UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico

PROYECTO TÉCNICO

"ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE CORRIENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN COMBINANDO FALLOS EN LA MAQUINARIA ROTATIVA Y ELABORACIÓN DE UNA GUÍA DE PRÁCTICA SOBRE DETECCIÓN DE FALLOS POR MEDIO DEL AFCM"

Autor:

Chingal Imaicela David Esteban

Tutor:

Ing. René Vinicio Sánchez, Ph.D.

Cuenca – Ecuador

2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo David Esteban Chingal Imaicela, con documento de identificación N° 1714596564, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: "ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE CORRIENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN COMBINANDO FALLOS EN LA MAQUINARIA ROTATIVA Y ELABORACIÓN DE UNA GUÍA DE PRÁCTICA SOBRE DETECCIÓN DE FALLOS POR MEDIO DEL AFCM", mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, junio del 2018

David Esteban Chingal Imaicela C.I.: 1714596564

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE CORRIENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN COMBINANDO FALLOS EN LA MAQUINARIA ROTATIVA Y ELABORACIÓN DE UNA GUÍA DE PRÁCTICA SOBRE DETECCIÓN DE FALLOS POR MEDIO DEL AFCM", realizado por David Esteban Chingal Imaicela, obteniendo el Proyecto Técnico, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, junio del 2018

Ing. René Vinicio Sánchez, Ph.D. . CI.: 0103409587

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, David Esteban Chingal Imaicela con C.I.: 1714596564 autor del trabajo de titulación "ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE CORRIENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN COMBINANDO FALLOS EN LA MAQUINARIA ROTATIVA Y ELABORACIÓN DE UNA GUÍA DE PRÁCTICA SOBRE DETECCIÓN DE FALLOS POR MEDIO DEL AFCM" certifico que el total contenido del proyecto técnico, es de mí exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, junio del 2018

David Esteban Chingal Imaicela C.I.: 1714596564

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mis padres José y Narcisa por apoyarme durante todo mi trayecto estudiantil y de vida, logrando conseguir todas las metas que me he propuesto.

A mi hermana Irene, por estar conmigo y apoyarme siempre.

Y a todas aquellas personas cercanas que siempre confiaron en mí.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, José y Narcisa quienes a lo largo de toda mi vida han apoyado y motivado mi formación académica, creyeron en mí en todo momento y no dudaron de mis habilidades. Mi hermana Irene por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me ha ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

A mi director de proyecto, Ing. Vinicio Sánchez, a los miembros del GIDTEC, Mariela Cerrada, Diego Cabrera, Christian Ortiz, Pablo Lucero, Jean Carlo Macancela, Édison Pacheco, Andrés Vacacela, Cristian Torres, Franco Cajas, Juan Carlos Calderón y Felipe Montalván; quienes a lo largo de este tiempo siempre me colaboraron para el éxito de este proyecto. A los laboratoristas Carlos y Mauricio que siempre me ayudaron a resolver cualquier inconveniente durante el desarrollo del proyecto, brindando su amistad y conocimientos.

A Adriana, por su paciencia y comprensión durante este largo proceso siendo mi mejor amiga, mi consejera, guiándome siempre a seguir adelante y no bajar los brazos en los momentos difíciles.

A mis amigos Adrián, Gabriel, Franklin, Hugo y Edgar. Por haberme brindado su amistad, colaboración y sabiduría en toda mi vida estudiantil sin el cual no hubiera podido salir adelante.

RESUMEN

En el presente proyecto técnico con título adquisición de señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en la maquinaria rotativa y elaboración de una guía de práctica sobre detección de fallos por medio del AFCM, se sitúa en el ámbito del mantenimiento basado en la condición la cual se llevó a cabo la adquisición de señales de corriente eléctrica del motor de inducción acoplado a una caja de engranajes, simulando fallos en engranes rectos; esto con la finalidad de brindar un aporte en el estudio de detección de fallos en engranes mediante señales de corriente eléctrica.

El capítulo 1 contiene la introducción del proyecto técnico, el planteamiento del problema y los objetivos establecidos.

El capítulo 2 contiene el marco teórico donde se establece el concepto de mantenimiento basado en la condición, monitoreo de condición, técnicas de monitoreo de vibraciones, emisiones acústicas y corriente eléctrica. Se realiza una revisión bibliográfica sobre la utilización de la técnica de señales de corriente eléctrica en la detección de fallos en motores eléctricos y en engranes, con sus ventajas y limitaciones del uso de las señales de corriente, además se analizan los fallos más comunes que pueden existir en los engranes con el fin de ser aplicados a este proyecto.

El capítulo 3 presenta la experimentación del proyecto donde se detalla la construcción de fallos en engranes rectos los cuales se acoplarán a la caja de engranajes para la adquisición de señales de corriente eléctrica. También se detalla el montaje de línea base y el plan experimental a utilizar para la adquisición de las señales de corriente con los fallos de picadura y rotura de diente.

En el capítulo 4 se presenta la elaboración y validación de una guía de práctica que es parte de los resultados del proyecto; en donde se expone el uso de las señales de corriente para detectar fallos en engranes. La evaluación de la guía de práctica se realizó con los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica logrando establecer un material de apoyo para el mejor entendimiento de estos temas afines al mantenimiento en estudiantes de pregrado.

ABSTRACT

In the present technical project entitled acquisition of current signals of the induction motor combining faults in rotary machinery and elaboration of a practice guide on faults detection using MCSA, is in the area of condition-based maintenance which involved the acquisition of electrical current signals from the induction motor coupled to a gearbox, simulating spur gear faults; this with the purpose of providing a contribution in the study of the detection of gear faults using of electrical current signals.

Chapter 1 contains the introduction of the technical project, the approach to the problem and the objectives established.

Chapter 2 contains the theoretical framework where the concept of condition-based maintenance, vibration monitoring techniques, acoustic emissions and electrical current is established. A bibliographical review of the use of the electrical current signal technique in the detection of faults in gears and electric motors is carried out, with its advantages and limitations, also the most common gear faults that may exist are analysed in order to be applied to this project.

Chapter 3 presents the experimentation of the project where the construction of faults in spur gears is detailed, which will be coupled to the gearbox for the acquisition of electrical current signals. Also detailed is the baseline assembly and the experimental plan to be used for the acquisition of current signals with pitting faults and tooth breakage.

Chapter 4 presents the development and validation of a practice guide which is part of the project results; where the use of current signals to detect faults in gears is explained. The evaluation of the practice guide was carried out with the students of the Mechanical Engineering degree course in order to establish a support material for a better understanding of these subjects related to maintenance in undergraduate students.

ÍNDICE

Cesión de derechos de autor	II
Certificación	III
Declaratoria de responsabilidad	IV
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
f., J'	
indice	IA
Indice de figuras	XII
Índice de tablas	XIV
1 Capítulo 1 - Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.1.1 Antecedentes	1
1.1.2 Importancia y alcances	2
1.1.3 Delimitación	2
1.2 Objetivos	
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
2 Capítulo 2 - Marco teórico	4
2.1 Mantenimiento basado en la condición	4
2.2 Monitoreo de la condición	5
2.3 Monitoreo de las vibraciones	5
2.4 Monitoreo de las emisiones acústicas	6
2.5 Monitoreo de la corriente eléctrica del motor	6
2.5.1 Corriente eléctrica	8
2.5.1.1 Corriente directa o continua	8

2.J.1.2 CO	rriente alterna	9
2.5.2 Moto	r de inducción	9
2.5.2.1 Mo	tor de inducción, jaula de ardilla	10
2.5.2.2 Vel	locidad y deslizamiento	11
2.5.2.3 Pot	tencia y factor de potencia	12
2.5.2.4 To	rque y rendimiento	14
2.5.2.5 To	rque y corriente	14
2.5.3 Fallos	s de barra rota del rotor	18
2.5.4 Fallos	s de excentricidad en el entrehierro	18
2.5.5 Fallos	s en rodamientos	19
2.5.6 Fallos	s en engranes	20
2.5.7 Histo	ria del uso de señales de corriente para detectar fallos en sistemas	
mecánicos		22
2.5.8 Norm	nas para el análisis de la firma de corriente	25
2.5.9 Equip	oo de adquisición	26
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser	bo de adquisición nsores para la medición de corriente eléctrica	26 27
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1.1	po de adquisición nsores para la medición de corriente eléctrica Resistencia de derivación (<i>Shunt</i>)	26 27 27
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1.1 2.5.9.1.2	po de adquisición nsores para la medición de corriente eléctrica Resistencia de derivación (<i>Shunt</i>) Transformador de corriente	26 27 27 27
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1.1 2.5.9.1.2 2.5.9.1.3	bo de adquisición nsores para la medición de corriente eléctrica Resistencia de derivación (<i>Shunt</i>) Transformador de corriente Bobina Rogowski	26 27 27 27 27 28
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1.1 2.5.9.1.2 2.5.9.1.3 2.5.9.1.4	po de adquisición nsores para la medición de corriente eléctrica Resistencia de derivación (<i>Shunt</i>) Transformador de corriente Bobina Rogowski Sensor de efecto Hall	26 27 27 27 27 28 29
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1.1 2.5.9.1.2 2.5.9.1.3 2.5.9.1.4 2.5.9.2 Pin	po de adquisición nsores para la medición de corriente eléctrica Resistencia de derivación (<i>Shunt</i>) Transformador de corriente Bobina Rogowski Sensor de efecto Hall za amperimétrica	26 27 27 27 28 29 31
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1.1 2.5.9.1.2 2.5.9.1.3 2.5.9.1.4 2.5.9.2 Pin 2.5.9.3 Tra	po de adquisición nsores para la medición de corriente eléctrica Resistencia de derivación (<i>Shunt</i>) Transformador de corriente Bobina Rogowski Sensor de efecto Hall za amperimétrica	26 27 27 27 28 29 31 31
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1.1 2.5.9.1.2 2.5.9.1.3 2.5.9.1.4 2.5.9.2 Pin 2.5.9.3 Tra 2.5.9.4 Tar	po de adquisición nsores para la medición de corriente eléctrica Resistencia de derivación (<i>Shunt</i>) Transformador de corriente Bobina Rogowski Sensor de efecto Hall za amperimétrica insductor de corriente	26 27 27 27 28 29 31 31
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1.1 2.5.9.1.2 2.5.9.1.3 2.5.9.1.4 2.5.9.2 Pin 2.5.9.3 Tra 2.5.9.4 Tar 2.5.9.5 Cha	oo de adquisición noores para la medición de corriente eléctrica Resistencia de derivación (<i>Shunt</i>) Transformador de corriente Bobina Rogowski Sensor de efecto Hall za amperimétrica insductor de corriente ijeta NI 9234	26 27 27 27 28 29 31 31 31 32 33
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1.1 2.5.9.1.2 2.5.9.1.3 2.5.9.1.4 2.5.9.2 Pin 2.5.9.3 Tra 2.5.9.4 Tar 2.5.9.5 Cha 2.6 Fallos en e	po de adquisición noores para la medición de corriente eléctrica Resistencia de derivación (<i>Shunt</i>) Transformador de corriente Bobina Rogowski Sensor de efecto Hall za amperimétrica insductor de corriente ejeta NI 9234	26 27 27 27 28 29 31 31 31 31 32 33
2.5.9 Equip 2.5.9.1 Ser 2.5.9.1.1 2.5.9.1.2 2.5.9.1.3 2.5.9.1.4 2.5.9.2 Pin 2.5.9.3 Tra 2.5.9.4 Tar 2.5.9.5 Cha 2.6 Fallos en e 2.6.1 Fallo	bo de adquisición asores para la medición de corriente eléctrica	26 27 27 27 28 29 31 31 31 31 31 32 33 34 34

	2.6.1.2	2 Revisión bibliográfica de construcción de fallos de rotura de diente	
	2.6.2	Fallos de picadura en el diente de engrane	40
	2.6.2.1	Características del fallo por picadura en el diente de engrane	42
	2.6.2.2	2 Revisión bibliográfica de la construcción de fallos por picadura	45
	2.7 Apl	icaciones de la técnica AFCM en detección de fallos	47
	2.8 Ver	itajas y limitaciones	
3	Capítulo	3 - Experimentación	
	3.1 Exp	perimentación del fallo por rotura de diente en el engrane	48
	3.1.1	Niveles de severidad de rotura de diente en el engrane	
	3.1.2	Fallos propuestos para rotura de diente en el engrane	54
	3.2 Exp	perimentación de fallos por picadura de diente en engrane	57
	3.2.1	Niveles de severidad de fallo por picaduras de diente en engrane	57
	3.2.2	Fallos propuestos para picadura de diente en el engrane	61
	3.3 Mo	ntaje de línea base	63
	3.3.1	Banco de vibraciones	63
	3.3.2	Montaje de elementos mecánicos y sensores	64
	3.3.3	Validación de línea base	64
	3.3.3.1	Verificación visual	65
	3.3.3.2	2 Verificación de ruidos extraños	65
	3.3.3.3	B Verificación de frecuencias características	65
	3.3.4	Establecimiento de la línea base	68
	3.3.4.1	Plan experimental	68
	3.3.5	Resultado de la línea base	70
4	Capítulo	- 4 Guía de práctica	73
	4.1 Ela	poración de guía de práctica sobre la técnica del AFCM	73
	4.2 Vali	dación de guía de práctica sobre la técnica del AFCM	74
	4.2.1	Calificación de guía sobre la técnica del AFCM	74
	4.2.2	Resultados de la guía de práctica	75

Conclusiones	76
Recomendaciones	77
Trabajos futuros	77
Referencias bibliográficas	78
Anexos	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pasos del mantenimiento basado en la condición [5]	.4
Figura 2. Clasificación de los motores eléctricos	.7
Figura 3. Movimiento de los electrones a través del conductor [21]	8
Figura 4. Gráfico de la corriente directa	8
Figura 5. Gráfico de la corriente alterna.	9
Figura 6. a) rotor, b) estator [19]1	.0
Figura 7. Rotor jaula de ardilla [24]1	.0
Figura 8. Entrehierro es el espacio existente entre el estator y rotor1	. 1
Figura 9. Devanados desfasados a 120°1	. 1
Figura 10. Triángulo de potencias de un sistema trifásico1	2
Figura 11. Diagrama vectorial de todas las componentes de corriente en el motor de	
inducción [19]1	.6
Figura 12. Onda sinusoidal pura de un motor1	.7
Figura 13. Onda sinusoidal con torque y carga en el motor1	7
Figura 14. Excentricidad estática y dinámica [30]1	.9
Figura 15. Dimensiones del rodamiento [30]2	20
Figura 16. Espectro de frecuencia con bandas laterales alrededor de la frecuencia de	
alimentación del estator [35]2	21
Figura 17. Línea de tiempo del AFCM2	24
Figura 18. Proceso de adquisición de datos de la señal de corriente2	26
Figura 19. Resistencia Shunt para medir corriente2	27
Figura 20. Funcionamiento del transformador de corriente [60]2	28

Figura 22. Circuito integrador conectado a la bobina Rogowski	29
Figura 23. Circuito de efecto Hall [19]	29
Figura 24. Pinza amperimétrica de efecto Hall [64]	
Figura 25. Transductor de corriente	
Figura 26. Módulo de entrada de sonido y vibración NI 9234 [66]	
Figura 27. Chasis NI cDAQ-9188 [67].	
Figura 28. Clasificación del fallo rotura de diente según la norma ISO 10825	35
Figura 29. Rotura de diente por fatiga [72]	35
Figura 30. Fallo de rotura de diente	
Figura 31. Clasificación del fallo picadura de diente según la norma ISO 10825	40
Figura 32. Picadura inicial [83]	41
Figura 33. Picadura destructiva o progresiva [84]	41
Figura 34. Macro picadura [85]	42
Figura 35. Etapa avanzada del fallo por picadura	43
Figura 36. Evolución del fallo por diente roto	54
Figura 37. Relación entre los agujeros de la picadura y el ancho de cara del diente	57
Figura 38. Altura activa del diente del engrane	58
Figura 39. Área de picadura en un diente de engrane	59
Figura 40. Evolución del fallo por picadura	61
Figura 41. Banco de vibraciones [2]	64
Figura 42. Proceso para el montaje de elementos mecánicos y los sensores [2]	64
Figura 43. Espectro de corriente de las frecuencias de giro en la parte superior y en l	a parte
inferior la del piñón	67
Figura 44. Espectro de vibración del piñón	68
Figura 45. Montaje esquemático de la caja de engranajes con sus respectivos sensore	s69
Figura 46. Espectros de corriente de 0 a 100 Hz de las severidades de fallos por rotu	ıra de
diente	70
Figura 47. Espectros de corriente de 0 a 100 Hz de las severidades de fallos por pica	dura71
Figura 48. Espectros de corriente de 100 a 300 Hz de las severidades de fallos por re	otura de
diente	72
Figura 49. Espectro de corriente de 100 a 300 Hz de las severidades de fallos por pie	adura.72
Figura 50. Diagrama de flujo para establecer una guía de práctica [2]	73

Figura 51. Posición de engranes	
Figura 52. Principales elementos de la caja de engranajes	
Figura 53. Disposición de engranes para guía de práctica	
Figura 54. Fallo por rotura de diente en engrane	
Figura 55. Proceso para la adquisición de las señales de corriente de los engranes	89
Figura 56. Sistema de transmisión de carga al sistema de caja de engranajes	90
Figura 57. Pinza amperimétrica de efecto Hall	90
Figura 58. Pinza amperimétrica colocada alrededor del conductor	91
Figura 59. Cable de salida de las pinzas conectadas al módulo y a su vez al chasis	91
Figura 60. Programa de procesamiento de datos	92
Figura 61. Sistema de transmisión de carga al sistema de caja de engranajes	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de sensores de corriente [65].	
Tabla 2. Características técnicas de la pinza amperimétrica	
Tabla 3. Características técnicas del transductor de corriente	
Tabla 4. Características técnicas de la tarjeta NI 9234	
Tabla 5. Características técnicas del chasis NI cDAQ-9188	
Tabla 6. Características de un engrane con fallo de diente roto	
Tabla 7. Niveles de severidad de rotura en el engrane	
Tabla 8. Construcción de fallos por rotura de diente	
Tabla 9. Características de un engrane con fallo de picadura	
Tabla 10.Niveles de severidad de picadura en el engrane	44
Tabla 11. Construcción de fallos por picadura en engrane	45
Tabla 12. Características geométricas del engrane	
Tabla 13. Niveles de severidad para rotura de diente en engrane	54
Tabla 14. Fallos propuestos para rotura de diente en el engrane	55
Tabla 15. Característica geométrica del engrane	57
Tabla 16. Niveles de severidad para cada engrane con fallo por picadura	60
Tabla 17. Fallos propuestos para picadura en el engrane	61
Tabla 18. Resultados obtenidos	67
Tabla 19. Tabla de equipos, instrumentos y software	

Tabla 20. Características técnicas de los engranes	89
Tabla 21. Combinación de fallos usados en la caja de engranajes	89
Tabla 22. Parámetros de pruebas	91
Tabla 23. Valores de las bandas laterales de las frecuencias características de giro y engran	iaje.
	93
Tabla 24. Gráfica del espectro del engrane en buenas condiciones	94
Tabla 25. Gráfica del engrane con fallo de rotura de diente al 100%	96

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

En el presente la competencia en las industrias es cada vez mayor, esto ha obligado a las empresas a reducir los costos y mejorar la calidad de sus servicios o productos. La maquinaria rotativa que generalmente trabaja las 24 horas puede fallar causando pérdidas económicas para la empresa [1].

Los sistemas mecánicos funcionando las 24 horas necesitan técnicas de mantenimiento para la detección a tiempo de un fallo no programado. La palabra "fallo" se establece cuando un elemento mecánico esta con defectos, pero la máquina opera normalmente y "falla" es cuando el elemento mecánico ha dejado de funcionar [2].

Los fallos en sistemas mecánicos pueden ser determinados por medio de un monitoreo de la condición, los métodos de monitoreo más empleados son: mediciones mecánicas, medición de magnitudes, mediciones eléctricas, ensayos no destructivos y tribológicos [1].

En el presente proyecto técnico se establece el monitoreo de condición por el método de mediciones eléctricas, también conocido como el análisis de firma de corriente del motor (AFCM), con el objetivo de establecer una base de datos de señales de corriente para la detección de fallos de picadura (*pitting*) y diente roto (*tooth breakage*) en los engranes.

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Antecedentes

Desde los años ochenta las señales de corriente son utilizadas en el diagnóstico de fallos en el motor eléctrico, diagnosticando fallos en barras rotas, cortocircuito del estator y excentricidad de rotor. Desde los años noventa se amplió el diagnóstico de fallos en sistemas mecánicos hasta la presente fecha.

Los ingenieros del Laboratorio Nacional Oak Ridge (ORNL), usaron las señales de corriente para el diagnóstico de fallos en sistemas mecánicos proporcionando un medio mejorado para determinar el estado de las válvulas accionadas por motor (MOVs) ampliamente utilizadas como válvulas de aislamiento o control en sistemas de seguridad de centrales nucleares [3].

Actualmente la Universidad Politécnica Salesiana cuenta con un laboratorio de análisis de vibraciones, donde el Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC) ha realizado estudios sobre mantenimiento basado en la condición.

1.1.2 Importancia y alcances

Para conocer el estado de la maquinaria se realiza el mantenimiento basado en la condición, ya que con esta técnica se puede recomendar acciones preventivas, usando información recogida a través de monitoreo de la condición [4]. A nivel industrial es conocido que al aplicarse estas técnicas de monitoreo continuo se reduce las paradas no programadas, manteniendo la maquinaria operando y teniendo una mayor eficacia en la producción [5]. Al tratarse de sistemas cerrados y de difícil acceso a la maquinaria rotativa se establece como metodología para la detección fallos.

El presente trabajo contribuye una metodología en el mantenimiento basado en la condición para la detección de fallos, el cual permite realizar un aporte científico e industrial proyectando dicho estudio para futuros proyectos de investigación en esta área; además se requiere implementar una guía de práctica usando señales de corriente para la detección de fallos en los engranes.

La Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, tiene a disposición el laboratorio de vibraciones con el cual se realiza el análisis de señales para el monitoreo de la condición; además, brinda los recursos necesarios para simular diferentes fallos que se pueden presentar en la maquinaria rotativa, aportando conocimientos en el mantenimiento basado en la condición, los cuales son aplicados en las industrias [2], [6].

1.1.3 Delimitación

El laboratorio de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, permite realizar diferentes configuraciones de maquinaria rotativa con lo cual se ha logrado realizar simulaciones de fallos lo más cercanas posibles a lo que existe hoy en día dentro de las industrias. Con la utilización del banco de pruebas y la configuración de los sistemas planteados en este proyecto para la adquisición de señales de corriente se pretende proporcionar información valiosa, confiable y estructurada que sirva en el campo de la investigación. El Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC), se encargará de dicho análisis y para la realización de futuros proyectos de investigación con miras hacia industrias que deseen implementar un mantenimiento basado en la condición.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Establecer una base de datos de señales de corriente en el motor de inducción, para la detección de fallos de engranajes por medio del análisis de firma de corriente del motor (AFCM).

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar mediante revisión bibliográfica, las técnicas de mantenimiento basado en la condición y detección de fallos en cajas de engranaje mediante el AFCM.
- Configurar la maquinaria rotativa para levantar una base de datos de los fallos en engranajes con las señales de corriente en el motor de inducción.
- Adquirir datos de señales corriente y compararlos con las señales vibracionales.
- Elaborar una guía de práctica para la detección de fallos en engranajes mediante el AFCM.

CAPÍTULO 2 - MARCO TEÓRICO

2.1 Mantenimiento basado en la condición

El Mantenimiento Basado en la Condición (MBC) es utilizado para prolongar el funcionamiento de la maquinaria recomendando acciones de mantenimiento basadas en la información recolectada a través del monitoreo de condición. Un programa de mantenimiento basado en la condición aumenta la productividad y reduce el costo de mantenimiento [5].

Kim [7] establece: "Las ventajas del MBC incluyen previo aviso del fallo inminente y mayor precisión en la predicción del fallo. También ayuda en los procedimientos de diagnóstico, ya que es relativamente fácil de asociar el fracaso para componentes específicos a través de los parámetros supervisados".

Existe tres etapas fundamentales en el programa de mantenimiento basado en la condición, las cuales se muestra en la Figura 1 [4], [7], [8].



Figura 1. Pasos del mantenimiento basado en la condición [5].

En la Figura 1 se observa el proceso para realizar el mantenimiento basado en la condición los cuales son: Adquisición de datos, procesamiento de datos, toma de decisiones para acciones de mantenimiento basadas en resultados de diagnóstico o pronóstico. Estas etapas se deben cumplir para realizar una correcta detección de fallos en la maquinaria según su condición [5]. La toma de decisiones se hará relacionando a dos posibles variantes para analizar los equipos, diagnóstico y/o pronóstico de fallos. "El diagnóstico es el análisis posterior de eventos y el

pronóstico es un análisis anterior al evento, siendo este último el más eficiente. En un programa MBC se puede utilizar uno de ellos o ambos" [5].

La norma ISO 17359 es una excelente herramienta para el mantenimiento basado en la condición, ya que se obtiene información detallada de la maquinaria. También proporciona datos fundamentales de criticidad del equipo, como para saber si la maquina necesita este tipo de mantenimiento [2].

2.2 Monitoreo de la condición

El monitoreo de la condición (MC) se puede definir como un medio para determinar la condición de la máquina y prevenir una falla de la misma sugiriendo acciones de mantenimiento. El MC consiste en recopilar datos del sistema a través de diversos sensores y luego procesar los datos para obtener información significativa; diversas técnicas de monitoreo de la condición se pueden utilizar para detectar condiciones de fallo e incluso identificar que componente tiene el fallo en la máquina, el monitoreo de la condición es un medio para implementar el MBC [4].

2.3 Monitoreo de las vibraciones

La técnica de monitoreo de vibraciones es la técnica de MC más utilizada en la industria, puede identificar con exactitud alrededor del 90 % de todos los fallos de maquinaria rotativa por el cambio en las señales de vibración, de manera que se pueda tomar la acción de mantenimiento lo antes posible para prolongar la vida de la máquina [9].

La norma ISO 2041:1990 dice que, "vibración es toda variación en el tiempo de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia" [10].

El monitoreo de vibraciones es la técnica de MC más empleada para el diagnóstico de fallos en cajas de engranajes [11], [12]. Las razones principales por lo que se usa el monitoreo de las vibraciones en cajas de engranajes son [11], [13], [14]:

- Las cajas de engranajes presentan patrones de la señal de vibración que caracterizan el estado o condición de las mismas, estos patrones se denominan firma, por lo que una modificación en la misma puede reflejar síntomas de fallo.
- 2. El desarrollo de sistemas comerciales confiables como analizadores y medidores de vibración portátiles.
- Las aplicaciones de computación han facilitado el desarrollo de métodos avanzados de procesamiento de señales y técnicas de reconocimiento de patrones.

2.4 Monitoreo de las emisiones acústicas

Las emisiones acústicas (EA) se refieren a la generación de ondas elásticas transitorias producidas por una redistribución repentina de la tensión en un material. Cuando una estructura está sometida a un estímulo externo (cambio de presión, carga o temperatura), las fuentes localizadas desencadenan la liberación de energía, en forma de ondas de tensión, que se propagan a la superficie y son registradas por sensores. Este fenómeno mecánico se presenta en periodos de tiempo entre microsegundo a milisegundos [2], [15], [16].

En el MC de maquinaria rotativa, las EA se definen como ondas elásticas transitorias generadas por la interacción de dos superficies en movimiento relativo; las causas de las EA en maquinaria rotativa se deben a impactos, fatiga cíclica, fugas, fricción, pérdida de material, entre otras [17]. En la maquinaria rotativa, los procesos relacionados con la fricción son los principales factores de las EA. La fricción está acompañada de factores como: calor, eléctricos, corrosión, magnéticos, y electromagnéticos; todos estos factores son el resultado de procesos rápidos que se producen en la fricción [18].

La técnica de monitoreo de emisiones acústicas es la técnica de MC utilizada para la detección de fallos incipientes y con el uso de un solo sensor puesto que es una técnica no direccional [2].

2.5 Monitoreo de la corriente eléctrica del motor

Los motores eléctricos se utilizan como generadores de movimiento en más del 90 % de los sistemas mecánicos de las industrias. Estos sistemas mecánicos son en su mayoría cajas de engranajes, ventiladores, compresores y bombas [19] [20].

Existen varios tipos de motores eléctricos como se muestra en la Figura 2 y se clasifican de acuerdo al tipo de corriente utilizada para su alimentación [21].



Figura 2. Clasificación de los motores eléctricos.

Los motores de corriente continua y los motores síncronos de corriente alterna tienen utilizaciones y aplicaciones muy específicas tales como control de la velocidad y proporcionar alto par a bajas velocidades [21]. El motor asincrónico de jaula de ardilla ofrece fácil manejo de transmisión y distribución, por lo que es el más utilizado en ámbitos industriales.

Los fallos en los motores de trifásicos, así como en los sistemas mecánicos pueden detectarse mediante la monitorización de vibraciones. Los niveles de vibración pueden medirse para evaluar el estado de condición de la maquinaria rotativa en función de la norma ISO 10816 [19].

Otra técnica para detectar el estado de los motores de trifásicos es el Análisis de la Firma de Corriente del Motor (AFCM). Una vez capturada la forma de onda de la corriente en el tiempo, se puede analizar en el dominio de la frecuencia o el dominio tiempo-frecuencia. Los fallos como la excentricidad del rotor, la rotura del rotor y el fallo del cojinete del motor, pueden identificarse fácilmente en el dominio de la frecuencia por sus frecuencias características [19] [20]. La corriente en la bobina del estator será así modulada y se observaran bandas laterales, alrededor de la frecuencia de alimentación, espaciadas en las frecuencias de defecto mecánico.

2.5.1 Corriente eléctrica

La corriente eléctrica (I) en un conductor se define como la circulación de cargas o electrones a través de un conductor, que se mueven siempre del polo negativo al polo positivo de la fuente de fuerza electromotriz (FEM) como se observa en la Figura 3. La corriente eléctrica produce un campo magnético debido al movimiento de los electrones [22].



Figura 3. Movimiento de los electrones a través del conductor [22].

2.5.1.1 Corriente directa o continua

La corriente directa (C.D.) o continua (C.C.), es la corriente eléctrica que circula en un solo sentido, es decir, del polo negativo al positivo de la fuente de fuerza electromotriz (FEM) que la suministra [22]. Esta corriente mantiene siempre fija su polaridad, como es el caso de las pilas y baterías. La forma gráfica de la corriente directa o continua se muestra en la Figura 4.



2.5.1.2 Corriente alterna

La corriente alterna (C.A.), es un tipo de corriente eléctrica, en la que la dirección del flujo de electrones va y viene a intervalos regulares o en ciclos [23]. Esto ocurre tantas veces como frecuencia en Hertz (Hz) tenga esa corriente. La forma gráfica de la corriente alterna es una onda senoidal como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Gráfico de la corriente alterna.

Dónde:

Amplitud: Es el máximo valor que toma la corriente eléctrica.

Período: Es el tiempo en segundos durante el cual se repite el valor de la corriente. El período es lo inverso de la frecuencia y su expresión matemática se presenta en la ecuación 1.

$$F = \frac{1}{T} (Hz)$$
 (1)

2.5.2 Motor de inducción

Los motores de inducción fueron inventados por Nikola Tesla y Galileo Ferrari en 1888 y su principio de funcionamiento es por inducción electromagnética transfiriendo energía de la parte estacionaria a la parte rotatoria [24]. Cuando se aplica una corriente alterna a la parte estacionaria, esta produce un campo magnético rotatorio e induce corriente y una fuerza electromotriz en las bobinas de la parte rotatoria de tal forma que este empieza a girar [24].

2.5.2.1 Motor de inducción, jaula de ardilla

El motor de inducción jaula de ardilla es el más usado de todos los motores eléctricos, por su forma constructiva. Están formados por una parte estacionaria denominado estator y una parte rotatoria denominado rotor como se muestra en la Figura 6. Se le denomina jaula de ardilla porque los conductores están distribuidos por el contorno del rotor, sus extremos están cortocircuitados en forma de jaula por lo que se le conoce como jaula de ardilla como se presenta en la Figura 7 [25].



Figura 6. a) rotor, b) estator [19].



Figura 7. Rotor jaula de ardilla [25].

El rotor se encaja en el interior del estator, y para que pueda rotar independientemente debe existir una separación del estator al rotor llamado entrehierro como se presenta en la Figura 8. El principio fundamental de este motor es la creación de un campo magnético giratorio y sinusoidalmente distribuido en el entrehierro.



Figura 8. Entrehierro es el espacio existente entre el estator y rotor.

El campo magnético giratorio se genera con tres devanados desfasados a 120° y conectados a un sistema trifásico como se observa en la Figura 9. La rotación se presenta por un sistema de polos norte y sur de acuerdo a la ley de Lenz que establece " La corriente inducida en una espira está en la dirección que crea un campo magnético que se opone al cambio en el flujo magnético en el área encerrada por la espira" [26]. Así, el polo norte del rotor al estar frente a un devanado del estator ejerce repulsión sobre el rotor lo que provoca el movimiento en el motor.



Figura 9. Devanados desfasados a 120°.

2.5.2.2 Velocidad y deslizamiento

El rotor de los motores de inducción gira a una velocidad menor que la de sincronismo, por lo que se le conoce como motor asincrónico. En este caso la velocidad síncrona es la velocidad del campo giratorio generado por el estator y se calcula con la ecuación 2. [27].

$$N_{s} = \frac{120f_{e}}{P} (rpm)$$
(2)

Donde f_e es la frecuencia de la línea, y P, el número de polos.

El deslizamiento (s) se define como la diferencia entre la velocidad síncrona (Ns) y la velocidad del rotor (Nr). Se expresa por medio de la ecuación 3. [27].

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} 100\%$$
 (3)

Con el deslizamiento calculado se puede encontrar la frecuencia a la que están sometidos los conductores del rotor aplicando la ecuación 4.

$$fr = sfe$$
 (4)

Donde fr es la frecuencia de rotor.

2.5.2.3 Potencia y factor de potencia

En un sistema trifásico, para calcular la potencia de cada fase se deduce por el triángulo de potencias como se observa en la Figura 10. Para una conexión trifásica en estrella (Y) se tiene [27]:



P: Potencia Activa (W)

Figura 10. Triángulo de potencias de un sistema trifásico.

 Potencia real o activa (P): Es aquella potencia disponible para realizar un trabajo. Se mide en Vatio (W) o Caballos de fuerza (HP) y se calcula con la siguiente ecuación 5 [27]:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \tag{5}$$

2. Potencia reactiva (Q): Es aquella potencia que regresa a la línea. Se mide en Voltamperios reactivos (VAR) y se calcula con la siguiente ecuación 6 [27]:

$$Q = \sqrt{3} V_L I_L \operatorname{sen} \varphi \tag{6}$$

3. Potencia aparente (S): Es el producto entre el voltaje de línea y la corriente de línea. Se mide en Voltamperio (VA) y se calcula con la siguiente ecuación 7 [27]:

$$S = \sqrt{3} V_L I_L \tag{7}$$

Donde V_L y I_L son voltaje de línea y corriente de línea respectivamente. Se calcula con las siguientes ecuaciones 8 y 9 [27]:

$$V_L = \sqrt{3} V_F \tag{8}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_F \tag{9}$$

Donde V_F y I_F son voltaje y corriente de fase.

Para una conexión trifásica en triangulo (Δ) se define como [27]:

$V_L = V_F$	(10)
$I_{\rm L} = I_{\rm F}$	(11)

Algunos motores trifásicos trabajan en dos tensiones, 690 y 400 voltios. En este caso la conexión del motor será diferente en función de la tensión que se utilice. Para una tensión alta se usa la conexión en estrella y para una tensión baja se usa la conexión en triángulo.

4. Factor de potencia (cosφ): El factor de potencia mide la relación de cuanta potencia aparente es transformada en potencia real [24]. La potencia aparente (S) es potencia real o activa (P) y puede variar desde 1 cuando el ángulo de fase φ es 0°, a 0 cuando el

ángulo de fase φ es 90°. Este dato está indicado en las placas de los motores de inducción [27].

2.5.2.4 Torque y rendimiento

El rendimiento es la eficiencia de la conversión de la energía eléctrica absorbida de la red por el motor, en energía mecánica disponible en el eje del motor. Llamando Potencia útil (P_u) a la potencia mecánica disponible en el eje y Potencia absorbida (P_a) a la potencia eléctrica que el motor retira de la red, el rendimiento será la relación entre las dos, como se presenta en la ecuación 12 [27] :

$$\eta = \frac{P_{u}}{P_{a}} = \frac{P_{u}}{\sqrt{3} V_{L} I_{L} \cos \phi} \ 100\%$$
(12)

La potencia útil (Pu)en el eje se obtiene directamente de la placa de características del motor.

2.5.2.5 Torque y corriente

Cuando un motor de inducción acciona un sistema mecánico, el eje de entrada del sistema mecánico se acopla rígidamente al rotor del motor de inducción. En tal caso, el torque de carga en el rotor será una función de la velocidad del eje de entrada y sus frecuencias moduladas, que afectarán al campo electromagnético del estator. El estator absorberá la corriente de acuerdo con la variación del campo electromagnético [28].

Los autores Xu *et al.* [29] desarrollaron una ecuación para calcular el torque del entrehierro de un motor de inducción y se presenta en la ecuación 13.

$$T = \frac{3 P_p}{2} \lambda_s i_{sT}$$
(13)

Donde:

P_p: número de par de polos

 λ_s : amplitud de enlace del flujo del estator

 i_{sT} : componente de la corriente del estator en la dirección 90 grados por delante del vector de flujo. i_{sT} se denomina componente del torque motor.

En un motor trifásico, el enlace de flujo del estator λ_s tiene una magnitud constante y gira a $2\pi f$ rad/s, donde f es la frecuencia de la alimentación eléctrica. Para calcular λ_s los autores Xu *et al.* presentan la ecuación 14.

$$\lambda_{s} = (L_{s} i_{sM}) + (\sigma T_{r} L_{s} \frac{d}{dt} i_{sM}) - (w_{s} T_{r} L_{s} i_{sT})$$
(14)

Donde:

i_{sM}: componente de corriente magnética, que está en fase con el vector de flujo

ws: velocidad angular de deslizamiento

L_s: inductancia total del estator

T_r: constante de tiempo del rotor

 σ : factor de fuga total del motor de inducción

Las ecuaciones 13 y 14 establecen la relación entre las variables mecánicas y eléctricas. En presencia de la vibración torsional a la frecuencia (f_0) el torque del entrehierro (T) del motor de inducción se calcula con la ecuación 15 [19].

$$T = T_0 + A_T \cos(2\pi f_0 t + \phi)$$
(15)

Donde:

T₀: torque promedio

 A_T : torque de giro en el eje de la maquinaria rotativa

fo: velocidad del eje de la maquinaria rotativa

 φ : fase respectiva de f_o

Por lo tanto, sólo los efectos de las vibraciones torsionales causadas por las frecuencias de rotación del eje son considerados en las señales de corriente. Cada corriente de fase del estator consiste en un componente de corriente magnetizante i_{sM} , que está en fase con el vector de flujo; y un componente del torque motor i_{sT} , que está 90° por delante del vector de flujo. Estos componentes están dados por las ecuación 16 y 17 [19] y se presenta en la Figura 11.

$$\mathbf{i}_{sM} = \mathbf{i}_{sM0} + \mathbf{A}_{sM} \operatorname{sen}(2\pi \mathbf{f}_0 \mathbf{t} + \boldsymbol{\varphi}_M) \tag{16}$$

$$\mathbf{i}_{sT} = \mathbf{i}_{sT0} + \mathbf{A}_{sT} \, \operatorname{sen}(2\pi f_0 \mathbf{t} + \boldsymbol{\varphi}_T) \tag{17}$$

Donde:

 i_{sM0} y i_{sT0} valor promedio de las componentes i_{sM} y i_{sT}

 A_{sM} y A_{sT} son proporcionales a A_T

 ϕ_M y ϕ_T son las fases respectivas donde se proyecta la corriente magnetizante y torque del motor.



Figura 11. Diagrama vectorial de las componentes de corriente en el motor de inducción.

La corriente del estator I_{sr} como se presenta en la Figura 11, puede ser medida cuando se proyecta sobre la corriente de fase r del motor trifásico con una frecuencia de alimentación eléctrica f. La corriente I_{sr} se puede calcular con la ecuación 18 [19], [30].

$$I_{sr} = i_{sT} \cos(2\pi ft) + i_{sM} \sin(2\pi ft)$$

Remplazando i_{sM} , i_{sT} con las ecuaciones 16 y 17 y simplificando:

$$I_{sr} = i_{s0} \operatorname{sen}(2\pi ft + \varphi_{s0}) + \frac{1}{2} \{A_{sM} \cos[2\pi (f - f_0)t - \varphi_M] + A_{sT} \cos[2\pi (f - f_0)t - \varphi_T]\} - \frac{1}{2} \{A_{sM} \cos[2\pi (f + f_0)t + \varphi_M] - A_{sT} \cos[2\pi (f + f_0)t + \varphi_T]\}$$
(18)

Donde:

 i_{s0} Es la magnitud de vector corriente de estator y se calcula con la ecuación 19.

$$i_{s0} = \sqrt{i_{sM0}^2 + i_{sT0}^2}$$
(19)

 φ_{s0} Se calcula con la ecuación 20.

$$\varphi_{s0} = \tan^{-1} \frac{\mathbf{i}_{sT0}}{\mathbf{i}_{sM0}}$$
(20)

La (18 establece que el efecto de una vibración con una frecuencia f_0 puede observarse fácilmente en la corriente de alimentación como componentes de bandas laterales de frecuencia (f+f₀) y (f-f₀) [30].

Para las corrientes I_{sy} y I_{sb} pueden ser calculadas con las ecuaciones 21 y 22.

$$I_{sy} = i_{sM} \operatorname{sen}\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sT} \cos\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right)$$
(21)

$$I_{sb} = i_{sM} \operatorname{sen}\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sT} \cos\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right)$$
(22)

Cuando no hay defectos en el motor de inducción y ningún torque de carga, la corriente dibuja una onda sinusoidal pura [19] como se presenta en la Figura 12. Pero debido a las frecuencias oscilantes i_{sM} e i_{sT} y la (18, la forma de onda de la corriente se verá afectada en cualquiera de sus fases como se presenta en la Figura 13.



Figura 12. Onda sinusoidal de un motor.



Figura 13. Onda sinusoidal con torque y carga en el motor.

En la Figura 13 se presenta que el torque ejercido en el eje del motor, induce bandas laterales a través de la frecuencia de alimentación eléctrica en la firma de corriente dibujada por un motor de inducción. Este torque dará lugar posteriormente a fluctuaciones en la velocidad, que es simplemente la vibración torsional del eje.

2.5.3 Fallos de barra rota del rotor

Cuando una barra rota está presente dentro del rotor, la corriente no puede fluir a través de él, por lo que ya no puede añadir su parte de torque a la carga del rotor. A medida que la barra rota pasa por debajo del polo, reducirá efectivamente el par del rotor durante el período de tiempo que se encuentre debajo del polo de campo, en su posición de producción de par [19]. La presencia de barras rotas rompe la simetría del rotor que se traduce en la aparición de un campo rotatorio que genera armónicos en la corriente del estator según la ecuación 23. [19].

$$f_{brb} = f\left[k\frac{1-s}{p}\pm s\right]$$
(23)

Donde:

f es la frecuencia de alimentación eléctrica del motor.

k = 1, 3, 5, 7 ... es el número de armónicos presentes en la señal de corriente.

p es el número de pares de polos del motor de inducción.

s es el deslizamiento.

2.5.4 Fallos de excentricidad en el entrehierro

La excentricidad implica un espacio desigual que existe entre el estator y rotor cuando no se garantiza una perfecta alineación de los centros del estator y el rotor. Ésta puede ser de dos tipos, estática o dinámica [19].

La excentricidad estática puede ser originada por las siguientes razones [19], [31]:

- 1. Mal alojamiento estatórico.
- 2. Mal soporte de los cojinetes, desgaste de éstos, excesiva tolerancia.
- 3. Posicionamiento incorrecto del rotor o del estator en la fase de puesta en servicio.

La excentricidad dinámica puede ser originada por las siguientes razones [19]:

- 1. Rotor y eje no concéntricos.
- 2. Desgaste severo del rodamiento.

3. Eje del rotor doblado.

En la Figura 14 se presenta la diferencia entre excentricidad estática y dinámica.



El fallo de excentricidad dinámica es similar al de excentricidad estática. Las frecuencias debido a la excentricidad del entrehierro están dadas por la ecuación 24.

$$f_{ee} = f \left[1 \pm m \left(\frac{1-s}{p} \right) \right]$$
(24)

Donde:

f es la frecuencia de alimentación eléctrica del motor.

m = 1, 2, 3, ... es el número de armónicos presentes en la señal de corriente.

p es el número de pares de polos del motor.

s es el deslizamiento.

2.5.5 Fallos en rodamientos

El fallo en los rodamientos provoca la aparición de armónicos de frecuencia en la corriente de estator según la ecuación 25. [19].

$$f_{bng} = \left| f \pm m f_{i,o} \right| \tag{25}$$

Donde $f_{i,o}$ como se muestra en la ecuación 26, es una de las frecuencias de vibración características, basada en la dimensión y características de los rodamientos.

$$f_{i,o} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 \pm \frac{bd}{pd} \cos\beta \right]$$
(26)

Donde n_b es el número de bolas del cojinete, f_r es la velocidad mecánica de rotor en Hz, bd es el diámetro de la bola, pd el diámetro del rodamiento y β es el ángulo de contacto de las bolas tal como se presenta en la Figura 15.



Figura 15. Dimensiones del rodamiento [32].

2.5.6 Fallos en engranes

El análisis de la señal de corriente del motor es una forma indirecta de medir la vibración generada por un fallo mecánico. Si existe una condición de fallo, el par de carga variará con la posición del rotor. Las fluctuaciones de carga implican cambios de velocidad en los motores eléctricos. Como resultado de las variaciones de velocidad, se producen cambios en el deslizamiento que causan consecutivamente desplazamientos en las bandas laterales a través de la frecuencia de alimentación eléctrico se comporta como un transductor logrando detectar las frecuencias de los componentes mecánicos y convertirlas en corrientes inducidas generadas en los devanados del motor. La vibración causada por los fallos de los componentes mecánicos induce cambios en el campo magnético del estator y, como consecuencia en la inductancia del motor que puede ser calculada con la ecuación 18.

Los fallos en engranes como los dientes rotos producen una anomalía en el par de carga, el cual es detectado por el motor. Esta anomalía se transfiere a la corriente del motor desde la carga. Dependiendo de la anomalía, se pueden ver frecuencias únicas en el espectro de frecuencia actual [34]. Las oscilaciones mecánicas en la caja de engranajes cambian la excentricidad en el entrehierro, lo que resulta en cambios en la forma de onda de la corriente. En consecuencia, esto puede inducir componentes de corriente a la frecuencia de alimentación los cuales se pueden calcular con las siguientes ecuaciones [35], [36] y el espectro de frecuencia se presenta en la Figura 16:

$$|f_{Gr1} = f \pm mf_{r1}|$$
(27)

$$|\mathbf{f}_{\mathrm{Gr2}} = \mathbf{f} \pm \mathbf{n} \mathbf{f}_{\mathrm{r2}}| \tag{28}$$

$$|f_{Gr1r2} = f \pm mf_{r1} \pm nf_{r2}|$$
(29)

$$|\mathbf{f}_{\rm Gm} = \mathbf{f} \pm \mathbf{q} \mathbf{f}_{\rm m}| \tag{30}$$

$$|\mathbf{f}_{Gr1m} = \mathbf{f} \pm \mathbf{m}\mathbf{f}_{r1} \pm \mathbf{q}\mathbf{f}_{m}| \tag{31}$$

$$|\mathbf{f}_{\mathrm{Gr2m}} = \mathbf{f} \pm \mathbf{n}\mathbf{f}_{r2} \pm \mathbf{q}\mathbf{f}_{\mathrm{m}}| \tag{32}$$

$$|\mathbf{f}_{\text{Gr1r2m}} = \mathbf{f} \pm \mathbf{m} \mathbf{f}_{r1} \pm \mathbf{n} \mathbf{f}_{r2} \pm \mathbf{q} \mathbf{f}_{\text{m}}| \tag{33}$$



Figura 16. Componentes de frecuencia de corriente alrededor de la frecuencia de alimentación.

Donde:

f es la frecuencia de alimentación eléctrica del motor.

m, n, q=1, 2, 3, ... son los números de armónicos presentes en la señal de corriente.

 $f_{r1} \ y \ f_{r2}$ son las velocidades de rotación del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.
f_m es la frecuencia de engranaje (GMF).

 f_{Gr1} y f_{Gr2} son las componentes de frecuencia de giro del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.

 f_{Gr1r2} es la suma de las componentes de la frecuencia de giro del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.

 f_{Gm} es la componente de la frecuencia de engranaje (GMF).

 f_{Gr1m} y f_{Gr2m} es la suma de las componentes de la frecuencia de engranaje y frecuencia de giro de los ejes de entrada y salida de la caja de engranajes respectivamente.

 f_{Gr1r2m} es la suma total de la frecuencia de engranaje y frecuencia de giro de los ejes de entrada y salida de la caja de engranajes respectivamente.

Como se presenta en las ecuaciones anteriores, las oscilaciones mecánicas darán lugar a componentes de corriente adicionales en el espectro de frecuencias. Los ejes giratorios lentos darán lugar a componentes de corriente alrededor de los componentes de la frecuencia de alimentación de estator tal como se presenta en la Figura 16 [37].

2.5.7 Historia del uso de señales de corriente para detectar fallos en sistemas mecánicos

La técnica AFCM es simplemente el proceso por el cual las lecturas de la corriente del motor son registradas y analizadas en el dominio de la frecuencia. Ha existido desde 1982 y ha demostrado su eficacia a lo largo de los años en la localización de fallos del rotor y problemas de excentricidad en los motores [19], [36], [38]. A inicios de los años ochenta, se iniciaron simultáneamente trabajos de investigación en Estados Unidos y Europa sobre el estudio de la corriente en función de las roturas de barras en el rotor jaula de ardilla de los motores de inducción. En Estados Unidos, este trabajo fue reportado por Kliman *et al.* [39], [40] y en Europa varios investigadores reportaron este tema, incluyendo a Vas [41], Williamson [42], Filipetti *et al.* [43], Tavner [44], Hargis *et al.* [45], Deleroi [46], y Cameron *et al.* [47].

Desde los años noventa, se hace una evolución de estudios de fallos no solo en el motor de inducción, sino también en sistemas mecánicos eliminando las desventajas de los sensores de vibración, emisiones acústicas (EA) y cables de señal añadidos a la maquinaria rotativa. En 1990, el Laboratorio Nacional *Oak Ridge (ORNL)* proporciona un medio mejorado para determinar el estado de las válvulas accionadas por motor eléctrico (*MOVs*) ampliamente

utilizadas como válvulas de aislamiento o control en sistemas de seguridad de centrales nucleares [3]. En 1997, los autores Schoen *et al.* [42] detectaron los fallos en rodamientos de la maquinaria rotativa logrando ampliar el uso de la técnica de las señales de corriente en sistemas mecánicos. Desde el año 2000 en adelante existen más investigaciones del AFCM aplicados en sistemas mecánicos que fueron reportados por, Ye *et al.* [48], Kar y Mohanty [28], Tsoumas *et al.* [49], Rajagopalan *et al.* [50], Mohanty *et al.* [51], Nandy *et al.* [52], Marzebali *et al.* [53] y Cheng *et al.* [54]. En la Figura 17 se detallan los trabajos realizados en la detección de fallos en maquinaria rotativa con la técnica del AFCM, desde el inicio hasta la presente fecha.

1982	• Williamson [36]. Analizó los fallos de roturas de la barra del rotor y de los anillos finales del motor de inducción.
1982	• Hargis et al [39]. Detectaron los defectos del rotor en los motores de inducción.
1984	• Deleroi [40]. Dectectó los fallos de rotura de barras en el rotor jaula de ardilla.
1986	• Cameron <i>et al</i> [41]. Monitorearon el fallo de excentricidad del entrehierro en el motor de inducción.
1987	• Tavner [38]. Realizaron un monitoreo de condición de máquinas eléctricas.
1988	• Filipetti et al [37]. Diagnósticaron las máquinas de inducción en sistemas expertos.
1990	• Haynes y Eissenberg [3]. Diagnósticaron el fallo de válvulas que estan conectadas al motor eléctrico usadas en centrales nucleares por medio del AFCM.
1997	• Schoen et al [42]. Detectaron los fallos en rodamientos de los motores eléctricos.
2003	• Ye et al [43]. Analizaron fallos mecánicos por descomposición de paquetes de ondas.
2005	• Tsoumas <i>et al</i> [44]. Realizaron un estudio comparativo de las técnicas de análisis de firmas de corriente del motor de inducción para la detección de fallos mecánicos.
2006	• Kar y Mohanty [27]. Monitorearon las vibraciones de los engranes mediante el análisis de la firma de la corriente del motor.
2006	• Rajagopalan <i>et al</i> [45]. Detectaron los fallos en engranajes acoplados a motores eléctricos en función de la corriente/tensión.
2012	• Mohanty et al [46]. Detectaron fallos mecánicos en bombas centrífugas.
2015	• Nandy et al [47]. Diagnósticaron el flujo del líquido en bombas centrífugas.
2015	• Marzebali <i>et al</i> [48]. Analizaron los efectos de vibración por torsión de la caja de engranajes planetarios.
2016	• Cheng <i>et al</i> [49]. Detectaron fallos de la caja de engranajes usadas en turbinas eólicas.

Figura 17. Línea de tiempo del AFCM.

2.5.8 Normas para el análisis de la firma de corriente

Para un efectivo análisis de señal de corriente se requiere de diferentes normas sobre señales de corriente tanto en la parte instrumental como del motor de inducción, las cuales son:

ISO 20958:2013: Condition monitoring and diagnostics of machine systems: Electrical signature analysis of three-phase induction motors.

Establece las directrices para las técnicas en línea recomendados a los efectos de la condición de control y diagnóstico de máquinas eléctricas con base en el análisis de la firma eléctrica, es aplicable a motores de inducción trifásicos [55].

IEC 61000-4-30, Testing and Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods.

La norma IEC 61000-4-30 define los procedimientos de medida de cada uno de los parámetros eléctricos en base a los cuales se determina la calidad del suministro eléctrico para así obtener resultados fiables, repetibles y comparables [56].

ISO/IEC 17025:2005, Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensavo y de calibración.

La norma ISO/IEC 17025 es aplicada por los laboratorios de ensayo y calibración con el objetivo de demostrar que son técnicamente competentes y que sus resultados son veraces [57].

IEC 61010-031:2002, Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use.

Esta norma se ocupa de la seguridad de los conjuntos de sondas portátiles y manuales. Son para su uso en la interfaz entre un fenómeno eléctrico y los equipos de ensayo o medición [58].

IEEE Standard 519:1992

Hace referencia de los instrumentos básicos usados para la medición de tensiones y corrientes no sinusoidales, cada equipo con una descripción de la información y recopilación de datos que se pueden monitorear con cada instrumento [59].

NEMA MG1:2016

Es el estándar definitivo para la información práctica sobre rendimiento, seguridad, ensayos, construcción y fabricación de motores y generadores de corriente alterna y corriente continua. Proporciona acceso a las pruebas fundamentales, así como a los criterios dimensionales y de aplicación relativos a la maquinaria rotativa. El estándar asiste a los usuarios en la correcta selección y aplicación de motores y generadores [60].

La norma más utilizada en el análisis de firma de corriente es la ISO 20958:2013, debido a que cumple los requisitos necesarios para el monitoreo y diagnóstico de fallos en motores eléctricos.

2.5.9 Equipo de adquisición

Para la adquisición de la señal de corriente existe un procesamiento de la señal antes de ser almacenada en el ordenador, luego de lo cual se realizará una descomposición espectral basada en la transformada rápida de Fourier (*FFT*).

En la Figura 18 se muestra un proceso de adquisición y visualización de la señal de corriente en el motor de inducción.



Figura 18. Proceso de adquisición de datos de la señal de corriente.

2.5.9.1 Sensores para la medición de corriente eléctrica

Para realizar el diagnóstico mediante la técnica del AFCM es necesario medir la corriente de estator del motor. En la actualidad se tiene 4 tipos de sensores para la medición de corriente los cuales son: resistencia de derivación (*shunt*), transformadores de corriente, bobina Rogowski y sensor de efecto Hall, las cuales se explican a continuación.

2.5.9.1.1 Resistencia de derivación (Shunt)

Shunt es una resistencia relativamente pequeña la cual se utiliza para la detección indirecta de corrientes eléctricas elevadas. Cuando la corriente recorre una resistencia provoca una caída de tensión que puede medirse con un voltímetro conectado en paralelo. Con esta conexión en paralelo entre resistencia de derivación y voltímetro, se puede calcular la intensidad de corriente como se observa en la Figura 19 [61].



Figura 19. Resistencia Shunt para medir corriente.

La resistencia *Shunt* debe ser de valor muy bajo para evitar la excesiva caída tensión en él y minimizar las pérdidas por calor. El calentamiento en exceso del resistor puede modificar su resistividad y dar lugar a un error en la medida [32].

2.5.9.1.2 Transformador de corriente

El transformador de corriente es un transformador que reduce las corrientes de alto voltaje a un valor mucho menor para producir una corriente alterna en su devanado secundario que es proporcional a la corriente medida en su primario como se presenta en la Figura 20 [62].



Figura 20. Funcionamiento del transformador de corriente [62].

El transformador de corriente consta de una o muy pocas vueltas en el devanado secundario. El devanado primario puede ser de una sola vuelta plana, una bobina de alambre de alta resistencia envuelta alrededor del núcleo o simplemente un conductor colocado a través del agujero como se presenta en la Figura 20.

2.5.9.1.3 Bobina Rogowski

La bobina Rogowski fue inventada por W. Rogowski y W.Steinhaus en el año 1912 para medir campos magnéticos [63], actualmente usada para medir corriente. La bobina Rogowski tiene una bobina flexible de fácil enrollamiento que es colocado alrededor del conductor, y así poder realizar la medición de corriente.



Figura 21. Esquema de la bobina Rogowski.

Como se puede observar en la Figura 21 la bobina se cierra alrededor del cable conductor que transporta la corriente que se quiere medir. El funcionamiento de la bobina Rogowski se basa en la Ley de Faraday que dice "una fuerza electromotriz total inducida en un circuito cerrado es proporcional a la tasa de cambio temporal del flujo magnético total que une el circuito" [26].

La bobina Rogowski tiene un núcleo de aire a diferencia del transformador de corriente. El diseño del núcleo de aire tiene una impedancia de inserción más baja, lo que permite una respuesta de la señal más rápida y un voltaje de señal muy lineal. La bobina Rogowski produce un voltaje que es proporcional a la velocidad de cambio (derivado) de la corriente contenida en la bobina. La tensión de la bobina se integra para que la sonda proporcione una tensión de salida proporcional a la señal de corriente de entrada como se presenta en la Figura 22 [64].



Figura 22. Circuito integrador conectado a la bobina Rogowski.

2.5.9.1.4 Sensor de efecto Hall

El efecto Hall, es producir un voltaje al aproximar un campo magnético sobre el conductor. El efecto del campo magnético ejerce una interacción en los electrones la cual provoca la desviación dentro del material del conductor y agrupándolos en los extremos, debido a esta desviación aparece un voltaje llamado Voltaje de Hall tal como se presenta en la Figura 23 [65].



Figura 23. Circuito de efecto Hall [19].

Esencialmente, el efecto Hall es otra forma de detectar el campo magnético alrededor de un conductor portador de corriente. Para introducir una corriente en el dispositivo semiconductor Hall se requiere una fuente de alimentación externa [19]. Existen dos tipos principales de sensores de Efecto Hall: lazo abierto (*open-loop*) y de lazo cerrado (*close-loop*). El segundo ofrece mejor precisión, pero a un costo mayor, y la mayoría de los sensores de efecto hall que se

encuentran en medidores de energía usan el diseño de anillo abierto para lograr costos más bajos. Estos sensores tienen una excelente respuesta a frecuencia y están capacitados para medir corrientes muy altas. En la práctica aparece en forma de pinzas amperimétricas como se muestra en la Figura 24, donde se encuentra una sonda en forma de pinza junto con el sensor y electrónica vinculada con el procesamiento de la medida.



Figura 24. Pinza amperimétrica de efecto Hall [66].

En la Tabla 1 se presenta las diferencias de los sensores de corrientes antes mencionados.

Tecnología del sensor	Resistencia Shunt	Resistencia ShuntSensor de efecto HallTransformador de corriente		Bobina Rogowski
Coste	e Muy bajo Alto Medio		Bajo	
Linealidad en el intervalo de medición	Muy buena	Pobre	obre Regular Muy buena	
Capacidad de medir altas corrientes	Muy baja	Buena	Buena	Muy buena
Consumo de energía	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Problema de saturación	No	Sí	Sí	No
Medida de corriente continua	Sí	Sí	No	No
Medida de corriente Sí alterna		Sí	Sí	Sí
Rango de medidas6000A0-1000A0		0-500A	0-2000A	

Tabla 1.	Comparación	de sensores	de corrie	nte [67].
----------	-------------	-------------	-----------	-----------

La Tabla 1 proporciona una visión general de los sensores para medir corriente y de acuerdo con su rango de medida, consumo de potencia, exactitud y costo parcial; se considera el sensor de efecto Hall para la medición de corriente en el presente trabajo.

2.5.9.2 Pinza amperimétrica

El equipo para adquirir la señal de corriente del motor de inducción en el laboratorio de vibraciones es una pinza amperimétrica CA/CC i30s como se presenta en la Figura 24, esta pinza se basa en el efecto Hall y puede ser usada con analizadores, multímetros y osciloscopios para obtener medidas de corriente (C.C). o (C.A.) [66]. La Tabla 2 presenta las características técnicas de la pinza amperimétrica.

Características técnicas			
Rango de corriente	20 A CA rms o CC		
Rango de medida	± 30 A		
Sensibilidad de salida	100 mV/A		
Precisión (+25 °C)	\pm 1% de lectura \pm 2 mA		
Resolución	$\pm 1 \text{ mA}$		
Impedancia de carga	$> 10 \text{ k}\Omega \text{ y} \le 100 \text{ pF}$		
Sensibilidad de la posición del conductor	\pm 1% respecto a lectura central		
Rango de frecuencias	CC a 100 kHz (- 0,5 dB)		
Coeficiente térmico	\pm 0,01% de lectura/°C		
Alimontación aléatrica	9 V alcalina, MN1604/PP3, 30 horas,		
Annentación electrica	indicador de batería baja		
Tensión de servicio	300 V CA rms o CC		

Tabla 2. Características técnicas de la pinza amperimétrica.

2.5.9.3 Transductor de corriente

El HXS 20-NP de LEM es un transductor de corriente tal como se presenta en la Figura 25. Se utiliza para la medición electrónica de corriente continua, alterna y de corriente pulsada, tiene una precisión menor o igual al 1% y un rango de medida de corriente primaria de $\pm 60A$. El dispositivo se utiliza en controladores de velocidad variable de CA y servomotores, convertidores estáticos para motores de corriente continua, fuentes de alimentación conmutadas, fuentes de alimentación para aplicaciones de soldadura y fuentes de alimentación de baterías.



Figura 25. Transductor de corriente.

La Tabla 3 presenta las características técnicas del transductor de corriente

Características técnicas			
Tecnología del sensor	Lazo abierto		
Rango de corriente	\pm 20 A		
Tipo de sensor	Efecto Hall		
Frecuencia ancho de banda	DC to 50 kHz		
Precisión	±1 %		
Voltaje de alimentación	5 VCC		
Soñalas da salida	Vmáx= 4.4 V		
Schales de Sanda	Vmin = 0.6V		

Tabla 3. Características técnicas del transductor de corriente.

2.5.9.4 Tarjeta NI 9234

El NI 9234 es un módulo de entrada de sonido y vibración desarrollada por la National Instruments como se presenta en la Figura 26, que puede medir señales de sensores piezoeléctricos electrónicos integrados como acelerómetros, tacómetros y sensores de proximidad que proporciona un amplio rango dinámico e incorpora acoplamiento de AC/DC. El canal de entrada mide las señales simultáneamente. Cada canal también tiene filtros antialiasing- integrados que ajustan automáticamente su velocidad de muestreo. Cuando es usado con software de NI, este módulo ofrece funcionalidad de procesamiento para monitoreo de condición como análisis de frecuencia y rastreo de orden [68].



Figura 26. Módulo de entrada de sonido y vibración NI 9234 [68].

La Tabla 4 muestra las características técnicas del módulo NI 9234.

Características técnicas			
Marca	National Instruments		
Número de canales	4		
Resolución	24 bits		
Frecuencia de muestreo	51.2 KS/s por canal		
Entrada	Analógica IEPE y AC/DC		
Voltaje de entrada	+- 5V		

Tabla 4. Características técnicas de la tarjeta NI 9234.

2.5.9.5 Chasis

El NI cDAQ-9188 es un chasis de 8 ranuras diseñado para adquirir datos de medidas mixtas como se presenta en la Figura 27. Una sola NI CompactDAQ chasis puede medir hasta 256 canales de señales de sensores, analógicas I/O, digitales I/O y contadores/temporizadores con una comunicación Ethernet a una PC o portátil, entregando datos de alta velocidad y facilidad de uso.

Los módulos utilizables incluyen termocuplas, RTDs, calibradores de tensión, carga y transductores de presión, celdas de torque, acelerómetros, medidores de flujo y micrófonos. Además, con el software controlador NI-DAQmx se puede registrar los datos de los experimentos realizados en el laboratorio o desplegar un sistema de prueba distribuido a través de entornos de programación como NI LabView [69].



Figura 27. Chasis NI cDAQ-9188 [69].

La Tabla 5 muestra las características técnicas del chasis NI cDAQ-9188.

Tabla 5. Características técnicas del chasis NI cDAQ-9188.

Características técnicas			
Marca	National Instruments		
Número de canales	256		
Número de ranuras	8		
Voltaje de entrada	9V-30V		

2.6 Fallos en engranes

Los fallos en engranes se pueden atribuir a la deficiencia del material, desgaste con el transcurrir de las horas de funcionamiento, funcionamiento defectuoso, defecto de montaje y mala lubricación. El lubricante se utiliza para prevenir el contacto directo con los dientes logrado así reducir los niveles de fricción, vibración y eliminar el calor generado.

Los tipos de fallos utilizados en este proyecto son rotura de diente (*tooth breakage*) y picadura (*pitting*) los cuales se explican a continuación:

2.6.1 Fallo de rotura de diente en el engrane

El fallo por rotura de diente es ocasionado por la concentración de carga a lo largo de la longitud del diente. Este fallo comienza con una grieta en la raíz del diente en el lado de las capas estiradas, donde se producen tensiones de flexión junto con las tensiones locales debido a la forma de los dientes [70].

La norma ISO 10825, establece a este tipo de fallo como rotura de diente (Tooth breakage), y divide a su vez en cuatro subtipos de fallos los cuales son: Rotura por sobrecarga (Overload breakage), cizalla de dientes (Tooth shear), rotura tras deformación plástica (Breakage after plastic

deformation) y rotura por fatiga *(Fatigue breakage)*. En la Figura 28 se presenta la clasificación de los fallos por rotura de diente.



Figura 28. Clasificación del fallo rotura de diente según la norma ISO 10825.

Uno de los principales tipos fallos de esta categoría es rotura por sobrecarga y rotura por fatiga, los cuales son ocasionados por sobrecargas o ciclos de esfuerzo de los dientes más allá del límite de resistencia del material [71], [72], [73]. En la Figura 29 se presenta una rotura de diente por fatiga.



Figura 29. Rotura de diente por fatiga [74].

2.6.1.1 Características del fallo por rotura de diente en engrane

La rotura por fatiga de flexión comienza con una grieta en la sección de la raíz y progresa hasta que el diente o una parte de este se rompe [75]. La rotura por sobrecarga aparece como una

rotura fibrosa que ha sido arrancada o rasgada. La Tabla 6 presenta un resumen de las características que presenta un engrane con diente roto.

Tipo de fallo	Rotura de diente (ISO 10825)
Subtipo de fallo	Rotura por sobrecarga
	Tensiones (hertziana, cizallamiento) repetidas más allá del límite
Causas	de resistencia del material.
	Sobrecarga por elevado torque
	Se presenta como rotura tenaz y fibrosa, mostrando evidencia de
Localización	que el material ha sido rápidamente arrancado o rasgado
Localización	Presencia de curvas semielípticas con marcas perpendiculares en
	la superficie de la rotura
Dimensiones	Volumen de rotura de $2 mm^3$ sobre un diente
	Se forma una grieta en la sección de la raíz y esta progresa hasta
Evolución	que el diente o parte de él se rompe
	Mantener la carga por debajo del límite de resistencia del material
Soluciones	Escoger un material con mayor resistencia
	Aumentar el área de raíz del diente
Imagen	

Tabla 6. Características de un engrane con fallo de diente roto.

Figura 30. Fallo de rotura de diente.

La Tabla 7 presenta diferentes niveles de severidad que pueden existir en un engrane, donde se resumen las principales características que se van presentando mientras el fallo va evolucionando.

Tabla 7. Niveles de severidad de rotura en el engrane.

ESTADO DEL ENGRANE		Normal	Fallo leve	Fallo moderado	
IMAGEN DEL FALLO					
	Causa de fallo		Carga de trabajo excesiva por un tiempo prolongado.	Carga de trabajo excesiva por tiempo prolongado en un engrane con fallo leve de rotura. Se presenta también picado en la línea de paso debido a sobrecargas y tensión cíclica.	(1 1 1
DESCRIPCIÓN DEL FALLO	Estado del diente		Pequeñas grietas en la raíz del diente que causan desprendimiento de un pequeño porcentaje del diente.	Desprendimiento de más de la mitad del diente.]
	Porcentaje de volumen de rotura en el		Menor al 25% del volumen	Hasta el 50% del volumen	1
	diente		total de un diente.	total de un diente.	0
	Ruido durante su funcionamiento	No causa ruido.	Poca presencia de ruido durante su funcionamiento.	Causa ruido durante su funcionamiento.	(



Carga de trabajo excesiva por tiempo prolongado en un engrane con fallo moderado de rotura debido a sobrecargas y tensión cíclica.

El diente se rompe desde la raíz completamente.

Mayor al 50% del volumen total de un diente.

Causa ruido considerable.

2.6.1.2 Revisión bibliográfica de construcción de fallos de rotura de diente

Referencia	Descripción del fallo	Forma Geométrica	Forma Constructiva	Método para su construcción	Porcentaje de fallo	Severidad
[76]	El diente del engrane presenta rotura en la esquina superior.			Se elimina la esquina superior del diente, con una fresa.	3.56% de rotura de un diente.	El autor lo considera de nivel leve.
[77], [78]	El diente del engrane presenta rotura en la parte superior de toda la cresta.		ESW tooth cut	Se elimina la cresta del diente con una fresa por toda la longitud del diente.	25% de rotura de un diente.	El autor lo considera de nivel leve.
[79], [80]	El diente del engrane presenta rotura en toda la esquina.	25%		Se elimina una parte del diente con una fresa.	25% de rotura de un diente.	El autor lo considera de nivel leve.
[77], [78]	El diente del engrane presenta rotura desde la parte superior hasta la mitad en toda la cresta.		50% tooth cut	Se elimina la cresta del diente con una fresa por toda la longitud del diente.	50% de rotura de un diente.	El autor lo considera de nivel moderado.
[79], [80]	El diente del engrane presenta rotura desde la esquina hasta la mitad del mismo.	50%		Se elimina la mitad del diente con una fresa.	50% de rotura de un diente.	El autor lo considera de nivel moderado.

Tabla 8. Construcción de fallos por rotura de diente.

Referencia	Descripción del fallo	Forma Geométrica	Forma Constructiva	Método para su construcción	Porcentaje de fallo	Severidad
[77], [78]	El diente del engrane presenta rotura en su totalidad.		Loo% tooth cut	Se elimina la cresta del diente con una fresa por toda la longitud del diente.	100% de rotura de un diente.	El autor lo considera de nivel severo.
[79], [80]	El diente del engrane presenta rotura en su totalidad.	100%		Se elimina por completo el diente con una fresa.	100% de rotura de un diente.	El autor lo considera de nivel severo.
[81]	El diente del engrane presenta rotura en su totalidad.	Hairline crack Hairline crack H Hairline crack H H H H H Coast crack H H Coast side (resourced flark)		Se rompe el diente a partir de una grieta formada por la fatiga con una velocidad de 1320 rpm y tiempo de funcionamiento prolongado.	100% de rotura de un diente.	El autor lo considera de nivel severo.

Severidad

La Tabla 8 presenta un resumen de los experimentos realizados y la construcción del fallo por rotura de diente en engranes. Los puntos principales por tomar en cuenta son la forma geométrica y constructiva, el método de construcción, las dimensiones y el nivel de severidad, en casos que el autor no presente los niveles de severidad, éste se basara con el porcentaje de rotura de diente establecido en la Tabla 7. Además, la Tabla 8 proporciona una visión general de los métodos para construir fallos en engranes por rotura de diente y el método para construir fallos en engranes por rotura de diente y el método para construir un diente roto es por medio de mecanizado con una fresa.

2.6.2 Fallos de picadura en el diente de engrane

El fallo de picadura es producto a la fatiga en la superficie de los dientes del engrane que se presenta como agujeros en la superficie de contacto del diente. Una propiedad mecánica que ofrece resistencia a este tipo de fallo es la dureza superficial del material [82].

La norma ISO 10825 establece a este tipo de fallo como fenómeno de fatiga en la superficie (*Surface fatigue phenomena*) y se divide en cuatro subtipos de fallos los cuales son: picaduras (*pitting*), picaduras en escamas (*Flake pitting*), descamado (*spalling*) y dislocación de capa tratada (*case crashing*) [2]. En la Figura 31 se presenta la clasificación de los fallos por fenómeno de fatiga en la superficie.



Figura 31. Clasificación del fallo picadura de diente según la norma ISO 10825.

Los principales tipos fallos de esta categoría es la picadura y tiene tres subtipos de fallos los cuales son: inicial, progresiva y macro [83].

 La picadura inicial es originada en áreas locales de alta tensión debido a superficies irregulares sobre el diente del engrane, como se presenta en la Figura 32. Generalmente es más prominente en engranes endurecidos [2], [84].



Figura 32. Picadura inicial [85].

b. La picadura destructiva o progresiva se origina por debajo de la línea de del diámetro primitivo en la parte del dedendum y progresivamente va aumentando el tamaño y número de agujeros hasta que se destruye la superficie como se presenta en la Figura 33.



Figura 33. Picadura destructiva o progresiva [86].

c. La macro picadura se manifiesta como agujeros de tamaño grande que cubren todo el diente. Este tipo de picadura normalmente tiende a inutilizar el engrane y daña todo el sistema de engranajes, la Figura 34 presenta este tipo de fallo.



Figura 34. Macro picadura [87].

2.6.2.1 Características del fallo por picadura en el diente de engrane

La picadura se presenta en parte de los dientes o en la totalidad de ellos puesto que es causado por la ausencia o deficiencia de aditivos de extrema presión en el lubricante. De esta forma el fallo inicia con agujeros pequeños en la cara del diente que a medida que el fallo avanza estos aumentan en número y tamaño. Este tipo de fallo se conoce como localizado, por lo que se propaga por la superficie [83].

La Tabla 9 presenta un resumen de las características que presenta un engrane con picadura [1], [88].

Tipo de fallo	Fenómeno de fatiga en la superficie (ISO 10825)
Subtipo del fallo	Picadura
	Tensiones (hertziana, cizallamiento) repetidas más allá del límite
Causaa	de resistencia del material
Causas	Sobrecarga de superficies
	Deformación de película lubricante
	El fallo inicia bajo la línea del diámetro primitivo en la parte del
Legalización	dedendum
Localización	En etapas avanzadas se presenta de manera aleatoria en toda la
	cara del diente
Dimensiones	Diámetro del agujero mayor a 0.25mm
	El engrane durante un mal funcionamiento origina esfuerzos
Evolucion	sobre el flanco de los dientes que provocaran desprendimiento de

Tabla 9. Características de un engrane con fallo de picadura.

	material formando agujeros bajo la línea del diámetro primitivo, a
	medida que el fallo avanza los agujeros se presentan en todo el
	diente, incluso llegando a originar grieta por fatiga
	Mantener la carga por debajo del límite de resistencia del material
S a la ciana a	Aumentar la dureza del material
Soluciones	Aumento de dureza del miembro de accionamiento
	Usar cantidades adecuadas del lubricante

Imagen



Figura 35. Etapa avanzada del fallo por picadura.

La Tabla 10 presenta diferentes niveles de severidad de picadura que pueden existir en un engrane, donde se resumen las principales características que se van presentando mientras el fallo va evolucionando.

La Tabla 11 presenta un resumen de la parte experimental para la construcción de fallos por picaduras en engranes. Los puntos principales por tomar en cuenta son la forma geométrica y constructiva, el método de construcción, las dimensiones y el nivel de severidad, en casos que el autor no presente los niveles de severidad, éste se basara con el porcentaje de picadura establecido en la Tabla 10. Además, proporciona una visión general de los métodos para construir fallos en engranes por picadura en la línea del diámetro primitivo. Para la construcción del fallo se empieza por un fallo incipiente y va progresando hasta volverse un fallo severo. Se tiene varios métodos para la construcción de fallos por picadura, pero el más utilizado es por electroerosión, porque tiene un mecanizado de alta precisión y no presenta rebabas en los dientes del engrane.

ESTADO DEL ENGRANE		Normal	Fallo leve	Fallo moderado
IMAGEN DEL FALLO				
	Causa de fallo		Ruptura de capa límite de lubricante.	Carga de trabajo excesiva por tiempo prolongado en un engrane con fallo leve de picadura.
DESCRIPCIÓN DEL FALLO	Características de los dientes	Podría tener presencia de micro picadura.	Presencia de agujeros bajo la línea del diámetro primitivo en la parte del dededum.	Presencia de agujeros sobre y bajo la línea del diámetro primitivo.
	Porcentaje de área en los dientes		Menor al 15% del área total del diente.	Ente 15% y 40% del área total de un diente.
	Ruido durante su funcionamiento	No causa ruido.	Poca presencia de ruido durante su funcionamiento.	Causa ruido durante su funcionamiento.

Tabla 10.Niveles de severidad de picadura en el engrane.

Fallo severo



Carga de trabajo excesiva por tiempo prolongado en un engrane con fallo moderado de picadura.

Agujeros pueden ocupar cualquier lugar dentro de la cara de un diente.

Mayor al 40% del área total de un diente.

Causa ruido considerable.

2.6.2.2 Revisión bibliográfica de la construcción de fallos por picadura

Referencia	Descripción del fallo	Forma Geométrica	Forma Constructiva	Método para su construcción	Porcentaje de fallo
[89], [90], [91]	Se presentan 3 picaduras en un diente y 1 picadura en sus dientes vecinos los cuales se encuentran ubicados bajo la línea de paso.	 		Los autores utilizan una máquina de electro erosión (<i>EDM</i>) para remover el material y obtener superficies uniformes de 3 mm de diámetro.	1 agujero equivale al 2.65% de fallo en un solo diente. 3 agujeros equivalen a 7.95% de fallo en un diente.
[89], [90], [91]	Se presentan 10 picaduras en un diente, 3 picaduras en sus dientes vecinos y 1 picadura en sus dientes posteriores los cuales se encuentran ubicados bajo la línea de paso.			Los autores utilizan electro erosión para remover el material y obtener superficies uniformes de 3 mm de diámetro.	 10 agujeros equivalen 26.5% de fallo en un solo diente. 3 agujeros equivalen a 7.95% de fallo en un diente.
[89], [90], [91]	Se presentan 24 picaduras en un diente, 10 picaduras en sus dientes vecinos y 3 picadura en sus dientes posteriores los cuales se encuentran ubicados bajo la línea de paso.	••• - :::::::::::::::::::::::::::::::::		Los autores utilizan electro erosión para remover el material y obtener superficies uniformes de 3 mm de diámetro.	 24 agujeros equivalen 63.6% de fallo en un solo diente. 10 agujeros equivalen 26.5% de fallo en un solo diente. 3 agujeros equivalen a 7.95% de fallo en un diente.
[89], [90], [91]	Se presentan picaduras en 1 diente sin considerar ubicación, los cuales tienen diferente tamaño.		M	Los autores realizan los agujeros con una broca de diferentes diámetros.	40% de fallo de agujeros en la superfic de un diente.

al 1	El ASM Handbook especifica cuando el área picada es del 3-15% del área del diente, se lo considera de nivel leve.
n al al	El ASM Handbook especifica cuando el área picada es del 15-40% del área del diente, se lo considera de nivel moderado.
n al 1 n al	El ASM Handbook especifica cuando el área

l	picada es del 50-100%
	del área del diente, se lo
al	considera de nivel severo.

El autor lo considera de nivel moderado.

lo

Referencia	Descripción del fallo	Forma Geométrica	Forma Constructiva	Método para su construcción	Porcentaje de fallo
[92]	Se tiene picaduras a lo largo de todos los dientes.			Los autores realizan la picadura del engrane con agujeros de 2mm de diámetro y 2 mm de profundidad a lo largo del diente.	
[93]	Se tiene 5 picaduras en todos los dientes del engrane helicoidal.			Los autores realizan un agujero a lo largo de la línea del diámetro primitivo con un diámetro de 3 mm y 0.5 mm de profundidad.	
[94]	Se tiene 5 picaduras en 3 dientes del engrane.			Los autores utilizan una broca de 2 mm de diámetro para realizar los agujeros con una profundidad de 1 mm.	

lo	Severidad
-	
	El autor lo considera de nivel severo.
	El autor lo considera de nivel moderado.

2.7 Aplicaciones de la técnica AFCM en detección de fallos

La técnica AFCM puede aplicarse en varios casos como son: fallos en motores de inducción [95], fallos en bombas centrífugas [52], fallos en cajas de engranaje [96], fallos en rodamientos [97], fallos en válvulas dentro de un reactor nuclear [4] y fallos en molinos eólicos [98].

2.8 Ventajas y limitaciones

Se presentan las ventajas y limitaciones de la técnica AFCM aplicado en cajas de engranajes las cuales son [20], [50], [99], [100].

Ventajas:

- 1. El AFCM es una técnica no intrusiva porque no es necesario montar ningún transductor en la caja de engranajes.
- El AFCM es una potente técnica para determinar fallas en sistemas mecánicos que de otro modo son inaccesibles para el monitoreo de la condición por análisis de vibración convencional.
- 3. Para el AFCM, la señal de corriente puede ser medida en lugares lejanos desde el motor, siempre y cuando haya acceso al conductor que alimenta la corriente al motor.
- El costo de la instrumentación es menor con respecto a las mediciones de vibraciones, debido a que no implica el montaje de un sensor en la caja y cablearlo hasta el sistema de adquisición de datos.

Limitaciones:

- 1. Las frecuencias de los fallos pueden sobreponerse con la frecuencia de la fuente de alimentación del motor, lo cual puede dificultar la detección del fallo.
- Las relaciones señal/ruido de las firmas relacionadas con los fallos en las señales de corriente son bajas.
- 3. El AFCM también pueden ser corrompido por errores de transmisión, errores de fabricación y errores de instalación de las cajas de engranajes, por lo tanto, podría ser un reto extraer información útil de las señales de corriente para el diagnóstico de fallos de la caja de engranajes.
- 4. El AFCM es una técnica que aún está en su fase de desarrollo.

CAPÍTULO 3 - EXPERIMENTACIÓN

El laboratorio de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana tiene un banco de vibraciones que ha sido implementado para simulaciones e investigaciones del Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC) [101], logrando así establecer bases de datos que serán usadas para el diagnóstico de fallos en las maquinarias rotativas.

3.1 Experimentación del fallo por rotura de diente en el engrane

Durante un largo período de funcionamiento de los engranes, los dientes están sometidos a la fatiga por flexión. Debido a esta fatiga, en los puntos más débiles de los dientes del engrane se observan inicialmente grietas, estos comienzan en las raíces de los dientes o en el filete donde se desarrolla una alta tensión con la alta resistencia a la tracción por flexión. Las grietas se extienden por el diente transformándose en roturas.

Todas las roturas de los dientes de los engranes utilizados en el proyecto fueron construidas con una máquina fresadora, y fueron diseñados para replicar un fallo de rotura iniciando con un fallo leve, hasta concluir con un fallo severo.

3.1.1 Niveles de severidad de rotura de diente en el engrane

Como método de determinación del porcentaje de rotura se calculará el volumen de un diente (V_t) para relacionarlo con el volumen de rotura (V_r) , con los siguientes datos presentados en la Tabla 12.

Característica geométrica	Valor
Módulo (m)	2.25 mm
Longitud del diente (L)	20 mm

Гаb	la 12.	Características	geométricas	del	engrane.
-----	--------	-----------------	-------------	-----	----------

Los pasos para calcular el porcentaje de rotura de diente son:

1. Se calcula el paso circular (P) con la ecuación 34.

$$P = m \pi [mm]$$
 (34)
 $P = 2.25 \pi = 7.07 [mm]$

2. Se calcula el espesor medio (e) con la ecuación 35.

$$e = \frac{P}{2} [mm]$$
 (35)
 $e = \frac{7.07}{2} = 3.54 [mm]$

3. Se calcula el alto del diente (h) con la ecuación 36.

$$h = 2.25 m [mm]$$
 (36)
 $h = 2.25 2.25 = 5.06 [mm]$

4. Se calcula el volumen total del diente (V_t) con la ecuación 37.

$$V_t = h \mbox{ e L } [mm^3] \eqno(37)$$

$$V_t = 5.06 \ 3.54 \ 20 = 358.25 \ [mm^3]$$

5. Se calcula el porcentaje de diente roto (%dr) con la ecuación 38.

$$\% dr = \frac{V_r}{V_t} \ 100\% \tag{38}$$

Donde:

V_r: Es el volumen de rotura del diente y se calcula con la ecuación 39.

 $V_r = A_{rotura} L_{rotura} [mm^3]$ (39)

Donde:

Arotura: es el área de la rotura del diente

L_{rotura}: es la longitud de la rotura del diente

- 6. Cálculo del porcentaje de fallo a simular en el diente de engrane:
 - Rotura de diente 1:



$$A_{rotura} = \frac{b h}{2} = \frac{0.7 \ 2.4}{2} = 0.84 \ mm^2$$
$$V_r = 0.84 \ 5.5 = 4.62 \ mm^3$$
$$4.62$$

$$\% dr = \frac{4.02}{358.25} \ 100\% = 1.3\%$$

• Rotura de diente 2:



 $A_{rotura} = \frac{b h}{2} = \frac{0.7 2.7}{2} = 0.95 mm^2$

$$V_r = 0.95 \ 15 = 14.25 \ mm^3$$

$$\% dr = \frac{14.25}{358.25} \ 100\% = 4 \ \%$$

• Rotura de diente 3:



$$A_{rotura} = \frac{12.7}{2} = 1.35 \text{ mm}^2$$

$$V_r = 1.35 \ 20 = 27 \ mm^3$$

$$\%$$
dr = $\frac{27}{358.25}$ 100% = 7.5 %

• Rotura de diente 4:



 $A_{rotura} = \frac{12.7}{2} + 2.7 \ 1 = 1.35 + 2.7 = 4.05 \ mm^2$

$$V_r = 4.05 \ 10 = 40.5 \ mm^3$$

$$\%$$
dr = $\frac{40.5}{358.25}$ 100% = 11.3 %

• Rotura de diente 5:



$$A_{rotura} = \frac{2.71 \ 2.7}{2} = 3.66 \ mm^2$$
$$V_r = 3.66 \ 20 = 73.2 \ mm^3$$
$$\% dr = \frac{73.2}{358.25} \ 100\% = 20.4 \ \%$$

• Rotura de diente 6:



 $A_{rotura 2} = (1.05 2.7) + (1.67 2.7) = 7.3 \text{ mm}^2$

$$V_{r1} = 3.66 \ 10 = 36.6 \ mm^3$$

$$V_{r2} = 7.3 \ 10 = 73 \ mm^3$$

$$V_r = V_{r1} + V_{r2} = 36.6 + 73 = 109.6 \text{ mm}^3$$

$$\%$$
dr = $\frac{109.6}{358.25}$ 100% = 30.6 %

• Rotura de diente 7:



 $A_{rotura} = (1.05 \ 2.7) + (1.67 \ 2.7) = 7.3 \ mm^2$

$$V_r = 7.3 \ 20 = 146 \ mm^3$$

$$\%$$
dr = $\frac{146}{358.25}$ 100% = 40.8 %

• Rotura de diente 8:



 $A_{rotura 1} = (1.05 2.7) + (1.67 2.7) = 7.3 \text{ mm}^2$

 $A_{rotura 2} = 5.06 \ 3.53 = 17.86 \text{mm}^2$ $V_{r1} = 7.3 \ 10 = 73 \ \text{mm}^3$ $V_{r2} = 17.86 \ 10 = 178.6 \ \text{mm}^3$

 $V_r = V_{r1} + V_{r2} = 73 + 178.6 = 251.6 \ \text{mm}^3$

%dr =
$$\frac{251.6}{358.25}$$
 100% = 70.2 %

• Rotura de diente 9:



 $A_{rotura}\,=\,5.06\;3.54=17.9\;mm^2$

$$V_{r1} = 17.9 \ 20 = 358.25 \ mm^3$$

$$\% dr = \frac{358.25}{358.25} \ 100\% = 100 \ \%$$

En la Tabla 13 se presenta los niveles de severidad para rotura de diente.

Código	Número de dientes	Longitud del fallo (m)	Área fallo (mm^2)	Volumen fallo (mm^3)	Porcentaje de fallo (%)	Nivel de severidad
	0	0	0	0	0.0	Normal
P1	1	5.5	0.84	4.62	1.3	Leve
P2	1	15	0.95	14.25	4.0	Leve
P3	1	20	1.35	27.00	7.5	Leve
P4	1	10	4.05	40.50	11.3	Leve
Р5	1	20	3.66	73.20	20.4	Leve
P6	1	20	10.96	109.6	30.6	Moderado
P7	1	20	7.3	146.00	40.8	Moderado
P8	1	10	25.16	251.60	70.2	Severo
Р9	1	20	17.9	357.20	100.0	Severo

Tabla 13. Niveles de severidad para rotura de diente en engrane.

En la Figura 36 se presenta la evolución del fallo por diente roto.



Figura 36. Evolución del fallo por diente roto.

3.1.2 Fallos propuestos para rotura de diente en el engrane

Con el porcentaje de diente roto calculado y su volumen, se procede a elaborar los fallos en los engranes. La Tabla 14 presenta nueve grados de severidad construidos en cada engrane.

Posición	Código	Descripción del fallo	Imagen
Z1		Sin fallo	
Z1	P1	Volumen de fallo: 4.62 mm ³ en un solo diente. Porcentaje de fallo: 1.3 %.	
Z1	Р2	Volumen de fallo: 14.25 mm ³ en un solo diente. Porcentaje de fallo: 4 %.	- Ulluluu
Z1	Р3	Volumen de fallo: 27 mm ³ en un solo diente. Porcentaje de fallo: 7.5%	
Z1	P4	Volumen de fallo: 40.5 mm ³ en un solo diente. Porcentaje de fallo: 11.3%	

Tabla 14. Fallos propuestos para rotura de diente en el engrane.

Posición	Código	Descripción del fallo	Imagen
Z1	Р5	Volumen de fallo: 73.2 mm ³ en un solo diente. Porcentaje de fallo: 20.4%	
Z1	P6	Volumen de fallo: 109.6 mm ³ en un solo diente. Porcentaje de fallo: 30.6%	
Z1	Ρ7	Volumen de fallo: 146 mm ³ en un solo diente. Porcentaje de fallo: 40.8 %	
Z1	Р8	Volumen de fallo: 251.6 mm ³ en un solo diente. Porcentaje de fallo: 70.2%	
Z1	Р9	Volumen de fallo: 357.2 mm ³ en un solo diente. Porcentaje de fallo: 100 %	

3.2 Experimentación de fallos por picadura de diente en engrane

La picadura es una forma de corrosión que lleva a la creación de pequeños agujeros en el diente del engrane. Esto ocurre debido a la carga repetitiva en la superficie del diente y al esfuerzo de contacto que excede la resistencia a la fatiga superficial del material. Por lo tanto, las picaduras fueron construidas artificialmente por medio del mecanizado por electroerosión, debido a que con esta técnica de mecanizado se puede ir controlando los porcentajes requeridos del fallo.

3.2.1 Niveles de severidad de fallo por picaduras de diente en engrane

El porcentaje de picadura de un engrane, es la relación existente entre el área de la cara del diente y el área ocupada por los agujeros de picadura, tal como se ilustra en la Figura 37. En la Tabla 15 se presenta los parámetros del engrane.



Figura 37. Relación entre los agujeros de la picadura y el ancho de cara del diente.

Tabla 15. Característica geométrica del engrane.

Característica	Valor	
geométrica	v aloi	
Módulo (m)	2.25 mm	
Número de dientes (Z)	32	
Ángulo de presión (α)	20°	
Ancho de diente (W)	20 mm	

Para calcular el área de la cara del diente se requiere multiplicar la altura de trabajo activa (h_w) por el ancho del diente de engrane (W) con el siguiente proceso:


Figura 38. Altura activa del diente del engrane.

1. De la Figura 38 se calcula el alto del diente (h) con la ecuación 40

2. Se calcula el juego en cabeza o tolerancia (c) con la ecuación 41.

$$c = 0.25 \text{ m} \text{ [mm]}$$
 (41)
 $c = 0.25 2.25 = 0.56 \text{ [mm]}$

3. Se calcula la altura de trabajo activa del engrane (h_w) con la ecuación 42.

$$h_w = h - c \text{ [mm]}$$
 (42)
 $h_w = 5.06 - 0.56 = 4.5 \text{ [mm]}$

4. Se calcula el área total de la superficie de contacto en un diente (A) con la ecuación 43.

$$A = h_w W \text{ [mm2]}$$
 (43)
 $A = 4.5 \ 20 = 90 \text{ [mm2]}$

 Se calcula el área de picadura (A_{pitt}) con la ecuación 44 tal como se presenta en la Figura 39.



Figura 39. Área de picadura en un diente de engrane.

$$A_{\text{pitt}} = \frac{\pi \, \emptyset^2}{4} \quad [\text{mm}^2] \tag{44}$$

Donde:

Ø: es el diámetro de la picadura

6. Se calcula el porcentaje de fallo de picadura (%pitt) con la ecuación 45.

$$\% \text{pitt} = \frac{A_{\text{pitt}}}{A} \ 100\% \tag{45}$$

Dónde (A_{pitt}) representa la suma de las áreas de todos los agujeros creados en un solo diente y (A) representa el área total de la superficie de contacto en un diente. En la Tabla 16 se especifica el porcentaje de nivel de severidad para cada engrane, además se especifica el número de agujeros que corresponde a cada diente del engrane. En la Figura 40 se presenta la evolución del fallo por picadura.

		Número de agujeros					D'/	Área picadura (mm²)	Porcentaje de picadura (%)	Profundidad (mm)	Severidad	
Código	igo Diente 6 Diente 4 Diente 2 Diente 1 Diente 3 Diente 5 Diente	Diente 7	(mm)									
												Normal
P1				1				1.5	1.77	1.96	0.5	Leve
P2				3		_		1.5	5.30	5.89	0.5	Leve
Р3			1	4	1		_	1.5	7.07	7.85	0.5	Leve
P4			3	6	3			1.5	10.60	11.78	0.5	Leve
Р5			4	8	4			1.5	14.14	15.71	0.5	Leve
P6		1	3	8	3	1		2	25.13	27.93	0.5	Moderado
P7	1	3	10	12	10	3	1	2	37.70	41.89	0.5	Moderado
P8	1	3	10	20	10	3	1	2	62.83	69.81	0.5	Severo
Р9	0	Al azar	Al azar	Al azar	Al azar	Al azar	Al azar	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Severo

Tabla 16. Niveles de severidad	para cada	engrane con	fallo por picadura.
--------------------------------	-----------	-------------	---------------------





3.2.2 Fallos propuestos para picadura de diente en el engrane

Con el porcentaje de picadura calculado, se procede a elaborar los fallos en los engranes. La Tabla 17 presenta nueve grados de severidad para cada fallo elaborado en el diente del engrane. En la imagen se observa los agujeros ubicados arriba y debajo de la línea de paso del engrane.

Posición	Código	Descripción del fallo	Imagen
Z1		Sin fallo	
Z1	Р1	Diámetro: 1.5 mm Profundidad: 0.5mm Característica geométrica: 1 agujero en 1 diente Porcentaje de fallo: 1.96% Total, de dientes picados: 1	

Tabla 17. Fallos propuestos para picadura en el engrane.

Posición	Código	Descripción del fallo	Imagen
Z1	Р2	Diámetro: 1.5 mm Profundidad: 0.5 mm Característica geométrica: 3 agujeros en 1 diente Porcentaje de fallo: 5.89% Total, de dientes picados: 1	
Z1	Р3	Diámetro: 1.5 mm Profundidad: 0.5 mm Característica geométrica: 4 agujeros en 1 diente y 1 agujero en 2 y 3 diente Porcentaje de fallo: 7.85% en 1 diente Total, de dientes picados: 3	
Z1	Р4	Diámetro: 1.5 mm Profundidad: 0.5 mm Característica geométrica: 6 agujeros en 1 diente y 3 agujeros en 2 y 3 diente Porcentaje de fallo: 11.78% en 1 diente Total, de dientes picados: 3	
Z1	Р5	Diámetro: 1.5 mm Profundidad: 0.5 mm Característica geométrica: 8 agujeros en 1 diente y 4 agujeros en 2 y 3 diente Porcentaje de fallo: 15.7% en 1 diente Total, de dientes picados: 3	
Z1	P6	Diámetro: 2 mm Profundidad: 0.5 mm Característica geométrica: 10 agujeros en 1 diente, 3 agujeros en 2 y 3 diente y 1 agujero en 4 y 5 diente Porcentaje de fallo: 34.91% en 1 diente Total, de dientes picados: 5	

Posición	Código	Descripción del fallo	Imagen
Z1	Ρ7	Diámetro: 2 mm Profundidad: 0.5 mm Característica geométrica: 12 agujeros en 1 diente, 10 agujeros en 2 y 3 diente, 3 agujeros en 4 y 5 diente y 1 agujero en 6 y 7 diente Porcentaje de fallo: 41.89% en 1 diente Total, de dientes picados: 7	o
Z1	Р8	Diámetro: 2 mm Profundidad: 0.5 mm Característica geométrica: 20 agujeros en 1 diente, 10 agujeros en 2 y 3 diente, 3 agujeros en 4 y 5 diente y 1 agujero en 6 y 7 diente Porcentaje de fallo: 69.81% en 1 diente Total, de dientes picados: 7	o
Z1	Р9	Característica geométrica: agujeros irregulares a lo largo del diente. Porcentaje de fallo: 100% en 1 diente Total, de dientes picados: 6	

3.3 Montaje de línea base

3.3.1 Banco de vibraciones

El banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana, consta de todos los implementos necesarios para realizar diferentes configuraciones de maquinaria rotativa como: desbalanceo, desalineación y combinaciones de fallos de rodamientos y engranes; con estas configuraciones se logra realizar simulaciones lo más cercanas posibles a las que se presentan en la industria.

El banco se conforma por cinco unidades principales: (i) unidad de mando, (ii) unidad motriz, (iii) unidad de carga, (iv) unidad de sistemas rotativos y (v) unidad de sistema de adquisición de datos, tal como se presenta en la Figura 41.



Figura 41. Banco de vibraciones [2].

3.3.2 Montaje de elementos mecánicos y sensores

Para realizar el montaje de los elementos mecánicos y los sensores de vibración y corriente se debe tener una secuencia fija, lo cual permitirá que el sistema no sufra alteraciones durante su funcionamiento. La Figura 42 presenta el procedimiento a seguir para los respectivos montajes.



Figura 42. Proceso para el montaje de elementos mecánicos y los sensores [2].

3.3.3 Validación de línea base

Una vez concluido el montaje de los elementos mecánicos y los sensores, se procede a realizar la validación de la línea base. Para lo cual se realiza una verificación previa de todo el sistema de acuerdo a los siguientes pasos [2].

3.3.3.1 Verificación visual

Consiste en observar si hay errores que se han cometido durante el montaje de los elementos mecánicos, es un método muy sencillo, pero no eficaz. Al aplicar este método, sólo se puede comprobar una mala alineación, mal ajuste en los pernos, contaminantes dentro de la caja de engranes, cruce de cables de los sensores, entre otros.

3.3.3.2 Verificación de ruidos extraños

Una vez finalizada la verificación visual, se procede a utilizar el sentido auditivo, esto con el fin de verificar que al momento del encendido del motor no se generen ruidos extraños. Para este tipo de verificación es necesario de una persona experta en el tema [2].

3.3.3.3 Verificación de frecuencias características

Cuando una caja de engranajes se encuentra en buenas condiciones generan frecuencias características que están determinadas por la relación de transmisión entre piñón-engranaje y velocidad de giro. Estas frecuencias tienen bandas laterales a través de la frecuencia de la línea en la corriente del motor.

El cálculo de los espectros de frecuencia se presenta en las siguientes ecuaciones:

• Frecuencia de giro:

$$F_{g} = \frac{RPM_{motor}}{60} [Hz]$$
 (46)

Donde:

RPM_{motor}: Velocidad de giro del motor

• Frecuencia de giro piñón:

1X piñón =
$$F_g$$
 [Hz] (47)

• Frecuencia de giro engrane:

1X engrane =
$$F_g \frac{Z_1}{Z_2}$$
 [Hz] (48)

Donde:

Z1: Numero de dientes del piñón

Z₂: Numero de dientes del engrane

• Frecuencia de engranes:

$$GMF = F_g Z_1 [Hz]$$
(49)

• Frecuencia de corriente de alimentación de estator:

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_g \mathbf{p} \ [\text{Hz}] \tag{50}$$

Donde:

p: Número de pares de polos del motor.

• Frecuencias de giro en la línea de corriente del motor:

$$\mathbf{F}_{Gr1} = \left| \mathbf{F}_{s} \pm \mathbf{m} \mathbf{F}_{g} \right| \ [\text{Hz}] \tag{51}$$

Donde:

m: 1, 2, 3..., son números enteros que representan lo armónicos que se encuentran en la línea de corriente.

• Frecuencias de los engranes en la línea de corriente del motor:

 $F_{GM} = |F_s \pm qGMF| \quad [Hz] \tag{52}$

Donde:

q: 1, 2, 3..., son números enteros que representan lo armónicos que se encuentran en la línea de corriente.

• Componentes de frecuencia relacionados con la frecuencia de engrane y la frecuencia de rotación en la línea de corriente del motor:

$$\mathbf{F}_{Gr1M} = \left| \mathbf{F}_{s} \pm \mathbf{m} \mathbf{F}_{g} \pm \mathbf{q} \mathbf{G} \mathbf{M} \mathbf{F} \right| \ [Hz] \tag{53}$$

Para la verificación se procede a calcular las frecuencias características de los elementos de la caja de engranajes en buenas condiciones a una velocidad de 360 rpm con las ecuaciones 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54 y 55. La Tabla 18 presenta los resultados obtenidos de las frecuencias características.

Denominación	Frecuencia [Hz]		
Fg	6		
1X piñón	6		
1X engrane	4		
GMF	192		
F _s	18		
F _{Gr1}	24, 36, 42, 54		
F _{GM}	210, 174		
F _{Gr1M}	216, 180		

Tabla 18. Resultados obtenidos

La validación resulta de verificar el espectro de vibraciones con las frecuencias obtenidas en la Tabla 18 como se presentan en la Figura 43 y 45. En el espectro de vibración de la Figura 44 se observa un valor de GMF de 185.6 [Hz], esto se debe a que la velocidad de giro no es exacta con el valor calculado.



Figura 43. Espectro de corriente de las frecuencias de giro en la parte superior y en la parte inferior la del piñón.



Figura 44. Espectro de vibración del piñón.

Con la verificación de las frecuencias de giro y engrane se procede con el levantamiento de datos.

3.3.4 Establecimiento de la línea base

Por último, se realiza el establecimiento de la línea base, consiste en la adquisición de las señales de vibración y de corriente eléctrica bajo los parámetros que se establecen en el plan experimental establecido por el GIDTEC el cual se describe a continuación.

3.3.4.1 Plan experimental

El plan experimental se desarrolló en un banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, el movimiento se genera por un motor marca Siemens modelo 1LA7 096-6YA60 de 2 Hp; el movimiento que se transmite hacia el eje de entrada de la caja de engranajes es mediante un acople flexible. En el eje de salida de la caja de engranajes se ubica una polea que transmite el movimiento al freno magnético Rosati de 883 kW mediante una banda flexible, lo cual permite simular la aplicación de cargas. La carga del freno es controlada por una fuente de voltaje de corriente continua TDK-Lambda, GEN 100-15-is510. La velocidad de giro del motor se controla por medio de un variador de frecuencia Danfoss VLT 1.5 kW. Para la adquisición de datos se emplearon tres acelerómetros, tres pinzas de corriente y un encoder. Las señales de vibración y corriente serán adquiridas por diferentes tarjetas de adquisición de datos las cuales están montadas en un chasis NI cDAQ-9188 de *National Instruments* a través de un computador portátil ASUS ROG GL752VW-DH74.

En la Figura 45 se presenta la configuración del banco de vibraciones para realizar la adquisición de la base de datos con las señales de vibración y corriente eléctrica, de acuerdo al plan experimental. Los engranes fueron construidos de material SAE/AISI 4140, el número de dientes para el piñón y el engrane son de Z1=32 y Z2=48 respectivamente. El ancho de los dientes es 20 mm, módulo de 2.25 y ángulo de presión θ =20°. La localización de los fallos se presenta en el engrane Z1, cada fallo tiene una condición normal P0 y nueve niveles de severidad P1 a P9. Cada fallo y su severidad tienen una nomenclatura (Z#_#_L), donde los dos primeros términos (Z#), corresponde al engrane Z1 o Z2; el segundo término (#), corresponde al tipo de fallo, picadura (_2), y rotura de diente (_4); el tercer término (_L) corresponde a los nueve niveles de severidad (1 a 9).



Figura 45. Montaje esquemático de la caja de engranajes con sus respectivos sensores.

El plan experimental establecido tiene por nombre plan experimental diez, el cual representa el fallo de picadura en la cara del diente del engrane y fallo por rotura de diente en el engrane, que contienen diez niveles de severidad incluyendo el engrane en buenas condiciones.

3.3.5 Resultado de la línea base

Los resultados de la línea base de los fallos por rotura de diente y picadura se presentan en las Figuras 46, 47, 48 y 49 que inician con fallo leve, hasta un fallo severo tal como se presentaron en las Tablas 16 y 19.

En la Figura 46 y 47 se presentan los espectros de corriente con los fallos de rotura de diente y picadura respectivamente, están en un rango de frecuencia de 0 a 100 Hz y se observan componentes de corriente alrededor de los componentes de la frecuencia de alimentación de estator que es de 18 Hz. Estas componentes de corriente son las velocidades de giro de eje de entrada y salida de la caja de engranajes. Estos valores son obtenidos con la **¡Error! No se e ncuentra el origen de la referencia.**



Figura 46. Espectros de corriente de 0 a 100 Hz de las severidades de fallos por rotura de diente.



Figura 47. Espectros de corriente de 0 a 100 Hz de las severidades de fallos por picadura.

Las Figura 48 y 49 muestran las componentes de corriente desde los 100 Hz hasta los 300 Hz. Como los GMF son componentes de alta frecuencia de la caja de engranajes, la componente de la GMF es detectable desde de los 100 Hz en adelante. Puede observarse que, aunque se puede rastrea la GMF, es difícil interpretar el resultado debido al ruido entremezclado.

En la Figura 48 se observan variaciones de las componentes de corriente a medida que el fallo evoluciona, esto es ocasionado por el fallo de rotura de diente que genera pequeñas fluctuaciones de torque en el eje de entrada de la caja de engranajes. Por el contrario, en la Figura 49 se presenta el fallo de picadura y no se observan variaciones de las componentes de corriente.

Los resultados obtenidos de las Figura 48 y 49 establecen que, al existir fluctuaciones de torque en el eje de entrada de la caja de engranajes ocasionados por fallos de engrane como la rotura de diente, pueden ser detectados por el AFCM.



Figura 48. Espectros de corriente de las severidades de fallos por rotura de diente.



Figura 49. Espectro de corriente de las severidades de fallos por picadura.

CAPÍTULO - 4 GUÍA DE PRÁCTICA

Para la elaboración de una guía de práctica se requiere cumplir con el formato establecido en la Universidad Politécnica Salesiana, así como aportar de manera significativa al estudiante fortaleciendo sus conocimientos sobre el manejo y detección de fallos usando un sensor de corriente y aplicando la técnica del AFCM. Por este motivo la Figura 50 muestra el procedimiento para establecer una guía de prácticas.



Figura 50. Diagrama de flujo para establecer una guía de práctica [2].

4.1 Elaboración de guía de práctica sobre la técnica del AFCM

Como ha sido mencionado el AFCM presentan grandes ventajas para la detección de fallos en maquinaria rotativa donde es inaccesible montar un sensor de vibración o de emisión acústica, sin embargo, su estudio se encuentra en desarrollo. Por tanto, con la elaboración de la guía de práctica sobre el tema se pretende incentivar a los estudiantes a la investigación sobre el análisis

de firma de corriente, las cuales tienen un gran futuro dentro del mantenimiento basado en la condición.

La práctica planteada de análisis de firma de corriente es la siguiente:

• Detección de fallo en engranajes por medio de análisis de firma de corriente del motor (AFCM).

Esta práctica tiene como objetivo reconocer una señal de corriente con un engrane en buenas condiciones y compararla con la que tenga un fallo por rotura. La guía de práctica se presenta en el Anexo 1.

4.2 Validación de guía de práctica sobre la técnica del AFCM

Para la validación, se realizó la práctica propuesta en los laboratorios de análisis vibracional de la Universidad Politécnica Salesiana, con la colaboración de laboratoristas y 10 estudiantes pertenecientes a la carrera de Ingeniería Mecánica [2].

4.2.1 Calificación de guía sobre la técnica del AFCM

Para el proceso de calificación se partió del formato "Ficha de valoración de guías de práctica" [1], en el cual se evalúa cuatro aspectos sobre las guías, que son:

- Logros de aprendizaje
- Estructura básica
- Estrategia metodológica
- Materiales educativos

El resultado de la evaluación se califica sobre 21 puntos, requiriendo un mínimo de 85% de la nota máxima para la aprobación de la guía de práctica [2]. La evaluación realizada por cada estudiante se encuentra en el Anexo 2.

4.2.2 Resultados de la guía de práctica



Número de personas encuestadas: 10 Calificación promedio: 19.75

En promedio la nota obtenida de la práctica propuesta sobre señales de corriente es superior al 85% de la nota máxima. De esta manera bajo el criterio establecido en [2], la guía de práctica queda validada y disponible para la realización en los laboratorios de análisis vibracional de la Universidad Politécnica Salesiana.

CONCLUSIONES

En este proyecto técnico se adquirió señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en maquinaria rotativa, logrando establecer dos bases de datos de señales de corriente usando la técnica del AFCM, lo que ha permitido alcanzar los objetivos planteados y llegar a las conclusiones que se describen a continuación:

- Del estudio de la bibliografía sobre detección de fallos en cajas de engranajes mediante la técnica del AFCM, se concluye la efectividad de las señales de corriente para detectar fallos en sistemas mecánicos.
- De acuerdo al plan experimental propuesto por el GIDTEC, se levantó dos bases de datos de severidad de fallos en engranes con picadura y rotura de diente, cada base de datos está formada por tres señales de vibración, tres señales de corriente y una señal del encoder.
- Con la base de datos de severidad de fallos obtenida, se logra detectar fallos en engranes con señales de corriente aplicando la técnica del AFCM, identificando la existencia de bandas laterales a través de la frecuencia de línea de alimentación del motor; tales como frecuencias de rotación del eje de entrada, eje de salida y frecuencias de engranaje, pero la amplitud de estas bandas laterales tiene menor amplitud en comparación con la frecuencia de la línea, por lo que no se puede realizar un diagnóstico de severidad de fallos por medio de la FFT.
- La guía de práctica establecida en este proyecto técnico se ha enfocado en el estudio del análisis de firma de corriente de motor (AFCM) para la detección de fallos en engranes, con el objetivo de identificar patrones de fallos en el espectro de corriente. Con la práctica de laboratorio se logra abrir un panorama de nuevas técnicas de monitoreo de condición y retos a los estudiantes de Ingeniería Mecánica.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda verificar los datos adquiridos de los sensores, por lo que un error sistemático puede afectar en la visualización de las señales.
- Para tener una mejor visualización de las frecuencias características, se recomienda aumentar la carga y velocidad en la caja de engranajes.

TRABAJOS FUTUROS

- Realizar un estudio del monitoreo de corriente para severidad de fallos en engranes de dientes helicoidales.
- Generar una base de datos utilizando señales de vibración y corriente eléctrica en compresores y bombas hidráulicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. V. Nivelo Jara y D. J. Romero Rodríguez, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2014.
- [2] C. G. Ortiz Farfán y I. A. Pérez Rivera, «Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2016.
- [3] H. D. Haynes y D. M. Eissenberg, «Motor current signature analysis method for diagnosing motor operated devices», 4965513, 1990.
- [4] A. K. S. Jardine, D. Lin, y D. Banjevic, «A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, n.º 7, pp. 1483-1510, oct. 2006.
- [5] R. V. Sánchez Loja, «Diagnóstico de fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración empleando una red neuronal perceptrón multicapa con retropropagación del error», Tesis de máster, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España, 2012.
- [6] R. Guiracocha, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2015.
- [7] Hack-Eun Kim, «Machine prognostics based on health state Probability estimation», Thesis Doctor of Philosophy, Queensland University of Technology, 2010.
- [8] W. Huaqing, «Study on intelligent condition diagnosis based on feature extraction method and neuro-fuzzy approach for rotating machinery», Mie University, 2009.
- [9] S. Devendiran y K. Manivannan, «Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies for Bearing and Gear Components-A Review», Int. J. Appl. Eng. Res., vol. 11, n.º 6, pp. 3966–3975, 2016.
- [10] W. Olarte, M. Arbeláez, y B. Zabaleta, «Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo», *Sci. Tech.*, vol. 2, n.º 45, 2010.
- [11] R. B. Randall, Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. John Wiley and Sons, 2011.
- [12] V. Sharma y A. Parey, «Frequency domain averaging based experimental evaluation of gear fault without tachometer for fluctuating speed conditions», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 85, pp. 278-295, feb. 2017.
- [13] C. Kar y A. R. Mohanty, «Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, n.º 1, pp. 158–187, 2006.
- [14] P. Jayaswal, A. K. Wadhwani, y K. B. Mulchandani, «Machine Fault Signature Analysis», Int. J. Rotating Mach., vol. 2008, pp. 1-10, 2008.
- [15] R. Rodríguez, A. Fernández, y J. Barros, «Estudio de fallas comunes en rodamientos rígidos de una hilera de bolas mediante análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia», Trabajo de grado, Universidad Austral de Chile, Valdivia [Chile], 2002.
- [16] Horst Czichos, Handbook of technical diagnostics. New York: Springer, 2012.

- [17] D. Mba y R. B. Rao, «Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines; Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines and Rotating Structures. », 2006.
- [18] V. M. Baranov, E. M. Kudryavtsev, G. A. Sarychev, y V. M. Schavelin, Acoustic Emission in Friction. Elsevier, 2011.
- [19] A. Mohanty, Machinery Condition Monitoring. CRC Press, 2014.
- [20] R. V. Sánchez Loja, «Diagnóstico de fallos en cajas de engranajes con base en la fusión de datos de señales de vibración, corriente y emisión acústica», Tesis Doctoral, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2017.
- [21] mheducation, «Motores eléctricos». [En línea]. Disponible en: http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf. [Accedido: 20-sep-2017].
- [22] «Así Funciona», 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_corriente_electrica/ke_corriente_electric a_1.htm. [Accedido: 27-sep-2017].
- [23] F. Green, «Corriente alterna y corriente continua». [En línea]. Disponible en: https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/corriente-alterna.htm. [Accedido: 13-dic-2017].
- [24] J. E. Obregón Lozano, «Medición de la eficiencia a motores de inducción utilizando el método de deslizamiento», tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México, 2006.
- [25] L. Castillo, «Estudio de materiales necesarios para fabricar motores eléctricos de ventiladores para trabajos a altas temperaturas», tesis de máster, Universidad de Oviedo, Asturias, España, 2013.
- [26] R. A. Serway, J. W. Jewett, y S. R. C. González, *Física para ciencias e ingeniería*, vol. 2. Pomona: CENGAGE Learning, 2015.
- [27] G. E. Harper, Curso de transformadores y motores de inducción. Editorial Limusa, 2000.
- [28] C. Kar y A. R. Mohanty, «Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, n.º 1, pp. 158–187, 2006.
- [29] X. Xu, R. De Doncker, y D. W. Novotny, «A stator flux oriented induction machine drive», en Power Electronics Specialists Conference, 1988. PESC'88 Record., 19th Annual IEEE, 1988, pp. 870–876.
- [30] I. Bravo Imaz, «Acquisition and processing of new data sources for improved condition monitoring of mechanical systems», Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, Leoia, 2018.
- [31] R. Flores y T. I. Asiaín, «Diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotatorias utilizando la técnica de espectros de frecuencia de bandas laterales», *Inf. Tecnológica*, vol. 22, n.º 4, pp. 73–84, 2011.
- [32] O. Poncelas López, «Diagnóstico de motores de inducción mediante la adquisición de corrientes de estator con sonda Rogowski», Tesis de máster, Universitat Politècnica de Catalunya, Cataluña, España, 2008.
- [33] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, y R. G. Bartfield, «Motor bearing damage detection using stator current monitoring», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, n.º 6, pp. 1274-1279, nov. 1995.
- [34] W. Wang, «Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, n.º 5, pp. 887-903, sep. 2001.

- [35] S. H. Kia, H. Henao, y G.-A. Capolino, "Gearbox monitoring using induction machine stator current analysis", en *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007.* SDEMPED 2007. IEEE International Symposium on, 2007, pp. 149–154.
- [36] M. E. H. Benbouzid, «A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, n.º 5, pp. 984–993, 2000.
- [37] N. Mehala, «Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis», Tesis Doctoral, National Institute of Technology Kurukshetra, India, 2010.
- [38] P. Vas, Sensorless vector and direct torque control. Oxford Univ. Press, 1998.
- [39] G. B. Kliman y J. Stein, Methods of Motor Current Signature Analysis Electric Machines and Power Systems, vol. 20. New York: Hemisphere Publishing, 1982.
- [40] G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, y M. W. Madden, «Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 3, n.º 4, pp. 873–879, 1988.
- [41] P. Vas, «Steady state and transient performance of induction motors with rotor asymmetry», *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, n.º 9, pp. 3246–3251, 1982.
- [42] S. S. Williamson, «Steady-state analysis of a 3-phase cage motors with rotor-bar and end ring fault», *IEEE PROC*, vol. 129, n.º 3, pp. 93-100, 1982.
- [43] F. Filippetti, G. Franceschini, M. Martelli, y C. Tassoni, «An approach to knowledge representation about induction machine diagnostics in expert systems», en *Proc. Int. Conf. Electrical Machines*, 1988, vol. 3, pp. 289–296.
- [44] P. J. Tavner y J. Penman, Condition monitoring of electrical machines. Letchworth, Hertfordshire, England : New York: Research Studies Press; Wiley, 1987.
- [45] C. Hargis, B. G. Gaydon, y K. Kamash, "The detection of rotor defects in induction motors", en Proc. 1982 IEE Int. Conf. Electrical Machines, Design and Application, 1982, pp. 216–220.
- [46] W. Deleroi, «The bar break in the Käfigläufer of an asynchronous motor Broken bar in a squirrel-cage rotor of an induction motor», *Archiv für elektrotechnik*, vol. 67, n.º 2, pp. 91– 99, 1984.
- [47] J. R. Cameron, W. T. Thomson, y A. B. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors", en IEE Proceedings B (Electric Power Applications), 1986, vol. 133, pp. 155–163.
- [48] Z. Ye, B. Wu, y A. Sadeghian, «Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, n.º 6, pp. 1217–1228, 2003.
- [49] I. Tsoumas, E. Mitronikas, G. Georgoulas, y A. Safacas, «A comparative study of induction motor current signature analysis techniques for mechanical faults detection», en *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2005. SDEMPED 2005. 5th* IEEE International Symposium on, 2005, pp. 1–6.
- [50] S. Rajagopalan, T. G. Habetler, R. G. Harley, T. Sebastian, y B. Lequesne, «Current/voltage-based detection of faults in gears coupled to electric motors», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, n.º 6, pp. 1412–1420, 2006.
- [51] A. R. Mohanty, P. K. Pradhan, N. P. Mahalik, y S. G. Dastidar, «Fault detection in a centrifugal pump using vibration and motor current signature analysis», *Int. J. Autom. Control*, vol. 6, n.º 3-4, pp. 261-276, 2012.
- [52] S. Nandy, A. U. Rehman, A. Jain, R. Mishra, y R. K. Tripathi, «Flow Diagnostics in Centrifugal Pumps by Motor Current Signature Analysis», COMADEM2015, 2015.

- [53] M. H. Marzebali, S. H. Kia, H. Henao, G. A. Capolino, y J. Faiz, «Planetary gearbox torsional vibration effects on wound rotor induction generator electrical signatures», en 2015 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC), 2015, pp. 1440-1445.
- [54] F. Cheng, C. Wei, L. Qu, y W. Qiao, «Fault diagnosis of wind turbine gearbox using DFIG stator current analysis», en 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016, pp. 1-7.
- [55] ISO, «Condition monitoring and diagnostics of machine systems -- Electrical signature analysis of three-phase induction motors», en ISO 20958:2013, 2013.
- [56] IEC, «Testing and Measurement Techniques Power Quality Measurement Methods», en IEC 61000-4-30, 2015.
- [57] E. ISO, «IEC 17025», Gen. Requir. Competence Test. Calibration Lab., pp. 05–15, 2005.
- [58] IEC, «IEC 61010», Int. Stand., p. 121, 2002.
- [59] IEEE, «IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems», *IEEE STD*, pp. 519–1992, 1992.
- [60] M. NEMA, MG 1-2016, Motors and Generators. National Electrical Manufacturers Association, 2016.
- [61] «Especificaciones técnicas», Fritztechnik. [En línea]. Disponible en: http://www.fritztechnik.de/es/shunts-de-corriente/especificaciones-tecnicas/. [Accedido: 13-dic-2017].
- [62] «The Current Transformer», *Electronics Tutorials*. [En línea]. Disponible en: http://www.electronics-tutorials.ws/transformer/current-transformer.html. [Accedido: 19-dic-2017].
- [63] W. Rogowski y W. Steinhaus, «Die messung der magnetischen spannung», Arch. Für Elektrotechnik, vol. 1, n.º 4, pp. 141–150, 1912.
- [64] D. E. Shepard y D. W. Yauch, «An overview of Rogowski coil current sensing technology», *LEM High Curr. Syst.*, 2000.
- [65] D. Nedelkovski, «What is Hall Effect and How Hall Effect Sensors Work», How To Mechatronics, 30-dic-2015.
- [66] Fluke, «Pinza amperimétrica CA/CC i30». [En línea]. Disponible en: http://www.fluke.com/fluke/eses/accesorios/sondasamperimetricas/i30.htm?pid=56292. [Accedido: 27-sep-2017].
- [67] «Afinidad Eléctrica». [En línea]. Disponible en: http://www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=101.
- [68] Datasheet NI 9234, «Austin TX». 2015.
- [69] NI compactDAQ ethernet data acquisition system, 1ra ed. National Instruments., Austin,TX, 2014.
- [70] S. P. Radzevich, Dudley's handbook of practical gear design and manufacture. CRC Press, 2016.
- [71] F. Díaz del Catillo Rodriguez, «Engranajes: Historia, fabricación y fallas», Universidad Nacional Atónoma de México, Cuautitlán Izcalli, 2013.
- [72] L. E. B. Hernández, «Las fallas en los engranajes», Ing. E Investig., vol. 0, n.º 12, pp. 40-52, may 1985.
- [73] H. Ozturk, «Gearbox health monitoring and fault detection using vibration analysis», tesis doctoral, Dokuz Eylul University, Turquía, 2006.
- [74] O. Asi, «Fatigue failure of a helical gear in a gearbox», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 13, n.º 7, pp. 1116–1125, 2006.
- [75] J. Moya Rodríguez *et al.*, «Bancos de prueba para el ensayo de transmisiones por engranajes», presentado en COMEC, Cuba, 2014.

- [76] F. Chaari, W. Baccar, M. S. Abbes, y M. Haddar, «Effect of spalling or tooth breakage on gearmesh stiffness and dynamic response of a one-stage spur gear transmission», *Eur. J. Mech. - ASolids*, vol. 27, n.º 4, pp. 691-705, jul. 2008.
- [77] Y. Qu, D. He, J. Yoon, B. Van Hecke, E. Bechhoefer, y J. Zhu, «Gearbox Tooth Cut Fault Diagnostics Using Acoustic Emission and Vibration Sensors — A Comparative Study», *Sensors*, vol. 14, n.º 1, pp. 1372-1393, ene. 2014.
- [78] M. Amarnath y I. P. Krishna, «Local fault detection in helical gears via vibration and acoustic signals using EMD based statistical parameter analysis», *Measurement*, vol. 58, pp. 154–164, 2014.
- [79] M. Cerrada, R.-V. Sánchez, F. Pacheco, D. Cabrera, G. Zurita, y C. Li, "Hierarchical feature selection based on relative dependency for gear fault diagnosis", *Appl. Intell.*, vol. 44, n.º 3, pp. 687-703, abr. 2016.
- [80] A. Herrera Delgado, J. Quiroga Méndez, y I. Jaimes Sánchez, «Estudio experimental de fallas en engranajes rectos por desalineación, excentricidad y diente roto», *Ing. Desarro.*, vol. 34, n.º 1, pp. 1-23, ene. 2016.
- [81] W. D. Mark, C. P. Reagor, y D. R. McPherson, «Assessing the role of plastic deformation in gear-health monitoring by precision measurement of failed gears», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, n.º 1, pp. 177-192, ene. 2007.
- [82] J. Moya Rodríguez *et al.*, «Deterioro y modos de fallo en engranajes», presentado en COMEC, Cuba, 2014.
- [83] Rexnord, «Failure Analysis Gears-Shafts-Bearings», 1978. [En línea]. Disponible en: https://www.rexnord.com/ContentItems/TechLibrary/Documents/108-010_Failure-Analysis-Gears,-Shafts,-Bearings, [Accedido: 10-oct-2017].
- [84] B. Eftekharnejad y D. Mba, «Monitoring Natural Pitting Progress on Helical Gear Mesh Using Acoustic Emission and Vibration», *Strain*, vol. 47, pp. 299-310, dic. 2011.
- [85] E. Shipley, Gear Failures: how to recognize them, what causes them, how to avoid them. 1967.
- [86] E. B. Staff, «Recognizing Basic Gear Fatigue Failure Patterns», *Empowering Pumps*, 23-oct-2017.
- [87] «Failure Modes in Gears», Bright Hub Engineering. [En línea]. Disponible en: http://www.brighthubengineering.com/cad-autocad-reviews-tips/8443-failure-modesin-gear-part-one/#imgn_0. [Accedido: 15-dic-2017].
- [88] B. Höhn y K. Michaelis, «Influence of oil temperature on gear failures», *Tribol. Int.*, vol. 37, n.º 2, pp. 103-109, feb. 2004.
- [89] J. Qu, «Support-vector-machine-based diagnostics and prognostics for rotating systems», University of Alberta Libraries, 2011.
- [90] S. K. Lee, J. S. Shim, y B.-O. Cho, «Damage detection of a gear with initial pitting using the zoomed phase map of continuous wavelet transform», en *Key Engineering Materials*, 2006, vol. 306, pp. 223–228.
- [91] A. S. M. Handbook, «Friction, lubrication and wear technology», ASM Int., vol. 18, pp. 362–369, 1992.
- [92] Q. He, X. Ren, G. Jiang, y P. Xie, «A hybrid feature extraction methodology for gear pitting fault detection using motor stator current signal», *Insight-Non-Destr. Test. Cond. Monit.*, vol. 56, n.º 6, pp. 326–333, 2014.
- [93] Z. Korka, A. Bara, B. Clavac, y L. Filip, "Gear Pitting Assessment Using Vibration Signal Analysis", Romanian J. Acoust. Vib., vol. XIV, pp. 44-49, sep. 2017.
- [94] R. C. Ümütlü y K. Z. Ozturk, «Pitting Detection in a Worm Gearbox Using Artificial Neural Networks», *Inst. Noise Control Eng.*, pp. 1879-2861, 2016.

- [95] K. S. Gaeid, H. W. Ping, M. Khalid, y A. L. Salih, "Fault diagnosis of induction motor using MCSA and FFT", *Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, n.º 2, pp. 85–92, 2011.
- [96] B. R. Rajendra y S. V. Bhaskar, «Condition Monitoring of Gear Box by Using Motor Current Signature Analysis», Int. J. Sci. Res. Publ., vol. 3, ago. 2013.
- [97] B. Trajin, J. Regnier, y J. Faucher, «Bearing fault indicator in induction machine using stator current spectral analysis», en *Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008.* 4th IET Conference on, 2008, pp. 592–596.
- [98] X. Gong y W. Qiao, «Current-Based Mechanical Fault Detection for Direct-Drive Wind Turbines via Synchronous Sampling and Impulse Detection», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, n.º 3, pp. 1693-1702, mar. 2015.
- [99] X. Jin, F. Cheng, Y. Peng, W. Qiao, y L. Qu, «A comparative study on Vibration-and current-based approaches for drivetrain gearbox fault diagnosis», en *Industry Applications Society Annual Meeting, 2016 IEEE*, 2016, pp. 1–8.
- [100] W. Zhou, T. G. Habetler, y R. G. Harley, "Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review", en 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007, pp. 3-6.
- [101] J. Jara, J. Sinchi, y R. Sánchez, «Diseño y construcción de un banco didáctico para la medición de vibraciones mecánicas en los Laboratorios de Instrumentación de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca», Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca [Ecuador], 2012.
- [102] SINAIS, «Frecuencias propias de un engranaje», Curso de análisis de vibraciones. [En línea]. Disponible en: http://www.sinais.es/Recursos/Cursovibraciones/engranajes/frecuencias_engranajes.html. [Accedido: 06-oct-2014].

ANEXOS

Anexo 1

DETECCIÓN DE FALLOS EN ENGRANES MEDIANTE ANÁLISIS DE FIRMA DE CORRIENTE DEL MOTOR

Chingal David, egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica Correo electrónico: dchingal@est.ups.edu.ec Asignatura: Análisis de vibraciones, Cuenca – Ecuador, Fecha de realización: 22/03/2018

1. Presentación de la práctica

En la presente práctica se realiza la detección de fallos en engranes mediante el análisis de firma de corriente del motor (AFCM) utilizando la pinza amperimétrica i30s, software Labview y software Matlab para la adquisición e identificación de los datos obtenidos.

2. Requisitos y precauciones

Para realizar de manera satisfactoria esta práctica es necesario tener los conocimientos básicos sobre señales de corriente, magnetismo, motor de inducción, vibraciones y efecto Hall, por lo tanto, se recomienda realizar una lectura de los siguientes textos y guía de práctica:

- Corriente y resistencia: [26] pág. 752-753.
- Fuerza magnética que actúa sobre un conductor que transporta corriente: [26] pág. 819-820.
- El efecto Hall: [26] pág. 825-827.
- El motor de inducción: [27] pág. 320.
- Guía de practica sobre detección de fallos en caja de engranajes mediante señal de vibración mecánica [6] pág. 157.

3. Objetivos

- Conocer los conceptos de corriente, frecuencia, vibración y fallo de rotura de diente de engrane que están presentes en las cajas de engranajes.
- Identificar el espectro de corriente en un engrane en buen estado y otro con fallo de rotura de diente por medio del análisis de firma de corriente del motor (AFCM) usando software Matlab para la identificación del espectro.
- Describir el espectro de corriente en un engrane en buen estado y otro con fallo de rotura de diente usando el software Matlab.

4. Equipos, instrumentos y software

Tabla 19. Tabla de equipos, instrumentos y software.				
Descripción	Marca	Serie		
Pinza amperimétrica	Fluke	i30s		
Acelerómetro	IMI	603C01		
Laptop	Asus	Gaming		
Software	Labview	Fault diagnostic		
Motor eléctrico	Siemens	1LA7 096-6YA60		

5. Normas de seguridad

• Para la ejecución de la práctica, es de carácter obligatorio el uso de mandil y gafas.

6. Exposición

6.1. Caja de engranajes

La caja de engranajes es un elemento de transmisión de potencia y velocidad que cuenta con una etapa como se presenta en la Figura 51, donde Z1 es el piñón y Z2 es la rueda.



Figura 51. Posición de engranes.

En la Figura 52 se observa sus componentes principales.



Figura 52. Principales elementos de la caja de engranajes.

6.2. Frecuencias características de los engranes

6.2.1. Frecuencia de engranaje

Estas frecuencias son propias de cada engrane y aparecen en el espectro de frecuencia independientemente del estado del engrane. Su amplitud depende significativamente de la velocidad en el momento de la lectura [102]. Se calculan mediante la Ecuación 6.1.

$$GMF = Z_P F_a [Hz] \tag{6.1}$$

Donde:

 Z_P = número de dientes del piñón.

 F_g = velocidad de giro del piñón en [Hz].

El factor de conversión de la velocidad en revoluciones por minuto [rpm] a Hertz [Hz] es mediante la Ecuación 6.2.

$$1 [rpm] = \frac{1}{60} [Hz]$$
(6.2)

Ejemplo:

Para la realización de la práctica se tiene una velocidad de giro del piñón de $F_g=6$ Hz y $Z_P=32$

Calcular la GMF con la Ecuación 6.1:

$$GMF = Z_P F_q = 32.6 = 192 [Hz]$$

6.2.2. Frecuencia de corriente de estator

La frecuencia de corriente de estator (f_s) es la frecuencia adquirida del motor de inducción cuando gira a cierta velocidad controlada por el variador de frecuencia, ya que está toma la tensión y la frecuencia del suministro de red eléctrico.

Para calcular la f_s se utiliza la Ecuación 6.3.

$$\boldsymbol{f}_{\boldsymbol{s}} = \frac{\boldsymbol{n}_{\boldsymbol{s}} \, \boldsymbol{p}}{60} \, [H\boldsymbol{z}] \tag{6.3}$$

Donde:

 n_s = es la velocidad sincrónica del estator en rpm. p = es el número de pares de polos que tiene el motor de inducción.

p es el numero de pares de polos que tiene el motor d

Ejemplo:

Para la realización de la practica se tiene un motor de inducción trifásico marca Siemens con una alimentación de línea de 220 V, 60 Hz, número de pares de polos de 3, y está conectado a un variador de frecuencia; si se desea obtener una velocidad de giro de 6 Hz. ¿En cuánto hay que variar la frecuencia de corriente de estator para obtener la velocidad deseada?

Calcular la n_s con la Ecuación 6.2.

$$n_s = 6 [Hz] \frac{1 rpm}{\frac{1}{60} [Hz]} = 360 [rpm]$$

Calcular la f_s con la Ecuación 6.3.

$$f_s = \frac{n_s p}{60} = \frac{360 \ 3}{60} = \mathbf{18} \ [Hz]$$

Se necesita una frecuencia de corriente de estator de 18 Hz para obtener una velocidad de giro de 6Hz.

6.2.3. Bandas laterales del motor de inducción trifásico

Las bandas laterales son componentes espectrales que se presentan a través de la frecuencia de línea de alimentación del motor y son el resultado de fluctuaciones en el eje giratorio de la máquina rotativa, ocasionando cambios en el torque, velocidad y deslizamiento en el motor de inducción.

Las frecuencias características de las vibraciones también tienen bandas laterales a través de la frecuencia de línea de alimentación en la corriente del motor, estas frecuencias características son: la frecuencia de giro del eje de entrada de la caja de engranajes (f_{r1}) y la frecuencia de engranaje (GMF).

Las bandas laterales de las frecuencias características del motor de inducción se calculan con las siguientes ecuaciones.

$$f_{Gr1} = |a f_s \pm m f_{r1}| \tag{6.4}$$

$$\boldsymbol{f}_{\boldsymbol{G}\boldsymbol{M}} = |a \, f_s \pm q \, \boldsymbol{G}\boldsymbol{M}\boldsymbol{F}| \tag{6.5}$$

$$\boldsymbol{f}_{\boldsymbol{Gr1M}} = |a f_s \pm m f_{r1} \pm q \ \boldsymbol{GMF}| \tag{6.6}$$

Donde:

a, *m* y *q*: 1, 2, 3, ..., son los armónicos para detectar las frecuencias de engranaje y giro del eje.

 f_{Gr1} : es la frecuencia de giro del eje

 f_{GM} : es la frecuencia de engranaje

 f_{Gr1M} : son las componentes de frecuencia relacionados con la frecuencia de giro del eje y la frecuencia de engranaje

6.3. Disposición de fallos en engranes

Para el montaje de fallos se tiene la caja de engranes de 1 etapa como se muestra en la Figura 53. El piñón estará representado por Z1 y será el poseedor de los diversos fallos, mientras que Z2 será el engrane sin fallos durante la ejecución de la práctica.



Figura 53. Disposición de engranes para guía de práctica.

Para la caja de engranajes, las características técnicas de los engranes se presentan en la Tabla 20.

Engranes	Módulo [mm]	Número de dientes	Altura de diente [mm]	Ancho de diente [mm]
Z1	2.25	32	5.06	20
Z2	2.25	48	5.06	20

Tabla 20. Características técnicas de los engranes

6.4. Fallo en el diente de engrane

Se proporcionan 2 combinaciones de engranes para ser utilizados en la guía, los mismos se presentan en la Tabla 21.

Engrance	Estado del diente			
Engranes	Combinación 1	Combinación 2		
Z1	Normal	Rotura de diente		
Z2	Normal	Normal		

Tabla 21. Combinación de fallos usados en la caja de engranajes.

6.4.1. Fallo por rotura de diente

La rotura de diente es un fallo ocasionado por sobrecarga en el diente del piñón. Esto ocurre debido a la carga repetitiva en la superficie del diente. En la Figura 54 se presenta un fallo por rotura de diente.



Figura 54. Fallo por rotura de diente en engrane.

7. Proceso y procedimiento

7.1. Proceso



Figura 55. Proceso para la adquisición de las señales de corriente de los engranes.

7.2. Procedimiento

7.2.1. Montaje de engrane en buena condición

- 1. Desmontar la banda que conecta la salida de la caja con el freno, mostrado en la Figura 56, con la ayuda de un desarmador que será usado de palanca.
- 2. Usar una llave allen 6 para destapar la caja de engranaje, retirando los pernos de sujeción
- 3. Desmontar los ejes de la caja de engranaje, quitando las tapas de los rodamientos.
- 4. Colocar los engranajes en buenas condiciones en sus respectivos puntos de fijación.
- 5. Montar los ejes en la caja de engranajes, ubicando las tapas de los rodamientos.
- 6. Colocar banda entre las salidas de la caja de engranajes y el freno de forma alineada, ayúdese de una regla metálica para la alineación.
- 7. Tapar caja de engranajes y asegurar con los pernos de sujeción.



Figura 56. Sistema de transmisión de carga al sistema de caja de engranajes.

7.2.2. Montaje de la pinza amperimétrica i30s

1. Encender la pinza amperimétrica i30s por medio del interruptor de OFF-ON y verificar que el LED esté iluminado como se indica en la Figura 57.



Figura 57. Pinza amperimétrica de efecto Hall.

- 2. Ajustar el voltaje de salida a cero del instrumento, presionando y girando el botón ZERO ADJUST.
- 3. Posicionar la pinza amperimétrica alrededor del conductor de alimentación del motor de inducción como se indica en la Figura 58.



Figura 58. Pinza amperimétrica colocada alrededor del conductor.

4. Conectar el cable de salida de la pinza amperimétrica a un Módulo de Entrada NI9234 y este módulo se acopla al chasis como se indica en la Figura 59.



Figura 59. Cable de salida de las pinzas conectadas al módulo y a su vez al chasis.

7.2.3. Puesta en marcha del sistema

- 1. Encender computador portátil.
- 2. Clic en "INICIO", buscar "Fault_Diagnosis".
- 3. En la casilla de dirección escribimos "C:\Users\PUBLIC\Documents\Practica1\" más la fecha en la cual se realice la práctica.

7.2.4. Adquisición de datos del sistema

1. Modificamos los parámetros según la Tabla 22 parámetros de prueba.

Sin fallo	Rotura de diente 100%	
Repetition	Repetition	
R1 🕤	R1 🕤	
Frequency	Frequency	
F1 💽	F1 💌	
Load	Load	
	L1 💽	
Fault	Fault	
P1 💽	P10 🕤	

R1F1L1P1	R1F1L1P10

- 2. Encender variador de frecuencia pulsando el botón hand on^[2]].
- 3. Clic en [\Rightarrow] para iniciar el programa.
- 4. Pulsamos botón [] y esperamos a que el programa presente las señales obtenidas.

7.2.5. Análisis de forma de onda

- 1. Clic en "Inicio", buscar "Matlab".
- 2. En la barra de selección de carpetas poner "D:\Practica_corriente".
- 3. Entrar en el script "verificación_current".
- 4. En load (Figura 60) reemplazar número de práctica, fecha, numero de fallo "P" y parámetros de prueba.

```
%Condiciones iniciales
clc;clear all;close all;
load('D:\Practica_corriente\(fecha)\P(#)\(Parametro).mat')
```

Figura 60. Programa de procesamiento de datos

- 5. Ejecutar el programa.
- 6. La Tabla 23 presenta los valores teóricos calculados para la frecuencia de giro del eje y de la frecuencia de engranaje en buen estado, con sus respectivas frecuencias características.
- 7. La Tabla 24 presenta un espectro de frecuencia de giro del eje y de la frecuencia de engranaje en buen estado con sus respectivas frecuencias características.

Buenas condiciones				
	f_s			
	f_{r1}	6 Hz		
	GMF	192 Hz		
	$f_s + 2f_{r1}$	30 Hz		
	$f_s + 3f_{r1}$	36 Hz		
f_{Gr}	$f_s + 6f_{r1}$	54 Hz		
	$f_s + 9f_{r1}$	72 Hz		
	$f_s + 12f_{r1}$	90 Hz		
	$3f_s + GMF$	246 Hz		
f_{GM}	$7f_s + GMF$	318 Hz		
	$9f_s + GMF$	354 Hz		
	$f_s - f_{r1} - GMF$	180 Hz		
f_{Gr1M}	$f_s + f_{r1} + GMF$	216 Hz		
	$\overline{3f_s + f_{r1} + GMF}$	252 Hz		

Tabla 23. Valores de las bandas laterales de las frecuencias características de giro y engranaje.


Tabla 24. Gráfica del espectro del engrane en buenas condiciones.

7.2.6. Montaje del engrane con fallo de rotura de diente

- 1. Desmontar la banda que conecta la salida de la caja con el freno, mostrado en la Figura 61, con la ayuda de un desarmador que será usado de palanca.
- 2. Usar una llave allen 6 para destapar la caja de engranaje, retirando los pernos de sujeción.
- 3. Desmontar los ejes de la caja de engranaje, quitando las tapas de los rodamientos.
- 4. Seleccionar un engrane con fallo de rotura de diente al 100%.
- 5. Montar los ejes en la caja de engranajes, ubicando las tapas de los rodamientos.
- 6. Colocar banda entre las salidas de la caja de engranajes y el freno de forma alineada, ayúdese de una regla metálica para la alineación.
- 7. Tapar caja de engranajes y asegurar con los pernos de sujeción.



Figura 61. Sistema de transmisión de carga al sistema de caja de engranajes.

- 8. Repetir nuevamente desde el punto 7.2.3.
- 9. Mediante la Tabla 24 que presenta el espectro de un diente de engrane en buenas condiciones, comparar con el resultado obtenido del espectro con fallo por rotura de diente y en la Tabla 25 graficar los espectros de frecuencia de giro y de los engranes piñón-rueda correspondientes al engrane con fallo de rotura de diente.

	Rotura de diente 100%				
Imagen					
Espectro frecuencia de velocidad de giro					
Espectro frecuencia de Engranaje					

Tabla 25. Gráfica del engrane con fallo de rotura de diente al 100%.

8. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Recomendaciones

_

Anexo 2

	Nombre	Fecha	Ciclo	Carrera	Calificación
				Ingeniería	
1	Cajas Franco	22/03/2018	Egresado	Mecánica	19/21
				Ingeniería	
2	Calderón Juan Carlos	22/03/2018	Décimo	Mecánica	20/21
				Ingeniería	
3	Delgado Adrián	23/03/2018	Egresado	Mecánica	18/21
				Ingeniería	
4	Encalada Gabriel	23/03/2018	Egresado	Mecánica	18/21
				Ingeniería	
5	Llivicura Olger	23/03/2018	Egresado	Mecánica	20/21
				Ingeniería	
6	Lojano Francisco	23/03/2018	Egresado	Mecánica	19/21
				Ingeniería	
7	Montalván Felipe	22/03/2018	Décimo	Mecánica	20/21
				Ingeniería	
8	Pacheco Edison	22/03/2018	Egresado	Mecánica	21/21
				Ingeniería	
9	Torres Cristian	22/03/2018	Egresado	Mecánica	20/21
				Ingeniería	
10	Vacacela Andrés	23/03/2018	Octavo	Mecánica	19/21