



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA POR FATIGA CONSIDERANDO LAS
VIBRACIONES DE MAQUINARIA**

Julio Efrain Alonzo Urizar

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández

Guatemala, febrero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA POR FATIGA CONSIDERANDO LAS
VIBRACIONES DE MAQUINARIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JULIO EFRAIN ALONZO URIZAR

ASESORADO POR EL ING. VICTOR MANUEL RUIZ HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
EXAMINADOR	Ing. José Ismael Veliz Padilla
EXAMINADOR	Ing. Víctor Eduardo Izquierdo Palacios
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA POR FATIGA CONSIDERANDO LAS VIBRACIONES DE MAQUINARIA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 13 octubre 2011.

Julio Efrain Alonzo Urizar

Guatemala, 25 de enero de 2023

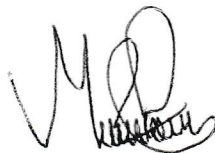
Ingeniero
Gilberto Enrique Morales Baiza
Director Escuela Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
USAC.

Estimado Ingeniero Morales:

Me dirijo a usted, para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado: **"CORROSION ELECTROQUIMICA POR FATIGA CONSIDERANDO LAS VIBRACIONES DE MAQUINARIA"** elaborado por el estudiante Julio Efrain Alonzo Urizar con numero de carnet. 1995-16882

Considero que éste llena los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería Mecánica, ya que ha cumplido las metas propuestas y lo encuentro completamente satisfactorio; por lo que recomiendo la aprobación del mismo.

Atentamente,



*Ing. Víctor Manuel
Ruiz Hernández
COL. 4620*

Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
Colegiado 4620



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.009.2023

El Coordinador del Área de Ingeniería de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA POR FATIGA CONSIDERANDO LAS VIBRACIONES DE MAQUINARIA**, desarrollado por el estudiante: **Julio Efrain Alonzo Urizar** con Registro Académico **199516882** y CUI **1599925830115** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área de Ingeniería de Materiales
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, febrero 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

LNG.DIRECTOR.047.EIM.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA POR FATIGA CONSIDERANDO LAS VIBRACIONES DE MAQUINARIA**, presentado por: **Julio Efrain Alonzo Urizar** , procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



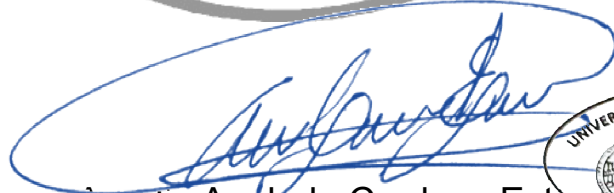
Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, febrero de 2023

LNG.DECANATO.OI.254.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA POR FATIGA CONSIDERANDO LAS VIBRACIONES DE MAQUINARIA**, presentado por: **Julio Efraín Alonzo Urizar**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, febrero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la vida, la sabiduría y entendimiento para alcanzar mis metas.
- Mis padres** Gabina Urizar y Julio Alonzo (q. e. p. d.), por sus consejos, enseñanzas y apoyo incondicional, siempre los amare.
- Mi esposa** Kenia Luna, por apoyarme en los momentos difíciles, y acompañarme en este camino de la vida.
- Mis hijos** Dwithg y Eightan Alonzo, por ser los motores que me hacen mantenerme activo.
- Mis hermanos** Sendi, Zulma, Gabriela y Marlon Alonzo, por su apoyo y consejos.
- Mis amigos** Marina Pineda (q. e. p. d.), y mi amigo Santos Ruano (q. e. p. d.). Por el gran apoyo a mi familia cuando más lo necesitaba.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindar los conocimientos necesarios para formarme como un profesional.
A Guatemala	A todos los guatemaltecos que con sus impuestos hacen posible mi sueño de ser un profesional universitario.
Mis amigos	Especialmente para Alejandro España, y a todos aquellos que han formado parte de mi vida.
Ingenieros	Ing. Hugo Ioli, por ser un gran motivador para terminar este proceso, a mi asesor Ing. Víctor Ruiz, por su gran apoyo al Ing. Carlos Pérez y a mi gran amigo Ing. Alden Gonzales.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. MARCO TEORICO.....	1
1.1. Acero	1
1.1.1. Tratamientos térmicos	2
1.1.1.1. Temple.....	3
1.1.1.2. Revenido	6
1.1.1.3. Recocido.....	6
1.1.1.4. Cementación.....	6
1.1.1.5. Nitruración	7
1.1.1.6. Cianuración.....	7
1.2. Fatiga.....	7
1.3. Corrosión	8
1.4. Corrosión electroquímica	9
1.5. Corrosión por fatiga	11
1.6. Vibración.....	13
2. CORROSION ELECTROQUIMICA Y VIBRACIONES DE MAQUINARIA.....	15
2.1. Corrosión electroquímica por fatiga	15

2.2.	Factores que aceleran la corrosión	16
2.2.1.	Tipo de metal.....	17
2.2.2.	Tratamiento térmico	18
2.2.3.	Pares galvánicos.....	18
2.2.4.	Zonas anódicas y catódicas	18
2.2.5.	Esfuerzos mecánicos	18
2.3.	Efectos que produce la vibración y la corrosión electroquímica	19
3.	PROBLEMAS MÁS COMUNES QUE PRODUCEN LAS VIBRACIONES	21
3.1.	Desbalanceo.....	21
3.2.	Desalineamiento.....	30
3.2.1.	Desalineación paralela	31
3.2.2.	Desalineación angular	32
3.3.	Holgura.....	34
3.4.	Resonancia.....	36
3.5.	Desgaste en rodamientos con elementos rodantes.....	37
3.5.1.	Lubricación inadecuada	38
3.5.2.	Contaminación	38
3.5.3.	Corrosión.....	39
3.5.4.	Desalineación.....	39
4.	ESTIMACION DE LA GRAVEDAD DE LA VIBRACION Y VERIFICACION DE LA VALIDEZ DE DATOS	41
4.1.	Tablas de severidad	41
4.1.1.	Tabla ISO 10816	42
4.1.2.	Carta de Rathbone	45
4.2.	Información del fabricante	47

4.3.	Comparación con máquinas iguales	49
4.4.	Factores que tienen que considerarse para una medición valida	50
4.4.1.	Ubicación de los puntos de prueba.....	53
4.4.2.	Orientacion de el acelerometro para realizar la medicion	55
CONCLUSIONES		59
RECOMENDACIONES		61
BIBLIOGRAFÍA.....		63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Cambios alotrópicos del hierro	3
2.	Representación general de tratamiento térmico temple	4
3.	Distorsión y cambio dimensionales después del temple	5
4.	Celdas unitarias austenita y martensita mostrando posición de átomo de carbono	5
5.	Corrosión electroquímica.....	10
6.	Serie galvánica para algunos metales y aleación comunes	11
7.	Corrosión por fatiga	12
8.	Trazo general curva de tensión-número de ciclos para acero al carbono	13
9.	Desbalanceo estático	22
10.	Desbalanceo dinámico	25
11.	Corrección desbalanceo dinámico	26
12.	Deformación geométrica de ventilador por succión de metal.....	27
13.	Ventilador desbalanceado por exceso de contaminación	29
14.	Ventilador centrífugo en reparación deteriorado por uso.....	30
15.	Desalineación paralela	31
16.	Desalineación angular	32
17.	Acoplamiento flexible y rígido.....	33
18.	Holgura mecánica	35
19.	Efecto de resonancia.....	36
20.	Valor de vibración de fabricante vs tabla ISO 10816-1	48
21.	Comparativa de vibraciones equipos idénticos	50

22.	Analizador de vibraciones	52
23.	Tendencia en frecuencia	53
24.	Puntos de medicion de vibraciones acople directo	54
25.	Puntos de medición acople con faja o acople indirecto	55
26.	Instalacion de sensor de vibracion en motor electrico.....	57

TABLAS

I.	Potenciales de electrodos estándar a 25 °C	17
II.	Carta de severidad de vibracion ISO 10816-1	42
III.	Mediciones de vibración de molinos	48
IV.	Vibración equipos idénticos	49

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ω^2	Aceleración en rad/s ²
PH	Acides
F	Fuerza en Newton
° C	Grados Celsius
kg	Kilogramo
M	Masa en kg
m	Metro
m/s ²	Metro sobre segundo al cuadrado
mm	Milímetros
%	Porcentaje
rad/s	Radianes sobre segundos
r	Radio
rpm	Revoluciones por minuto

GLOSARIO

Abrasión	Desgaste de una superficie por factores externos, como frotamiento, raspado, erosión y otras formas de contacto mecánico.
Abrasivo	Cuerpo duro que se usa, pulverizado o aglomerado, para pulimentar.
Acabado	Término genérico usado en pinturas, normalmente expresa la capa final de recubrimiento aplicado a un objeto.
Adhesión	Capacidad de un recubrimiento de unirse y permanecer fijo a un sustrato.
Aglutinante	De aglutinar, unir íntimamente dos cosas.
Aleación	Unión de dos metales por medio de la fusión.
Ánodo	Polo o electrodo positivo al que se dirige el anión o ion con carga negativa.
Anticorrosivo	Es el recubrimiento específicamente formulado para proteger un metal de la corrosión.

Catalizador	Acción que ejercen ciertos cuerpos en las reacciones químicas de otros sin sufrir ellos mismos modificaciones.
Catión	Ion, sea átomo o molécula con carga eléctrica positiva, es decir, que ha perdido electrones.
Cátodo	Polo negativo de un aparato eléctrico, es el electrodo de menor potencial y por el que pasa la energía eléctrica.
Colorante	Sustancia que imparte color a un recubrimiento, se distingue de un pigmento en que es totalmente soluble.
Cubrimiento	Capacidad de tapar, encubrir u opacar una superficie.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación se define el concepto de acero y de la importancia que hoy en día tiene en la industria mundial, así como las características que puede obtener cuando se le agregan algún elemento o se le aplica un tratamiento térmico, y las formas de como la corrosión puede debilitarlo al punto de hacerlo fallar prematuramente.

Se analiza como la corrosión electroquímica en combinación con la fatiga puede acelerar el proceso de falla de una pieza de acero o rodamientos, es bien importante saber que ambientes húmedos, piezas golpeadas en montajes o mantenimiento puede acelerar el proceso de corrosión, importante también tener cuidado al combinar los metales tomando en cuenta su carga eléctrica interna.

Las vibraciones mecánicas en la maquinaria rotatoria producen fallos prematuros, se mencionan las causas que producen las vibraciones y de cómo pueden ser corregidas, situaciones en la que no pueden ser eliminadas totalmente, pero se debe saber que existen tablas que indican parámetros de trabajo normal que permiten un funcionamiento correcto de los equipos.

Se especifica los puntos de la maquinaria donde se deben realizar las mediciones de vibraciones, mediciones hay que realizar y la información que genera cada una de ellas.

OBJETIVOS

General

Proponer un estudio de corrosión electroquímica por fatiga considerando las vibraciones de maquinaria.

Específicos

1. Conocer los efectos que puede provocar la corrosión electroquímica por fatiga y las vibraciones mecánicas.
2. Estimar los valores promedio en los cuales deben de trabajar las máquinas para evitar que produzca una aceleración del proceso de corrosión.
3. Identificar los problemas que pueden darse, cuando no se toman en cuenta la corrosión y vibración.

INTRODUCCIÓN

La corrosión electroquímica por fatiga considerando las vibraciones de maquinaria, es un fenómeno que regularmente no es considerado como factor de posibles fallas en el tiempo.

Es importante conocer los efectos perjudiciales que puede generar y las condiciones que favorecen para que se produzcan daños parciales e incluso daños que pueden disminuir la vida útil de la maquinaria, factores como el clima donde se tienen los equipos hasta condiciones generadas durante el montaje puede ser una fuente para el origen de estas condiciones.

Estimar los valores de vibraciones en equipos rotatorios debido a que, aunque estos parezcan inofensivos, si están fuera de los parámetros de trabajo en el tiempo provocan daños perjudiciales en partes mecánicas.

Se definirán conceptos generales de corrosión, fatiga, vibraciones mecánicas, valores estimados de vibración aceptables que están dados por el fabricante o encontrados por tablas de niveles de severidad, así como también mostrar los puntos clave de la maquinaria donde se deben realizar la toma de mediciones de vibración.

1. MARCO TEORICO

1.1. Acero

El acero como tal no tiene una formula porque no es un elemento o un compuesto, no se encuentra en la corteza de la tierra en estado puro.

El acero es producto de una combinación del hierro (Fe), con una cantidad de carbono (C), que puede variar del 0.088 % y el 2.11 % del peso de la aleación.

La construcción de maquinaria, obras civiles, se ha vuelto importante para el desarrollo de la economía mundial, los metales y las aleaciones son la base para la construcción de máquinas para las distintas ramas de la industria.

La calidad y durabilidad de una máquina depende de las propiedades especiales del acero las cuales se obtienen a partir del tratamiento térmico que se utilice y se deberá de escoger según la aplicación o trabajo al cual se someta el equipo fabricado.

Dependiendo de la cantidad de carbono que se le agregue al hierro y al tratamiento térmico que se aplique, puede adquirir diferentes propiedades de resistencia, elasticidad y dureza. El tratamiento térmico es importante en la metalografía.

1.1.1. Tratamientos térmicos

El grado de temperatura alcanzado y la rapidez para enfriarlo diferencian los tratamientos térmicos. Para saber el tipo de tratamiento térmico que se debe aplicar a un acero es necesario conocer las relaciones que hay entre las propiedades de él y su estructura.

Los tratamientos térmicos más conocidos son el temple, el revenido y recocido también existen tratamientos especiales como la cementación, nitruración y cianuración, estos últimos se diferencian de los primeros ya que se aplican a los aceros con bajo contenido de carbono.

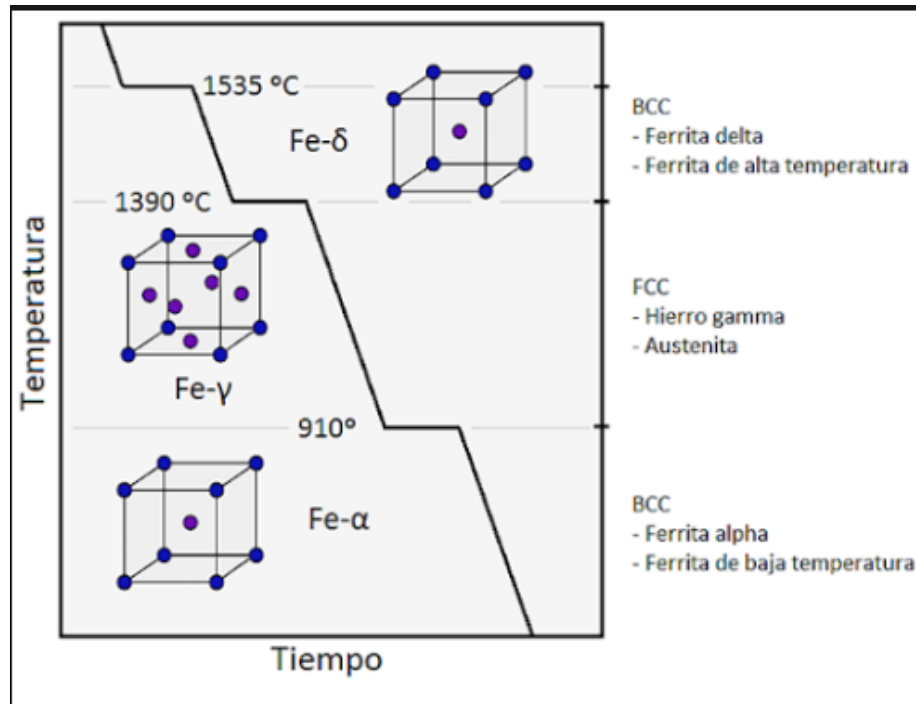
El hierro en estado sólido presenta diferentes estructuras cristalinas que cambian a determinadas temperaturas, Por ejemplo, hierro en estado sólido presenta una estructura cubica centrada en el centro que se mantiene de los 0° C a 910 °C hierro alfa.

A partir de los 910 °C la estructura cubica cambia, el átomo del centro desaparece y se forman otros átomos nuevos y distintos que pasan a centrarse en las caras, hierro gamma.

De los 1400 °C hasta los 1528 °C vuelve a tomar la estructura cubica centrada en el centro hierro delta.

A partir de los 1539 °C el hierro se vuelve líquido debido a que ha llegado a su punto de fusión.

Figura 1. Cambios alotrópicos del hierro



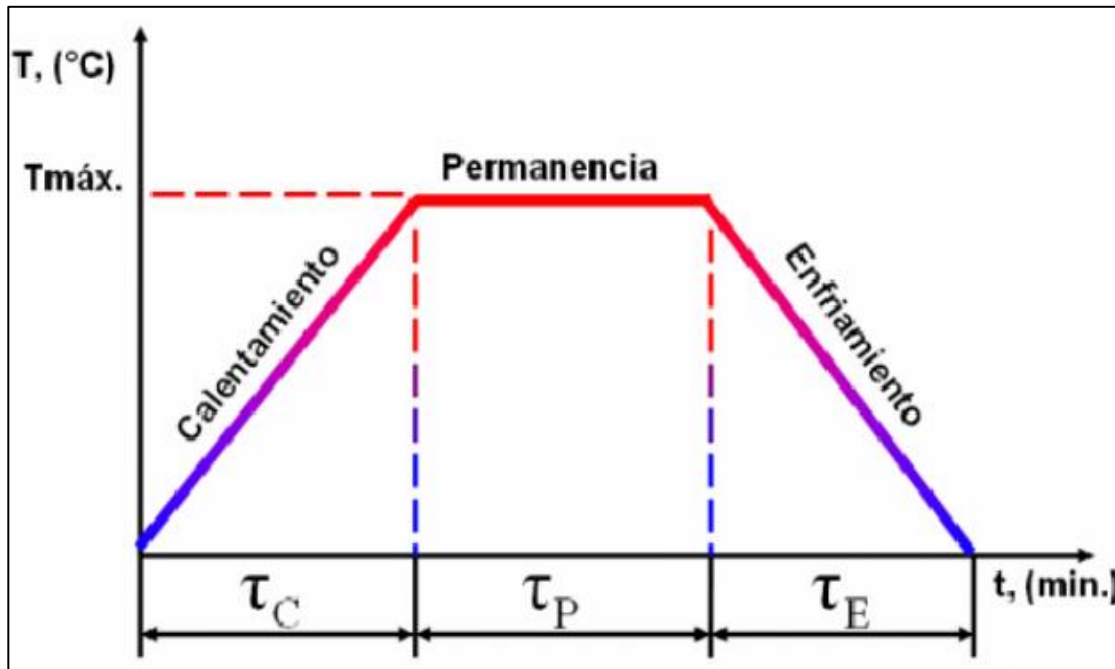
Fuente: Dual Metalurgia. *Metalurgia Física Básica*.

<http://dualmetalurgia.com/metalurgia/metalurgia-fisica-basica-del-acero/>. Consulta: 15 de agosto de 2022.

1.1.1.1. Temple

El temple se realiza en tres fases. Fase 1 el calentamiento hasta una temperatura de 1139 °C, fase 2 calor permanente a 1139 °C y fase 3 enfriamiento lento o brusco, El Temple es un tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la dureza y resistencia mecánica del material, transformando toda la masa en Austenita con el calentamiento y después, por medio de un enfriamiento brusco (con aceites, agua o salmuera, aire), se convierte en Martensita, que es el constituyente duro típico.

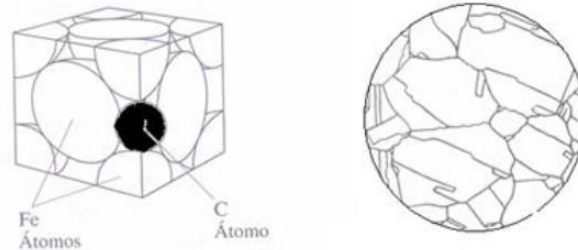
Figura 2. Representación general de tratamiento termico temple



Fuente: RODRÍGUEZ SOCA, Isabel; DÍAZ HERNÁNDEZ, Yusdel; FIOL ZULUETA, Alberto; CABALLERO STEVENS, Nilda. *Método para el cálculo de hornos metódicos de pozo para el revenido de aceros*. https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Esquema-de-representacion-general-de-tratamiento-termico-En-el-caso-del_fig2_308417027. Consulta: 15 de agosto de 2022.

¿Qué es austenita? La austenita, también conocida como gamma hierro es una forma de ordenamiento específico de los átomos de hierro y carbono. Está formado por una disolución sólida del carbono en hierro, lo que supone un porcentaje máximo de C del 2,11 %. La austenita es dúctil, blanda y tenaz.

Figura 3. **Distorsión y cambio dimensionales después del temple**



Estructura interna austenita

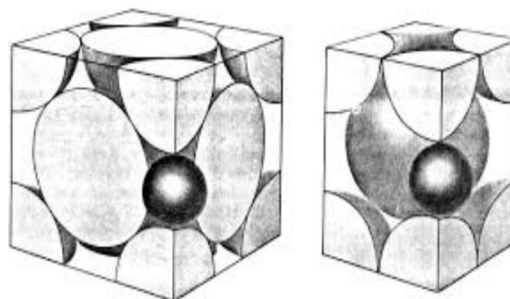
vista microscópica austenita

Fuente: TORRE, Fabiana. *Conocimiento de los materiales*.

<https://sites.google.com/site/conocerlosmateriales/>. Consulta: 15 de agosto de 2022.

¿Qué es martensita? La Martensita es una fase metaestable de los aceros, producto de la transformación de fases sin difusión desde la austenita a una velocidad muy cercana a la del sonido en el material.

Figura 4. **Celdas unitarias austenita y martensita mostrando posición de átomo de carbono**



Estructura interna austenita

estructura interna martensita

Fuente: LARRE, Va. *Transformaciones de la austenita fuera del equilibrio*.

<https://docplayer.es/55183740-Vi-transformaciones-de-la-austenita-fuera-del-equilibrio.html>.

Consulta: 15 de agosto de 2022.

Los equipos para realizar los tratamientos térmicos son los hornos ya que estos tienen controles de temperatura y se puede graduar la temperatura deseada. Se debe de evitar la entrada de gas o aire. El enfriamiento se puede realizar con aceite, con agua o aire. Con el agua se obtiene el enfriamiento más rápido y por lo que se obtienen estructuras muy duras martensita, con enfriamiento lento, se pueden obtener estructuras ferrítica, perlítica o cementita.

1.1.1.2. Revenido

Es un tratamiento térmico a baja temperatura, se realiza normalmente posterior al temple, consiste en calentar una pieza templada entre 260 °C a 350 °C, menor a la temperatura del temple y a continuación enfriarla a temperatura ambiente, esto busca volver el acero más tenaz gracias a su mayor dureza, Si se aumenta la temperatura de revenido disminuye la dureza.

1.1.1.3. Recocido

Con este proceso se eliminan tensiones internas originadas por la conformación en frío o en caliente se eleva la temperatura de 500 °C a 600 °C grados, se calienta la pieza a una temperatura determinada y se mantiene durante un tiempo para luego enfriarla después con lentitud.

1.1.1.4. Cementación

Es el proceso de saturación con carbono de las superficies de las piezas de acero consiste en obtener alta dureza en la superficie de una pieza conservando la tenacidad en su núcleo por ejemplo engranajes, ejes de levas.

Piezas con bajo contenido de carbono hasta de 0.25 por ciento se realiza a temperaturas entre 900 °C y 950 °C, las piezas se dejan a sobre medidas para el rectificado de las mismas entre 0.05 a 0.1 mm.

1.1.1.5. Nitruración

Proceso de saturación del acero con nitrógeno, el proceso se realiza con presencia de amoníaco con temperaturas de 280 °C a 450 °C, se usan aceros aleados con porcentaje medio de carbono que contienen cromotungsteno molibdeno vanadio y aluminio, extrema dureza y un grado de resistencia por rozamiento, camisas de motores piezas sometidas a fricción y altas temperaturas.

1.1.1.6. Cianuración

Tratamiento termoquímico donde se agrega cianuro al acero con el objeto de obtener una superficie dura y resistente al desgaste, este proceso se aplica al oro en las minas.

Con el paso del tiempo se ha logrado mezclar al acero otros elementos que dan como resultado acero de mejor calidad para los diferentes procesos de la industria mundial.

1.2. Fatiga

La fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas.

La fatiga de los materiales es un proceso de daño que se produce en los elementos mecánicos cuando se someten a cargas variables, incluso aunque estas sean varias veces inferiores a las que producirían la rotura ante una carga constante.

Carga cíclica es cuando un material es sometido a cargas de tensión y compresión, dichas cargas son menores a la carga de rotura del material.

1.3. Corrosión

En el diario vivir es normal que en algún pasaje de la vida se haya podido observar la corrosión, piezas oxidadas algunas porque se han quedado abandonadas o en la intemperie, otras por estar dentro de botes con agua entre otros.

El fenómeno de la corrosión es muy común para el ser humano debido a que la mayoría de los instrumentos de trabajo, maquinaria, muebles de oficina están hechos en su totalidad o en forma parcial de acero. En este capítulo se hablará de algunas formas que se da el ataque de la corrosión al acero.

Se puede definir la corrosión como el deterioro de un metal a consecuencia de un ataque químico o electroquímico o por interactuar con el medio que lo rodea, su entorno o tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma de mayor estabilidad o de menor energía interna.

Por qué es importante saber los daños que puede provocar la corrosión a los aceros, como se hace mención del principio de este enunciado la mayor parte de máquinas están fabricadas por acero y este es muy propenso a los ataques

corrosivos, no se puede evitar, pero si se puede prolongar los daños que esta provoca.

Hoy en día la industria mundial necesita mantener un ritmo de producción, para poder mantener los costos de producción y la meta diaria para satisfacer los mercados.

Tomar las precauciones pertinentes para que pueda prologarse una falla mantendrá la continuidad que requieren los procesos de la industria actual.

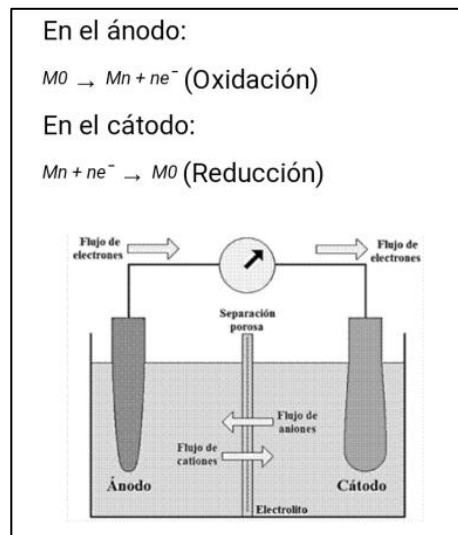
1.4. Corrosión electroquímica

La mayoría de los procesos de corrosión involucran reacciones de reducción-oxidación (reacciones electroquímicas), donde para que se desarrollen estos procesos, es necesaria la existencia de tres constituyentes:

- Unos electrodos (ánodo y cátodo)
- Un electrolito, como medio conductor, que en la mayoría de los casos corresponde a una solución acuosa.
- Una conexión eléctrica entre los electrodos.

La figura 5 muestra el esquema.

Figura 5. **Corrosión electroquímica**



Fuente: SALAZAR JIMÉNEZ, José Alberto. *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)*.

<https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>. Consulta: 15 de agosto de 2022.

Ambas reacciones ocurren de forma simultánea como se observa en las ecuaciones, el ánodo cede electrones al sistema cuando reacciona, aumentando su número de oxidación, cambiando de su estado metálico base a cationes que se disuelven en el electrolito, siendo este el material que sufre el fenómeno de la corrosión, mientras que, en el cátodo, los aniones metálicos absorben electrones, disminuyendo su número de oxidación, por lo que cambian a su estado base.

El potencial electroquímico define la resistencia de un material metálico a la corrosión, cuyo valor varía en dependencia de la composición del electrolito, cuanto más positivo sea el valor de dicho potencial, más noble (resistente) es el material. Mientras que, en el caso contrario, mientras más negativo sea este, más reactivo es el material a la corrosión.

La serie galvanica consiste en una tabla donde se ubican diferentes tipos de materiales respecto al potencial electroquímico de estos ver figura.

Figura 6. **Serie galvánica para algunos metales y aleación comunes**



Fuente: SALAZAR JIMÉNEZ, José Alberto. *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)*.

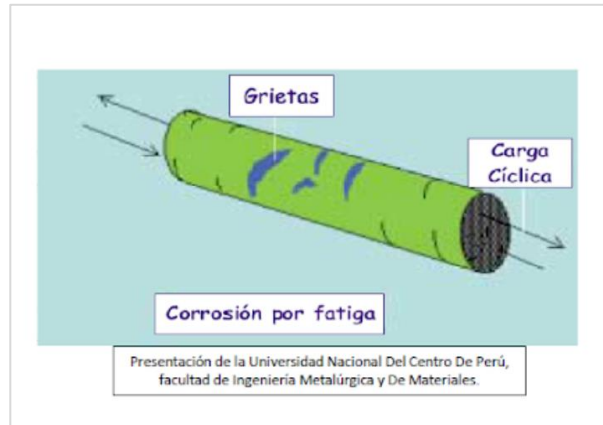
<https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>. Consulta: 15 de agosto de 2022.

1.5. Corrosión por fatiga

Este proceso se desarrolla en materiales, sujeto a esfuerzos externos, similar al de tensión, con la diferencia que estos esfuerzos son cíclicos o fluctuantes. De igual forma que con el proceso de tensión, el material se deteriora en mayor medida mediante la combinación de los dos fenómenos, comparado a cada uno por separado.

Se conoce como corrosión-fatiga al proceso a través del cual se produce agrietamiento por la acción combinada de una tensión cíclica y la presencia de un medio agresivo desde el punto de vista de la corrosión.

Figura 7. **Corrosión por fatiga**



Fuente: Universidad de Nacional del Centro de Perú. *Corrosión por fatiga*.

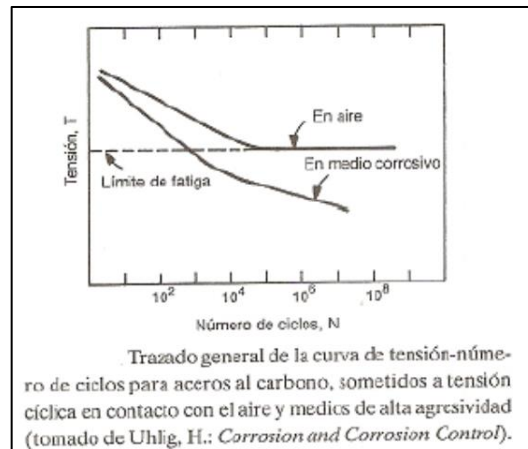
<https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/07/corrosion-por-fatiga.html>. Consulta: 15 de agosto de 2022.

Aparecen inmediatamente dos características diferenciales con respecto al fenómeno de agrietamiento por corrosión bajo tensión: la tensión debe de ser cíclica, no estática y no es necesaria la presencia de un medio agresivo específico para cada material metálico.

Una consecuencia de lo anterior es el hecho de que un material sea inmune a la corrosión bajo tensión es una condición de operación determinada no presupone un buen comportamiento frente a fenómenos de corrosión fatiga.

Se sabe, que desde el punto de vista exclusivamente mecánico los fenómenos de fatiga se caracterizan a través de las curvas T vs N donde T representa la tensión cíclica aplicada y N el n° de ciclos que se aplica. La curva correspondiente define las regiones en que se produce la rotura, que corresponde a situaciones a la izquierda de dicha curva, y aquellas en que no hay riesgo de rotura situadas a la derecha de la misma.

Figura 8. **Trazo general curva de tensión-número de ciclos para acero al carbono**



Fuente: Universidad de Nacional del Centro de Perú. *Corrosión por fatiga*.

<https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/07/corrosion-por-fatiga.html>. Consulta: 15 de agosto de 2022.

1.6. Vibración

La vibración mecánica puede describirse como el movimiento de un cuerpo sólido alrededor de una posición de equilibrio, sin que se produzca desplazamiento neto del mismo. Si el objeto que vibra entra en contacto con alguna parte de cuerpo humano. Le transmite la energía generada por la vibración.

Es el movimiento de vaivén de una maquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio, generalmente la causa reside en problemas mecánicos como son, desequilibrio o desbalanceo, desalineación, holgura mecánica, resonancia más adelante se hablará a profundidad de estas cuestiones, entre otros.

2. CORROSION ELECTROQUIMICA Y VIBRACIONES DE MAQUINARIA

2.1. Corrosión electroquímica por fatiga

Anteriormente se mencionó que la fatiga es una falla que se dan por deformaciones por golpes o secciones que tengan concentración de esfuerzos producto de un mal diseño o por aplicar soldadura, que puede suceder bajo condiciones bastante inferiores al límite de resistencia del metal u otros materiales esto en una región elástica, es consecuencia de esfuerzos alternados que producen grietas en general en las superficies debido a la concentración de tensiones.

La corrosión electroquímica es la forma más común de corrosión, el contacto del acero con un fluido generando una pila galvánica que deteriora el acero.

La aplicación de cargas repetitivas de un metal en un ambiente corrosivo, produce en el metal una disminución en su resistencia provocados por la combinación de ambos.

Sobre la superficie de la pieza se generan cargas a tensión o compresión y un medio de corrosión, esta combinación de corrosión es muy peligrosa porque afecta piezas de acero que se mantienen en rotación y que pueden causar una falla prematura.

Los esfuerzos o cargas que produce la corrosión por fatiga afecta más las zonas que presentan defectos ya sea por un diseño defectuoso o por golpes que hayan ocasionado en su transporte o en el montaje de las mismas, ejemplo un martillazo que se le proporcione a un eje que rota sobre chumaceras y tiene la carga de un ventilador centrifugo.

La muesca generada por ese martillazo es el punto donde se presentará con más rapidez la corrosión por fatiga y en ese lugar es el más probable que se dé la falla.

Es este punto donde se empezará a corroer luego por efectos de las cargas cíclicas esta empezará a provocar pequeñas fisuras al principio microscópicas pero que con el tiempo a medida que se amplió la zona de la abertura la corrosión entrará más y más al centro del material hasta debilitarlo, al haber un fluido como medio en el acero este formará una pila galvánica que acelera el proceso de la falla, producto de corrosión.

Los esfuerzos que generan la fatiga se concentran con mayor facilidad en los defectos o muescas que tenga el material, golpes, marcas que tenga la pieza, generando en el fondo de estos defectos formas con gran contenido de energía que actúan como ánodos y los bordes como cátodos de forma que se produce una pila galvánica de gran potencia al existir una gran superficie catódica.

2.2. Factores que aceleran la corrosión

Existen muchos factores que pueden acelerar el proceso de corrosión a continuación se mencionan algunos.

El potencial eléctrico de los metales, formación de películas y biopelículas, temperatura a la que se encuentra el acero, velocidad de corrosión, agentes antioxidantes, PH del medio ambiente. Esfuerzo mecánico, tiempo de exposición al ambiente corrosivo, conductividad del electrolito, zonas anódicas y catódicas.

2.2.1. Tipo de metal

Cuanto mayor sea la tendencia de un metal de ceder electrones, mayor será su potencial de reducción y este se corroerá con mayor facilidad y más rápido, por eso es muy importante tomar en cuenta estos factores al diseñar piezas mecánicas o maquinaria.

Tabla I. Potenciales de electrodos estándar a 25 °C

	Reacción de oxidación (corrosión)	Potencial del electrodo (E°) (voltios contra electrodo de hidrógeno estándar)
<p>Más catódico (menos tendencia a la corrosión)</p> <p>↑</p>	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3e^-$	+1.498
	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^-$	+1.229
	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2e^-$	+1.200
	$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + e^-$	+0.799
	$2\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^{2+} + 2e^-$	+0.788
	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$	+0.771
	$4(\text{OH})^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^-$	+0.401
	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2e^-$	+0.337
	$\text{Sn}^{2+} \rightarrow \text{Sn}^{4+} + 2e^-$	+0.150
	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e^-$	0.000
<p>Más anódico (mayor tendencia a corroerse)</p> <p>↓</p>	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2e^-$	-0.126
	$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2e^-$	-0.136
	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2e^-$	-0.250
	$\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2e^-$	-0.277
	$\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2e^-$	-0.403
	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$	-0.440
	$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3e^-$	-0.744
	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e^-$	-0.763
	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3e^-$	-1.662
	$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2e^-$	-2.363
$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + e^-$	-2.714	

Fuente: SMITH, William; HASHEMI, Javad. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. p. 830.

2.2.2. Tratamiento térmico

Un tratamiento térmico no apropiado para la pieza que se ha fabricado, puede ocasionar la aparición de la corrosión intergranular, debido a que puede haberse sobrecalentado el metal.

2.2.3. Pares galvánicos

Debido a la diferencia en su potencial electroquímico En ocasiones es necesario para la reparación de o fabricación de alguna parte de maquinaria mezclar dos materiales, es importante saber los materiales que se van a poner en contacto debido a que, si estos están en contacto con un electrolito, el material de mayor potencial de reducción tendera a corroerse. La conductividad del electrolito puede acelerar el proceso de corrosión.

2.2.4. Zonas anódicas y catódicas

En la fabricación de piezas puede darse que por diseño queden zonas anódicas y catódicas producto del no redondeo de las terminaciones en los cambios de secciones, también es de considerar que estas zonas también pueden darse por golpes en las superficies, rayones, o muescas donde se puedan concentras esfuerzos de tensión.

2.2.5. Esfuerzos mecánicos

Se considera una pieza sometida a esfuerzos mecánicos y que a su vez esté en un ambiente corrosivo, de hecho, se debe considerar que la presencia de oxígeno en la atmosfera genera desde ya el proceso de la corrosión, las fisuras que se generen productos de esfuerzos mecánicos aceleran la corrosión.

2.3. Efectos que produce la vibración y la corrosión electroquímica

Como se puede analizar hasta el momento se ha visto que la mayor parte de la corrosión metálica incluye reacciones electroquímicas, ahora se pondrá otro factor que es normal que se haga presente en la maquinaria y son las vibraciones.

La vibración no es más que un movimiento alternante de una parte de una maquina desde su posición de reposo, dicho en otras palabras, es una reacción de la estructura a las fuerzas generadas internamente en la máquina cuando esta se enciende producto de la fuerza de accionamiento de un motor eléctrico generalmente.

Se sabe que la vibración producirá esfuerzos cíclicos, que someterán a tensión al metal, provocando en el tiempo (se sabe que son cargas menores a la carga donde fallaría el material), fisuras y estas serán el foco para que se genere la corrosión.

La presencia del oxígeno en la atmosfera y de otros tipos de contaminación que se depositen sobre el metal en una maquina ayudara a que la corrosión sede con mayor velocidad, ya que dicha contaminación puede crear un electrolito que arme una gran pila voltaica, producto de generar un gran zona anódica o catódica.

3. PROBLEMAS MAS COMUNES QUE PRODUCEN LAS VIBRACIONES

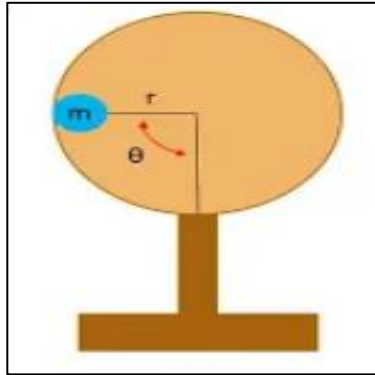
3.1. Desbalanceo

El desbalanceo es un ejemplo muy común de la generación de vibraciones mecánicas en la maquinaria rotativa. Las vibraciones pueden ser causadas por varios problemas, que pueden actuar por separado o en conjunto.

El desbalanceo o desequilibrio se da cuando el componente giratorio tiene un punto más pesado en su construcción, cuando este empieza a girar, el punto más pesado producirá una fuerza centrífuga, que será mayor que en los demás puntos provocando la vibración.

También puede darse por defectos de fabricación, o por problemas de mantenimiento (aspas de ventiladores deformadas o sucias, falta de contrapesos). Los efectos de un desbalanceo se notan más, a medida que aumente la velocidad. Se analizará la rueda de la figura 10 el punto de color representa la masa del punto más pesado.

Figura 9. **Desbalanceo estático**



Fuente: SERGIO VALENTÍN, Vásquez Flores. *Balaceo estático*.

<https://www.youtube.com/watch?v=Km4k7x7C8e0>. Consulta: 18 de agosto de 2022.

Se va a calcular el valor de la fuerza centrífuga y se sabe que $F = m \cdot a$ de la rueda. Ahora se va a deducir la fórmula, como es una aceleración angular, se puede decir que:

$$F = m\omega^2 r$$

Donde:

F = es la fuerza en newton,

M = la masa en kg.

ω^2 = la aceleración en m/s^2 , como es un disco

- Ejemplo1.

Suponiendo que la masa $m=1$ kg, velocidad de rotación $\omega=1740$ rpm y radio de $r= 0.25$ m.

Sustituyendo datos en $F=m\omega^2r$ se tiene:

$$F = (1 \text{ Kg})(1740/9.55 \text{ rad/s})^2(0.25 \text{ m}) = 8299.1 \text{ Newton}$$

La fuerza centrífuga provocada por esta masa a 1740 rpm es de 8299.1 newton.

- Ejemplo 2

Suponiendo que la masa $m=1 \text{ kg}$, velocidad de rotación $\omega=800 \text{ rpm}$ y radio de $r= 0.25 \text{ m}$.

Sustituyendo datos en $F=m\omega^2r$ se tiene:

$$F = (1 \text{ Kg})(800/9.55 \text{ rad/s})^2(0.25 \text{ m}) = 1754,3 \text{ Newton}$$

La fuerza centrífuga provocada por esta masa a 800 rpm es de 1754.3 newton.

En los ejemplos se observa que, la fuerza centrífuga cambio sustancialmente a medida que aumenta la velocidad.

Por ello es importante que cuando se tenga la necesidad de realizar un balance dinámico, se le brinde a la empresa contratante del servicio la velocidad de giro del equipo acompañado de la potencia del motor de inducción, porque con esos datos ellos clasifican los equipos por clase I, II, III y IV, para obtener la vibración admisible del equipo rotativo estas tablas se mencionaran en siguiente capítulo.

El desbalanceo puede ser en un plano y dos planos. Y se soluciona quitando o agregando peso a la masa del elemento giratorio con el objeto de trasladar el centro de gravedad hacia el eje de rotación.

- Desbalanceo en un plano

Actúa en un solo plano, afecta a elementos rodantes angostos, sean discos, ruedas de ventiladores, volantes entre otros. Normalmente se hace instalando un eje en el centro del disco o ventilador y este eje se coloca sobre dos apoyos o rieles que deben de estar perfectamente nivelados.

Sobre el riel se coloca el eje para que este pueda rodar, al hacerlo girar e ir deteniéndose este buscará colocar su lado más pesado hacia abajo por la acción de la fuerza de gravedad.

Sera necesario que cuando se gire el elemento rodante sobre los apoyos, marcar la posición donde se detenga y volver a realizar la operación un par de veces más, si la posición marcada vuelve a quedar hacia abajo confirma que ese es el lado más pesado del elemento giratorio y que la masa de corrección deberá de colocarse a 180° grados de este punto.

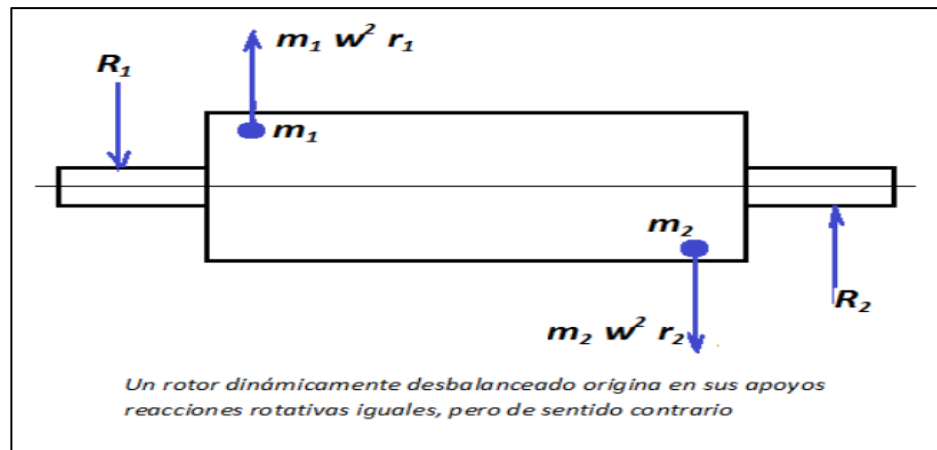
Este desbalanceo se puede corregir agregando o quitando masa y esto dependerá de la forma espesor de la lámina o tipo de material del que esté fabricado.

Normalmente si es acero las masas se sueldan al elemento rodante o pueden también atornillarse o si es muy complicado instalar contrapesos entonces se desgasta con pulidora o se desbasta en una fresadora tal es el caso de los impulsores de las bombas centrifugas.

- Desbalanceo en dos planos

También se conoce como desbalanceo dinámico, es el tipo de desbalanceo más frecuente y la inercia no se presenta en el eje de rotación. Ver figura.

Figura 10. **Desbalanceo dinámico**



Fuente: Full Mecánica. *Balaceo dinámico / algo de teoría.*

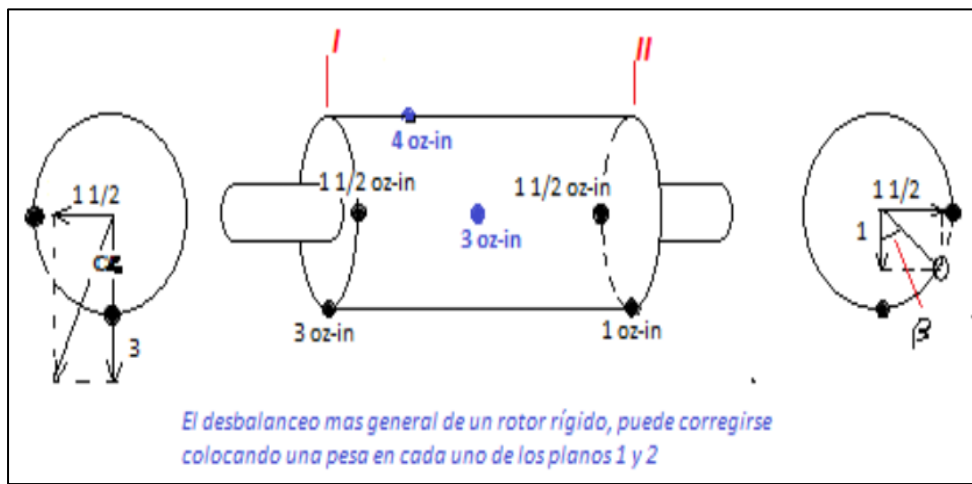
<http://www.fullmecanica.com/definiciones/b/1827-balanceo-dinamico>. Consulta: 18 de agosto de 2022.

Para lograr la corrección en este tipo de problema es necesario realizar balanceo en los dos planos de tal manera que la fuerza que se va a generar por la colocación de las masas en los dos planos elimine las fuerzas dinámicas y la suma de todos los momentos generados por ellas.

Para este tipo de corrección es necesario un analizador de vibraciones con un módulo de balanceo porque hacerlo sin un equipo es muy complicado. Este

equipo consta de un analizador, por lo menos un acelerómetro y un sensor laser para medir la fase del elemento rodante.

Figura 11. **Corrección desbalanceo dinámico**



Fuente: Full Mecánica. *Balaceo dinámico / algo de teoría.*

<http://www.fullmecanica.com/definiciones/b/1827-balanceo-dinamico>. Consulta: 18 de agosto de 2022.

Es muy común que los técnicos de mantenimiento relacionen un exceso de vibraciones con un desbalanceo, es muy importante que antes de contratar una empresa para realizar la corrección del equipo, se realice un análisis de vibraciones.

El técnico analista de vibraciones determinara por medio de espectros de velocidad y forma de onda si esa es la causa, debido a que una holgura excesiva en los alojamientos de los rodamientos, una desalineación o un eje doblado puede también generar vibración.

Las causas más comunes por la que se puede desbalancear un equipo son, deformación geométrica, contaminación o por deterioro de los equipos.

- Deformación geométrica del ventilador

Para hacer un análisis de las causas más comunes del desbalanceo, se utilizará como ejemplo un ventilador centrífugo ver gráfica 13, a menudo sucede que dentro del proceso de producción puedan desprenderse partes de la máquina y es muy común que éstas sean succionadas y lleguen a chocar con los ventiladores provocando deformaciones geométricas.

La deformación ocasionada al equipo determinará la nueva condición de vibración si esta excede los parámetros permisibles los cuales pueden verificarse en la tabla de severidad de vibraciones ISO 10816, ver tabla I capítulo 4, entonces debe de procederse a la corrección.

Figura 12. **Deformación geométrica de ventilador por succión de metal**



Fuente: elaboración propia, mantenimiento basado en condiciones S. A.

El círculo en verde de la gráfica muestra uno de los alabes del ventilador doblado la deformación geométrica provocó un desbalance, que tendrá que ser corregido primero con la reparación del alabe del ventilador y luego se realizará un balanceo debido al daño sufrido.

- Contaminación del ventilador

Sucede que un equipo puede generar vibraciones de un momento a otro; hablando de un ventilador lo más común es que se adhiera suciedad en los alabes.

Si los alabes están sucios o tienen materia prima adherida, por lo general así sucede, al no distribuirse de forma geométrica se convierte en la fuente del cambio de la condición de la máquina.

Estos problemas son muy frecuentes y lo más fácil para evitarlos es mantener una limpieza periódica de los ventiladores, evitando de esta manera que la vibración dañe los rodamientos o estructura del equipo.

Figura 13. **Ventilador desbalanceado por exceso de contaminación**



Fuente: elaboración propia, mantenimiento basado en condiciones S. A.

- **Deterioro de los equipos**

Es normal que, durante el uso continuo de un equipo, esta sufra reparaciones en su estructura, desgaste de elementos rodantes, poleas, turbinas, entre otros.

El desgaste no necesariamente es uniforme lo que provoca que la masa del elemento giratorio cambie en algunos puntos, generando un desequilibrio que provoca la vibración también puede generarse por el cambio de frecuencia natural de la estructura, debido a las reparaciones lo que en un momento puede coincidir con la frecuencia de los elementos rodantes y esto llevará a una resonancia estructural.

Conforme se desgastan algunos componentes como los rodamientos, alabes de ventiladores, desprendimiento de contrapesos de balance, o las reparaciones que se hacen por el deterioro de las maquinas, en determinado momento pueden convertirse en factores que de manera unitaria o en combinación de uno o más provoquen el desbalanceo.

Figura 14. **Ventilador centrífugo en reparación deteriorado por uso**



Fuente: elaboración propia, mantenimiento basado en condiciones S. A.

3.2. Desalineamiento

La desalineación es uno de los problemas de vibraciones más frecuentes en máquinas rotativas y se debe a la dificultad que presenta la alineación de dos rotores con sus respectivos apoyos.

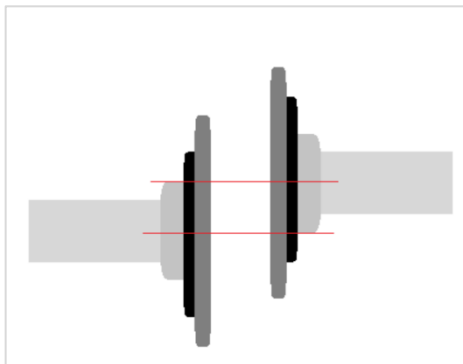
Se define como la condición en la que la línea central geométrica de dos ejes acoplados no coincide a lo largo del eje de rotación.

Existe desalineación paralela y desalineación angular o combinación de ambas que es lo más común, estas se pueden detectar fácilmente con ayuda de un equipo de alineación laser, que debe de ser utilizado por personal especializado en el tema.

3.2.1. Desalineación paralela

Ocurre cuando las líneas centrales de los ejes paralelos que están acoplados directamente o con acoples flexibles no coinciden, ver figura 16.

Figura 15. Desalineación paralela



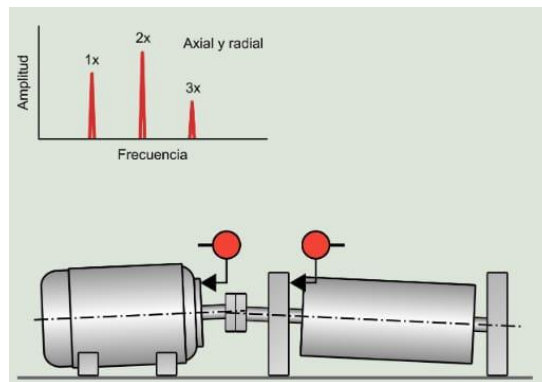
Fuente: MYG Inc. *Alineación y sus tolerancias*. <https://motoresygeneradores.com/alineacion-y-sus-tolerancias/>. Consulta: 18 de agosto de 2022.

Se ve que, aunque estén paralelos están desalineados porque no comparten el mismo centro o la misma línea ambos.

3.2.2. Desalineación angular

Desalineación angular o axial esta desviación se observa por el ángulo formado entre las líneas centrales en un plano en el espacio.

Figura 16. **Desalineación angular**



Fuente: FERNÁNDEZ, Alfonso. *Desalineación*. <https://power-mi.com/es/content/desalineaci%C3%B3n#:~:text=Hay%20desalineaci%C3%B3n%20angular%20cuando%20las,del%20eje%20con%20bajas%20amplitudes>. Consulta: 22 de agosto de 2022.

Al ver la figura 17 se puede considerar la desalineación como una condición en la cual el eje de la máquina que es conducido y el eje motriz, no comparten la línea de centros y se puede ver la forma del espectro característico.

Es de esperar que al no tener una correcta alineación se tengan consecuencias, provocando que la condición que presentan los equipos varíe.

Aumento de la temperatura, fallo de rodamientos, holgura mecánica en alojamientos de rodamientos, aumento de vibraciones, aumento de consumo de energía, fallas de los ejes por fatiga. Estos efectos se presentan y en cuanto no se corrijan las fallas estas aumentaran hasta que el equipo falle.

El diagrama del espectro de velocidad de la figura muestra la gráfica típica de una desalineación, si se observa se pueden dar cuenta que la vibración más grande se da en el 2X o sea el doble de la velocidad de rotación y dependiendo de la gravedad se ve puede observar hasta el 3X, a diferencia del desbalanceo donde predomina la amplitud de la frecuencia de rotación o sea el 1X y solo debe de aparecer esta frecuencia.

Una adecuada alineación, reducirá el exceso de energía consumida, ruido vibraciones, es importante saber que la alineación es relevante tanto para los acoplamientos rígidos como los flexibles.

Figura 17. **Acoplamiento flexible y rígido**



Fuente: UNE. *Tipos de acoplamientos de transmisión de potencia.*

<https://eganagroup.com/une/tipos-de-acoplamientos-de-transmision-de-potencia/>. Consulta: 22 de agosto de 2022.

Como se ve en la figura en el caso de los acoplamientos rígidos una ligera desalineación puede causar daños importantes en los componentes debido a que carecen de un elemento elásticos a diferencia de los acoplamientos flexibles.

3.3. Holgura

Puede definirse como el espacio o juego existente entre dos elementos de una transmisión que se deban contactar para transmitir movimiento.

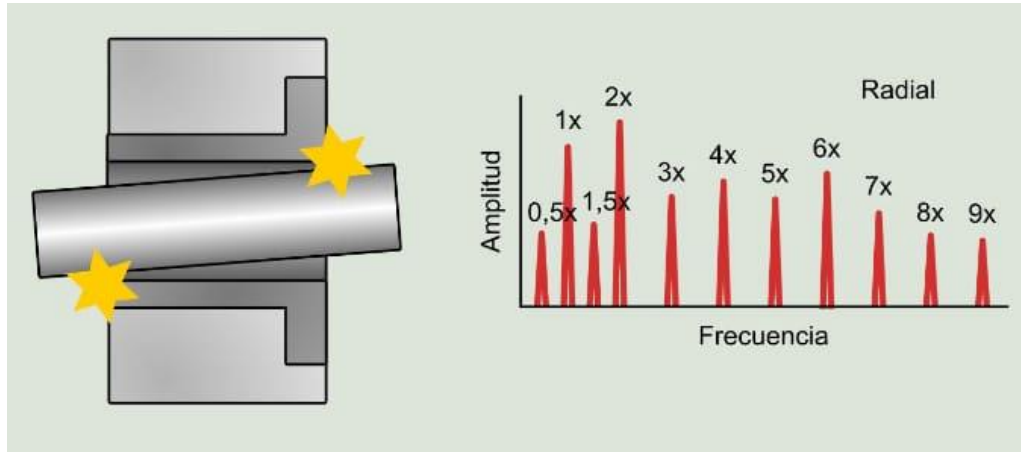
La holgura se puede originar en cada caso de manera muy distinta ejemplo aflojamientos de tornillos, aumento de tolerancias producidas por desgastes.

Normalmente se mencionan dos tipos de holgura mecánica; la rotatoria y la estacionaria.

Cuando se habla de holgura mecánica rotatoria se refiere a la holgura por el juego excesivo entre las partes rotativas y estacionarias, ejemplo la holgura producida en los alojamientos de los rodamientos.

Las tapaderas de los motores alojan los rodamientos siendo esta la parte estática y el inducido del motor la parte giratoria. El desgaste excesivo de los alojamientos produce vibración.

Figura 18. **Holgura mecánica**



Fuente: FERNÁNDEZ, Alfonso. *Desalineación*. <https://power-mi.com/es/content/desalineaci%C3%B3n#:~:text=Hay%20desalineaci%C3%B3n%20angular%20cuando%20las,del%20eje%20con%20bajas%20amplitudes>. Consulta: 22 de agosto de 2022.

La figura muestra en las partes en amarillo la holgura o desajuste que tiene el alojamiento con el eje del elemento giratorio. El espectro de vibración de la holgura clásico tiene armónicos de la velocidad de rotación, cuando dicha holgura es excesiva se presentan submúltiplos de la velocidad de rotación desde el 1X a 10 X, 0.5X, 1.5X entre otros, que es el caso del espectro de la figura 19.

La holgura estática es aquella que se produce entre dos partes estacionarias ejemplo la pata de un motor y la base, o tornillos flojos que sujetan el motor en este caso el motor saltara producto de los tornillos flojos y genera vibración producto de la mala sujeción.

Tanto en la holgura rotatoria como en la estacionaria el espectro de vibración será del mismo estilo.

3.4. Resonancia

Es aquella condición de una maquina o estructura en el cual la frecuencia de una fuerza vibrante tal como el desbalance de masa se iguala con la frecuencia natural del sistema.

La frecuencia natural, es el número de veces que se mueve una estructura cuando no está sometida a ninguna restricción, es la manera en que vibra en forma natural cualquier objeto si esa frecuencia es más amplia y se repite de forma continuada dará como resultado la resonancia.

Estos daños pueden ser tremendamente destructivos para cualquier equipo o estructura donde no se tienen las previsiones necesarias.

Figura 19. **Efecto de resonancia**



Fuente: Britannica. *Tacoma Narrows Bridge*. <https://www.britannica.com/topic/Tacoma-Narrows-Bridge>. Consulta: 22 de agosto de 2022.

En la elaboración de este puente colgante, cometieron el error de subestimar la fuerza del viento, solo probaron el puente a 200 km/h pero el día del colapso, la velocidad del viento era de 64 km/h, coincidió con la frecuencia natural del puente.

Cuando una fuerza se aplica repetidamente aun sistema con la frecuencia natural del mismo, el resultado es la aparición de oscilaciones de gran amplitud.

Toda estructura física tiene una frecuencia en la cual resuena, la fórmula para encontrar la frecuencia natural para un sistema de un grado de libertad.
 $\omega = \sqrt{k/m}$.

Un grado de libertad es la dirección en la que la estructura puede deformarse o desplazarse.

Porque es importante conocer la frecuencia natural de una estructura o equipo, porque es esta frecuencia en la cual una estructura o cuerpo vibrara libremente.

3.5. Desgaste en rodamientos con elementos rodantes

Puede tener un efecto perjudicial en el funcionamiento de los rodamientos, desde una reducción de la precarga, hasta efectos potencialmente catastróficos.

El desgaste puede producirse por uno o más motivos, a menudo suelen generarse por una lubricación inadecuada, la contaminación, corrosión y desalineación entre otros.

3.5.1. Lubricación inadecuada

El desgaste puede generarse por falta de lubricación debido a periodos muy largos de re - lubricación o la no re lubricación, por ello es importante llevar un historial y programa de lubricación.

Un error común en la industria en general es el uso de lubricante inadecuado, ejemplo aplicar una viscosidad inadecuada a la que se necesita, provocara que en algunos casos los rodamientos se calienten o que no pueda evitar la fricción entre los elementos rodantes.

Es importante revisar los manuales de la maquinaria para aplicar el lubricante recomendado de no contar con el manual de mantenimiento será necesario consultar con una empresa especialista en lubricación para poder mantener el equipo en óptimas condiciones.

3.5.2. Contaminación

Regularmente este problema empieza desde el montaje de los rodamientos, a menudo sucede que no hay un procedimiento para la instalación de los mismos, desde golpear los rodamientos para su instalación y la no limpieza de las piezas es una fuente directa de contaminación.

La limpieza de los alojamientos de los rodamientos, los retenedores de lubricante es muy importante debido a que si quedan restos de polvo o lubricante contaminado al mezclarse con el lubricante nuevo y este ingrese en la pista de los elementos rodantes actuara como una lija provocando el desgaste.

3.5.3. Corrosión

Se produce cuando se introduce agua o agentes corrosivos en el rodamiento y el lubricante no es capaz de proteger la superficie del acero. Ajustes de interferencia muy holgados entre el rodamiento y el eje permiten que se formen delgadas películas de óxidos.

3.5.4. Desalineación

La desalineación produce una fuerza descompensada y excesiva sobre el rodamiento provocando que los elementos rodantes no puedan ser protegidos por la película de lubricante generando así el desgaste por fricción.

4. ESTIMACION DE LA GRAVEDAD DE LA VIBRACION Y VERIFICACION DE LA VALIDEZ DE DATOS

4.1. Tablas de severidad

Son métodos para evaluar los riesgos, consiste en valorar el nivel de grado y gravedad a partir de criterios o valores definidos tanto para la probabilidad o frecuencia de ocurrencia como para la severidad o gravedad de las consecuencias.

La severidad describe que tan serio es el problema de vibración y se mide por medio de la amplitud de la onda. Este parámetro indica la condición de la máquina y a partir de este valor tendrán que realizarse los trabajos correspondientes que pueden ser balanceo dinámico, alineación de ejes entre otros, para corregir la causa raíz del problema.

Las tablas de severidad establecen valores determinados que aseguran una operación confiable de la maquina en el largo plazo y a la vez minimice los efectos adversos en los equipos asociados a la vibración.

Hay situaciones donde no se tiene ninguna referencia de los parámetros de vibración normal de trabajo de la maquinaria, ya sea por no contar con los manuales de mantenimiento y operación o sencillamente porque no especifica los valores, en esa situación se hace uso de las tablas de severidad que dan parámetros confiables en los que la maquinaria puede trabajar sin ningún problema. Existen varias tablas para considerar la condición de la maquinaria a continuación algunas de ellas.

4.1.1. Tabla ISO 10816

Esta tabla es la más utilizada por los analistas de vibraciones, de hecho, la mayoría de los equipos para la medición de vibraciones hacen sus análisis expertos considerando estos valores, ya que son valores estandarizados y respetados internacionalmente.

Tabla II. Carta de severidad de vibracion ISO 10816-1

CARTA DE SEVERIDAD DE VIBRACIÓN NORMA ISO 10816 – 1 (1995)				
SEVERIDAD DE VIBRACIÓN	RANGO DE TOLERANCIAS Y CLASIFICACIÓN DE MÁQUINAS			
	Máquinas Pequeñas	Máquinas Medianas	Máquinas Grandes más de 75Kw	
Velocidad mm/s - RMS	Hasta 15Kw Clase I	15Kw a 75Kw Clase II	Cimentación Rígida Clase III	Cimentación Flexible Clase IV
0.28	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
0.45				
0.71				
1.12	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio
1.80				
2.80	Insatisfactorio	Insatisfactorio	Insatisfactorio	Insatisfactorio
4.50				
7.10				
11.20	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable
18.00				
28.00				
45.00				
71.00				

Soporte Rígido: La frecuencia fundamental del sistema máquina/soporte es mayor que su frecuencia principal de excitación.

Soporte Flexible: La frecuencia fundamental del sistema máquina/soporte es menor que su frecuencia principal de excitación.

Fuente: PAULA CLARO, María; MORILLO, Paulo; VILLOTA, Nicolás. *Normativa para evaluar vibraciones en máquinas industriales*. <https://docplayer.es/97527278-Normativa-para-evaluar-vibraciones-en-maquinas-industriales.html>. Consulta: 22 de agosto de 2022.

Está dividida por los colores, verde, amarillo, naranja y rojo a un costado se observan los valores de amplitud global en mm/s.

El color verde indica que las condiciones de trabajo de la maquina son excelentes.

El color amarillo indica condiciones aceptables de trabajo, estando en este color se puede estar tranquilos no existe peligro de falla, y es en el límite de este color donde se deben de encender la alarma de cambio de condición segura, cuando esté al límite de cambio al color naranja.

El color naranja indica que el equipo ya salió del área segura y las condiciones de trabajo son inapropiadas, muchas veces el cambio de vibración puede ser provocada por un desbalanceo, o puede ser el inicio de alguna falla en los rodamientos en esta área se hace necesario planificar el mantenimiento para corregir el problema.

Color rojo indica condiciones severas donde el equipo puede sufrir daños significativos es recomendable no trabajar los equipos en esta condición.

La tabla hace una clasificación de las maquinas por la potencia nominal de los motores eléctricos que utiliza de la siguiente manera.

- Menor a 15 kW clase I
- 15 kW a 75 kW clase II
- Mayor a 75 kW clase III

Una vez se sabe cuál es la clasificación del equipo, bastará con conocer la amplitud y deslizarse hasta la columna de la clasificación para saber la condición que indica la tabla.

- Ejemplo1

Se tiene un ventilador accionado por un motor eléctrico y tiene una amplitud de vibración de 2 mm/seg. ¿Cuál es la condición del equipo según la tabla ISO 10816?

- Si el motor es de 10 kW
- Si el motor es de 100 kW
- Solución inciso A)
 - ✓ Paso 1. Seleccionar la clasificación del equipo, como el motor es menor a 15 kW entonces es de clase I.
 - ✓ Paso 2. Conocer la amplitud de la vibración y esa dice el problema que es de 2 mm/s.
 - ✓ Paso 3. Se colocan en la columna de clase I y hacen coincidir con la amplitud de 2 mm/s, si se compara en la tabla de la figura 4.1, se observa que esta frecuencia está en el nivel de condición insatisfactorio.
- Solución ejemplo inciso B)

- ✓ Paso 1. Como es un motor mayor a 75 kW entonces es de clase III.
- ✓ Paso 2. Se sabe que la amplitud de vibración es de 2 mm/seg.

Si se observa la tabla de severidad ISO 10816 se puede ver que esta vibración es aceptable para un equipo de clase III.

Para un equipo de clase I la vibración de 2 mm/s es insatisfactoria, pero para un equipo de clase III es una condición normal de trabajo. La tabla de severidad ISO 10816 es muy fácil de utilizar se puede verificar en cuestión de segundos la condición de un equipo.

Los equipos que pueden analizarse varían desde turbinas, bombas de recirculación, ventiladores centrífugos y axiales, motores eléctricos, generadores eléctricos, y equipos que giren de 120 rpm a 15,000 rpm.

La cimentación es rígida si la mayor frecuencia del componente de mayor valor en el espectro que generalmente la frecuencia de rotación de la maquina representa menos del 75 por ciento de la frecuencia natural del equipo.

4.1.2. Carta de Rathbone

Esta no es una norma, fue la primera guía de amplia aceptación en la industria. Fue desarrollada en los años treinta perfeccionada posteriormente. La carta dispone de una escala logarítmica frecuencial en Hertz o rpm y de una escala logarítmica de amplitudes en desplazamiento (pico o pico-pico), y en

velocidad. Mediante las cuales se puede determinar directamente la severidad de la vibración.

Las principales limitaciones de dicha carta de severidad de vibraciones son las siguientes.

- La carta no tiene en cuenta el tipo de máquina, la potencia y la rigidez de los anclajes.
- Es aplicable solamente a los equipos rotativos y no a los alternativos u otros sistemas industriales.
- Cuanto mayor es la frecuencia, la amplitud de vibración en desplazamiento tiene que ser menor para que se conserve la misma severidad, es decir. Si un equipo vibra a 300 rpm con 100micras p-p. la severidad es buena, pero si la misma amplitud corresponde a una frecuencia de 4000 cpm, entonces la severidad es grave.
- La vibración a baja frecuencia es menos peligrosa que la vibración a alta frecuencia de ahí que las averías de engranajes y rodamientos, que se producen generalmente a alta frecuencia sean muy peligrosas. Este es el motivo por el que las amplitudes de baja frecuencia se miden en desplazamientos y las de alta frecuencia en velocidad o aceleración. La carta de Rathbone fue creada para máquinas de bajas rpm y hoy se considera obsoleta.

4.2. Información del fabricante

Algunos fabricantes de maquinaria consideran en sus manuales de operación los parámetros de vibraciones determinados aceptables y en los que sus equipos pueden trabajar sin ningún problema, a pesar de que esos valores puedan llegar a ser más bajos o en algunos casos inaceptables para las tablas de severidad.

- Ejemplo

Los molinos para moler plástico con motores de 200 hp 3500 rpm la vibración normal de trabajo estipulada por el fabricante es de 10 mm/s y este valor es inaceptable para las tablas de severidad.

Esto se da por las condiciones de choques del plástico con las cuchillas, pero el diseñador de la maquina ya tomo en cuenta este factor para la fabricación estructural y esa vibración no es dañina para el equipo.

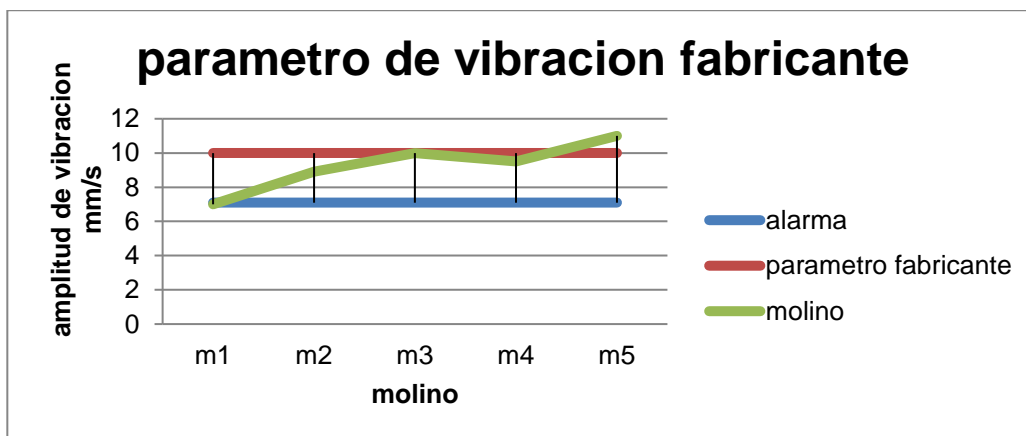
La siguiente tabla muestra los valores de amplitud de vibración en mm/s de cinco molinos, también se muestra el valor de la alarma de vibración para este tipo de maquina por ser de más de 75 kw y menor de 300 kw es de clase III y la alarma de vibración para ese equipo está en 7.1 mm/s y se muestra el valor de la vibración que para el fabricante es un parámetro normal de trabajo que para este caso es de 10 mm/s.

Tabla III. **Mediciones de vibración de molinos**

	m1	m2	m3	m4	m5
alarma ISO 10816	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1
parámetro fabricante	10	10	10	10	10
molino	7	8,9	10	9,5	11

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Valor de vibración de fabricante vs tabla ISO 10816-1**



Fuente: elaboración propia.

En la figura se ven dos líneas horizontales la de 7.1 mm/s que representa los valores de alarma de amplitud de vibración de la tabla de severidad ISO 10816 y la línea superior de 10 mm/s representa el valor de amplitud de vibración autorizada por el fabricante.

Observar que según la tabla de severidad ISO 10816 todos los molinos estarían presentando una señal de alarma debido a que todos los valores son superiores al establecido de 7.1 mm/s, pero para los parámetros normales de

trabajo del fabricante solo el molino m3 y m5 estarían lanzando una alarma de revisión por ser superior o igual a 10 mm/s.

4.3. Comparación con máquinas iguales

Como establecer los parámetros de vibración para una maquinaria a falta de manuales de mantenimiento o de manuales de operación, si definitivamente no se encontró información se puede valer de las tablas de severidad.

Puede ser de gran ayuda obtener parámetros de trabajo de la maquinaria, si se tienen varios equipos idénticos. Se realiza una medición de vibraciones de cada máquina idéntica, con los valores obtenidos se puede realizar una tabla o una gráfica y ver cuál es valor que más se repite o el próximo.

- Ejemplo

Se tienen cinco maquinas idénticas de 10 hp y 3500 rpm

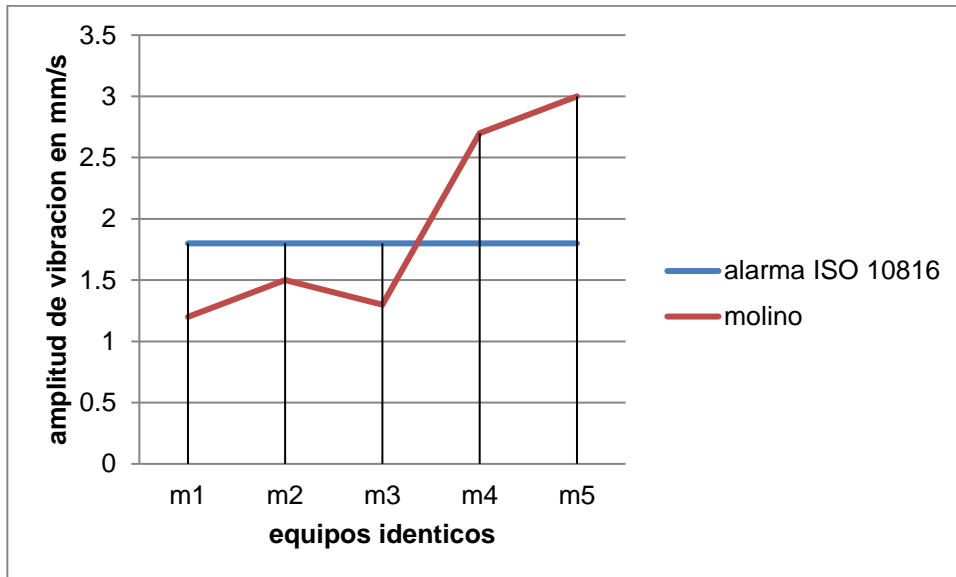
Por ser un motor menor a 15kW se considera de clase I, y la alarma de amplitud según la tabla de severidad ISO 10816 de vibración es de 1.8 mm/s, pasado este valor es necesario hacer una inspección de la maquinaria. La tabla III muestra los valores de vibración de la maquinaria.

Tabla IV. **Vibración equipos idénticos**

	m1	m2	m3	m4	m5
alarma ISO 10816	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
molino	1,2	1,5	1,3	2,7	3

Fuente: elaboración propia, con base en mantenimiento basado en condiciones S. A.

Figura 21. **Comparativa de vibraciones equipos idénticos**



Fuente: elaboración propia.

Observar en la figura 22 que los equipos m1, m2 y m3, tienen una amplitud de vibración parecida, y es menor a la vibración de alarma de la tabla ISO 10816, los equipo m4 y m5 si sobrepasan los valores de alarma.

Al hacer un análisis se puede ver que el 60 % de la maquinaria trabaja con valores debajo de la alarma de vibración de la tabla ISO 10816, se puede observar que estos equipos trabajan con valores de vibración entre 1 mm/s a 1.3 mm/s siendo estos menores a 1.8 mm/s. Se concluye que estos equipos pueden monitorearse con valores de tabla de severidad.

4.4. Factores que tienen que considerarse para una medición válida

Las mediciones de vibraciones permiten detectar defectos mecánicos prematuros cuando estos no representan una amenaza contra la integridad de la

maquinaria. Es bien importante conocer cómo realizar una medición que pueda brindar información verídica del estado de la maquinaria.

Los operarios de la maquinaria y personal de mantenimiento es gente capaz de detectar cambios en las condiciones de las maquinas porque diariamente interactúan con ellas, por el simple hecho del sonido con el que trabajan, vibración de trabajo normal entre otros, pero muchas veces estos problemas son detectados cuando ya se ha ocasionado un daño en el equipo.

Es por ello que para saber si los niveles de vibración se mantienen dentro de los rangos de operación, se necesita un analizador de vibración que permitirá recopilar los valores de vibración al inicio de trabajo de la máquina y poder realizar comparaciones a los años de uso, con su condición inicial o simplemente se puede medir el equipo antes de realizar el mantenimiento y las condiciones a las que quedo después de realizar el mantenimiento.

Un analizador de vibraciones consta de un transductor de vibraciones actualmente los más usados son llamados acelerómetro piezoeléctrico, y el colector de datos o analizador de frecuencias. Los transductores transmiten las señales mecánicas y la envían al analizador de frecuencias que las transforma en una gráfica de frecuencias que es sencilla de analizar.

Figura 22. **Analizador de vibraciones**



Transductor acelerómetro
Piezoeléctrico



Medidor de
tendencia
inteligente 9080

colector de datos
analizador de vibraciones TPI 9080

Fuente: elaboración propia.

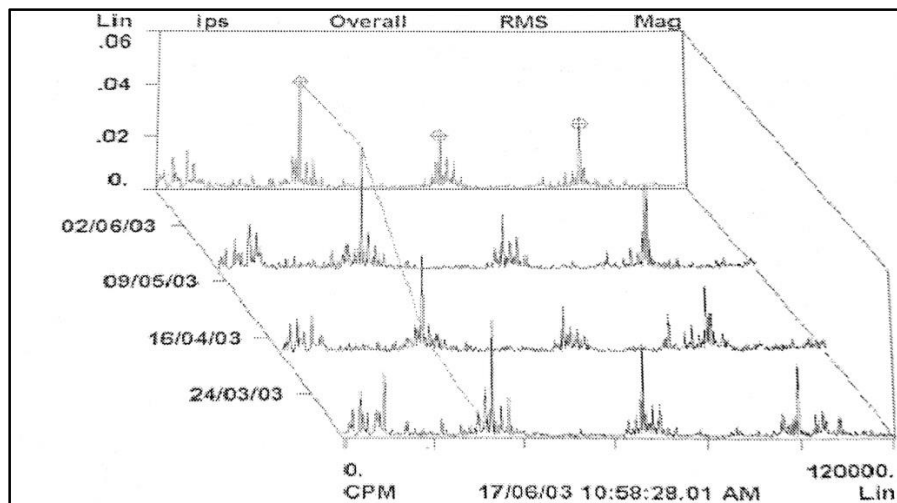
Para realizar mediciones veridicas se debe de colocar el tranductor o acelerometro piezoelectrico lo más cerca de los rodamientos que pueda tener el equipo rotatorio, y regularmente se deben de realizar las mediciones en los mismos puntos donde se realizo la primera vez para tener datos confiables.

cuando se realizan rutas de monitoreo de medicion de vibraciones en una planta grande es normal que se marquen los lugares donde se colocara el acelerometro para que las mediciones se realicen en los mismos puntos, esto ayuda al elaborar la tendencia de ese punto sea un informe preciso de lo que esta sucediendo en el tiempo en es punto en especifico.

En la gráfica de tendencia en frecuencia, alli se esta analizando un punto en especifico, se ve que realizaron una medicion mensual para ver los cambios

que puede tener el elemento analizado, por eso es bien importante marcar los puntos y realizar las mediciones donde mismo.

Figura 23. **Tendencia en frecuencia**



Fuente: TAM. *Analizadores de vibración y de monitore de condición.*

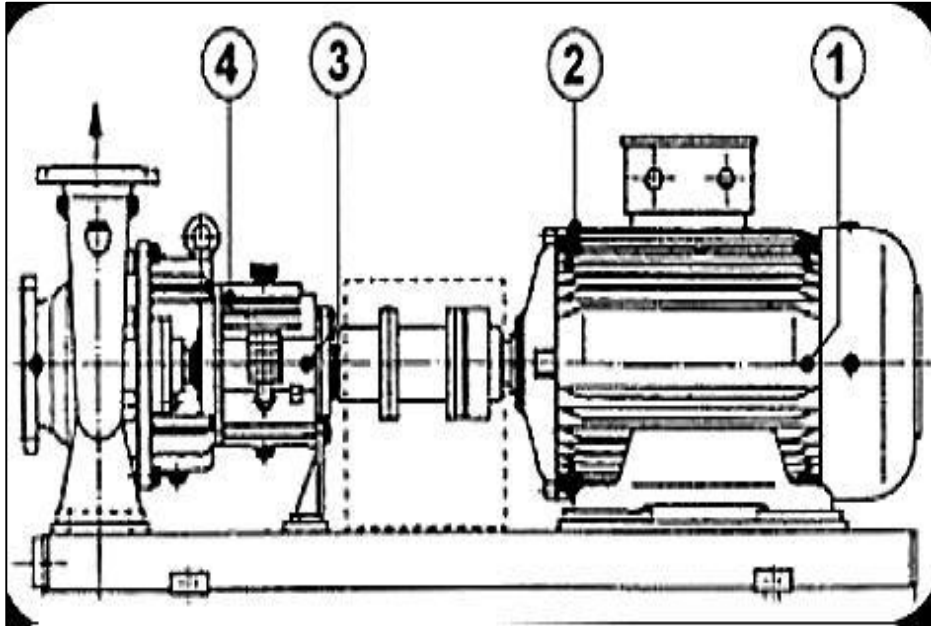
[https://www.tam.com.mx/tecnologia-para-analisis-de-vibraciones/adash-analisis-de-vibraciones.](https://www.tam.com.mx/tecnologia-para-analisis-de-vibraciones/adash-analisis-de-vibraciones)

Consulta: 26 de agosto de 2022.

4.4.1. **Ubicación de los puntos de prueba**

A continuación se describe el orden de como debe de realizar las mediciones en la maquinaria con acoplamiento directo.

Figura 24. **Puntos de medicion de vibraciones acople directo**



Fuente: DMC. *La medición de la vibración*. <https://www.dmc.pt/es/medicao-de-vibracoes/>.

Consulta: 26 de agosto de 2022.

- El elemento que mueve la maquinaria normalmente es un motor asincrono y alli se situa el primer punto.
- Medicion 1 coloca el acelerometro en la parte donde tiene el ventilador de enfriamiento y se le llamará Lado Libre, ver figura 25.
- El punto de medicion 2 es el extremo opuesto al lado libre y donde se realiza la instalacion de poleas, acoples entre otros, y se le llamará Lado acople. Motor.
- El punto de medicion 3 le corresponde a la parte de la maquinaria que se acopla con el motor directa o indirectamente lado acople maquina.

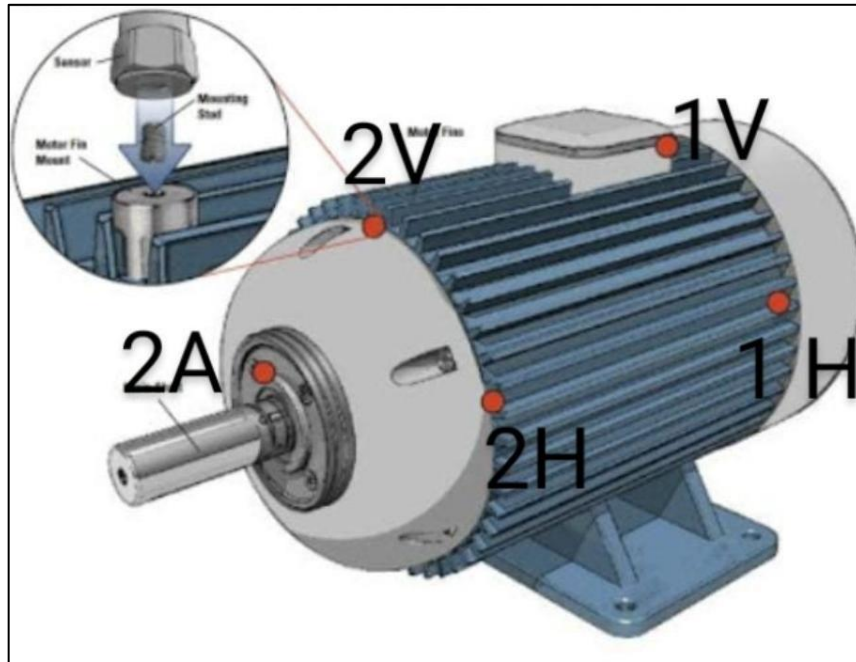
cual debe de ser la orientacion en la que debe instalarse el transductor, y es importante que el transductor se coloque lo más cercano al rodamiento.

Para obtener una informacion veridica, las mediciones tendran que ser recopiladas de igual manera cada vez que se realice, esto es muy importante para asegurar que los datos establezcan una tendencia en el tiempo.

Cada vez que se realice una medicion es necesario realizarlas en la posicion horizontal, vertical y axial, la direccion axial es aquella paralela a eje de rotacion del equipo, la vertical el la direccion desde el transductor hacia el centro de la flecha.

Eso quiere decir que cada punto de analisis donde se realicen mediciones se deben hacer tres capturas, si se analiza el punto 2 se tendrá una medicionl, 2H horizontal, 2V vertical y 2A axial.

Figura 26. **Instalacion de sensor de vibracion en motor electrico**



Fuente: Preditecnico. *Instalación de sensores de vibración en motores eléctricos.*

<http://www.preditecnico.com/2012/12/instalacion-de-sensores-de-vibracion-en.html>. Consulta:

26 de agosto de 2022.

Puntos donde debe estar orientado el transductor de señal o acelerometro.

En la gráfica se observa que en cada punto se necesita obtener tres mediciones, normalmente en el punto 1 no se mide la axial porque tiene puesta la tapa y no se puede medir, igualmente la medición axial es un poco difícil de hacerla porque en el punto dos regularmente el motor se acopla con poleas o directamente a la máquina y esto lo imposibilita, pero donde se pueda medir hay que hacerlo.

Los equipos de medición normalmente indican la medición que corresponde empiezan por el punto 1 y su medición empieza por la horizontal (1H) luego la medición vertical (1V), y finaliza con el 1 axial (1A).

Los transductores vienen previstos con un imán bien potente que permite que cuando se posicione este no se mueva, hay que asegurarse al colocarlo que quede firme y no se mueva a la hora de hacer la medición, de lo contrario se tendrán datos erróneos.

Hay motores o maquinaria que están fabricadas de acero inoxidable o de aluminio en tales casos el transductor no se sostendrá porque en estos materiales no se magnetiza, en este caso se puede sujetar con fuerza con la mano hacia el punto que se desee analizar y listo, se puede hacer la medición.

CONCLUSIONES

1. Mantener limpia la maquinaria de modo que se evite que algún fluido pueda servir como medio para formar una pila galvánica, esto disminuirá el peligro de corrosión electroquímica.
2. El control de las vibraciones mecánicas mediante revisiones constantes, limpiezas de elementos giratorios y alineaciones, disminuye las fallas por este fenómeno.
3. Las tablas de severidad de vibraciones, en especial la tabla de severidad ISO 10816 proporciona valores de vibración para que la operación de la maquinaria sea segura y no represente daños con el tiempo.
4. Realizar las mediciones de vibraciones en los puntos adecuados, brindará información verídica de la condición de la maquinaria.

RECOMENDACIONES

1. Conocer el potencial eléctrico al momento de fabricar un mecanismo que requiera dos materiales, para evitar una corrosión prematura.
2. Realizar un análisis de vibraciones para saber con certeza cuáles pueden ser las causas del problema, antes de alguna acción de mantenimiento por problemas de vibraciones en maquinaria rotatoria.
3. Revisar antes de realizar un balance que su ventilador o equipo rotatorio esté totalmente limpio, porque la contaminación puede ser la causa del problema, además podrá observar si existe alguna deformación o desprendimiento de partes del equipo.
4. Determinar cuáles son los equipos críticos y a estos realizar análisis tres veces al año, y llevar una tendencia del equipo para poder diagnosticar las posibles fallas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Britannica. *Tacoma Narrows Bridge*. [en línea]. <<https://www.britannica.com/topic/Tacoma-Narrows-Bridge>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
2. DMC. *La medición de la vibración*. [en línea]. <<https://www.dmc.pt/es/medicao-de-vibracoes/>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
3. Dual Metalurgia. *Metalurgia Física Básica*. [en línea]. <<http://dualmetalurgia.com/metalurgia/metalurgia-fisica-basica-del-acero/>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
4. FERNÁNDEZ, Alfonso. *Desalineación*. [en línea]. <<https://powermi.com/es/content/desalineaci%C3%B3n#:~:text=Hay%20desalineaci%C3%B3n%20angular%20cuando%20las,del%20eje%20con%20bajas%20amplitudes>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
5. Full Mecánica. *Balanceo dinámico / algo de teoría*. [en línea]. <<http://www.fullmecanica.com/definiciones/b/1827-balanceo-dinamico>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
6. LARRE, Va. *Transformaciones de la austenita fuera del equilibrio*. [en línea]. <<https://docplayer.es/55183740-Vi-transformaciones-de-la-austenita-fuera-del-equilibrio.html>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].

7. MYG Inc. *Alineación y sus tolerancias*. [en línea]. <<https://motoresygeneradores.com/alineacion-y-sus-tolerancias/>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
8. PAULA CLARO, María; MORILLO, Paulo; VILLOTA, Nicolás. *Normativa para evaluar vibraciones en máquinas industriales*. [en línea]. <<https://docplayer.es/97527278-Normativa-para-evaluar-vibraciones-en-maquinas-industriales.html>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
9. Preditécnico. *Instalación de sensores de vibración en motores eléctricos*. [en línea]. <<http://www.preditecnico.com/2012/12/instalacion-de-sensores-de-vibracion-en.html>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
10. RODRÍGUEZ SOCA, Isabel; DÍAZ HERNÁNDEZ, Yusdel; FIOLE ZULUETA, Alberto; CABALLERO STEVENS, Nilda. *Método para el cálculo de hornos metódicos de pozo para el revenido de aceros*. [en línea]. <https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Eschema-de-representacion-general-de-tratamiento-termico-En-el-caso-del_fig2_308417027>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
11. SALAZAR JIMÉNEZ, José Alberto. *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)*. [en línea]. <<https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].

12. SERGIO VALENTÍN, Vásquez Flores. *Balanceo estático*. [en línea]. <<https://www.youtube.com/watch?v=Km4k7x7C8e0>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
13. SMITH, William; HASHEMI, Javad. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4a ed. México: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V., 2006. 1036 p.
14. TAM. *Analizadores de vibración y de monitore de condición*. [en línea]. <https://www.tam.com.mx/tecnologia-para-analisis-de-vibraciones/adash-analisis-de-vibraciones>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
15. TORRE, Fabiana. *Conocimiento de los materiales*. [en línea]. <<https://sites.google.com/site/conocerlosmateriales/>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
16. UNE. *Tipos de acoplamientos de transmisión de potencia*. [en línea]. <<https://eganagroup.com/une/tipos-de-acoplamientos-de-transmision-de-potencia/>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].
17. Universidad de Nacional del Centro de Perú. *Corrosión por fatiga*. [en línea]. <<https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/07/corrosion-por-fatiga.html>>. [Consulta: 15 de agosto de 2022].

