



Universidad de Oviedo

Escuela Superior de la Marina Civil de Gijón

Trabajo Fin de Máster

ALINEACIÓN DE EQUIPOS

Para acceder al Título de Máster Universitario en

TECNOLOGÍAS MARINAS Y MANTENIMIENTO

Autor: Nicolás Álvarez Álvarez

Tutor: Javier Faes Fernández

Septiembre – 2020



Índice.

1. OBJETIVO.	6
2. INTRODUCCIÓN.	7
3. ALINEACIÓN. DEFINICIÓN Y TIPOS DE DESALINEAMIENTO.	8
3.1 TIPOS DE DESALINEAMIENTO.	9
3.1.1 <i>Desalineamiento angular.</i>	9
3.1.2 <i>Desalineamiento paralelo.</i>	10
3.2 PROBLEMAS DEL DESALINEAMIENTO.	12
4. ACOPLÉS.	15
4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS ACOPLAMIENTOS:	15
4.2 TIPOS DE ACOPLÉ.	16
4.2.1 <i>Acoples rígidos.</i>	16
4.2.2 <i>Acoples flexibles.</i>	16
4.2.2.1. <i>Miniatura.</i>	16
4.2.2.2. <i>Acoplamientos flexibles mecánicos.</i>	17
4.2.2.3. <i>Acoplamientos de elastómeros.</i>	19
4.2.2.4. <i>Membrana metálica;</i>	20
4.3 LUBRICACIÓN EN ACOPLAMIENTOS FLEXIBLES.	21
5. ALINEACIÓN DE ACOPLÉS. PROCEDIMIENTOS DE ALINEACIÓN.	23
5.1 OPERACIONES GENERALES PREVIAS.	23
5.2 ALINEACIÓN CON REGLA Y GALGA	24
5.3 ALINEACIÓN CON RELOJ COMPARADOR.	26
5.3.1 <i>Método de borde y cara.</i>	26
5.3.2 <i>Método de comparador inverso.</i>	27
5.4 ALINEACIÓN CON EQUIPO LÁSER.	28
5.5 FENÓMENO EXTERNO PARA TENER EN CUENTA: "PATA COJA".	31
5.5.1 <i>Procedimiento con reloj comparador:</i>	31
6. ALINEACIÓN DE CORREAS.	33
6.1 MÉTODOS DE ALINEACIÓN DE POLEAS.	33
6.1.1 <i>Métodos convencionales.</i>	34
6.1.1.1. <i>Método de comprobación de la desalineación paralela con regla.</i>	34
6.1.1.2. <i>Método de comprobación de la desalineación angular con regla.</i>	34
6.1.1.3. <i>Método de comprobación de desalineación angular con cuerda.</i>	34
6.1.2 <i>Métodos láser</i>	35
6.1.3 <i>Factor externo a la alineación. Tensión en correas.</i>	36
7. CASO PRÁCTICO. LÍNEA DE EJES DE UN BUQUE.	37
7.1 INTRODUCCIÓN TEÓRICA.	37
7.1.1 <i>Eje motor.</i>	37
7.1.2 <i>Eje intermedio.</i>	38
7.1.3 <i>Eje de cola o portahélice.</i>	38
7.1.4 <i>Elementos que componen la línea de ejes.</i>	39
7.2 ALINEACIÓN DE LA LÍNEA DE EJES DE UN BUQUE.	40
7.3 ANÁLISIS DE TENSIÓN SOBRE EL EJE DE TRANSMISIÓN DE UN BUQUE.	42
8. CONCLUSIÓN.	52
9. BIBLIOGRAFÍA	53



Tabla de ilustraciones.

Ilustración 1. Desalineación angular.	9
Ilustración 2. Desalineación angular. GAP.	9
Ilustración 3. Desalineaciones Angulares. Fuente:CETAI.....	10
Ilustración 4. Desalineación paralela.	10
Ilustración 5. Desalineación combinada.	11
Ilustración 6. SAG and GAP. Fuente: Congreso Internacional de la Sociedad de Mecánicos Croatas.	11
Ilustración 7. Acoplamiento desalineado. Fuente: CETAI.	14
Ilustración 8. Acople tipo miniatura. Fuente: Tecnopower.	16
Ilustración 9. Acople de cadena. Fuente: Industrialclutch.	17
Ilustración 10. Acople de engranaje. Fuente: IndiaMART.....	17
Ilustración 11. Acople de cinta metálica. Fuente: Direct Industry	18
Ilustración 12. Sistema cardán. Fuente: Trazoide.	18
Ilustración 13. Sistema de cardan doble. Fuente: Ecured.....	18
Ilustración 14. Acople Geislinger. Fuente: Geislinger GmbH.	19
Ilustración 15. Pin Drive. Fuente: Everpower.	19
Ilustración 16. Acoplamiento elástico. Fuente: Vulkan Couplings.....	20
Ilustración 17. Acoplamiento de membrana metálica. Fuente: Rexnord.	20
Ilustración 18. Diferencia entre acoplamiento de disco flexible y de diafragma. Fuente: Altra Industrial Motion.	21
Ilustración 19. Acoplamiento de bomba centrífuga con avería por falta de lubricación. Fuente: Pfizer.	22
Ilustración 20. Alineación de bombas con sistema láser.....	24
Ilustración 21. Alineación con reglas y galgas. Medida con las reglas.	25
Ilustración 22. Alineación con reglas y galgas. Reajuste con galga.	25
Ilustración 23. Reloj comparador marca DRAPER. Fuente: DRAPER TOOLS.....	26
Ilustración 24. Método de borde y cara.....	27
Ilustración 25. Angularidad en método de borde y cara.	27
Ilustración 26. Método del comparador inverso.....	28
Ilustración 27. Angularidad en el método de comprador inverso.	28
Ilustración 28. Equipo portátil de alineación láser. Fuente: Fluke.....	31
Ilustración 29. Reloj comparador en comprobación de "pata coja". Fuente: CETAI.	32
Ilustración 30. Desalineación en poleas. Fuente: Power-MI.	33
Ilustración 31.Desfase en correa. Detección con regla. Fuente: SKF.	34



Ilustración 32. Desalineamiento angular en correa. Detección con regla. Fuente: SKF.	34
Ilustración 33. Desalineamiento angular. Detección con cuerda. Fuente: SKF.....	35
Ilustración 34. Cabezales de alineación láser colocados sobre las poleas. Fuente: Seiffert Industrial.	35
Ilustración 35. Alineación de poleas con sistema láser. Fuente: Seiffert Industrial.	35
Ilustración 36. Eje motor.....	38
Ilustración 37. Eje intermedio.....	38
Ilustración 38. Eje de cola.	39
Ilustración 39. Eje de un buque.....	41
Ilustración 40. Modelo sobre el que se realiza el ensayo con cotas de diámetro (mm).	42
Ilustración 41. Medida total del eje.....	42
Ilustración 42. Medidas del eje intermedio y el eje de cola.	43
Ilustración 43. Fuerza aplicada sobre el eje.	44
Ilustración 44. Desplazamiento de eje.	47
Ilustración 45. Desplazamiento del eje en el eje X.	47
Ilustración 46. Desplazamiento en eje X.....	48
Ilustración 47. Desplazamiento en el eje Y.....	48
Ilustración 48. Desplazamiento en el eje Y.....	49
Ilustración 49. Desplazamiento en el eje Z.....	49
Ilustración 50. Desplazamiento en el eje Z.....	50



Índice de tablas.

Tabla 1. Tolerancias para la alineación de ejes con acoples cortos. Fuente: Lu-deca.	29
Tabla 2. Datos sobre el modelo utilizado.....	43
Tabla 3. Elementos de acero al carbono	43
Tabla 4. Elementos de acero forjado	44
Tabla 5. Fuerza aplicada sobre la línea de ejes.....	46
Tabla 6. Resumen de resultados.	51



Índice de gráficos.

Gráfico 1. Fallos en máquinas. Fuente: Dinamox.....	8
Gráfico 2. Vida de rodamiento. Fuente: CETAI.	12
Gráfico 3. Desgaste en cierres mecánicos. Fuente: CETAI.....	13
Gráfico 4. La desalineación y el consumo de eléctrico. Fuente: CETAI.	13
Gráfico 5. Gráfico HIDRA para cálculo del empuje de la hélice kW/rpm. Fuente: Diego Ramírez López.	45
Gráfico 6. Gráfico HIDRA para cálculo del empuje de la hélice kW/rpm. Fuente: Diego Ramírez López.	46



1. Objetivo.

El objetivo de este trabajo es una descripción de los tipos de alineación que podemos encontrar a bordo de un buque mercante o en la industria, ya que la alineación cada vez está tomando más relevancia en los planes de mantenimiento.

En este trabajo se busca conocer qué es la alineación y porque ha de realizarse. También, diversas formas de realizarla; desde las más tradicionales, que no necesitan de equipos sofisticados de medición, hasta las más tecnológicas utilizadas en la industria, que necesitan de equipos más sofisticados para su ejecución.

Para realizar correctamente la alineación es necesario seguir un método, tanto en las alineaciones con reloj comparador como en la alineación láser, en este trabajo se busca conocer esos métodos que se utilizan en la industria y deben llevarse a cabo minuciosamente con técnicos preparados en la materia, ya que una alineación incorrecta reduce drásticamente la vida útil del equipo.

Para entender la alineación se elabora un estudio entre los distintos tipos de alineamiento y factores que la afectan. Tanto en acoplamientos como en correas, para acabar con el caso de la línea de ejes de un buque donde podremos observar la desviación que se produce en un eje por efecto de la fuerza axial producida por la hélice, provocando así desalineamientos.

En el caso práctico de este trabajo, se busca conocer la desviación que pueden sufrir los ejes que conectan la hélice con el motor, con lo que se pretende demostrar que la alineación no solo debe realizarse durante el montaje de los equipos, sino que es una operación que debe realizarse periódicamente. Por lo que deberían programarse en los planes de mantenimiento tanto de la industria como en los buques para alargar la vida útil de los equipos.



2. Introducción.

De acuerdo con la RAE **alinear** consiste en “Ajustar en línea dos o más elementos de un mecanismo para su correcto funcionamiento”. (ASALE & RAE, s. f.).

En la primera parte de este trabajo se definen los tipos de desalineamiento, así como los problemas que este puede causar.

En la segunda parte, se tratan los diferentes tipos de acoplamiento que existen en la industria para unir dos ejes de rotación.

En la tercera parte, se explica cómo alinear ejes, tanto los métodos tradicionales como los más complejos que necesitan de maquinaria especializada.

En la cuarta parte, se desarrolla el tema de las correas, tanto definición como alineación en equipos.

Para concluir, se elabora un caso práctico sobre la desviación en el eje de cola de un buque por acción de la fuerza axial, para comprender la importancia de la alineación periódica en los equipos y la necesidad de ser incluida en los planes de mantenimiento.

Aunque el Sistema Internacional establezca que la medida estándar son los metros, debido a la precisión con la que se trabaja en los procesos de alineación este trabajo utiliza el milímetro como medida general.



3. Alineación. Definición y tipos de desalineamiento.

La alineación de máquinas en el sector industrial es un proceso de ajuste que sirve para mejorar la funcionalidad de estas. En sistemas como turbinas, bombas, ejes de transmisión o motores térmicos alternativos todos los componentes deben de estar correctamente alineados. («Pumpen ausrichten mit Unterlegblechen», s. f.).

En la actualidad, la industria emplea máquinas rotativas para la mayoría de sus actividades, por lo que la alineación es un factor muy importante para el correcto funcionamiento de estas y evitar así, pérdidas económicas por roturas o envejecimiento prematuro de las máquinas. Según John Piotrowski, el desalineamiento hace perder a la industria norteamericana millones de dólares todos los años, estima que el 80% de los fallos en máquinas se deben a una incorrecta alineación. (Piotrowski, 2006).

En la Conferencia Internacional de Mantenimiento IMC-2012, se llegó a la conclusión que la desalineación provoca el mayor número de fallos en las máquinas. Un estudio realizado por expertos en la industria brasileña afirma que el 50% de las paradas de máquinas son a causa de la desalineación. («Desalineación del eje y su contribución a fallas mecánicas», 2020).

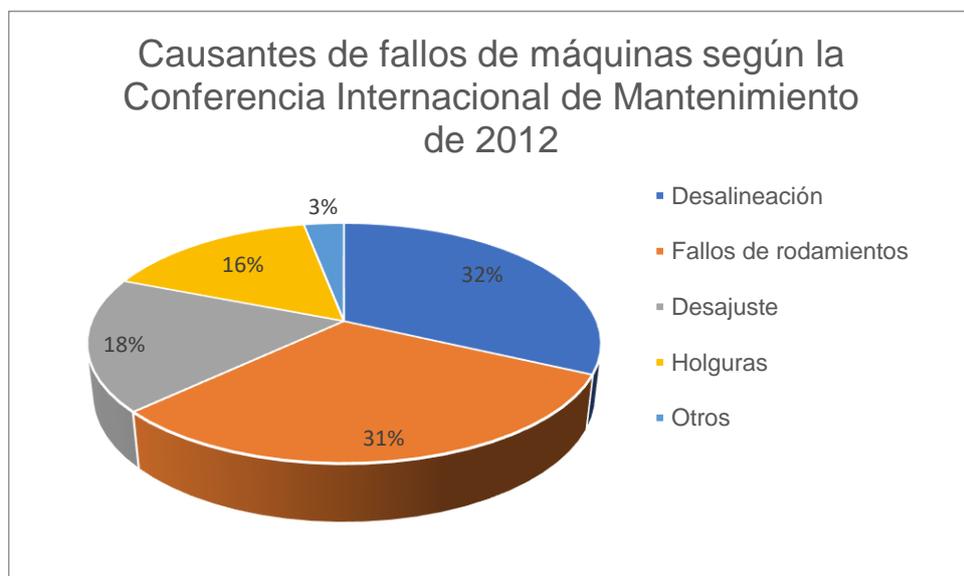


Gráfico 1. Fallos en máquinas. Fuente: Dinamox.



3.1 Tipos de desalineamiento.

3.1.1 Desalineamiento angular.

El desalineamiento angular sucede cuando las caras del eje se encuentran separadas formando un ángulo, de tal manera que la separación entre ambos ejes no es uniforme en toda la superficie del acoplamiento. Es un dato para tener en cuenta porque con el (σ) y con el diámetro de acople, mediante multiplicación podemos obtener la diferencia de apertura “GAP”¹, equivalente al perímetro de los acoples, como se explica en la ilustración 2. Esta desalineación se puede observar en la ilustración 1. (*Desalineación Angular*, s. f.).

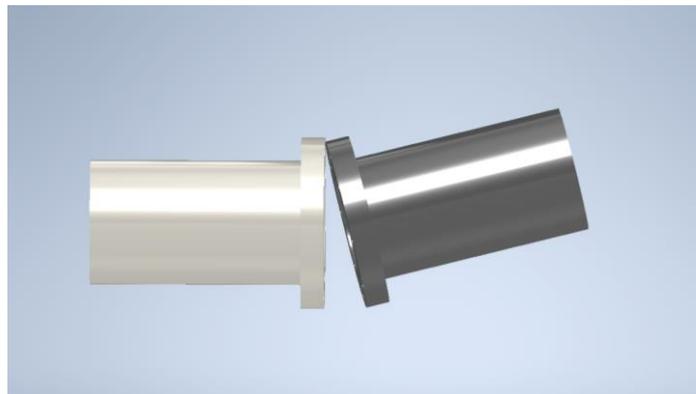


Ilustración 1. Desalineación angular.

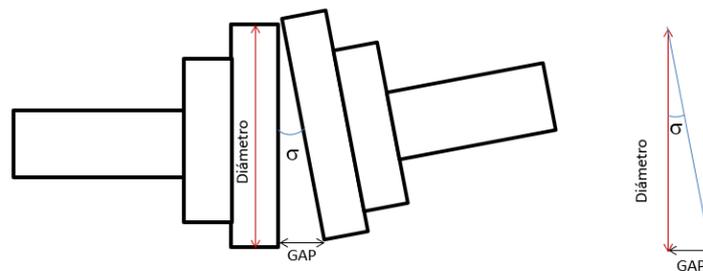


Ilustración 2. Desalineación angular. GAP.

¹ GAP: palabra inglesa que en español significa “Holgura”.



Las unidades de medida habituales son grados² o mrad³, incluso en ocasiones se expresa como una pendiente en mm/m. Ya que, si sabemos el ángulo y lo multiplicamos por el diámetro del acople, obtendremos la abertura equivalente. Como se puede observar en la Ilustración 3, con un mismo ángulo de desalineamiento la distancia entre los acoples varía según el diámetro.

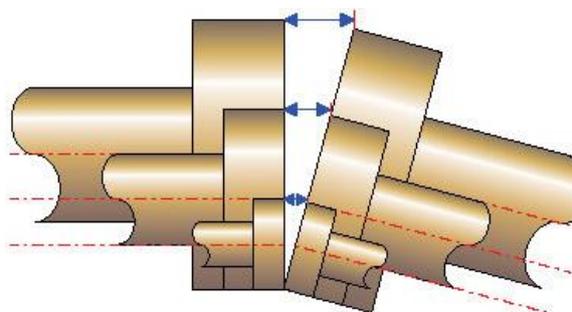


Ilustración 3. Desalineaciones Angulares. Fuente: CETAI.

3.1.2 Desalineamiento paralelo.

El desalineamiento paralelo o desfase es la distancia entre los dos centros de rotación que se pretenden unir. Es muy complicado que dos ejes estén perfectamente paralelos. Además, el borde del acople puede no coincidir con los ejes a unir. El desfase se mide internacionalmente en milímetros o en milésimas de pulgada (estas no están recogidas en el Sistema Internacional, una milésima de pulgada equivale a 0,0254 milímetros).

Se conoce como SAG⁴ a la distancia entre los dos centros de rotación, que puede ser medida en milímetros o grados.

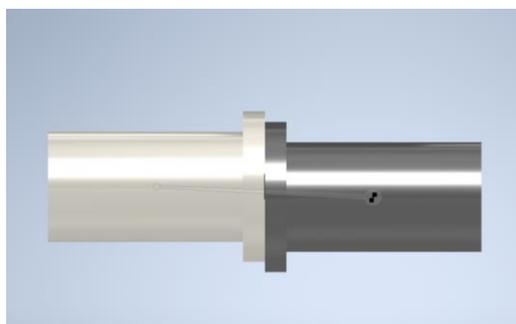


Ilustración 4. Desalineación paralela.

² Esta no es una unidad del Sistema Internacional. 1 grado (°) equivale a 0,01745329 radianes.

³ Miliradianes, equivalente a 0,001 radianes.

⁴ Del inglés “caída”, hace referencia a la distancia entre los dos centros a alinear.



Ambos casos de desalineamiento suelen darse a la vez, provocando así una desalineación combinada, de esta manera se encontrarían los dos centros de ejes de rotación separados (desalineación paralela) y las caras del acoplamiento formando un ángulo (desalineación angular).

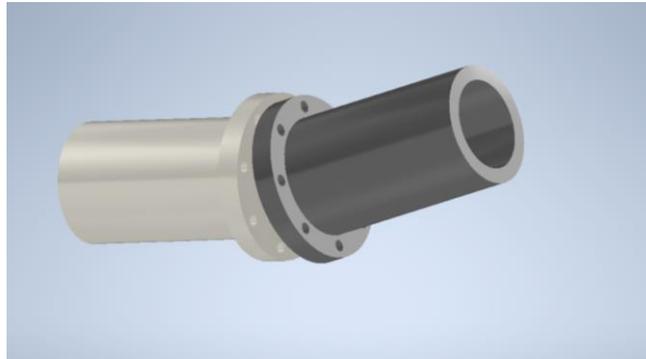


Ilustración 5. Desalineación combinada.

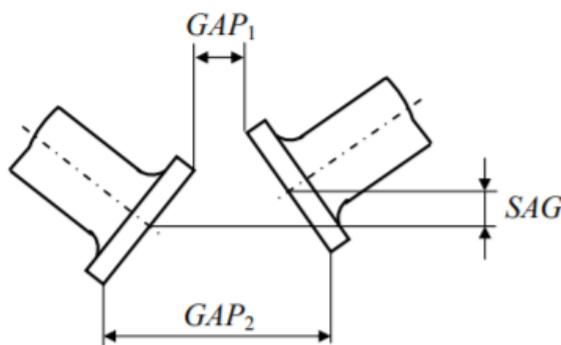


Ilustración 6. SAG and GAP. Fuente: Congreso Internacional de la Sociedad de Mecánicos Croatas.

Ecuaciones para calcular las distancias SAG y GAP:

$$SAG = w_2 - w_1 - \frac{D}{2 * (\cos\beta_2 - \cos\beta_1)} \approx w_2 - w_1.$$

$$GAP = GAP_2 - GAP_1 = D * (\sin\beta_2 - \sin\beta_1) \approx D * (\beta_2 - \beta_1)$$

Donde:

w_2 ; w_1 : Desviaciones.

β_1 ; β_2 : Ángulos de inclinación.

D: Diámetro del acoplamiento.

3.2 Problemas del desalineamiento.

La desalineación causa problemas en los componentes de un equipo, ya que estos están diseñados para trabajar a una carga determinada y la desalineación hace que aumente la carga.

En los componentes en los que nos podemos encontrar más fácilmente problemas son:

Rodamientos: estos se diseñan para trabajar un número de horas a una o más cargas determinadas. Si por la desalineación, la carga del eje es diferente a la de los parámetros de diseño, se reducirá la vida útil del rodamiento. Como se puede observar en el gráfico 2, la vida del rodamiento es inversamente proporcional a la distancia entre los centros de rotación, disminuyendo la vida útil al aumentar el desfase.

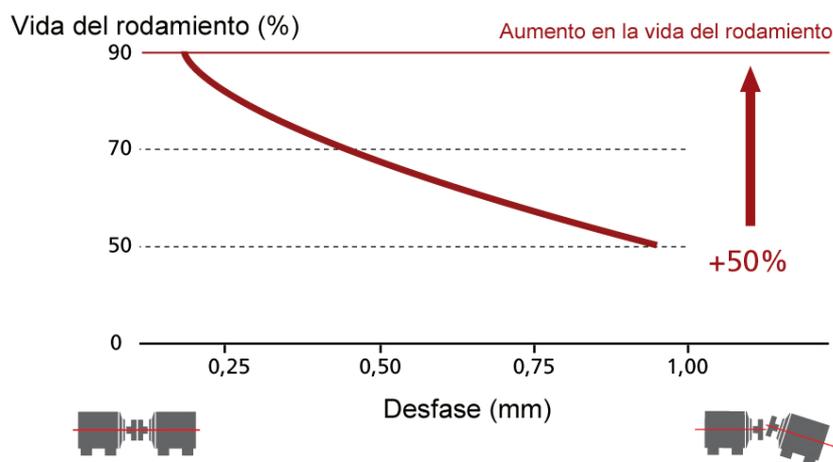


Gráfico 2. Vida de rodamiento. Fuente: CETAI.

Cierres mecánicos de bombas: en muchos casos el desgaste prematuro se debe al aumento de carga sobre el eje debido a la desalineación. Al igual que en el caso anterior, como se muestra en el gráfico 3, cuanto menor sea la desalineación, más meses durará el cierre mecánico.

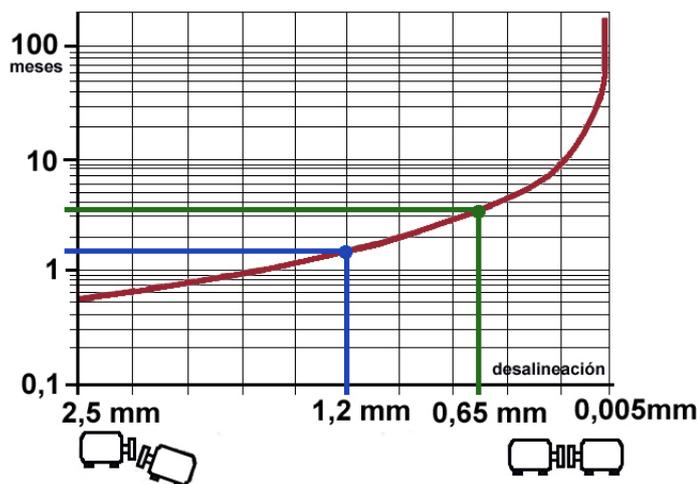


Gráfico 3. Desgaste en cierres mecánicos. Fuente: CETAI.

Consumo: Este aumenta más por la desalineación paralela que por la desalineación angular. Una correcta alineación hará que la máquina necesite menos energía para moverse y eso ahorrará en la factura final. Como se puede apreciar en el gráfico 4, el consumo eléctrico aumenta a medida que aumenta la distancia entre los puntos de rotación (desfase).

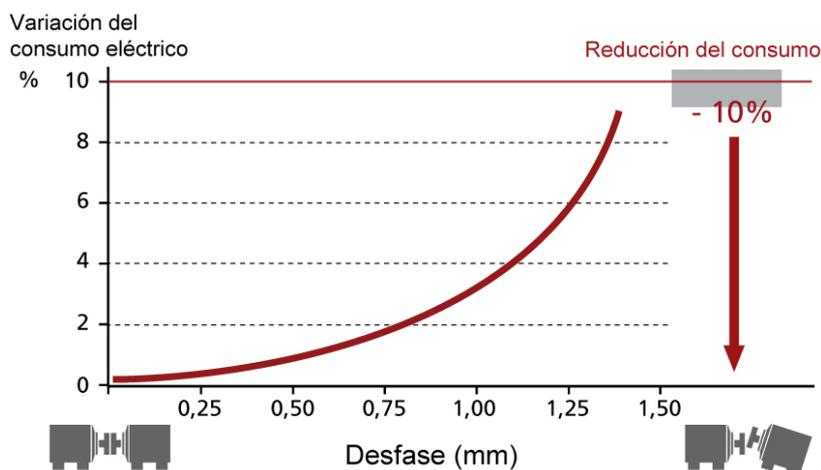


Gráfico 4. La desalineación y el consumo de eléctrico. Fuente: CETAI.

Acoples: Si este se encuentra desalineado, se reducirá su vida útil por calentamiento en la mayoría de los casos, además se calentará la máquina. Como se puede apreciar en la ilustración 7, el color amarillento en la cámara termográfica antes de alinear indica una mayor temperatura que una vez alineado.

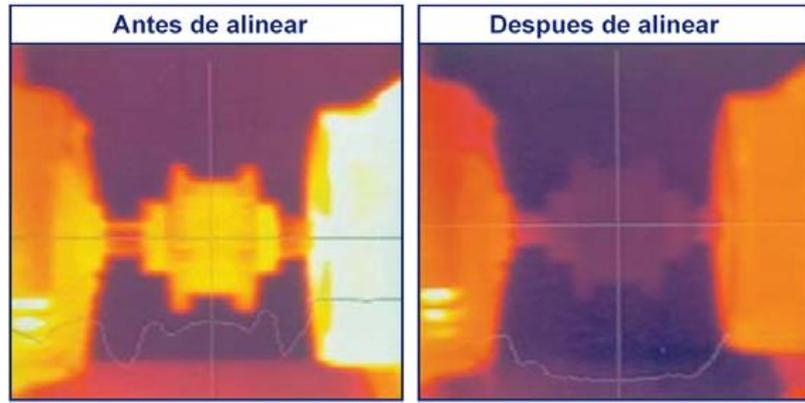


Ilustración 7. Acoplamiento desalineado. Fuente: CETAI.



4. Acoples.

El presente trabajo pretende reflejar la importancia de una buena alineación. No solo es importante conseguir la alineación entre dos ejes, sino que la otra parte fundamental es un buen alineamiento del acople que los une, siendo estos una de las partes fundamentales del proceso de montaje de un eje.

Los acoples o acoplamientos son dispositivos de unión de ejes de rotación, presentes en los sistemas de máquinas de los sectores naval e industrial. Están diseñados para dar un cierto grado de flexibilidad durante el arranque previo a la marcha, ya que tener dos ejes perfectamente alineados es muy difícil.

4.1 Características de los acoplamientos:

Los requisitos fundamentales que debe cumplir un acople para su correcto funcionamiento y desarrollo según John Piotrowski⁵ son los siguientes:

- La capacidad de transmitir fuerza de un eje a otro.
- Los acoples deben de permitir un pequeño desalineamiento angular y paralelo.
- Estos componentes deben absorber los esfuerzos sin dejar que sean absorbidos por los ejes que los unen.
- Deben de ser fáciles de ensamblar y desensamblar.

Actualmente con el auge de los análisis de vibraciones se considera muy importante que un acoplamiento pueda absorber la vibración torsional y que acepte pequeños esfuerzos laterales, sobre todo en el momento del arranque. También debe de absorber empujes axiales, incluso estando desalineados, sin transmitir cargas de empuje de un eje a otro.

Los materiales de los que se compone un acoplamiento deben poder resistir altas temperaturas, que se podrían generar debido a la fricción con los ejes o a una elevada temperatura ambiente. También deben de acoplarse rígidamente al eje sin dañarlo. Para que el acoplamiento no se deteriore prematuramente y pueda funcionar en el lugar instalado durante mucho tiempo, se deben utilizar materiales compatibles. Por ejemplo, nunca se debe usar austenita en contacto con acero inoxidable. (Piotrowski, 2006).

⁵ Autor de “*Shaft Alignment Handbook*”, libro de referencia en el sector de la alineación.



4.2 Tipos de acople.

4.2.1 Acoples rígidos.

Antes de que llegasen al mercado los acoples flexibles, los acoples rígidos eran la única forma de unir dos ejes. Aunque actualmente la mayoría de los acoplamientos son flexibles, los acoplamientos rígidos siguen teniendo su lugar en el mercado, en especial en máquinas donde ocurre un pequeño desalineamiento o en bombas verticales donde uno de los rodamientos lleva el peso de la carcasa y el rotor de la bomba. (*Tipos de acoplamientos de transmisión de potencia rígidos vs flexibles, s. f.*).

4.2.2 Acoples flexibles.

A diferencia de los rígidos, estos acoples son capaces de compensar desplazamientos tanto en el eje axial como el radial gracias a su diseño o material. Además, son capaces de soportar impactos y vibraciones, previniendo así la resonancia.

4.2.2.1. Miniatura.

Son usados para un par inferior a 0,05 Newton metro y diámetros de eje de incluso 1 milímetro. Se emplean para el uso médico, de laboratorio o microbombas. Actualmente la demanda de este tipo de acoplamientos está aumentando. (*Miniature Bellows Couplings, 2020*).

El componente principal de estos acoplamientos es el fuelle de metal fabricado en acero inoxidable. En su construcción se debe tener en cuenta el par al que va a funcionar y el grado de desalineamiento que se espera corregir.

Son fáciles de instalar y no requieren de mantenimientos posteriores a su instalación.



Ilustración 8. Acople tipo miniatura. Fuente: Tecnopower.



4.2.2.2. Acoplamientos flexibles mecánicos.

Consisten en una serie de componentes rígidos que juntos realizan una función mecánica. («Acoplamientos mecánicos», 2019)

Existen diversos tipos de acoples dentro de esta sección:

De cadena: Consiste en dos piñones unidos con una cadena, metálica, fácil de montar y desmontar gracias a sus pocas piezas. Necesita lubricación permanente.

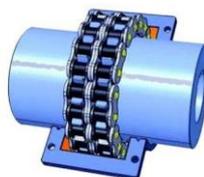


Ilustración 9. Acople de cadena. Fuente: Inustrialclutch.

De engranaje: consiste en dos ejes con engranajes de dientes que se unen mediante un tercero (como mínimo), al igual que los de cadena necesitan lubricación permanente y están limitados a la temperatura límite de dicho lubricante. Resulta difícil calcular las fuerzas de reacción y momentos de los ejes de las turbomáquinas cuando se utiliza este tipo de acople.



Ilustración 10. Acople de engranaje. Fuente: IndiaMART.

De cinta metálica: consiste en dos ejes con ranuras en el diámetro exterior, mediante las que se unen a través de una cinta metálica. El desalineamiento y el movimiento axial se contrarrestan mediante la flexión y el deslizamiento de la zona de la ranura sobre los dientes, generalmente cónicos.



Ilustración 11. Acople de cinta metálica. Fuente: Direct Industry.

De junta universal o cardán: Es uno de los sistemas más antiguos de alineación, consiste en una articulación que puede transmitir el movimiento en direcciones distintas. Está compuesta por dos círculos concéntricos que forman un ángulo recto sobre el eje, lo que permite la transmisión del par a través de este, aunque haya movimiento. De esta forma en este acoplamiento solo puede existir desalineamiento angular. (Cardán - EcuRed, s. f.).

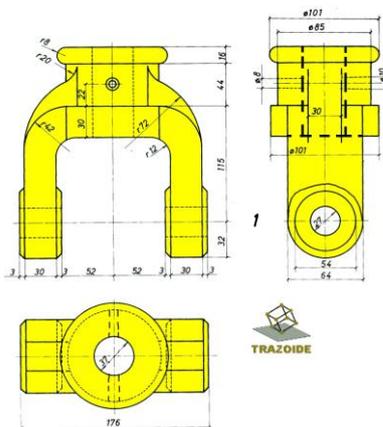


Ilustración 12. Sistema cardán. Fuente: Trazoide.

Junta homocinética o cardán doble: consiste en dos piezas como la anterior unidas por una horquilla doble, de forma que el movimiento no uniforme de una de ellas es rectificado por la otra.

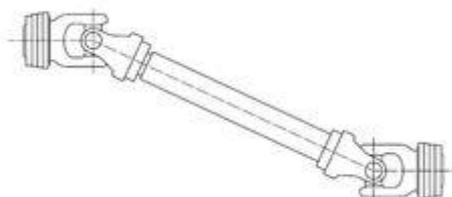


Ilustración 13. Sistema de cardan doble. Fuente: EcuRed.



“Leaf spring” (ballesta) o tipo “Geislinger”: Este acoplamiento utiliza una serie de “ballestas” colocadas radialmente entre los ejes. Cuando el conjunto de muelles que lo conforman se desvía, se produce una amortiguación al pasar el aceite de lubricación de un lado a otro. Este acoplamiento es muy utilizado para amortiguar empujes axiales. En caso de perder el lubricante sus cualidades cambian drásticamente. El tipo de lubricante está limitado por la temperatura. (*Geislinger Coupling | Coupling with Hydrodynamic Damping*, s. f.) .

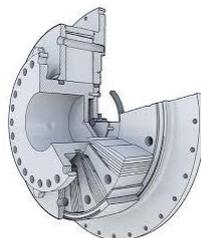


Ilustración 14. Acople Geislinger. Fuente: Geislinger GmbH.

“Pin drive”: consiste en unos pines metálicos con “ballestas” que se colocan cerca del diámetro superior y se unen mediante agujeros al otro eje. Los pines pueden girar dentro de la conexión y permitir movimiento. No necesita lubricación. (Everpower, s. f.).



Ilustración 15. Pin Drive. Fuente: Everpower.

4.2.2.3. Acoplamientos de elastómeros.

Existe una gran variedad de diseños de acoplamientos que utilizan un elastómero en medio para transmitir par y reducir el desalineamiento. La mayoría de estos son torsionalmente blandos para absorber los pares altos que aparecen durante el arranque o los cambios de carga bruscos.



Están compuestos generalmente por goma sintética, uretano⁶, nailon, teflón o bronce impregnado en aceite. Los elastómeros son más blandos que los otros materiales utilizados en acoples. El desgaste es mínimo y el recambio del elastómero es todo lo que se debe hacer durante periodos de servicio. (Piotrowski, 2006).

En algunos diseños también hace de aislador de corriente. Además, al ser torsionalmente blando acepta movimiento y vibraciones axiales.

No necesita lubricación.



Ilustración 16. Acoplamiento elástico. Fuente: Vulkan Couplings.

4.2.2.4. Membrana metálica:

Han surgido como alternativa a los acoplamientos de engranaje, ya que estos últimos necesitan mucho mantenimiento y una lubricación constante. Durante los últimos años se han desarrollado acoplamientos flexibles con elementos metálicos en los que se reduce en gran medida el mantenimiento y están diseñados para tener una larga vida.



Ilustración 17. Acoplamiento de membrana metálica. Fuente: Rexnord.

⁶ Derivado del ácido carbámico. Utilizado para obtener el poliuretano.



Acoplamiento de diafragma: La transmisión de la fuerza transcurre a través de dos membranas flexibles de metal, tipo diafragma, con agujeros en el diámetro exterior y conectados mediante un tubo espaciador, el desalineamiento y el desplazamiento axial se corrige mediante el doblado de las membranas del diafragma.

Acoplamiento de disco flexible: son muy parecidos a los de diafragma, con la excepción de que usan multitud de discos, más delgados y no circulares. (*Two Coupling Technologies Compared*, 2019)

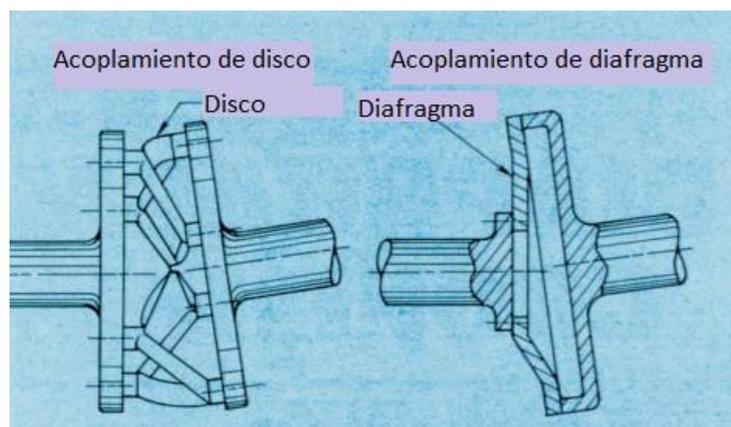


Ilustración 18. Diferencia entre acoplamiento de disco flexible y de diafragma. Fuente: Altra Industrial Motion.

4.3 Lubricación en acoplamientos flexibles.

Algunos de los acoples flexibles necesitan lubricación, en la actualidad podemos encontrar fundamentalmente dos tipos de lubricación:

- Carga única.
- Relleno continuo.

La grasa se usa normalmente en los sistemas de carga única y el tipo de grasa lo especifica el fabricante.

Uno de los problemas más comunes en acoples con grasa son las pérdidas de lubricante debido a fugas en juntas del sistema de lubricación, chaveteros de los ejes, bridas de acoplamiento o por el engrasador de llenado. Produciendo un calor excesivo en el acople. También puede suceder que, debido a la fuerza centrífuga, la grasa se acumule en las



paredes del acoplamiento transformándose así en una especie de aceite, separado del espesante⁷, perdiendo sus cualidades de origen.

Como el espesante tiene un mayor peso específico que el aceite, se suele acumular donde la fuerza es mayor, causando una pérdida de las cualidades de la grasa y acumulaciones de suciedad.

Se debe inspeccionar diariamente para ver si hay pérdidas, si las hay no se debe añadir más grasa, porque el aceite de la grasa gotea, pero el espesante se acumula.



Ilustración 19. Acoplamiento de bomba centrífuga con avería por falta de lubricación.

Fuente: Pfizer.

Los sistemas de alimentación continua generalmente usan el mismo aceite que los rodamientos, los rociadores se colocan para inyectar directamente el chorro en el acoplamiento. Este sistema refrigera el equipo manteniendo una temperatura estable en el acople.

Un problema común es la contaminación de este aceite, normalmente con el agua que se condensa en los tanques (los sistemas de purga pueden solucionar este problema). (Piotrowski, 2006).

⁷ Las grasas están normalmente por una mezcla de jabón o espesante y aceite.



5. Alineación de acoples. Procedimientos de alineación.

5.1 Operaciones generales previas.

Existen diversos métodos para unir los núcleos de los ejes, cada uno con sus ventajas e inconvenientes. Se recomienda seguir las indicaciones de cada eje y acoplamiento para asegurar el correcto ensamblado y prevenir el deslizamiento o un rozamiento indeseado.

Una vez que un acoplamiento ha sido seleccionado, el siguiente paso debe ser una instalación apropiada. Si no se lleva a cabo una correcta instalación es muy fácil destruir el acoplamiento prematuramente, por ello es muy importante que el acople se instale rigurosamente.

Los acoples que están compuestos por metales nunca deben almacenarse en lugares corrosivos, ya que el óxido afecta a sus propiedades mecánicas.

Tras desembalar el acoplamiento, la persona encargada del montaje se ha de asegurar de que estén todas las piezas, y que dispone de todo lo necesario para su instalación. Como por ejemplo tornillos, espaciadores o juntas.

Una vez que el material necesario para realizar la instalación está preparado, se deberán limpiar todos los recubrimientos de superficies e inspeccionar minuciosamente si están dañados.

Tras realizar los pasos anteriores, se deben medir de nuevo todas las dimensiones, tomando especial atención en los bornes del acoplamiento, ranuras y la longitud total.

Se deben medir los ejes entre los que el acoplamiento se va a colocar, sobre todo la medida entre los ejes en los que se va a acoplar, asegurándose que están a la misma distancia a la que estarán durante la operación.

Si es posible se debe presentar el acoplamiento antes de colocarlo entre los ejes, para asegurarse que las tolerancias entre ellos son las adecuadas, que los elastómeros encajan o que los tornillos son válidos.

Un gran porcentaje de los ejes utiliza varios puntos de anclaje para prevenir que el núcleo del acoplamiento gire por acción de la fuerza torsional. El Instituto Americano Nacional de Medidas ANSI, ha desarrollado una guía para que según el tamaño del eje se coloquen los anclajes adecuados. (Piotrowski, 2006).

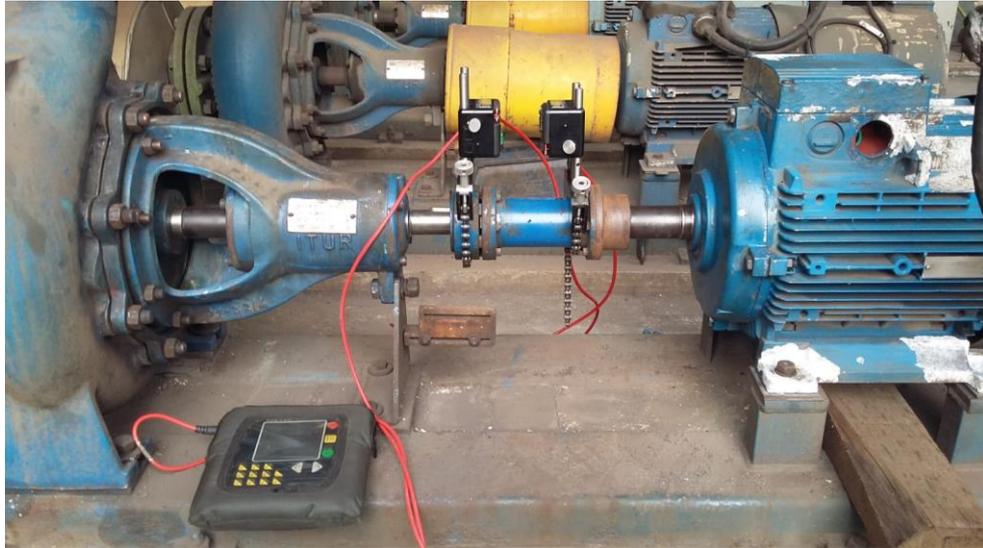


Ilustración 20. Alineación de bombas con sistema láser.

Métodos de alineación, comúnmente conocidos:

- Alineación con reglas y galgas.
- Alineación con reloj comparador.
- Alineación láser.

5.2 Alineación con regla y galga

Es un método simple y fácil de ejecutar, pero también es impreciso ya que está limitado por la precisión del ojo humano.

Para llevar a cabo este método tan solo se necesita una regla y un juego de galgas calibradas.

Ejecución:

En primer lugar, debemos medir los planos superior e inferior del acoplamiento (en un reloj corresponderían con la posición de las agujas a las 12 y las 6). Como se representa en la ilustración 21.

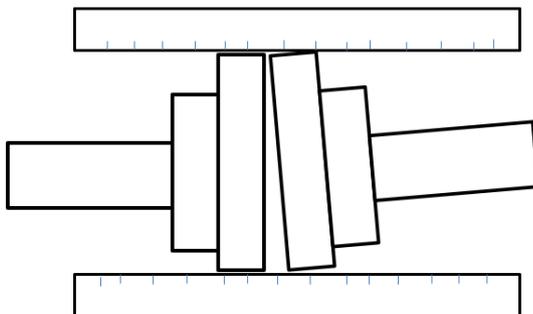


Ilustración 21. Alineación con reglas y galgas. Medida con las reglas.

Una vez que hemos medido los dos planos, mediante una diferencia podremos obtener la separación entre las caras del acoplamiento.

El siguiente paso será la colocación de una galga cuyo grosor sea igual a la diferencia obtenida en el paso anterior, que se colocará en el lado que había menos distancia entre los puntos. En la ilustración 22 podemos observar la galga colocada en color gris.

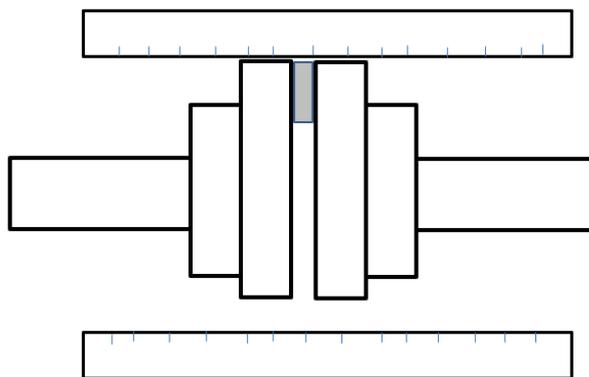


Ilustración 22. Alineación con reglas y galgas. Reajuste con galga.

Una vez reajustada la máquina, la distancia medida en todo el perímetro del acoplamiento debe ser la misma.

Como conclusión podemos afirmar que este método puede ser útil en caso de que el acoplamiento presente desalineación angular. Sin embargo, no tiene en cuenta el desalineamiento paralelo.



5.3 Alineación con reloj comparador.

El reloj comparador es un instrumento de medida, que como su propio nombre indica, mide mediante la comparación de dos superficies. No otorga una medida por cuenta propia, pero si da una lectura sobre piezas a verificar.

Consta de una corona similar a la de un reloj convencional, de un palpador y una base magnética. Cuando el palpador detecta una diferencia de altura con respecto a la que estaba midiendo, hace girar la aguja. Hacia la derecha si la nueva medida es menor y hacia la izquierda si la nueva medida es mayor.



Ilustración 23. Reloj comparador marca DRAPER. Fuente: DRAPER TOOLS.

Existen dos métodos para alinear con esta herramienta:

- Método de borde y cara.
- Método de comparador inverso.

5.3.1 Método de borde y cara.

En este método se utilizan dos relojes, cuyas bases están colocadas en el mismo acoplamiento, pero separadas 180 grados. Los palpadores se colocan en el acoplamiento contrario al que se encuentra la base, uno en la parte del perímetro exterior para medir el desfase y otro en la cara contraria del acoplamiento para medir el ángulo de inclinación. Como se puede observar en la ilustración 24 con los relojes compradores representados en color azul.

Una vez colocados los palpadores se ha de hacer girar la máquina lentamente y de forma manual, por razones de seguridad.

Al tratarse de un reloj comparador, no obtendremos una medida fija. Como se ha dicho en este trabajo, el reloj comparador da medidas por comparación, por lo que el técnico



encargado debe estar mirando permanentemente las medidas del reloj comparador y trabajar con la máxima obtenida.

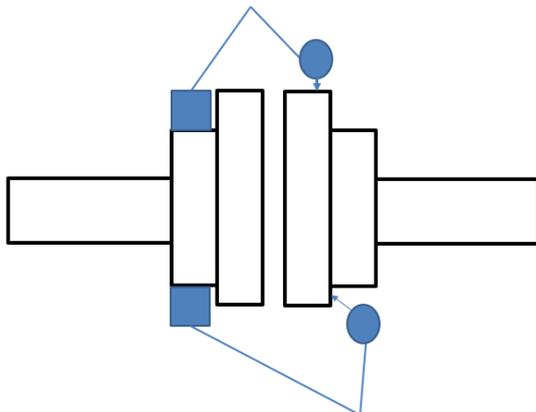


Ilustración 24. Método de borde y cara.

El ángulo de inclinación lo obtendremos mediante la medida obtenida en el reloj comparador, colocado como se explica anteriormente. Esta medida nos indicará el recorrido que tiene el acoplamiento horizontalmente, por lo que con esa medida y el diámetro del acoplamiento podremos obtener el ángulo de desalineamiento (σ), como se puede observar en la Ilustración 25.

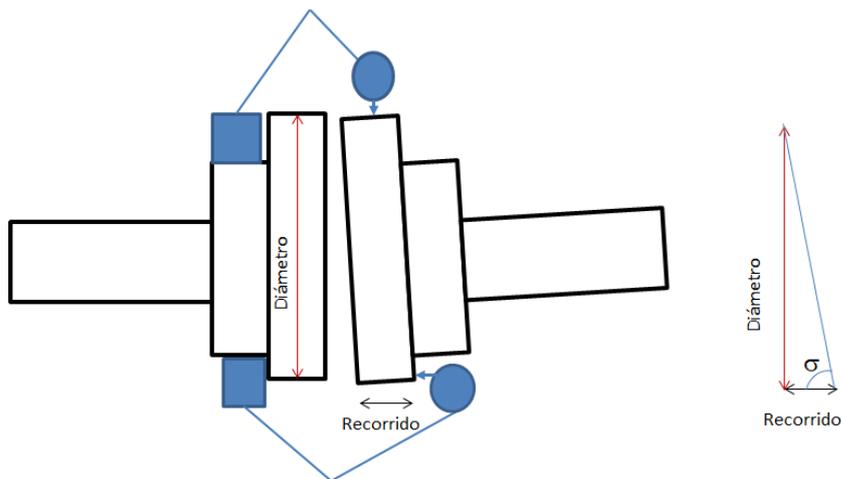


Ilustración 25. Angularidad en método de borde y cara.

5.3.2 Método de comparador inverso.

En este método se coloca la base de un reloj comparador en cada uno de los acoplamientos, uno en la parte superior y otro en la inferior, a 180 grados de diferencia.



El palpador se coloca en el perímetro del acoplamiento contrario al que esta la base, como se puede apreciar en la Ilustración 26 donde los relojes aparecen representados en color azul.

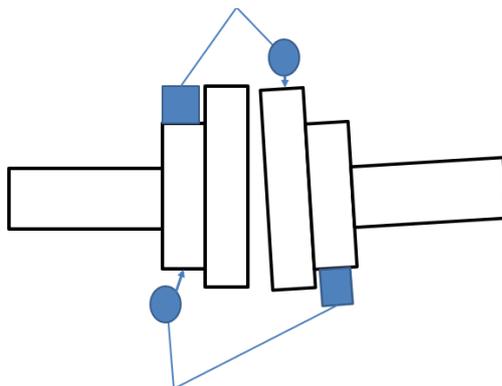


Ilustración 26. Método del comparador inverso.

De esa manera cada uno de los relojes indica el desfase y con la diferencia de ambos desfases podremos calcular la angularidad (σ).

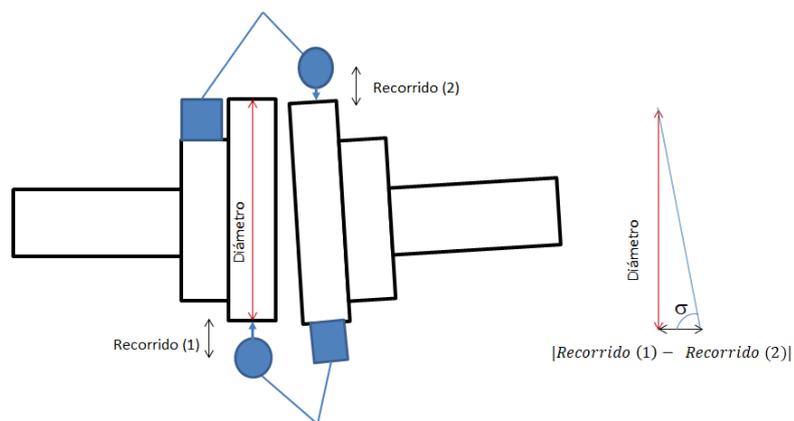


Ilustración 27. Angularidad en el método de comprador inverso.

5.4 Alineación con equipo láser.

En la actualidad la mayoría de las alineaciones de equipos industriales y marinos se realizan mediante alineadores láser, dejando los métodos tradicionales en un segundo plano por su menor precisión.

La mayoría de los equipos láser para alineamiento de pequeños equipos como bombas o compresores tienen un funcionamiento muy parecido por medio de una interfaz muy intuitiva



que facilita de gran manera el trabajo del técnico. (Las herramientas de alineación láser se ofrecen como parte del programa AIP+ de NSK - Automatización en la industria 4.0, s. f.)

Estos equipos cuentan de tres partes móviles e inalámbricas en la mayoría de los modelos:

- Controlador o procesador: es similar a una “Tablet” en la que se introducen los datos y por medio de un algoritmo indica los puntos a alinear.
- Cabezal móvil: suele indicarse con una M en su parte posterior, es el cabezal que debe ir colocado en el eje que después se va a poder desplazar para ajustarlo. En el caso de una bomba, sería el eje del motor eléctrico, ya que la bomba sería difícil desplazarla porque posee tuberías fijas que dificultaría el proceso.
- Cabezal estático: suele estar indicado con una S en su parte posterior, en el caso de una bomba iría colocado en el eje de la bomba, que es el que resulta más difícil su ajuste.

Para corregir la desalienación en el caso de una máquina con un motor eléctrico acoplado, se puede realizar mediante la colocación de galgas en las patas del motor o mediante el ajuste de los tornillos colocados transversalmente en el motor para corregir el desplazamiento horizontal. En otro tipo de equipos, se deberá de ajustar siguiendo las instrucciones del fabricante.

Procedimiento general:

1. En primer lugar, se debe encender el controlador e indicar que tipo de alineación vamos a ejecutar, una alineación con los ejes colocados en horizontal o en vertical. Algunos equipos láser son capaces de hacerlas en ambos planos gracias a los giróscopos que utilizan los cabezales.
2. Indicar la tolerancia, está se indicará en función de las revoluciones a las que trabaja el equipo, siguiendo la norma.

RPM	Excelente		Aceptable	
	Desfase	Angularidad	Desfase	Angularidad
	Mil	Mil/Pulgada	Mil	Mil/Pulgada
600	5.0	1.0	9.0	1.5
900	3.0	0.7	6.0	1.0
1200	2.5	0.5	4.0	0.8
1800	2.0	0.3	3.0	0.5
3600	1.0	0.2	1.5	0.3
7200	0.5	0.1	1.0	0.2

Tabla 1. Tolerancias para la alineación de ejes con acoples cortos. Fuente: Ludeca.



3. Montar los cabezales, el estacionario en el eje de la bomba y el móvil en el eje del motor. Tienen un sistema de sujeción mediante cadena.
4. Ajustar el haz de luz láser, el sensor móvil desprende un haz de láser que ha de incidir en la zona remarcada del sensor estacionario, para ajustarlo se pueden desplazar ambos verticalmente.
5. Una vez alineados, apretar los tensores del cabezal para una mayor fijación al eje. Generalmente la sujeción es mediante cadenas o medias lunas.
6. Medir las distancias, mediante una cinta métrica o mediante un medidor láser. se pueden introducir en milímetros o en pulgadas a decisión del técnico.
 - La primera medida será la distancia entre los dos cabezales.
 - La segunda medida varía según el equipo, en el caso de PREDITEC⁸ solicita la distancia entre la unión del acople con el eje estacionario y el cabezal móvil; y en el caso de SKF opta por la distancia entre el centro del acople y el cabezal móvil.
 - La tercera medida es la comprendida entre el cabezal móvil y la primera pata del motor.
 - La cuarta medida es la que separa las patas anterior y posterior del motor.
7. Comprobación de la “pata coja”⁹, para ello se desenroscarán y se volverán a apretar todas las tuercas de sujeción del motor a bancada, lo que nos indicara qué pata se encuentra más alta que otra y deberemos suplementar o rebajar mediante galgas calibradas.
8. Para que los cabezales tomen los datos se ha de girar el eje completo del equipo como dicte el fabricante. En el caso de la marca PREDITEC, primero 45° hacia un lado, volver a la posición inicial y posteriormente 90° hacia el otro lado (lo que serían las nueve, las doce y las tres en un reloj de aguja). Deben de quedarse en cada posición hasta que el controlador indique pasar a la siguiente.
9. Una vez tomados los datos el controlador nos dará el grado de desalineamiento. Mostrará los datos de desalineación angular y paralela tanto en el plano horizontal como en el plano vertical. Además, mostrará tipo semáforo los datos que estén dentro de tolerancia en color verde y los que estén fuera de tolerancia en color rojo. Estos datos se deben de guardar para que una vez que acabe la prueba se puedan comparar con los obtenidos tras la alineación

⁸ Compañía de ingeniería, especializada en instrumentación para protección, supervisión y diagnóstico predictivo de maquinaria en las plantas industriales.

⁹ Fenómeno explicado en el punto 5.5 de este trabajo.



10. Rectificar mediante galgas calibradas cada una de las patas del motor tal como indique el controlador y ajustar las sujeciones laterales del motor para corregir el desplazamiento horizontal.
11. Una vez realizado los cambios, volver a realizar el paso 8 para comprobar que la máquina se encuentra alineada y guardar los datos obtenidos.
12. En la mayoría de los equipos modernos se pueden exportar los datos a una plantilla Excel para reportar los datos al responsable del equipo o para que queden guardados en la sección de mantenimiento.



Ilustración 28. Equipo portátil de alineación láser. Fuente: Fluke.

5.5 Fenómeno externo para tener en cuenta: “Pata coja”.

Se denomina “Pata Coja” a la situación en la que una de las patas de una máquina se encuentra en el aire sin que apoye la máquina sobre ella. (Kovacevic, 2017).

Se puede detectar de dos maneras:

- A simple vista.
- Por medio de un reloj comparador.

Para tener mayor precisión se recomienda utilizar el reloj comparador en todas las patas en las que se sospeche que puede ocurrir este fenómeno.

5.5.1 Procedimiento con reloj comparador:

1. Colocar el palpador en una de las patas.



2. Aflojar el tornillo de la pata en la que se ha colocado el palpador
3. Apretar el tornillo (comprobar que la aguja no se mueve).
4. Repetir el procedimiento en cada una de las patas.

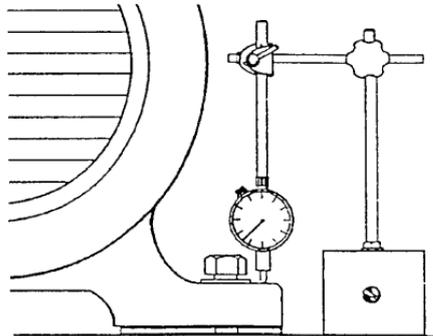


Ilustración 29. Reloj comparador en comprobación de "pata coja". Fuente: CETAI.

Si una pata se levanta más que las otras es que padece el problema, por lo que se le ha de colocar una galga, cuyo grosor sea la diferencia entre lo que se levantó ésta y lo que se levantaron las otras.



6. Alineación de correas.

Las correas son uno de los medios de transmisión más extendidos y comunes en todas las industrias del mundo. Destaca frente a otros tipos de transmisión por su sencillez y precio, ya que resultan mucho más económicas que otros tipos de transmisiones como el cardán.

Una incorrecta alineación de las correas puede reducir notablemente tanto la vida de estas, como de las poleas y los rodamientos.

Los motivos mayoritarios por lo que una polea no está alineada:

- Las poleas están inclinadas por un montaje inadecuado.
- Las poleas están mal colocadas en los ejes
- Los ejes que une la correa están desalineados entre sí.

Al igual que en el resto de los equipos, en las correas puede aparecer desalineación angular o paralela.



Ilustración 30. Desalineación en poleas. Fuente: Power-MI.

Se debe tener en cuenta que, en la alineación de correas, la mayoría de las ocasiones lo que está desalineado o mal montado son las poleas, por lo que para tener una correa alineada lo más importante es que las poleas que une lo estén. La polea conductora y la polea inducida deben de estar correctamente alineadas y con una tensión adecuada. (*Manual de correas de transmisión industrial Dunlop, s. f.*).

6.1 Métodos de alineación de poleas.



6.1.1 Métodos convencionales.

Son los más extendidos, por su rapidez y sencillez, pero también son imprecisos ya que su ejecución consiste en una inspección visual o con la ayuda de una regla u otro elemento recto. No son métodos recomendados por los fabricantes de correas ya que en ocasiones no aconsejan desalineaciones superiores a $0,5^\circ$ lo que resulta prácticamente imperceptible para el ojo humano.

6.1.1.1. Método de comprobación de la desalineación paralela con regla.

Este método consiste en colocar una regla o cualquier otra herramienta recta en una de las caras de la polea y comprobar mediante inspección visual el margen que existe en la otra, como se puede apreciar en la ilustración 31.

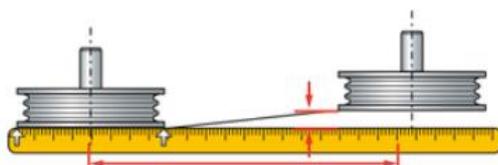


Ilustración 31. Desfase en correa. Detección con regla. Fuente: SKF.

6.1.1.2. Método de comprobación de la desalineación angular con regla.

La ejecución de este método es igual a la anterior pero esta vez se inspeccionará visualmente el ángulo formado de una polea con respecto a la otra. Como se puede apreciar en la ilustración 32.

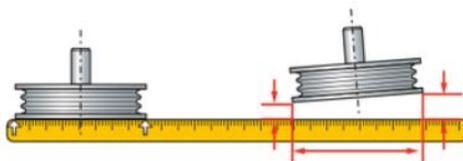


Ilustración 32. Desalineamiento angular en correa. Detección con regla. Fuente: SKF.

6.1.1.3. Método de comprobación de desalineación angular con cuerda.

Para llevar a cabo este método se precisa de una cuerda, que se atará a uno de los ejes de la correa y se pasará por la cara de la misma, a la altura de la otra polea se podrá apreciar el ángulo formado. Este método es todavía más impreciso que el anterior ya que



resulta muy complicado colocar la cuerda sobre la cara perfectamente sin que se desvíe. Este método aparece descrito en la ilustración 33.

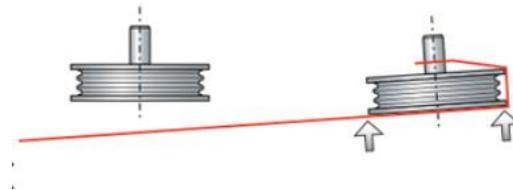


Ilustración 33. Desalineamiento angular. Detección con cuerda. Fuente: SKF.

6.1.2 Métodos láser

El método de alineación láser de poleas es muy similar al de alineación de ejes descrito anteriormente en el punto 5.4 de este trabajo. Pero en este caso en vez de colocar los cabezales sobre ejes, se colocan sobre las poleas.

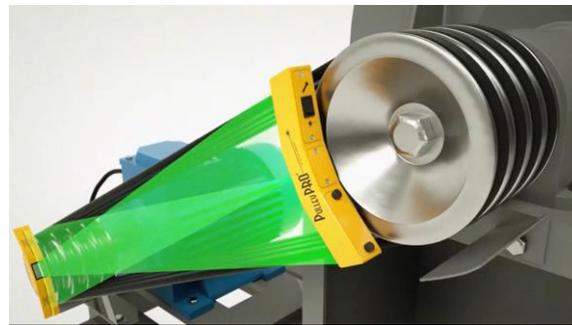


Ilustración 34. Cabezales de alineación láser colocados sobre las poleas. Fuente: Seiffert Industrial.

Ambos cabezales emiten un haz de luz láser que se refleja sobre el cabezal contrario, lo que indica las posibles desalineaciones angular y paralela que pueda tener el equipo.



Ilustración 35. Alineación de poleas con sistema láser. Fuente: Seiffert Industrial.



Para corregir el desalineamiento se han de ajustar las poleas, mediante la bancada del equipo o mediante el propio sistema de alineamiento de las poleas. De tal manera que el haz de luz laser quede en la marca del cabezal contrario.

6.1.3 Factor externo a la alineación. Tensión en correas.

Además de una correcta alineación de las poleas, en el caso de las correas es muy importante conocer la tensión de estas, para asegurarse de que está trabajando en el rango indicado por el fabricante.

Para medir esta tensión actualmente existen equipos llamados tensiómetros que son capaces de indicar con precisión la tensión a la que la correa está ajustada.

El tensiómetro se trata de una herramienta compacta y fácil de usar. Proporciona datos muy relevantes como son la frecuencia (hercios) o la fuerza (N). Lo que nos permite conocer el estado de la correa para poder cambiarla si presenta claros signos de desgaste y evitar así daños mayores en ejes o en el propio equipo si se rompiese durante el funcionamiento. (*Tensión en correas. Intermec., s. f.*).



7. Caso práctico. Línea de ejes de un buque.

Una de las alineaciones más importantes a bordo de un buque es la alineación del sistema propulsor. Debido a los grandes esfuerzos que sufre por acción de la hélice y las condiciones ambientales es de vital importancia que se encuentre correctamente alineado. En el punto 7.3 de este trabajo, se elabora un análisis de tensión sobre los esfuerzos sufridos por los ejes de un buque por acción del empuje axial provocado por la hélice y la desviación que eso conlleva.

7.1 Introducción teórica.

Se conoce como “línea de ejes” al conjunto de piezas encargadas de unir la hélice y el motor principal, mediante las que se transmite la potencia desde la máquina a la hélice, ambas colocadas a cada uno de sus extremos.

El eje debe estar libre de vibraciones y debe poder soportar con seguridad las distintas operaciones del buque.

Según a la distancia de la popa que se encuentre la sala de máquinas, la longitud de los ejes puede ser menor o mayor. En los buques en los que la sala de máquinas se encuentre a la mitad del casco o más a proa, deberán tener mayor cantidad de soportes que sujeten al eje, denominados descansos.

Dentro de la línea de ejes podemos distinguir tres partes:

- Eje motor.
- Eje intermedio.
- Eje de cola o eje portahélice.

7.1.1 Eje motor.

Se trata del eje macizo que va directamente conectado al motor o turbina por medio de un acoplamiento rígido o elástico según la potencia del motor. En su parte posterior se conecta con la caja reductora, o con el eje intermedio si no la monta.

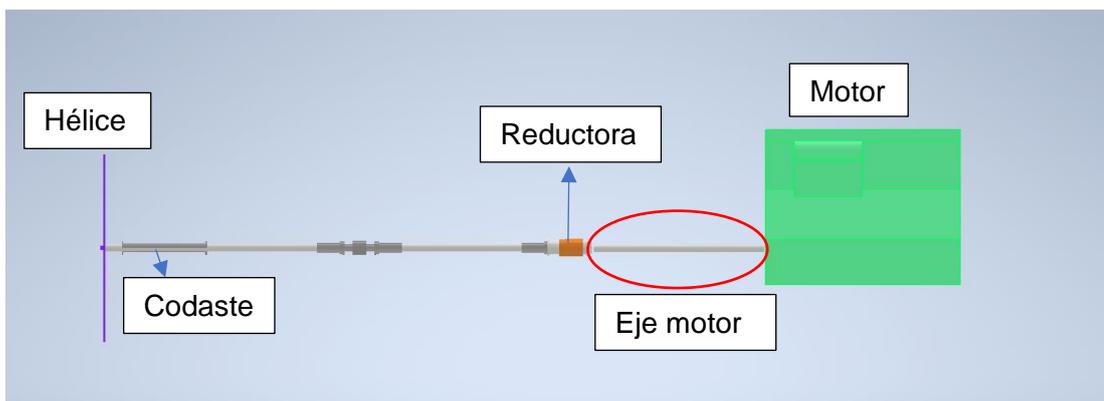


Ilustración 36. Eje motor.

7.1.2 Eje intermedio.

Está compuesto de uno o más trozos de eje macizo de acero forjado unidos entre sí, que se sustentan en los descansos sobre los cojinetes de apoyo. Los trozos de ejes se unen entre sí, en la mayoría de los buques, por medio de chavetas y pernos. Las chavetas colocadas transversalmente evitan que los pernos, colocados en los taladros de los discos, estén sometidos a fuerzas de cizalle. Une la reductora con el eje de cola hasta la bocina.

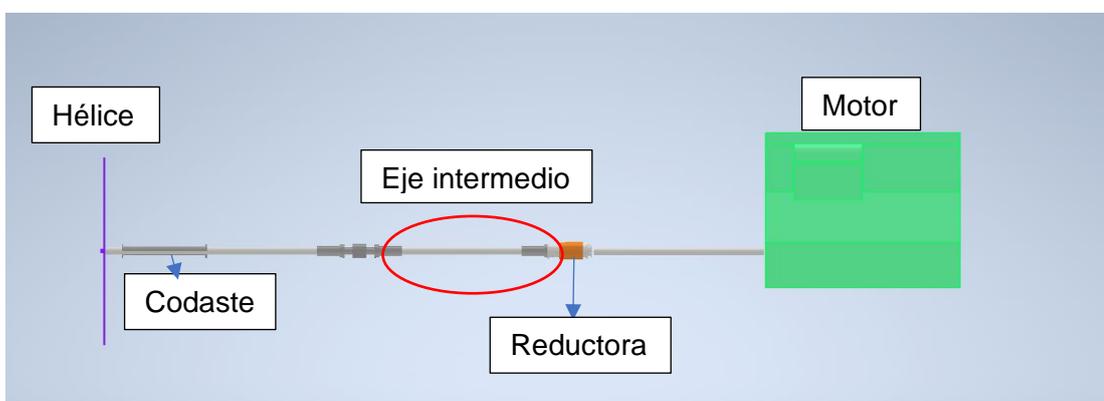


Ilustración 37. Eje intermedio.

7.1.3 Eje de cola o portahélice.

Es la última parte de la línea de ejes, sobre el cual se monta la hélice. En la mayoría de los buques, salvo en excepciones como en el caso de los buques militares, está formado por acero macizo forjado. En el caso de los buques militares, algunos montan esta parte del eje hueca con el fin de ahorrar peso.

La parte sobre la que se monta la hélice es cónica, esta se fija al eje mediante una tuerca de bronce formando una junta estanca y mediante chavetas longitudinales entalladas a mitad del eje, se asegura la hélice para evitar el movimiento de arrastre.

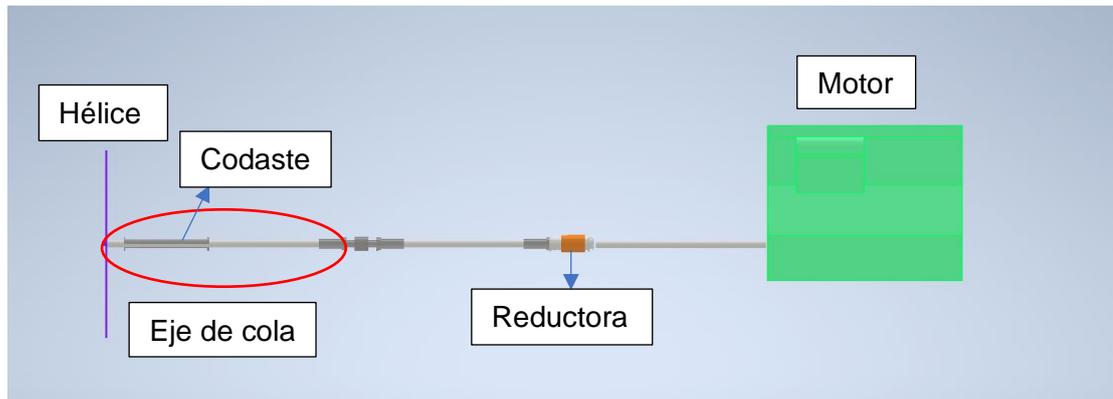


Ilustración 38. Eje de cola.

7.1.4 Elementos que componen la línea de ejes.

El eje de cola y el eje intermedio necesitan de asientos para su sustentación. Los soportes sobre los que descansan los ejes llevan un cojinete en su interior, generalmente de metal blanco antifricción de bajo coste. La función de estos cojinetes es evitar que se desgaste el eje y desgastarse ellos, ya que resulta más económico reemplazar los cojinetes que el eje. Estos pueden ir lubricados con aceite o grasa según el diseño del buque.

Para evitar el desgaste del eje se montan camisas de bronce en el codaste¹⁰ y demás soportes envolviendo al eje.

Uno de los puntos más críticos del eje de cola es la parte en la que el eje pasa a través del casco, ya que debe ser estanca para evitar que entre agua de mar en el interior del buque, esta parte se denomina “tubo de codaste” y posee dos funciones: dar estanquidad al buque y sustentación al eje.

Para asegurar la estanquidad la bocina se encarga de permitir el giro de la hélice sin que entre agua al interior. Suele estar construida en bronce con metal antifricción, está colocada en la parte en la que el eje atraviesa el casco, donde se monta mediante una tuerca exterior.

¹⁰ Extremo de la popa del buque que se une en la parte inferior con la quilla. Otorga al timón apoyo y permite su giro.



7.2 Alineación de la línea de ejes de un buque.

Para alinear el eje de un buque se debe tener en cuenta el diseño del buque y las indicaciones dadas por el diseñador y el constructor. El proceso no está normalizado por lo que varía según el constructor y su programa.

La alineación del eje suele comenzar una vez que la estructura de popa esté terminada y las cuadernas de popa soldadas (aunque algunos astilleros optan por empezarlo cuando incluso no se han colocado las cuadernas). Es en ese momento donde se debe establecer la referencia para la posición de los ejes, los soportes que los sustentan, la reductora, el acople y el motor principal.

Una vez que se ha trazado la línea de referencia para la colocación del eje, si es necesario, se ha de rectificar teniendo en cuenta la inclinación de los cojinetes de bocina.

Para colocar el eje, es normal ayudarse de cojinetes “temporales” que ayuden a su colocación, además ha de tenerse en cuenta que cuando se une a la reductora o al motor la hélice no suele estar colocada, por lo que es necesario aplicar una carga o fuerza similar en el eje de cola al peso de la hélice, para facilitar el montaje y evitar tensiones innecesarias en el extremo del eje contrario a la hélice.

Una vez que ya este todo montado se podrá recurrir al método “Sag and Gap” para la alineación de los ejes. Este método es preferiblemente llevarlo a cabo cuando el buque está en dique seco, ya que si se hace cuando el buque se encuentra a flote se ha de tener en cuenta los esfuerzos de arrufo y quebranto¹¹.

Como ya he descrito con anterioridad el GAP se obtiene de la desalineación angular y el SAG de la desalineación paralela, por lo que el método “Sag and Gap” consiste en la verificación de la apertura entre las dos caras de la brida y la inclinación del eje.

Una vez que sabemos tanto las medidas GAP como SAG se debe proceder al ajuste de la bancada y soportes del eje para corregir el desalineamiento. Estos dos procesos de toma de medidas y ajuste se han de realizar tantas veces como sea necesario hasta que los desalineamientos estén dentro de la tolerancia impuesta por el diseñador y las sociedades de clasificación. Con las ayudas tecnológicas con las que se dispone actualmente se puede llegar a corregir el desalineamiento con tan solo una medida.

¹¹ Esfuerzos que sufre el casco del buque por efecto de la carga que transporta.



Para verificar que se trata de una alineación correcta se han de tomar las medidas de desviación del cigüeñal, de reacción del cojinete del eje de engranajes, desviación de la bancada del motor y también se deben evaluar el contacto de los engranajes, si es posible.

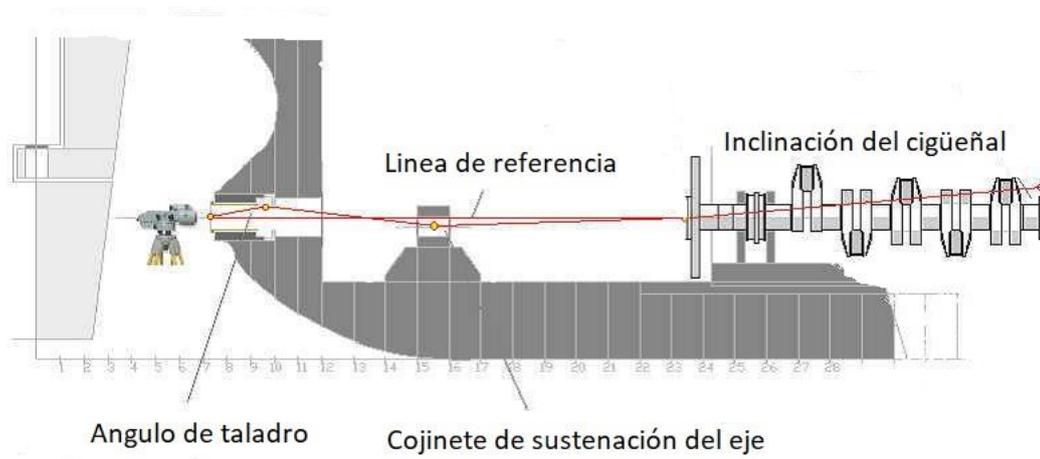


Ilustración 39. Eje de un buque.



7.3 Análisis de tensión sobre el eje de transmisión de un buque.

Para entender los problemas de desalineación que puede sufrir un buque y la importancia de que se encuentren bien alineados, en las siguientes ilustraciones se puede observar, mediante un análisis de tensión realizado con la ayuda del programa Autodesk Inventor Professional 2021, la desviación que puede sufrir un eje por acción del empuje axial de la hélice. Consiste en un modelo de eje de intermedio y de eje de cola del sistema de transmisión de un buque. En las ilustraciones 40, 41 y 42 se pueden apreciar las medidas del eje, tanto los diámetros como las medidas longitudinales en milímetros.

El modelo consiste en dos ejes unidos por un soporte y una estructura que simula la reductora a uno de sus lados.

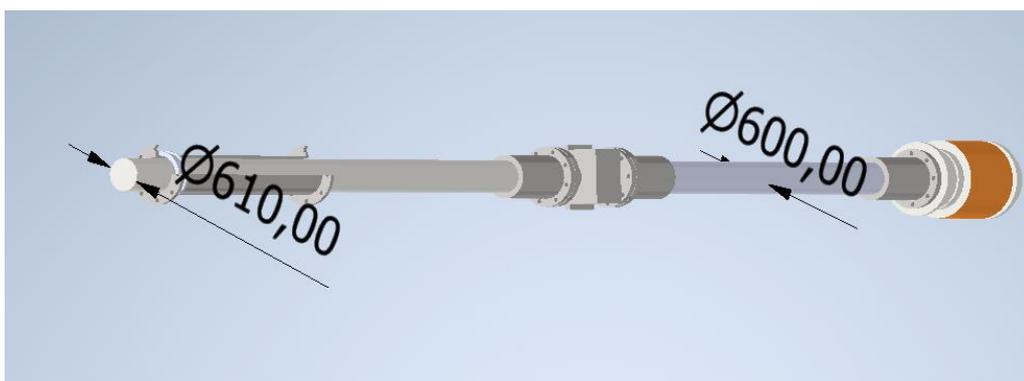


Ilustración 40. Modelo sobre el que se realiza el ensayo con cotas de diámetro (mm).

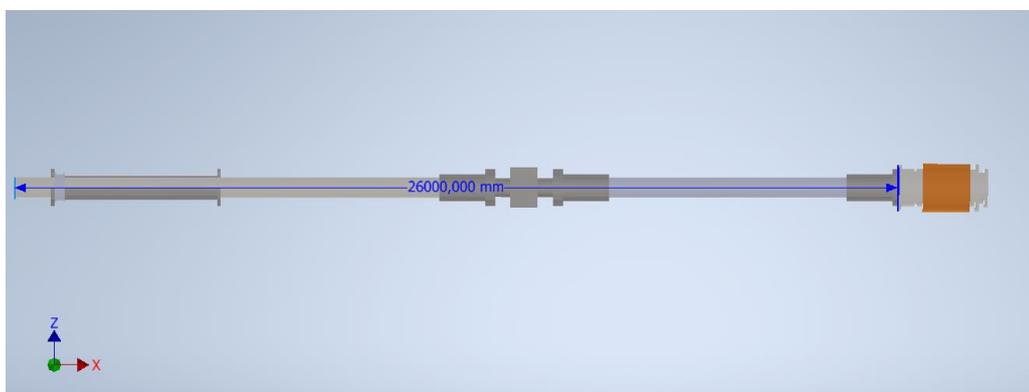


Ilustración 41. Medida total del eje.

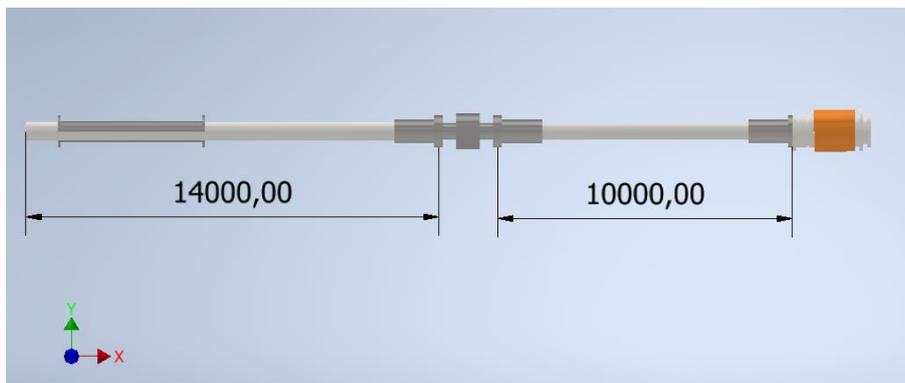


Ilustración 42. Medidas del eje intermedio y el eje de cola.

Masa	104748 kg
Área	119388000 mm ²
Volumen	1,33438E+10 mm ³
Centro de gravedad	x=-3155,14 mm y=415,776 mm z=-1547,22 mm

Tabla 2. Datos sobre el modelo utilizado.

Nombre	Acero, carbono	
General	Densidad de masa	7,85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	350 MPa
	Resistencia máxima a tracción	420 MPa
Tensión	Módulo de Young	200 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,29 su
	Módulo cortante	77,5194 GPa
Nombres de piezas	Acoples Soporte Tubo de popa	

Tabla 3. Elementos de acero al carbono.

Nombre	Acero, forjado	
General	Densidad de masa	7,85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	250 MPa
	Resistencia máxima a tracción	300 MPa
Tensión	Módulo de Young	210 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,3 su
	Módulo cortante	80,7692 GPa
Nombres de piezas	Eje1 Eje 2	

Tabla 4. Elementos de acero forjado.

El análisis de tensión aplicado en esta simulación se trata de un análisis de tensión estático, muy empleado para corroborar la rigidez torsional de un prototipo con una fuerza aplicada. Para realizarlo se ha utilizado una fuerza transversal en el eje de cola en dirección a la reductora del buque para simular el esfuerzo que sufre un eje por el empuje axial aplicado por la hélice.



Ilustración 43. Fuerza aplicada sobre el eje.

La fuerza aplicada se ha calculada en función de la potencia del motor, suponiendo un buque propulsado con dos motores de 8145 KW cada uno y con sistemas de hélice de paso variable.

Mediante las gráficas HIDRA obtenidas del trabajo de fin de grado “Cálculo, dimensionamiento y componentes de la línea de ejes de un buque Ro-Ro con una potencia instalada de 2*8145Kw”. Podemos obtener la fuerza de empuje axial en Newtons que ejercerá la hélice sobre la línea de ejes de un buque. (Proyecto fin de carrera de Ingeniería Técnica



*Naval Cálculo, dimensionamiento y componentes de la línea de ejes de un buque Ro-Ro con una potencia instalada de 2*8145Kw. Autor: Diego Ramírez López., 2009.)*

Para calcular el empuje máximo debemos tener en cuenta que este sucederá durante el periodo de arranque del buque, es decir cuando el buque lleve una velocidad de 0 nudos.

En el gráfico 5 se refleja en el eje de ordenadas la potencia del motor, que es la suma de los dos motores (15950 kW) y en el eje de abcisas las revoluciones a las que trabaja el motor, que son 500 rpm.

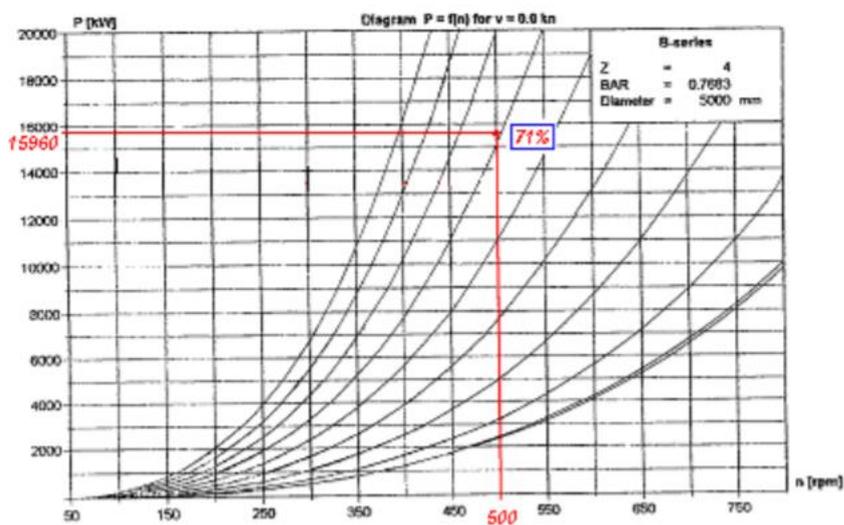


Gráfico 5. Gráfico HIDRA para cálculo del empuje de la hélice kW/rpm. Fuente: Diego Ramírez López.

Esta gráfica nos da que la fuerza máxima de empuje será cuando la hélice de paso variable esté al 71%.

En el gráfico 6 podemos obtener la fuerza de las hélices sobre las líneas de ejes cuando el paso sea del 71%.

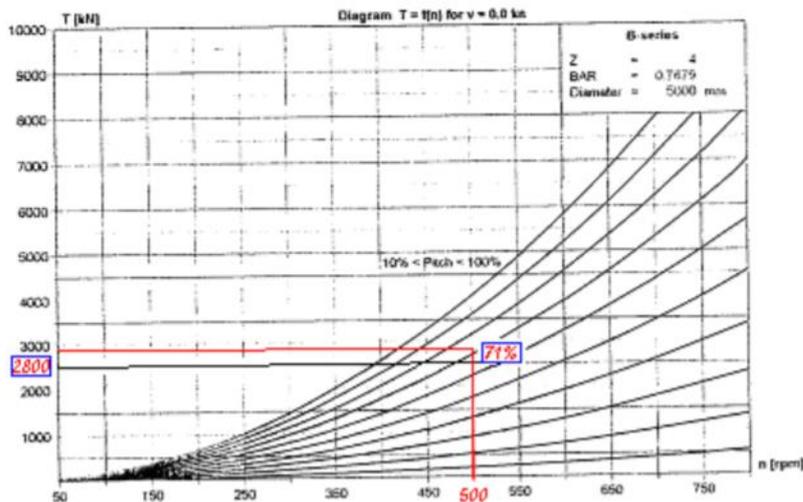


Gráfico 6. Gráfico HIDRA para cálculo del empuje de la hélice kW/rpm. Fuente: Diego Ramírez López.

La gráfica HIDRO nos da que la fuerza ejercida de las hélices sobre las líneas de ejes será de 2800 kN, es decir 1400 kN en cada línea de ejes.

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	1400000,000 N
Vector X	1400000,000 N
Vector Y	-0,000 N
Vector Z	-0,000 N

Tabla 5. Fuerza aplicada sobre la línea de ejes.

El resultado del análisis se puede observar en las siguientes ilustraciones. En las ilustraciones 44 - 50 se puede observar el desplazamiento que sufre el eje en cada uno de sus ejes y con la distancia en milímetros.

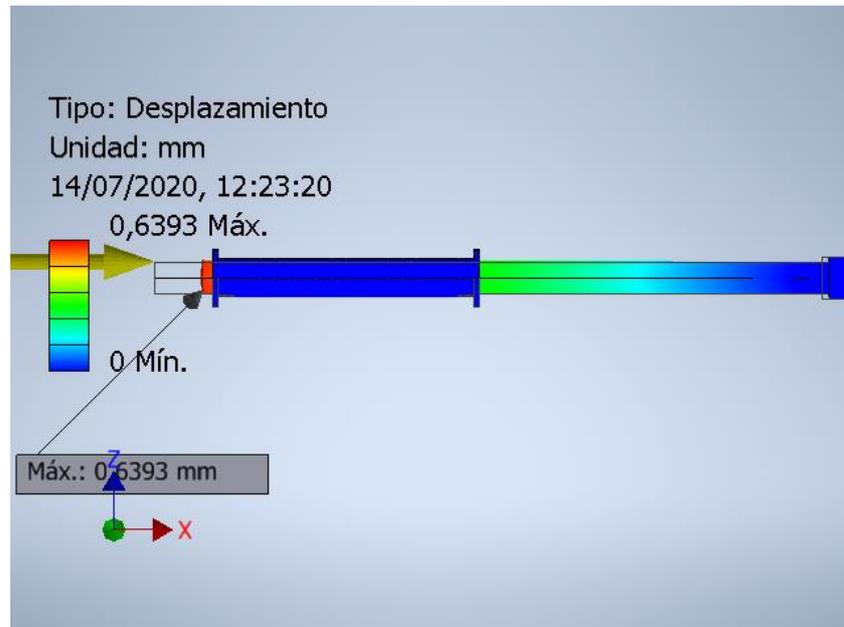


Ilustración 44. Desplazamiento de eje.

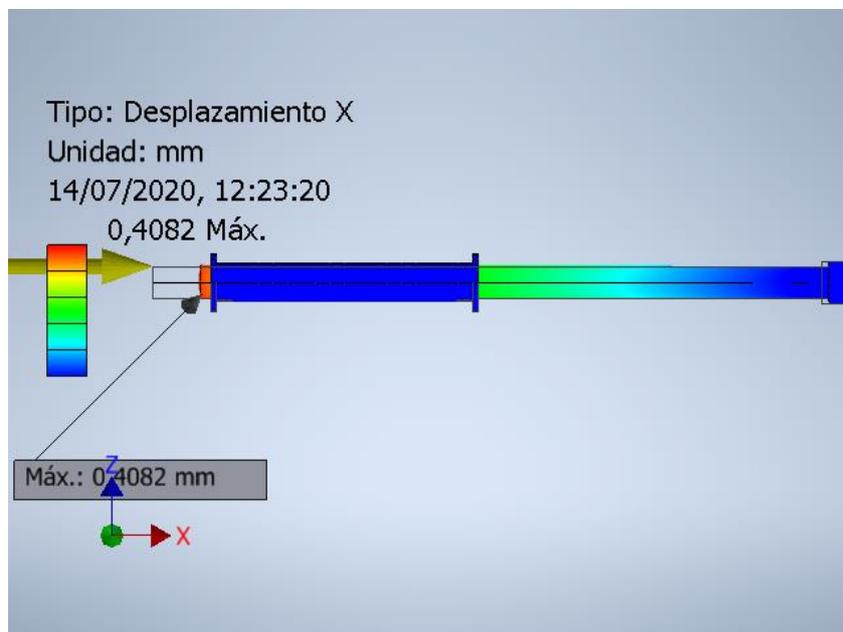


Ilustración 45. Desplazamiento del eje en el eje X.

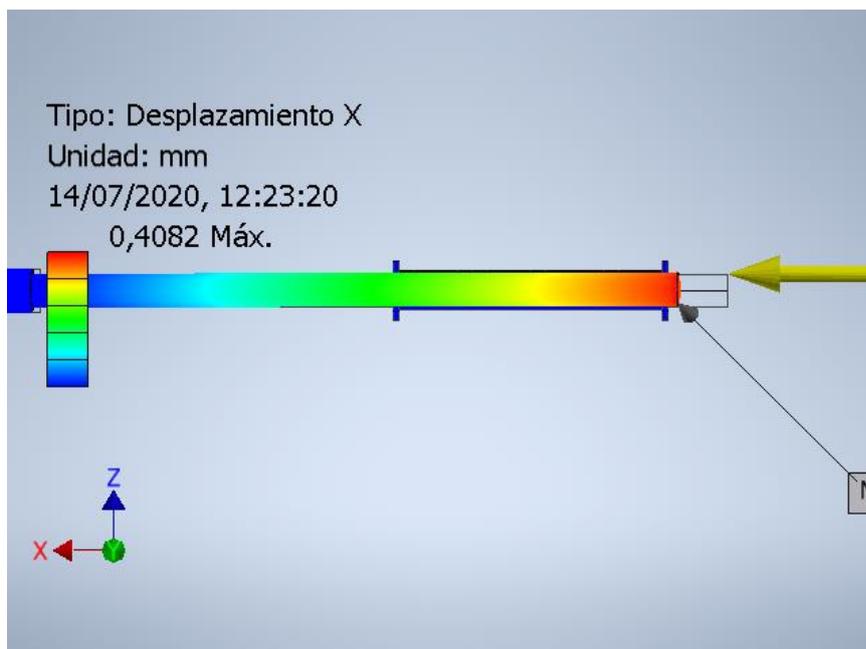


Ilustración 46. Desplazamiento en eje X.

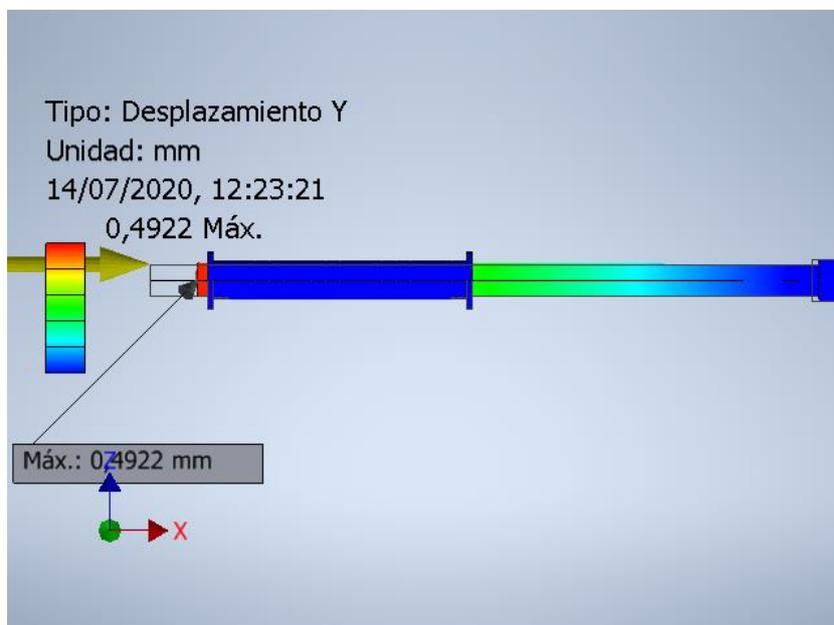
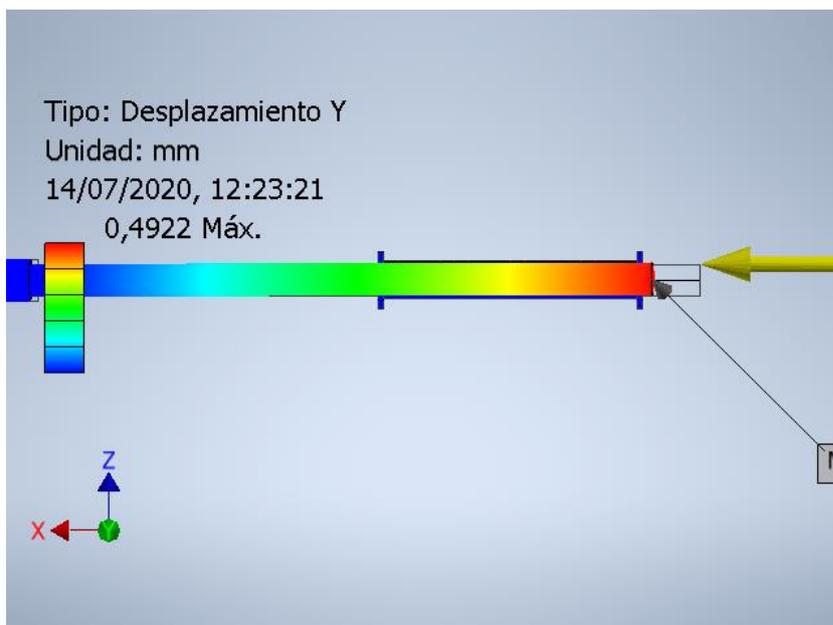
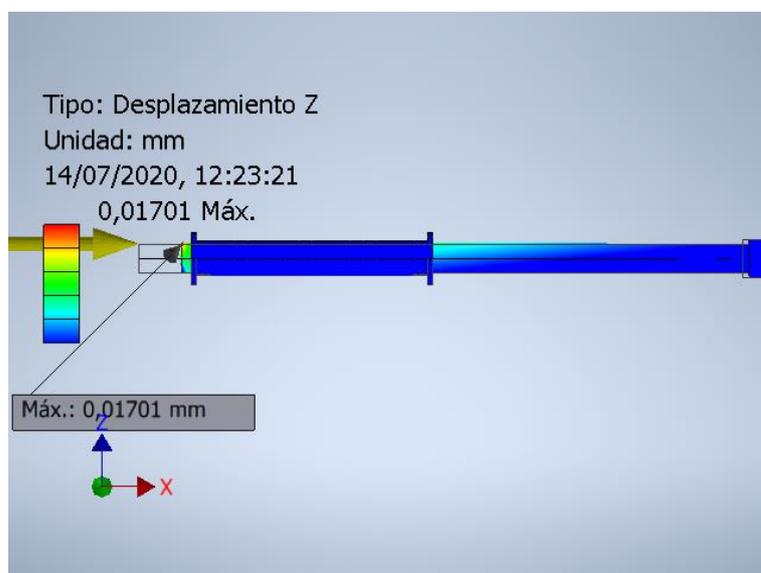


Ilustración 47. Desplazamiento en el eje Y.



Ilustracion 48. Desplazamiento en el eje Y.



Ilustracion 49. Desplazamiento en el eje Z.

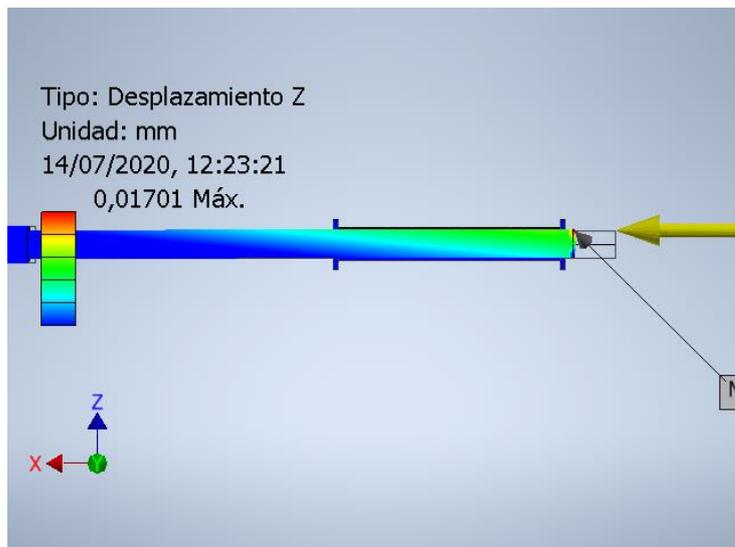


Ilustración 50. Desplazamiento en el eje Z.

Gracias a este análisis se puede apreciar la desviación que sufren los ejes durante la operación y la importancia de la periodicidad con la que se debe de realizar trabajos de alineación ya que los ejes sufren fuerzas constantemente que tienden a su desalineamiento.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	1,33438E+10 mm ³	
Masa	104748 kg	
Tensión de Von Mises	0 MPa	24,1853 MPa
Primera tensión principal	-2,34243 MPa	12,2091 MPa
Tercera tensión principal	-20,9498 MPa	3,90763 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,639332 mm
Coeficiente de seguridad	10,3369 su	15 su
Tensión XX	-18,2929 MPa	4,48811 MPa
Tensión XY	-6,0918 MPa	3,85409 MPa
Tensión XZ	-4,20908 MPa	7,51114 MPa
Tensión YY	-9,46398 MPa	10,9881 MPa
Tensión YZ	-1,49418 MPa	1,58524 MPa
Tensión ZZ	-3,76857 MPa	10,8775 MPa



Desplazamiento X	-0,00483568 mm	0,408198 mm
Desplazamiento Y	-0,0721216 mm	0,49225 mm
Desplazamiento Z	-0,0022989 mm	0,0170108 mm
Deformación equivalente	0 su	0,000100706 su
Primera deformación principal	0 su	0,0000514738 su
Tercera deformación principal	-0,000108394 su	0,0000000221085 su
Deformación XX	-0,0000919467 su	0,0000120327 su
Deformación XY	-0,0000377112 su	0,0000248589 su
Deformación XZ	-0,0000260562 su	0,0000464976 su
Deformación YY	-0,0000409147 su	0,000043315 su
Deformación YZ	-0,00000960384 su	0,0000102039 su
Deformación ZZ	-0,0000101198 su	0,0000346182 su
Presión de contacto	0 MPa	10,7733 MPa
Presión de contacto X	-9,45583 MPa	4,2809 MPa
Presión de contacto Y	-3,77129 MPa	4,84485 MPa
Presión de contacto Z	-4,12539 MPa	4,54868 MPa

Tabla 6. Resumen de resultados.



8. Conclusión.

En este trabajo se ha descrito la alineación como método para aumentar la vida útil de los equipos y reducir averías. Para entender la importancia de esta, se han descrito los distintos tipos de desalineación, debidos a una incorrecta alineación entre ejes.

En este trabajo también se han descrito los acoples encargados de la unión de ejes rotatorios, tanto los tipos que existen en el mercado, como las características que deben tener para absorber pequeños desalineamientos.

Para una correcto alineado es indispensable disponer de un método a seguir, para ello, en este trabajo se han explicado distintos tipos de alineación, desde los tradicionales (menos precisos), hasta los que necesitan de equipos láser para su realización, mucho más recomendables para aplicaciones industriales de mantenimiento. Este apartado es muy importante, ya que, si la alineación no se realiza correctamente, puede disminuir drásticamente la vida útil del equipo.

Como se puede apreciar en el análisis de tensión realizado, existen fuerzas ajenas al eje que tienden a su desalineamiento. Por lo que el trabajo de alineación no debe de realizarse solo en el montaje, como sucede en ocasiones, sino que debe de realizarse periódicamente por técnicos especializados para evitar el desgaste prematuro de las máquinas. Por lo que la alineación debería estar dentro de los planes de mantenimiento o GMAOs¹² de las industrias y de los buques, para realizarlo en todos aquellos equipos que puedan desalinearse.

Personalmente, me resulta muy interesante el tema de la alineación, durante la realización de este Trabajo Fin de Máster he podido ampliar mis conocimientos en este tema que me era desconocido, pero sabía de su importancia. Espero poder aplicar este conocimiento adquirido en un futuro cercano.

¹² Software orientado a la gestión de labores de mantenimiento.



9. BIBLIOGRAFÍA

- ▷ Acoplamientos mecánicos: ¿qué son y qué tipos hay? (2019, noviembre 26). *Sadi Transmisiones S.L.* <https://saditransmisiones.com/acoplamientos-mecanicos/admin>. (s. f.). *PIN Couplings | EVER-POWER INDUSTRY*. Recuperado 9 de julio de 2020, de <https://ever-power.biz/info/?p=482>
- ASALE, R.-, & RAE. (s. f.). *Alinear | Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Recuperado 13 de mayo de 2020, de <https://dle.rae.es/alinear>
- Cardán—EcuRed*. (s. f.). Recuperado 13 de mayo de 2020, de <https://www.ecured.cu/Card%C3%A1n>
- Desalineación Angular*. (s. f.). Recuperado 8 de mayo de 2020, de <http://support.azimadli.com/vibman-spanish/desalineacinangular.htm>
- Desalineación del eje y su contribución a fallas mecánicas. (2020, enero 27). *Dynamox*. <https://dynamox.net/es/desalineacion-del-eje-fallas-mecanicas/>
- Geislinger Coupling | Coupling with Hydrodynamic Damping*. (s. f.). Recuperado 9 de julio de 2020, de <https://www.geislinger.com/en/products/product/coupling>
- ISO 2041:2009(en), Mechanical vibration, shock and condition monitoring—Vocabulary*. (s. f.). Recuperado 9 de julio de 2020, de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2041:ed-3:v1:en>
- Kovacevic, J. (2017, septiembre 4). Understanding Soft Foot and How to Correct It. *HP Reliability, an Eruditio LLC Company*. <https://hpreliability.com/understanding-soft-foot-and-how-to-correct-it/>
- Las herramientas de alineación láser se ofrecen como parte del programa AIP+ de NSK - Automatización en la industria 4.0*. (s. f.). Recuperado 9 de julio de 2020, de <https://www.interempresas.net/Robotica/Articulos/162700-Las-herramientas-de-alineacion-laser-se-ofrecen-como-parte-del-programa-AIP-de-NSK.html>
- Manual de correas de transmisión industrial Dunlop*. (s. f.). Recuperado 9 de julio de 2020, de https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut121/Correas_Dunlop.pdf



Matthews, S. (2016, julio). *Alignment and Vibration: What is the correlation? - VibrAlign*.

<https://vibralign.com/other-topics/alignment-vibration-correlation/>

Miniature Bellows Couplings. (2020, febrero 7). R+W Kupplungen. [https://www.rw-](https://www.rw-couplings.com/products/precision-couplings/miniature-bellows-couplings/)

[couplings.com/products/precision-couplings/miniature-bellows-couplings/](https://www.rw-couplings.com/products/precision-couplings/miniature-bellows-couplings/)

Piotrowski, J. (2006). *Shaft Alignment Handbook*. CRC Press.

Proyecto fin de carrera de Ingeniería Técnica Naval Cálculo, dimensionamiento y

componentes de la línea de ejes de un buque Ro-Ro con una potencia instalada de

*2*8145Kw. Autor: Diego Ramírez López. (s. f.). Recuperado 14 de julio de 2020, de*

[https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6438/b34208975.pdf;jsessionid=1C](https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6438/b34208975.pdf;jsessionid=1C36397EA7777E8F6BC70AF7EA51AFA6?sequence=3)

[36397EA7777E8F6BC70AF7EA51AFA6?sequence=3](https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6438/b34208975.pdf;jsessionid=1C36397EA7777E8F6BC70AF7EA51AFA6?sequence=3)

Pumpen ausrichten mit Unterlegblechen. (s. f.). peel-plate.com. Recuperado 16 de julio de

2020, de [https://peel-plate.com/technische-details/anwendungsbereiche/pumpen-](https://peel-plate.com/technische-details/anwendungsbereiche/pumpen-ausrichten/)

[ausrichten/](https://peel-plate.com/technische-details/anwendungsbereiche/pumpen-ausrichten/)

Tensión en correas. Intermecc. (s. f.). Recuperado 9 de julio de 2020, de

https://www.intermec.com.co/pdf/Tension_de_correas.pdf

Tipos de acoplamientos de transmisión de potencia rígidos vs flexibles. (s. f.). Recuperado 9

de julio de 2020, de [https://eganagroup.com/une/tipos-de-acoplamientos-de-](https://eganagroup.com/une/tipos-de-acoplamientos-de-transmision-de-potencia/)

[transmision-de-potencia/](https://eganagroup.com/une/tipos-de-acoplamientos-de-transmision-de-potencia/)

Two coupling technologies compared: Flexible disc and bellows couplings. (2019, octubre 9).

Design World. [https://www.designworldonline.com/the-coupling-two-technologies-](https://www.designworldonline.com/the-coupling-two-technologies-compared-flexible-disc-and-bellows-couplings/)

[compared-flexible-disc-and-bellows-couplings/](https://www.designworldonline.com/the-coupling-two-technologies-compared-flexible-disc-and-bellows-couplings/)