



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería
Ingeniería Electromecánica



“Reconfiguración mecánica y de control de cadena cinemática para análisis de cargas oscilantes.”

Tesis:

Que como parte de los requisitos para obtener el título de Ingeniero
Electromecánico con Línea Terminal Mecatrónica

Presenta:

Alan Ranferi Cervantes Hernández

Dirigido por:

Dr. Juan José Saucedo Dorantes

C. U. San Juan del Río, Querétaro, marzo del 2020



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería
Ingeniería Electromecánica



“Reconfiguración mecánica y de control de cadena cinemática para análisis de cargas oscilantes.”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de Ingeniero Electromecánico con Línea Terminal Mecatrónica

Presenta:

Alan Ranferi Cervantes Hernández

Dirigido por:

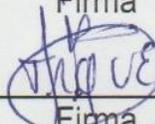
Dr. Juan José Saucedo Dorantes

Dr. Juan José Saucedo Dorantes
Presidente



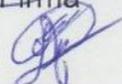
Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
Secretario



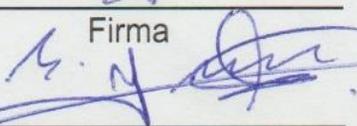
Firma

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz
Vocal



Firma

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar
Suplente



Firma

Agradecimientos

A todas las personas que me apoyaron a lo largo de mi trayectoria en la universidad, que siempre estuvieron conmigo colaborando.

A mis padres, Marta y Armando, que durante todo el tiempo me estuvieron apoyando no solo económicamente si no también dándome ánimos.

A mis hermanos Armando y Nayeli, que siempre estuvieron ahí para mí.

A mi esposa Grecia, por apoyarme todo el tiempo para no dejar todo, por siempre motivarme a que yo podía más.

A mis asesores Dr. Juan José y Dr. Roque Alfredo, por haberme permitido trabajar en conjunto con ustedes y dirigirme durante mi trayectoria como alumno de licenciatura.

A todos mis profesores, que me ayudaron siempre y que gracias a su dedicación me han formado en la parte académica y profesional para poder salir adelante.

Al fondo de fortalecimiento a la investigación (FOFIUAQ2018) por otorgarme una beca para poder realizar el trabajo que se presenta.

A todos mis amigos y compañeros que estuvieron conmigo durante toda la etapa de la universidad, por hacer agradable el tiempo que estuve con ustedes compartiendo.

Gracias.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Antecedentes.....	11
1.2 Planteamiento del problema	14
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo General.....	15
1.3.2 Objetivos particulares	15
1.4 JUSTIFICACIÓN	16
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	18
2.1 Principales fallas en cadenas cinemáticas.....	18
2.1.1 Fallas en rodamientos	19
2.1.2 Fallas en cajas de engranes	21
2.1.3 Fallas en motores de inducción	22
2.1.4 Cargas oscilantes	23
2.2 Métodos de detección de novedad	25
3. METODOLOGÍA.....	33
3.1 Reconfiguración mecánica	35
3.2 Instrumentación.....	37
3.3 Control	38
3.3.1 Sistema de control	38
3.3.2 Sistema mecánico de carga oscilante basado en freno mecánico	39
3.4 Experimentación.....	40
3.5 Procesamiento	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	43
4.1 Reconfiguración de la cadena cinemática	43
4.2 Instrumentación de la cadena cinemática.....	44
4.3 Control de la carga	47
4.3.1 Identificación de la planta del sistema de frenado	47
4.3.2 Sintonización de las ganancias	51
4.4 Experimentación con la cadena cinemática	54
4.5 Análisis de las señales	56
5. CONCLUSIONES.....	61
6. REFERENCIAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cadena cinemática actual	15
Figura 2.1 Fallas en rodamiento por calentamiento	20
Figura 2.2. Fallas en engranes.	21
Figura 2.3. Fallas en motores de inducción.	22
Figura 2.4. Bomba centrífuga	23
Figura 2.5. Transportador helicoidal	24
Figura 2.6. Válvula rotativa.	25
Figura 2.7 Sistema de control en lazo abierto	28
Figura 2.8. Sistema de control en lazo cerrado.	29
Figura 2.9. Diagrama analógico controlador proporcional	30
Figura 2.10 Diagrama analógico de controlador integral	31
Figura 2.11 Controlador derivativo analógico	32
Figura 3.1 Diagrama de metodología propuesta	34
Figura 3.2. Propuesta de nueva cadena cinemática	36
Figura 3.3. Diagrama de instrumentación.	38
Figura 3.4. Sistema de frenado propuesto	39
Figura 3.4a. Señal ideal	41
Figura 3.4b. Señal senoidal real	41
Figura 4.1 Cadena cinemática reconfigurada	44
Figura 4.2a Encoder	45
Figura 4.2b Acelerometro	45
Figura 4.2c Sensor de corriente	47
Figura 4.3 Tarjeta de adquisición de datos	48
Figura 4.4. Etapa de acondicionamiento	48
Figura 4.5. Respuesta ante entrada escalón.	49
Figura 4.6. Respuesta en el tiempo	50
Figura 4.7 Diagrama a bloques del sistema de control	51
Figura 4.8. Respuesta al escalón de la planta.	53
Figura 4.9. Respuesta ante escalón de planta más controlador.	53

Figura 4.10. Respuesta ante entrada sinusoidal (0.5 Hz).	55
Figura 4.11. Respuesta ante entrada sinusoidal (1 Hz)	55
Figura 4.12a Vibraciones sin carga	56
Figura 4.12b Vibraciones con carga	57
Figura 4.13a Velocidad sin carga	58
Figura 4.13b Velocidad con carga	58
Figura 14a Corriente sin carga	59
Figura 14b Corriente con carga	60
Figura 4.15 Corriente contra velocidad	56

Dirección General de Bibliotecas UAQ

RESUMEN

En la actualidad, el análisis de diferente maquinaria industrial se ha vuelto muy importante, ya que para conocer las principales problemáticas de cualquier sistema se necesita de estudiar profundamente, las constantes cargas variables u oscilantes que se presentan en la distinta maquinaria de la industria pueden ser un problema grave si no se toma a consideración, es necesario analizar todo esto para observar el comportamiento de los componentes ante las posibles cargas que se le presenten. En este trabajo se presenta un problema experimental basado en una cadena cinemática que debe de tener una carga variable controlada para así mismo analizar el sistema mediante sensores y observar cómo es que varían las diferentes magnitudes físicas que se encuentran en dicha cadena. Con todo esto se obtuvo los resultados esperados viendo como principal afectación del sistema, la corriente eléctrica que conforme se va aplicando carga va aumentando y la velocidad disminuyendo.

(Palabras clave: carga oscilante, cadena cinemática, detección de novedad, reconfiguración, análisis)

ABSTRACT

Nowadays, the analysis of different industrial machinery has become very important, since to know the main problems of any system it is necessary to study deeply, the constant variable or oscillating loads that occur in the different machinery of the industry can be a serious problem if it is not taken into consideration, it is necessary to analyze all this to observe the behavior of the components before the possible loads that appear. This work presents an experimental problem based on a kinematic chain that must have a controlled variable load in order to analyze the system using sensors and observe how the different physical quantities found in said chain vary. With all this, the expected results were obtained, seeing as the main affectation of the system, the electric current that as load is applied increases and the speed decreases.

(Keywords: oscillating load, kinematic chain, novelty detection, reconfiguration, analysis)

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos, la mayoría de procesos y aplicaciones en la industria han estado relacionadas con la utilización de máquinas rotativas, de hecho, tras el paso de los años estas máquinas han estado sujetas a diferentes cambios y transformaciones para mejorar su desempeño. Por otra parte, es bien sabido que entre las principales máquinas rotativas están las eléctricas, como los motores de inducción; donde la utilización y aplicación de estas máquinas se debe principalmente a la necesidad de convertir energía eléctrica en mecánica (CAISSE, 1993). Desde un punto de vista industrial, los motores eléctricos representan la solución a las necesidades de sus procesos ya que es el medio más importante para generar múltiples tareas en las que se necesita energía mecánica que pueda ser traducida a un movimiento, una fuerza, etc.

Actualmente, existen diferentes aplicaciones en las que se ven involucrados los motores eléctricos, estas aplicaciones pueden ser tan simples como un juguete pequeño o un lector de discos, hasta aplicaciones complejas que implican el desarrollo de maquinaria compleja de grandes dimensiones en donde se requieren considerables cantidades de energía para desarrollar tareas específicas. La integración en conjunto de un motor eléctrico con otros elementos como cajas de engranes, rodamientos, ejes, entre otros, constituyen y dan lugar a la creación de una cadena cinemática, o también conocidos como sistemas electromecánicos (Saucedo et al, 2006). Por lo tanto, la integración de diferentes elementos en una cadena cinemática ofrece grandes ventajas ya que se pueden realizar múltiples tareas con un mismo sistema, aunque una cadena cinemática ofrece grandes ventajas por la variabilidad de sus aplicaciones, estas también pueden estar sujetas y ser susceptibles a la aparición de fallas dando origen a condiciones inapropiadas de operación. Es decir, la aparición de un fallo en un elemento específico podría generar que el resto de componentes de la cadena cinemática se vayan

degradando, y en consecuencia se afectará severamente su rendimiento; y esto, en sitios industriales se verá reflejado directamente en pérdidas económicas por afectar directamente las líneas de producción. En este sentido, la aparición de fallos inesperados que generan condiciones inapropiadas de operación puede afectar la disponibilidad de la maquinaria y conducir a la interrupción de procesos industriales. En ambientes industriales, teóricamente, se podría reducir la aparición de fallos inesperados si la maquinaria operaba bajo condiciones idealmente lineales, la realidad es que la mayoría de proceso en la industria se caracterizan por operar bajo condiciones de carga oscilante o variables. Así, la operación de maquinaria en condiciones de trabajo de carga oscilante repercute principalmente en el desgaste mono tónico de los elementos mecánicos o eléctricos involucrados.

Por lo tanto, el desarrollo de esta tesis se realizará bajo un marco científico-tecnológico en donde se llevará a cabo la reconfiguración mecánica y de control de una cadena cinemática para analizar los efectos generados por cargas oscilantes. Así mismo, mediante este análisis se determinarán la afectación que se producen en la condición de trabajo de la cadena cinemática, y también se definirán las complicaciones que pueden generar ante la aplicación de acciones de mantenimiento. La presente tesis está compuesta por cinco capítulos, en el Capítulo I se da una breve introducción del tema principal, además de dar el planteamiento del problema, el objetivo general y particulares y, general para dar solución a la problemática que se presenta, en el Capítulo II se explicara con más detalle la parte teórica, conceptos, herramientas matemáticas y métodos que se pueden utilizar para el desarrollo de la presente tesis, en el Capítulo III se desarrollara una metodología que se utilizara en el transcurso del proyecto para poder llegar a la solución final, en el Capítulo IV se presentaran los resultados obtenidos de acuerdo a la metodología aplicada en el capítulo anterior, y finalmente en el Capítulo V se plantean unas conclusiones que nos pueden ayudar a continuar con el desarrollo de proyectos científicos de investigación en referencia a este tema.

1.1 Antecedentes

La aplicación de estrategias de monitoreo de condición juega un papel muy importante para el diagnóstico de fallas en maquinaria empleada en aplicaciones industriales. Incluso, una gran parte de las investigaciones con aportaciones significativas han sido enfocadas al diagnóstico de fallas en motores eléctricos (Huang et al, 2016). Estos estudios han sido de gran importancia ya que en la actualidad han permitido conocer las respuestas y efectos de los diferentes tipos de fallos que puede experimentar un equipo específico; además, una de las principales ventajas de desarrollar metodologías de diagnóstico es que ayudan a reducir el costo de mantenimiento y garantizar la productividad efectiva en procesos industriales. Así mismo, se ha conocido que tipos de fallas son las que nos generan más daño en el sistema que conforma a una máquina (Liang et al, 2018). Por lo tanto, uno de los objetivos de las estrategias de condición de monitoreo y diagnóstico de fallas es reducir los costos de mantenimiento e incrementar el tiempo de vida útil de los elementos del sistema, y de esta forma asegurar la disponibilidad y eficiencia de cualquier proceso. Por lo general, la mayoría de los usuarios de este tipo de sistemas están representados por pequeñas, medianas y grandes empresas de la industria que están dedicadas a distintas áreas; y que al detener su producción podrían generar pérdidas económicas significativas y afectaciones severas e irreversibles por la inversión de tiempo innecesario en el intento de subsanar la aparición de fallos inesperados (Henao et al., 2014)

De esta manera, ya que la mayoría de maquinaria industrial es constituida por sistemas electromecánicos, los sistemas mecánicos son muy susceptibles a fallas de distintos tipos, por lo tanto, se debe de tener un control o al menos un estudio detallado de dicho sistema para estimar los tiempos de vida y posible aparición de fallas. De esta forma se tiene la posibilidad de evitar la aparición de fallos severos que podrían representar el paro total en líneas de producción en aplicaciones industriales, y consecuentemente, generar grandes pérdidas económicas que también podrían conducir a la desaparición de las mismas empresas. Por lo tanto, la aplicación de estrategias de monitoreo de condición son

una solución viable ya que pueden ayudar a efectuar la detección temprana de fallos inesperados evitando que la productividad de procesos industriales se vea comprometida por la aparición de problemáticas mayores en sus líneas de producción.

Por otra parte, debido a que los sistemas electromecánicos o cadenas cinemáticas son susceptibles a la aparición de fallas de distintos tipos, en los últimos años se han desarrollado diferentes proyectos a nivel internacional que han analizado y estudiado más detalladamente la aparición de diferentes fallos. En este sentido, Gaëtan Didier et al (2006) realizaron un estudio de barras rotas, mediante el procesamiento de señales de consumo de corriente en el estator de un motor de inducción con el uso de un periodograma de Bartlett, aunque su estudio muestra resultados significativos, las diferentes pruebas experimentales realizadas para la evaluación de fallos fueron no fueron consideradas bajo un marco real industrial que considere condiciones no lineales de operación o de carga oscilante. Las vibraciones son un problema en este tipo de sistemas ya que nos pueden generar varios problemas, Chen et al. (2012) realizaron el estudio de falla en rodamientos en una caja de engranes en la cual instalaron dentro de esta caja un sistema de monitoreo y analizaron las señales de vibración, aunque las cajas de engranes son consideradas elementos no lineales, este estudio realizado considero su análisis bajo condiciones ideales de operación con cargas completamente lineales. Bediaga et al. (2013) propusieron un método de detección de fallas mediante el procesamiento de señales como la transformada rápida de Fourier (FFT), demodulación de amplitud y la transformada de Hilbert-Huang (HHT) para buscar errores en los rodamientos debidos a vibraciones. Otro trabajo es el de Saucedo-Dorantes et al (2016) quienes realizaron un método empleando técnicas de vibración y estudio de corrientes para detectar fallas en rodamientos y cajas de engranes. Además, Cariño-Corrales et al (2017) desarrollaron un método de identificación y detección de fallas mediante un marco de aprendizaje incremental aplicado a sistemas electromecánicos industriales que consiste en la detección de novedad en las señales de lectura. Aunque actualmente existen una gran cantidad de estudios que reportan resultados significativos y proponen metodologías para la identificación de

fallos eficientes en sistemas electromecánicos y cadenas cinemáticas, la mayoría de estos trabajos han sido enfocados hacia la evaluación de la condición de operación bajo condiciones lineales de operación dejando fuera la consideración que generalmente la mayoría de procesos industriales opera bajo condiciones carga oscilante o variable.

Dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro también se han realizado estudios y se han propuesto métodos enfocados en la detección de fallas en cadenas cinemáticas, algunos de estos estudios han sido aplicados a la detección de diferentes tipos de fallas en los elementos que pueden constituir a un sistema electromecánico. En este sentido, Saucedo-Dorantes et al (2014) propusieron una metodología para analizar el desgaste en cajas de engranes mediante un estudio con vibración y el cálculo de las frecuencias características de fallo. Otro trabajo es el de Garcia-Ramirez et al (2014) quienes, mediante procesos de imágenes termo gráficas, realizaron el análisis de los fallos posibles en los motores de inducción. Así mismo, Mejía (2015) desarrollo una metodología que consiste en el estudio de los espectros en las impedancias, con este método se analizaron ciertos tipos de fallas como des alineamiento, desbalance mecánico, barra rota y balero dañado. Más recientemente, Saucedo-Dorantes et al (2017) realizaron unos métodos para detección de fallos en cadenas cinemáticas mediante algoritmos inteligentes y fusión de datos. Y finalmente, un trabajo importante es el de Espitia et al (2018) quienes hicieron un análisis estadístico para detectar diferentes tipos de fallos en mecanismos en los cuales se está ejerciendo alguna carga excéntrica oscilante. En este sentido, la mayoría de los estudios y metodologías propuestas para detección de fallas dentro de la Universidad han sido realizados bajo un enfoque de procesamiento de señales que les ha permitido determinar el estado actual de la maquinaria y realizar la identificación de diferentes tipos de fallas. Aunque los resultados son significativamente importantes, es importante mencionar que la mayoría de experimentos realizados fueron considerados bajo condiciones de operación no variables; en este sentido, surge la necesidad de desarrollar e implementar un sistema electromecánico que permita la evaluación de fallos bajo condiciones de carga variable o carga oscilante. Por lo tanto, en esta tesis se

propone realizar la configuración mecánica y de control de una cadena cinemática para la evaluación de fallas bajo condiciones de carga oscilante.

1.2 Planteamiento del problema

Las cadenas cinemáticas son muy utilizadas en la industria, pero debido a que se encuentran sometidas a condiciones de trabajo excesivas operando bajo condiciones de carga variable, las apariciones de fallos inesperados pueden afectar la disponibilidad de la maquinaria e incluso se puede la calidad del producto puede disminuir considerablemente debido a que los diferentes elementos que conforman la maquinaria se van degradando por las condiciones de carga oscilante.

Comúnmente las cargas oscilantes a las que se someten las cadenas cinemáticas tienden a provocan anomalías respecto al comportamiento normal del sistema, por lo tanto, esto produce que la vida útil de los componentes se deteriore y afecte dirceamente en el tiempo de vida útil esperado, y, en consecuencia, se debe realizar una inversión innecesaria para reestablecer la operación normal de funcionamiento.

Como se presentó en los antecedentes, el trabajo desarrollado por Espitia et al (REVISAR EL AÑO) se realizó un primer análisis de los efectos que las cargas oscilantes producen sobre la operación de la cadena cinemática. En este sentido, en la figura 1.1 se muestra la configuración mecánica de la cadena cinemática que fue sometida experimentalmente a cargas oscilantes. Específicamente, la carga oscilante es simulada mediante una masa inercial excéntrica que hace que el resto de elementos acoplados a ella se vean afectados por su operación ante diferentes velocidades de operación. Aunque la propuesta desarrollada para simular cargas oscilantes es razonable, esta configuración no permitió realizar un análisis concreto por no tener la capacidad de poder controlar la oscilación de la carga.

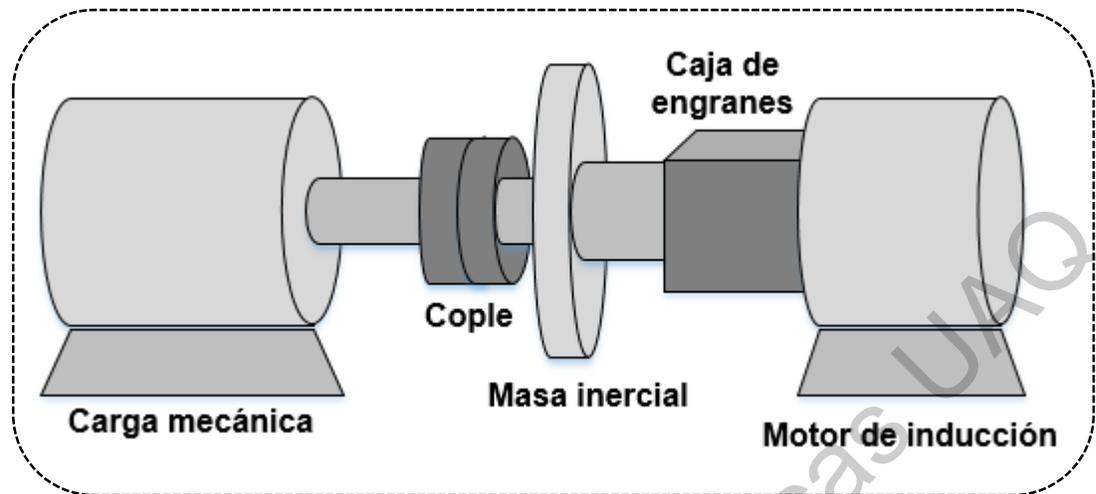


Figura 1.1. Cadena cinemática actual

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar la reconfiguración mecánica y de control de una cadena cinemática mediante la instalación de un sistema de carga oscilante para analizar los efectos generados ante la aplicación de estrategias de monitoreo de condición.

1.3.2 Objetivos particulares

- Revisar el estado del arte acerca del análisis y detección de fallas en cadenas cinemáticas que operen bajo condiciones de carga oscilantes.
- Realizar la reconfiguración mecánica y de control de una cadena cinemática para evaluar diferentes condiciones de operación bajo cargas oscilantes.

- Instrumentar la cadena cinemática con sensores de vibración, corriente y velocidad para realizar la adquisición de diferentes señales físicas.

- Evaluar diferentes condiciones de carga oscilante mediante pruebas experimentales para realizar la adquisición continua de diferentes señales físicas.

- Desarrollar una metodología de diagnóstico basada en técnicas de detección de novedad para evaluar la condición de operación de la cadena cinemática.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Una gran cantidad de aplicaciones en la industria se encuentran relacionados con la utilización de maquinaria basada en cadenas cinemáticas que además pueden estar sujetas a condiciones de operación de cargas oscilantes. Esta es una de las principales razones que inspiran la realización del presente trabajo, y de acuerdo con los antecedentes presentados, han sido muy pocos trabajos que han abordado el análisis de los efectos generados por cargas oscilantes. Por lo tanto, abordar esta temática también ayudara a analizar los efectos que pueden ser inducidos y afectar la condición de operación de la misma cadena cinemática.

Por otra parte, hasta el momento, el desarrollo que se ha generado respecto a la adquisición, procesamiento y análisis de señales ha sido de gran importancia para la implementación de estrategias de monitoreo de condición enfocadas en la detección de fallas. En este sentido, aunque en la actualidad ya se cuentan con avances y desarrollos significativos en el área de diagnóstico, no se ha abordado completamente el tópico de los efectos generados en cadenas cinemáticas que operen bajo condiciones de carga oscilante.

Así, establecer una estrategia de diagnóstico que evalué la condición actual de trabajo de una cadena cinemática ayudara a garantizar la disponibilidad de la

maquinaria y evitar paros inesperados. Esto, en ambientes industriales minimiza inversiones innecesarias, ya que mediante la detección e identificación de condiciones anormales de operación se puede evitar detener líneas de producción.

Otro factor que impulsa el desarrollo de este trabajo es la detección de fallas en cadenas cinemáticas que operen bajo la influencia de cargas oscilantes mediante técnicas de detección de novedad que sean aplicadas a señales físicas adquiridas durante la operación de trabajo de la cadena cinemática. Finalmente, el desarrollo de este trabajo también se justifica en que se ha planteado desarrollar este proyecto del análisis de cargas oscilantes sea el antecedente para trabajos futuros y sea retomado consecutivamente para la realización de investigaciones con un aporte científico que contribuyan a mejorar la vida útil de los elementos que componen las cadenas cinemáticas.

Dirección General de Bibliotecas UAO

CAPITULO 2

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Para desarrollar un análisis de los efectos de las cargas oscilantes y proponer una metodología aplicada a la detección de fallas en cadenas cinemáticas, primero se deben de comprender algunos conceptos que se utilizaran en el transcurso de este trabajo, por lo tanto, se debe entender a que nos referimos al decir que se realizara una reconfiguración mecánica y de control. Esto se refiere al desensamble de la cadena cinemática que se tiene actualmente y a la instalación de nuevos elementos para formar un nuevo sistema electromecánico el cual incluya un sistema de control sobre la carga oscilante. Es decir, mediante la instalación de nuevos componentes mecánicos y electrónicos se pretende accionar y tener control de la variación de una carga oscilante que afecte la condición de operación de la nueva cadena cinemática; posteriormente, mediante la instrumentación con sensores de vibración, corriente y velocidad, se evaluaran y analizaran los efectos generados a través de técnicas de procesamiento de datos y detección de novedad para realizar la evaluación de condición.

Las cargas oscilantes, se refiere a que la cadena cinemática no operara bajo condiciones de carga constante, así, la influencia de cargas variables u oscilantes generarán esfuerzos mecánicos y eléctricos que influirán directamente la condición de operación de la misma cadena cinemática. Consecuentemente, se propondrá una metodología de diagnóstico basada en técnicas de detección de novedad para evaluar la condición de operación.

2.1 Principales fallas en cadenas cinemáticas

Las principales fallas en cadenas cinemáticas observadas y estudiadas durante el transcurso de los años comprenden fallas mecánicas y fallas eléctricas. Dentro de las fallas mecánicas están las producidas en rodamientos, cajas de

engranes, desbalances y des alineamientos; mientras que las fallas eléctricas han sido evaluadas sobre los motores de inducción ocasionándoles cortos circuitos. En este sentido, se explicará un poco a detalle cómo se producen estas fallas y sus orígenes.

2.1.1 Fallas en rodamientos

Los rodamientos son el elemento mecánico más utilizado y por lo tanto uno de los más importantes en máquinas rotatorias ya que a través de estos se realiza el movimiento rotatorio además de mantener los ejes alineados. Por lo tanto, este tipo de elemento se deben de mantener en condiciones óptimas para que las máquinas y mecanismos rotatorios no fallen. A pesar de las grandes ventajas que puede ofrecer un rodamiento, estos componentes son muy frágiles y están expuestos a sufrir todo tipo de anomalía; por lo tanto, a lo largo de los años se han llevado a cabo varios estudios enfocados a la detección de falla en estos elementos, y enfocados en cómo podrían mantener más tiempo o estimar sus tiempos de vida dependiendo del entorno al que estén sometidos, el tipo de fallas a las que los rodamientos son más comunes son fallas en sus pistas interiores o exteriores, fallas en las bolas. Una de las fallas comunes dadas por calentamiento es como la que se muestra en la figura 2.1 (reporteroindustrial.com, 2001). Estos elementos suelen ser muy sensibles, por lo que desde recibir un simple golpe en la pista interna o externa puede generar que ya no funcione de forma apropiada, o caso puede ser que las bolas puedan presentar picaduras lo que generaría que se vea afectada la misma rotación. (Cerrada et al, 2018).

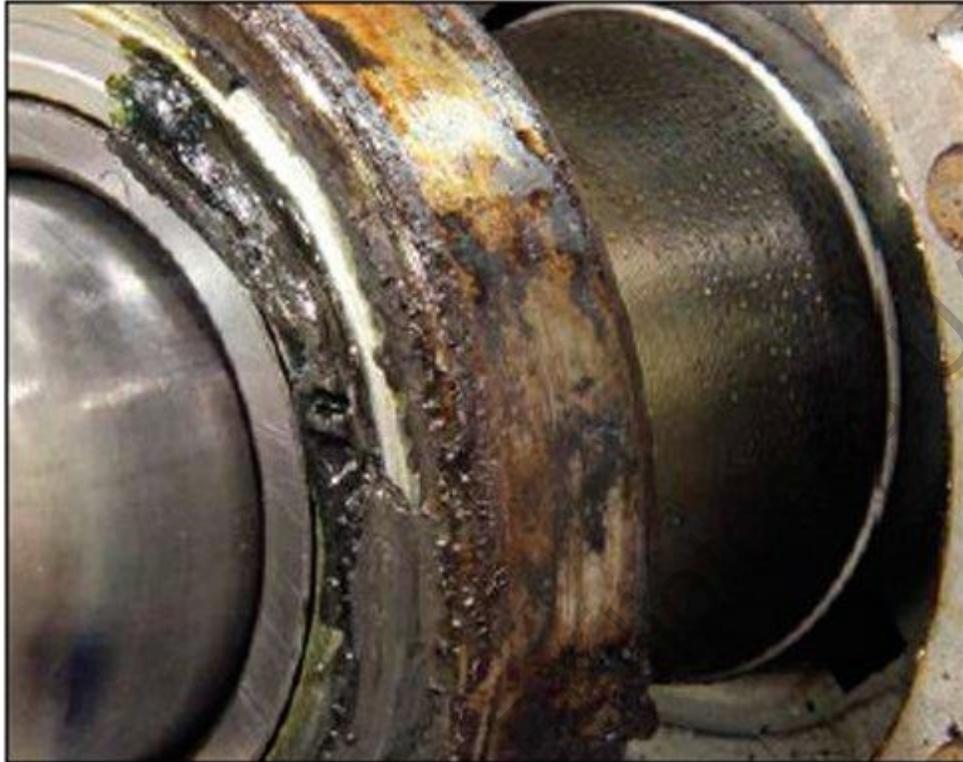


Figura 2.1 Fallas en rodamiento por calentamiento

Es importante tener en cuenta que los rodamientos son elementos muy utilizados gracias a su gran importancia en las cadenas cinemáticas, pero también hay que tener en cuenta que estos componentes son muy frágiles por lo tanto son de suma importancia estarlos cambiando periódicamente debido a que las fallas comunes que estos presentan suelen suceder varias veces, entonces es importante tenerlos siempre en orden y estar revisándolos, ya que hasta de estar siguiendo un ciclo varias veces o en operaciones grandes que están trabajando por varios días continuos, las bolas y las carreras tienden a desgastarse, esto quiere decir que tienen un tiempo de vida no muy largo. (Mecánica básica, 2009)

2.1.2 Fallas en cajas de engranes

Las cajas de engranes son una de las máquinas mecánicas rotativas más importantes y utilizadas en distintas aplicaciones de la industria, incluso su uso ha abarcado algunas aplicaciones militares. Aunque las cajas de engranes son muy robustas y eficientes, su composición mecánica no las excluye y las hace susceptibles a la aparición de fallas; por lo tanto, se debe tener un buen control sobre las acciones de mantenimiento que se le apliquen para evitar la aparición de desgastes o fallas que podrían conducir a la falla total y ocasionar desde una pérdida económica hasta un desastre mayor. Por lo tanto, durante los años se han estudiado acerca de varios tipos de fallas en estos elementos, porque son elementos muy importantes en los mecanismos, y si se llega a tener un diagnóstico bueno que nos ayude a obtener una detección temprana de las fallas, y con esto podríamos generar un ahorro económico hasta evitar una catástrofe. Las principales fallas dadas en los engranes son: grietas en los dientes, abolladuras en los dientes, desgaste en los dientes, dientes despostillados, errores de manufactura, desalineación y excentricidad, entre otros. (X. Liang et al, 2018)



Figura 2.2. Fallas en engranes.

Un ejemplo de una de las fallas en engranes por falta de lubricación se presenta en la figura 2.2. (ATTEN2, 2018). Gracias a que los engranes son piezas mecánicas muy difíciles de manufacturar, esto nos puede construirse con defectos de fábrica, por lo tanto, se debe de realizar algún análisis de detección de fallas en

estos elementos desde un inicio, ya que es la principal falla que se debe de descartar. Con el uso continuo de los engranes, estos mismos se van desgastando con el tiempo hasta llegar un punto en que van a fallar de una u otra forma, por lo tanto, es necesario tener un cierto mantenimiento adecuado, además se necesita estimar un tiempo de vida del engrane para saber aproximadamente cada cuanto tiempo se debe de realizar algún mantenimiento o cambio del mismo.

2.1.3 Fallas en motores de inducción

Los motores de inducción son máquinas que convierten energía eléctrica en energía mecánica, por lo que estos tienden a ser susceptible a fallas tanto eléctricas como mecánicas, no es factible económicamente hablando realizar un estudio de las fallas en estas máquinas, pero existen varios modelos por computadora que son capaces de representar fenómenos físicos con los modos de falla y comparar los cambios en las mediciones. Las fallas más comunes en los motores de inducción han sido estudiadas de cierta forma por separado, y estas fallas se sabe que se debe de tener cierto mantenimiento para evitar un paro de la máquina, errores como lo son: barra del rotor rota, el ultimo anillo roto, corto circuito en el estator, excentricidad estática, excentricidad dinámica, entre otros. (A. Singh et al, 2016)

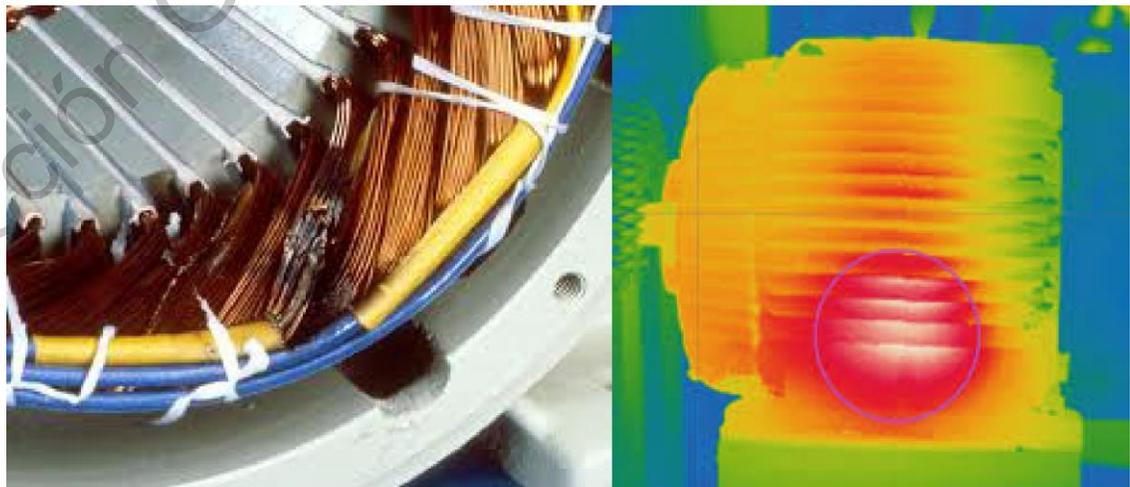


Figura 2.3. Fallas en motores de inducción.

Una de las fallas ocasionadas por fallos eléctricos en motores de inducción se muestra en la figura 2.3, por el sobrecalentamiento en los devanados puede generar una falla de corto circuito ya que se acelera la degradación del aislamiento. (lanotaenergetica.com, 2018). Por otra parte, la mayoría de procesos industriales se ven involucrados con la utilización de motores de inducción por su eficiencia y robustez; por lo tanto, se debe de tener un cierto conocimiento acerca de qué tipo de fallas pueden ser las más comunes, ya que al estar operando por tiempos muy largos esto provoca que las fallas sean cada vez más visibles, pero sobre todo tener en cuenta que se debe tener un mantenimiento periódico de estas máquinas, para que se reduzca el tiempo de aparición de una falla, también se debe tener un análisis para detectar fallas mayores y evitar tragedias. Una aplicación clásica de los motores de inducción es la de las bombas centrífugas de bombeo, en la figura 2.4 se muestra dicha aplicación.



Figura 2.4. Bomba centrífuga

2.1.4 Cargas oscilantes

Las cargas oscilantes son variaciones, perturbaciones o fluctuaciones que se dan durante el tiempo de un medio o sistema cualquiera, es un movimiento que se da de forma repetida que tiene como base alguna posición central, o posición de equilibrio, un sistema cualquiera oscila cuando algunos parámetros del mismo

toman valores que se van repitiendo constantemente, dichos parámetros representativos que ocasionan una oscilación son la variación de tiempo, posición, velocidad, entre otros. Algunos ejemplos de oscilación están basados desde cosas básicas como el movimiento de un columpio, el péndulo de un reloj; hasta cosas más complejas como máquinas de selección de basura, que en la banda que se utiliza el sistema nunca tiene la misma carga en cada compartimiento. (Thornton y Marion, 2003).



Figura 2.5. Transportador helicoidal



Figura 2.6. Válvula rotativa.

Unos de los ejemplos comúnmente utilizados en la industria se muestran en las figuras 2.5, el sistema mostrado es un transportador helicoidal y son ampliamente utilizados para transportar productos que requieran pasar durante el proceso de un lugar a otro. Otro ejemplo se muestra en la figura 2.6, este sistema es una válvula rotativa la cual es utilizada en tuberías para dejar pasar, en cantidades controladas mediante válvulas, algún tipo de producto que se requiera usar en algún punto específico del proceso.

2.2 Métodos de detección de novedad

La aplicación de estrategias de condición de monitoreo y diagnóstico basado en técnicas de detección de novedad ha sido de gran importancia ya que se puede garantizar el correcto funcionamiento de cualquier maquinaria. Existen diferentes tipos de técnicas de detección de novedad entre los cuales destacan aquellas basadas el método probabilístico, basado en cuantificación de distancias, basado en la reconstrucción, basado en el dominio y técnicas de teoría de la

información. Estos métodos son muy importantes y cada uno tienen sus propias características para aplicaciones específicas; ya que cada uno tiene un enfoque diferente, su implementación podría ayudar a resolver diferentes problemáticas para distintas circunstancias. Como el primer método, basado en estadística, asume que las mediciones de menor densidad tienen poca probabilidad de tener mediciones reales.

El método basado en la distancia, habla acerca de las mediciones tomadas como vecinas (que son mediciones continuas), donde los datos normales están todos agrupados en un pequeño espacio, mientras que los datos que tienen alguna novedad se encuentran muy alejados del valor de sus vecinos. El método basado en la reconstrucción, dice que, al mapear los datos anormales, el error de reconstrucción entre el valor anterior y el actual nos da el valor de novedad. Por otra parte, el método basado en el dominio dice que se define un dominio en función de los valores normales, pero no proporciona información de datos que tienen una gran densidad. Finalmente, en las técnicas de teoría de la información, se calcula toda la información de los datos obtenidos, los datos novedosos nos harán que se altere completamente toda la información de un conjunto de datos. (Pimentel et al, 2014)

Como anteriormente se mencionó, existen diferentes técnicas de detección de novedad entre las cuales cada una tiene su propio método para detectar anomalías en algunas mediciones tomadas durante distintos tipos de pruebas o muestras, por lo tanto, es necesario saber cómo funcionan cada una de estas y como nos pueden ayudar cada una, por lo que no podemos usar una misma para todos los estudios de este tipo que hagamos, pero al saber cómo las podemos utilizar, entonces nos da una mayor facilidad de manejar nuestras muestras o conjunto de datos que obtengamos para poder analizar si hay alguna distorsión de las señales principales, en este trabajo observamos que se nos será más útil realizar el estudio mediante el método probabilístico y el método de medición de distancias, ya que nos dan la ventaja de ser métodos sencillos que pueden ofrecer resultados significativos, pero que también al realizar el estudio de probabilidad nos da la oportunidad de graficar los datos y poder comprenderlos mejor. (Pimentel et al, 2014) realizaron un trabajo acerca de detección de novedad que habla de lo que

esta técnica para detectar fallas se trata, dicen que es una tarea en la cual se clasifican los datos obtenidos durante diferentes pruebas, se utiliza principalmente cuando la cantidad de datos que no son normales o comunes en la medición no son suficientes para formar un buen modelo que represente las clases no normales.

La medida de distancia ha tenido un papel clave en el análisis de valores atípicos. Varias investigaciones han intentado utilizar medidas de distancia para diferentes aplicaciones, como detección de daños, cuantificación, etc. El cálculo de la distancia puede efectuarse por diferentes métodos, pero generalmente su aplicación frecuente está enfocada para pares de conjuntos de datos que pueden ilustrar de la siguiente manera. Para dos conjuntos de datos Y_1 e Y_2 con elementos Z en cada conjunto, las diferentes distancias se definen como:

Distancia de la cuadra de la ciudad:

$$d_{12} = \sum_{z=1}^z |Y_1(z) - Y_2(z)|$$

Distancia de Chebyshev:

$$d_{12} = \lim_{e \rightarrow \infty} \left(\sum_{z=1}^z |Y_1(z) - Y_2(z)|^e \right)^{1/e}$$

Distancia Minkowsky:

$$d_{12} = \sqrt[r]{\sum_{z=1}^z |Y_1(z) - Y_2(z)|^r}$$

Aquí, tenga en cuenta que "r" es una variable. Y si $r=1$, esto se convertirá en una distancia de cuadra de la ciudad; si $r=2$, esto se convertirá en la distancia Euclidiana; si $r \rightarrow \infty$, se convierte en la distancia de *Chebyshev*.

Distancia Mahalanobis:

$$d_{12} = \sqrt{(Y_1 - \bar{Y}_2)^T \Sigma^{-1} (Y_1 - \bar{Y}_2)}$$

donde $\Sigma^{-1} = \mathbf{Cov}^{-1}$, es decir, la matriz de covarianza inversa de \mathbf{Y}_2 . Tenga en cuenta que este cálculo de covarianza debe considerarse cuidadosamente, ya que a veces la inversión de la matriz puede ser un desafío, a lo que uno puede referirse. Tenga en cuenta que aquí cuando $\Sigma=1$, la distancia de Mahalanobis coincide con la distancia euclidiana.

2.3 Controlador PID analógico

Existen dos tipos de sistemas de control, uno de ellos es control en lazo abierto y otro es control en lazo cerrado. El sistema de control en lazo abierto es el más sencillo de los dos ya que no tiene una retroalimentación, y simplemente se caracteriza por recibir una señal y realizar un proceso para el que este diseñado. El diagrama a bloques de dicho sistema se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.7 Sistema de control en lazo abierto

El sistema de lazo cerrado trabaja a base de una retroalimentación de la salida para compararla con la entrada y el controlador decida que se requiere para

que se tenga la salida deseada. El diagrama a bloques de un sistema de control en lazo cerrado se muestra en la figura 2.8, donde se muestra como controlador el proporcional, integral y derivativo (PID).

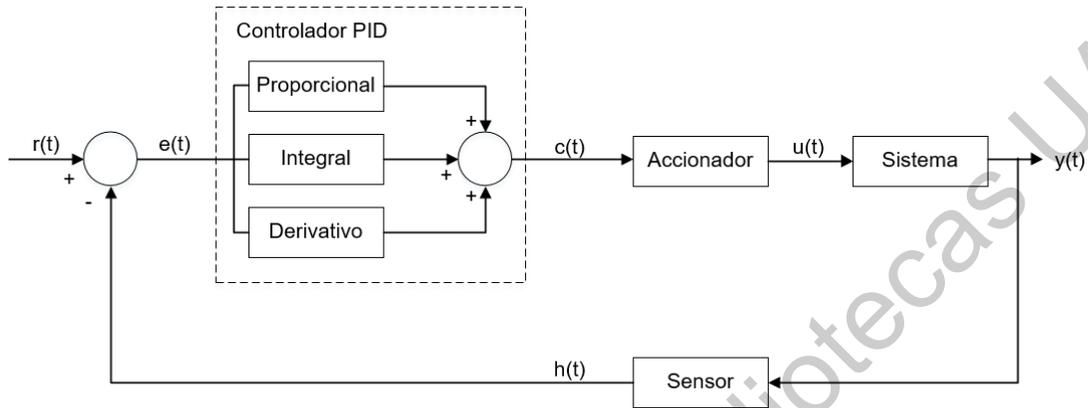


Figura 2.8. Sistema de control en lazo cerrado.

El sistema de control en lazo cerrado es más comúnmente utilizado para procesos donde se requiera tener el control automático sobre la salida, hay 3 tipos de controladores analógicos que se pueden utilizar en las distintas tareas que se requieran, los cuales son el controlador proporcional, integral y el derivativo.

Controlador proporcional:

El diagrama analógico de un controlador proporcional se muestra a continuación en la figura 2.9.

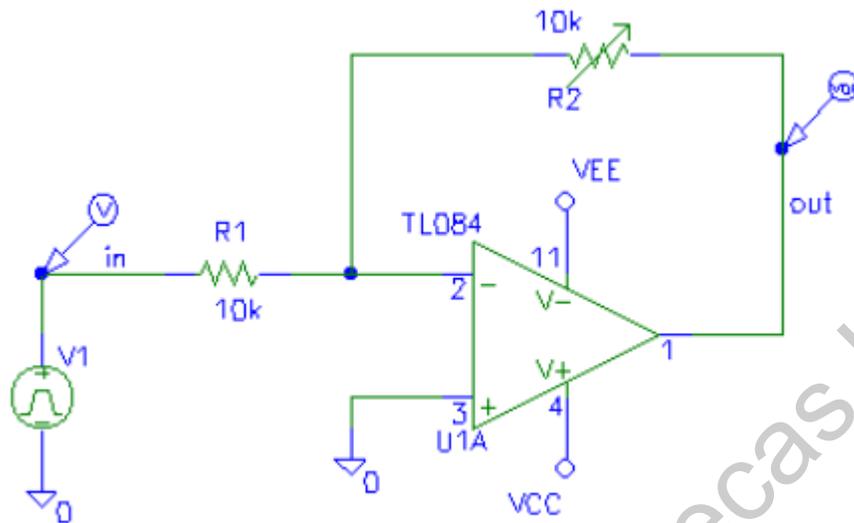


Figura 2.9. Diagrama analógico controlador proporcional

Se observa un ejemplo del diagrama de controlador proporcional analógico en la figura 2.9, el controlador proporcional sirve para aumenta la velocidad de respuesta y reducir el error en estado estacionario, dicho diagrama tiene una ecuación de ganancia la cual se muestra a continuación.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Controlador integral:

El diagrama de un controlador integral analógico se muestra en la figura 2.10, y sirve para reducir el error en estado estacionario, pero reduce la velocidad de respuesta del sistema, donde se muestra como ejemplo y posteriormente se muestra la ecuación de ganancia para el mismo ejemplo.

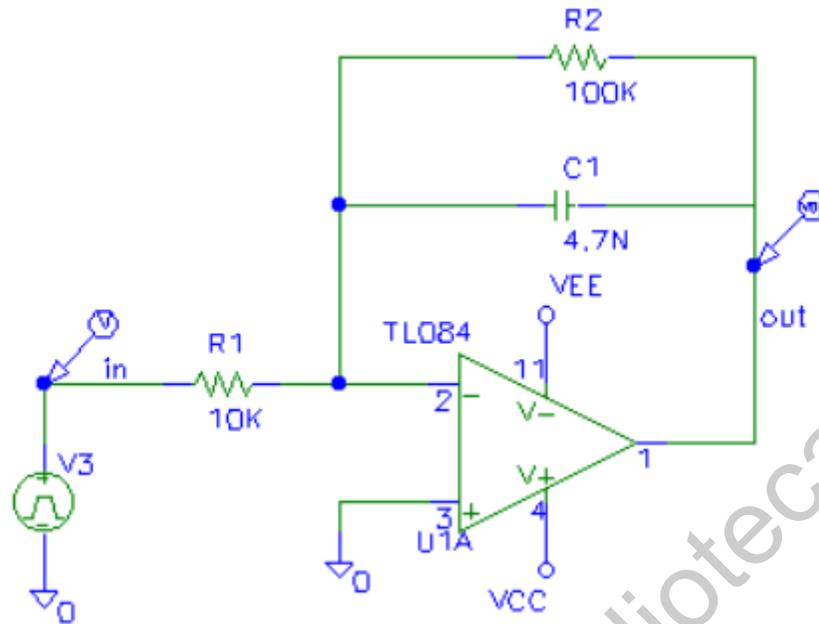


Figura 2.10 Diagrama analógico de controlador integral

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{R_2 C s + 1} \right)$$

Controlador derivativo:

El controlador analógico derivativo sirve para mejorar el amortiguamiento del sistema, y vuelve a aumentar la velocidad de respuesta, un ejemplo del controlador derivativo se muestra en la figura 2.11.

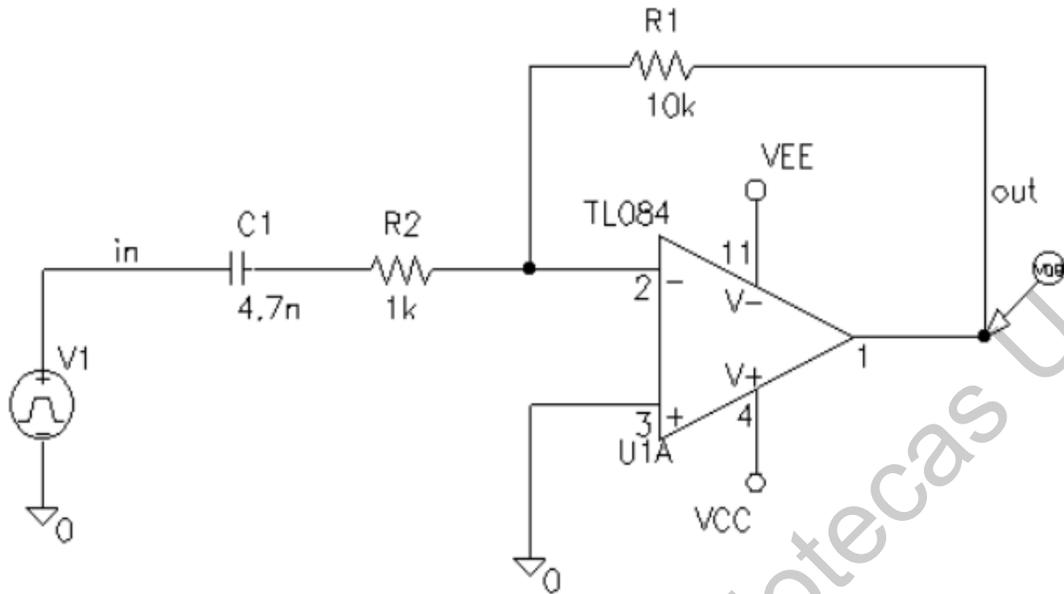


Figura 2.11 Controlador derivativo analógico

La ecuación de ganancia del circuito mostrado en la figura 2.11 se muestra a continuación.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_1 C s}{R_2 C s + 1}$$

Hay diferentes combinaciones que se pueden hacer con los diferentes tipos de controladores ya sea, proporcional-integral, proporcional-derivativo o proporcional-integral-derivativo, este último es el más utilizado, aunque depende mucho de las circunstancias de las que el sistema esté sometido para decidir qué tipo de controlador utilizar. La ecuación del controlador proporcional-integral-derivativo (PID) se muestra a continuación.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s} + k_d s \right)$$

CAPITULO 3

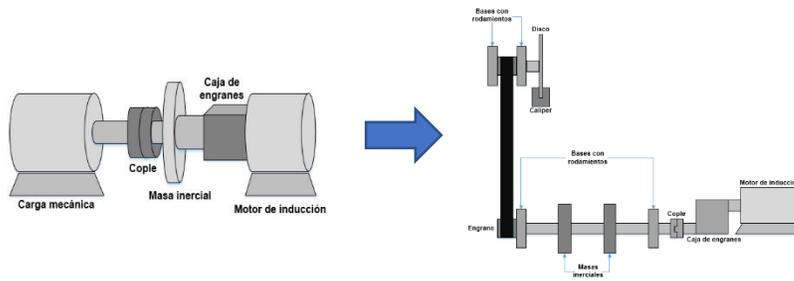
3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para efectuar la realización del presente trabajo para realizar el análisis del comportamiento de la cadena cinemática expuesta a cargas oscilantes se encuentra dividida en cuatro etapas, las cuales son: reconfiguración mecánica, la instrumentación del sistema mediante el uso de sensores para la medición de ciertas variables físicas tales como corriente, voltaje, vibración y velocidad; la siguiente etapa consta del control del sistema externo que generará el efecto de la carga oscilante y por último se experimentara con diferentes pruebas y se analizaran los resultados, se maneja como muestra en el diagrama a bloques de la figura 3.1, la descripción detallada de cada uno de los bloques se da a continuación.

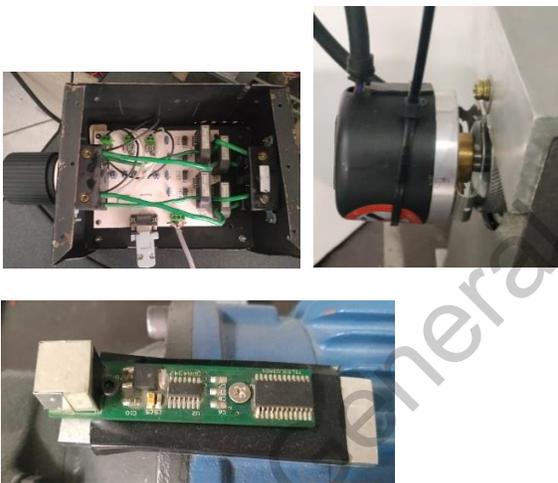
Dirección General de Bibliotecas UAQ

Figura 3.1 Diagrama de metodología propuesta.

1.- Reconfiguración mecánica.



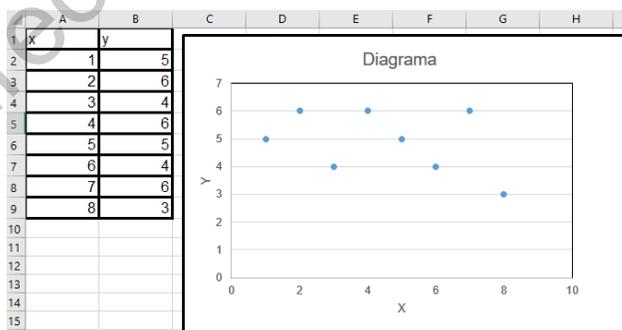
2.- Instrumentación.



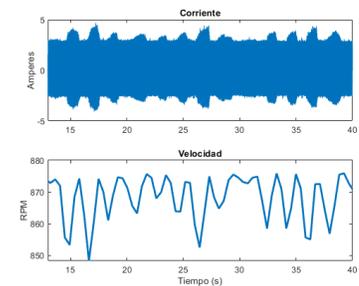
3.- Control.



5.- Procesamiento.



4.- Experimentación.



3.1 Reconfiguración mecánica

Anteriormente se tenía una configuración mecánica de la cadena más simple, específicamente, la cadena cinemática con la que se contaba tenía una construcción similar a la de la Figura mostrada en la descripción del Planteamiento del problema del Capítulo I. Una de las principales desventajas que se tenía con esta cadena cinemática es que no se tenía control sobre la carga oscilante que se requería aplicar para afectar la operación de la misma cadena cinemática y posteriormente realizar el análisis de los efectos producidos. Por lo tanto, con el desarrollo de esta tesis, se decidió realizar diferentes ajustes para poder tener el control sobre la carga oscilante y afectar la operación de trabajo de la cadena cinemática.

Se habla de una reconfiguración mecánica debido a la necesidad de poder analizar distintos elementos que constituyan a una cadena cinemática, tales como: rodamientos, engranes, bandas, discos dentados, entre otros. De esta manera, se llega a la conclusión de generar una nueva propuesta de cadena cinemática que permita realizar el estudio de diferentes elementos bajo los efectos de carga oscilante, dicha propuesta es mostrada en la figura 3.2.

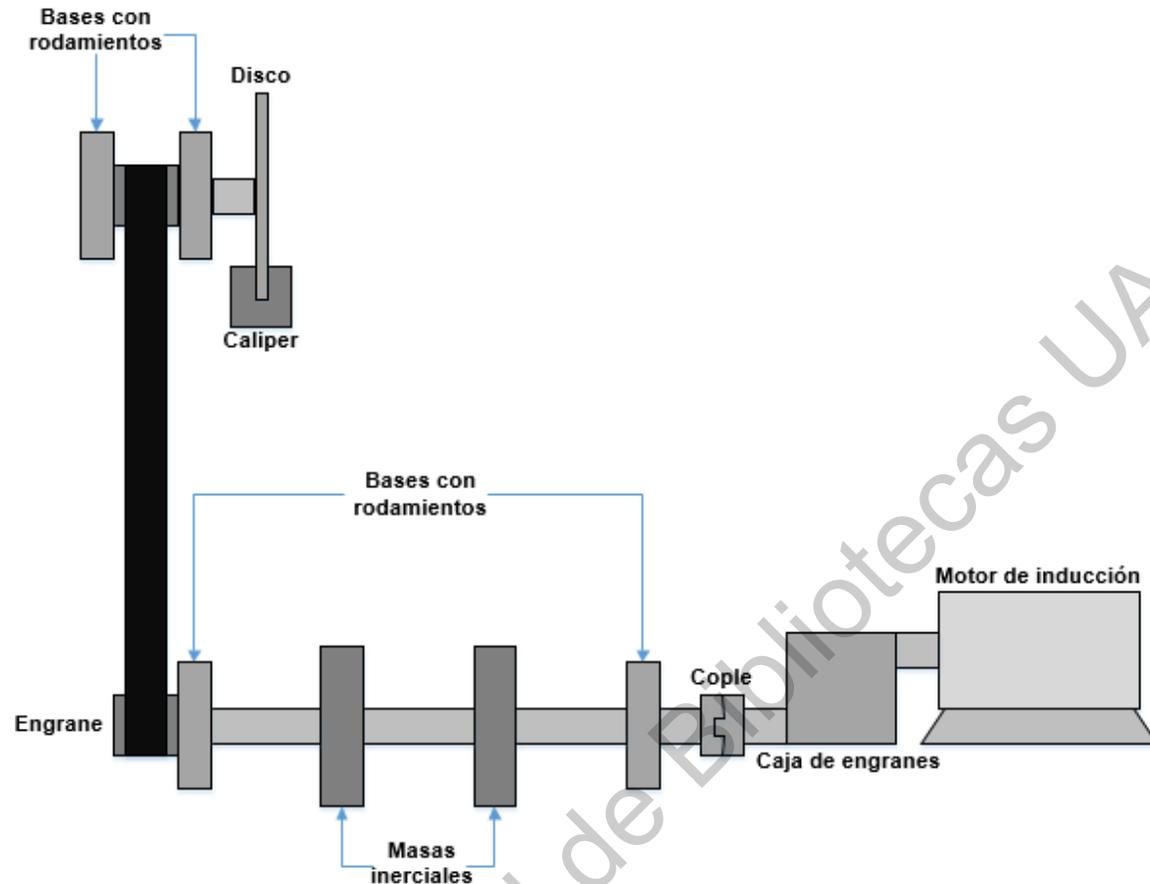


Figura 3.2. Propuesta de nueva cadena cinemática

En la figura anterior se muestra la propuesta que se hace de la nueva cadena cinemática que se va a construir y que servirá para poder hacer análisis de cargas oscilantes. Además, en esta nueva configuración se ha considerado incluir el mecanismo que generara el efecto de carga oscilante, dicho mecanismo está basado en un sistema de frenado que contiene su propia instrumentación para la aplicación automática de cargas oscilantes. En el diagrama de bloques de la figura 3.2 se muestra de manera general, la representación de la construcción final de la cadena cinemática que se pretende obtener.

Cada uno de los elementos que se incluyen en la nueva configuración de la cadena cinemática, como se observan en la figura 3.2, son útiles para realizar el análisis de las señales generadas en el motor y sus variaciones debidas a cargas oscilantes. Principalmente se habla del motor de inducción con el que se va a estar

trabajando a continuación, específicamente el motor de inducción trifásico de 1492 W (modelo WEG00236ET3E145T-W22), y el elemento con el cual es alimentado y ayuda a variar la velocidad de dicho motor es el variador de frecuencia (modelo WEGCFW08). Posteriormente se conecta a una caja de engranes de relación 2: 1 (modelo BALDOR GCF2X02BB) para impulsar el eje de entrada y a su vez el eje de salida de la caja de engranes nos ayuda a impulsar un eje por medio de un cople rígido (modelo L090), el eje impulsado de 30 mm está soportado por dos rodamientos en sus extremos (modelo 6205), en el otro extremo del eje se encuentra una banda dentada (modelo BANDO 250 S8M 800) sujeta por engranes dentados, la cual sirve para transmitir la potencia hacia el sistema de frenado que será el encargado de producir el efecto de la carga oscilante controlada por medio de un sistema automático de accionamiento.

3.2 Instrumentación

Una de los principales objetivos considerados para el desarrollo de esta tesis se enfocan en la reconfiguración mecánica y de control de una cadena cinemática. Posterior a la realización de dicha configuración, y de acuerdo con la metodología propuesta, se instrumentará la nueva cadena cinemática mediante sensores de corriente, voltaje, vibración y velocidad. Además, para la adquisición de las señales de todos estos sensores, se acondicionará un sistema de adquisición de datos (Data Acquisition System-DAS) que está basada en tecnología de arreglo de compuertas programables (Fiel Programmable Gate Array FPGA).

Los sensores que se utilizaron para realizar la cuantificación de diferentes señales físicas y monitorear la condición de estado de la cadena cinemática ante la aparición de cargas oscilantes fueron, un acelerómetro triaxial (modelo LIS3L02AS4) que nos ayudó a medir las vibraciones fue instalado en la parte superior de la caja de engranes; además, un encoder (modelo E40H6-100-3-1-5) fue instalado en la parte final de la cadena cinemática para medir la velocidad y, un conjunto de sensor de efecto Hall (modelo L08P050D15) fueron empleados para cuantificar el consumo de corriente del motor de inducción. En la Figura 3.3 se

muestra un diagrama a bloques representativo de la instrumentación con sensores y su conexionado con el sistema de adquisición de datos.

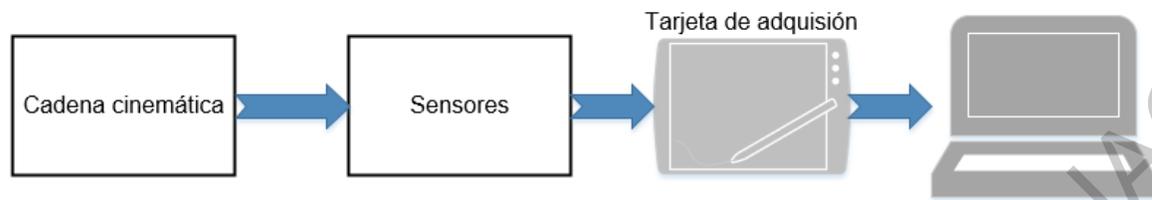


Figura 3.3. Diagrama de instrumentación.

3.3 Control

3.3.1 Sistema de control

Para la parte de control de la carga oscilante, su implementación se pretende realizar mediante el sistema de frenado y su correspondiente instrumentación. Específicamente, el controlado a implementar será un controlador de tres tiempos PID analógico, el objetivo de implementar el controlador es el mantener una presión constante en el sistema de frenado. Así, mediante el uso de un sensor de presión de frenado se cuantificará la presión actual y, mediante un sistema de accionamiento se accionará el mecanismo que mantenga una presión de frenado predefinida. Con la implementación del controlador se podrán simular experimentalmente el efecto de cargas oscilantes a través de un freno mecánico, esto es debido a que se forzara el sistema de frenado a seguir una referencia armónica que emulara la aparición de una carga variable u oscilante.

Esta propuesta se planea realizar el ensamble de un diagrama propuesto (mostrado en la figura 3.4) para el accionamiento de la bomba de freno y el sensor pueda medir, y ser acondicionada la señal medida del mismo sensor, todo esto se planea hacer de forma tal que se pueda identificar la planta del sistema para así mismo calcular su tiempo de respuesta, y en base a esto, establecer los valores que tomaran cada una de las ganancias del controlador PID.

3.3.2 Sistema mecánico de carga oscilante basado en freno mecánico

Para la parte de la carga oscilante, se requiere de un mecanismo que nos sirva de apoyo para controlar la presión de frenado que internamente se tiene en el sistema de frenado, por lo tanto, se genera una propuesta de un tipo pedal, similar al de un coche pero controlado por un mecanismo lineal impulsado por un motor DC, el cual sirve para presionar o soltar la bomba del líquido de freno mediante un pedal hecho mediante una solera de aluminio y acoplada al motor mediante un trozo de barra de aluminio, además, la bomba de líquido de freno lleva un tubo que va acoplado a la manguera del caliper por medio de un cople "T" para conectar el sensor (modelo BOSCH 265 005 303). El mecanismo del que se habla que nos ayuda a generar la carga oscilante se muestra en la figura 3.4.

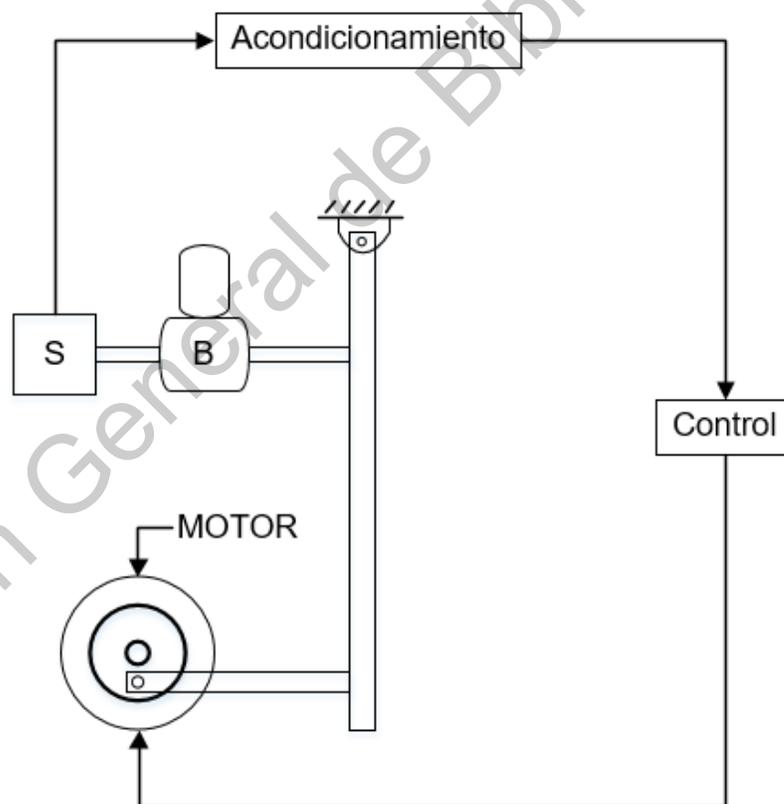


Figura 3.4. Sistema de frenado propuesto

3.4 Experimentación

La metodología que se planea desarrollar para el estudio de las cargas oscilantes en la cadena cinemática, está basada en hacer pruebas de la cadena cinemática a cierta velocidad y que el sistema de frenado induzca artificialmente y de forma controlada la forma oscilante de una carga. Durante cada uno de los experimentos realizados se efectuará el monitoreo continuo de las diferentes magnitudes físicas mediante el sistema de adquisición y cada uno de los sensores instalados sobre la cadena cinemática.

Principalmente se realizarán dos experimentos diferentes, el primero de ellos se realizará para cuando la cadena cinemática se encuentre operando sin ningún tipo de carga; y el segundo, se realizará para cuando la cadena cinemática se encuentre operando bajo la influencia de la carga oscilante. Como se mencionó anteriormente, en cada uno de los experimentos se adquirirán de forma continua las diferentes magnitudes físicas, y posteriormente poder analizar el comportamiento y los efectos producidos sobre la cadena cinemática.

3.5 Procesamiento

Principalmente para realizar la medición de las señales mediante los sensores anteriormente mencionados, se obtendrán las señales que caractericen la condición normal de operación de la cadena cinemática, es decir, en condiciones cuando no hay ningún tipo de carga. Por lo tanto, en el caso de las señales de corriente se espera que las señales obtenidas sean unas señales senoidales ideales (como lo muestra la figura 3.4a), pero sabemos de antemano que las señales suelen por lo regular no ser ideales (como se muestra en la figura 3.4b) y tienden a ser más irregulares en cada punto del ciclo. Este efecto comúnmente es producido por la contaminación de la red de suministro eléctrico.

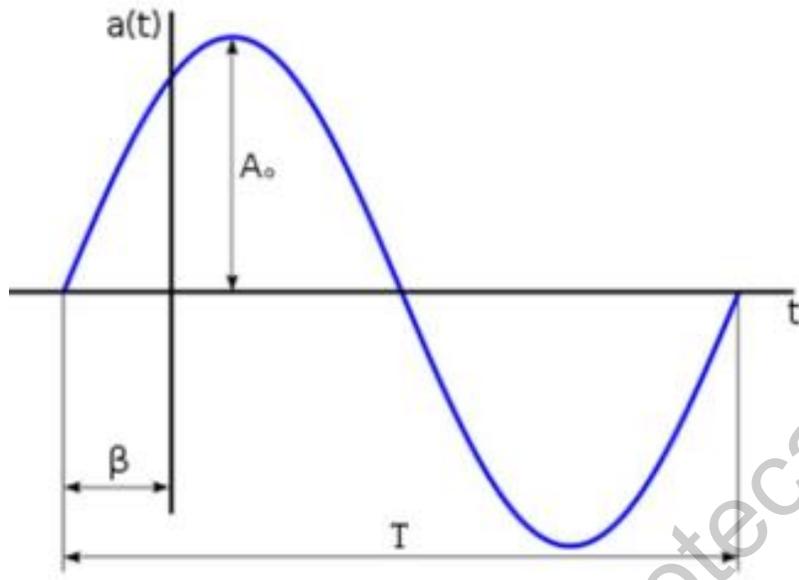


Figura 3.4a. Señal ideal

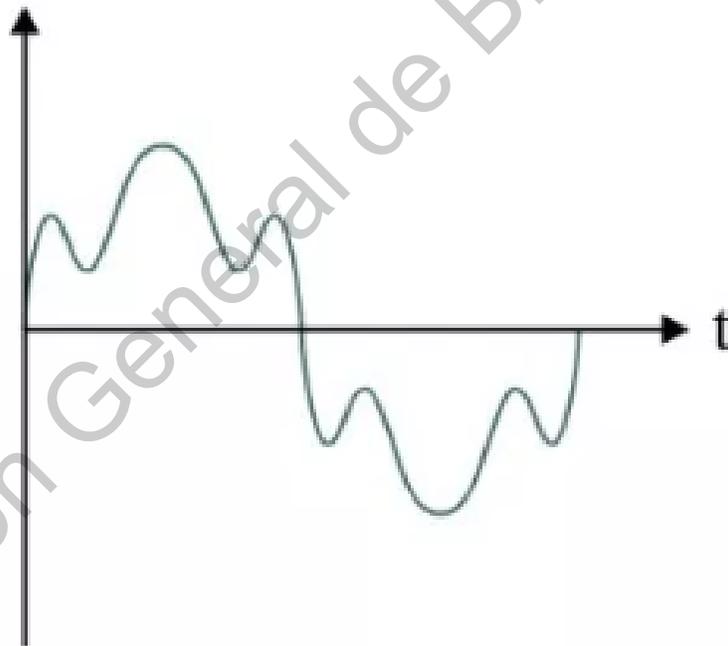


Figura 3.4b. Señal senoidal real

Al saber lo anterior, se requiere que al tener nuestras señales obtenidas de la cadena cinemática en condiciones normales (bajo ningún tipo de carga o anomalía) se pueda obtener un conjunto de parámetros que puedan caracterizar el

comportamiento y tendencia de las señales. Posteriormente, de la misma forma se procederá a realizar pruebas del sistema ante cargas oscilantes a distintas frecuencias de operación, para así mismo proceder con la adquisición de datos ante este tipo de condiciones en el sistema y obtener la mismas señales ante dicha carga para poder observar cómo es que las señales del sistema ante condiciones anormales tiende a cambiar ante condiciones de distintas cargas que van afectando el sistema y, sucesivamente aplicar las técnicas de detección de novedad, que se refiere a que se va a observar que tanto van a variar los datos de la señal sana a los de la señal cuando el sistema está siendo sometido a cargas oscilantes, el tipo de anomalías que se encuentren en el sistema van a ser de utilidad para futuros trabajos de investigación, que puedan ayudar a mejorar la vida útil de la maquinaria o del sistema al que se pueda aplicar alguna carga oscilante en alguna parte de su vida útil.

Para el análisis de las señales que se obtengan del sistema se generara un código en Matlab que nos graficara las señales que se obtengan tanto de voltaje como corriente, velocidad y vibraciones para analizar las distintas anomalías que cada una de estas variables físicas tengan al aplicarse la carga oscilante al sistema.

CAPITULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente capítulo se va a mostrar los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta en el capítulo anterior para detección de anomalías en las variables físicas como lo son voltaje, velocidad, corriente y vibraciones al ser expuesto nuestro sistema a cargas oscilantes.

4.1 Reconfiguración de la cadena cinemática

Mediante la aplicación de la metodología propuesta en el capítulo anterior se llevó a cabo una reconfiguración de la cadena cinemática que se tenía anteriormente, se llevó a cabo el desmontaje del sistema que se tenía y se procedió con el uso del mismo motor de inducción, posteriormente se realizó el ensamble de una caja de engranes en el mismo motor de inducción para la reducción de velocidad y aumento de torque del sistema. Posterior a la caja de engranes se encuentra una flecha soportado por dos rodamientos que contiene dos masas inerciales, para así mismo mediante la transmisión del movimiento por una banda dentada que llega hasta un disco con caliper. La cadena cinemática con la que se trabajará se muestra a continuación en la figura 4.1.

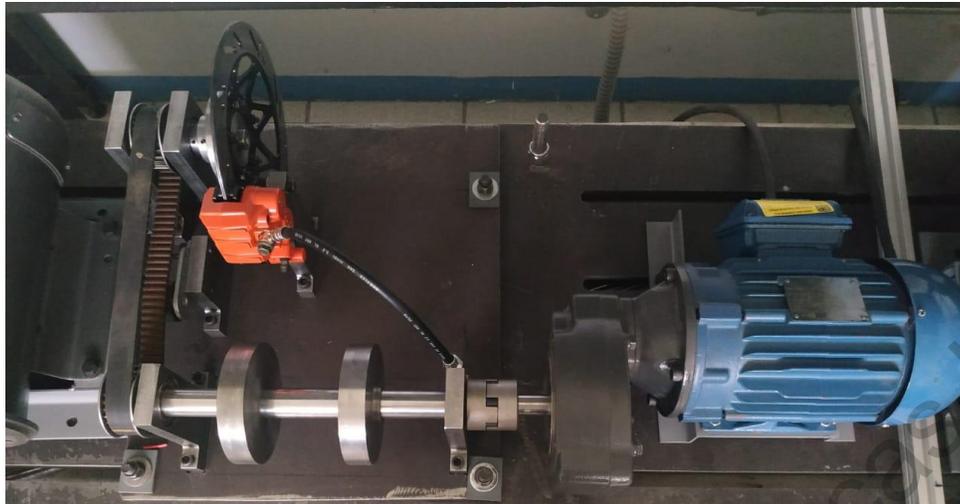


Figura 4.1 Cadena cinemática reconfigurada

Como se observa en la figura anterior, la cadena cinemática reconfigurada queda concluida de forma tal que sea similar a la propuesta que se hizo en el capítulo anterior.

4.2 Instrumentación de la cadena cinemática

Para instrumentar la cadena cinemática se utilizaron tres tipos de sensores que nos miden y entregan información acerca de la velocidad, voltaje, corriente y vibraciones del sistema, dichos sensores fueron instalados en partes distintas de la cadena cinemática, los mismo se muestran a continuación en la figura 4.2. El sensor de velocidad utilizado (encoder) se ubicó en la flecha que se encuentra sosteniendo la banda y el disco de frenado, el sensor de corriente que se utilizó se instaló en las líneas de alimentación del motor de inducción, y el sensor de vibración (acelerómetro) se colocó en la parte superior del motor de inducción del lado transmisión de dicha maquina giratoria.



Figura 4.2a Encoder



Figura 4.2b Acelerometro

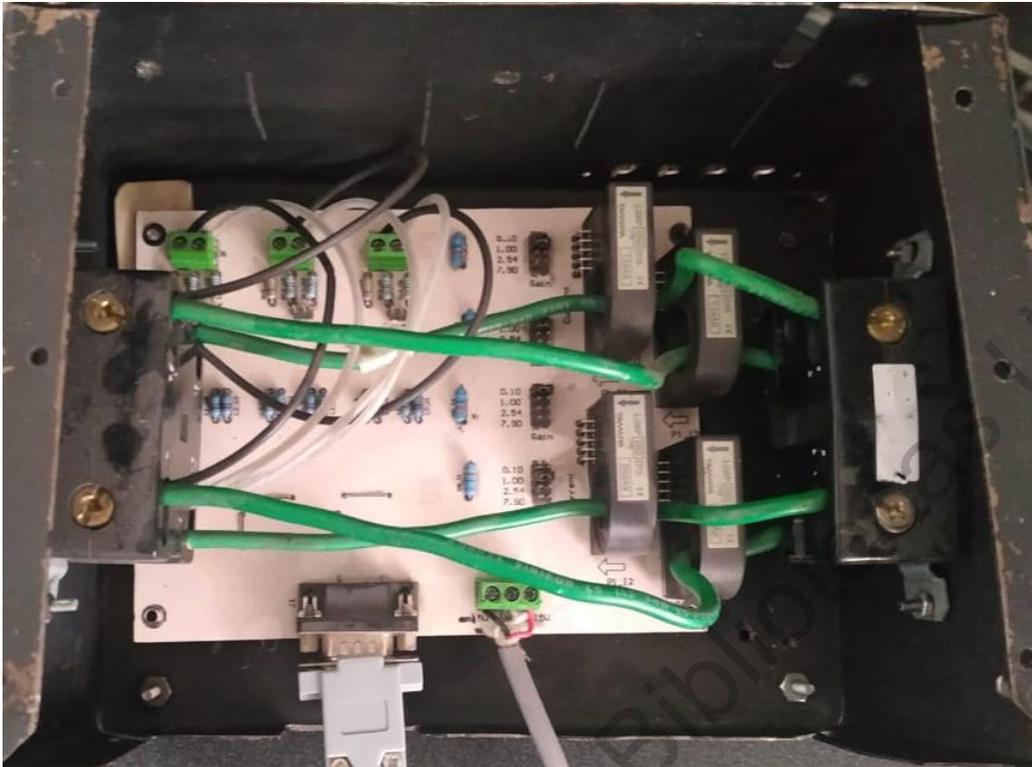


Figura 4.2c Sensor de corriente

Cada uno de los sensores mostrados anteriormente se utilizan para la detección de las variables físicas mencionadas, esto se hace mediante el uso de una tarjeta de adquisición de datos basada en FPGA-UPDSH, la tarjeta se encuentra configurada con un código el cual fue desarrollado por el grupo de investigación HSPdigital, la programación en hardware de dicho sistema de adquisición de datos opera de forma conjunta con un script desarrollado en el software Matlab, donde se grafican todas las señales obtenidas de vibraciones, corrientes, velocidad y voltaje, con esto se podrá observar los datos que se obtengan para hacer el análisis requerido en las señales y poder observar las diferencias entre cada prueba que se realice. La tarjeta UPDSH se muestra en la figura 4.3.

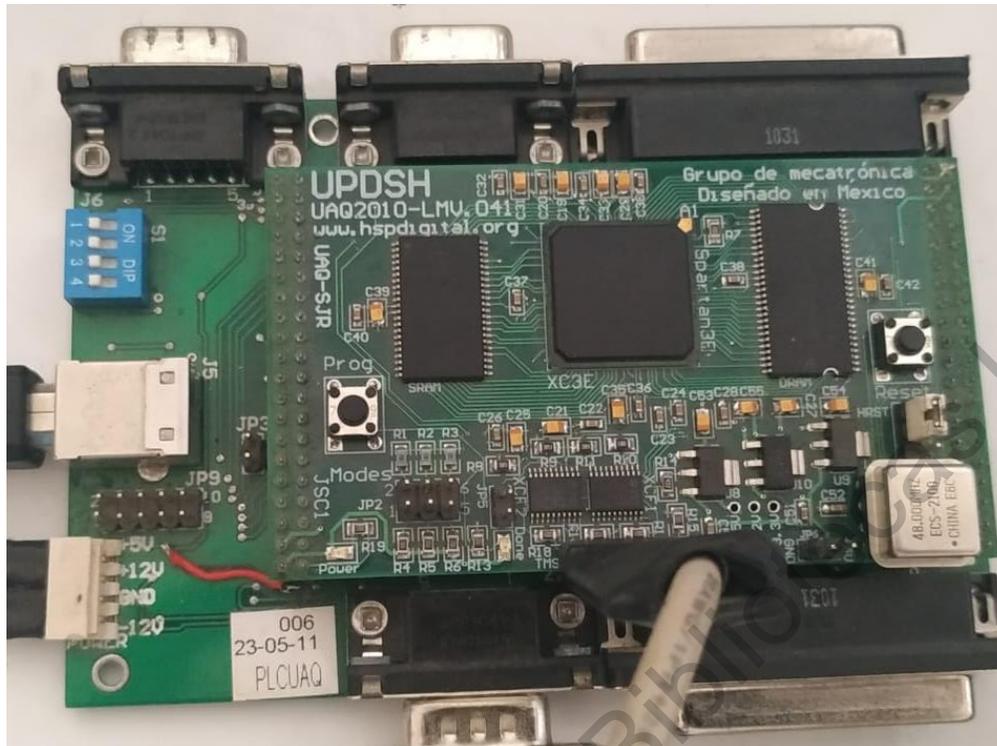


Figura 4.3 Tarjeta de adquisición de datos

4.3 Control de la carga

4.3.1 Identificación de la planta del sistema de frenado

Para la detección de la planta del sistema de frenado, el cual será usado para la aplicación de la carga oscilante en la cadena cinemática, en primer lugar, se realizó el ensamble de todo el mecanismo que comprende la conexión del caliper, mangueras y tubos de presión, sensor de presión de frenado, bomba de frenado. Así, mediante el sensor se cuantificará la presión interna del sistema de frenado y ésta será la señal usada como retroalimentación para poder realizar la implementación de lo que será el control del freno de forma oscilante. Para fines prácticos y de implementación, la salida del sensor fue sometida a un proceso de acondicionamiento con la finalidad de ajustar los niveles de voltajes en rangos que están entre los 0V y 5V, además, el proceso de acondicionamiento se realizó para

evitar el offset de la propia señal. La figura 4.4 muestra la etapa de acondicionamiento conectada en un protoboard.

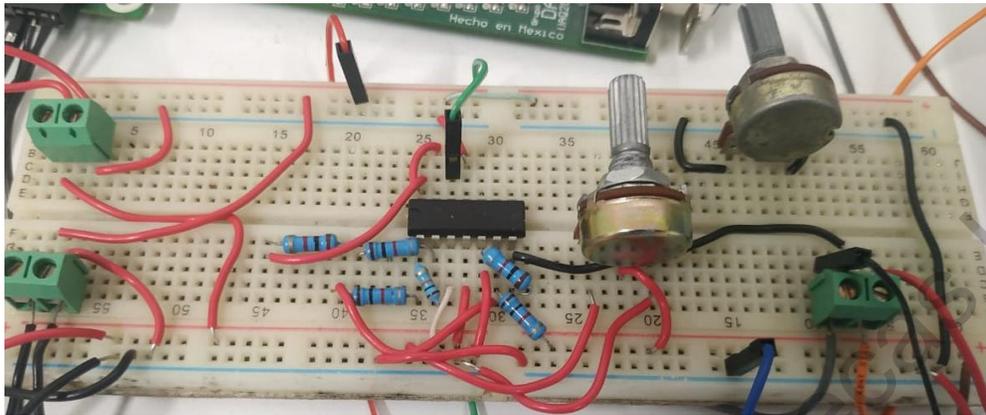


Figura 4.4. Etapa de acondicionamiento

Como se mencionó, la etapa de acondicionamiento se realiza con la finalidad de que nuestra salida nos quede en un rango de voltaje de 0 a 5 v en la retroalimentación del sensor, posteriormente se realizó la parte de detección de la planta lo cual se realizó con la tarjeta UPDSH que está basada en FPGA, dicha tarjeta funciona como sistema de adquisición de datos debido a que contiene convertidores analógico digital. La programación de las frecuencias de muestreo para la adquisición de las señales se de igual forma mediante un script de Matlab el cual al ejecutarlo nos muestra las gráficas obtenidas, y así se obtuvo los datos que corresponden a la respuesta de la planta de la etapa de sistema de frenado, en la figura 4.5 se muestra la señal de respuesta generada que caracteriza la planta del sistema de frenado ante una entrada escalón.

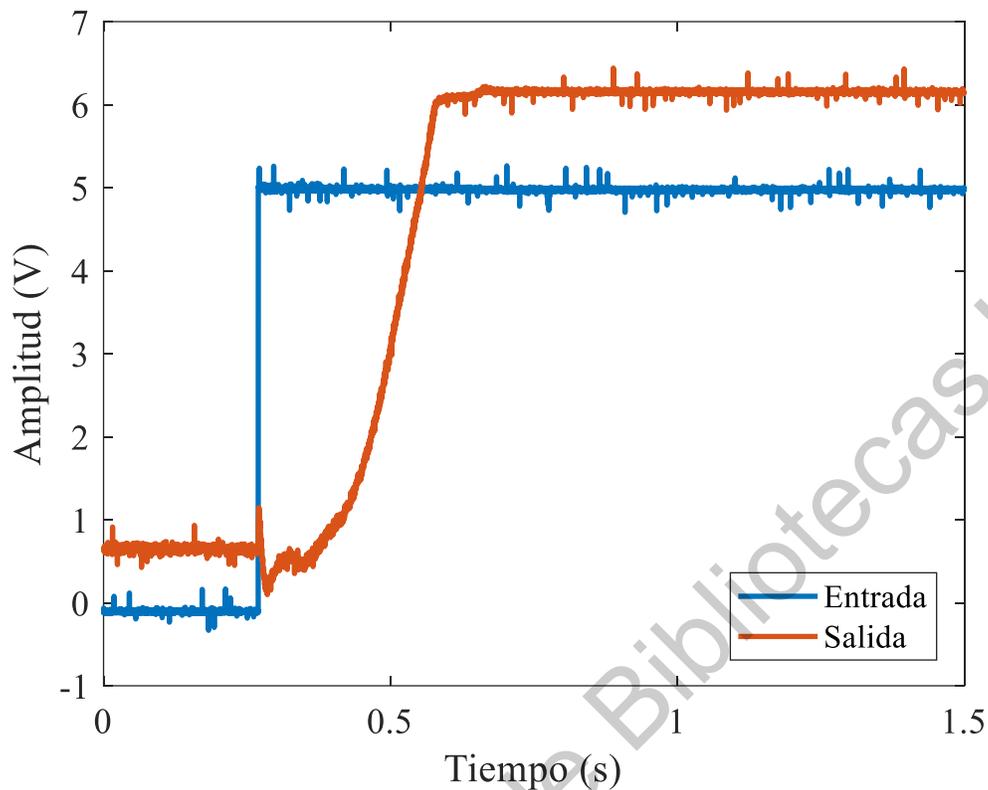


Figura 4.5. Respuesta ante entrada escalón.

De las señales adquiridas y mostradas en la anterior Figura 4.5 se puede observar la respuesta del sistema de frenado, debido a que se tiene que obtener una representación matemática para proponer un controlador, es posible hacer la aproximación del sistema de frenado a un sistema de primer orden mediante el cálculo del tiempo de respuesta. En este sentido, en la siguiente Figura 4.6 se muestran los puntos específicos que sirven para obtener el valor de tiempo de respuesta, el tiempo de respuesta para sistemas de primer orden se calcula al 63.3% de la salida producida, es decir, el sistema de frenado tiene un tiempo de respuesta de 25.2ms cuando ha alcanzado su 63.3% del total de la respuesta.

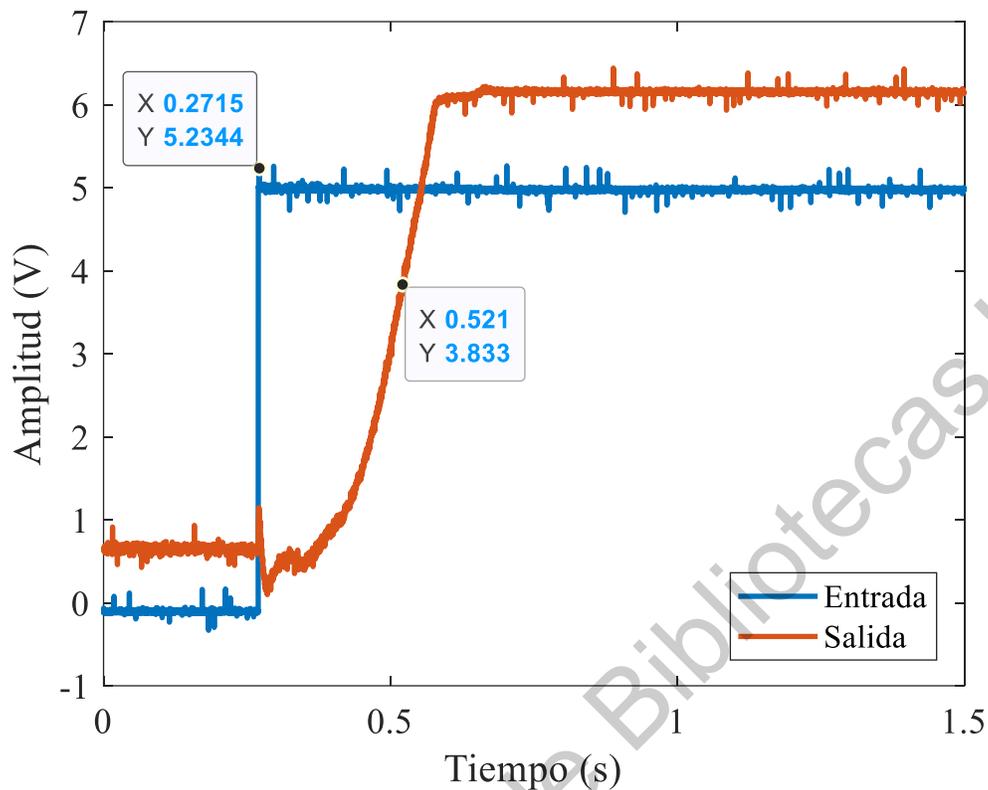


Figura 4.6. Respuesta en el tiempo

Una mejor aproximación de la respuesta del sistema se puede obtener mediante herramientas dedicadas al modelado de sistemas, así, debido a que se adquirió y almacenó en una PC los datos de entrada y salida del sistema de frenado, mediante el uso de la herramienta de identificación "ident" de MATLAB se obtuvo una mejor aproximación. Como es de observarse en las anteriores Figuras, la respuesta del sistema se asemeja más a la producida por sistemas de segundo orden, así, tras realizar la identificación del modelo de la planta del sistema mediante el "ident" de MATLAB se obtuvo la siguiente función de transferencia:

$$TF = \frac{85.23}{s^2 + 7.3103s + 65.283}$$

4.3.2 Sintonización de las ganancias

El método utilizado para sintonizar las ganancias del controlador PID será basado en Ziegler-Nichols, el cual consiste en ver la respuesta del sistema ante una entrada de tipo escalón, y observar en cuanto tiempo llega la señal a la referencia, con esto se toma una tabla con los valores que se obtengan se la gráfica y nos da los valores de las ganancias, el diagrama a bloques de lo que sería ya nuestra planta con un controlador PID se muestra en la figura 4.7.

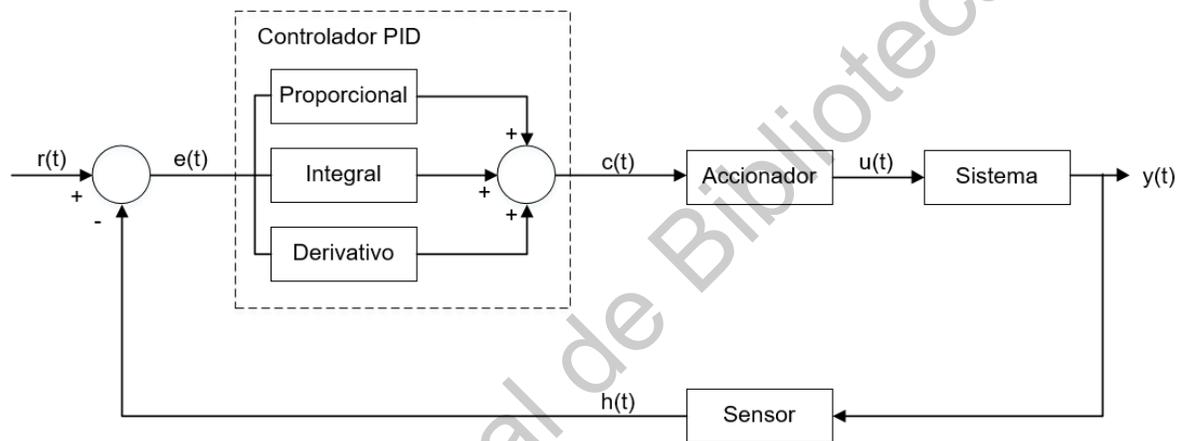


Figura 4.7 Diagrama a bloques del sistema de control

Para implementar el método de Ziegler-Nichols se deben de conocer ciertos parámetros, como lo son t_1 y t_2 que son el tiempo que tarda en empezar a responder el sistema a partir de que se le aplica la entrada tipo escalón y el tiempo que tarda en llegar a determinado porcentaje del total de la salida, respectivamente, además se requiere conocer otros valores tales como dx y dy , que son el valor de referencia del escalón, y el valor máximo de la variable física que se mida, en nuestro caso sería la presión máxima, además se tiene una tabla que con estos valores se calcula una variable más que será ya conociendo todo esto nos podemos ir a la tabla y calcular las ganancias.

	Kp	Ki	Kd
P	Ko		
PI	0.9*Ko	0.27*Ko/T1	
PID	1.2*Ko	0.60*Ko/T1	0.60*Ko*T1

Tabla 4.1 Ganancias Ziegler-Nichols

Donde $K_o = (dx \cdot t_2) / (dy \cdot t_1)$, aplicando todo este procedimiento las ganancias obtenidas del sistema quedan de la siguiente manera, $K_p = 1.59$, $K_i = 7.43$ y $K_d = 0.082$. Otro método adicional de sintonización de las ganancias del controlador PID se puede ser a través de la utilización de las herramientas de sintonización ya incluidos en herramientas de MATLAB; en este sentido, haciendo uso de la librería de herramientas "PID Tuner" también fue posible encontrar los valores que pueden tomar las diferentes ganancias del controlador. Tras haber realizado la sintonización se obtuvieron los valores de $K_p=2.17$, $K_i=8.64$ y $K_d=0.117$; como se podrá observar no existe una gran diferencia en comparación con los valores dados por Ziegler-Nichols.

Previo a la implementación del controlador PID analógico, se realizó la simulación de la planta del sistema de frenado ante una entrada escalón y la respuesta obtenida es la mostrada en la Figura 4.8. Así mismo, se realizó la simulación de la planta y el controlador en conjunto ante la misma respuesta escalón y, la respuesta generada es la que se muestra en la Figura 4.9. Como se puede observar se ha logrado mejorar la respuesta del sistema y controlar su propia estabilidad.

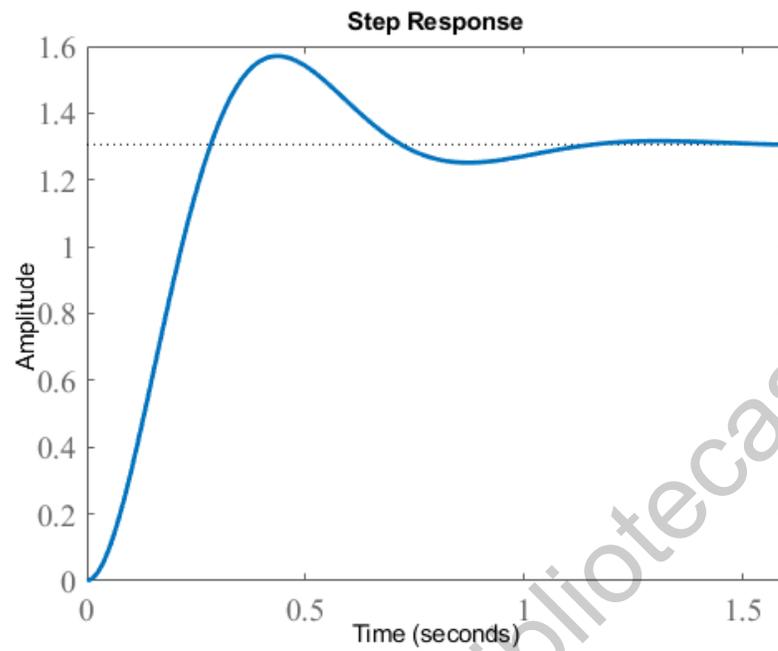


Figura 4.8. Respuesta al escalón de la planta.

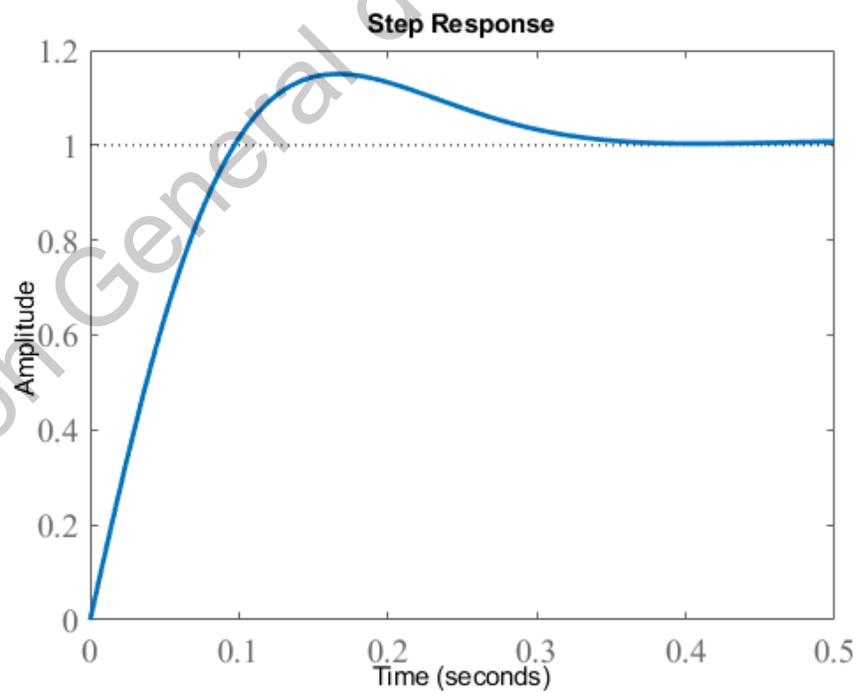


Figura 4.9. Respuesta ante escalón de planta más controlador.

4.4 Experimentación con la cadena cinemática

Las pruebas realizadas físicamente en la cadena cinemática y el sistema de frenado fueron realizadas con ayuda del sistema de adquisición de datos y de un generador de funciones. Con el sistema de adquisición de datos se adquirieron y almacenaron en una PC la referencia o entrada que aplicada al sistema de frenado y también se adquirió la respuesta generada. Con el generador de funciones se generó una señal senoidal armónica para simular la referencia en forma de carga variable y, así producir el comportamiento de carga oscilante. Específicamente, las señales generadas tenían aproximadamente una amplitud de 8V pico-pico y diferentes valores de frecuencia, el primer valor de frecuencia empleado fue el de 0.5 Hz y un segundo valor de frecuencia de apropiadamente 1 Hz también fue evaluado. En las siguientes Figuras, Figura 4.10 y Figura 4.11, se muestran los gráficos de la referencia generada por medio del generador de funciones y, la salida producida por el sistema de frenado controlado por el controlador PID analógico propuesto.

Estas primeras dos pruebas experimentales fueron realizadas sin tener en funcionamiento la cadena cinemática, sin embargo, parte importante de este trabajo se enfoca en analizar los efectos inducidos por cargas oscilantes. Por lo tanto, estas mismas entradas, usadas como referencia, fueron empleadas para inducir en la cadena cinemática el efecto de carga variable u oscilante. Durante la evaluación experimental de la carga oscilante sobre la cadena cinemática, se realizó la adquisición de las diferentes magnitudes físicas anteriormente mencionadas, vibraciones, corrientes y voltajes. La adquisición de estas señales se realizó con el objetivo de analizar y observar los efectos que la carga oscilante puede producir sobre la operación normal de funcionamiento de la cadena cinemática.

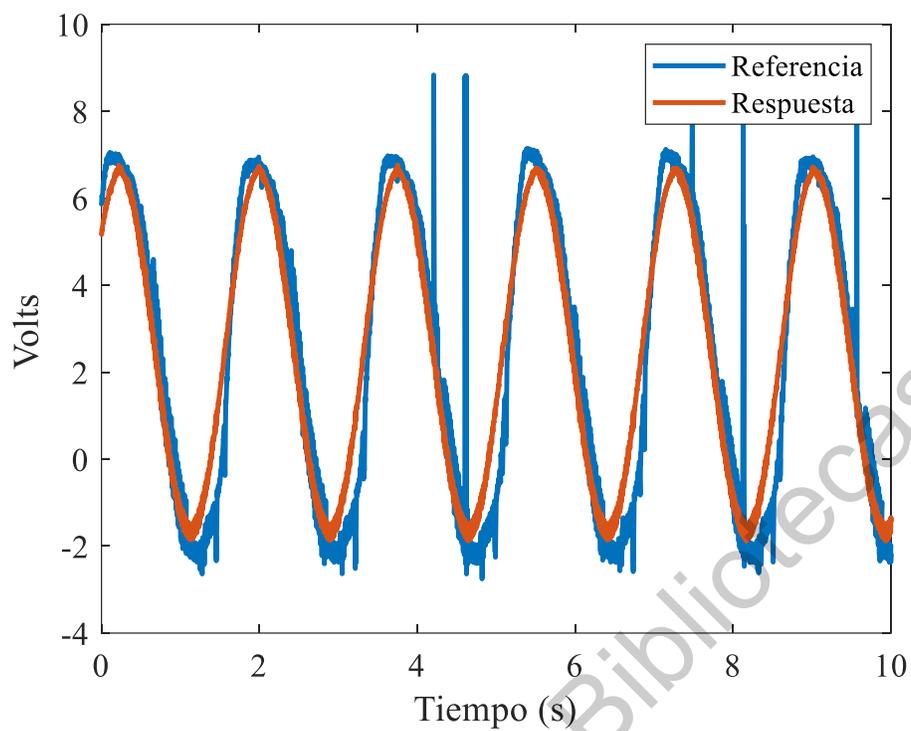


Figura 4.10. Respuesta ante entrada sinusoidal (0.5 Hz).

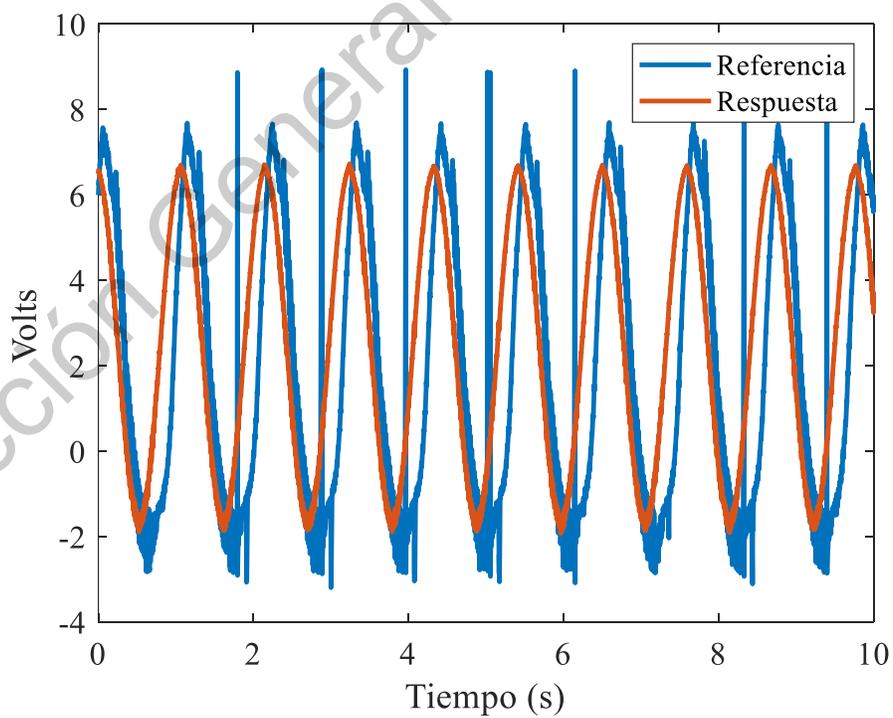


Figura 4.11. Respuesta ante entrada sinusoidal (1 Hz)

4.5 Análisis de las señales

Las señales obtenidas de las pruebas realizadas en el sistema nos dan información importante de cómo es que cambian las mediciones de los sensores al someter la cadena cinemática a diferentes cargas oscilantes. Respecto a la adquisición de señales de vibración, es posible observar que existen variaciones significativas en la medición de señales para cuando la cadena cinemática opera de forma normal y para cuando opera bajo cargas oscilantes. Los cambios producidos por la carga oscilante se pueden apreciar de forma visual en las Figuras 12a y 12b, estas dos figuras corresponden a la adquisición de señales de vibración cuando la cadena opera sin carga oscilante y cuando opera con carga oscilante, respectivamente. Además, como puede observarse, el cambio más significativo que se da es el que la carga oscilante produce cuando es aplicada, es decir, el incremento de vibraciones se da en función de la frecuencia que fue usada por la carga oscilante.

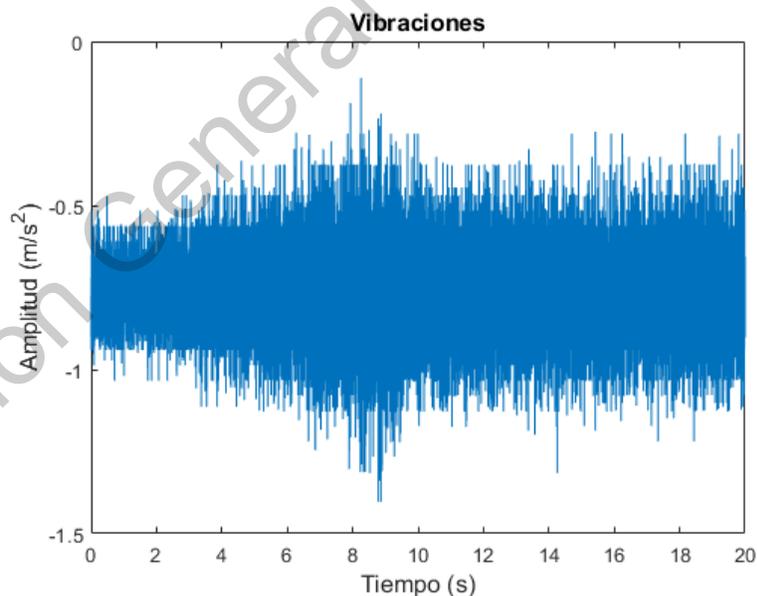


Figura 4.12a Vibraciones sin carga

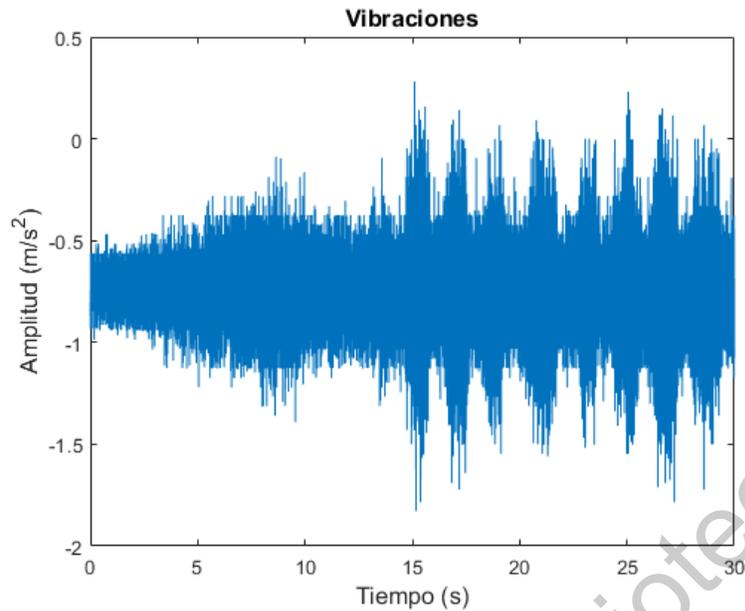


Figura 4.12b Vibraciones con carga

Otras señales a analizar son las de velocidad de giro de la cadena cinemática, en las Figuras, Figura 4.13a y Figura 4.13b, se muestra las gráficas de velocidad rotacional desarrollada por la cadena cinemática cuando opera sin carga oscilante y cuando opera bajo carga oscilante, respectivamente. Las señales obtenidas en velocidad, nos muestran cómo se va diferenciando cuando el sistema no es sometido a ninguna carga (figura 4.13a) el sistema se estabiliza a la velocidad deseada y posteriormente se mantiene a esa misma velocidad, pero cuando el sistema está siendo sometido a una carga oscilante, entonces el sistema tiende a variar la velocidad dependiendo cuanto tiempo la carga sea puesta o de qué forma es la carga, todo esto se puede observar en la velocidad.

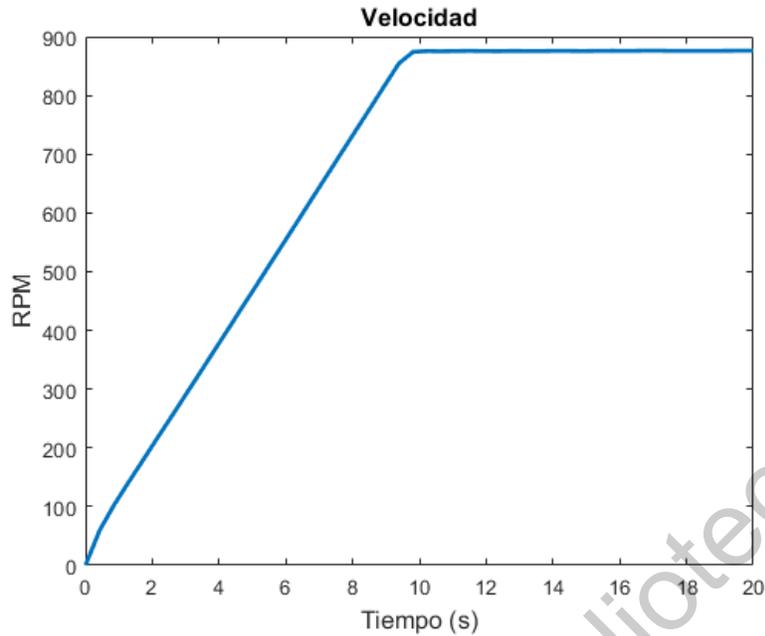


Figura 4.13a Velocidad sin carga

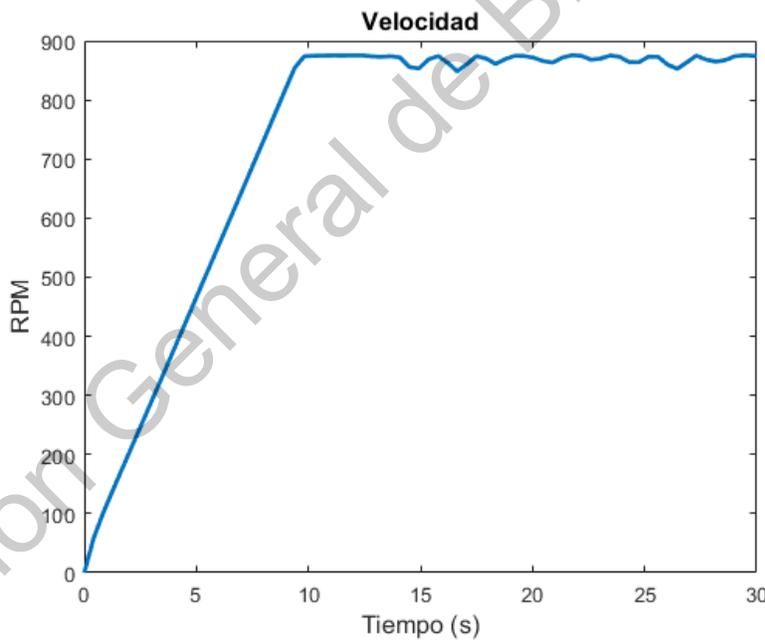


Figura 4.13b Velocidad con carga

Respecto a las señales de corriente de consumo del motor de inducción, en la Figura 14a y figura 14b, se muestran las gráficas de consumo de corriente cuando la cadena cinemática es operada sin carga oscilante y con carga oscilante, respectivamente. Como se observa en las figuras, cuando el sistema no está siendo

sometido a ningún tipo de carga, entonces la corriente se estabiliza a un nivel después de alcanzar la velocidad deseada, y ahí se mantiene (figura 14a). Por otra parte, cuando la cadena cinemática se expone a cargas oscilantes la señal de corriente tiende a comportarse de manera que tiene picos justamente donde la carga es aplicada (figura 14b), por lo que se observa que la forma de la carga es tomada por la señal y mostrada en forma de picos senoidales. Esto significa que, ante la aplicación de cargas oscilantes, existe variaciones en el consumo de corriente del motor, así mismo la velocidad de rotación se ve afectada y el incremento de vibraciones es inherente a la aparición de cargas oscilantes.

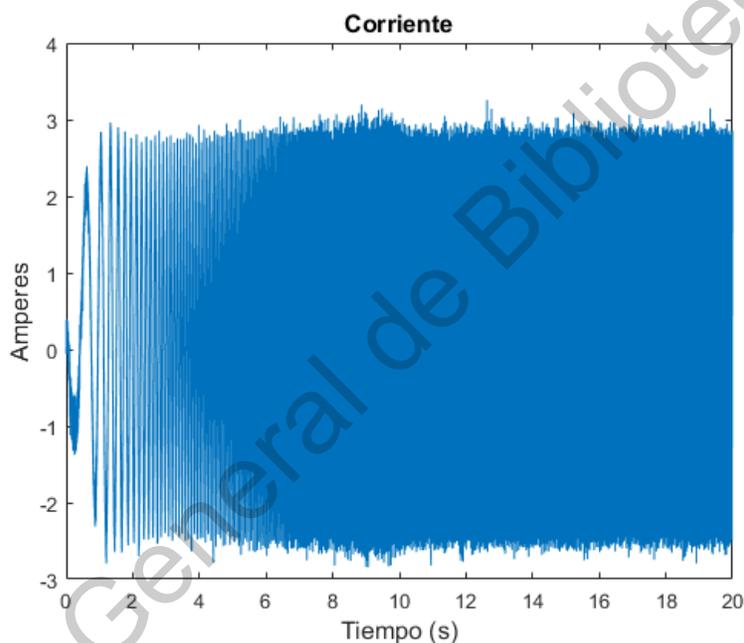


Figura 14a Corriente sin carga

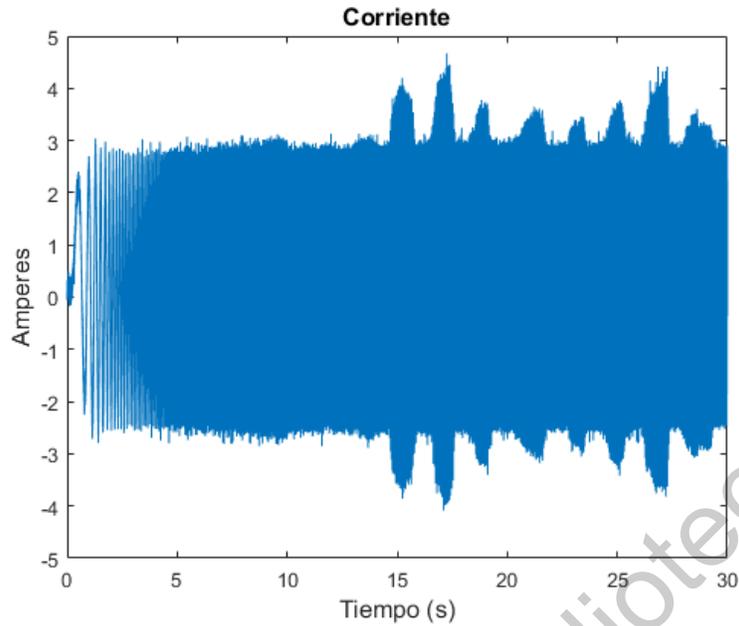


Figura 14b Corriente con carga

En la figura 4.15 se puede observar el comportamiento de la velocidad de rotación y el consumo de corriente del motor de inducción, de esta figura se puede observar claramente que ante la aparición de cargas oscilantes existe una reducción de velocidad de giro y, esta reducción en la velocidad de giro coincide de forma puntual con los picos de corriente, todo esto, producido por la aparición de carga oscilante en la operación de la cadena cinemática.

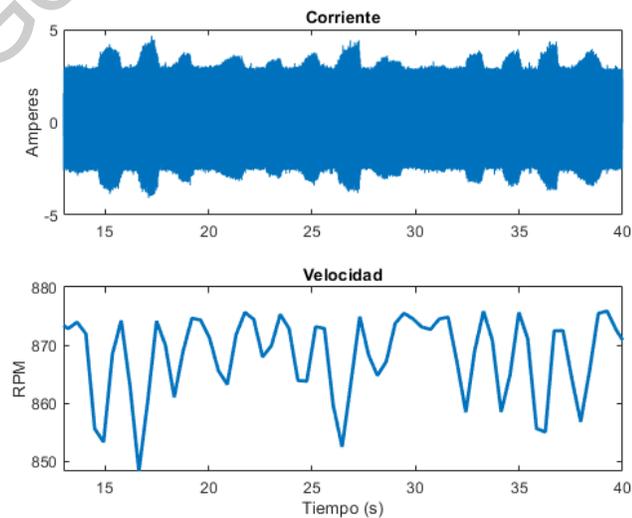


Figura 4.15 Corriente contra velocidad

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES

Se obtuvieron los resultados deseados en la parte de la reconfiguración de la cadena cinemática, se logró ensamblar todo a como se había propuesto al inicio, además de que el motor de inducción se reutilizó de otro proyecto de investigación anterior a este.

Se tuvo que adaptar los sensores para la parte de la instrumentación, a la cadena cinemática para así mismo poder obtener los resultados deseados, se utilizaron piezas de aluminio tales como ángulo y solera como apoyo para realizar las bases de los sensores de vibraciones y el encoder. El sensor de corriente que se utilizó en el proyecto ya había sido conectado y ensamblado en proyectos de investigación anteriores.

La carga mecánica desarrollada para actuar en forma de carga oscilante en el sistema de la cadena cinemática, se realizó primero una propuesta que se tenía anteriormente, pero dicha propuesta no funcionó de la manera esperada, si no que funcionaba demasiado lento, por lo tanto, se optó por desarrollar una nueva propuesta que pudiese responder más rápido, así mismo se realizó la propuesta presentada en el proyecto de investigación que se está trabajando, y se generó la idea en físico, se realizaron pruebas y funciono más rápido que la propuesta anterior, por lo tanto se dejó de esta manera el sistema de frenado mecánico que simuló la carga oscilante.

Las pruebas que se realizaron para obtener la velocidad deseada del freno mecánico, fueron que se analizó la respuesta del sistema ante una entrada escalón, y ante una entrada de tipo variable en el tiempo, y se observó que en la entrada escalón se refleja a un sistema de primer orden y tarda cierto tiempo en llegar a la referencia, pero cuando la referencia era variable en el tiempo (senoidal), a bajas frecuencias el sistema seguía perfectamente la referencia sin problemas, pero por

lo mismo, al ser frecuencias bajas el sistema actuaba lento, y al subir la frecuencia era más rápido, pero afectaba el comportamiento del sistema. Se hicieron pruebas hasta hallar una frecuencia que no afectara mucho la respuesta del sistema, pero que tampoco fuera tan lento.

Las señales obtenidas en la etapa de instrumentación del sistema, son muy claras ya que, al ser hecha la prueba por un periodo de tiempo, nos da la respuesta en forma de graficas en un código de Matlab, por lo tanto, se puede observar claramente en cada una de las pruebas hechas (con carga y sin carga), cuando es cada una de ellas. Se analizaron en el tiempo donde el motor llega a su velocidad establecida en el variador de frecuencia.

Dirección General de Bibliotecas UNQ

6. REFERENCIAS

- Bediaga, I., Mendizabal, X., Arnaiz, A. and Muñoa J. 2013. Ball bearing damage detection using traditional signal processing algorithms. *IEEE Instru. Meas. Mag.* 16:20-25.
- Barbieri, N., Barbieri, G. D. S. A. V., Martins, B. M., Barbieri, L. D. S. A. V., & de Lima, K. F. (2019). Analysis of automotive gearbox faults using vibration signal. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 129, 148-163.
- Barros, L. Y., Poletto, J. C., Neis, P. D., Ferreira, N. F., & Pereira, C. H. S. (2019). Influence of copper on automotive brake performance. *Wear*, 426, 741-749.
- CAISSE, A. (1993). *Maquinas eléctricas y transformadores*
- Contreras-Hernandez, J. L., Almanza-Ojeda, D. L., Ledesma, S., & Ibarra-Manzano, M. A. (2019). Motor fault detection using Quaternion Signal Analysis on FPGA. *Measurement*, 138, 416-424.
- Dhir, D. K. (2018). Thermo-mechanical performance of automotive disc brakes. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1864-1871.
- Ding, X., Li, Y., Belatreche, A., & Maguire, L. P. (2014). An experimental evaluation of novelty detection methods. *Neurocomputing*, 135, 313-327.
- Garcia-Ramires, A.G., Morales-Hernandez, L.A., Osernio-Rios, R. A., Benitez-Rangel, J. P., Garcia-Perez, A. and Romero-Troncoso, R. J. 2014, Fault detection in induction motors and the impac on the kinematic chain through thermographic analysis. *Electric Power Systems Research* 114, 1-9.
- Henao, Humberto & Capolino, Gérard-André & Fernandez-Cabanas, Manes & Filippetti, Fiorenzo & Bruzzese, Claudio & Strangas, Elias & Pusca, Remus & Estima, Jorge & Riera-Guasp, Martin & Hedayati-Kia, Shahin. (2014). Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques. *Industrial Electronics Magazine, IEEE.* 8. 31-42. 10.1109/MIE.2013.2287651.

Hoang, D. T., & Kang, H. J. (2019). A survey on Deep Learning based bearing fault diagnosis. *Neurocomputing*, 335, 327-335.

Hoang, D. T., & Kang, H. J. (2019). Rolling element bearing fault diagnosis using convolutional neural network and vibration image. *Cognitive Systems Research*, 53, 42-50.

Huang, S. R., Huang, K. H., Chao, K. H., & Chiang, W. T. (2016). Fault analysis and diagnosis system for induction motors. *Computers & Electrical Engineering*, 54, 195-209.

Liang, X., Zuo, M. J., & Feng, Z. (2018). Dynamic modeling of gearbox faults: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 98, 852-876.

Mejia Barron, A., 2015, Analisis de impedancia espectral en motores de induccion bajo modos de control escalar y vectorial, Tesis de maestria. Universidad autónoma de Querétaro.

Pimentel, M. A., Clifton, D. A., Clifton, L., & Tarassenko, L. (2014). A review of novelty detection. *Signal Processing*, 99, 215-249.

Saucedo-Dorantes, J.J., Garcia-Ramirez, A.G., Jauregui-Correa, J.C., Osornio-Rios, R.A., Garcia-Perez, A., Romero-Troncoso, R.J., 2014, Reliable methodology for gearbox wear monitoring based on vibration analysis, *Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE*.

Saucedo-Dorantes, J.J., Delgado-Prieto, M., Ortega-Redondo, J.A., Osornio-Rios, R.A. and Romero-Troncoso, R.J., 2016, Multiple Fault Detection methodology based on vibration and current analysis applied to bearings in induction motors and gearboxes on the kinematic chain, *hindawi publishing corporation shock and vibrationm volume 2016, article ID 5467643*.

Saucedo Zárata, C.H., Sánchez López, C., & Huerta Ruelas, J.A. (2006). Diseño preliminar de un banco didáctico/experimental para el estudio de esfuerzos en cadenas cinemáticas reconfigurables. *Ciencia y tecnología*, (32).

Yetgin, A. G. (2019). Effects of induction motor end ring faults on motor performance. Experimental results. *Engineering Failure Analysis*, 96, 374-383.

Yin, L., Wang, H., & Fan, W. (2018). Active learning-based support vector data description method for robust novelty detection. *Knowledge-Based Systems*, 153, 40-52.

Dirección General de Bibliotecas UAQ