



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i2.1196>

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

Shaft alignment method of rotational machines made up of lactic acid components

Método de alinhamento de eixos de máquinas rotacionais compostas por componentes de ácido láctico

Eduardo Segundo Hernández-Dávila ^I
edhernandez@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4899-2371>

Javier Renato Moyano-Arévalo ^{II}
javier.moyano@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7992-7444>

Natalia Sofía Barahona-Alvear ^{III}
natalia.barahona@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6568-0188>

***Recibido:** 29 de febrero de 2020 ***Aceptado:** 30 de marzo de 2020 *** Publicado:** 30 de abril de 2020

- I. Magíster en Gestión del Mantenimiento Industrial, Ingeniero de Mantenimiento, Docente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Mantenimiento Industrial, Grupo de Investigación Ciencia del Mantenimiento CIMANT, Riobamba, Ecuador.
- II. Magíster en Diseño Mecánico Mención en Fabricación de Autopartes de Vehículos, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Mantenimiento Industrial, Grupo de Investigación Ciencia del Mantenimiento CIMANT, Riobamba, Ecuador.
- III. Magíster en Gerencia de Instituciones de Salud, Doctora en Química, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Mantenimiento Industrial, Grupo de Investigación Ciencia del Mantenimiento CIMANT, Riobamba, Ecuador.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo el desarrollo de un nuevo método de bajo costo para la alineación de ejes de máquinas rotacionales, debido a que en las pequeñas empresas, microempresas y sector artesanal, a pesar de que conocen los beneficios de la alineación, no cuentan con los recursos económicos necesarios. Para el diseño del prototipo se emplea 2 relojes palpadores soportados sobre 2 dispositivos de acoplamiento fabricados con poliácido láctico por el método de deposición de material, mismos que a su vez se aseguran sobre un soporte metálico ajustado en cada eje, de tal manera que tan solo se requiere del giro de 180° del acoplamiento para obtener las lecturas que se ingresan en una aplicación informática que proporciona los valores de corrección para la alineación, así como el nivel de desalineación alcanzado. De esta manera se consigue un procedimiento de alineación simple, preciso y económico. La hipótesis consiste en que el nivel de la alineación que se alcanza con esta propuesta es igual al obtenido con el método láser, cuya demostración se realiza comparando los valores de corrección de la alineación generados en un módulo de pruebas con el estadístico paramétrico t student.

Palabras clave: Desalineación; alineación de eje; alineación láser; reloj comparador.

Abstract

The objective of this research is to develop a new low-cost method for the alignment of rotational machine axes, since in small companies, micro-enterprises and the artisanal sector, despite knowing the benefits of alignment, they do not count with the necessary financial resources. For the design of the prototype, 2 probing clocks supported on 2 coupling devices made of lactic polyacid by the material deposition method are used, which in turn are secured on a metal support adjusted on each axis, in such a way that only 180° rotation of the coupling is required to obtain readings that are entered into a computer application that provides correction values for alignment as well as the level of misalignment reached. In this way a simple, precise and economical alignment procedure is achieved. The hypothesis is that the level of alignment achieved with this proposal is equal to that obtained with the laser method, which is demonstrated by comparing the alignment correction values generated in a test module with the parametric t-student statistic.

Keywords: Misalignment; axis alignment; laser alignment; dial gauge.

Resumo

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

O objetivo desta pesquisa é desenvolver um novo método de baixo custo para o alinhamento de eixos de máquinas rotacionais, uma vez que em pequenas empresas, microempresas e no setor artesanal, apesar de conhecerem os benefícios do alinhamento, eles não contam com os recursos financeiros necessários. Para o projeto do protótipo, são utilizados 2 relógios de sondas suportados em 2 dispositivos de acoplamento feitos de poliácido láctico pelo método de deposição de material, que por sua vez são fixados em um suporte metálico ajustado em cada eixo, de maneira que É necessária uma rotação de 180° do acoplamento para obter leituras inseridas em um aplicativo de computador que forneça valores de correção para o alinhamento, bem como o nível de desalinhamento alcançado. Dessa maneira, é alcançado um procedimento de alinhamento simples, preciso e econômico. A hipótese é que o nível de alinhamento alcançado com esta proposta seja igual ao obtido com o método laser, demonstrado pela comparação dos valores de correção de alinhamento gerados em um módulo de teste com a estatística paramétrica de t-student.

Palavras-chave: Desalinhamento; alinhamento de eixos; alinhamento a laser; indicador de discagem.

Introducción

Se conoce como desalineación a la no coincidencia de las líneas centrales de rotación de dos o más ejes de una maquina (Piotrowski, 2007; Sánchez et al., 2007), que se produce comúnmente durante la instalación (Jalan & Mohanty, 2009). Es uno de los problemas más comunes en la industria en general (Lees, 2007; Mankowski & Wang, 2013), siendo responsable de aproximadamente la mitad de todos los daños prematuros de la máquina (Poste, 2001), causando casi el 60% de las fallas (Xu et al., 2018).

Específicamente produce efectos hidrodinámicos en el lubricante de los cojinetes de fricción, desgastándolo por cavitación (Lombera & Novo, 2018), también provoca fuerzas de acción en el acoplamiento (Patel & Darpe, 2009; Ulacia et al. 2018), incrementa la temperatura, como resultado del crecimiento de la fatiga (Tonks & Wang, 2017) y genera importantes pérdidas de capacidad de carga dinámica en los rodamientos (Corzo & González, 2012), afectando significativamente la vida útil esperada de estos elementos que funcionan en contacto con el eje.

Se considera a la desalineación como una de las principales causas de vibración de la maquinaria (Lees, 2007; Pennacchi, Vania, & Chatterton, 2012), alcanzando el 70% de los problemas de

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

vibración (Simm et al., 2016), asimismo, puede producir manifestaciones en la corriente eléctrica que alimenta a los motores de inducción (Verucchi et al. 2016), motivos por los cuales, reduce la seguridad y la fiabilidad (Lai et al., 2018).

Estos efectos físicos, provocan la distorsión de la base de la máquina debido a una posible expansión térmica desigual, hundimiento heterogéneo del suelo, sacudidas, etc. (Hori & Uematsu, 1980).

La disminución de la eficiencia energética es otro de los problemas técnicos más recurrentes y severos de la desalineación, ya que de acuerdo a observaciones realizadas en bombas sencillas con motor acoplado (White, 2010), la desalineación podría incrementar el consumo de energía hasta en un 11%, a pesar de que se utilice motores de alta eficiencia, debido a que se requiere de más energía para mover el acoplamiento. La energía perdida se disipa en forma de vibraciones y calor.

Estas observaciones descritas por White (2010) y que coinciden con publicaciones realizadas por el fabricante de equipos de alineación laser Prüftechnik Alignment Systems (Prüftechnik, 2014, 2017) son la referencia para estimar que en máquinas desalineadas se puede alcanzar en promedio una disminución del 5% del consumo eléctrico de los motores acoplados mediante la alineación de sus ejes.

Por lo tanto, la alineación de ejes es una solución eficaz para incrementar la fiabilidad y la seguridad de las máquinas, así como también, contribuye significativamente con la eficiencia energética de los sistemas motrices; por lo que, se constituye una alternativa viable para los países que buscan modificar y fortalecer su matriz productiva y energética como es el caso del Ecuador (MEER, 2016; Senplades, 2017) y de muchos otros países en vías de desarrollo.

Para solucionar el problema de la desalineación existen dos tipos de métodos, los sensoriales que utilizan los sentidos de la vista y tacto, que se realiza con reglas o calibres y depende de la apreciación visual de cada persona, por lo que son muy imprecisos. Por otro lado, los métodos instrumentales como la alineación con relojes palpadores y alineación con dispositivos láser, alcanzan precisiones elevadas; de los cuales, la tecnología láser es más rápida y precisa que el anterior (García, 2013; Sánchez et al., 2007), sin embargo es desproporcionalmente más costosa.

Por tal motivo, en el presente trabajo de investigación se plantea el desarrollo de un nuevo método económico para la alineación de ejes de máquinas rotacionales que como mucho tienen un costo de la veintava parte de la tecnología láser; para lo cual, se emplea 2 relojes palpadores soportados

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de políácido láctico

sobre 2 dispositivos de acoplamiento fabricados con políácido láctico (PLA) por impresión 3D, mismos que a su vez se aseguran sobre un soporte metálico ajustado en cada eje, de tal manera que tan solo se requiere del giro de 180° del acoplamiento para obtener las lecturas que se ingresan en una aplicación informática que arroja los valores de corrección para la alineación; de esta manera se consigue un procedimiento de alineación simple y económico. La hipótesis consiste en que el nivel de la alineación que se alcanza con esta propuesta es igual al obtenido con el método láser, cuya demostración se realiza con la ayuda del estadístico paramétrico de comparación de muestras de t student.

La relevancia de esta investigación consiste en que a pesar de que los métodos para la alineación de ejes de máquinas rotacionales existen desde hace varios años alrededor del mundo, en la mayoría de las empresas no le prestan la importancia necesaria, sobre todo en las pequeñas empresas, microempresas y sector artesanal; debido a que, a pesar de conocer el perjuicio energético y económico del desalineamiento, el costo para la adquisición de alineadores modernos y precisos es elevado.

Metodología

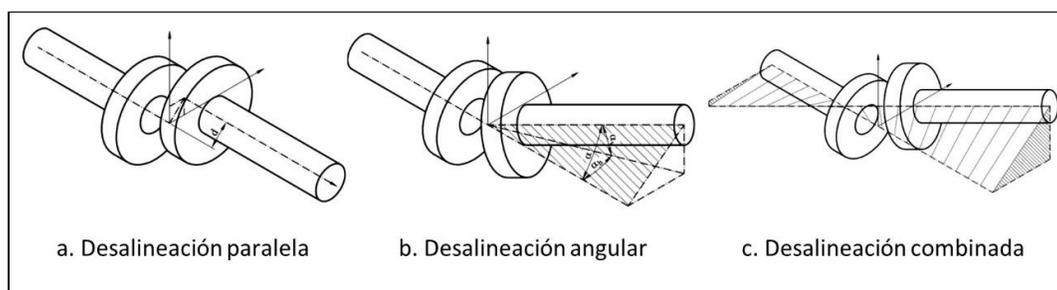
La alineación de los elementos de transmisión mecánica es una de las prácticas más antiguas y más recomendadas por los diseñadores de maquinaria (White, 2010). Su inobservancia recae directamente sobre tres afectaciones de relevancia:

- Disminuye el desempeño de la máquina
- Disminuye la vida útil de los componentes móviles
- Incrementa el consumo de energía para realizar el mismo trabajo

La desalineación se presenta cuando los ejes acoplados no coinciden en una misma línea de rotación (Fig. 1) (Piotrowski, 2007; Sánchez et al., 2007).

Figura 1. Tipos de desalineación de ejes

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico



Fuente: (Sánchez et al., 2007)

De acuerdo con la bibliografía consultada, existen dos tipos de métodos de alineación (Sánchez et al., 2007):

Métodos sensoriales: Utilizan los sentidos de la vista y tacto. Se realiza con reglas o calibres y depende de la apreciación visual de cada persona. Este método es muy impreciso, aunque es preferible a no realizar ningún ajuste.

Métodos instrumentales: Estos métodos utilizan instrumentos de medida. La recisión alcanzada es elevada y se dividen en dos: alineación con relojes palpadores y alineación con dispositivos láser. Este último es más rápido y preciso que el anterior, aunque más costoso.

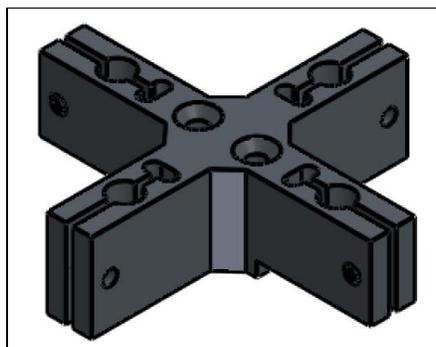
En el proceso de alineación; el primer eje pertenece a la máquina motriz que es la que genera la energía mecánica y generalmente es un motor eléctrico, y que a su vez es la que se mueve para conseguir la alineación. El segundo eje corresponde a la máquina conducida, misma que se mantiene fija todo el tiempo.

Prototipo

El prototipo consiste en un elemento en forma de cruz (Fig. 2), cuya función es asegurar los relojes comparadores sobre el soporte de cadena de la Fig. 5, que se monta sobre el eje de la máquina fija (Fig. 6).

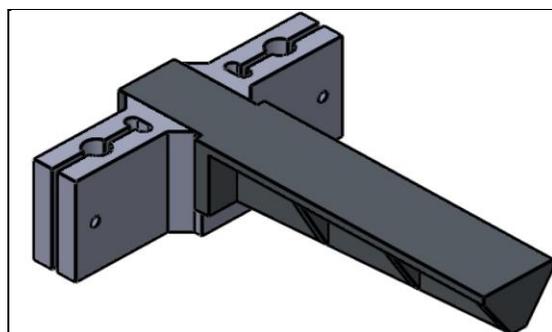
Figura 2. Porta relojes comparadores

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de políácido láctico



Un segundo elemento está conformado por una guía seguidora (Fig. 3) que se fija sobre el segundo soporte de cadena de la Fig. 5, que a su vez se monta sobre el eje de la máquina móvil (Fig. 6).

Figura 3. Guía seguidora



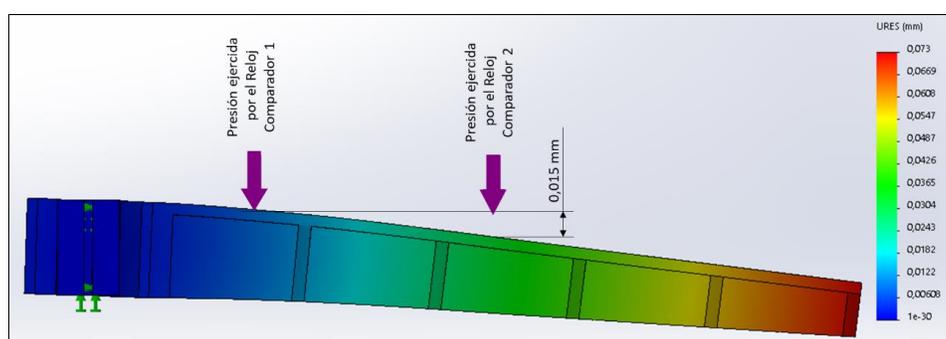
Tanto el porta relojes comparadores como la guía seguidora se elaboraron con políácido láctico (PLA), mediante un proceso de deposición de material (impresión 3D), con una boquilla de 0,4 mm, altura de capa de 0,2 mm, número de perímetros de 3 y densidad de relleno del 40% con patrón cúbico. Cabe mencionar que si se requiere de mayor rigidez puede incrementarse la densidad del relleno hasta el 80%.

Luego de la elaboración de la guía seguidora se requirió pulir la superficie plana que entra en contacto con los palpadores de los relojes comparadores utilizando lijas resistentes al agua de los siguientes números y secuencia 220, 280, 360 y 500. Este procedimiento se realizó colocando la lija sobre vidrio y con abundante agua; es recomendable que el lijado se realice en un solo sentido girando paulatinamente la guía seguidora 90°.

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de políácido láctico

El pandeo presentado por la guía seguidora de la Fig. 3 se resolvió mediante el método de elementos finitos en el software Solidworks, versión 2016, para esto se tomó en cuenta la presión que ejercen los relojes palpadores sobre la guía seguidora, dando como resultado una deformación de 0,015 mm entre los puntos de contacto (Fig. 4) que puede recuperarse propiciando un pequeño golpe en el extremo rojo de tal manera que no influye en las mediciones.

Figura 4. Porta relojes palpadores



Los 2 soporte de cadena que se sujetan a los ejes que se desea alinear (Fig. 5) son genéricos, por lo que se los puede adquirir con cualquier distribuidor de implementos industriales. Los empleados en esta investigación se caracterizan por tener dos varillas de 8 mm de diámetro separadas a 60 mm. También existe la posibilidad de construirlos localmente, en cuyo caso incluso el costo disminuye.

Figura 5. Soporte de cadena para alineación de ejes



Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de políácido láctico

Para el montaje se colocó la guía seguidora en el eje de la máquina móvil (M) y los relojes comparadores en el eje de la máquina fija (F) como indica la Fig. 6. Es importante verificar que los palpadores de los relojes comparadores queden situados a la mitad de su carrera.

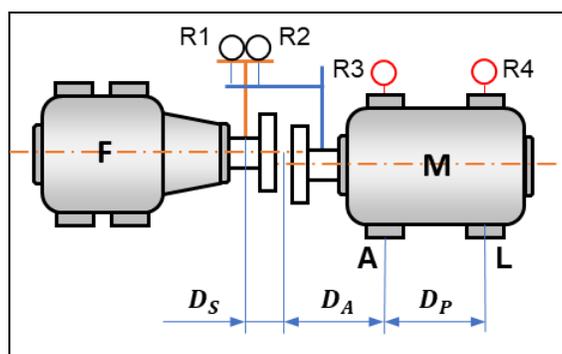
Figura 6. Montaje de los dispositivos de alineación



Para facilitar el proceso de alineación se colocó otros relojes comparadores (R3 y R4 de la Fig. 7) en sentido horizontal en la base de la máquina móvil a la altura de los pernos del lado libre y lado acople. Estos relojes indican con precisión el desplazamiento horizontal de la máquina móvil.

Una vez montados los dispositivos de alineación, con la ayuda de un flexómetro se obtuvo las medidas de las distancias entre el soporte de cadena y el centro del acople (D_S), desde el centro del acople hasta el perno del lado acople de la máquina móvil (D_A) y la distancia entre pernos de anclaje (D_P), tal como se indica en la fig. 7.

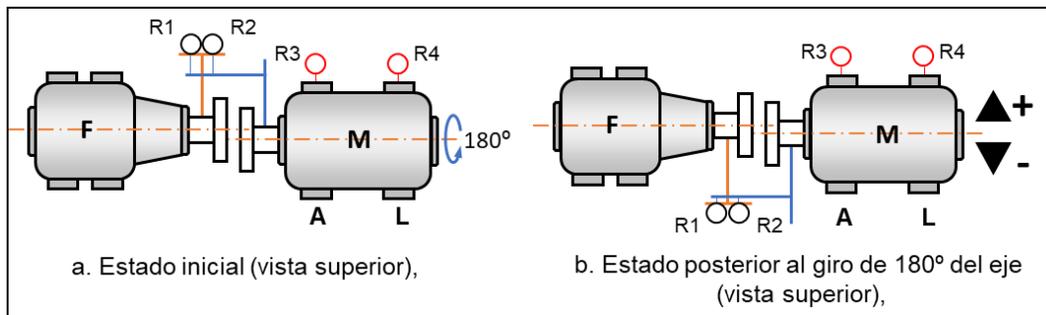
Figura 7. Alineación horizontal



Método de alineación horizontal

Para iniciar con el procedimiento de desalineación, los relojes comparadores R1 y R2 se colocan de manera horizontal (literal a de la Fig. 7) y se enceran. A continuación, se gira los ejes 180° como se indica en la Fig. 8 y se anota la lectura de los relojes (LH_M y LH_F).

Figura 8. Alineación horizontal



Para obtener los valores de corrección horizontal, las distancias de la Fig. 7 y las lecturas de los relojes comparadores se ingresan en las Ec. 1 y 2, mismas que al igual que las otras ecuaciones fueron obtenidas aplicando geometría Euclidiana.

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

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

Donde H_A es el valor de corrección para la alineación horizontal para el perno del lado acople (perno A de la Fig. 8), H_L es el valor de corrección para la alineación horizontal para el perno del lado libre (perno L de la Fig. 8), R es la distancia entre los palpadores de los relojes comparadores R1 y R2, LH_M es la variación producida en la lectura del reloj del lado de la máquina móvil después de girar los 180° y LH_F es la variación producida en la lectura del reloj del lado de la máquina fija después de girarlos 180°.

A continuación, se desplaza horizontalmente actuando sobre los pernos lado acopla (A) y lado libre (L) de la máquina móvil hasta que en los relojes comparadores R3 y R4 marquen lecturas iguales

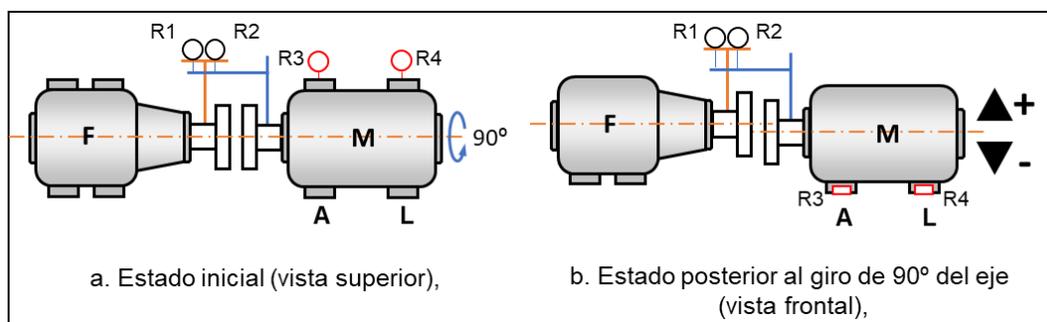
Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

a H_A y H_L respectivamente, donde los valores positivos o negativos indican el sentido del movimiento de acuerdo con lo mostrado en el literal b de la Fig. 8.

Método de alineación vertical

El proceso de alineación vertical inicia una vez que el nivel de desalineación horizontal está dentro de tolerancias. El primer paso consiste en retirar cualquier posible alza que se encuentre debajo de la máquina móvil y colocar el conjunto armado en sentido horizontal, como lo indica el literal a de la Fig. 9.

Figura 9. Alineación vertical



Una vez que el conjunto alcanza el plano horizontal, se encera los relojes comparadores R1 y R2; posteriormente, se gira 90° el dispositivo de alineación hasta quedar en sentido vertical como se indica en la Fig. 9 y se anota la lectura de los relojes (LV_F y LV_M).

Para obtener los valores de corrección vertical, se ingresan en las Ec. 3 y 4 las distancias y lecturas correspondientes.

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

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

Donde V_A es el valor de corrección para la alineación vertical para los pernos del lado acople (pernos A de la Fig. 9), V_L es el valor de corrección para la alineación vertical para los pernos del lado libre (pernos L de la Fig. 9), LV_M es la variación producida en la lectura del reloj del lado de

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

la máquina móvil después de girar los 90° y LV_F es la variación producida en la lectura del reloj del lado de la máquina fija después de girarlos 90° .

V_A Y V_L indican la variación de la altura que se debe compensar colocando o retirando láminas calibradas de acero inoxidable austenítico AISI 304, encajados en los pernos lado acopla (A) y lado libre (L) según lo indique el signo obtenido. Para valores positivos de V_A o V_L se debe incrementar la altura y para valores negativos se debe disminuir la altura de acuerdo con lo indicado en el literal b de la Fig. 9.

Los procesos de alineación vertical y horizontal deben repetirse hasta alcanzar el grado de tolerancia requeridos, para lo cual se calcula los respectivos niveles de desalineación con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$DP_H = \left| \frac{H_A + H_L}{2} \right| \quad \text{Ec. 5}$$

$$DA_H = 1000 \times \arctan \left| \frac{LH_M - LH_F}{2 * R} \right| \quad \text{Ec. 6}$$

$$DP_V = \left| \frac{V_A + V_L}{2} \right| \quad \text{Ec. 7}$$

$$DA_V = 1000 \times \arctan \left| \frac{LV_M - LV_F}{R} \right| \quad \text{Ec. 8}$$

Donde DP_H es el nivel de desalineación paralelo horizontal en milímetros [mm], DA_H es el nivel de desalineación angular horizontal en mili radianes [mrad] es el nivel de desalineación paralelo vertical en milímetros [mm] y es el nivel de desalineación angular vertical en mili radianes [mrad]. Los niveles de desalineación calculados con las Ec. 5 - 8 se comparan con los valores de la Tabla 1 para verificar que se alcanzó las tolerancias requeridas.

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

Tabla 1. Tolerancias de desalineación paralela y angular

Frecuencia de rotación de los ejes acoplados [rpm]	Nivel aceptable de desalineación paralela [mm]	Nivel excelente de desalineación paralela [mm]	Nivel aceptable de desalineación angular [mrad]	Nivel excelente de desalineación 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	0,1	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: Prüftechnik

Para facilitar la ejecución de los procedimientos de alineación horizontal y vertical descritos, se puede optar por la asistencia de una aplicación informática que procese automáticamente las ecuaciones requeridas (Ec. 1 - 8), como la observada en la Fig. 10, que fue desarrollada en una hoja de cálculo.

Figura 10. Asistente informático para la alineación de ejes

ASISTENTE PARA LA ALINEACIÓN DE EJES

ESPOCH

R [mm] = 60
 D_S [mm] = 53
 D_A [mm] = 49
 D_P [mm] = 177
 f [rpm] = 1800

ALINEACIÓN HORIZONTAL

$$H_A = \frac{(D_A - D_S) * (LH_M - LH_P) + (LH_M + LH_P)}{2 * R}$$

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

Pasadas	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
LH _F [mm]	-1,59	-0,33	-0,04		
LH _M [mm]	-1,65	-0,41	-0,04		
H _A [mm]	-0,81	-0,18	-0,02		
H _L [mm]	-0,90	-0,30	-0,02		
Des. Par. =	0,86	0,24	0,02		
Des. Ang. =	0,50	0,67	0,00		

Acceptable = P 0,08 < 0,8 Excel.= P 0,05 < 0,5

ALINEACIÓN VERTICAL

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

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

Pasadas	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
LV _F [mm]	-0,08	0,02			
LV _M [mm]	-0,10	0,03			
V _A [mm]	0,09	-0,02			
V _L [mm]	0,15	-0,05			
Des. Par. =	0,12	0,04			
Des. Ang. =	0,33	0,17			

Acceptable = P 0,08 < 0,8 Excel.= P 0,05 < 0,5

Método desarrollado por el Grupo de Investigación Ciencia del Mantenimiento CIMANT de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, mediante el proyecto de investigación "Desarrollo de medios y equipos para la alineación de ejes de maquinaria industrial"

Resultados y análisis

Para la validación del prototipo diseñado en la presente investigación se recogieron 4 muestras de 61 datos cada una (Tabla 2), correspondientes a los valores de corrección horizontal para los pernos del lado acople (H_A) y lado libre (H_L) alcanzados con el método propuesto y mediante la tecnología láser, para lo cual se empleó al alineador Optaling plus de la marca Prüftechnik.

Tabla 2. Valores de corrección horizontal alcanzados para los pernos del lado acople y libre

Nº	H_A Prototipo	H_L Prototipo	H_A Láser	H_L Láser
1	-0,06	-0,03	-0,03	0,00
2	0,05	-0,02	0,02	0,01
3	0,05	0,01	0,05	0,10
4	0,03	0,03	0,03	0,03
5	-0,01	-0,01	0,07	0,00
6	0,04	0,04	0,03	0,04
7	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
8	-0,10	0,04	-0,05	-0,03
9	-0,02	-0,03	-0,03	-0,02
10	0,05	-0,05	0,04	-0,01
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
61	-0,03	-0,04	0,02	0,02

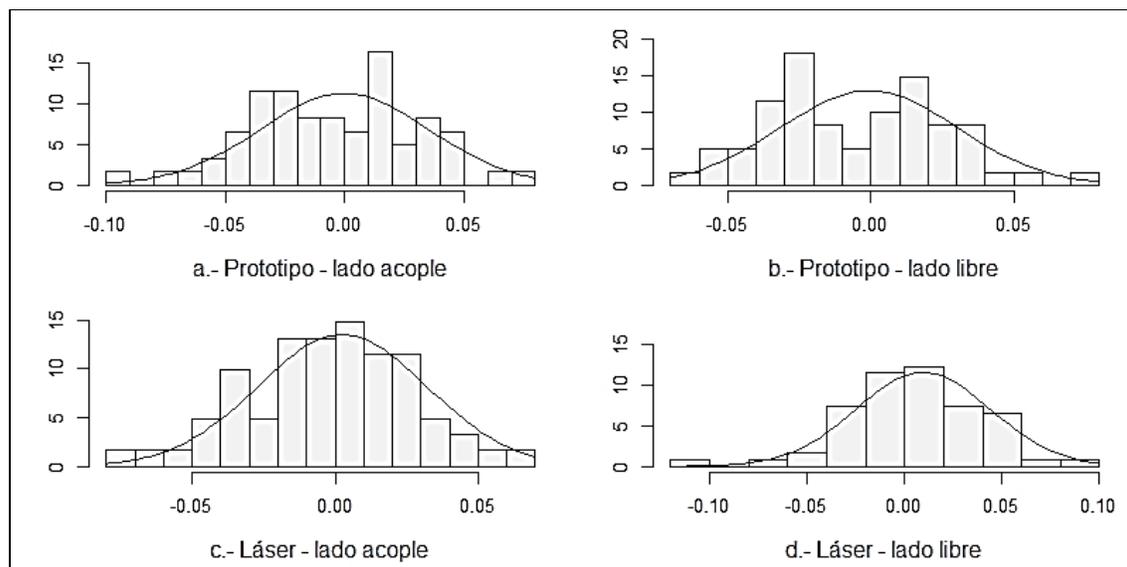
Los resultados estadísticos de las mediciones se encuentran sintetizados en la Tabla 3, en donde se puede observar que los valores de corrección alcanzados en las 4 muestras tienden a cero, en tanto que la desviación estándar es pequeña; sin embargo, son ligeramente mayor para los valores de corrección del prototipo, lo que sugiere que son más dispersas que las correspondientes a la alineación láser. Los respectivos histogramas de frecuencia se encuentran en la Fig. 10.

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de políácido láctico

Tabla 3. Valores estadísticos de las mediciones

Método	Perno por mover	Mínimo [mm]	Máximo [mm]	Media [mm]	Desviación estándar
Prototipo	Lado acople	-0,10	0,08	-0,00016	0,0356
Prototipo	Lado libre	-0,07	0,08	-0,00069	0,0309
Láser	Lado acople	-0,08	0,07	0,00249	0,0296
Láser	Lado libre	-0,11	0,10	0,00954	0,0095

Figura 10. Diagramas de frecuencias de los valores de corrección horizontal



Previo a la evaluación de la hipótesis se requiere realizar un test de normalidad de los datos, para lo que se recurre a la prueba de Shapiro-Wilk, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4, mismos que indican que para todos los casos el p-valor es mayor que 0,05; por lo tanto, se concluye que los datos se distribuyen normalmente con una confianza del 95%. Esta normalidad de los datos también se puede observar en los diagramas q-q de la Fig. 11.

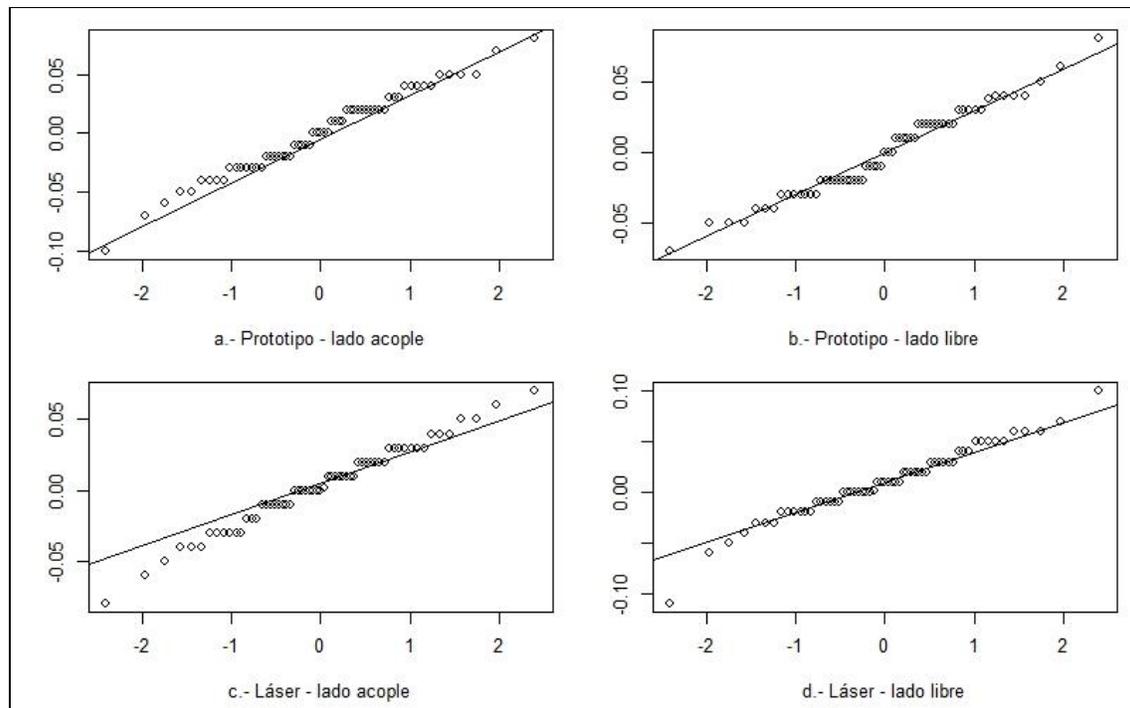
Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de políácido láctico

Tabla 4. Resultados de la prueba normalidad

Método	Perno por mover	W	P-Valor	Normalidad
Prototipo	Lado acople	0,98364	0,5889	Si se distribuye normalmente
Prototipo	Lado libre	0,97417	0,2234	Si se distribuye normalmente
Láser	Lado acople	0,98606	0,7158	Si se distribuye normalmente
Láser	Lado libre	0,97203	0,1755	Si se distribuye normalmente

Dado que en las pruebas de Shapiro-Wilk se encontró que todos los datos se distribuyen normalmente, se aplica el método paramétrico de t student para la demostración de la hipótesis; en donde la H_0 corresponde a la igualdad de las muestras, que indicaría que los valores de corrección alcanzados con el prototipo y con la alineación láser son iguales.

Figura 11. Diagramas q-q de los valores de corrección horizontal



En la evaluación de la hipótesis, el p-valor obtenido con la prueba t student es mayor que 0,05 (Tabla 5); por lo tanto, se acepta la H_0 y se concluye que no existe pruebas suficientes para

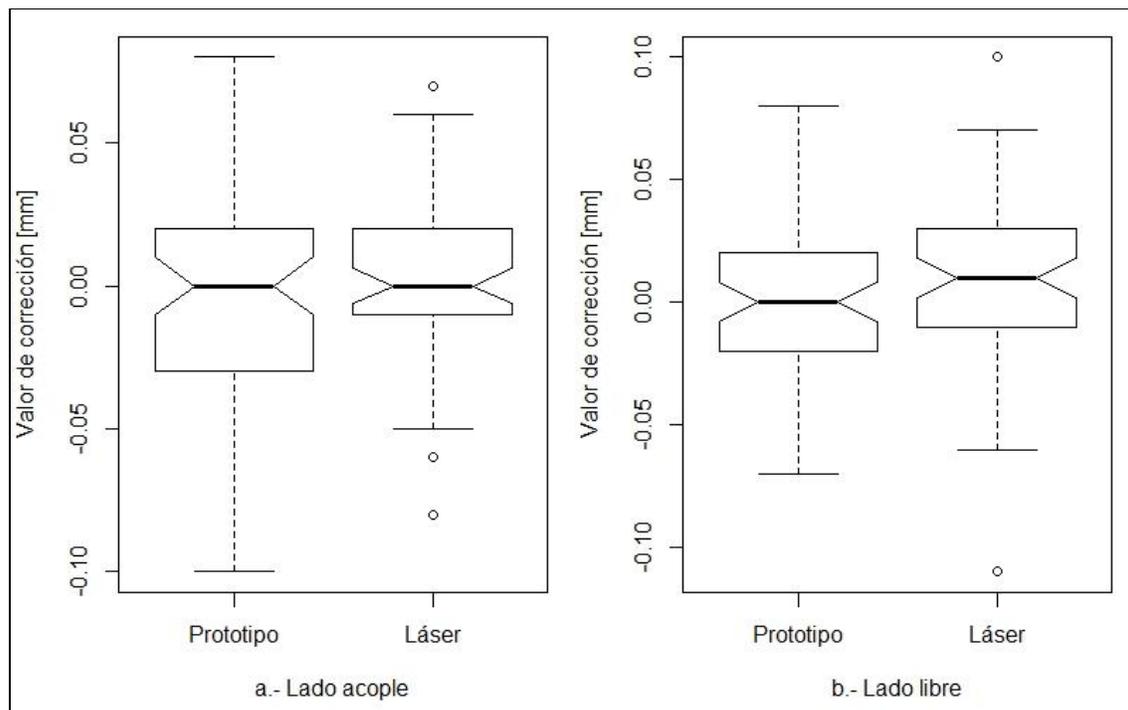
Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de políácido láctico

establecer que las muestras son diferentes con el 95% de confianza; por consecuencia, se demuestra que los valores de corrección alcanzados con el prototipo y con la alineación láser son iguales y por consiguiente se obtiene la misma precisión. La igualdad de las muestras también se puede evidenciar en los diagramas de caja de la Fig. 12.

Tabla 5. Resultados de la prueba t student.

Variabes Comparadas	T	DF	P-Valor
Lado acople	-0,44834	116,15	0,6547
Lado libre	-1,7213	118,52	0,0878

Figura 12. Diagramas de caja de los valores de corrección horizontal



Conclusiones

El método de alineación de ejes propuesto en la presente investigación proporciona resultados similares a los obtenidos con la alineación láser, aunque con un poco más de dispersión, lo que sugiere que la repetitividad es menor; sin embargo, con el prototipo se alcanzó un valor de corrección promedio más cercano a cero.

El diseño propuesto, permite el ensamblaje de un dispositivo para a la alineación de ejes con pocos componentes y por utilizar como materia el PLA procesado mediante deposición de material se consigue un producto de bajo costo de fabricación y bajo peso.

El pandeo de la guía seguidora de 0,015 mm no genera errores significativos en el proceso de alineación de los ejes, por consiguiente, se justifica su dimensionamiento y selección de material.

Referencias

1. Corzo, L. M., & González, G. (2012). Estimación analítica del efecto de la desalineación angular en la duración de rodamientos de bolas. *Revista Cubana de Ingeniería*, 3(3), 65–73. <https://doi.org/10.1234/rci.v3i3.120>
2. García, S. (2013). *Ingeniería de Mantenimiento - Manual Práctico Para la Gestión Eficaz del Mantenimiento. Volumen 2 (1ra. ed)*. Renovetec.
3. Hori, Y., & Uematsu, R. (1980). Influence of misalignment of support journal bearings on stability of a multi-rotor system. *Tribology International*, 13(5), 249–252. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(80\)90084-5](https://doi.org/10.1016/0301-679X(80)90084-5)
4. Jalan, A. K., & Mohanty, A. R. (2009). Model based fault diagnosis of a rotor-bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition. *Journal of Sound and Vibration*, 327(3–5), 604–622. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.07.014>
5. Lai, G., Liu, J., Liu, S., Zeng, F., Zhou, R., & Lei, J. (2018). Comprehensive optimization for the alignment quality and whirling vibration damping of a motor drive shafting. *Ocean Engineering*, 157, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.003>

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

6. Lees, A. W. (2007). Misalignment in rigidly coupled rotors. *Journal of Sound and Vibration*, 305(1–2), 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.04.008>
7. Lombera, H., & Novo, C. E. (2018). Algoritmo para determinar cavitación en un par eje-cojinete con ranura axial y desalineación paralela. *Ingeniería Mecánica*, 21(2), 108–116. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442018000200108
8. Mankowski, O., & Wang, Q. (2013). Real-time monitoring of wind turbine generator shaft alignment using laser measurement. In *Procedia CIRP* (Vol. 11, pp. 291–295). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.019>
9. MEER. (2016). Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035. Quito-Ecuador. Retrieved from <https://www.celec.gob.ec/hidronacion/images/stories/pdf/PLANEEmersionespañol.pdf>
10. Patel, T. H., & Darpe, A. K. (2009). Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(7), 2236–2252. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.04.004>
11. Pennacchi, P., Vania, A., & Chatterton, S. (2012). Nonlinear effects caused by coupling misalignment in rotors equipped with journal bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 30, 306–322. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.11.020>
12. Piotrowski, J. (2007). *Shaft Alignment Handbook* (3ra. ed). CRC Press.
13. Poste, P. (2001). Taking the squint out of shaft alignment techniques. *World Pumps*, 418(418), 20–24. [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(01\)80283-2](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(01)80283-2)
14. Prüftechnik. (2014). Porqué alinear las máquinas. Retrieved November 15, 2014, from <http://clicks.aweber.com/y/ct/?l=J23J.&m=3zUhq6BQTYVS5w3&b=Y94i6jHFFJUIT1BRYADFg>
15. Prüftechnik. (2017). Cómo pueden reducirse los costes energéticos mediante una alineación rigurosa. Germany. Retrieved from <https://www.pruftechnik.com/es-ES/Conocimiento/Ideas-de-mantenimiento/Historias-de-éxito-y-articulos-profesionales/Wasted-energy-means-wasted-dollars.html>
16. Sánchez, F., González, A., Sancho, J., & Rodríguez, P. (2007). *Mantenimiento Mecánico de Máquinas* (2da ed). Universitat Jaume I, D. L.

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de políacido láctico

17. Senplades. (2017). Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Toda una Vida. Quito-Ecuador. Retrieved from https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL_0K.compressed1.pdf
18. Simm, A., Wang, Q., Huang, S., & Zhao, W. (2016). Laser based measurement for the monitoring of shaft misalignment. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 87, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.034>
19. Tonks, O., & Wang, Q. (2017). The detection of wind turbine shaft misalignment using temperature monitoring. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 17, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.05.001>
20. Ulacia, J., Larrañaga, A., Arana, J., Elizegi, J., & Esnoala. (2018). Predicción de vida a fatiga de acoplamientos dentados abombados con elevadas desalineaciones. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 22(2), 91–101.
21. Verucchi, C., Bossio, J., Bossio, G., & Acosta, G. (2016). Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80, 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.04.035>
22. White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones* (1ra ed). USA: Editorial Azima DLI.
23. Xu, B., Chen, D., Zhang, H., Li, C., & Zhou, J. (2018). Shaft mis-alignment induced vibration of a hydraulic turbine generating system considering parametric uncertainties. *Journal of Sound and Vibration*, 435, 74–90. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.008>

References

1. Corzo, L. M., & González, G. (2012). Analytical estimation of the effect of angular misalignment on the life of ball bearings. *Cuban Magazine of Engineering*, 3 (3), 65–73. <https://doi.org/10.1234/rci.v3i3.120>
2. García, S. (2013). *Maintenance Engineering - Practical Manual For Effective Maintenance Management*. Volume 2 (1st ed.). Renovetec.

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

3. Hori, Y., & Uematsu, R. (1980). Influence of misalignment of support journal bearings on stability of a multi-rotor system. *Tribology International*, 13 (5), 249–252. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(80\)90084-5](https://doi.org/10.1016/0301-679X(80)90084-5)
4. Jalan, A. K., & Mohanty, A. R. (2009). Model based fault diagnosis of a rotor-bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition. *Journal of Sound and Vibration*, 327 (3–5), 604–622. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.07.014>
5. Lai, G., Liu, J., Liu, S., Zeng, F., Zhou, R., & Lei, J. (2018). Comprehensive optimization for the alignment quality and whirling vibration damping of a motor drive shafting. *Ocean Engineering*, 157, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.003>
6. Lees, A. W. (2007). Misalignment in rigidly coupled rotors. *Journal of Sound and Vibration*, 305 (1–2), 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.04.008>
7. Lombera, H., & Novo, C. E. (2018). Algorithm to determine cavitation in a shaft-bearing pair with axial groove and parallel misalignment. *Mechanical Engineering*, 21 (2), 108–116. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442018000200108
8. Mankowski, O., & Wang, Q. (2013). Real-time monitoring of wind turbine generator shaft alignment using laser measurement. In *Procedia CIRP* (Vol. 11, pp. 291–295). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.019>
9. MEER. (2016). National Energy Efficiency Plan 2016-2035. Quito, Ecuador. Retrieved from <https://www.celec.gob.ec/hidronacion/images/stories/pdf/PLANEEversionespañol.pdf>
10. Patel, T. H., & Darpe, A. K. (2009). Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 (7), 2236–2252. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.04.004>
11. Pennacchi, P., Vania, A., & Chatterton, S. (2012). Nonlinear effects caused by coupling misalignment in rotors equipped with journal bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 30, 306–322. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.11.020>
12. Piotrowski, J. (2007). *Shaft Alignment Handbook* (3rd ed.). CRC Press.
13. Poste, P. (2001). Taking the squint out of shaft alignment techniques. *World Pumps*, 418 (418), 20–24. [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(01\)80283-2](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(01)80283-2)

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

14. Prüftechnik. (2014). Why align the machines. Retrieved November 15, 2014, from <http://clicks.aweber.com/y/ct/?l=J23J.&m=3zUhq6BQTYVS5w3&b=Y94i6jHFFEJUIT1BRYADFg>
15. Prüftechnik. (2017). How energy costs can be reduced through rigorous alignment. Germany. Retrieved from <https://www.pruftechnik.com/es-ES/Conocimiento/Ideas-de-mantenimiento/Historias-de-éxito-y-articulos-profesionales/Wasted-energy-means-wasted-dollars.html>
16. Sánchez, F., González, A., Sancho, J., & Rodríguez, P. (2007). Mechanical Maintenance of Machines (2nd ed). Universitat Jaume I, D. L.
17. Senplades. (2017). National Development Plan 2017-2021. All Life. Quito, Ecuador. Retrieved from https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL_0K.compressed1.pdf
18. Simm, A., Wang, Q., Huang, S., & Zhao, W. (2016). Laser based measurement for the monitoring of shaft misalignment. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 87, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.034>
19. Tonks, O., & Wang, Q. (2017). The detection of wind turbine shaft misalignment using temperature monitoring. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 17, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.05.001>
20. Ulacia, J., Larrañaga, A., Arana, J., Elizegi, J., & Esnoala. (2018). Prediction of fatigue life of crowned toothed couplings with high misalignments. *Iberoamerican Journal of Mechanical Engineering*, 22 (2), 91–101.
21. Verucchi, C., Bossio, J., Bossio, G., & Acosta, G. (2016). Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80, 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.04.035>
22. White, G. (2010). *Introduction to Vibration Analysis* (1st ed). USA: Azima DLI Publishing House.
23. Xu, B., Chen, D., Zhang, H., Li, C., & Zhou, J. (2018). Shaft mis-alignment induced vibration of a hydraulic turbine generating system considering parametric uncertainties. *Journal of Sound and Vibration*, 435, 74–90. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.008>

Referências

1. Corzo, L.M. & González, G. (2012). Estimativa analítica do efeito do desalinhamento angular na vida útil de rolamentos de esferas. *Revista Cubana de Engenharia*, 3 (3), 65–73. <https://doi.org/10.1234/rci.v3i3.120>
2. García, S. (2013). *Engenharia de manutenção - Manual prático para gerenciamento eficaz da manutenção*. Volume 2 (1ª ed.). Renovetec.
3. Hori, Y. & Uematsu, R. (1980). Influência do desalinhamento dos mancais de apoio na estabilidade de um sistema com vários rotores. *Tribology International*, 13 (5), 249–252. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(80\)90084-5](https://doi.org/10.1016/0301-679X(80)90084-5)
4. Jalan, A.K. & Mohanty, A.R. (2009). Diagnóstico de falhas baseado em modelo de um sistema com rotor para desalinhamento e desequilíbrio em condições de estado estacionário. *Journal of Sound and Vibration*, 327 (3–5), 604–622. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.07.014>
5. Lai, G., Liu, J., Liu, S., Zeng, F., Zhou, R., & Lei, J. (2018). Otimização abrangente para a qualidade do alinhamento e amortecimento de vibração em rotação de um eixo de acionamento de motor. *Ocean Engineering*, 157, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.003>
6. Lees, A.W. (2007). Desalinhamento em rotores rigidamente acoplados. *Journal of Sound and Vibration*, 305 (1–2), 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.04.008>
7. Lombera, H., & Novo, C.E. (2018). Algoritmo para determinar a cavitação em um par de rolamentos de eixo com ranhura axial e desalinhamento paralelo. *Engenharia Mecânica*, 21 (2), 108-116. Recuperado em http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442018000200108
8. Mankowski, O. & Wang, Q. (2013). Monitoramento em tempo real do alinhamento do eixo do gerador de turbinas eólicas usando medição a laser. In *Procedia CIRP* (Vol. 11, pp. 291–295). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.019>
9. MEER. (2016). *Plano Nacional de Eficiência Energética 2016-2035*. Quito, Equador. Recuperado de <https://www.celec.gob.ec/hidronacion/images/stories/pdf/PLANEEvercionespañol.pdf>

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

10. Patel, T.H. & Darpe, A.K. (2009). Investigações experimentais na resposta à vibração de rotores desalinhados. *Sistemas Mecânicos e Processamento de Sinais*, 23 (7), 2236-2252. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.04.004>
11. Pennacchi, P., Vania, A. e Chatterton, S. (2012). Efeitos não lineares causados por desalinhamento do acoplamento em rotores equipados com mancais de munhão. *Sistemas Mecânicos e Processamento de Sinais*, 30, 306–322. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.11.020>
12. Piotrowski, J. (2007). *Manual de alinhamento de eixos* (3ª ed.). CRC Pressione.
13. Poste, P. (2001). Tirando o estrabismo das técnicas de alinhamento do eixo. *Bombas Mundiais*, 418 (418), 20–24. [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(01\)80283-2](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(01)80283-2)
14. Prüftechnik. (2014). Por que alinhar as máquinas. Recuperado em 15 de novembro de 2014, de <http://clicks.aweber.com/y/ct/?l=J23J.&m=3zUhq6BQTYVS5w3&b=Y94i6jHFFEJUIT1BRYADFg>
15. Prüftechnik. (2017). Como os custos de energia podem ser reduzidos através de alinhamento rigoroso. Alemanha. Recuperado em <https://www.pruftechnik.com/es-ES/Conocimiento/Ideas-de-mantenimiento/Historias-de-éxito-y-articulos-profesionales/Wasted-energy-means-wasted-dollars.html>
16. Sánchez, F., González, A., Sancho, J. e Rodríguez, P. (2007). *Manutenção Mecânica de Máquinas* (2ª ed). Universidade Jaume I, D. L.
17. Senplades. (2017). *Plano Nacional de Desenvolvimento 2017-2021. Toda a vida*. Quito, Equador. Recuperado em https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL_0K.compressed1.pdf
18. Simm, A., Wang, Q., Huang, S. e Zhao, W. (2016). Medição com laser para o monitoramento do desalinhamento do eixo. *Medição: Journal of International Measurement Confederation*, 87, 104-116. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.034>
19. Tonks, O., & Wang, Q. (2017). A detecção de desalinhamento do eixo da turbina eólica usando monitoramento de temperatura. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 17, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.05.001>

Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico

20. Ulacia, J., Larrañaga, A., Arana, J., Elizegi, J. e Esnoala. (2018). Previsão da vida à fadiga de acoplamentos dentados coroados com altos desalinhamentos. *Revista Ibero-americana de Engenharia Mecânica*, 22 (2), 91-101.
21. Verucchi, C., Bossio, J., Bossio, G., & Acosta, G. (2016). Detecção de desalinhamento em motores de indução com acoplamento flexível por meio de análise de torque estimada e MCSA. *Sistemas mecânicos e processamento de sinais*, 80, 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.04.035>
22. White, G. (2010). *Introdução à Análise de Vibração* (1ª ed). EUA: Azima DLI Publishing House.
23. Xu, B., Chen, D., Zhang, H., Li, C. e Zhou, J. (2018). Vibração induzida por desalinhamento de eixo de um sistema de geração de turbina hidráulica, considerando incertezas paramétricas. *Jornal de Som e Vibração*, 435, 74-90. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.008>

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).