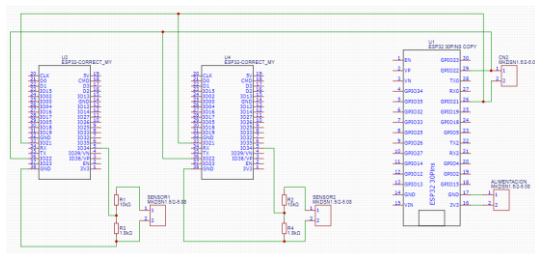


**Figura 17.** Sonda TM0105. Fuente: <https://www.swann-associates.com/pdf/probitech/TM0180-TM0105.pdf>.

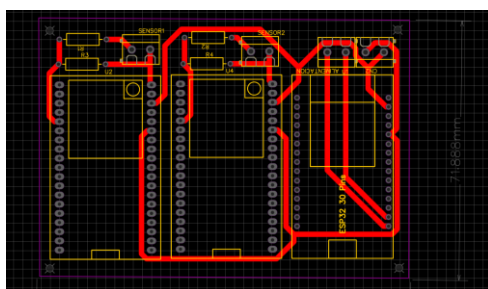
**ESP32.** - Es un microcontrolador que integra tecnologías WiFi y Bluetooth, que le proporcionan conectividad con internet u otros dispositivos, lo cual por su bajo costo y múltiples prestaciones permite analizar la señal y transmitirla para su procesamiento.

**MPU6050.** - es una unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Units) de 6 grados de libertad (DoF), el cual combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes. Este sensor es muy utilizado en navegación, goniometría y estabilización.

En la figura 18 se puede observar el diagrama de conexión para PCB y en la figura 19 se puede observar el ruteo para PCB de procesamiento.



**Figura 18.** Diagrama de conexión. Fuente: Autores.



**Figura 19.** Ruteo para PCB de procesamiento. Fuente: Autores.

## 2.5. Interfaz desarrollada

La interfaz desarrollada puede correr a través de conexión wifi en cualquier dispositivo que cuente con

Android, iOS, Linux y Windows, mediante el uso de un navegador a partir del servidor que generan las unidades ESP-32.

Para ello se desarrolló una interfaz que posee la estructura que se observa en la figura 20.

**Alineador de ejes G4**

GIROSCOPIO	ACELEROMETRO	TEMPERATURA
Grado: °	X: ms <sup>2</sup>	°C
X: °	Y: ms <sup>2</sup>	
Y: °		
ANIMACION 3D		
RESET POSITION X Y Z		
DISTANCIAS DE BANCADAS		
Ingresar valor Dp:		
4 Guardar		
Dp: 4		
Ingresar valor Da:		
3 Guardar		
Da: 3		
Ingresar valor Ds:		
2 Guardar		
Ds: 2		
DISTANCIAS DE LH		
Ingresar valor LH <sub>M</sub> :		
5 Guardar		
LH <sub>M</sub> : 5		
Ingresar valor LH <sub>F</sub> :		
6 Guardar		
LH <sub>F</sub> : 6		
Ingresar valor R:		
7 Guardar		
R: 7		
DISTANCIAS DE LV		
Ingresar valor LV <sub>M</sub> :		
2 Guardar		
LV <sub>M</sub> : 2		
Ingresar valor LV <sub>F</sub> :		
1 Guardar		
LV <sub>F</sub> : 1		
DISTANCIAS DE SENSOR 1		
0° 0.6 Guardar		
0°: 0.6		
90° 0.3 Guardar		
90°: 0.3		
180° 0.2 Guardar		
180°: 0.2		
DISTANCIAS DE SENSOR 2		
0° 1 Guardar		
0°: 1		
90° 1 Guardar		
90°: 1		
180° 1 Guardar		
180°: 1		
DIFERENCIA DE SENSORES		
0°: 0.40		
90°: 0.70		
180°: 0.80		
Respuesta		
ALINEACION VERTICAL		
V <sub>A</sub> : -1.64		
V <sub>L</sub> : -0.79		
Respuesta		
CALCULOS DESALINEACION		
DP <sub>H</sub> : 2.54		
DA <sub>H</sub> : 71.43		
DP <sub>V</sub> : 1.21		
DA <sub>V</sub> : 141.90		
Respuesta		
Generar PDF		

**Figura 20.** Estructura del Interfaz desarrollado. Fuente: Autores.

Para el efecto se desarrolló la programación mediante HTML; a continuación, se pueden ver algunas líneas de programación:

```
<!DOCTYPE HTML><html>
<head>
  <title>ALINEADOR DE EJES</title>
  <meta name="viewport" content="width=device-width,
initial-scale=1">
  <script src="html2pdf.bundle.min.js"></script>
  <link rel="icon" href="data:,">
  <link rel="stylesheet" type="text/css" href="style.css">
```

Para posibilitar el ingreso a librería y visualizar el movimiento en 3D del alineador de ejes desarrollado y los cálculos en función de los valores obtenidos, se procedió a realizar la programación en JS. A continuación, se pueden ver algunas líneas de programación:

```
let scene, camera, rendered, cube;
function parentWidth(elem) {
  return elem.parentElement.clientWidth;
}
function parentHeight(elem) {
  return elem.parentElement.clientHeight;
}
function init3D(){
  scene = new THREE.Scene();
  scene.background = new THREE.Color(0xffffffff);
  camera = new THREE.PerspectiveCamera(75,
parentWidth(document.getElementById("3Dcube")) /
parentHeight(document.getElementById("3Dcube")), 0.1,
1000);
```

Además, para poder otorgar apariencias y características a la aplicación Web, se procedió a desarrollar la programación en CSS. A continuación, se pueden ver algunas líneas de programación:

```
html {
  font-family: Arial;
```

```
display: inline-block;
text-align: center;
p {
  font-size: 1.2rem;
body {
  margin: 0;
.topnav {
  overflow: hidden;
background-color: #790e00;
color: #ffffff;
font-size: 1rem;
```

Todas las líneas de programación, fueron almacenadas en una carpeta llamada DATA, la cual se carga en la memoria de los sensores ESP32 mediante la función ESP32 Sketch Data Upload.

Mediante HTTP se crea la aplicación Web (protocolo de comunicación), donde se permite visualizar el interfaz y recibir los datos existentes. Para los dos ESP32 restantes y el MPU6050 se utiliza un protocolo de comunicación I2C que permita compartir los datos y poder censarlos.

Para poder visualizar el interfaz se requiere crear una red wifi con los siguientes datos:

- const char\* ssid = "CAB\_EJE";
- const char\* password = "12345678";

### 3. Resultados

En la tabla 3 se presentan los datos técnicos del dispositivo de Alineación de Ejes con Sondas de Proximidad de Alta Precisión.

**Tabla 3.** Datos técnicos del Alineador.

Datos Técnicos	
Designación	Alineador de ejes
Sensores y comunicación	2 sensores de proximidad inductivos Giroscópio
Distancia de medición del sistema	0 a 185 mm entre soportes 3 barras de referencia de 200, 150 y 100 mm
Material de la carcasa	Resina de ingeniería
Tipo de funcionamiento	110 V / AC
Dimensiones	(105x55x55)mm
Peso	450 g
Dispositivo operativo	Android - Windows iPad, iPod Touch
Requisito del sistema operativo	Apple iOS 9 o Android 9 o superior
Método de alineación	Alineación de ejes horizontales Medición de 3 posiciones 0, 90 y 180°
Valores de corrección en vivo	Solo para horizontales
Accesorio	2 soportes en V con cadenas Ancho 20 mm
Diámetro de eje	15 hasta 50 mm
Acoplador de corriente	Cable de poder 110 V / AC
Temperatura de funcionamiento	0 a 45°C
Contenido del caso	Unidad de medida 3 barras de referencia 2 soportes de eje con cadenas de 420 mm Varillas de 100 mm

**Fuente:** Autores.



En la tabla 4, se presenta los valores de las tolerancias obtenidas en las distintas pruebas desarrolladas con el sistema de alineación de ejes implementado.

**Tabla 4.** Tolerancias del alineador de ejes.

Velocidad (rpm)	Desplazamiento (mm)	Error Angular (mm/100)
0 - 1000	0,13	0,1
1000 - 2000	0,1	0,08
2000 - 3000	0,07	0,07
3000 - 4000	0,04	0,06
4000 - 5000	0,03	0,05
5000 - 6000	0,03	0,04

**Fuente:** Autores

En la figura 21, se presenta una fotografía del equipo desarrollado, ensamblado y calibrado para su utilización en procesos de alineación de ejes de máquinas.



**Figura 21.** Equipo desarrollado, ensamblado y calibrado.  
Fuente: Autores.

#### 4. Conclusiones

El desarrollo y aplicación de un dispositivo de alineación de ejes utilizando sondas de proximidad de alta precisión basadas en transductores ha demostrado una mejora significativa en la precisión de la alineación. Este enfoque innovador permite detectar desviaciones y desalineaciones con mayor exactitud que los métodos tradicionales, lo que resulta en un alineamiento más preciso y eficiente de los ejes en maquinaria industrial.

La implementación de este dispositivo ha llevado a una reducción notable en el tiempo necesario para realizar las tareas de alineación de ejes, así como en los costos asociados con el mantenimiento industrial. La alta precisión y la capacidad de monitoreo continuo que ofrecen las sondas de proximidad permiten una identificación temprana de problemas de

desalineación, minimizando el tiempo de inactividad y mejorando la productividad general.

La utilización de sondas de proximidad de alta precisión para la alineación de ejes contribuye a un funcionamiento más suave y equilibrado de la maquinaria, lo que incrementa su vida útil y optimiza su rendimiento. Al asegurar que los ejes estén alineados de manera óptima, se reduce el desgaste y la vibración, lo que resulta en una operación más confiable y en la disminución de la frecuencia de reparaciones y reemplazos.

#### 5. Referencias

- [1] H. Á. González, J. F. Cardona, y G. A. Monroy, «Diseño de un banco de pruebas de desalineamiento y desbalanceo mecánico», *Scientia et Technica*, vol. 2, n.º 28, pp. 101-106, 2005.
- [2] P. Poste, «Taking the squint out of shaft alignment techniques», *World Pumps*, vol. 2001, n.º 418, pp. 20-24, 2001.
- [3] H. Lombera-Rodríguez y C. E. Novo-Soto, «Algoritmo para determinar cavitación en un par eje-cojinete con ranura axial y desalineación paralela», *Ingeniería Mecánica*, vol. 21, n.º 2, pp. 108-116, 2018.
- [4] O. Tonks y Q. Wang, «The detection of wind turbine shaft misalignment using temperature monitoring», *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 17, pp. 71-79, 2017.
- [5] A. W. Lees, «Misalignment in rigidly coupled rotors», *Journal of Sound and Vibration*, vol. 305, n.º 1-2, pp. 261-271, 2007.
- [6] C. Verucchi, J. Bossio, G. Bossio, y G. Acosta, «Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 80, pp. 570-581, 2016.
- [7] G. White, «Introducción al análisis de vibraciones», *Woburn, MA, Estados Unidos: Ázima*, vol. 551, pp. 1990-2010, 2010.
- [8] Prüftechnik, «PRÜFTECHNIK | Laserausrichtung | Condition Monitoring | NDT», *pruftechnik*. Accedido: 20 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.pruftechnik.com/de-DE/>
- [9] E. S. Hernández-Dávila, J. R. Moyano-Arévalo, y N. S. Barahona-Alvear, «Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico», *Dominio de las Ciencias*, vol. 6, n.º 2, pp. 975-999, 2020.
- [10] I. Mendoza y G. Zurita, «Desarrollo de un sistema de medición de alineación de ejes para

- aplicaciones industriales.», *Investigación & Desarrollo*, vol. 18, n.º 1, pp. 91-102, 2018.
- [11] R. E. Ascarruz Armas y J. L. Cruz Soto, «Propuesta de la técnica de alineamiento láser en ejes ventiladores de tipo tiro», Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, 2022. Accedido: 18 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/7492>
- [12] S. Garg, S. Kumar, R. Deshpande, y A. K. Sharma, «A Laser Shaft Alignment by IPS-PSD's for Rotary machine», *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, n.º 4, p. 6, 2017.