

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Eléctrico*

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:

**“ESTIMACIÓN DEL PAR DE CARGA EN MOTORES DE
INDUCCIÓN BASADO EN SU MODELO MATEMÁTICO Y
ORIENTADO A LA DETECCIÓN DE FALLOS EN CAJAS
DE ENGRANAJES”**

AUTOR:

LUIS RENATO ORTEGA LUCERO

TUTOR:

ING. MARIELA CERRADA LOZADA, PhD.

CUENCA - ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Luis Renato Ortega Lucero con documento de identificación N° 0104219142, 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: **“ESTIMACIÓN DEL PAR DE CARGA EN MOTORES DE INDUCCIÓN BASADO EN SU MODELO MATEMÁTICO Y ORIENTADO A LA DETECCIÓN DE FALLOS EN CAJAS DE ENGRANAJES”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Eléctrico*, 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 digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2021



Luis Renato Ortega Lucero

C.I. 0104219142

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ESTIMACIÓN DEL PAR DE CARGA EN MOTORES DE INDUCCIÓN BASADO EN SU MODELO MATEMÁTICO Y ORIENTADO A LA DETECCIÓN DE FALLOS EN CAJAS DE ENGRANAJES”**, realizado por: Luis Renato Ortega Lucero, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2021



Ing. Mariela Cerrada Lozada, PhD.

C.I. 0151771813

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Luis Renato Ortega Lucero con documento de identificación N° 0104219142, autor del trabajo de titulación: **“ESTIMACIÓN DEL PAR DE CARGA EN MOTORES DE INDUCCIÓN BASADO EN SU MODELO MATEMÁTICO Y ORIENTADO A LA DETECCIÓN DE FALLOS EN CAJAS DE ENGRANAJES”**, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque investigativo* es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, mayo del 2021



Luis Renato Ortega Lucero

C.I. 0104219142

Dedicatoria

A Dios por darme la vida, fuerza y salud para cumplir mis objetivos.

A mi madre, que siempre me ha apoyado en mi desarrollo personal.

A mi país, por que espero que juntos podamos crear un futuro mejor.

Agradecimientos

A mis padres, Amanda y Alfredo quienes me han demostrado que se puede superar los obstáculos y seguir adelante. A mis hermanos Josué y Rodolfo quienes me enseñaron y ayudaron a ser mejor persona y al resto de mi familia que siempre ha deseado lo mejor para mí.

A mi tutor de tesis, Ing. Mariela Cerrada, quien me guió con mucha voluntad en el trayecto de este proyecto. Al Ing. José Manuel Aller quién nos transmitió los conocimientos necesarios de máquinas eléctricas para la realización del presente proyecto. Al director del grupo de investigación GIDTEC, Ing. Vinicio Sánchez, quien me extendió todo su apoyo, y al resto de miembros del grupo y de manera especial a Diego Cabrera, Franco Cajas, Cristian Torres, Jean Carlo Macancela y Mauricio Calle.

A mi amigo Eddy Sanmartín quién ha sido un motivo de alegría en mi vida.

Resumen

En el presente proyecto técnico, se muestra que la señal de par eléctrico en estado estacionario de un motor de inducción trifásico con carga generada por una caja de engranajes, es una señal sensible a la aparición de fallos en dicha caja. Se muestra que, en efecto, el par eléctrico es sensible al fallo de tipo rotura de diente conforme el nivel de severidad aumenta. La estimación del par de carga se basa en la estimación del par eléctrico del motor en estado estable, o estacionario, a partir de la disponibilidad de una base de datos de corrientes y tensiones del estator medidas en el motor, cuando una caja de engranajes con fallo esta acoplada al motor.

Con el fin de validar los resultados referente a los cambios del par eléctrico del motor debido a diferentes cargas en estado estable, se estimaron los parámetros de los motores de inducción usados en los bancos de pruebas, para generar un modelo matemático de cada motor, que pueda generar señales de par eléctrico simuladas. Esta estimación de parámetros se logró a partir del comportamiento de tensión y corriente durante el arranque del motor. Las simulaciones realizadas muestran que los pares de carga constantes, y velocidades estimadas a partir de otra base de datos disponibles de corrientes medidas sin la caja de engranajes, pero con cargas constantes, son similares a sus correspondientes obtenidos por el modelo.

Una vez verificado que el par de carga puede estimarse a partir del par eléctrico, se calcularon los pares eléctricos de los motores de inducción con la caja de engranajes acoplada. Para determinar la sensibilidad del par eléctrico estimado ante fallas en la caja de engranajes, se emplean tres técnicas de procesamiento de señales sobre el par: la Transformada Rápida de Fourier (FFT), la FFT con relleno de ceros, y el espectro de potencia, de las cuales el espectro de potencia del par expresa de mejor manera la sensibilidad ante las fallas.

Índice general

Cesión de derechos de autor	ii
Certificación	iii
Declaratoria de responsabilidad	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Índice de Tablas	x
Índice de Figuras	xi
Introducción	1
1 Problema de estudio y Objetivos	3
1.1 Problema de estudio	3
1.2 Grupo Objetivo (Beneficiarios)	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Metodología aplicada	5
1.4.1 Fase I	5
1.4.2 Fase II	5
1.4.3 Fase III	6
1.4.4 Fase IV	6
2 Fundamentos Teóricos	7
2.1 Mantenimiento basado en la condición y monitoreo de la condición	7
2.1.1 Monitoreo de vibraciones	8
2.1.2 Monitoreo de par	9
2.2 Engranajes y cajas de engranajes	10
2.3 Máquina de inducción	15
2.3.1 Tipos de rotor del motor de inducción	15
2.3.2 Modelo dinámico del motor de inducción en coordenadas primitivas (rotor jaula de ardilla o bobinado)	17
2.3.3 Vectores espaciales	20
2.3.4 Estimación del par eléctrico y parámetros del motor	22
2.3.5 Medición de resistencia eléctrica	25

2.3.6	Sistema adimensional de unidades	26
2.4	Espectro de amplitud y espectro de potencia	28
3	Marco Metodológico	32
3.1	Estimación del par eléctrico y par de carga mediante simulación	33
3.1.1	Simulación del modelo de la máquina de inducción	33
3.1.2	Estimación del par eléctrico y par de carga	35
3.2	Adquisición de señales y creación de bases de datos	38
3.2.1	Banco de pruebas experimental	39
3.2.2	Plan experimental: Línea base del motor a velocidad constante	39
3.2.3	Plan experimental: Severidad de fallo de engranaje recto a velocidad constante	42
3.2.4	Adquisición de señales en la fase de arranque del motor	45
3.3	Procesamiento de Datos	46
3.3.1	Adecuación y validación de señales	46
3.3.2	Estimación de la resistencia eléctrica de los devanados del estator	48
3.3.3	Transformación a vectores espaciales	49
3.3.4	Estimación de parámetros del motor	49
3.3.5	Simulación del modelo del motor con los parámetros estimados	55
3.3.6	Estimación del par de carga	60
3.3.7	Validación del par de carga constante por modelo matemático	65
4	Análisis de señales de par eléctrico en estado estable considerando una caja de engranajes	70
4.1	Estudio de sensibilidad usando el espectro de amplitud	70
4.2	Estudio de sensibilidad usando el espectro de amplitud con la técnica de rellenado de ceros y el espectro de potencia	77
5	Conclusiones y Trabajo futuro	82
5.1	Conclusiones	82
5.2	Trabajo futuro	84
	Anexos	84
	A Funcionamiento del freno electromagnético Pasqualini	85
	Glosario	88
	Bibliografía	95

Índice de Tablas

2.1	Técnicas del Mantenimiento Basado en la Condición, variable empleada y lugar de aplicación	8
2.2	Niveles de severidad de rotura de diente del engranaje	14
2.3	Clasificación térmica del aislamiento para maquinas con Factor de servicio 1.15	26
3.1	Parámetros eléctricos para simulación	34
3.2	Parámetros mecánicos para simulación	34
3.3	Características del equipamiento mecánico usado en el plan experimental	40
3.4	Características de los motores del plan experimental	40
3.5	Características de los motores del plan experimental	42
3.6	Características de la caja de engranajes del plan experimental "Severidad de fallo de engranaje recto a velocidad constante"	43
3.7	Características de los engranajes	43
3.8	Combinación para la adquisición de la base de datos	46
3.9	Mediciones y cálculo de la resistencia eléctrica de un devanado del motor	49
3.10	Parámetros mecánicos estimados	51
3.11	Bases del sistema para optimización de parámetros	53
3.12	Valores límites de evaluación de los parámetros para el algoritmo de optimización	54
3.13	Valores iniciales para evaluación de los parámetros del algoritmo de optimización	54
3.14	Parámetros obtenidos mediante el algoritmo de optimización de punto interior	55
3.15	Errores en estado estacionario de señales estimadas experimentalmente y proporcionadas por el modelo matemático	58
3.16	Estimación de par de carga constante	63
3.17	Parámetros de la señal de tensión a simular	66
3.18	Bases del sistema para la conexión del motor doble estrella paralelo	66
3.19	Error porcentual relativo entre señales de par de carga constante medidas y simuladas	68
3.20	Error porcentual relativo entre señales de velocidad medidas y simuladas	69
4.1	Frecuencias características de la caja de engranajes	71
4.2	Frecuencias de las componentes características de la caja de engranajes	71

Índice de Figuras

2.1	Engranaje recto	10
2.2	Nomenclatura del engrane	11
2.3	Ángulo de presión presente en un juego de engranes	11
2.4	Perfil normal de engranajes	12
2.5	Engranaje recto con rotura de diente, condición severa	13
2.6	Perfil con banda lateral no simétrica de engranajes debido a diente roto	13
2.7	Tipos de construcción del fallo de engrane por diente roto	14
2.8	Rotor devanado con anillos deslizantes	16
2.9	Rotor de jaula de ardilla	16
2.10	Rotor de doble jaula y barra profunda	17
2.11	Esquema del motor de inducción trifásico	17
2.12	Estimación de coeficiente de fricción k y momento de inercia J	23
2.13	Estimación de velocidad mecánica del motor	24
2.14	Medida volto-amperométrica para resistores de bajo valor	25
2.15	Técnica para obtener una mejor estimación de amplitud mediante la DFT, a) Señal en el tiempo, b) DFT de la señal, c) DFT con rellenado de ceros de la señal	30
3.1	Diagrama de flujo de actividades del marco metodológico	33
3.2	Señales del motor simuladas en condición en vacío	36
3.3	Vector espacial del enlace de flujo del estator	37
3.4	Comparación del par eléctrico modelado y estimado en condición del motor en vacío y con carga	38
3.5	Banco de vibraciones	39
3.6	Disposición de los elementos mecánicos del experimento	41
3.7	Montaje esquemático de sensores	41
3.8	Configuración de sensores y módulos	42
3.9	Engranaje recto con pérdida del 25% de su diente, fallo P2 nombrado	44
3.10	Disposición de los elementos mecánicos del experimento	44
3.11	Montaje esquemático de sensores	45
3.12	Configuración de sensores y módulos	45
3.13	Corrientes y tensiones trifásicas medidas	47
3.14	Espectros de tensiones y corriente	48
3.15	Transitorio durante el arranque del motor a) Tensiones, b) Corrientes medidas	50
3.16	Vectores espaciales durante el arranque del motor a) Vector espacial de tensión, b) Vector espacial de corriente	51
3.17	Vectores espaciales del enlace de flujo del estator a) Flujo no centrado b) Flujo centrado	52
3.18	a) Estimación del par eléctrico y b) Integral del par eléctrico durante el arranque del motor	52

3.19	Velocidad mecánica del eje del motor	53
3.20	Primera derivada del vector espacial de corriente	54
3.21	Evaluación de la función de costo	55
3.22	Comparación de impedancia medida e impedancia calculada a) Magnitudes y b) Ángulos	56
3.23	Transformadas de Fourier de las señales de tensiones aplicadas durante el arranque	57
3.24	Comparación señales de tensión y corriente medidas y simuladas	59
3.25	Comparación de señales estimadas y simuladas mediante optimización de parámetros a) Velocidad mecánica y b) Par eléctrico	60
3.26	Transformada de Fourier de la señal de velocidad medida a) Carga L1, b) Carga L2 y c) Carga L3	62
3.27	Representación del sistema electromecánico y modelo dinámico de la caja de engranajes	64
3.28	Comparación de la señal de par de carga estimada y simulada al introducir en el modelo del motor el par del freno: a) carga L1, b) carga L2 y c) carga L3	67
3.29	Comparación de la señal de velocidad medida y simulada al introducir en el modelo del motor el par del freno: a) carga L1, b) carga L2 y c) carga L3	68
4.1	Comparación en frecuencia de la señal de par y la señal de vibración A3, en condición normal de funcionamiento de la caja de engranajes, usando el motor 1 con carga L3	72
4.2	Comparación en frecuencia de la señal de par y la señal de vibración A3 de la caja de engranajes, con fallo de rotura de diente del 50%, usando el motor M1 con carga L3	73
4.3	Comparación en frecuencia de la señal de par y la señal de vibración A3 de la caja de engranajes, con fallo de rotura de diente del 100%, usando el motor M1 con carga L3	74
4.4	Curvas de amplitud vs. nivel de severidad de fallo de la componente Fg, Fp y GMF de la señal de par, usando el motor 1	75
4.5	Curvas de amplitud vs. nivel de severidad de fallo de la componente Fg, Fp y GMF de la señal de par, usando el motor 2	76
4.6	Comparación en frecuencia de la señal de par y la señal de vibración A3 de la caja de engranajes aplicada la técnica de rellenado de ceros, con fallo de rotura de diente del 50%, usando el motor M1 con carga L3	78
4.7	Comparación en frecuencia de la señal de par y la señal de vibración A3 de la caja de engranajes mediante el espectro de potencia, con fallo de rotura de diente del 50%, usando el motor M1 con carga L3	79
4.8	Curvas de amplitud vs. nivel de severidad de fallo de la componente Fg, Fp y GMF de la señal de par, motor 1 y empleando dos técnicas distintas	80
4.9	Curvas de amplitud vs. nivel de severidad de fallo de la componente Fg, Fp y GMF de la señal de par, motor 2 y empleando dos técnicas distintas	81
A.1	Partes del freno Pasqualini	85
A.2	Yugo de hierro del freno Pasqualini	86

Introducción

Los sistemas industriales requieren de la selección adecuada de estrategias de mantenimiento que permitan aumentar la disponibilidad y seguridad de la fábrica, y reducir costos [1], [2]. El mantenimiento implica tomar acciones preventivas y correctivas para mantener o restaurar los sistemas industriales a un estado operativo deseado. Una estrategia de mantenimiento adecuada permite a la empresa aumentar la producción y reducir los costos. Se conoce que los costos por mantenimiento pueden alcanzar del 15% al 70% de los costos totales de producción [3].

Las estrategias de mantenimiento se pueden dividir en tres categorías: Mantenimiento Correctivo (MCo), Mantenimiento Preventivo (MP) y Mantenimiento Predictivo (MPd) [2]. El MPd es un método de prevención avanzado en el que las operaciones de mantenimiento se posponen hasta que sean realmente necesarias. El propósito del MPd es monitorear el sistema para detectar fallos relacionados con el daño del componente antes que deje de realizar la función nominal esperada, también denominada falla. Esta estrategia de mantenimiento se puede implementar con base en la información extraída de indicadores periódicos de desempeño, o monitoreo de la condición del sistema [2], [4]. El MPd se puede dividir en el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC) y el Mantenimiento Basado en la Condición (MBC). El monitoreo de la condición es el proceso de determinar el estado de la maquinaria en operación a partir de indicadores normalmente extraídos de señales monitoreadas que están asociadas a los modos de fallo, por lo cual el monitoreo de la condición es parte del MBC [5].

El MBC consta de tres fases fundamentales [6], [7]:

- Fase 1. Adquisición de datos: En esta etapa es donde se adquieren y almacenan las señales de monitoreo de la condición.
- Fase 2. Procesamiento de datos: En esta etapa, la información obtenida será gestionada y analizada para comprender e interpretar mejor los datos, incluida la verificación de las señales de los sensores y fundamentalmente la extracción de los parámetros de condición.

- Fase 3. Toma de decisiones: En esta etapa, se tomarán acciones de mantenimiento en función de los resultados de diagnóstico y/o de pronóstico de fallos.

Las maquinarias rotativas tales como ejes, rodamientos, cajas de engranajes, son ampliamente utilizadas en las diversas industrias debido a la necesidad de transmisión de potencia [8], [9]. Las fallas inesperadas de la maquinaria rotativa pueden causar pérdidas masivas de producción y daños catastróficos. Por lo tanto, es vital descubrir los cambios en los indicadores de condición que se puedan detectar antes de que el fallo incipiente se convierta en falla. Por eso el MBC siempre ha sido objeto de una intensa investigación. Las fallas relacionadas al engranaje representaron el 60% de las fallas de la caja de cambios, mientras que el 24% de las fallas de la caja de engranajes fueron causadas por un mantenimiento ineficaz. Por lo tanto, para mejorar la confiabilidad del sistema de transmisión de engranajes y reducir fallos inesperados, es necesario realizar un monitoreo de la condición e implementar el MBC, en el cual se recomiendan medidas de mantenimiento en base a la información obtenida del monitoreo de la condición [5].

En este proyecto, se propone el uso de la señal del par eléctrico en estado estacionario, del motor acoplado a una caja de engranajes, el cual es estimado a partir de las señales de corriente del estator medidas en dicho motor. Se muestra que la señal del par eléctrico es sensible a los fallos de tipo diente roto de engranajes rectos en diferentes niveles de severidad, ya que esta señal está relacionada con el par de carga generado por la caja de engranajes, el cual muestra cambios según la condición de fallo. La ventaja de usar el par eléctrico, es que es una señal que puede obtenerse a partir de la medición de corriente, a través de sensores que son menos invasivos que otros sensores de señales comúnmente usadas, como acelerómetros para medición de vibraciones, para los cuales, además, su lugar de emplazamiento debe ser cuidadosamente estudiado.

Capítulo 1

Problema de estudio y Objetivos

1.1 Problema de estudio

Los principales tipos de fallos que se presentan en los engranajes son la rotura de diente, el agrietamiento, la picadura y el gripado [10],[11],[12]. En la industria, además de evitar el riesgo de lesiones por rotación a alta velocidad y evitar fugas de lubricante, las cajas de engranajes suelen estar cerradas para reducir el ruido que generan. Por eso es difícil inspeccionar y monitorear de modo directo los engranajes. Para realizar estas tareas, el sistema suele estar parado, lo que no es beneficioso para la empresa. Los diferentes tipos de fallos que pueden ocurrir en la maquinaria rotativa son difíciles de detectar hasta que se alcanza la falla, por lo que las técnicas de monitoreo de la condición pueden obtener diferentes señales que indiquen su estado. Las señales acústicas, vibración, corriente y emisión acústica se han utilizado para la detección temprana de fallos en maquinaria rotativa. El uso de múltiples señales de monitoreo de condición del mismo tipo de sensor o de diferentes sensores puede mejorar la precisión del diagnóstico de fallos. El aumento de la precisión conduce a un aumento de la confiabilidad del sistema de diagnóstico de fallos [5]. Una de las señales que está poco reportada en la literatura, es la señal de par de carga, la cual ha sido utilizada para el diagnóstico de fallos solamente en [13].

Por otro lado, la detección y el diagnóstico de fallos basado en modelo es un importante campo de investigación [14]. El uso de modelos matemáticos para detectar fallos en engranajes ya ha sido reportado en la literatura [15] [16] [17], desde diferentes enfoques:

- i. Para generar señales residuales entre las señales de vibración en operación normal y la operación con falla, debido a que la presencia de fallos cambia el comportamiento dinámico del sistema y son introducidos como cargas equivalentes que actúan sobre el modelo de sistema en condición normal;
- ii. Para el análisis de nuevas señales de condición, por ejemplo señales de error de transmisión, directamente asociadas con la rigidez del contacto entre engranajes, que miden la diferencia angular entre la posición ideal de la salida

del eje del engranaje sin deflexión, dado por el modelo, y la actual posición del eje, o más conceptualmente,

- iii. Para la comprensión del fenómeno físico de aparición y comportamiento de la falla en la señal de vibración, en diferentes modos de fallos.

Este proyecto se direcciona al monitoreo de la condición de fallos en cajas de engranajes cuyo fallo esta determinado por el nivel de severidad en la rotura de diente. La señal que se empleará en este proceso es la del par eléctrico estimado en estado estacionario, por cuanto éste esta relacionado con el par de carga en estado estacionario generado por la caja de engranajes. El par eléctrico es obtenido a partir de las señales de corriente y voltaje medidas en el motor eléctrico de inducción trifásico que actúa sobre la caja de engranajes. La estimación del par eléctrico de un motor de inducción basado en su modelo dinámico ya ha sido reportado en [18],[19],[20]. Por otro lado, el par de carga en un motor de inducción también puede ser estimado, según se reporta en [21].

1.2 Grupo Objetivo (Beneficiarios)

Con el fin de fortalecer los procesos de investigación, desarrollo, innovación y redes de cooperación se ha propuesto desarrollar este proyecto en el cual los principales beneficiarios son los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana, quienes desarrollan habilidades de modelado matemático y procesamiento de señales, y las industrias locales que pueden hacer uso de estas técnicas de monitoreo no invasivas, usando señales usualmente disponibles en los sistemas SCADA.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar la sensibilidad de la señal de par de carga estimada a partir de señales de corriente y voltaje en un motor de inducción, en la detección de fallos en cajas de engranajes.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudiar los modelos matemáticos para estimar par de carga a partir de señales de corriente y voltaje en motores de inducción.
- Identificar experimentalmente los parámetros del motor de inducción disponible en el laboratorio de vibraciones del GIDTEC-UPS usando las señales de corriente y voltaje del motor en fase de arranque.

- Realizar comparaciones entre las señales de par estimado ante cargas constantes generadas en el laboratorio y las obtenidas a través de la simulación del modelo matemático del motor de inducción.
- Estimar experimentalmente los pares de carga a partir de señales de corriente y voltaje debido a la presencia de fallos debidos a la severidad del diente roto en la caja de engranajes
- Identificar los cambios en la señal de par de carga estimado debido a diferentes niveles de severidad de fallo usando técnicas de procesamiento de señales y/o estadísticas.

1.4 Metodología aplicada

Para el desarrollo del presente proyecto se plantean cuatro fases que se detallan a continuación.

1.4.1 Fase I

Se realiza una búsqueda y selección bibliográfica sobre modelos de motores de inducción para estimación de parámetros del motor, par eléctrico y par de carga. De ellos, se focaliza en aquel que más se adapte a los objetivos del proyecto, y se realizan simulaciones para comprender el procedimiento de identificación de parámetros y estimación del par eléctrico.

1.4.2 Fase II

En el banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana bajo condiciones reales controladas, se levantan dos bases de datos de señales de corrientes y voltajes del motor: (1) conectado a una carga constante y (2) con carga debido al acoplamiento de la caja de engranajes con fallos. Para esto se establecen dos planes experimentales a velocidades constantes del motor. Luego de establecidos los planes experimentales, se ensambla la configuración mecánica de cada plan para proceder a verificar la línea base de cada señal de monitoreo que indica que el sistema está ensamblado adecuadamente y se pueden adquirir los datos mediante códigos desarrollados en las plataformas y entornos de desarrollo LabVIEWTM y MATLABTM. Adicionalmente, se realiza la adquisición de señales de corriente y voltaje en estado transitorio, o fase de arranque, en ausencia de carga, que se usan posteriormente para la identificación de los parámetros del modelo matemático del motor. Esto con el fin de validar las señales de par de carga constante estimados experimentalmente con aquellos obtenidos por la vía de la simulación.

1.4.3 Fase III

Con la base de datos de señales en estado transitorio, se procede a identificar los parámetros del motor y se valida con simulaciones a partir del modelo respecto al par eléctrico y velocidad estimados. Con la base de datos de señales en estado estacionario con carga constante se procede a estimar el par eléctrico y el par de carga, y se valida con simulaciones a partir del modelo nuevamente respecto al par eléctrico y velocidad estimados. Con la base de datos de señales en estado estacionario del motor conectado a la caja de engranajes en presencia de diferentes niveles de severidad fallos, se procede a estimar el par de carga, a partir del par eléctrico en estado estable, y se valida con simulaciones a partir del modelo.

1.4.4 Fase IV

Luego de tener disponibles diferentes señales de par estimado de carga, se realiza un análisis de la serie temporal, con técnicas apropiadas de procesamiento de señales y/o estadísticas, para identificar cambios asociados a la presencia de fallos relativos a diferentes niveles de severidad del modo de fallo diente roto.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Mantenimiento basado en la condición y monitoreo de la condición

El MBC es un tipo de mantenimiento cuya estrategia consiste en decidir o recomendar acciones de mantenimiento usando información reunida a través del monitoreo de la condición [6]. El MBC posee dos características importantes que son el diagnóstico y pronóstico. El diagnóstico comprende la detección del fallo, aislamiento e identificación cuando ocurre. La detección consiste en indicar si el sistema monitoreado posee alguna característica de fallo. El aislamiento consiste en localizar el componente del sistema con fallo y la identificación determina su naturaleza cuando es detectado [6]. Mencionado esto, la detección es un paso importante y el primero en el diagnóstico de fallos. Por otra parte, el pronóstico se encarga de predecir el fallo antes de que se presente. Además, determina cuando y cómo va ocurrir. El MBC consta de tres pasos claves que son [6]:

- 1 Adquisición de datos: Este paso consiste en obtener datos relevantes de la salud del sistema.
- 2 Procesamiento de datos: Consiste en el manejo y análisis de los datos o señales recopilados en el primer paso para obtener una mejor comprensión e interpretación de los datos.
- 3 Toma de decisiones de mantenimiento: Este último paso consiste en recomendar directrices de mantenimiento eficientes.

En la Tabla 2.1 se presentan algunas de las técnicas que se emplean en el MBC.

Tabla 2.1: Técnicas del Mantenimiento Basado en la Condición, variable empleada y lugar de aplicación [22]

Variable medida	Técnica de diagnóstico	Aplicación
Vibraciones	Análisis de vibraciones	Maquinaria rotativa
	Impulsos de choque	
	Analizador de frecuencias	
Corriente	Análisis espectral de corriente eléctrica	Motores eléctricos
Viscosidad, partículas y degradación de lubricantes	Análisis de aceites	Reductores, cajas de cambio, motores térmicos, compresores
Temperatura	Termografía	Sistemas estáticos, térmicos, eléctricos y electrónicos
	Pintura térmica	
	Adhesivos de bandas	
Valor óhmico y capacidad	Medida de resistencia, ondas de choque, corrientes de absorción, conducción	Motores eléctricos
Ruidos	Medición de acústica	Maquinaria rotativa
	Medición de emisión acústica	
Corrosión	Sonido ambiental (ultrasonido)	Depósitos, tuberías, calderas, etc.
	Detector de gas	

Alguna de las variables medidas en la Tabla 2.1 emiten información o señales, durante el funcionamiento funcionamiento de la máquina, en la forma de ruido, vibración, temperatura, condición de aceite lubricante, calidad, cantidad de corriente consumida por el motor acoplado. Éstas señales son adquiridas mediante la instalación de transductores que miden estas señales de la máquina, y que son fuente de información sobre la condición de la máquina [23].

El Monitoreo de la Condición (MC) se puede definir, entonces, como un medio para determinar la condición de la máquina a partir de señales medidas, para prevenir una falla de la misma. El monitoreo de la condición consiste en recopilar y procesar datos provenientes de diversos sensores para obtener información significativa. Además, las técnicas de monitoreo de la condición se pueden emplear para detectar y diagnosticar fallos en la máquina [24].

De la señales monitoreadas mediante técnicas de MC se deben extraer parámetros o características relevantes que indicarán la condición de la maquinaria. Los parámetros deberán ser estables en condición normal de funcionamiento, mientras que cuando ocurra el fallo deberán presentar alguna tendencia [5].

2.1.1 Monitoreo de vibraciones

El monitoreo de vibraciones es la técnica de MC más usada para diagnosticar fallos en cajas de engranajes. La fluctuación de carga y fallos en los engranajes se presentan en

el monitoreo de esta señal, por lo que la convierten en una técnica eficiente. Es conocido que puede reconocer con exactitud alrededor del 90% de todos los fallos de maquinaria a partir de la información subyacente en esta señal [5]. Dentro de las razones principales para usar esta técnica en cajas de engranajes están [5], [6]:

- 1 La presencia de patrones de la señal de vibración que determinan el estado o condición de la maquinaria. Los patrones son llamados firma, la modificación de estos puede representar síntomas de fallo.
- 2 La comprensión teórica de los mecanismos de vibración permite predecir el comportamiento de la señal monitoreada debido a fallos.
- 3 El desarrollo tecnológico de sistemas comerciales fiables como analizadores y medidores de vibración portátiles.
- 4 Las aplicaciones computacionales facilitan el desarrollo y aplicación de métodos avanzados de procesamiento de señales y técnicas de reconocimiento de patrones.

Por otra parte, debido a otras fuentes como ruido, la existencia de fenómenos dinámicos no estacionarios, cambios de carga y velocidad, y dificultad en el posicionamiento de los sensores, el monitoreo y análisis de vibraciones pueden ser menos sensibles a fallas tempranas [25].

2.1.2 Monitoreo de par

La medida del par en aplicaciones industriales permite analizar la fatiga que sufren los componentes mecánicos. Sin embargo, esta medida se ve afectada por ruido que se introduce al ser una medida de naturaleza invasiva [13]. La máquina de inducción puede ser usada como un sensor de monitorización del par que se produce en un sistema electromecánico [13]. Mediante modelado matemático, se ha demostrado que el fallo de rodamiento en un solo punto produce oscilaciones del par a la frecuencia de rotación mecánica del rotor [13]. También, en una caja de engranajes en condición de salud normal, se han mostrado oscilaciones de par producidas por fuentes de excitación interna, entre las cuáles están la variación de rigidez de engrane, la fuerza de fricción y errores de transmisión. Dichas oscilaciones corresponden a frecuencias rotacionales como son la frecuencia de piñón, frecuencia de engranaje y frecuencia de engrane de los engranajes (GMF). Las tres frecuencias mencionadas se han observado mediante simulación de modelos, mientras que las frecuencias de piñón y engranaje han sido evidenciadas mediante experimentación [13]. Entre las ventajas del monitoreo de la señal de par, también se encuentra que no está ligada a una frecuencia principal [13], como sucede con las señales de corriente eléctrica [24], lo que puede dar una mejor comprensión de los fenómenos físicos del sistema mecánico. Además, es posible la estimación del par de carga a través del modelo del motor, cuyas

variables de entrada son mediciones no invasivas. Dado esto, se considera que el par de carga puede ser una señal mas informativa que las señales de corriente.

2.2 Engranajes y cajas de engranajes

Un engranaje tiene forma de disco o rueda con dientes a su alrededor, cuyo propósito es proporcionar un accionamiento positivo engranando sus dientes con los dientes de otro engranaje o cremallera [26]. El accionamiento positivo hace referencia a la presencia de deslizamiento cero o despreciable durante la interacción de los dientes de los engranajes [27]. Los sistemas de engranajes por lo general se encuentran cerrados, estos se encargan de transmitir potencia desde una maquinaria a un eje de rotación, dichos sistemas son denominados cajas de engranajes [26], o también cajas de cambios, debido a que producen cambio en la velocidad de giro. Por estas razones, las cajas de engranajes son ampliamente usadas en la industria y el sector automovilístico.

Los engranajes pueden clasificarse en diferentes grupos, dentro los cuales se encuentran [28]:

- 1 Engranajes de eje paralelo
- 2 Engranajes coplanares, no paralelos (intersección de ejes)
- 3 Engranajes no coplanares, no paralelos (no intersección de ejes)
- 4 Engranajes especiales (engranajes cuadrados, rectangulares y elípticos, etc.)

Dentro del grupo de engranajes de eje paralelo, se encuentran los engranajes rectos, estos han sido el modelo de desarrollo para los demás tipos. Sus dientes son rectos y paralelos a la línea del orificio central [26], Figura 2.1. Los engranajes rectos se pueden usar con otros de su mismo tipo, por lo general en un par de engranes, el más pequeño es llamado piñón [26] y el más grande como engranaje rueda o sencillamente engranaje [28].



Figura 2.1: Engranaje recto disponible en el laboratorio de vibraciones de la UPS

Los engranajes rectos son los más baratos de la clase eje paralelo [28]. Gran cantidad de engranajes de potencia están fabricados con acero endurecido y cementado. Se pueden nombrar otros materiales usados como el hierro, latón y bronce, y ciertos polímeros [28].

Para los engranes existe una nomenclatura definida, ver Figura 2.2, para describir sus características, dentro de la cual se puede nombrar:

- **Círculo de referencia:** Es el círculo en el que se basa el cálculo, y su diámetro se denomina diámetro de referencia [28]. En la literatura también es conocido como círculo primitivo o círculo de paso.
- **Módulo:** Es la relación del diámetro de referencia y el número de dientes [28].
- **Anchura de carga o Longitud del diente:** es la dimensión del diente medida en dirección axial [29].
- **Borde superior o Cabeza o Cresta.**
- **Ángulo de presión :** Es el ángulo α que se forma entre la línea de engrane con la horizontal, ver Figura 2.3 [29].

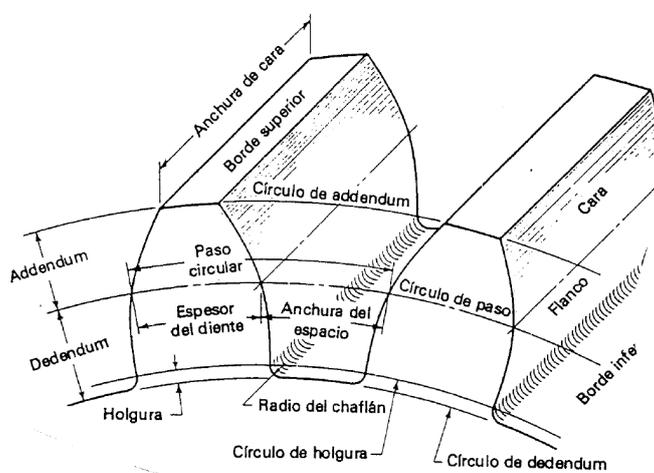


Figura 2.2: Nomenclatura del engrane [29]

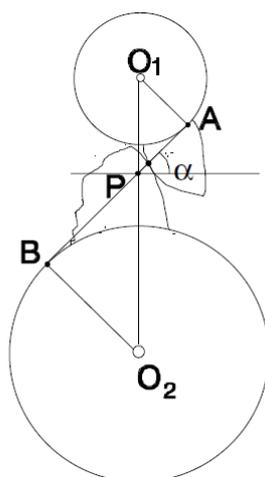


Figura 2.3: Ángulo de presión α presente en un juego de engranes [29]

El número de velocidades de funcionamiento en una caja de engranajes depende del número de juegos de engranajes. Por ejemplo, una caja de engranajes de una etapa tiene dos velocidades: entrada y salida. La caja de cambios de dos etapas tiene tres velocidades:

entrada, media y salida. De acuerdo con la velocidad de entrada y la relación de cada juego de engranajes, las velocidades intermedia y de salida se determinan mediante cálculo [30].

Las cajas de engranajes por lo general tienen espectros de vibración relacionados a su funcionamiento en condición normal. Las vibraciones severas que se presentan se deben a la resonancia entre la frecuencia natural del sistema y la velocidad de giro de algún eje [26]. La excitación por resonancia ocurre por inexactitudes de los engranajes que ocasionan pequeñas fluctuaciones periódicas en la velocidad de la línea de paso (del inglés, pitch line velocity) [26].

La implementación de un programa de mantenimiento predictivo requiere una gran cantidad de tiempo de comprensión de la dinámica del funcionamiento del engranaje y/o caja de cambios y sus frecuencias características [26]. Se puede aprovechar de que los engranajes generan un perfil dinámico único el cual puede ser usado para valorar sus respectivos estados, este perfil también puede utilizarse como una herramienta para evaluar la dinámica de funcionamiento de la caja de engranajes [26].

Cualquier conjunto de engranajes genera un componente de frecuencia denominado frecuencia de engrane de engranajes (del inglés, Gear Mesh Frequency, GMF). La multiplicación del número de dientes del engranaje por la velocidad de giro del eje determina la frecuencia fundamental de esta componente. La velocidad de cada uno de los engranajes presentes en el sistema se mostrarán como bandas laterales de la frecuencia de engrane [26]. Para un conjunto de engranajes sano, las bandas laterales estarán espaciadas una vez de la velocidad del eje de entrada, además se presentarán en pares de igual amplitud alrededor de la GMF [26]. A este conjunto de características se denomina perfil, en la Figura 2.4 se presenta un perfil normal. Por otra parte, la simetría descrita se verá afectada por desalineación externa, cargas inducidas anormales y otras influencias externas [26].

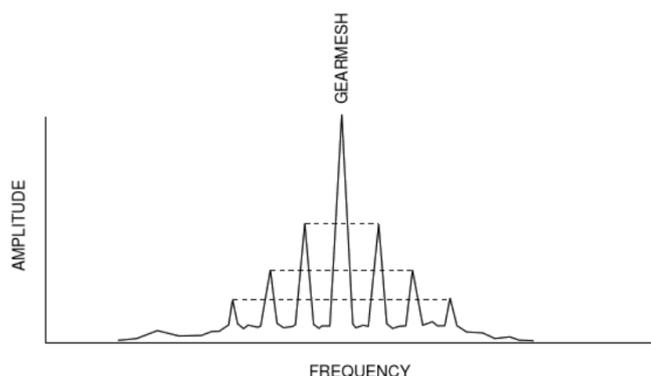


Figura 2.4: Perfil normal de engranajes produce simetría [26]

Los fallos que se producen en los engranajes comúnmente ocurren en sus dientes, las causas pueden ser desalineación, mala lubricación, fatiga, altas velocidades, entre otras. Entre los principales fallos que se pueden encontrar en dientes de engranajes son el agrietamiento (crack), rayadura (scuffing), picadura (pitting) y rotura de diente (broken tooth) [25].

El fallo por rotura de diente o diente roto (broken tooth) es el más dañino en la maquinaria, pudiendo provocar daños irreversibles [31]. Este tipo de fallo es producido por la concentración de carga a lo largo del diente [25]. El fallo empieza a partir de una grieta en la raíz del diente hasta que el diente, o parte de éste, se rompe; este fenómeno es denominado rotura por flexión [32]. El nivel de severidad del diente se determina por el porcentaje de pérdida de su volumen [24]. En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo de un engranaje con este tipo de fallo.



Figura 2.5: Engranaje recto con rotura de diente, condición severa [25]

Cuando se presenta este fallo, conforme gira el engranaje, el espacio dejado por el diente astillado o roto aumentará la holgura mecánica entre el piñón y el engranaje principal. El resultado será una banda lateral de baja amplitud que se producirá a la izquierda de la GMF [26]. Cuando los siguientes dientes sin daños interactúen, el espacio adicional dará como resultado un impacto de mayor energía. La banda lateral resultante, a la derecha de la GMF, tendrá una amplitud mucho mayor, Figura 2.6. El resto de bandas laterales tendrán características similares. Si la severidad aumenta, la amplitud de la GMF lo hará también y la simetría de las bandas laterales cambiará [26].

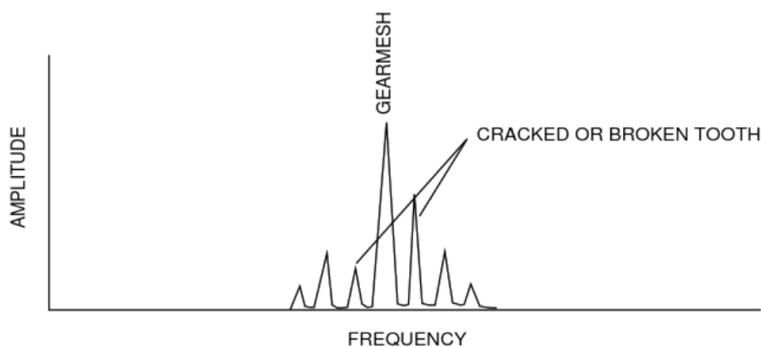


Figura 2.6: Perfil con banda lateral no simétrica de engranajes debido a diente roto [26]

En la Tabla 2.2 se presenta el grado de severidad del fallo por rotura de diente, sus causas y características del diente. Como se aprecia en esta tabla, la severidad de fallo es progresiva hasta que el diente se rompe por completo.

Tabla 2.2: Niveles de severidad de rotura de diente del engranaje [24]

Nivel de severidad	Causa de fallo	Estado del diente	Porcentaje de volumen de rotura (%dr)
Fallo leve	Carga excesiva de trabajo por un largo periodo	Pequeñas grietas en la raíz del diente provocan desprendimiento de un pequeño porcentaje del diente.	$\%dr \leq 25$
Fallo moderado	Carga excesiva de trabajo por un largo periodo de un engranaje con fallo leve de rotura.	Desprendimiento de más de la mitad del diente.	$25 < \%dr \leq 50$
Fallo severo	Carga excesiva de trabajo por un largo periodo de un engranaje con fallo moderado de rotura.	El diente se rompe desde la raíz completamente.	$\%dr > 50$

Por otra lado, en [24] se presenta un resumen de las diferentes características de construcción de este fallo. Entre estas características se encuentran, rotura en la esquina superior, rotura en toda la esquina, rotura en la parte superior de toda la cresta, rotura desde la parte superior hasta la mitad en toda la cresta, como se aprecia en la Figura 2.7.

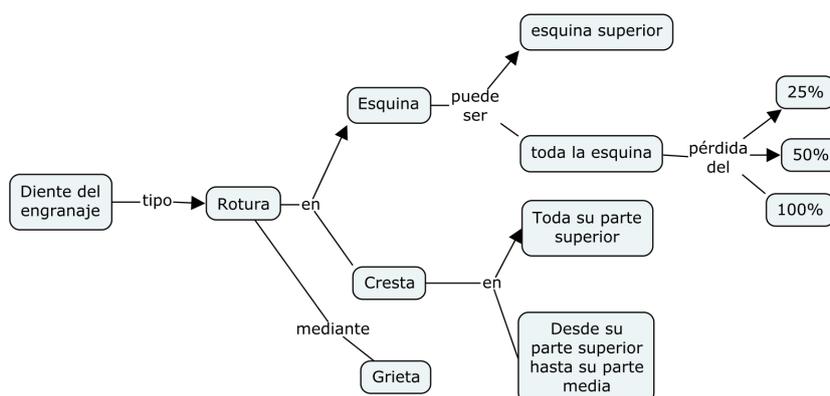


Figura 2.7: Tipos de construcción del fallo de engrane por diente roto [24]

Para todos los casos de la Figura 2.7 a excepción de grieta, se puede construir el fallo mediante mecanizado con una fresa [24].

2.3 Máquina de inducción

La máquina de inducción o también llamada máquina asíncrona, es un convertidor electromecánico de energía de tipo rotativo. Este dispositivo al igual que otros del mismo tipo puede comportarse como un motor o generador dependiendo si absorbe o entrega energía a la red eléctrica. Como generador su rendimiento es bajo, por lo que solo es usado en pocos casos en generadores eólicos [33]. Esta máquina está compuesta principalmente por un estator y un rotor, su nombre se debe a la inducción electromagnética que ocurre entre sus partes. El nombre de máquina asíncrona se debe a que el rotor no gira a velocidad de sincronismo la cual es impuesta por la frecuencia de la red [34]. Debido a que la mayoría de los motores de inducción que son usados en la industria son trifásicos, se explicará el funcionamiento y el modelado para el caso en el que el estator y rotor son trifásicos.

El motor es alimentado con tensiones trifásicas balanceadas en el estator. La excitación en los devanados del estator produce un campo magnético rotatorio que induce una fuerza electromotriz en los conductores del rotor generando la circulación de corriente sobre estos [33]. La circulación de corrientes en el rotor genera un campo magnético rotatorio que interactúa con el del estator originándose así el par eléctrico [33]. Debido a que es deseable que un motor de inducción posea un elevado par de arranque y un elevado rendimiento cuando alcanza el régimen permanente se desarrollaron diferentes tipos de rotor [33].

2.3.1 Tipos de rotor del motor de inducción

El rotor de un motor de inducción dependiendo de su construcción puede ser de rotor devanado o de rotor de jaula de ardilla.

Rotor devanado

Fue el primer rotor desarrollado [33], su construcción es similar al del estator de manera que se obtiene un arrollamiento trifásico en el que las tres fases se conectan por un lado en estrella y por el otro se envían a unos anillos aislados entre sí [35], [34]. Un ejemplo de este tipo de rotor se presenta en la Figura 2.9. Los anillos deslizantes dan acceso a las bobinas del rotor lo que permite añadir resistencia adicional para limitar las corrientes de arranque, aumentar el par y controlar la velocidad [35],[33]. Una vez que el motor haya alcanzado el régimen permanente se puede mejorar el rendimiento, cortocircuitando la resistencia adicional [33].

Este tipo de rotores se usan muy poco debido a que el rotor de jaula de ardilla posteriormente desarrollado fue capaz de soportar esfuerzos eléctricos y mecánicos mucho mayores [33].



Figura 2.8: Rotor devanado con anillos deslizantes [33]

Rotor jaula de ardilla

El rotor jaula de ardilla reemplaza los devanados de rotor por barras conductoras que se cortocircuitan en sus extremos mediante anillos [33]. Este tipo de construcción da el nombre de jaula de ardilla y una de sus ventajas es que es simple y robusta [34].

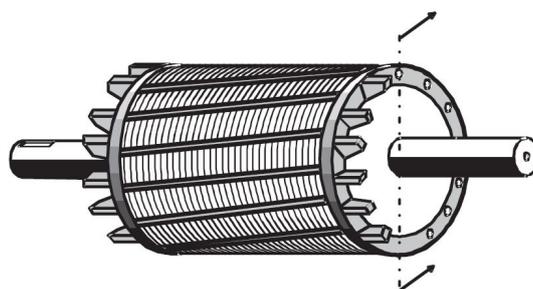


Figura 2.9: Rotor de jaula de ardilla [34]

Rotor de doble jaula de ardilla o barras profundas

El rotor de doble jaula de ardilla posee una jaula externa que es muy resistiva y otra profunda con menor resistencia [33]. Esta construcción aprovecha el efecto pelicular para variar la resistencia equivalente del rotor de manera automática durante el arranque [33]. Cuando el rotor está en reposo, el deslizamiento es grande y la frecuencia de las corrientes que circulan por él es proporcional al deslizamiento. Si las barras son profundas o el rotor es de doble jaula, la corriente de alta frecuencia fluye por la periferia de la barra o por la jaula más externa y resistiva, incrementando sustancialmente la resistencia equivalente del rotor en esta condición. Cuando la máquina está operando cerca del punto nominal, los deslizamientos son cercanos a cero y la frecuencia de las corrientes que circulan por el rotor también es reducida. En este caso las corrientes se distribuyen uniformemente por las barras y consecuentemente la resistencia equivalente disminuye.[33].

En la Figura 2.10 se muestra la sección transversal de un rotor de doble jaula y de un rotor de barra profunda.

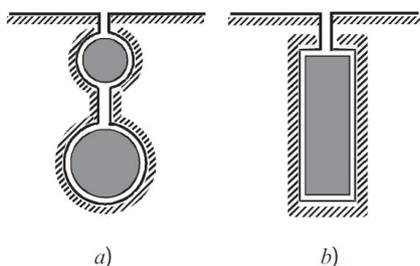


Figura 2.10: Rotor de a) doble jaula y b) de barra profunda [34]

2.3.2 Modelo dinámico del motor de inducción en coordenadas primitivas (rotor jaula de ardilla o bobinado)

El modelo dinámico del motor de inducción parte de la disposición física de los devanados del motor. Para un motor de inducción trifásico se modelan tres devanados o bobinas en el estator y rotor, Figura 2.11, donde $a_{e,r}$, $b_{e,r}$, $c_{e,r}$ son los ejes coordenados asociados a las fases a,b,c del motor en el estator y rotor, $i_{a,b,c}^e$ y $i_{a,b,c}^r$ son las corrientes de fase en el estator y el rotor, y θ es la posición angular del eje del rotor.

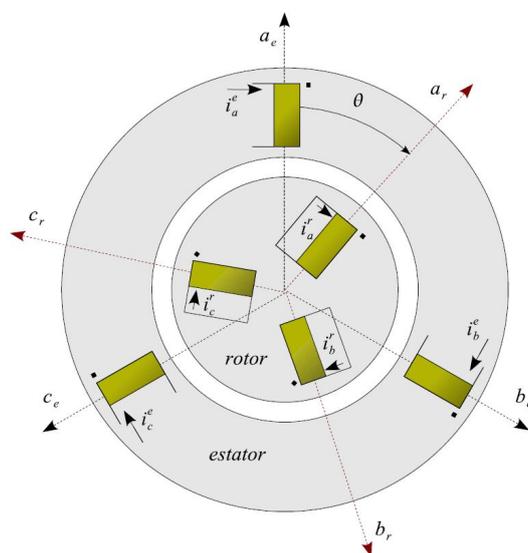


Figura 2.11: Esquema del motor de inducción trifásico [33]

Los devanados del rotor se encuentran cortocircuitados en sus extremos. Mediante las leyes de Kirchhoff se pueden determinar las ecuaciones que definen el comportamiento del motor [36]. Al despreciar los efectos de saturación magnética, corrientes parásitas, la distribución de la fuerza magnetomotriz no sinusoidal y el ranurado [37], estas ecuaciones son:

$$[v] = [R][i] + \frac{d[\lambda]}{dt} \quad (2.1)$$

$$\lambda = [L(\theta)][i] \quad (2.2)$$

$$[v] = [R][i] + L[(\theta)]\frac{d[i]}{dt} + \dot{\theta}[\tau(\theta)][i] \quad (2.3)$$

En estas ecuaciones, se tiene que:

$$[v] = \begin{bmatrix} [v_e] \\ [v_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [v_a^e & v_b^e & v_c^e]^t \\ [v_a^r & v_b^r & v_c^r]^t \end{bmatrix}$$

donde v es el vector de voltaje, v_e es el vector de voltaje en el estator, v_r es el vector de voltaje en el rotor, $v_{a,b,c}^e$ denota los voltajes de cada fase a, b, c del estator y $v_{a,b,c}^r$ denota los voltajes de cada fase a, b, c del rotor.

$$[i] = \begin{bmatrix} [i_e] \\ [i_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [i_a^e & i_b^e & i_c^e]^t \\ [i_a^r & i_b^r & i_c^r]^t \end{bmatrix}$$

donde i es el vector de corriente, i_e es la corriente de corriente en el estator, i_r es vector de corriente en el rotor, $i_{a,b,c}^e$ y $i_{a,b,c}^r$ denotan lo descrito en la Figura 2.11

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} [\lambda_e] \\ [\lambda_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\lambda_a^e & \lambda_b^e & \lambda_c^e]^t \\ [\lambda_a^r & \lambda_b^r & \lambda_c^r]^t \end{bmatrix}$$

donde λ es el vector de flujo, λ_e es el vector de flujo en el estator, λ_r es el vector de flujo en el rotor, $\lambda_{a,b,c}^e$ denota los flujos de cada fase a, b, c del estator y $\lambda_{a,b,c}^r$ denota los flujos de cada fase a, b, c del rotor.

Las matrices de parámetros que definen el comportamiento del modelo de la máquina de inducción en el sistema de coordenadas primitivas son:

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_{ee}] & [R_{er}] \\ [R_{re}] & [R_{rr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e[I] & [0] \\ [0] & R_r[I] \end{bmatrix}$$

$$[L(\theta)] = \begin{bmatrix} [L_{ee}] & [L_{er}(\theta)] \\ [L_{re}(\theta)] & [L_{rr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\sigma e}[I] + L_{me}[S] & L_{er}[C(\theta)] \\ L_{er}[C(\theta)]^t & L_{\sigma r}[I] + L_{mr}[S] \end{bmatrix}$$

$$[\tau(\theta)] = \begin{bmatrix} \frac{d}{d\theta}[L_{ee}] & \frac{d}{d\theta}[L_{er}(\theta)] \\ \frac{d}{d\theta}[L_{re}(\theta)] & \frac{d}{d\theta}[L_{rr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & L_{er}\frac{d}{d\theta}[C(\theta)] \\ L_{er}\frac{d}{d\theta}[C(\theta)]^t & [0] \end{bmatrix}$$

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$[0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[C(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{d\theta}[C(\theta)] = \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) & -\sin \theta & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) & -\sin \theta \end{bmatrix}$$

Donde:

- R_e es la resistencia de cada una de las bobinas del estator
- R_r es la resistencia de cada una de las bobinas del rotor
- $L_{\sigma e}$ es la inductancia de dispersión del estator
- $L_{\sigma r}$ es la inductancia de dispersión del rotor
- L_{me} es la inductancia de magnetización del estator
- L_{mr} es la inductancia de magnetización del rotor
- L_{er} es la inductancia mutua de acoplamiento estator-rotor

La ecuación mecánica que define el comportamiento del motor es dada mediante la segunda Ley de Newton:

$$T_e - T_m = J\ddot{\theta} \quad (2.4)$$

En la Ecuación (2.4), T_m representa el par mecánico de carga, mientras T_e es el par eléctrico, y J es la inercia del eje del motor. El par eléctrico del motor se calcula mediante el principio de trabajos virtuales [33]:

$$T_e = \frac{\partial W'_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} [i]^t [\tau(\theta)] [i] \quad (2.5)$$

Al reemplazar la Ecuación (2.5) en la Ecuación (2.4) se obtiene la Ecuación (2.6) que junto con Ecuación (2.3) modelan el comportamiento de la máquina de inducción en coordenadas primitivas:

$$\frac{1}{2}[i]^t[\tau(\theta)]^t[i] - T_m = J\ddot{\theta} \quad (2.6)$$

En estado estable, la Ecuación (2.4) es igual 0 y el par eléctrico se aproxima al par de carga.

2.3.3 Vectores espaciales

El modelo del motor de inducción en coordenadas primitivas esta definido por matrices simétricas o cíclicas. Estas matrices se desacoplan mediante la transformación de componentes simétricas, descritas por las Ecuaciones (2.7) y (2.8), cuya característica de ser hermitiana permite que sea conservativa en potencia:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_+ \\ x_- \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \\ 1 & e^{j\frac{4\pi}{3}} & e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j\frac{4\pi}{3}} & e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_+ \\ x_- \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_+ \\ x_- \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

La transformación da como resultado sistemas independientes, estos sistemas son secuencia cero, positiva y negativa, de acuerdo con la Ecuación (2.7). El sistema de secuencia cero posee un valor nulo a menos que la sumatoria instantánea de tensiones o corrientes sea diferente de cero. Los sistemas de secuencia positiva y negativa son conjugados entre sí. Por esta característica se representa el modelo del motor utilizando solo la secuencia positiva, en la Ecuación (2.9):

$$\vec{x}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

La transformación que usa la secuencia positiva se le denominó transformación a vectores espaciales [33]. Los vectores espaciales que se obtienen con la transformación pueden representar un sistema de tensiones, corrientes o flujos trifásicos mediante un vector en el espacio, cuya posición y magnitud dependen del tiempo [33].

Al usar la transformación a vectores espaciales al modelo de la máquina de inducción trifásica se reduce el número de ecuaciones de siete a tres y se reduce su complejidad matemática [33].

$$\begin{bmatrix} \vec{v}_e \\ \vec{v}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} L_e & M_{er}e^{j\theta} \\ M_{er}e^{j\theta} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} \right) \quad (2.10)$$

$$M_{er} \Im m \left\{ \vec{i}_e (\vec{i}_r e^{j\theta})^* \right\} - T_m(\dot{\theta}) = J\ddot{\theta} \quad (2.11)$$

Donde:

$$\vec{v}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a^e & v_b^e & v_c^e \end{bmatrix}^t$$

$$\vec{i}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^e & i_b^e & i_c^e \end{bmatrix}^t$$

$$\vec{v}_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a^r & v_b^r & v_c^r \end{bmatrix}^t$$

$$\vec{i}_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^r & i_b^r & i_c^r \end{bmatrix}^t$$

$$L_e = L_{\sigma e} + \frac{3}{2}L_{me}$$

$$L_r = L_{\sigma r} + \frac{3}{2}L_{mr}$$

$$M_{er} = \frac{2}{3}L_{er}$$

Las expresiones que se obtienen poseen una dependencia de la posición angular θ que es eliminada explícitamente al referir las variables del rotor al estator [33]. El modelo de la máquina de inducción trifásica en el sistema de coordenadas espaciales entonces está dado por el par de ecuaciones en (2.12):

$$\begin{bmatrix} \vec{v}_e \\ \vec{v}_r^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e \\ \vec{i}_r^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_e & M_{er} \\ M_{er} & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i}_e \\ \vec{i}_r^e \end{bmatrix} - j\dot{\theta} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M_{er} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e \\ \vec{i}_r^e \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$M_{er} \Im m \left\{ \vec{i}_e (\vec{i}_r^e)^* \right\} - T_m(\dot{\theta}) = J\ddot{\theta}$$

Donde:

$$T_e = M_{er} \Im m \left\{ \vec{i}_e (\vec{i}_r^e)^* \right\} \quad (2.13)$$

Por otro lado, el voltaje del rotor en el marco de referencia del estator (\vec{v}_r^e) es cero debido a que las bobinas del rotor se encuentran internamente cortocircuitadas.

2.3.4 Estimación del par eléctrico y parámetros del motor

La información que brinda la impedancia instantánea al arranque de un motor de inducción trifásico es suficiente para estimar sus parámetros [20]. Las variables que requieren ser medidas corresponden a las tensiones y corrientes del estator. El método propuesto ajusta los parámetros del modelo dinámico usando una función de error obtenida al comparar la impedancia instantánea obtenida de las variables medidas y la representación vector espacial de la máquina [20]. Además, mediante este método se estima el par eléctrico del motor y a partir de esta variable su velocidad.

El procedimiento inicia al calcular el vector espacial del flujo del estator mediante la Ecuación (2.14) con las variables medidas y transformadas a vectores espaciales. El valor de la resistencia del estator se puede medir mediante el acceso a los terminales de las bobinas del motor.

$$\vec{\lambda}_e(t) = \int_0^t \left(\vec{v}_e(\tau) - R_e \vec{i}_e(\tau) \right) d\tau \quad (2.14)$$

Posteriormente se calcula el par eléctrico propuesto por [20] que se presenta en la Ecuación (2.15), esta expresión es equivalente matemáticamente a la Ecuación (2.13) con la diferencia que explícitamente no se requiere conocer las corrientes que circulan por el rotor.

$$T_e = n_p (\vec{\lambda}_e \times \vec{i}_e) \quad (2.15)$$

Debido a que la prueba es en vacío, es decir sin carga conectada al motor, solo las pérdidas mecánicas por fricción están actuando como carga mecánica, estas pérdidas pueden ser modeladas como una función lineal de la velocidad angular ω_m , es decir:

$$T_m = k\omega_m \quad (2.16)$$

donde k es el coeficiente de fricción.

Por tanto, la Ecuación (2.4) se convierte en:

$$T_e = J\ddot{\theta} + k\omega_m \quad (2.17)$$

Debido a que la máquina alcanza su estado estable, se puede usar esta condición para identificar en la integral del par eléctrico, el momento de inercia y el coeficiente de fricción. En efecto, observe que:

$$\int T_e(t) dt = J\omega_m(t) + \int k\omega_m(t) dt \quad (2.18)$$

Dado que el motor arranca en vacío, la velocidad mecánica ω_m es muy similar a la velocidad sincrónica ω_s , por lo que se puede decir que $\omega_m = \omega_s$. Entonces, para instantes de tiempo $t \geq t_0$ la integral del par eléctrico presenta una función rampa a lo largo del tiempo, cuya pendiente es $k\omega_s$, mientras su desplazamiento resulta ser la constante $J\omega_s$ compuesta por el momento de inercia y la velocidad sincrónica, tal y como se muestra en la Figura 2.12. En [38] se menciona que este método es excelente para máquinas de alta tensión y cuyos rotores poseen barras oblicuas.

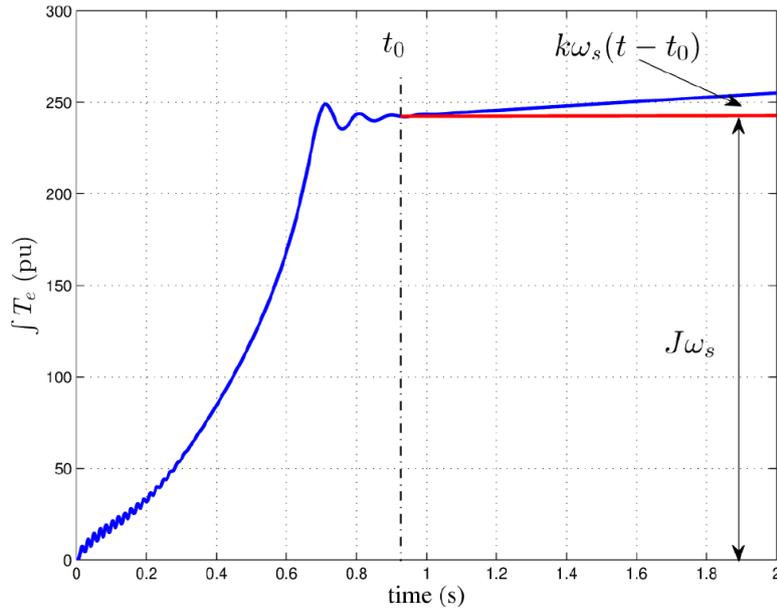


Figura 2.12: Estimación de coeficiente de fricción k y momento de inercia J [20]

La velocidad mecánica se estima al integrar numéricamente el par acelerante ($T_e - T_m$) [20] y dividir por el momento de inercia J , en la ecuación 2.18. Este procedimiento consiste en reescalar y ajustar el par acelerante [38] tomando en cuenta el instante t_0 en el cual inicia el régimen estacionario, la expresión 2.19 muestra lo descrito. La gráfica de la estimación de la velocidad mecánica se muestra en la Figura 2.13, aquí se observa que en régimen estacionario la velocidad se aproxima a la unidad es decir la base del sistema en por unidad, esto sucede debido a la condición del motor en la que se encuentra sin carga conectada.

$$\omega_m(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \int \frac{T_e(t) - k\omega_m(t)}{J} dt & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{\int T_e(t) dt - k\omega_s t}{J} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Posteriormente se determina la impedancia instantánea a partir de las tensiones y corrientes medidas, ver Ecuación (2.20), a esta variable se le llamará impedancia medida. La impedancia instantánea basada en el modelo matemático del motor se presenta en la Ecuación (2.21), a esta variable se le llamará impedancia calculada y corresponde a un

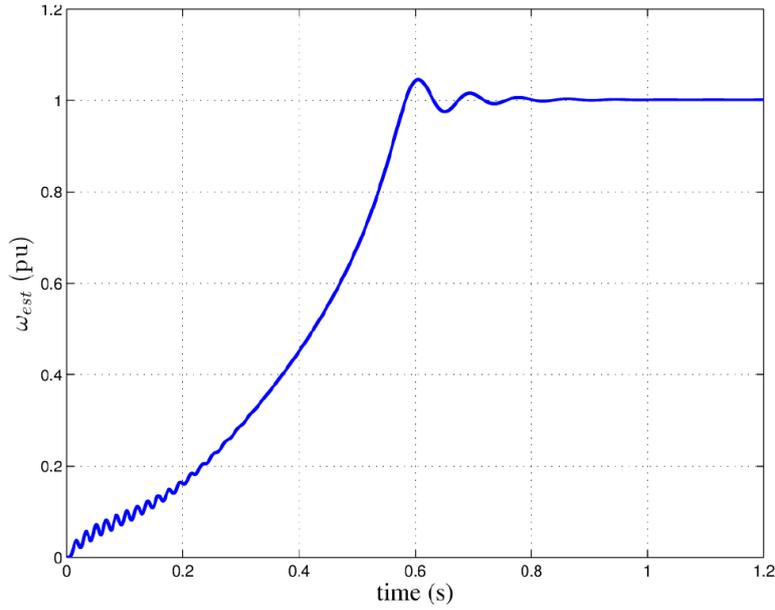


Figura 2.13: Estimación de velocidad mecánica del motor [20]

motor cuyo rotor es de tipo jaula de ardilla simple o de rotor bobinado, donde $\hat{L}_e = L_e - L_{er}^2/L_r$. La Ecuación (2.21), además requiere conocer la primera derivada del vector espacial de corriente del estator, esta variable puede ser determinada fácilmente al derivar numéricamente el vector espacial de corriente del estator.

A continuación se minimiza una función de costo que permite encontrar los parámetros que mejor definen el comportamiento del motor. La función de costo empleada por [20] para resolver este problema de optimización viene determinada por el cuadrado del error relativo de dos grupos de datos, de acuerdo con la Ecuación (2.22):

$$z_{med} = \frac{\vec{v}_e}{\vec{i}_e} \quad (2.20)$$

$$z_{cal} = R_e + R_r \frac{L_e}{L_r} - jn_p \omega_m \hat{L}_e + \hat{L}_e \frac{d \vec{i}_e}{dt} - \left(\frac{R_r}{L_r} - jn_p \omega_m \right) \frac{\vec{\lambda}_e}{\vec{i}_e} \quad (2.21)$$

$$\Psi = \sum_{k=1}^n \left(\frac{z_{med_k} - z_{cal_k}}{z_{med_k}} \right) \left(\frac{z_{med_k} - z_{cal_k}}{z_{med_k}} \right)^* \quad (2.22)$$

Para estimar los parámetros de la máquina de inducción de doble jaula de ardilla o de barras profundas, se puede usar la propuesta de [38] respecto al modelo de la impedancia instantánea. En [38] se muestra que los parámetros obtenidos basados en esta impedancia presentan menor error respecto a los parámetros que se consiguen con el modelo de jaula simple. Este método de estimación sigue el mismo procedimiento descrito previamente para el modelo de jaula simple, más el cálculo de las variables tales como la segunda derivada del vector espacial de la corriente del estator, la primera derivada del vector

espacial de tensión, el cuadrado de la velocidad mecánica estimada y su derivada. El modelo matemático presenta una mayor complejidad en su implementación.

2.3.5 Medición de resistencia eléctrica

Para determinar la resistencia eléctrica de un devanado del motor se utiliza el método establecido por la IEEE Std 118-1978 denominado *método volto-amperométrico* o de caída de potencial. Para esta prueba se requiere una fuente de CC, un amperímetro y un voltímetro. La fuente de CC deberá limitar la corriente suministrada o podrá ser usado un resistor de corriente limitadora. La conexión de los equipos se describe en el esquema de la Figura 2.14.

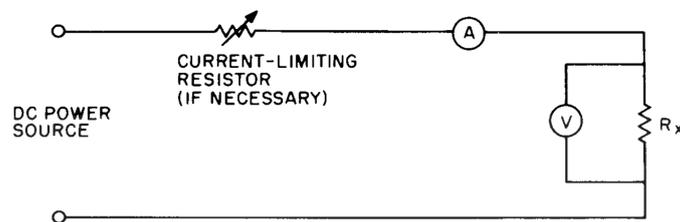


Figura 2.14: Medida volto-amperométrica para resistores de bajo valor [39]

Posteriormente con las medidas registradas se computa la resistencia eléctrica del devanado mediante la Ecuación (2.23):

$$R_x = \frac{V}{I - V/R_V} \quad (2.23)$$

donde V representa la tensión medida por el voltímetro, I la corriente que atraviesa el devanado, R_x la resistencia del devanado y R_V es la resistencia interna del voltímetro que para la mayoría de casos puede ser considerada como infinita.

El valor de la resistencia eléctrica se afecta por la temperatura del motor. Debido a que se desea conocer el valor de resistencia cuando el motor se encuentra en funcionamiento, es necesario corregir el valor obtenido durante la prueba realizada. La Ecuación (2.24) permite esta corrección [40]:

$$R_s = \frac{R_x(t_s + k)}{t_t + k} \quad (2.24)$$

Donde:

- R_s es la resistencia del devanado corregido a temperatura específica, t_s , en Ω .
- t_s es la temperatura específica para la corrección de la resistencia, en $^{\circ}\text{C}$.
- R_x es el valor de la resistencia del devanado a temperatura de la prueba, t_t , en Ω .

- t_t es la temperatura del devanado durante la prueba de medición de resistencia en °C.
- k es 234.5 para el cobre, 100% de conductividad de IACS (International Annealed Copper Standard), o 225 para el aluminio, basado en una conductividad del volumen del 62%.

Si no se conoce la temperatura de corrección (t_s) se puede dar una aproximación de acuerdo a la clase de aislamiento que poseen los devanados del motor. Las clases de aislamiento expresan límites de temperatura que aseguran la vida útil del motor. La norma internacional IEC 60085 establece la clasificación térmica de los materiales de aislamiento de maquinaria rotativa [41]. En la Tabla 2.3 se muestra esta clasificación [41] y se detallan la composición de la temperatura total [42].

Tabla 2.3: Clasificación térmica del aislamiento para maquinas con Factor de servicio 1.15

Temperaturas del sistema de aislamiento (°C) FS=1.15					
Clase	$T_{ambiente}$	ΔT	F.S.	T_{max}	T_{total}
A	40	40	+10	+15	105
B	40	65	+10	+15	130
F	40	90	+10	+15	155
H	40	115	+10	+15	180

De acuerdo con la Tabla 2.3, por ejemplo, si la temperatura del ambiente es de 40°C, la clase F permite un incremento de 90°C en el material, cuando el factor de servicio es 1.15 aumenta la temperatura en 10°C más y T_{max} representa el punto más caliente que ocurre en el devanado, al sumar estas componentes se obtiene la temperatura por clase. Cuando la temperatura ambiente sea menor a 40°C, se puede usar como aproximación la temperatura ambiente disponible y sumar todos los incrementos de temperatura anteriormente descritos.

2.3.6 Sistema adimensional de unidades

El sistema adimensional de unidades, o también llamado sistema en *por unidad*, es empleado para expresar numéricamente las magnitudes, parámetros y ecuaciones que definen el comportamiento de un sistema. En el ámbito eléctrico este sistema es ampliamente usado en sistemas eléctricos de potencia y maquinas eléctricas, debido a que permite una reducción en cálculos y da una mayor comprensión de sistemas que manejan diferentes valores nominales. En este nuevo sistema es necesario definir la potencia base y tensión base. Debido al rendimiento que poseen las máquinas de inducción existen tres posibilidades comunes en la selección de la potencia base, la selección dependerá de la aplicación y del enfoque del investigador. Para este proyecto se ha planteado usar como base la potencia mecánica nominal en el eje mecánico de la máquina P_{eje_n} . De esta manera, cuando la máquina se encuentra funcionando en su punto de operación nominal, la tensión y po-

tencia en el eje del rotor son la unidad. La selección de la tensión base es usualmente tomada como la tensión línea a línea nominal V_n . Con la potencia y tensión bases, S_B y V_B respectivamente, quedan definidas la corriente e impedancia bases, I_B y Z_B , respectivamente. Ya que el circuito equivalente de la máquina de inducción representa una fase de la máquina, la impedancia base del sistema debe ser monofásica [33].

La transformación al sistema por unidad se realiza al dividir las magnitudes de un sistema para sus respectivas bases, estas bases están definidas mediante las siguientes ecuaciones:

$$S_B = P_{ej} e_n \quad (2.25)$$

$$V_B = V_n \quad (2.26)$$

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} \quad (2.27)$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{V_B}{\frac{S_B}{\sqrt{3}V_B}} = \frac{V_B^2}{S_B} \quad (2.28)$$

Además, para determinar el par base es necesario definir la velocidad eléctrica base ω_{B_e} y la velocidad mecánica base ω_{B_m} . La velocidad eléctrica base se define mediante:

$$\omega_{B_e} = \omega_e = 2\pi f_e \quad (2.29)$$

donde ω_e y f_e son la velocidad angular y frecuencia ideales de la red eléctrica. La frecuencia de la red eléctrica por lo general es 60 Hz o 50 Hz dependiendo del caso. La velocidad mecánica base usualmente es la velocidad sincrónica del campo magnético rotatorio ω_s :

$$\omega_{B_m} = \omega_s = \frac{\omega_{B_e}}{p} \quad (2.30)$$

donde, p representa el número de pares de polos. De esta manera, el par base es:

$$T_B = \frac{S_B}{\omega_{B_m}} \quad (2.31)$$

Una vez definida la velocidad eléctrica base, el tiempo base se establece de manera automática. El ángulo base será siempre un radian.

$$\omega_{B_e} = \frac{\alpha_B}{t_B} \Rightarrow t_B = \frac{\alpha_B}{\omega_{B_e}} = \frac{1 \text{ Rad}}{\omega_{B_e}} \quad (2.32)$$

La inductancia base L_B se calcula de la siguiente manera:

$$L_B = \frac{Z_B}{\omega_{B_e}} \quad (2.33)$$

Además, es necesario establecer bases para los parámetros mecánicos como son el momento de inercia base J_B y el coeficiente de fricción mecánica base k_{loss_B} :

$$J_B = \frac{S_B}{(\omega_{B_m})^2 \omega_{B_e}} \quad (2.34)$$

$$k_{loss_B} = \frac{S_B}{(\omega_{B_m})^2} \quad (2.35)$$

Será necesario multiplicar las magnitudes en el sistema en por unidad por sus respectivas bases para regresar al sistema de magnitudes físicas.

2.4 Espectro de amplitud y espectro de potencia

La transformada de Fourier permite expresar una señal que se da en el dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia [43]. La aplicación de esta transformada para señales que son discretas en el tiempo se denomina transformada discreta de Fourier (DFT, del inglés Discrete Fourier Transform). La DFT de una señal discreta en el tiempo $x(n)$ se expresa mediante la notación X_k o $X(k)$ o $X(\omega_k)$ y esta definida en el intervalo de tiempo discreto $0 \leq n \leq N - 1$, donde N es el número de datos, Ecuación (2.36) [43].

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi n k}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (2.36)$$

La DFT esta compuesta por valores complejos asociados a frecuencias que van desde el límite de Nyquist negativo al límite de Nyquist positivo [44]. Cuando la serie de datos de tiempo posee valores reales, la DFT tendrá simetría par, por esta razón, comúnmente es usada solo un lado de la transformada [44].

Calcular la DFT directamente desde su definición resulta en un proceso computacionalmente costoso, lento e inaplicable para ciertas aplicaciones en tiempo real [43], [45]. Por lo que se desarrolló un algoritmo que determina la DFT de manera eficiente [45], a este algoritmo se denominó Transformada rápida de Fourier (FFT, del inglés Fast Fourier Transform). A través de este algoritmo la DFT ha alcanzado numerosas aplicaciones de tratamiento de señales como es el caso del análisis espectral [46], el cual permite identificar componentes frecuenciales prominentes en una señal [47].

El espectro de amplitud resulta de graficar las magnitudes de los coeficientes de la Ecuación (2.36) contra sus respectivos índices de frecuencia, las magnitudes se determinan mediante la ecuación (2.37) [48].

$$A_k = \frac{1}{N}|X(k)| = \frac{1}{N}\sqrt{(\text{Real}[X(k)])^2 + (\text{Imag}[X(k)])^2}, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (2.37)$$

El espectro de amplitud considerando un solo lado de la DFT se determina mediante la Ecuación (2.38), cuyas frecuencias van desde cero al límite de Nyquist positivo.

$$\bar{A}_k = \begin{cases} \frac{1}{N}|X(0)|, & k = 0 \\ \frac{2}{N}|X(k)|, & k = 1, \dots, N/2 \end{cases} \quad (2.38)$$

Sin embargo, los resultados de la DFT en ciertas ocasiones pueden otorgar falsas interpretaciones en la estimación de amplitud de las componentes de frecuencia [46]. Esto ocurre cuando la señal estudiada posee una componente de frecuencia que no corresponde a las frecuencias espaciadas de la DFT, cuyo tamaño de paso esta dado por:

$$\Delta f = \frac{F_s}{N} \quad (2.39)$$

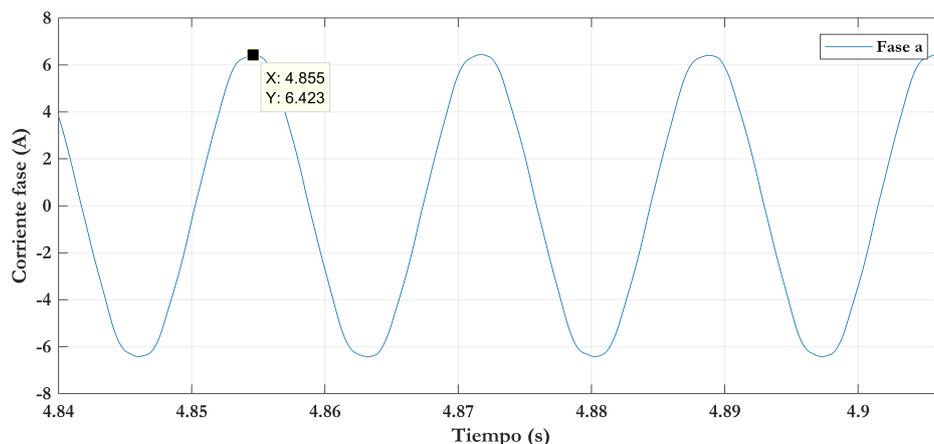
donde F_s es la frecuencia de muestreo. El resultado de la DFT producirá una estimación inexacta de la amplitud de la señal [49]. Este inconveniente se soluciona por lo general con un relleno de ceros al final de la señal, como lo indica la Ecuación (2.40), donde \bar{N} representa la nueva longitud de datos. El método descrito da un espaciamiento de frecuencias más pequeño de la DFT, que permitirá una mejor estimación de amplitud de las componentes de la señal [46].

$$\bar{x} = \begin{cases} x(n) & 0 \leq n \leq N - 1 \\ 0 & N \leq n \leq \bar{N} - 1 \end{cases} \quad (2.40)$$

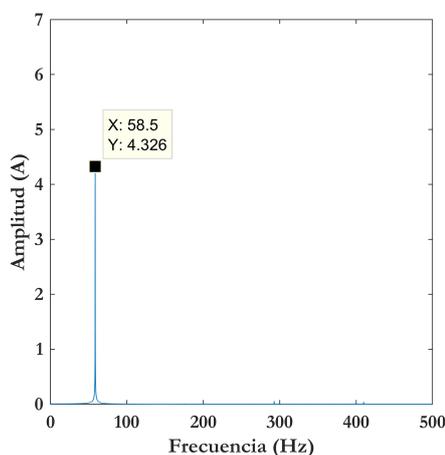
Cabe mencionar que el relleno de ceros proporciona una versión interpolada del espectro con una mejor visualización, no añade nueva información a la señal y tampoco mejora la resolución espectral, la cuál esta ligada a la frecuencia de muestreo y la longitud de datos de la adquisición [49],[48].

En la Figura 2.15(a) se muestra una porción de una señal de corriente eléctrica, esta ha sido medida en un tiempo de 10 segundos a una frecuencia de 50 kHz, se indica la amplitud de la señal sinusoidal. En la Figura 2.15(b) se presenta la DFT de la señal de corriente, mientras en la Figura 2.15(c) se presenta la DFT de la señal aplicada la técnica de relleno de ceros. Al comparar las amplitudes de las Figuras 2.15(b) y 2.15(c) con la amplitud de la Figura 2.15(a), se muestra efectivamente que la técnica de relleno de ceros logra una mejor estimación de la amplitud de la señal.

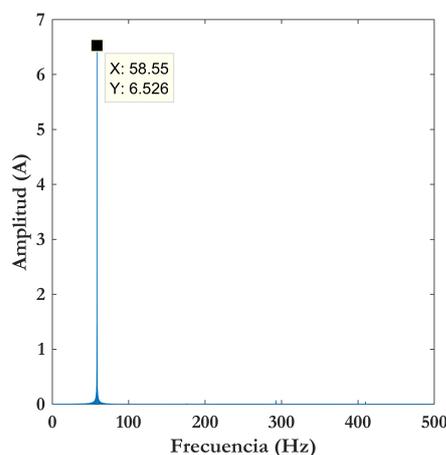
Por otra parte, para obtener el espectro de potencia, se requiere determinar la función de autocorrelación de la señal y a este resultado aplicar la transformada de Fourier. Sin



a) Señal en el dominio del tiempo



b)DFT de la señal de corriente



c)DFT con relleno de ceros de la señal de corriente

Figura 2.15: Técnica para obtener una mejor estimación de amplitud mediante la DFT, a)Señal en el tiempo, b)DFT de la señal, c)DFT con relleno de ceros de la señal

embargo, existe una aproximación directa, que establece que la energía almacenada en una señal analógica $x(t)$, es igual a la integral en el tiempo del cuadrado de la magnitud de la señal [50], ver Ecuación (2.41).

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \tag{2.41}$$

La extensión del teorema adjudicado a Parseval [50], muestra que,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df \tag{2.42}$$

donde el término $|X(f)|^2$ se le llama periodograma, densidad espectral de energía, densidad espectral de potencia ó de manera sencilla espectro de potencia. Por lo tanto,

mediante la DFT, el espectro de potencia es definido mediante la Ecuación (2.43), para sus respectivas frecuencias:

$$P_k = \frac{1}{N^2} |X(k)|^2 = \frac{1}{N^2} \{(\text{Real}[X(k)])^2 + (\text{Imag}[X(k)])^2\}, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (2.43)$$

De manera similar que el espectro de amplitud, el espectro de potencia que considera un solo lado de la DFT, se determina mediante la Ecuación (2.44), cuyas frecuencias van desde cero al límite de Nyquist positivo.

$$\bar{P}_k = \begin{cases} \frac{1}{N^2} |X(0)|^2, & k = 0 \\ \frac{2}{N^2} |X(k)|^2, & k = 1, \dots, N/2 \end{cases} \quad (2.44)$$

Capítulo 3

Marco Metodológico

Este trabajo propone el uso del método descrito en la Sección 2.3.4, el cual estima el par eléctrico de un motor de inducción trifásico, mediante mediciones realizadas de corriente y voltaje con el fin de detectar fallos mecánicos. Considerando que en estado estable el par eléctrico se aproxima al par de carga, este proyecto pretende mostrar que, en efecto, el par eléctrico es sensible a la aparición de fallas en la caja de engranajes acoplada al motor.

El marco metodológico se aplicó en dos motores de inducción disponibles en el laboratorio de vibraciones de la UPS, con carga constante y con carga debida al acople de una caja de engranajes con fallo. Para cumplir con este objetivo se realizaron un conjunto de actividades:

- 1 Simulación del modelo matemático al vacío, y a ante carga constante, usando parámetros académicos, para la comprensión de los métodos matemáticos usados para la estimación del par eléctrico.
- 2 Adquisición de señales de corriente y voltaje en régimen transitorio en ausencia de carga, para estimación de los parámetros del motor.
- 3 Estimación de los parámetros del motor usando las señales adquiridas, con la propuesta en [20].
- 4 Validación del par eléctrico y velocidad estimadas al vacío, a partir de los datos experimentales, con los generados por el modelo matemático.
- 5 Adquisición de señales de corriente y voltaje en estado estable en presencia de carga constante.
- 6 Estimación de los pares de carga constantes usando las señales adquiridas a partir de una propuesta de este proyecto.
- 7 Validación del par eléctrico y velocidad estimadas en presencia de carga constante, a partir de los datos experimentales, con los generados por el modelo matemático ajustado con carga constante.

- 8 Adquisición de señales de corriente y voltaje en estado estable en presencia de carga asociada a una caja de engranajes con fallos.
- 9 Estimación del par eléctrico usando las señales adquiridas.
- 10 Análisis de las respuestas de frecuencia del par eléctrico, para identificar la sensibilidad de dicha señal en las frecuencias de interés asociada a la caja de engranajes.

Específicamente, las actividades 2 a 7, permiten avanzar en la obtención del modelo matemático del motor con caja de engranajes usado en el laboratorio, que será usado posteriormente con fines de investigación para el grupo GIDTEC de la UPS. La Figura 3.1 ilustra el flujo de actividades del marco metodológico, donde las líneas gruesas representan las actividades realizadas en este proyecto y las líneas a trazos representan trabajos futuros que dependen de los resultados aquí logrados:

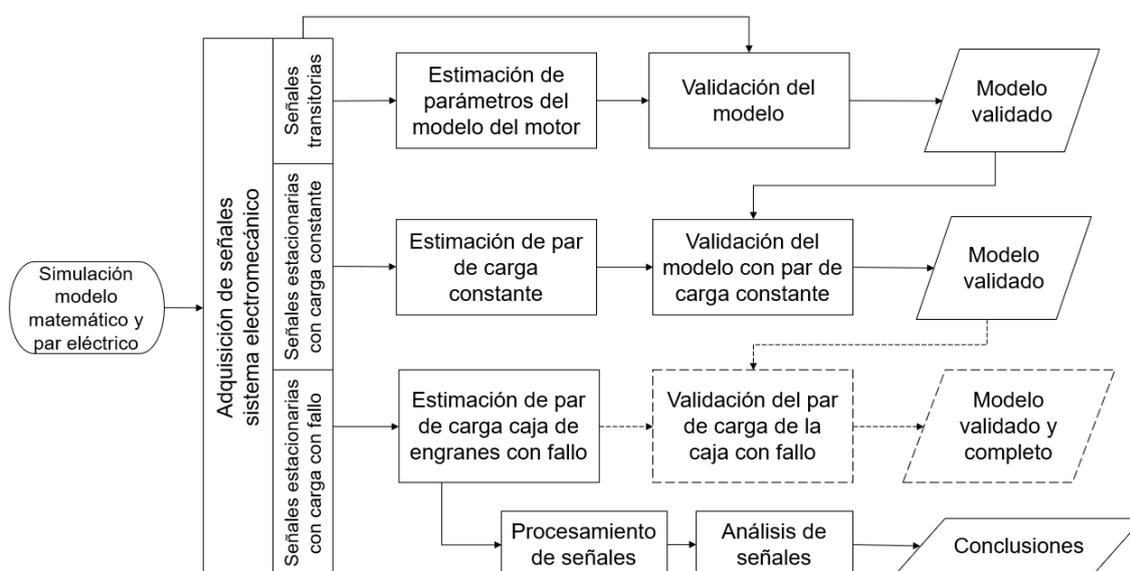


Figura 3.1: Diagrama de flujo de actividades del marco metodológico

3.1 Estimación del par eléctrico y par de carga mediante simulación

3.1.1 Simulación del modelo de la máquina de inducción

El modelo escogido para simulación pertenece a una máquina de inducción trifásica cuyo rotor representa el tipo bobinado o de jaula de ardilla simple. La simulación del motor es realizada tomando el modelo descrito por las Ecuaciones (2.3) y (2.6). El software usado es MATLAB debido a sus herramientas matemáticas y su amplia documentación disponible. Para resolver las ecuaciones diferenciales se requiere de un método numérico. El algoritmo de MATLAB denominado ode45 es un solver de paso fijo, está fundamentado

en una fórmula explícita de Runge-Kutta y puede ser usado para resolver la mayoría de problemas con ecuaciones diferenciales ordinarias [51]. El modelo del motor además requiere el conocimiento de sus parámetros que lo definen, debido a que en esta fase aún no se los ha hallado, se procede a utilizar los proporcionados por [33] con el fin de comprender la implementación del modelo.

El modelo en el sistema en por unidad permite reducir el número de parámetros eléctricos a conocer, de 7 a 5. Esto se debe a que la inductancia de magnetización del estator, inductancia de magnetización del rotor e inductancia mutua de acoplamiento estator-rotor para este sistema son iguales, a continuación su demostración:

$$L_{er} = N_e N_r P_{mer} \quad (3.1)$$

$$L_{me} = N_e^2 P_{me} \quad (3.2)$$

$$L_{mr} = N_r^2 P_{mr} \quad (3.3)$$

Al referir las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) en por unidad, el número de vueltas del estator (N_e) y el número de vueltas del rotor (N_r) son iguales a la unidad. Las permeancias se suponen iguales entre sí, lo que permite que las inductancias mencionadas también lo sean. Los parámetros eléctricos usados para ilustrar el comportamiento de las variables de un motor de inducción, via simulación del modelo matemático, se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros eléctricos para simulación

R_e	R_r	$L_{\sigma e}$	$L_{\sigma r}$	L_{er}	Unidad
0.02	0.06	0.1	0.1	2	Valor por unidad

Los parámetros mecánicos que se requieren conocer del motor son el momento de inercia y el coeficiente de fricción mecánico. El momento de inercia del rotor del motor es proporcionado por [33], mientras que para este caso teórico se ha propuesto ausencia de pérdidas mecánicas por fricción. Además, se considera que el motor está en vacío, por lo que no se introduce par de carga en la Ecuación (2.6). Para efectos de ilustrar el comportamiento del modelo vía simulación del modelo matemático, se usan los valores indicados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros mecánicos para simulación

J	k_{loss}	Unidad
250	0	Valor por unidad

En la Figura 3.2 se presenta la simulación de la tensión, corriente, velocidad del eje y par eléctrico desarrollado por el motor. Las figuras mostradas representan el comportamiento del motor desde que se aplica tensión en los bornes del motor. Estas señales poseen un régimen transitorio para instantes de tiempo menores a 0.35 segundos y estacionario para instantes de tiempo mayores. La inercia del rotor es la que determina el tiempo de duración del régimen transitorio. Además, se aprecia que las señales poseen magnitud en por unidad, es decir, se ha referido sus magnitudes físicas al sistema adimensional de unidades. Cabe mencionar que el par eléctrico no es una variable de retorno del solver implementado en MATLAB, sin embargo, se determina de manera sencilla a través de la ecuación (2.5) después de ejecutar el solver. Dicho par eléctrico se le llamará par eléctrico simulado con efectos de una mayor comprensión en el texto.

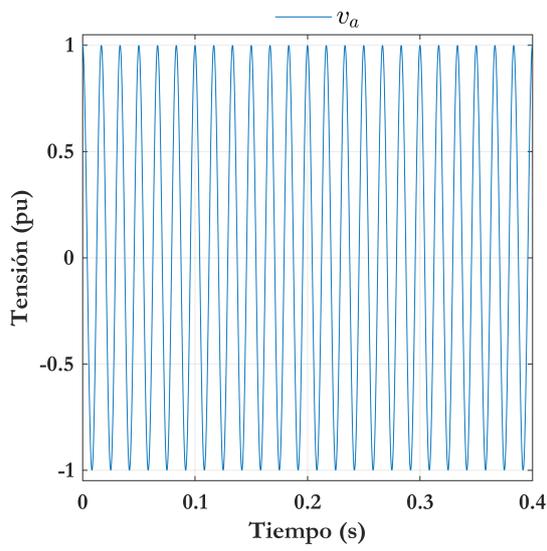
La Figura 3.2(a) muestra una de las tensiones trifásicas balanceadas de fase que es aplicada al estator del motor. La Figura 3.2(b) muestra una de las señales de corriente que son absorbidas. Las señales de corriente al inicio presentan oscilaciones de gran amplitud que corresponden al fenómeno conocido como *corriente de inrush*. Este fenómeno ocurre debido a la energización de la máquina, sus amplitudes no se modifican por la carga que sea conectada al eje del motor. Por otra parte, en régimen estacionario la amplitud de la corriente absorbida por el motor aumentará entre mayor sea la carga que se requiera movilizar.

En la Figura 3.2(c) se observa que la velocidad del motor aumenta progresivamente hasta alcanzar el régimen estacionario. La velocidad del motor en vacío en régimen estacionario es muy cercana a la velocidad de sincronismo. Dependiendo de la carga conectada se obtendrá una velocidad diferente debido al principio de funcionamiento de esta máquina. El efecto de inrush también es apreciado en esta señal como pequeñas oscilaciones que se muestran al inicio.

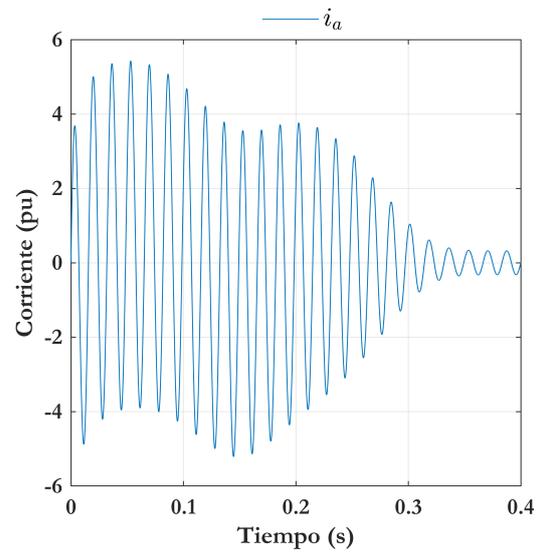
En la Figura 3.2(d) se presenta el comportamiento del par eléctrico. Es necesario mencionar que se simula el motor en ausencia de carga, por lo que T_m en la ecuación (2.6) es cero. Así, en régimen transitorio las oscilaciones del par eléctrico ocurren debido a la aceleración del motor, mientras en régimen estacionario debido a que la aceleración de la máquina ha decaído a cero, el par eléctrico también es cero.

3.1.2 Estimación del par eléctrico y par de carga

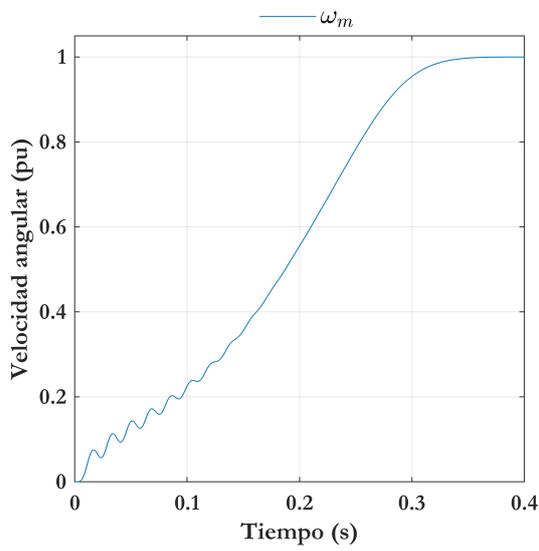
El par eléctrico del motor es determinado mediante las señales de tensión y corriente trifásicas obtenidas a partir del modelo. Además, es necesario conocer la resistencia eléctrica de una de sus bobinas. Primeramente es calculado el enlace del flujo magnético del estator mediante la Ecuación (2.14). Debido a las condiciones iniciales de integración [36], el enlace de flujo resultante posee una componente de corriente continua (CC) que



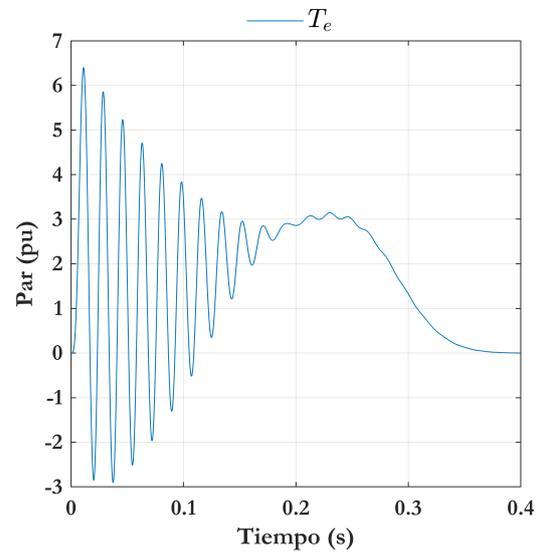
(a) Tensión de la fase a



(b) Corriente de la fase a



(c) Velocidad mecánica del motor



(d) Par eléctrico

Figura 3.2: Señales del motor simuladas en condición en vacío

produce que el vector espacial se descentre del origen del plano complejo. Para solucionar este inconveniente se ha implementado un filtro Butterworth, el cual identifica la componente CC de la señal y la elimina. En la Figura 3.3 se muestra el enlace de flujo magnético centrado y sin centrar.

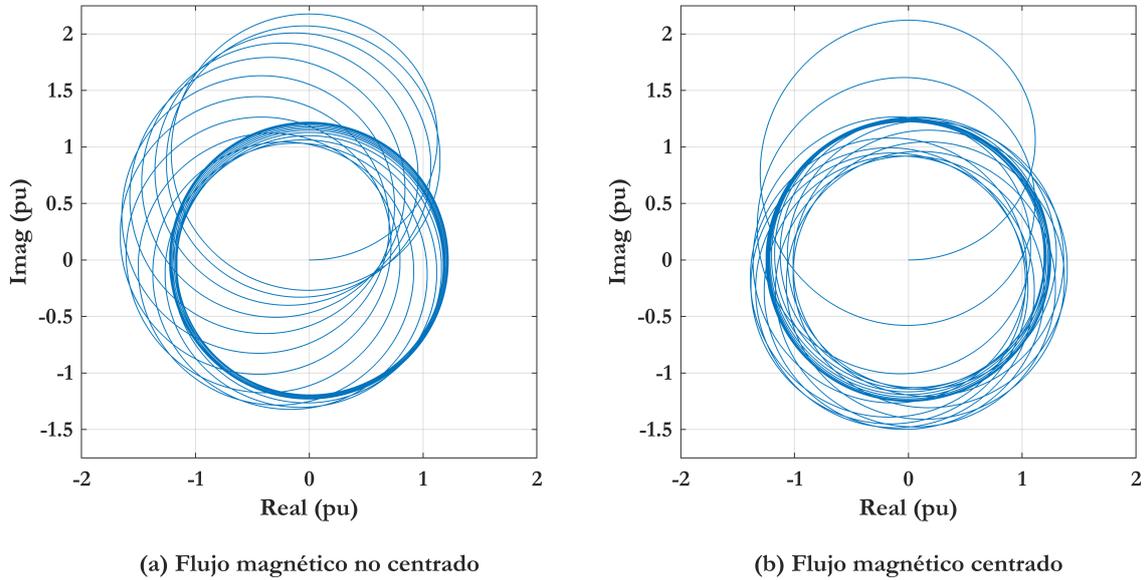


Figura 3.3: Vector espacial del enlace de flujo del estator

Una vez centrado el enlace de flujo magnético del estator, se procede a calcular el par eléctrico mediante la Ecuación (2.15), a esta variable resultante se le llamará par eléctrico estimado. En la Figura 3.4(a) se presenta el par eléctrico estimado y su comparación con la señal de par eléctrico simulada, ver Ecuación (2.5), obtenida en la Sección 3.1.1. Esta figura muestra que el filtro aplicado al vector espacial del enlace de flujo, modifica ligeramente el par eléctrico estimado mientras dura el transitorio del motor, sin embargo en el régimen estacionario se obtiene una excelente aproximación.

En la Figura 3.4(b) se presenta una comparación del par eléctrico simulado y estimado al introducir en el modelo del motor un par de carga constante $T_m = T_L$ en la Ecuación (2.6), esto es:

$$T_e - T_L = J\ddot{\theta} \quad (3.4)$$

La simulación del comportamiento del motor se ha realizado de manera similar que en la Sección 3.1.1. Se han empleado los mismos parámetros mecánicos de la Sección 3.1.1, es decir el momento de inercia y el coeficiente de fricción, ver Tabla 3.2.

Al igual que en la Figura 3.4(a), la Figura 3.4(b) muestra que el filtro aplicado al vector espacial del enlace de flujo cambia ligeramente el par eléctrico estimado mientras continua el transitorio del motor, pero se puede obtener una excelente aproximación en estado estacionario. El par de carga constante introducido en el modelo corresponde a un

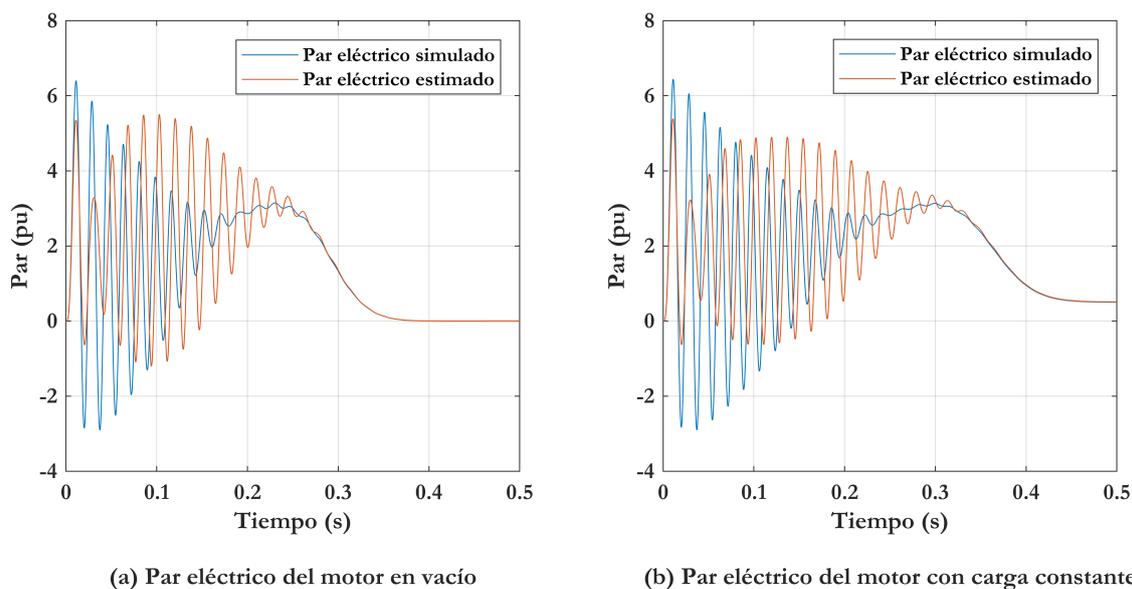


Figura 3.4: Comparación del par eléctrico modelado y estimado en condición del motor a) en vacío y b) con carga

valor de 0.5 en por unidad, esta magnitud es apreciada en la señal debido a la igualdad a cero de la Ecuación (3.4) en régimen estacionario ante velocidad constante.

3.2 Adquisición de señales y creación de bases de datos

En el banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca bajo condiciones reales controladas se levantaron dos bases de datos del sistema electromecánico. Los datos registrados corresponden a señales de corriente, tensión, velocidad de entrada y salida, vibración, acústica y emisión acústica. Las señales acústicas y de emisión acústica no han sido objeto de estudio para este proyecto.

Las bases de datos comprenden una configuración del sistema electromecánico distinta: (1) motor conectado a una carga constante y (2) motor con carga debido al acoplamiento de la caja de engranajes con fallo. Para esto se establecieron dos planes y protocolos experimentales. En los planes experimentales se establece el levantamiento de las señales a velocidad constante del motor. Luego de establecidos los planes y protocolos se ensambló la configuración mecánica de cada plan para verificar la línea base de cada señal de monitoreo que indica que el sistema está ensamblado adecuadamente y se puedan adquirir los datos mediante programas desarrollados en los programas LabVIEWTM y MATLABTM.

Adicionalmente, se realizó la adquisición de señales de corriente y voltaje en estado transitorio en ausencia de carga que se usará para la identificación de los parámetros del motor.

3.2.1 Banco de pruebas experimental

El banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca posee el equipamiento necesario para simular desperfectos que ocurren en la industria como son desbalanceo, desalineación y combinaciones de fallos de rodamientos y engranes de maquinaria rotativa [24]. Las cinco unidades principales que comprende el banco son:

- Unidad de mando
- Unidad motriz
- Unidad de carga
- Unidad de sistemas rotativos
- Unidad de adquisición de datos

En la Figura 3.5 se presenta la disposición de las unidades que conforman el banco.

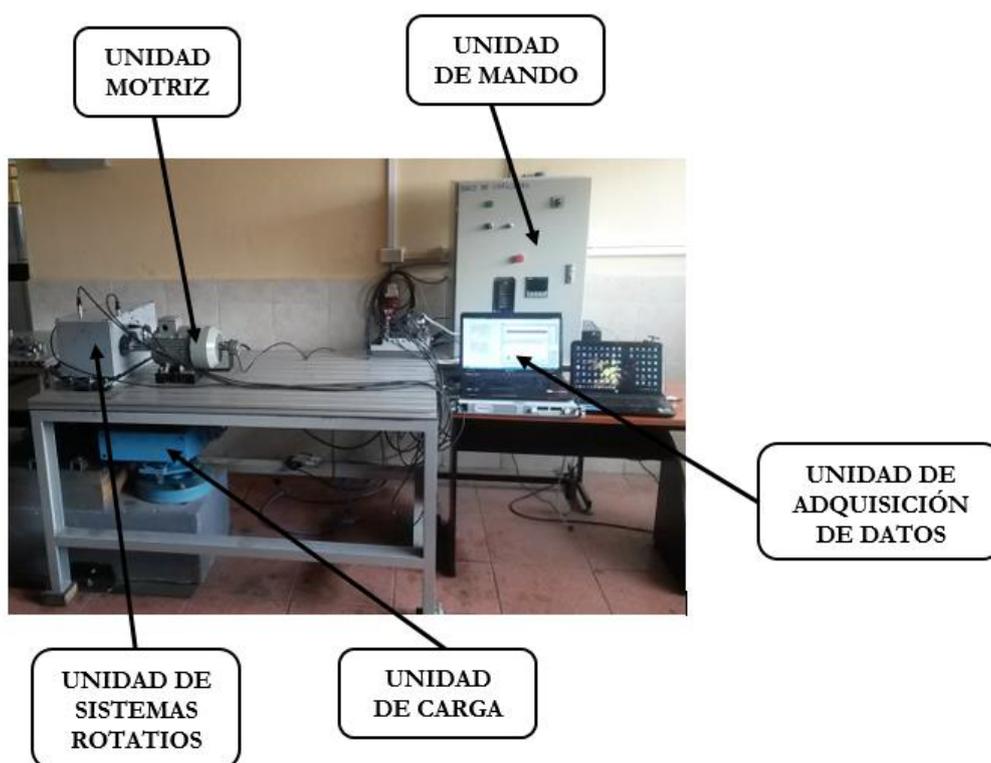


Figura 3.5: Banco de vibraciones [24]

3.2.2 Plan experimental: Línea base del motor a velocidad constante

Para esta base de datos se trabaja con dos motores, una polea con su correa trapezoidal y un freno magnético. Los instrumentos de medida que están presentes son un tacómetro, dos acelerómetros, un sensor de emisión acústica, tres pinzas amperométricas, seis sensores de voltaje y un micrófono condensador que se conectan a una computadora portátil a través de un chasis de adquisición de datos (DAQ, NI cDAQ) en un programa desarrollado por miembros del grupo de investigación GIDTEC de la UPS.

Este plan denominado “Línea base del motor”, elaborado en el GIDTEC, guarda los datos registrados del sistema electromecánico cuando las condiciones de funcionamiento del equipo son aceptables y estables, de tal manera que permita detectar cambios cuando los fallos sean implementados a través de la carga conectada al motor. Las características del equipamiento mecánico usado en el plan experimental se describe en la Tabla 3.3. Las características de los motores son obtenidas de sus respectivas placas, y mostradas en la Tabla 3.4. Además, el fabricante provee el parámetro de momento de inercia de cada motor en su hoja de datos. La configuración interna de los devanados del motor usada en esta base se denomina doble estrella paralelo. Esta configuración corresponde a la tensión disponible en el laboratorio de 220 Voltios.

Tabla 3.3: Características del equipamiento mecánico usado en el plan experimental

Características del equipo mecánico	
Motor A:	Siemens 1LA7 096-6YA60 2Hp
Motor B:	Siemens 1LA7 090-4YA60 2Hp
Acople:	Acople flexible
Tipo de carga	Electromagnética a través de transmisión por correa
Tipo de transmisión:	Polea - Correa
Relación de reducción:	1:1
Tipo de correa:	Correa trapezoidal

Tabla 3.4: Características de los motores del plan experimental

Características de los motores		
Motor:	Motor A	Motor B
Marca:	Siemens	Siemens
Denominación:	1LA7 096-6YA60	1LA7 090-4YA60
Tipo de motor:	Trifásico	Trifásico
Potencia nominal:	2 Hp	2 Hp
Conexiones:	YY / Y	YY / Y
Tensión nominal	220 / 440 V	220 / 440 V
Corriente nominal	7.8 / 3.9 A	7.0 / 3.5 A
Cos ϕ	0.77	0.80
Número de pares de polos	3	2
Velocidad nominal	1110 rpm	1700 rpm
Clase de aislamiento	Clase F	Clase F
Momento de inercia	0.0035 $kg.m^2$	0.0028 $kg.m^2$

En la Figura 3.6 se presenta la disposición de los elementos mecánicos que conforman el experimento. La Figura 3.7 presenta un diagrama de la localización de los sensores, mientras la Figura 3.8 muestra su configuración con los módulos.

Los señales son tomadas en una duración de 10 segundos, se realizan 15 repeticiones para cada una de las pruebas. Se usan los motores A (M1) y B (M2) a velocidad constante, conectados a la red eléctrica mediante un interruptor mecánico. Las cargas introducidas por el freno magnético son a tensiones 0V, 10V y 20V que representan las cargas L1,

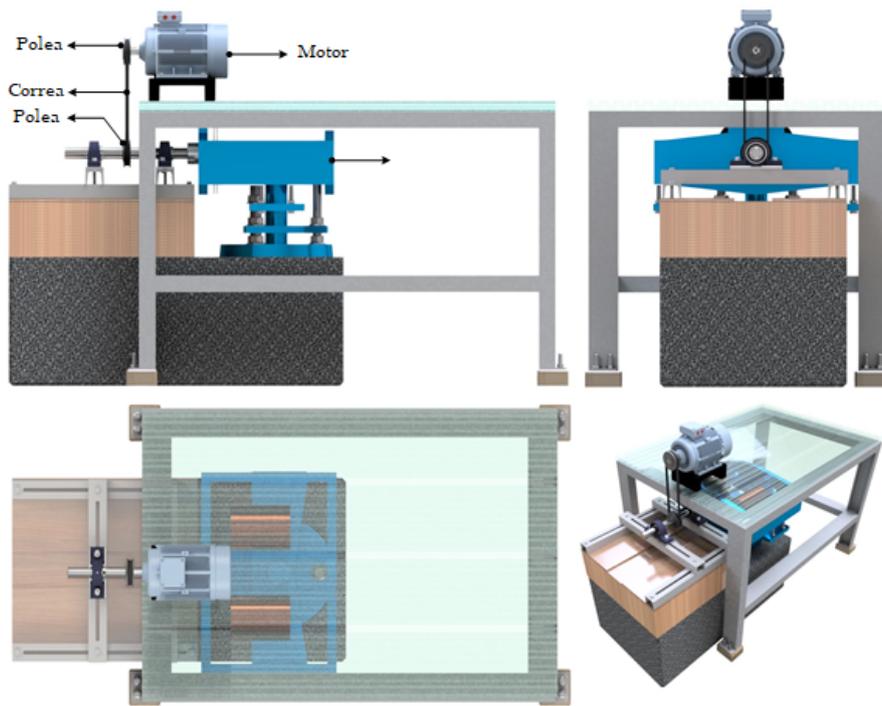


Figura 3.6: Disposición de los elementos mecánicos del experimento

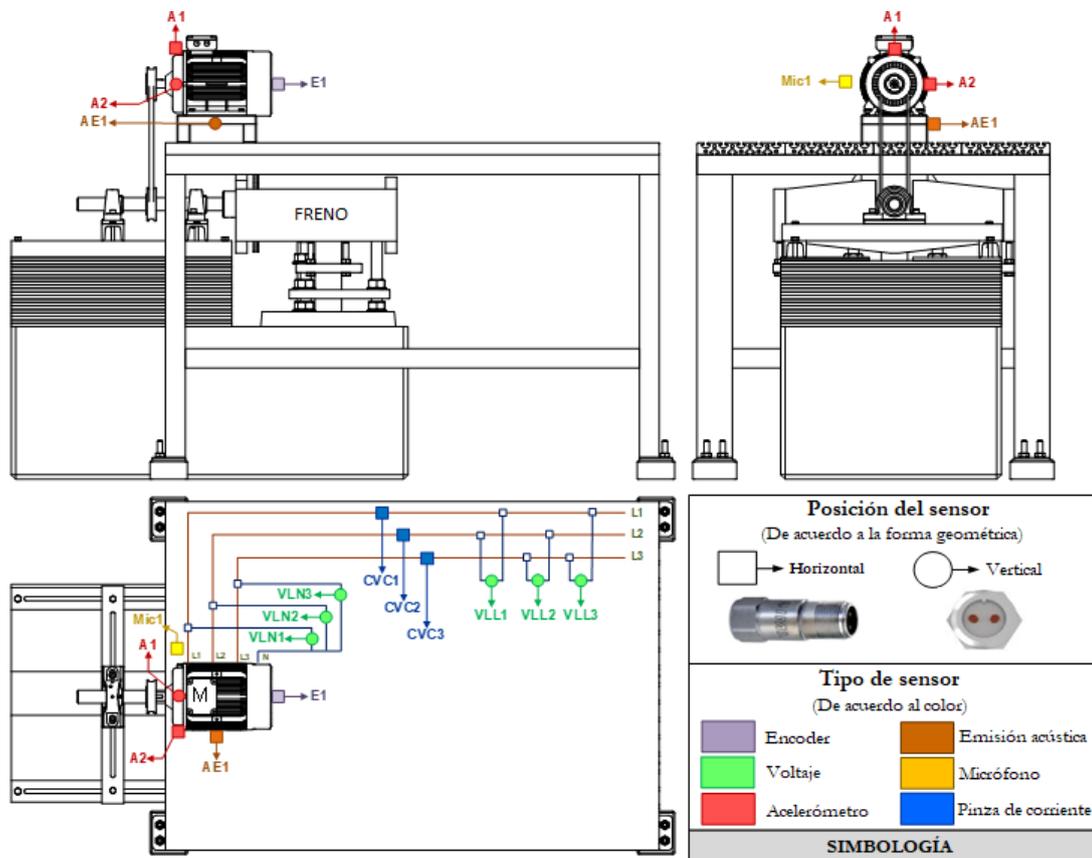


Figura 3.7: Montaje esquemático de sensores

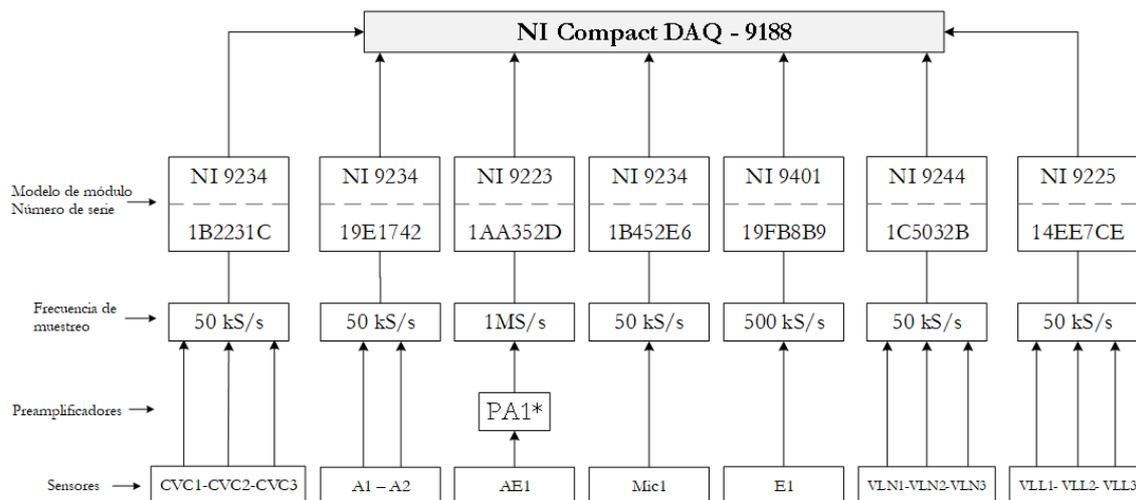


Figura 3.8: Configuración de sensores y módulos

L2 y L3 respectivamente generadas por el freno. Los valores en Nm (Newton-metro) de estas cargas constantes serán estimadas en este proyecto. En la Tabla 3.5 se presenta las combinaciones mencionadas. En la carga L1 solo se usa el motor sin ningún acoplamiento, polea u otro accesorio mecánico. Para las cargas L2 y L3 el motor se conecta al freno magnético mediante la polea y la correa. El número total de muestras de la base es 90.

Tabla 3.5: Características de los motores del plan experimental

Canales	Repetición	Motor	Cargas	Códigos de falla
Todos	R1	M1	L1	P1
	R2	M2	L2	
	R3		L3	
	R4			
	R5			
	R6			
	R7			
	R8			
	R9			
	R10			
	R11			
	R12			
	R13			
	R14			
	R15			

El plan experimental completo esta disponible en el grupo de investigación GIDTEC.

3.2.3 Plan experimental: Severidad de fallo de engranaje recto a velocidad constante

Para esta base de datos hay dos motores, una caja de engranes de una etapa, una polea con su correa trapezoidal y un freno magnético. En cuanto a los instrumentos

de medida, están presentes un encoder láser, un tacómetro, cuatro acelerómetros, dos sensores de emisión acústica, tres pinzas amperométricas, seis sensores de voltaje y dos micrófonos de condensador que se conectan a una computadora portátil a través de un chasis de adquisición de datos (DAQ, NI cDAQ) en un programa desarrollado por miembros del grupo de investigación. En este plan las señales generadas con diferentes fallos son tomadas de la caja de engranajes y del motor.

Las características del equipamiento mecánico usado son las mismas descritas en la Tabla 3.3 y se añade las características de la caja de engranajes mostradas en la Tabla 3.6. Los motores usados en esta base son los mismos que se usaron en la base anterior, Tabla 3.4, estos son conectados en configuración doble estrella paralelo (220V).

Tabla 3.6: Características de la caja de engranajes del plan experimental "Severidad de fallo de engranaje recto a velocidad constante"

Especificación del equipo mecánico	
Caja de engranes:	Una fase con engranajes rectos
Rodamientos:	NTN 6005 Z2C3
Tipo de correa:	Correa trapezoidal
Tipo de lubricación:	Baño de aceite
Aceite	Gulf HARMONY AW ISO VG 68
Cantidad de aceite:	1.8 gal

La experimentación se realiza con engranajes rectos que poseen el tipo de fallo rotura de diente. En la Tabla 3.7 se muestran las características de los engranajes usados. Los fallos se incorporan en un solo diente del piñon (Z1). La condición del engrane implementado varía desde un estado de salud normal, para luego incorporar el fallo en un nivel leve, moderado y severo. La severidad esta determinada por el porcentaje del volumen de pérdida del diente. Los fallos construidos comprenden una pérdida uniforme del 12.5% al 100% de su volumen empezando desde una de sus esquinas. De esta manera, se disponen de 8 condiciones de fallo y una condición en estado normal. En la Figura 3.9 se puede apreciar uno de los engranes con fallo que ha perdido el 25% del volumen de su diente.

Tabla 3.7: Características de los engranajes

Características de los engranes	
Tipo de engranajes:	Rectos
Número de etapas:	1
Material:	Acero E410
Modulo:	2.25
Ángulo de presión:	20°
Transmisión de relación cercana:	0.67
Ancho:	20.7 mm
Número de dientes Z1/Z2:	32/48

En la Figura 3.10 se presenta la disposición de los elementos mecánicos que conforman el experimento. La Figura 3.11 presenta un diagrama de la localización de los sensores,

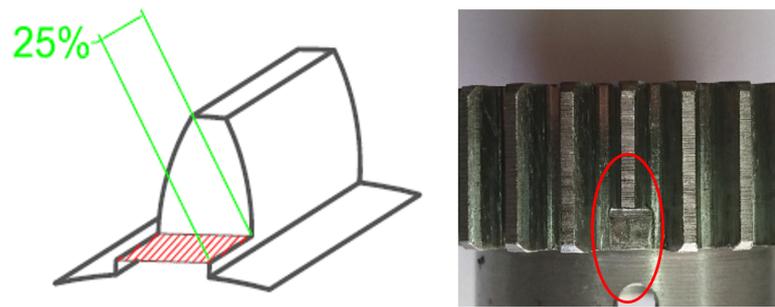


Figura 3.9: Engranaje recto con pérdida del 25% de su diente, fallo implementado físicamente

mientras la Figura 3.12 muestra su configuración con los módulos. Las señales son tomadas en una duración de 10 segundos, se realizan 10 repeticiones para cada una de las pruebas. Se usan los motores A (M1) y B (M2) a velocidad constante conectados a la red eléctrica mediante un interruptor mecánico. Las cargas introducidas por el freno magnético son a tensiones 0V, 10V y 20V que representan las cargas L1, L2 y L3 respectivamente. Las condiciones del engranaje se nombran P1 para condición normal hasta P9 que representa la pérdida total del diente. En la Tabla 3.8 se presenta las combinaciones mencionadas, son en total 540 muestras de la base. El plan experimental detallado esta disponible en el grupo GIDTEC.

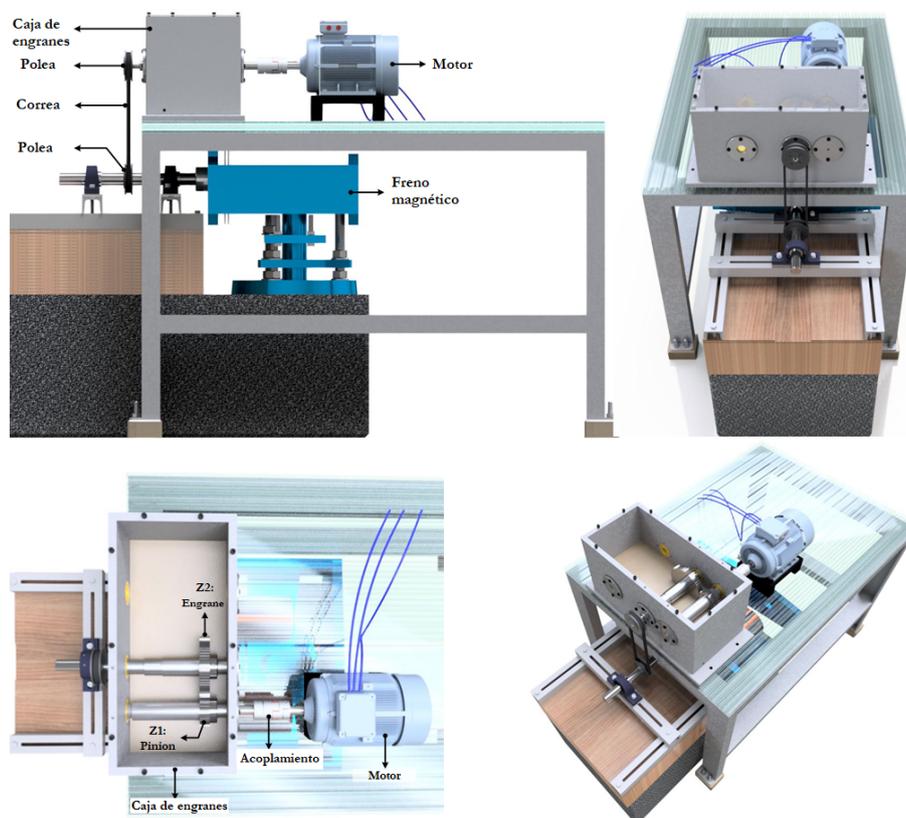


Figura 3.10: Disposición de los elementos mecánicos del experimento

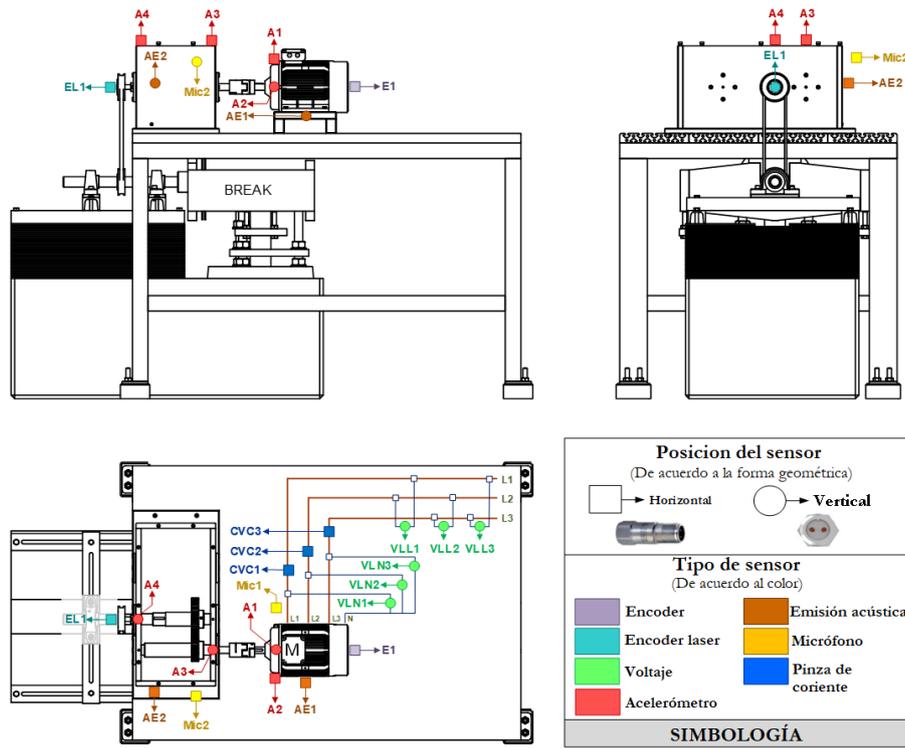


Figura 3.11: Montaje esquemático de sensores

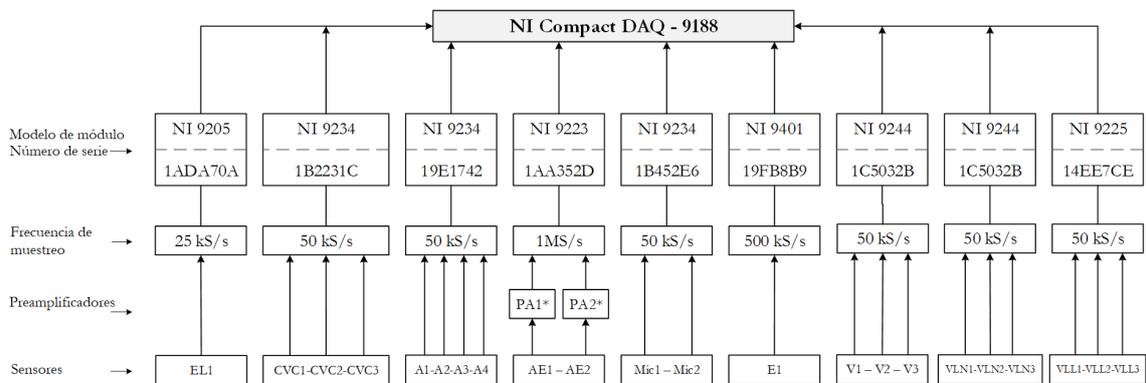


Figura 3.12: Configuración de sensores y módulos

3.2.4 Adquisición de señales en la fase de arranque del motor

Para esta prueba el motor se encuentra en vacío, es decir no se encuentra conectada ninguna carga a su eje. Se miden señales de tensión de línea y corrientes trifásicas. De manera similar que en los planes experimentales descritos anteriormente las señales son medidas mediante tres amperímetros y tres diferenciales de tensión línea-línea. La duración de la adquisición de datos es 10 segundos a frecuencia de muestreo de 50 kHz que es la frecuencia usada en el laboratorio para medir las señales de vibración, con propósitos de detección y diagnóstico de fallos. Para esta prueba se ha usado solo el motor A (M1), cuyo accionamiento consiste en un interruptor mecánico simple.

Tabla 3.8: Combinación para la adquisición de la base de datos

Canales	Repetición	Motor	Carga	Códigos de falla
Todos	R1	M1	L1	P1
	R2	M2	L2	P2
	R3		L3	P3
	R4			P4
	R5			P5
	R6			P6
	R7			P7
	R8			P8
	R9			P9
	R10			

Se evidenció que la duración del transitorio del motor no proporcionaba la información suficiente para posteriormente estimar sus parámetros. Para solucionar este inconveniente existieron dos alternativas:

- Reducir la tensión de alimentación del motor de tal manera que al motor le tomara mayor tiempo en alcanzar el régimen estacionario.
- Añadir un elemento de inercia conocida al eje del motor para poder alargar la duración del transitorio.

La solución más conveniente para la prueba fue cambiar la configuración de los devanados del motor a alto voltaje (440V). Así, al suministrar al motor la tensión disponible en el laboratorio (220V) el motor verá una reducción en su tensión. Este cambio en la configuración de los devanados no afectará a la representación del modelo del motor, esto ocurre debido a que las señales medidas pasarán a ser parte del mismo sistema en por unidad en el que se encuentra el modelo. Con esta configuración se tomaron cinco repeticiones de mediciones de corriente y voltaje, que servirán para estimar los parámetros del motor, de acuerdo al procedimiento de la Sección 2.3.4.

3.3 Procesamiento de Datos

3.3.1 Adecuación y validación de señales

De las bases de datos levantadas existen señales que requieren ser acondicionadas antes que puedan brindar información útil. El procedimiento descrito a continuación se aplicó para todas las señales adquiridas debido a que fueron medidas con el mismo equipamiento.

- 1 Eliminación de la componente de corriente continua (CC) o desplazamiento de las señales de tensiones y corriente, al calcular el valor medio del vector de datos y restarlo [36].
- 2 Ajuste de las señales de corriente cuyo factor de atenuación propio del instrumento es diez veces.

3 Verificación de amplitudes, frecuencias fundamentales y desfases de las señales medidas.

En la Figura 3.13 se pueden apreciar las tensiones de línea, tensiones de fase, y corrientes medidas de la muestra R10M1L1P1 perteneciente a la base "Línea base del motor a velocidad constante", validando que son correctas en cuanto a su amplitud y fase. Cabe indicar que las amplitudes de la Figura 3.13 corresponden a valores pico, por lo tanto para encontrar los valores eficaces o *rms* será necesario dividir para el factor raíz de dos los valores indicados.

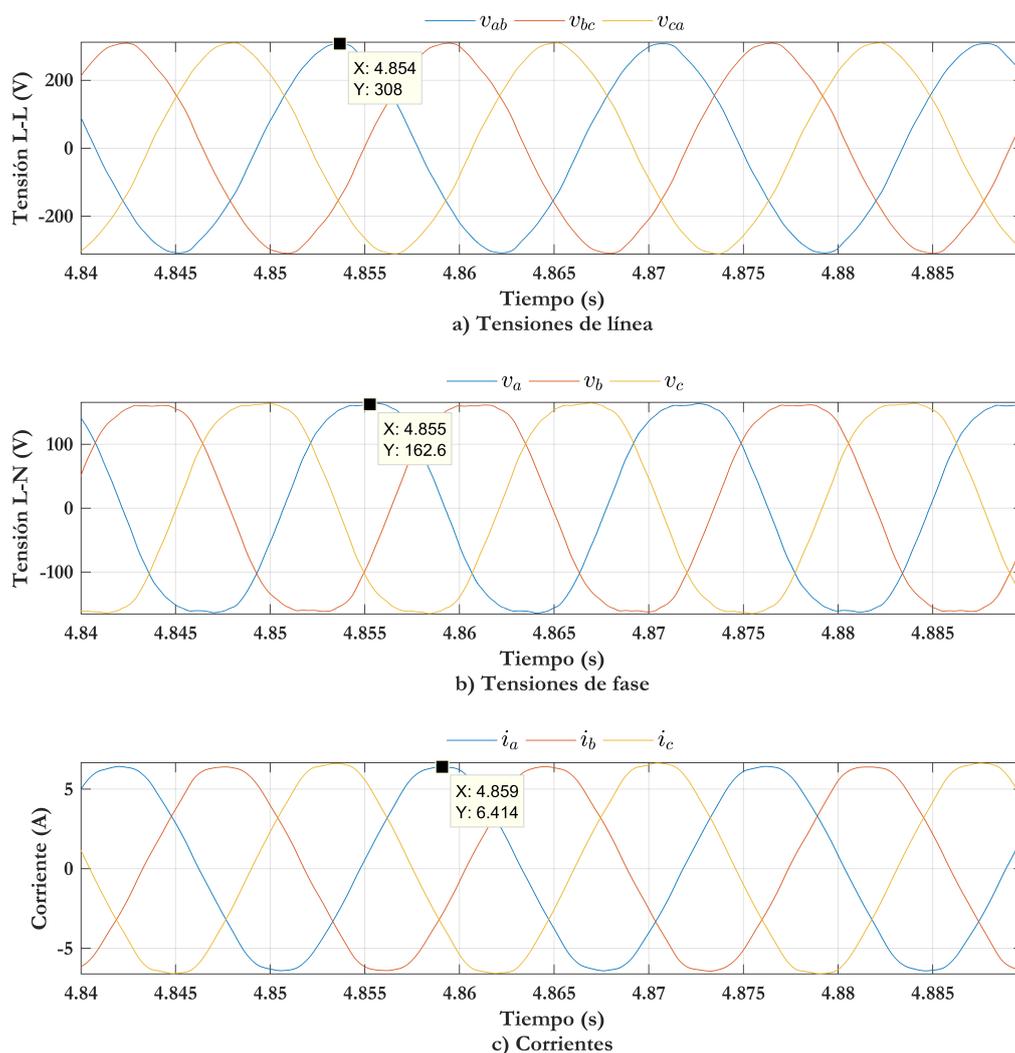


Figura 3.13: Corrientes y tensiones trifásicas medidas

Mediante la DFT se grafica los espectros de amplitud de las señales, en estos se puede identificar fácilmente las componentes de frecuencia que poseen. En la Figura 3.14 se ha trazado los espectros de amplitud de las señales v_{ab} , v_a e i_a , en los cuales se aprecia de manera prominente la frecuencia fundamental o frecuencia de la red eléctrica. Además, en la Figura 3.14(b) se aprecia la existencia del tercer armónico de la componente fundamental de la señal de tensión, esta componente es inusual debido a que en la DFT de la señal de

tensión línea a línea, Figura 3.14(a), no se presenta, por lo que se descarta la presencia de contaminación armónica, el origen de este armónico se restringe a la presencia del neutro virtual con el que se mide la tensión, este punto corresponde al centro de la conexión estrella del estator del motor. La ausencia de un neutro real o físico en la industria limita la medida de tensiones con referencia a este punto, sin embargo las señales medidas entre diferentes fases presentan la misma información como se indicará a continuación, y serán usadas principalmente a lo largo del proyecto.

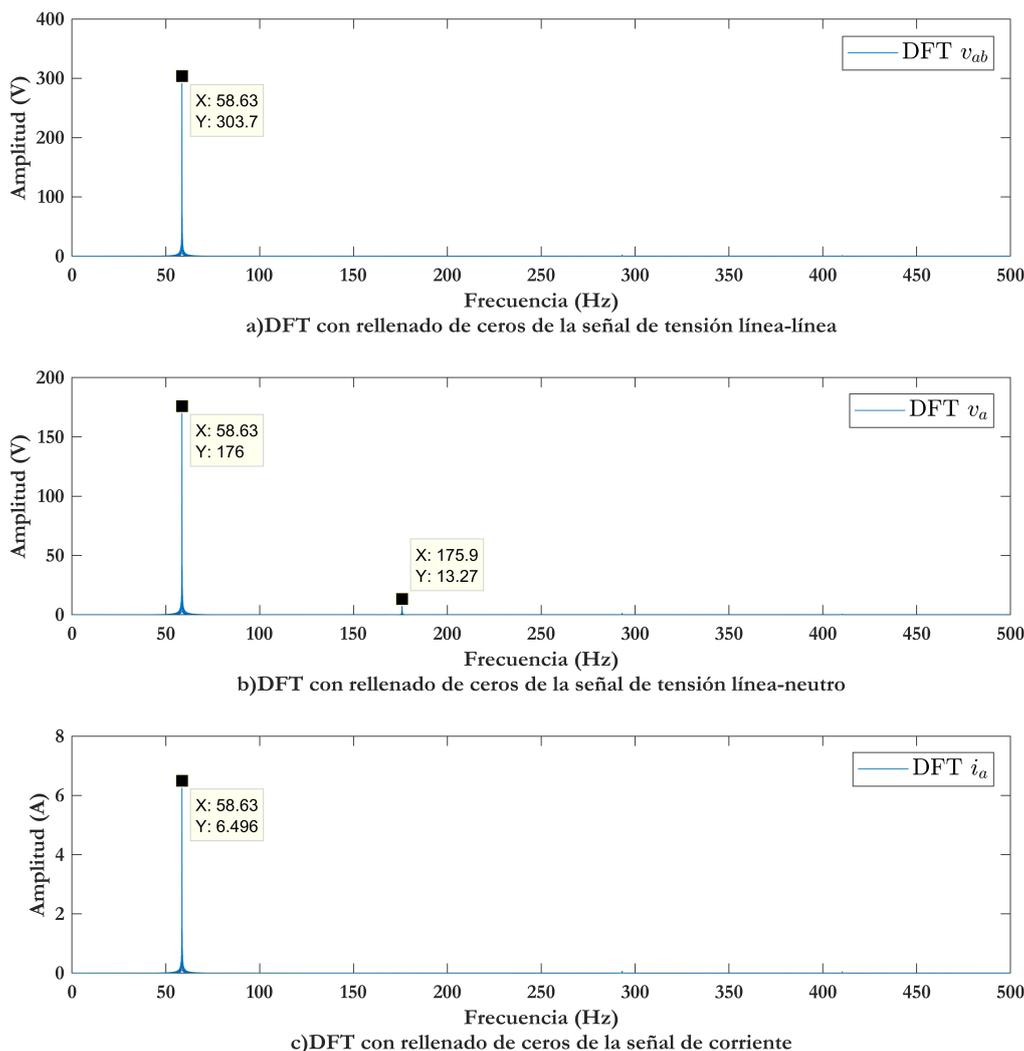


Figura 3.14: Espectros de tensiones y corriente

3.3.2 Estimación de la resistencia eléctrica de los devanados del estator

Para determinar la resistencia eléctrica de un devanado del motor se utiliza el método establecido por la IEEE, descrito en la Sección 2.3.5 denominado método volto-amperométrico o de caída de potencial. Se accede a los terminales de los devanados del motor, se toma los extremos de un devanado y se conecta una fuente de corriente continua y se limita la corriente a un valor no mayor al valor nominal de corriente del motor. Además, se

conecta el voltímetro como lo muestra el diagrama de la Figura 2.14. Se registra además la temperatura del devanado durante la prueba. El mismo procedimiento es aplicado para el motor A (M1) y el motor B (M2).

La temperatura del ambiente del laboratorio en el que se llevo a cabo la experimentación fue de 19°C. Con este dato, se puede calcular la temperatura específica al considerar un aumento de temperatura de 115 °C más de la Tabla 2.3 por el tipo de aislamiento. La temperatura específica corresponde a 134 °C en total, este dato y las mediciones realizadas se presentan en la Tabla 3.9 para determinar la resistencia corregida.

Tabla 3.9: Mediciones y cálculo de la resistencia eléctrica de un devanado del motor

Parámetro	Nomenclatura	Unidad	Motor 1	Motor 2
Tensión	V	V	2.16	2.08
Corriente	I	A	0.78	0.78
Temp. Prueba	t_t	°C	27.4	23.6
Resis. Prueba	R_x	Ω	2.77	2.67
Temp. Específica	t_s	°C	134	134
Resis. Corregida	Rs	Ω	3.896	3.807

3.3.3 Transformación a vectores espaciales

Se requerirá trabajar con los vectores espaciales de tensión y corriente para todas las muestras. La transformación a vectores espaciales parte de la Ecuación (2.9), por lo tanto los vectores espaciales mencionados son determinados mediante las Ecuaciones (3.5) y (3.6).

$$\vec{i}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(i_a + i_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(i_a + i_b \alpha + i_c \alpha^2 \right) \quad (3.5)$$

$$\vec{v}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(v_a + v_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(v_a + v_b \alpha + v_c \alpha^2 \right) \quad (3.6)$$

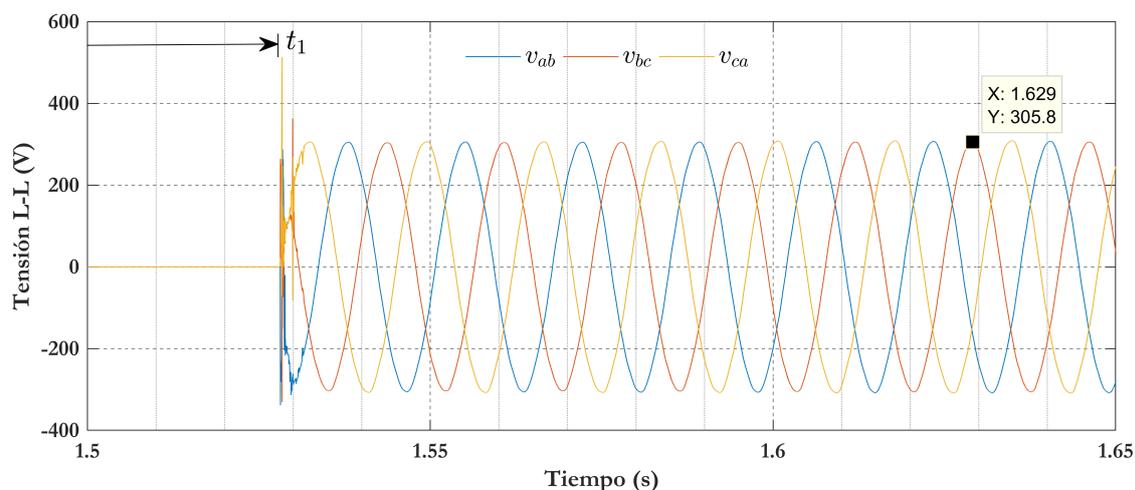
En las pruebas se midieron tensiones de línea y fase trifásicas, pero debido a que por lo general en la industria no se dispone de un neutro físico para realizar medidas de tensiones de fase, es posible determinar el vector espacial de tensión en base a medidas de tensiones de línea mediante la Ecuación (3.7) [36].

$$\vec{v}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{1 - \alpha^2} \left(v_{ab} + v_{bc} \alpha + v_{ca} \alpha^2 \right) \quad (3.7)$$

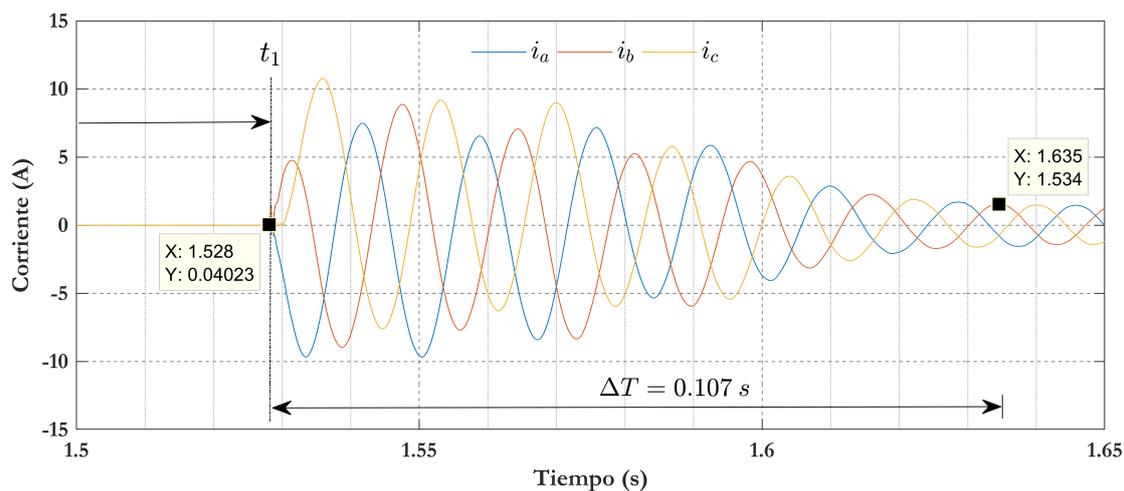
3.3.4 Estimación de parámetros del motor

Para esta sección se trabaja con las señales de corriente y voltaje adquiridas durante la fase de arranque (régimen transitorio) del motor A (M1), Sección 3.2.4. Dado que la adquisición de datos inicia antes del arranque, se requiere que sean eliminados los datos

previos a este instante, estos no son de utilidad, y corresponden a ruido básicamente. En la Figura 3.15 se presentan fragmentos de las señales de tensión y corriente medidas, donde t_1 indica el instante de arranque, la duración del transitorio ΔT es evidente en las señales de corriente de la Figura 3.15(b), cuyo valor es aproximadamente 0.11 segundos. Además, en la Figura 3.15(a) instantes seguidos a t_1 , la señal sinusoidal alcanza un elevado pico correspondiente a la energización del motor y a continuación la señal se deforma levemente debido al efecto de rebote inherente del interruptor mecánico. En la Figura 3.15(b) este efecto también está presente, sin embargo es de menor magnitud.



a) Tensiones trifásicas



b) Corrientes trifásicas

Figura 3.15: Transitorio durante el arranque del motor a) Tensiones, b) Corrientes

Cabe indicar que las señales graficadas en la Figura 3.15 son señales instantáneas, por lo tanto los valores pico indicados requerirán de dividir para el factor raíz de dos para encontrar los valores eficaces o *rms* respectivos.

Posteriormente, a las señales de tensión y corriente medidas se aplica la transformación a vectores espaciales de las Ecuaciones (3.5) y (3.7). En la Figura 3.16 se presentan las gráficas de los vectores espaciales, en ambas señales y sobre todo en la Figura 3.16(a) se puede observar una distorsión en la señal, cuyo origen se debe al rebote del interruptor mecánico cuando fue accionado.

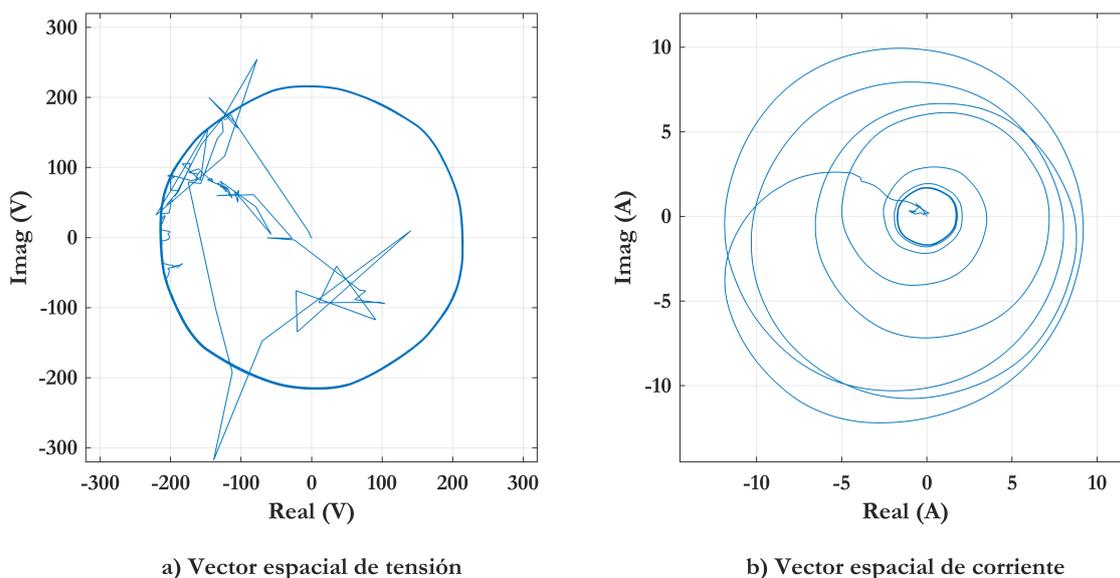


Figura 3.16: Vectores espaciales durante el arranque del motor a) Vector espacial de tensión, b) Vector espacial de corriente

Seguidamente, se procede a calcular el enlace del flujo magnético del estator mediante la Ecuación (2.14). El valor de la resistencia eléctrica de la bobina del estator es tomada de la Tabla 3.9. Debido a la conexión estrella serie del motor con la que se levantaron los datos, el valor de resistencia corresponde a dos veces el de una bobina. El flujo es centrado mediante el uso de un filtro como se describe en la Sección 3.1.2. La Figura 3.17 muestra la comparación entre la señal no centrada y centrada.

Posteriormente se computa el par eléctrico a través de la Ecuación (2.15), en la Figura 3.18(a) se presenta su representación gráfica en el tiempo. La integral del par eléctrico, Figura 3.18(b), permite determinar los parámetros mecánicos del motor de acuerdo con el método presentado en la Sección 2.3.4, estos se presentan en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Parámetros mecánicos estimados

J	k_{loss}	Unidad
15.891	0.03087	Valor por unidad

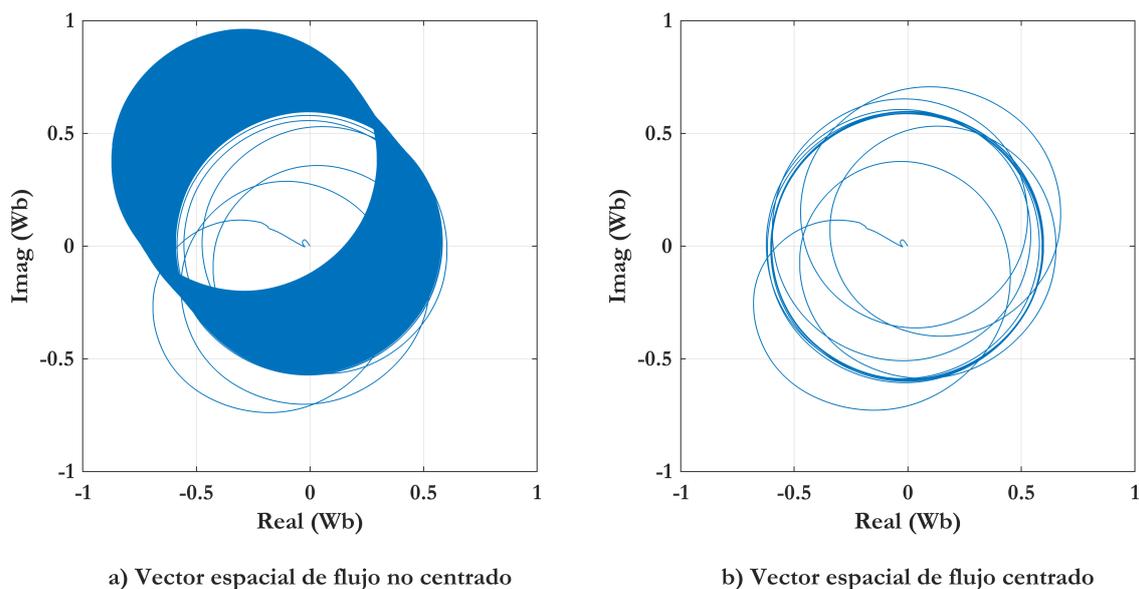


Figura 3.17: Vectores espaciales del enlace de flujo del estator a) Flujo no centrado b) Flujo centrado

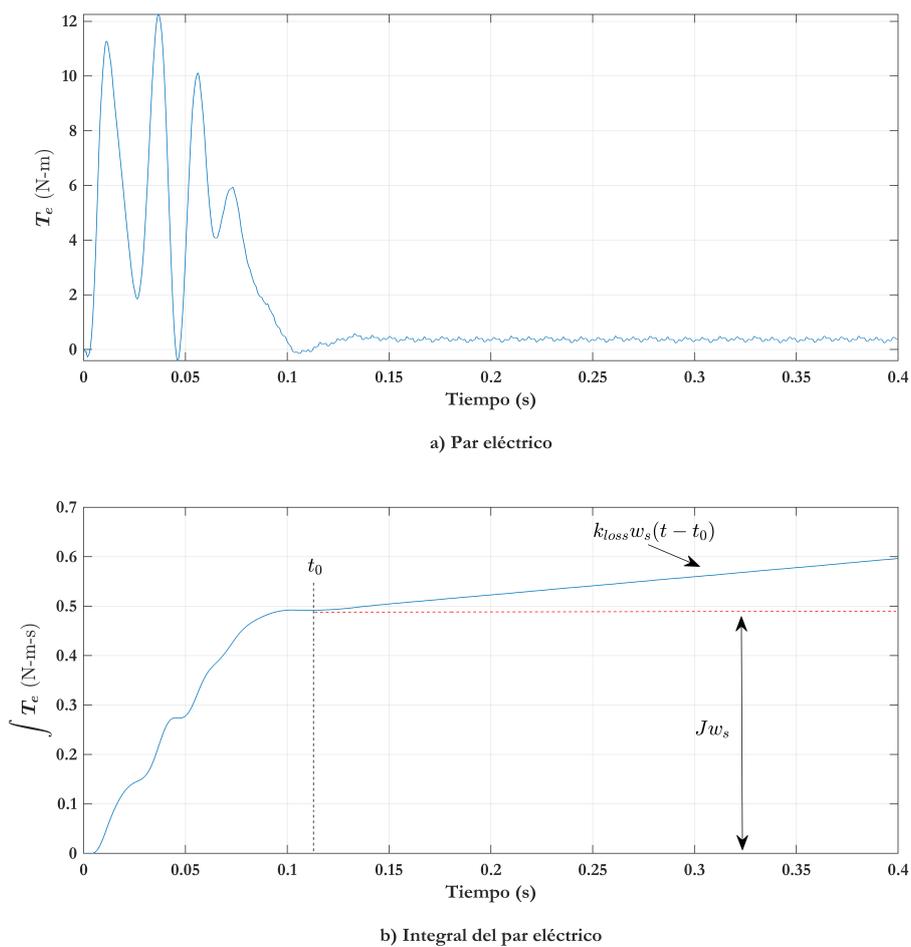


Figura 3.18: a) Estimación del par eléctrico y b) Integral del par eléctrico durante el arranque del motor

El parámetro de inercia estimado presenta un 12% de error respecto al valor proporcionado por el fabricante, Tabla 3.4 del motor A (M1), la magnitud de este error se considera aceptable y se usará el valor estimado para las próximas simulaciones.

Definidos los parámetros mecánicos del motor se estima la velocidad mecánica del eje al integrar el par acelerante como se indica en la Sección 2.3.4. Dicha estimación se presenta en la Figura 3.19, aquí se puede observar que el transitorio dura aproximadamente 0.11 segundos, y cuya velocidad en régimen estacionario alcanza 1177 revoluciones por minuto.

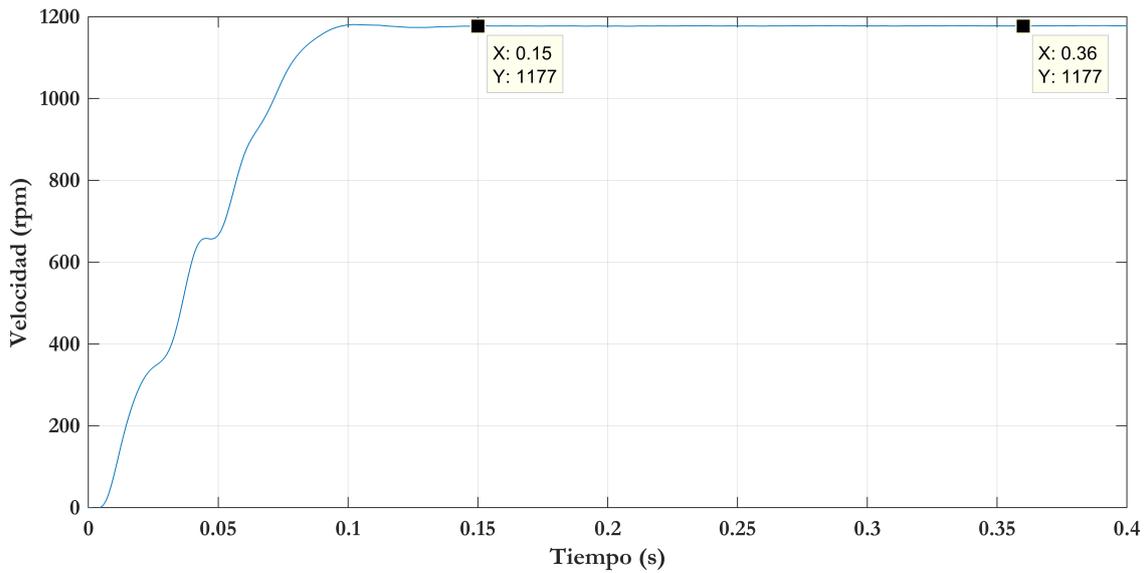


Figura 3.19: Velocidad mecánica del eje del motor

Por otra parte, es necesario determinar la primera derivada del vector espacial de corriente del estator, este vector interviene en el cálculo de la impedancia teórica z_{cal} , explicado en la Sección 3.1.2. La representación gráfica de la primera derivada del vector espacial de corriente del estator se presenta en la Figura 3.20, aquí, al inicio de la señal se presenta una distorsión ocasionada por dos razones subsecuentes, la primera esta relacionada al rebote producido por la acción del interruptor mecánico, y la segunda, por la derivación numérica la cual posee el efecto de introducir ruido sobre la señal.

A continuación se presentan las bases del sistema que permiten trasladar las señales estimadas al sistema adimensional de unidades, para posteriormente realizar el proceso de optimización.

Tabla 3.11: Bases del sistema para optimización de parámetros

Motor 1	V_{Base}	S_{Base}	I_{Base}	ω_{Base_e}	ω_{Base_m}	Z_{Base}
Conexión Y	440	1491	1.96	377	125.7	129.8
Unidad	V	W	A	$\frac{rad}{s}$	$\frac{rad}{s}$	Ω

Para finalizar, se implementa un algoritmo de optimización con restricciones para minimizar la función de costo de la Ecuación (2.22). La función con esta característica

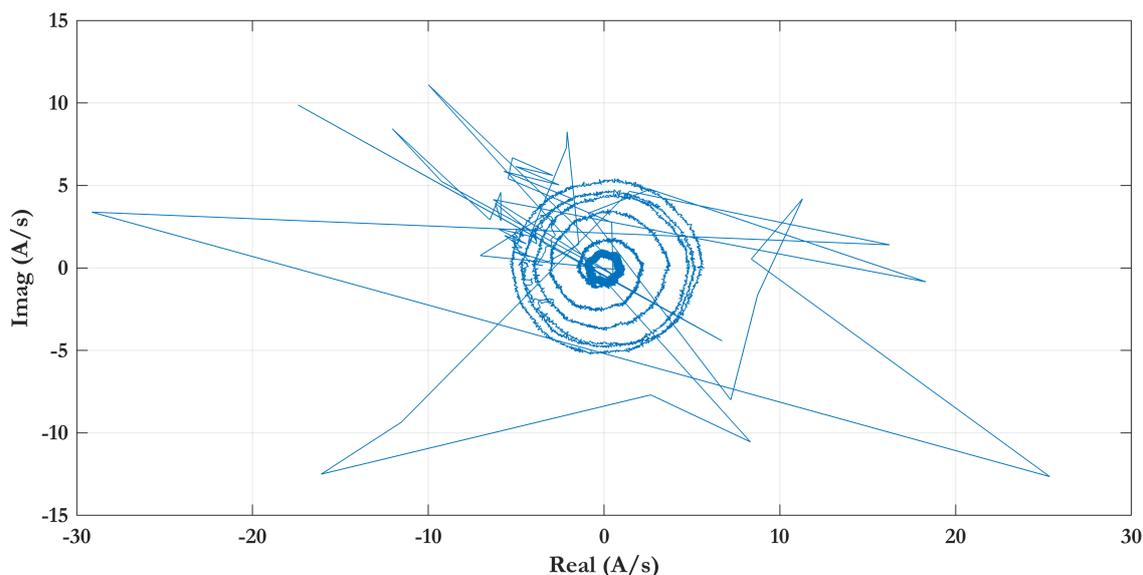


Figura 3.20: Primera derivada del vector espacial de corriente

disponible en MATLAB se denomina *fmincon*, cuyas entradas principales son los límites inferiores y superiores en los que se evaluará la solución, valores iniciales y el método de optimización. La Tabla 3.12 presenta los límites de entrada, los cuales han sido escogidos basándose en la literatura disponible [33]. Los valores iniciales generalmente son designados a partir de los ensayos en vacío y de rotor bloqueado aplicados al motor [36], [52], sin embargo para el presente proyecto se escogieron valores iniciales empíricamente debido a que no fue posible realizar estos ensayos. En la Tabla 3.13 se presentan los valores utilizados. El método de optimización seleccionado se denomina punto interior, el cual ha demostrado ser adecuado para este tipo de problemas [36], [52].

Tabla 3.12: Valores límites de evaluación de los parámetros para el algoritmo de optimización

	Parámetros (pu)			
Límites	$L_{\sigma e}$	$L_{\sigma r}$	L_m	R_r
Inferior	0.01	0.01	0.4	0.005
Superior	0.15	0.15	1.1	0.5

Tabla 3.13: Valores iniciales para evaluación de los parámetros del algoritmo de optimización

Parámetro	$L_{\sigma e}$	$L_{\sigma r}$	L_m	R_r
Valor inicial (pu)	0.03	0.03	1	0.02

En la Figura 3.21 se puede observar que la función de costo alcanzó un valor promedio de 0.004475 equivalente al 0.45% en la última iteración, una vez que se cumplió las restricciones establecidas en el algoritmo, la Tabla 3.14 muestra los parámetros que se obtuvieron.

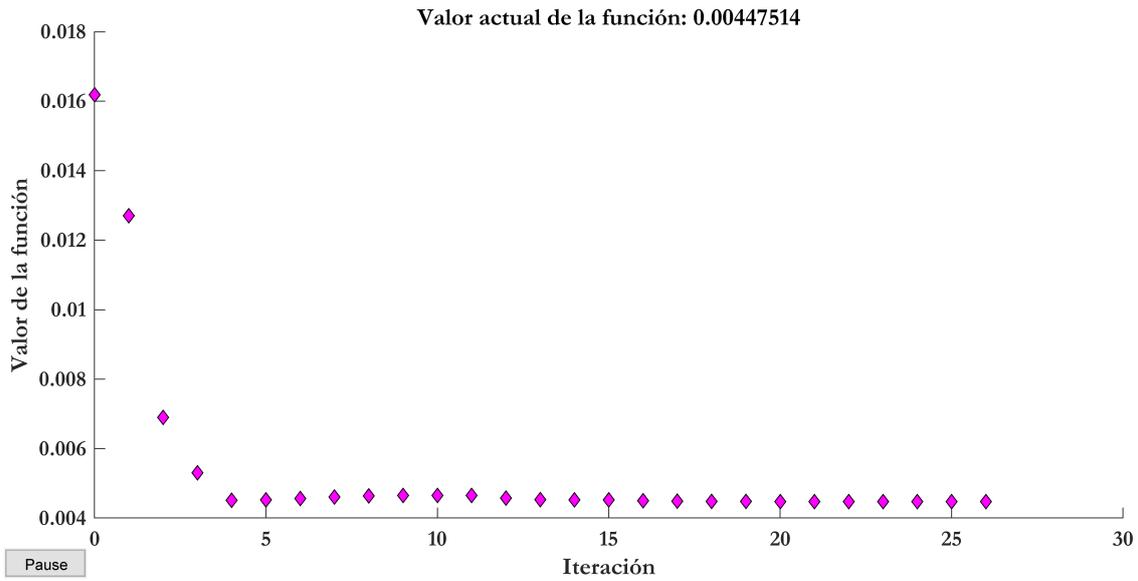


Figura 3.21: Evaluación de la función de costo

En la Figura 3.22 se presenta la comparación de magnitudes y ángulos de la impedancia medida e impedancia calculada, determinadas por la Ecuación (2.20) y Ecuación (2.21) respectivamente. En esta figura se puede observar que la magnitud y ángulo de la impedancia calculada hace un seguimiento y se aproxima en gran manera a la impedancia medida tanto en régimen transitorio como en régimen estacionario. Sin embargo, mediante el error porcentual relativo de las Ecuaciones (3.8) y (3.9) para magnitud y ángulo respectivamente [38], se aprecia que los errores son mayores en régimen transitorio que en estacionario, debido a que la impedancia calculada alcanza amplitudes más altas que la impedancia medida.

Tabla 3.14: Parámetros obtenidos mediante optimización

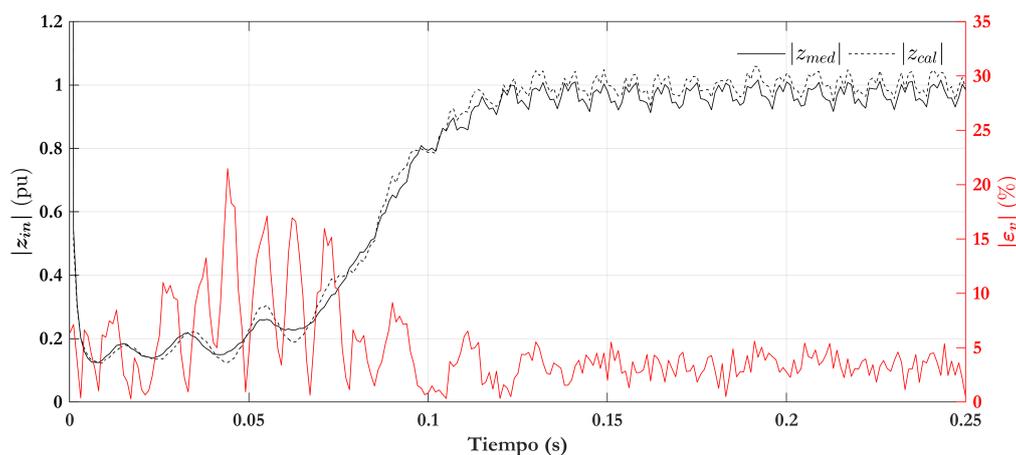
$L_{\sigma e}$	$L_{\sigma r}$	L_{er}	R_r	Unidad
0.07355	0.04957	1.0432	0.04787	Valor por unidad

$$|\varepsilon_v| = \left| \frac{|z_{med}| - |z_{cal}|}{|z_{med}|} \right| * 100 \quad (3.8)$$

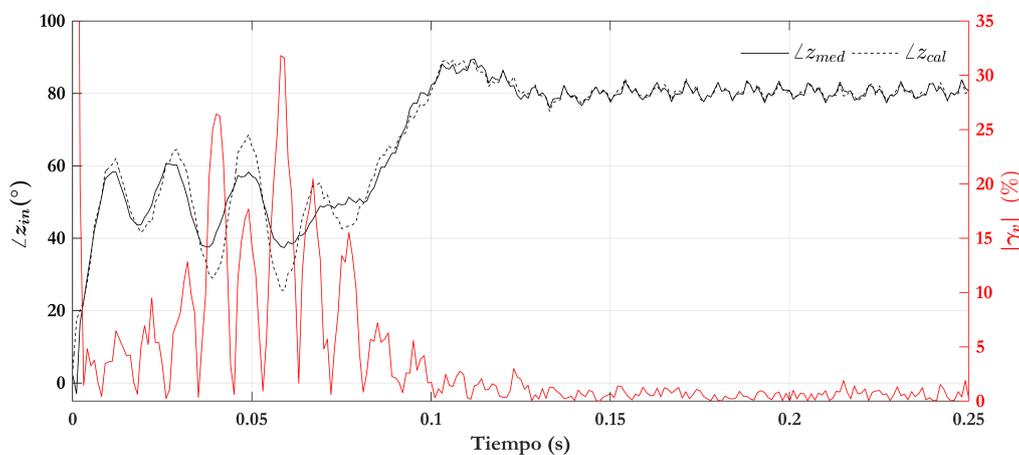
$$|\gamma_v| = \left| \frac{\angle z_{med} - \angle z_{cal}}{\angle z_{med}} \right| * 100 \quad (3.9)$$

3.3.5 Simulación del modelo del motor con los parámetros estimados

Una vez obtenidos los parámetros del motor a partir de los datos experimentales, se hace la comparación entre el comportamiento generado por el modelo matemático y las señales de tensiones, corrientes, par eléctrico y velocidad con las que se estimaron los



a) Comparación de magnitud entre impedancia medida y calculada, error de magnitud



b) Comparación de ángulo entre impedancia medida y calculada, error de ángulo

Figura 3.22: Comparación de impedancia medida e impedancia calculada y presentación del error a) Magnitudes y b) Ángulos

parámetros del motor. Dicho modelo matemático se encuentra en coordenadas primitivas como se presenta en la Sección 3.1.1 y requiere además de sus parámetros, la magnitud de tensión y frecuencia en por unidad con las que se levantaron los datos. La magnitud de tensión en por unidad se consigue al promediar los tres valores *rms* de las señales de tensión medidas en estado estacionario y dividir para su base de la Ecuación (2.26). La frecuencia se obtiene al trazar la Transformada de Fourier discreta de las señales de tensión como se muestra en la Figura 3.23 e identificar la frecuencia fundamental. En la Figura 3.23 se puede observar que la frecuencia fundamental es la misma en las señales trifásicas, este valor se transforma a *Rad/s* y se divide para su base de la Ecuación 2.29. La magnitud de tensión obtenida es 215.91 V y su frecuencia de 58.6 Hz, mientras en el sistema en por unidad corresponde a 0.4907 pu y 0.9767 pu respectivamente.

Mediante la Ecuación (3.10) se determina el valor *rms* de una señal x_n . Donde, N' , representa la cantidad de datos correspondientes al régimen estacionario.

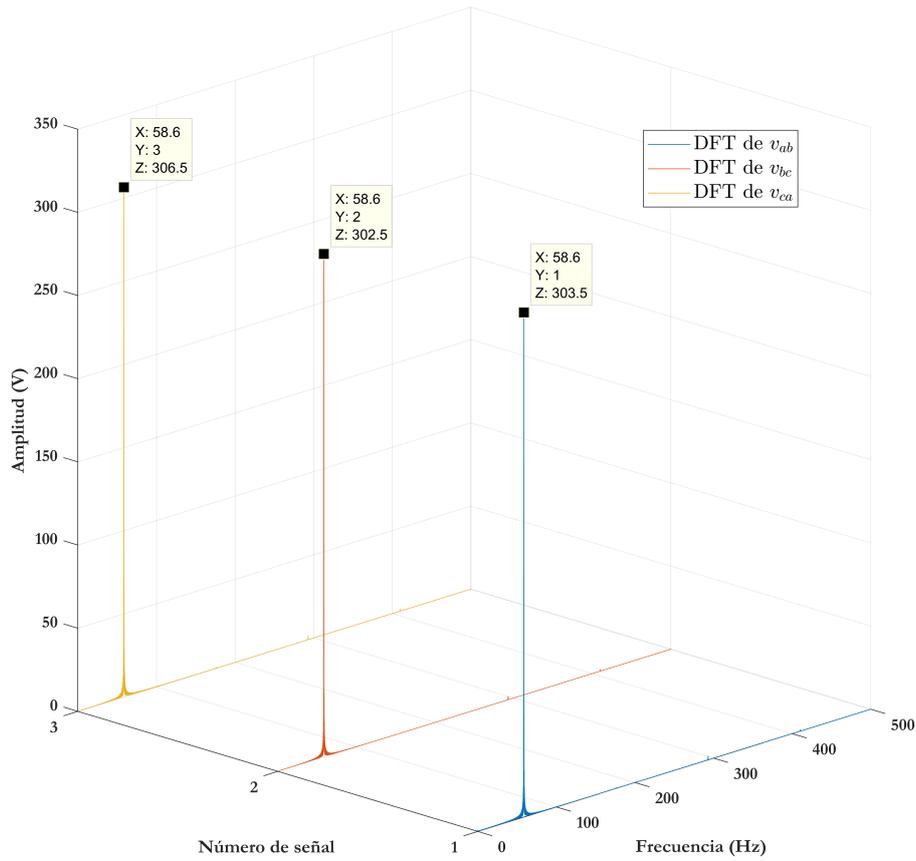


Figura 3.23: Transformadas de Fourier de las señales de tensiones aplicadas durante el arranque

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N'} \sum_{n'=1}^{N'} |x_n|^2} \quad (3.10)$$

Con el fin de comprobar las magnitudes reales de las señales, las siguientes comparaciones se realizan en el sistema de magnitudes físicas, por lo que se usan las bases de la Tabla 3.11 para escalar las señales que se obtienen del modelo.

Para escalar las tensiones y corrientes se añade el factor raíz de dos como indica la Ecuación 3.11 y Ecuación 3.12 respectivamente, debido a que las bases respectivas se encuentran expresadas en valores eficaces.

$$V_{(V)} = V_{(pu)} * (\sqrt{2}V_B) \quad (3.11)$$

$$I_{(A)} = I_{(pu)} * (\sqrt{2}I_B) \quad (3.12)$$

En la Figura 3.24 las señales línea a neutro medidas representan una aproximación a la reales debido a que no fueron directamente medidas, sino se obtuvieron a partir de la transformación inversa de componentes simétricas, Ecuación (2.8), aplicada al vector

espacial de tensión. Cabe mencionar que el vector espacial de tensión se obtuvo a partir de tensiones línea a línea. La Ecuación 3.13 muestra esta transformación. Como se mencionó en la Sección 2.3.3, la secuencia cero es nula debido a la suma de las tensiones trifásicas, la secuencia positiva esta definida por la Ecuación (2.9) y la secuencia negativa es la conjugada de la secuencia positiva.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{v}_e \\ \vec{v}_e^* \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Las señales de tensión medidas que se mencionaron en comparación con las señales simuladas, Figura 3.24(a), (b) y (c) muestran amplitudes idénticas a una misma frecuencia.

En la Figura 3.24(d), (e) y (f) se puede observar que las señales de corriente simuladas y medidas poseen igual duración del transitorio, en régimen estacionario las señales son muy similares en amplitud, sin embargo las corrientes medidas son mayores. El mayor consumo de corriente en el motor en estado estacionario está asociado a pérdidas que se producen en el hierro del motor que no son consideradas en el modelo. El error relativo entre las señales medidas y simuladas en régimen estacionario comprende el 13.5% de acuerdo a la Tabla 3.15.

En la Figura 3.25(a) las señales de velocidad presentan una forma muy similar, pero la señal simulada alcanza más rápido el estado estable. La diferencia de la velocidad estimada y simulada en régimen transitorio de la máquina, se debe al modelo del rotor implementado, como se demuestra en [38]. El error relativo en régimen estable de estas señales de velocidad es del 0.8% como lo indica la Tabla 3.15.

Las señales de par, Figura 3.25(b), presentan características similares en cuanto a forma y amplitud, existe un 2.4% de error respecto al par estimado en régimen estable como lo indica la Tabla 3.15. En esta figura se muestra el valor de par alcanzado en estado estable por la señal simulada. Cabe indicar que la señal de par estimado presenta pequeñas oscilaciones en régimen estacionario, por lo que el promedio de estos valores se usó en la Tabla 3.15 para calcular el error relativo.

Tabla 3.15: Errores en estado estacionario de señales estimadas experimentalmente y proporcionadas por el modelo matemático

Variable (régimen estacionario)	Unidad	Valores estimados		Error relativo (%)
		Experimentalmente	Modelo	
Tensión L-N	V rms	124.7	124.7	0.0
Corriente	A rms	0.987	0.854	13.5
Velocidad	rpm	1177	1167	0.8
Par eléctrico	N-m	0.366	0.357	2.4

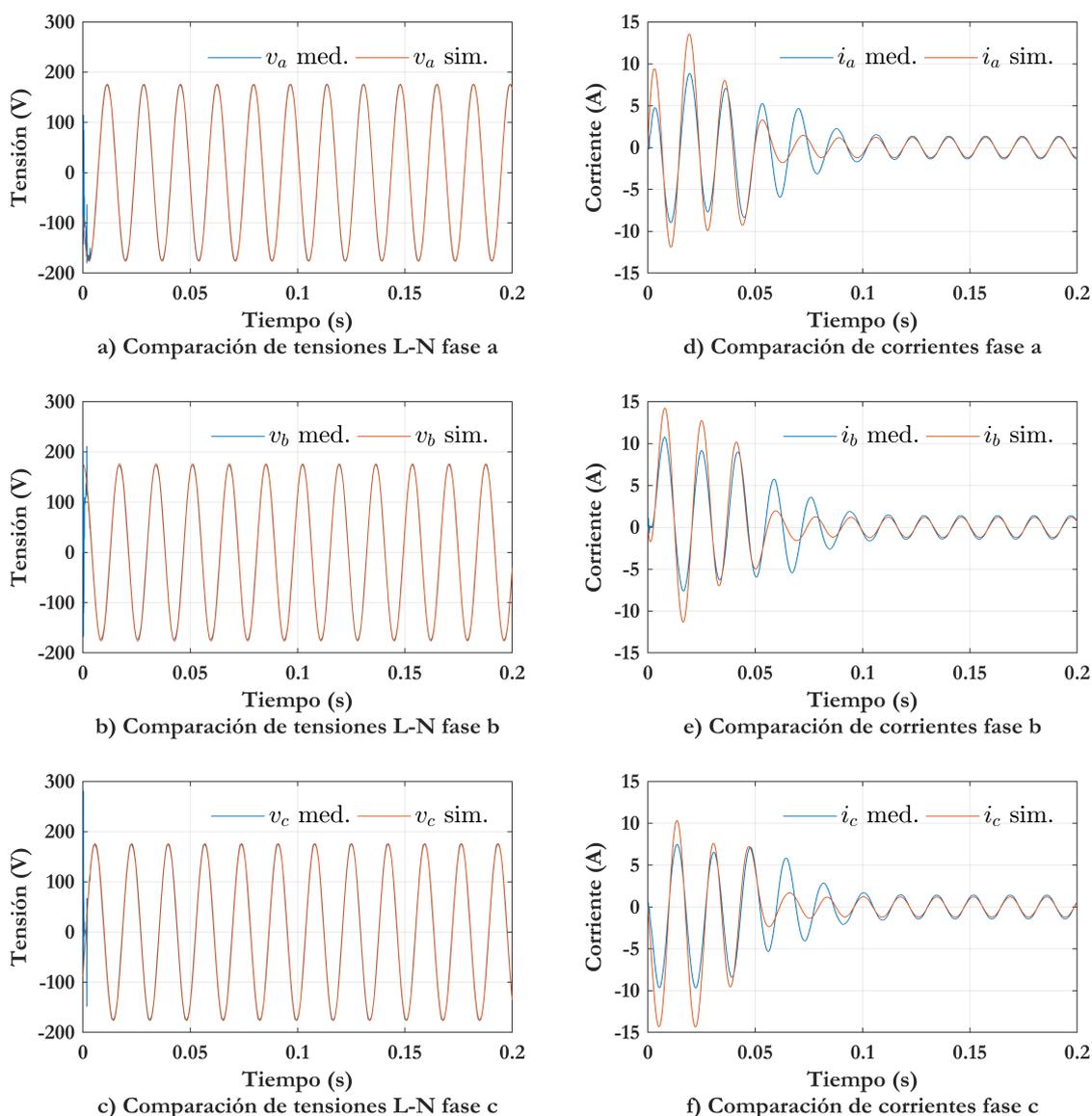
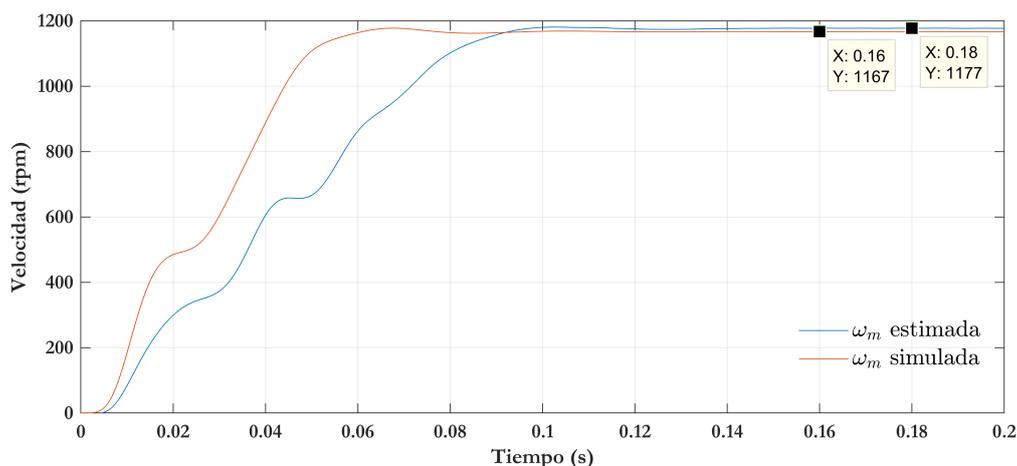


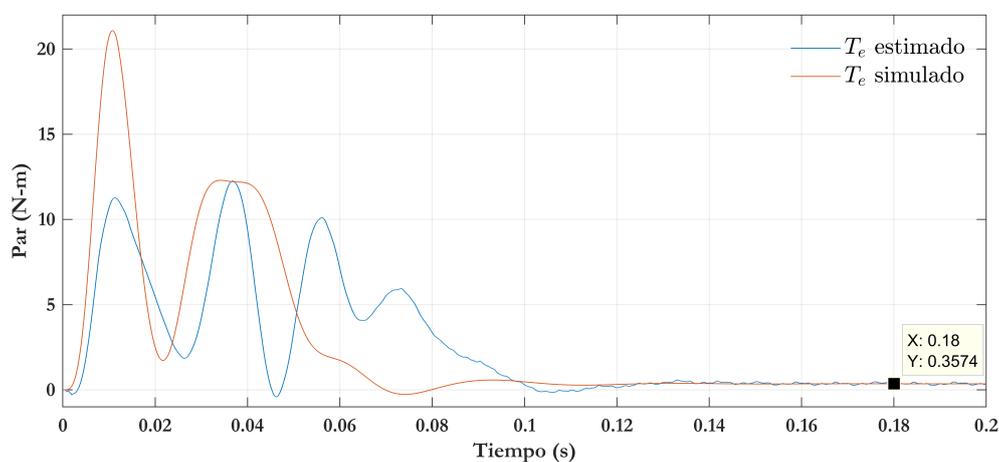
Figura 3.24: Comparación señales de tensión y corriente medidas y simuladas

En la Tabla 3.15 los valores *rms* se determinaron al promediar los valores *rms* trifásicos de las señales en estado estacionario.

Si bien el modelar el transitorio de las señales medidas es importante para definir el comportamiento del motor frente a un cambio repentino en la máquina, el interés de este trabajo está centrado en analizar señales del motor cuando este se encuentra en régimen estacionario y cuando se presentan en sus señales de monitoreo componentes frecuenciales que permiten identificar la presencia de un fallo. En la comparación de la señal de par eléctrico, Figura 3.25(b), se ha evidenciado la utilidad de la estimación de parámetros para simular el comportamiento del motor.



a) Comparación velocidad



b) Comparación par eléctrico

Figura 3.25: Comparación de señales estimadas y simuladas mediante optimización de parámetros a) velocidad mecánica y b) par eléctrico

3.3.6 Estimación del par de carga

El par de carga que se conecta al motor se puede determinar a partir de la Ecuación (2.4) al despejar T_m , la expresión despejada se presenta en la Ecuación (3.14)

$$T_m = T_e - J\ddot{\theta} \tag{3.14}$$

El par de carga representa la oposición al movimiento que se produce por el motor. Dentro de esta oposición se puede encontrar pares de fricción mecánica, pares constantes y componentes frecuenciales de par. Debido a que es de interés analizar las señales de par cuando el motor se encuentra en régimen estacionario, la aceleración del motor es cero por lo que se suprime el término momento de inercia de la Ecuación (3.14). Mediante

la Ecuación (3.15) se determinará el par de carga para las bases de datos tomadas, que indica que el par de carga es estimado a partir de par eléctrico en estado estable.

$$T_m = T_e \quad (3.15)$$

Estimación del par de carga constante

A continuación se procede a estimar el par de carga constante del plan experimental "Línea base del motor". En este caso, el par de carga contempla la suma del par de fricción mecánico T_f interno del motor dado por $T_f = k_{loss}\omega_m$ y el par del freno magnético T_{fm} , Ecuación (3.16), presentes en el sistema mecánico y despreciando el par de carga generada por la polea de acople al freno magnético. El par de fricción mecánico es constante cuando el motor ha alcanzado el régimen estacionario, debido a que es una una función de la velocidad. Por otro lado, el par del freno se asume constante en cualquier instante debido a su principio de funcionamiento. Entonces, considerando la Ecuación (3.15) en estado estable, se tiene:

$$T_e = k_{loss}\omega_m + T_{fm} \quad (3.16)$$

A continuación, se detallan los pasos que se realizaron para obtener el par de carga constante:

- 1 Se agrupan las muestras por motores y cargas empleadas. Se disponen de 6 grupos debido a que existen 2 motores y tres diferentes tipos de carga.
- 2 Se estima el par de carga de cada muestra mediante la Ecuación 3.15 y Ecuación 2.15.
- 3 Se determina el valor medio de cada señal obtenida.
- 4 Se calcula el par promedio por grupo. Los resultados por tipo de carga y motor se presentan en la Tabla 3.16.

Una vez estimado el par de carga, es posible determinar el par generado por el freno magnético mediante los pasos descritos a continuación:

- 1 Se determina la transformada discreta de Fourier (DFT) de la señal del encoder conectado al eje del motor.
- 2 Se identifica la frecuencia de giro en el espectro de amplitud de la señal de velocidad. La Figura 3.26 muestra el espectro de amplitud de la señal de velocidad para la carga L1, L2 y L3, en las que se identifica la velocidad de giro del eje del motor.
- 3 Se determina el par de fricción mediante su coeficiente y la velocidad identificada. Los resultados se presentan en la Tabla 3.16.

4 Se estima el par del freno magnético mediante la Ecuación (3.17), al restar el par de carga y el par de fricción conocido. Los resultados se presentan en la Tabla 3.16.

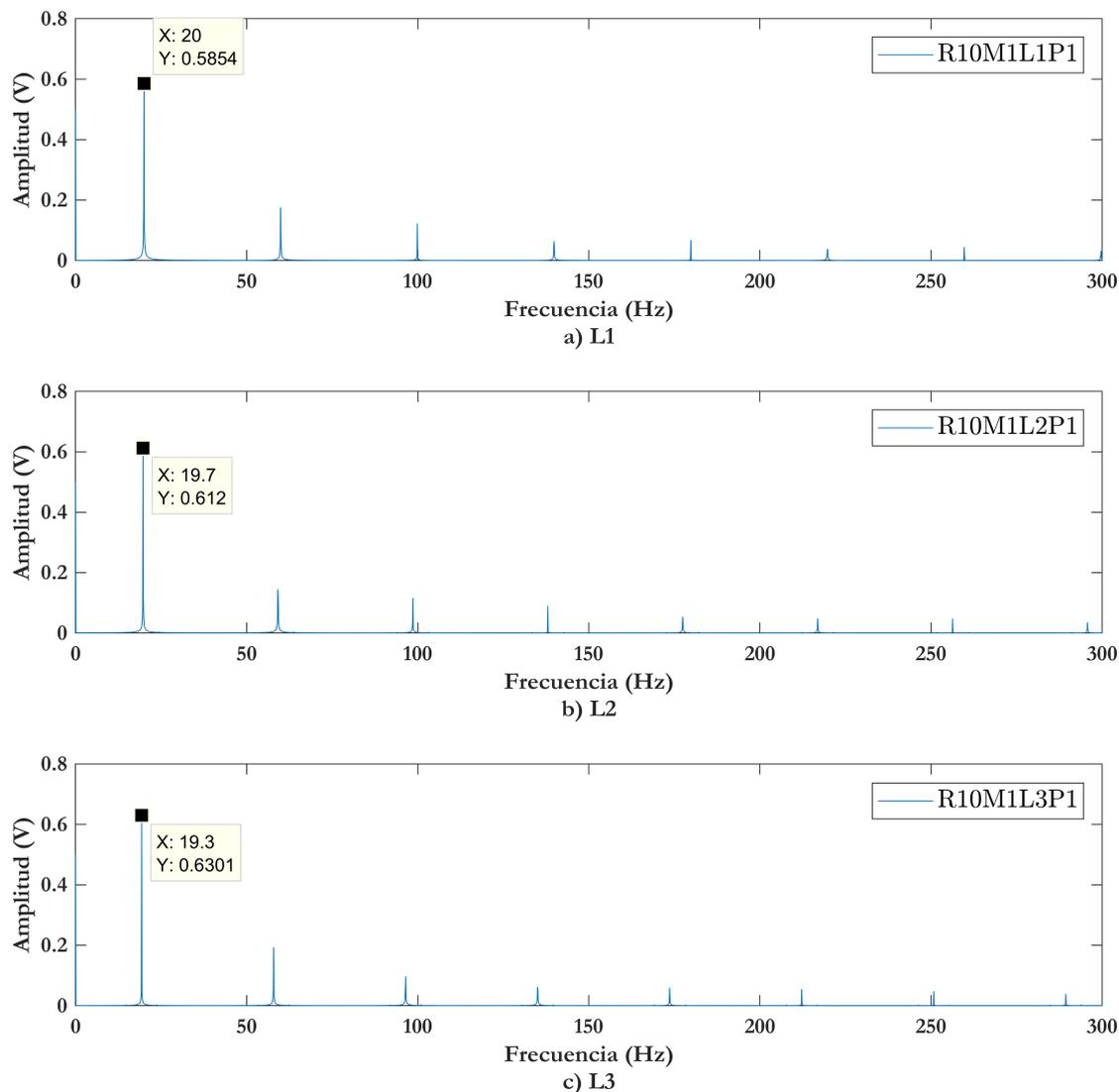


Figura 3.26: Transformada de Fourier de la señal de velocidad medida a) Carga L1, b) Carga L2 y c) Carga L3

La Ecuación (3.17) empleada para estimar el par del freno magnético resulta de despejar T_{fm} de la Ecuación (3.16).

$$T_{fm} = T_e - k_{loss}\omega_m \tag{3.17}$$

En la Tabla 3.16 el par del freno es nulo para L1, debido a que en esta carga el motor se encontraba en vacío, por tal razón se aprecia que el par de carga es muy similar al par de fricción calculado a través de su coeficiente y velocidad, de manera similar ocurre para el motor 2. Para el motor 2 con L1, se aprovecha de esta similitud para decir que el

Tabla 3.16: Estimación de par de carga constante

Motor	Motor 1			Motor 2			
Carga	L1	L2	L3	L1	L2	L3	Unidad
Velocidad	20.00	19.70	19.30	29.97	29.65	29.20	Hz
Par de carga	0.376	2.964	6.856	0.374	2.589	5.624	N-m
Par fricción	0.366	0.361	0.354	0.374	0.370	0.365	N-m
Par freno	-	2.603	6.503	-	2.219	5.259	N-m

par de carga es igual al par de fricción, de esta manera mediante la velocidad medida se determina el coeficiente de fricción ya que no se levantaron datos de su transitorio para la estimación de sus parámetros.

Estimación del par de carga de la caja de engranajes

Siguiendo el flujo del proyecto, se dispone a usar la Base "Severidad de fallo de engranaje recto a velocidad constante" para estimar el par de carga.

El par de carga en estado estacionario al igual que en la base anterior se estima mediante la Ecuación (3.15). El par de carga obtenido comprende una suma del par de fricción interna del motor $T_f = k_{loss}\omega_m$, par del freno magnético T_{fm} y el par de la caja de engranajes conectada. La caja de engranajes introduce un modelo de pérdidas por fricción T_{fc} y componentes frecuenciales de par relacionadas a su funcionamiento [13] $T_{gb}(t)$, Ecuación (3.18). Dichas pérdidas están asociadas a la fricción mecánica interna de la caja de engranajes y a las pérdidas por transmisión mecánica través del sistema de poleas.

$$T_m = k_{loss}\omega_m + T_{fm} + T_{fc} + T_{gb}(t) \quad (3.18)$$

Como ya se describió anteriormente, las pérdidas por fricción del motor $k_{loss}\omega_m$ se mantienen constantes en estado estable debido a la velocidad constante del motor, mientras el par del freno T_{fm} también es constante por su principio de funcionamiento. El par de fricción T_{fc} , generado principalmente por el sistema de poleas, se puede describir con un modelo similar al par T_{fm} , esto es $T_{fc} = k_{loss_{fc}}\omega_{m_{fc}}$, siendo $\omega_{m_{fc}}$ la velocidad de la polea, que en estado estable es constante, por tanto el par también lo es. El par de la caja de engranajes $T_{gb}(t)$ posee componentes frecuenciales debido a la frecuencia de giro del piñón, de la rueda y la interacción entre los engranajes cuya componente se denomina frecuencia de engrane (gear mesh frequency (GMF), en inglés). El par de carga depende de las características de la caja de engranajes, para el presente caso de estudio se ha usado una caja de engranajes de una sola etapa. En la Figura 3.27 se representa de manera simplificada el sistema electromecánico y el modelo dinámico para análisis del par T_{gb} , y mediante la Ecuación (3.19) se describe el modelo de la caja engranajes [13].

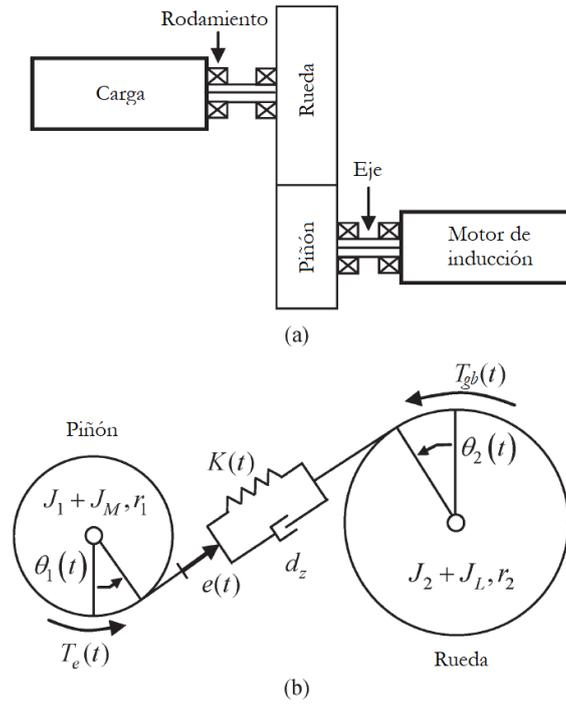


Figura 3.27: Representación del sistema electromecánico y modelo dinámico de la caja de engranajes [13].

$$\begin{aligned}
 (J_1 + J_M)\ddot{\theta}_1(t) + r_1 K(t) [r_1 \theta_1(t) + r_2 \theta_2(t) + e(t)] + r_1 d_z [r_1 \dot{\theta}_1(t) + r_2 \dot{\theta}_2(t) + \dot{e}(t)] &= T_e(t) \\
 (J_2 + J_L)\ddot{\theta}_2(t) + r_2 K(t) [r_1 \theta_1(t) + r_2 \theta_2(t) + e(t)] + r_2 d_z [r_1 \dot{\theta}_1(t) + r_2 \dot{\theta}_2(t) + \dot{e}(t)] &= T_L(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

donde:

- J_1 es la inercia del piñón
- J_2 es la inercia de la rueda
- J_M es la inercia del rotor de la máquina de inducción
- J_L es la inercia de la carga
- r_1, r_2 es el radio del piñón y rueda respectivamente
- d_z es el coeficiente de amortiguamiento del punto de contacto
- $K(t)$ es la función de rigidez del punto de contacto
- $e(t)$ es la función del error en la transmisión
- $T_e(t)$ es el par electromecánico
- $T_L(t)$ es el par de carga
- $\theta_1(t)$ es el ángulo rotacional del piñón
- $\theta_2(t)$ es el ángulo rotacional de la rueda

De acuerdo con [13], la caja de engranajes produce oscilaciones de par que podrían ser modeladas como $T_{gb} = T_{rd} + T_{rA} + T_{rB}$ tales que:

$$T_{rd} = A_{rd} \sin(\omega_{rd} t + \phi_{rd})$$

$$T_{rA} = A_{rA} \sin(\omega_{rA}t + \phi_{rA})$$

$$T_{rB} = A_{rB} \sin(\omega_{rB}t + \phi_{rB})$$

donde ω_{rd} , ω_{rA} y ω_{rB} denotan la frecuencia de engrane, la frecuencia del piñón y la frecuencia de la rueda, respectivamente. Este par T_{gb} modula la corriente del estator, y en consecuencia tiene efectos en el par eléctrico T_e .

El modelado del par $T_{gb}(t)$ supone un estudio más amplio de los parámetros de la caja de engranajes y un procesamiento de señales para el filtrado de los diferentes componentes del par de carga, diferentes a los de la caja de engranajes, presentes en el par eléctrico en estado estable. Por otro lado, las pérdidas mecánicas T_{fc} se pueden modelar al someter al motor a diferentes velocidades. Ambos modelos no han sido contemplados en este proyecto, por lo que no es posible simular el comportamiento del motor bajo estas condiciones, a través del modelo matemático. Este resultado queda como trabajo futuro, para terminar de adecuar el modelo matemático del banco de pruebas del laboratorio de vibraciones de la UPS.

Por lo expuesto, el análisis en frecuencia del par eléctrico permitirá detectar algún fallo, por lo que se centrará este estudio en identificar la variación de la magnitud de las frecuencias de interés ya mencionadas: la frecuencia de engranaje, frecuencia de piñón y frecuencia de engrane (GMF). Se procede a estimar el par de carga a través del par eléctrico en estado estable, Ecuación (2.15), para todas las muestras tomadas de la base de datos; debido a la gran cantidad de datos se generó una nueva base de datos solo con los pares eléctricos. En el Capítulo 4 se muestran los resultados y sus respectivos análisis.

3.3.7 Validación del par de carga constante por modelo matemático

Para esta sección se introducirá el par del freno magnético constante determinado en la Tabla 3.16 en el modelo del motor de inducción trifásico para estimar el par eléctrico en estado estable vía simulación. Gráficamente se compara esta señal con la estimación respectiva del par eléctrico para cada una de las muestras de la base del plan experimental “Línea base del motor”. El par eléctrico simulado, en estado estable, deberá reflejar la suma del par constante del freno y las pérdidas por fricción mecánica del motor, ver Ecuaciones (3.15) y (3.16).

Para la simulación se requiere conocer la amplitud y frecuencia de la señal de tensión de línea del experimento. A continuación se presentan los pasos para obtener estos parámetros:

- 1 Se calculan los valores eficaces o *rms* de las señales de tensión trifásicas de todas las muestras, mediante la Ecuación (3.10).
- 2 Se promedia los valores eficaces de tensión obtenidos.
- 3 Se determina la transformada discreta de Fourier (DFT) de las señales de tensión trifásicas de todas las muestras y se identifica la frecuencia de la componente fundamental.
- 4 Se refiere los valores encontrados al sistema adimensional de unidades mediante las bases definidas en la Tabla 3.18. En la Tabla 3.17 se muestran los valores encontrados.

En la Figura 3.14(a) se puede ver un ejemplo de la DFT aplicada a la señal de tensión v_{ab} en la que se identifica la componente fundamental.

Tabla 3.17: Parámetros de la señal de tensión a simular

Parámetro	Valor Real	Valor por unidad
Tensión	215.97 Vrms	0.9817
Frecuencia	58.6 Hz	0.9767

Tabla 3.18: Bases del sistema para la conexión del motor doble estrella paralelo

Motor 1	V_{Base}	S_{Base}	I_{Base}	ω_{Base_e}	ω_{Base_m}	Z_{Base}
Conexión Y	220	1491	3.91	377	125.7	32.46
Unidad	V	W	A	$\frac{rad}{s}$	$\frac{rad}{s}$	Ω

La simulación se realiza de forma similar que en la Sección 3.1.1 mediante las Ecuaciones (2.3) y (2.6). El par de carga T_m , es modelado de acuerdo a la Ecuación (3.16), en la que T_{fm} representa los pares constantes estimados de la Tabla 3.16. Se ha realizado la simulación del motor M1, para el motor M2 se procede de forma similar.

Se comparan los pares simulados contra los que se estimaron en la Sección 3.3.6 a través de la Ecuación (2.15), con el fin de validar el par de carga constante. En la Figura 3.28 se muestra una comparación entre estas señales para los tres tipos de carga utilizados. Cabe mencionar que L1 corresponde al motor en vacío. A las señales de par eléctrico obtenidas mediante experimentación (señales en azul) se ha aplicado un filtro para suavizar la señal y apreciar de mejor manera la componente continua en el tiempo. El tipo de filtro implementado se denomina Savitzky-Golay, el cual ajusta un pequeño conjunto de datos a un polinomio, y usa el punto central calculado de la curva polinomial ajustada como el nuevo punto de datos suavizado [53], [54]. El ajuste del polinomio se lleva a cabo mediante el método de mínimos cuadrados. MATLAB dispone la implementación de este filtro, cuyos parámetros son el orden del polinomio y la longitud de datos o ventana a realizar el ajuste, para el presente caso se ha escogido un polinomio de orden uno debido a que una de las características de la señal es ser continua en el tiempo y una longitud de ventana lo suficientemente amplia.

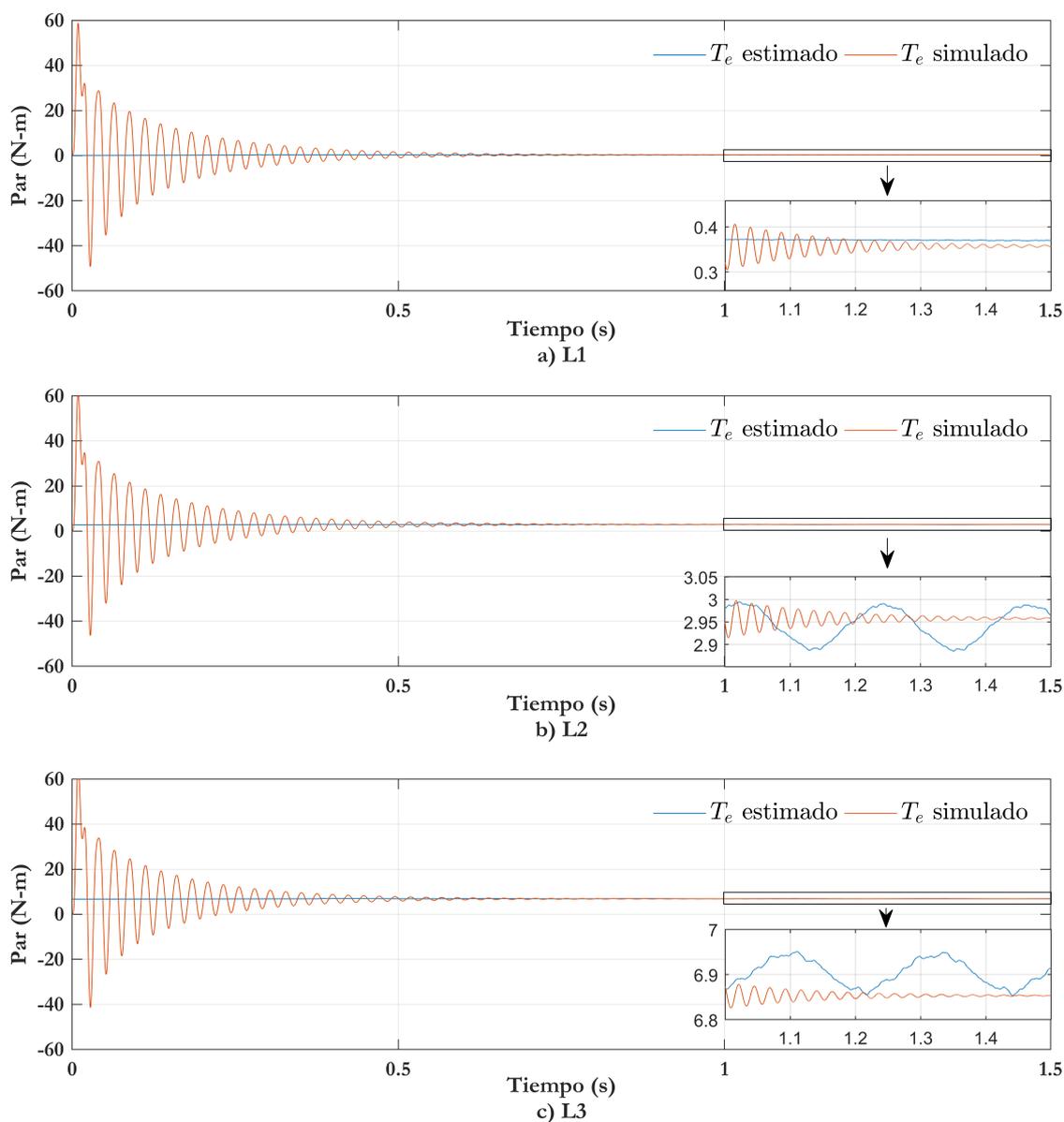


Figura 3.28: Comparación de la señal de par de carga estimada y simulada al introducir en el modelo del motor el par del freno: a) carga L1, b) carga L2 y c) carga L3

Las señales estimadas de las Figuras 3.28(b) y 3.28(c) a pesar de ser filtradas presentan oscilaciones de pequeña amplitud que sin embargo permiten realizar comparaciones con las señales simuladas. Para cuantificar el error, se utilizó los datos de la Tabla 3.16 y se calculó el promedio de la magnitud del par simulado para instantes de tiempo mayores a 1 s (datos en estado estable), estos resultados se presentan en la Tabla 3.19. Estas oscilaciones con carga L1 y L2 se presentan debido a que el par de las poleas para transmitir el par de carga constante a través del freno magnético no ha sido considerado en el modelo matemático simulado.

Además, se comparó las velocidades medidas y simuladas, ver Figura 3.29. Las velocidades fueron medidas para cada muestra mediante un encoder conectado al eje del motor

Tabla 3.19: Error porcentual relativo entre señales de par de carga constante medidas y simuladas

Parámetro	L1	L2	L3	Unidad
Tm estimado	0.376	2.964	6.856	N-m
Tm simulado	0.358	2.958	6.853	N-m
Error relativo	4.79	0.20	0.04	%

según el plan experimental, estas fueron identificadas en la Sección 3.3.6 cuando se estimó el par de carga constante. En la Tabla 3.20 se presenta la respectiva cuantificación del error entre las señales medidas y simuladas.

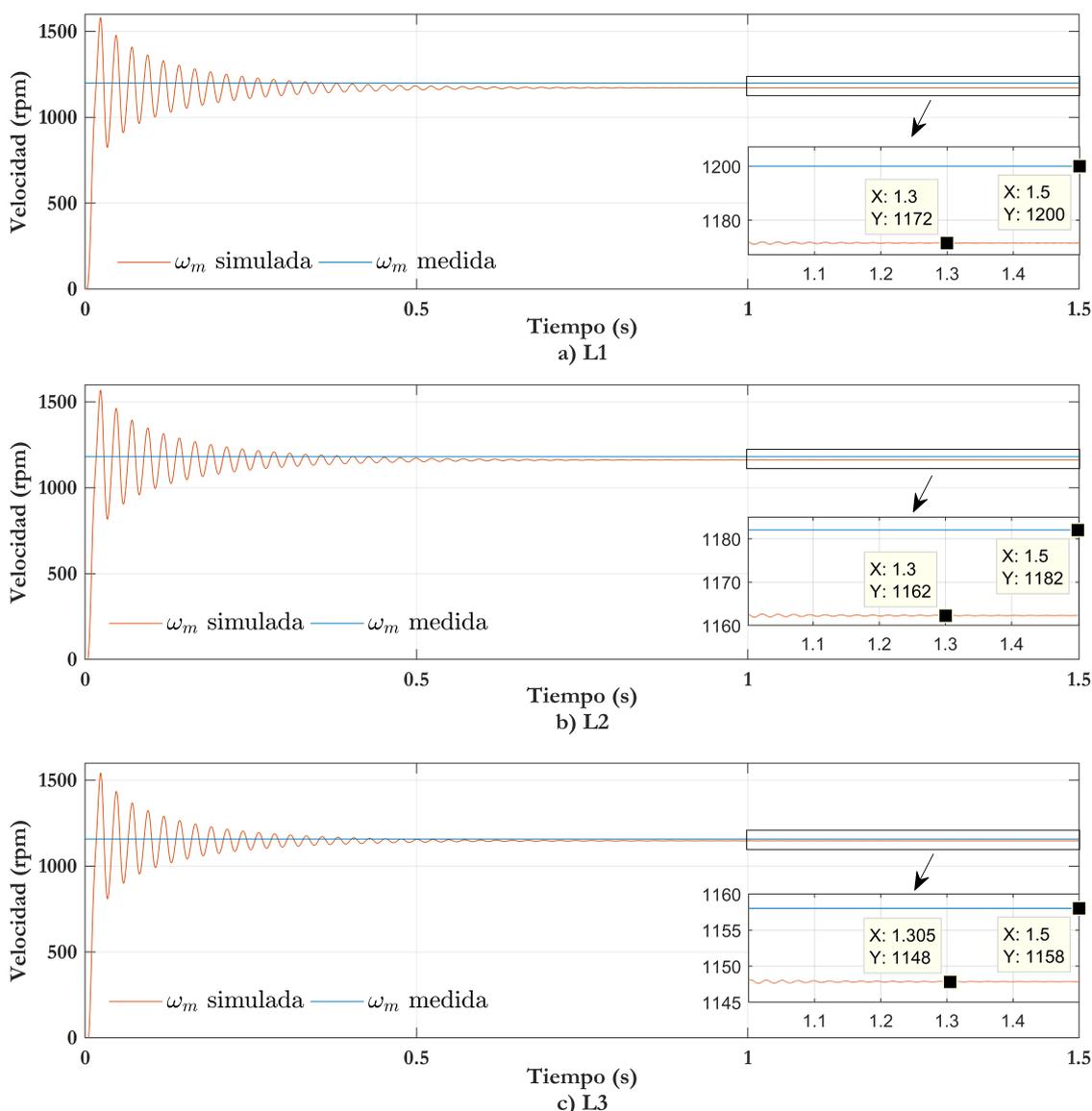


Figura 3.29: Comparación de la señal de velocidad medida y simulada al introducir en el modelo del motor el par del freno: a) carga L1, b) carga L2 y c) carga L3

Como se aprecia en las Tablas 3.19 y 3.20, el porcentaje de error obtenido es menor conforme aumenta la carga conectada al motor. Este suceso se justifica debido al tipo

Tabla 3.20: Error porcentual relativo entre señales de velocidad medidas y simuladas

Parámetro	L1	L2	L3	Unidad
w_m medida	20	19.7	19.3	Hz
w_m medida	1200	1182	1158	rpm
w_m simulada	1172	1162	1148	rpm
Error relativo	2.33	1.69	0.86	%

de rotor del modelo del motor implementado ó también debido a que el modelo de las pérdidas por fricción mecánica internas del motor es un polinomio de grado mayor, esta última opción puede ser corroborada o descartada al realizarle una prueba al motor a diferentes velocidades para establecer una curva de su comportamiento. Esta prueba no ha sido considerada dentro del presente proyecto y por razones de logística tampoco se pudo realizar, sin embargo, según los resultados obtenidos se muestra un error bajo para la carga L1 y muy bajo para las cargas L2 y L3, por lo que se continuará usando el modelo lineal de pérdidas mecánicas por fricción.

De esta manera se culmina la validación del modelo matemático bajo carga constante, pudiendo verificar que, en efecto, el par eléctrico puede usarse para estimar el par de carga, y analizar los componentes frecuenciales allí presentes con propósitos de detección y diagnóstico de fallos en cajas de engranajes.

Capítulo 4

Análisis de señales de par eléctrico en estado estable considerando una caja de engranajes

En este capítulo se realiza un análisis de las señales de par eléctrico en estado estable con carga generada por una caja de engranajes calculadas en el Capítulo 3, con el fin de mostrar la sensibilidad que posee la señal de par de eléctrico frente a fallos mecánicos que ocurren en el engrane piñón de la caja de engranajes. Mediante la transformada de Fourier se han trazado los espectros de amplitud y potencia de la señal para mostrar la presencia de indicadores de salud como son ciertas componentes frecuenciales propias del sistema mecánico. Además, se ha realizado una comparación con señales de vibración que fueron levantadas en el plan experimental, ya que este tipo de señal ha sido ampliamente estudiada. Finalmente, se ha analizado los cambios que se producen en la amplitud y potencia de las componentes de frecuencia de la señal de par conforme el estado de salud del engrane se deteriora.

4.1 Estudio de sensibilidad usando el espectro de amplitud

Como se mencionó anteriormente, una de las técnicas de procesamiento de señales para identificar las componentes de frecuencia que determinan el estado de salud del sistema mecánico, es la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a través del espectro de amplitud de la señal.

Para verificar la existencia de las componentes frecuenciales de interés en la señal de par de carga, se realiza una comparación en el dominio de la frecuencia con señales de vibración tomadas en el plan experimental. Se ha escogido la señal de vibración localizada en el acelerómetro A3, debido a que esta se encuentra más cercana al fallo en la caja de engranajes según la Figura 3.11. Esta verificación se ha realizado con el engranaje sin fallo

de rotura de diente y con el fallo al 50% y 100% de nivel de severidad y con la mayor carga constante (L3) proporcionada por el freno magnético. Las siguientes gráficas comprenden las muestras tomadas con el Motor M1, sin embargo los análisis son aplicados a los dos motores de la base. A las señales a utilizar no se les ha aplicado la técnica de rellenado de ceros, debido a que se desea mostrar las características originales que presentan los espectros de amplitud.

Las frecuencias de las componentes de interés de la caja de engranajes se determinan mediante las ecuaciones de la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Frecuencias características de la caja de engranajes

Descripción	Ecuación	Unidad
Frecuencia de giro del motor	$F_m = \frac{RPM_{motor}}{60}$	Hz
Frecuencia de giro del piñón	$F_p = F_m$	
Frecuencia de giro de la rueda	$F_g = F_m \frac{Z_1}{Z_2}$	
Frecuencia de engrane de engranajes (GMF)	$GMF = F_p \cdot Z_1 \text{ ó } F_g \cdot Z_2$	
Bandas laterales de la GMF	$F_1 = GMF \pm F_p $	
	$F_2 = GMF \pm F_g $	

En la Tabla 4.2 se muestran las frecuencias calculadas de las componentes a observar en los espectros de frecuencia.

Tabla 4.2: Frecuencias de las componentes características de la caja de engranajes

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Frecuencia de giro del motor	F_m	19.3	Hz
Frecuencia de giro del piñón	F_p	19.3	
Frecuencia de giro de la rueda	F_g	12.8	
Frecuencia de engrane de engranajes (GMF)	GMF	617.6	
Bandas laterales de la GMF	$F_{GMFp\ 1,2}$	598.3 , 636.9	
	$F_{GMFg\ 1,2}$	604.8 , 630.4	

En las siguientes figuras para facilitar la ubicación de las bandas laterales, se ha trazado circunferencias que encierran sus picos. Las frecuencias determinadas en la Tabla 4.2 ayudarán a identificar las componentes de frecuencia en los espectros, cabe indicar que las componentes no se encontrarán exactamente en las frecuencias calculadas, debido a pequeñas imperfecciones en los componentes mecánicos rotatorios o un error relativamente pequeño en la medición de la velocidad del motor, que afectaría las frecuencias calculadas mediante las ecuaciones de la Tabla 4.1. Por otra parte, debido al gran tamaño del espectro de frecuencia se han establecido tres ventanas para analizar las componentes de interés.

En la Figura 4.1 se presentan los espectros de amplitud de las señales de vibración y par eléctrico de la caja de engranajes sin fallo. En 4.1(a) el pico de la frecuencia del engranaje en la señal de vibración no se puede identificar adecuadamente, se observa ruido alrededor, por el contrario el pico en la señal de par se observa claramente. En cuanto a la frecuencia del piñon, 4.1(b), ambas señales son claras y coincidentes en frecuencia. En 4.1(c) se observa la presencia de la GMF en las dos señales, por otra parte, las bandas laterales de vibración son evidentes en vibración mientras en par son inexistentes.

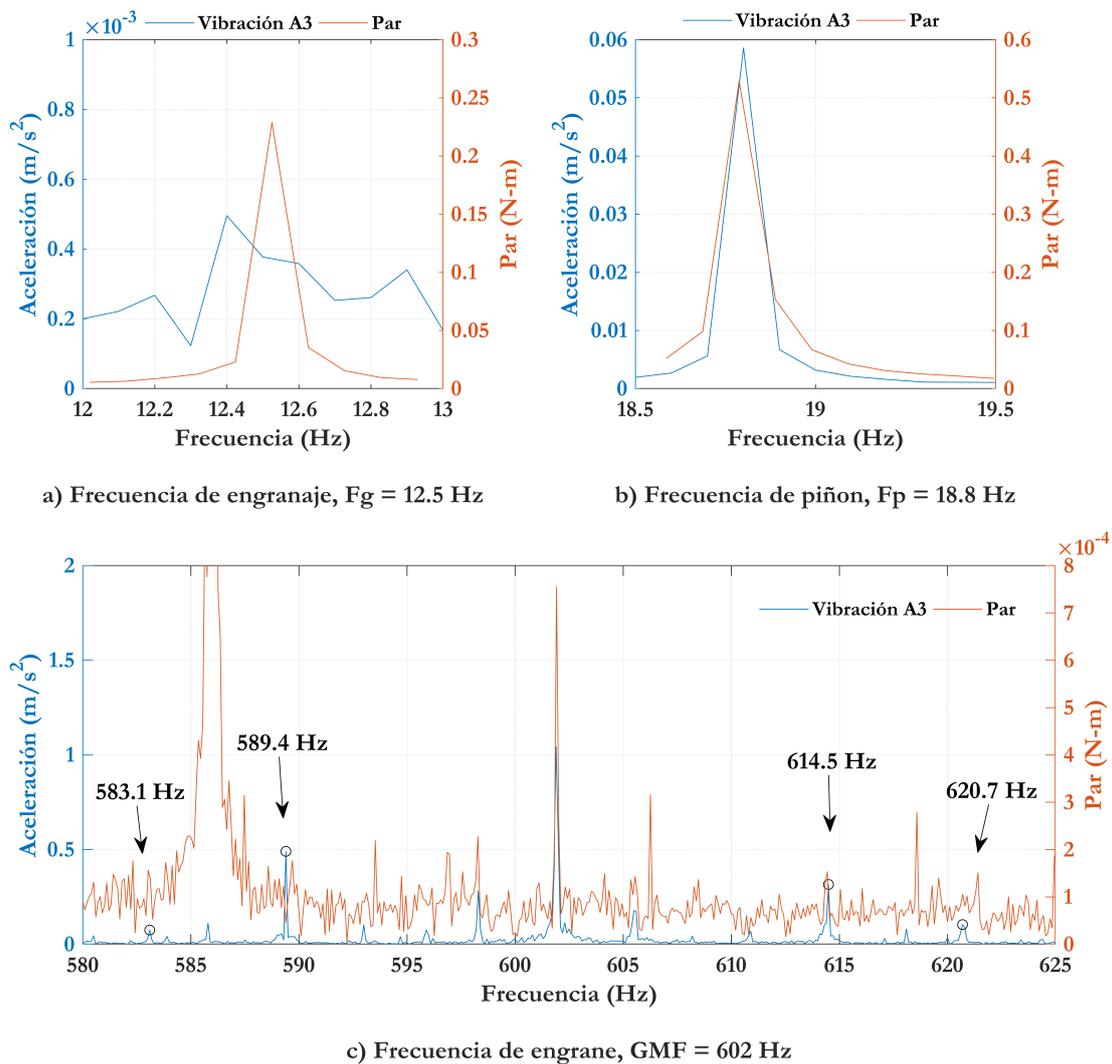


Figura 4.1: Comparación en frecuencia de la señal de par y la señal de vibración A3, en condición normal de funcionamiento de la caja de engranajes, usando el motor M1 con carga L3

En la Figura 4.2 se presentan los espectros de amplitud de las señales de vibración y par eléctrico de la caja de engranajes con pérdida del diente del piñon del 50% de su volumen (fallo con severidad moderada). En 4.2(a) el pico de la frecuencia del engranaje en la señal de vibración es evidente, por el contrario de la señal de par, este pico no es evidente; esto se debe a una estimación inexacta de la amplitud de las componentes

frecuenciales de la señal como se mencionó en la Sección 2.4. La frecuencia del piñón se puede identificar fácilmente en los espectros de las señales de vibración y par en 4.2(b). En 4.2(c) la GMF es apreciada en los dos espectros, las bandas laterales son claras en la señal de vibración y en la señal de par, aunque en esta última cuesta identificar los picos debido al ruido cercano. La banda lateral del extremo izquierdo del espectro de la señal de par se pierde debido a una frecuencia de amplitud mucho mayor.

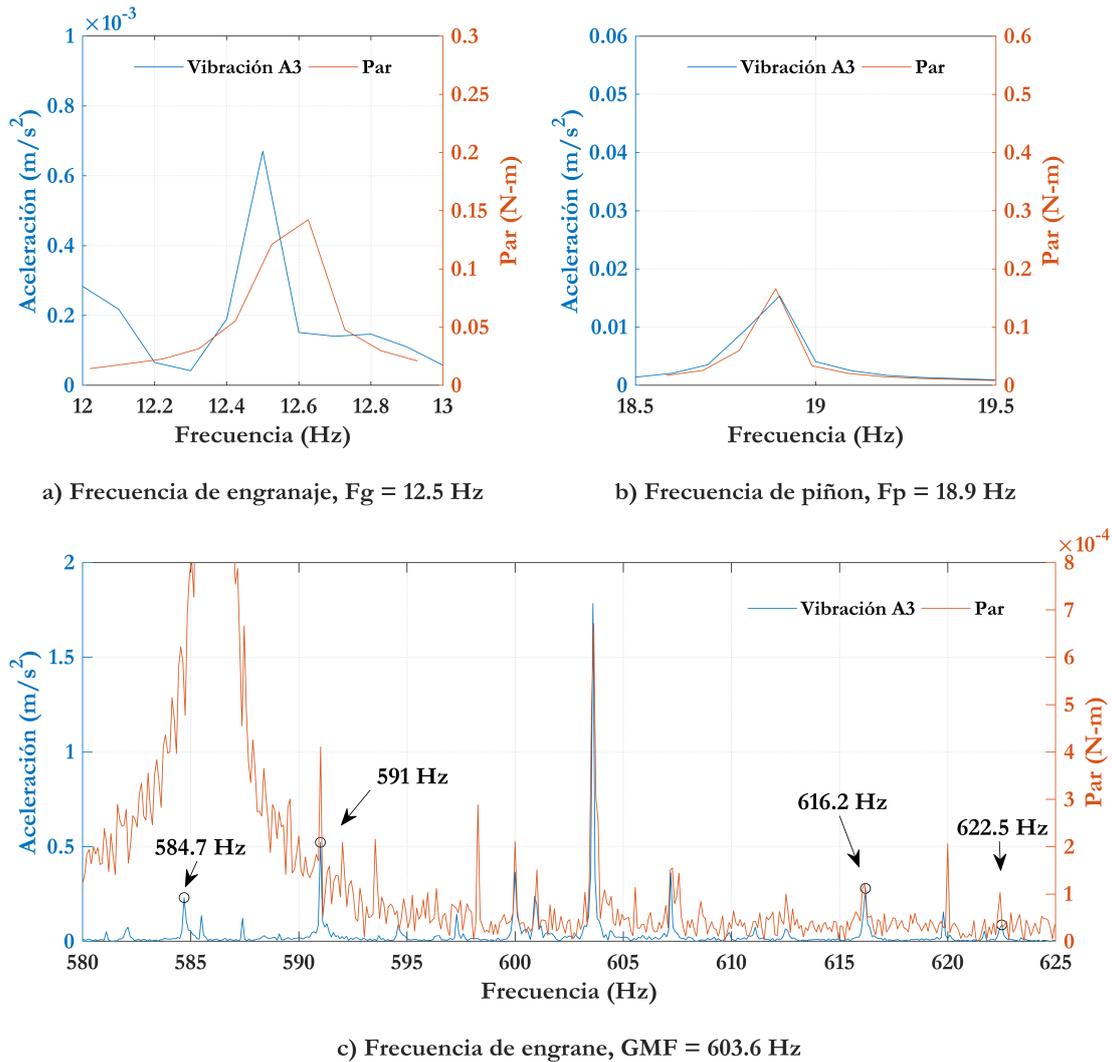


Figura 4.2: Comparación en frecuencia de la señal de par y la señal de vibración A3 de la caja de engranajes, con fallo de rotura de diente del 50%, usando el motor 1 con carga L3

En la Figura 4.3 se presentan los espectros de amplitud de las señales de vibración y par eléctrico de la caja de engranajes con pérdida del diente del piñón del 100% de su volumen (fallo severo). En 4.3(a) y 4.3(b), la frecuencia del engranaje y la de piñón respectivamente, son completamente claras y comparten las mismas frecuencias. En 4.3(c) la GMF es apreciada en los dos espectros a igual frecuencia y además presentan la misma forma ocasionada por el diente roto. Las bandas laterales solo están presentes en la señal de vibración y además presentan una forma similar a la de su GMF.

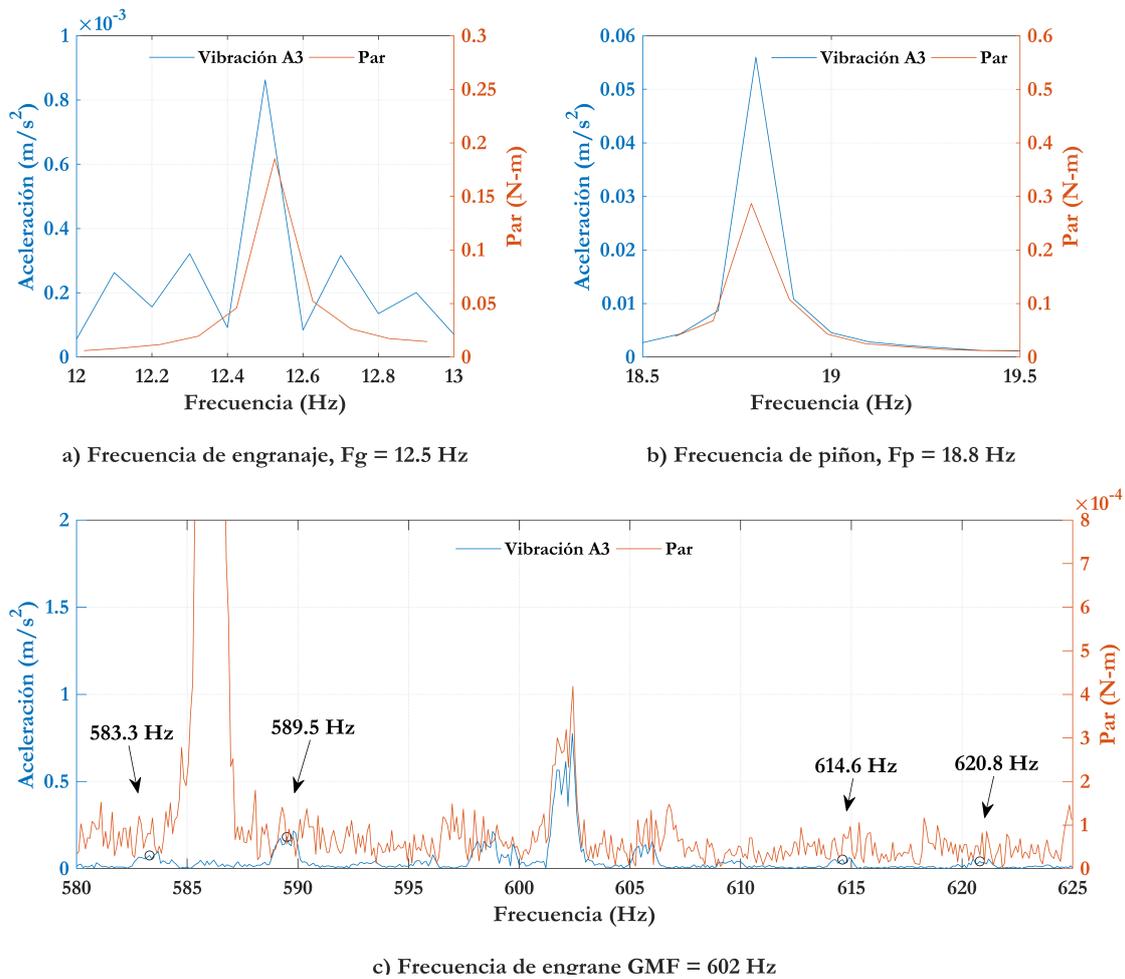


Figura 4.3: Comparación en frecuencia de la señal de par y la señal de vibración A3 de la caja de engranajes, con fallo de rotura de diente del 100%, usando el motor 1 con carga L3

En la Figura 4.1(c), Figura 4.2(c) y Figura 4.3(c) se pudo apreciar que existe una componente de mayor amplitud que la propia GMF, esta frecuencia comprende los 586 Hz y no ha podido ser justificada la razón de su naturaleza en el presente proyecto. Sin embargo, no tiene mayor repercusión en los objetivos establecidos como se seguirá explicando a continuación. Por otra parte, cabe mencionar que no todas las repeticiones de la base de datos presentan el problema de estimación de amplitud de la componentes frecuenciales de la Figura 4.2(a) de la señal de par, sin embargo posteriormente se empleará la técnica de rellenado de ceros para mejorar esta estimación.

Con relación a la señal de par de carga, en la Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3 las amplitudes en las frecuencias del engranaje (a) y las frecuencias del piñón (b) experimentan un disminución en presencia del fallo moderado ($dr\%=50$), mientras que, cuando el piñón ha perdido todo su diente su amplitud aumenta respecto la amplitud de la condición anterior. En cambio en (c) la amplitud de la GMF sufre un aumento en presencia del fallo moderado pero que en ausencia de la totalidad del diente del piñón disminuye.

El paso siguiente para determinar la sensibilidad de la señal de par eléctrico, es comparar el cambio en amplitud en las frecuencias de interés, conforme la severidad del fallo aumenta. Las bandas laterales no se consideran en este análisis. Para comparar las amplitudes de las señales se toma el máximo valor de las ventanas mostradas a excepción de la GMF, que requiere una mayor reducción de su ventana para identificar la amplitud de la componente correcta.

Para observar de mejor manera estos cambios, se han trazado las amplitudes de las frecuencias de interés de acuerdo a la severidad del fallo, véase la Figura 4.4. Estas amplitudes corresponden al promedio de las repeticiones realizadas para cada fallo y tipo de carga del motor M1. De similar manera, en la Figura 4.5 se presentan dichas curvas con el uso del motor M2.

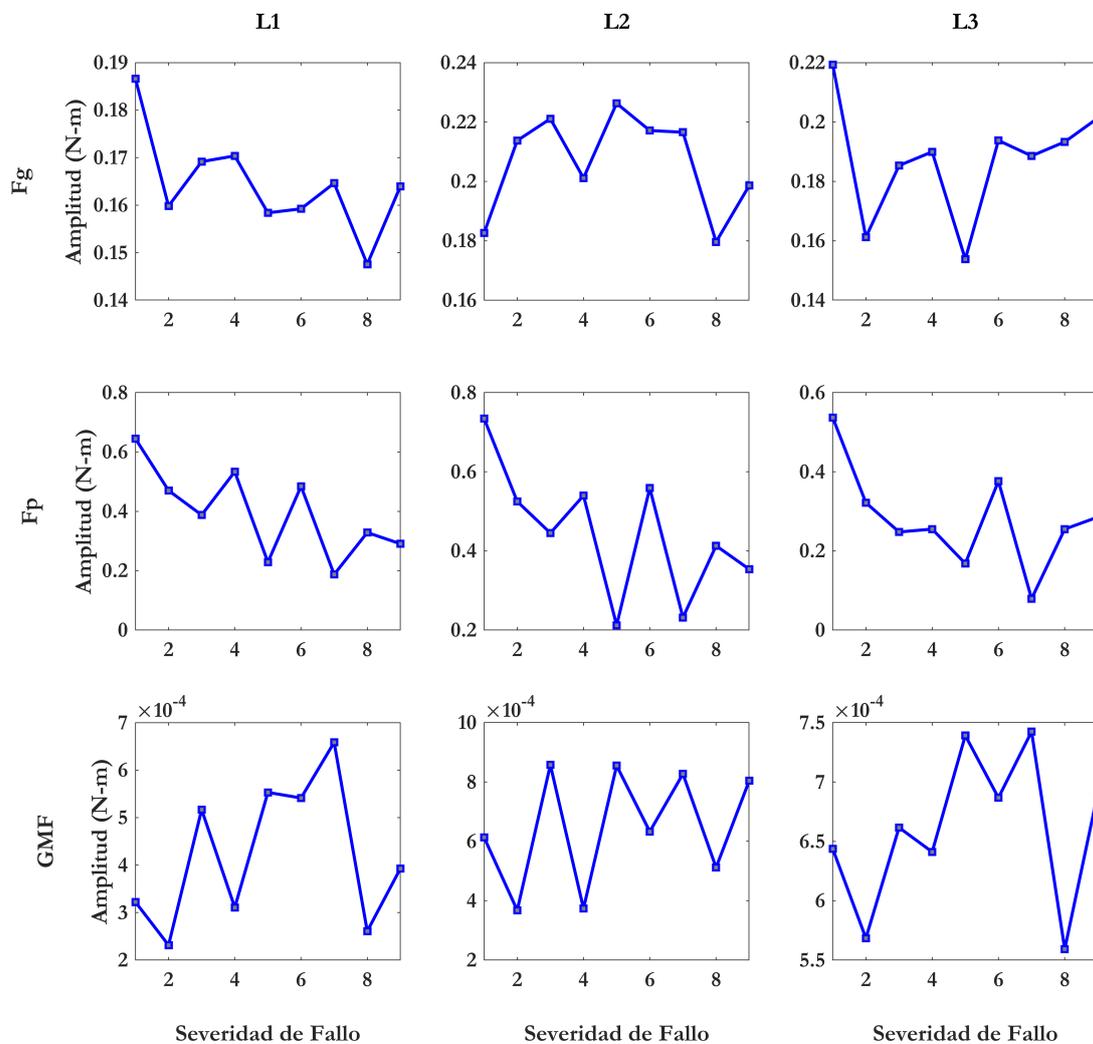


Figura 4.4: Curvas de amplitud vs. nivel de severidad de fallo de la componente Fg, Fp y GMF de la señal de par, usando el motor M1

En la Figura 4.4, para la curva amplitud vs. severidad de fallo de la carga L3 y correspondiente a la frecuencia del engranaje, se observa como ya se mencionó anteriormente,

en P5 una disminución de la amplitud respecto la condición normal de salud (P1) y luego un incremento en P9 respecto la amplitud anterior. Con esta misma carga para la frecuencia GMF y frecuencia del piñon (Fp) se observa el comportamiento descrito previamente para P1, P5 y P9.

Adicionalmente, para la frecuencia del piñon (Fp) y frecuencia de engrane (GMF) de la Figura 4.4, se observa el mismo patrón de comportamiento conforme aumenta la carga de L1 a L3. En esta misma figura, para la frecuencia del engranaje (Fg) se observa que no se mantienen el mismo patrón entre cargas, no obstante se implementa técnicas de procesamiento de señales para tratar de mejorar la estimación de la amplitud de las componentes frecuenciales. Así, se pretende descartar posibles errores en el comportamiento de las curvas mostradas. De igual manera se aplicará estas técnicas para los resultados obtenidos con el motor M2, de la Figura 4.5.

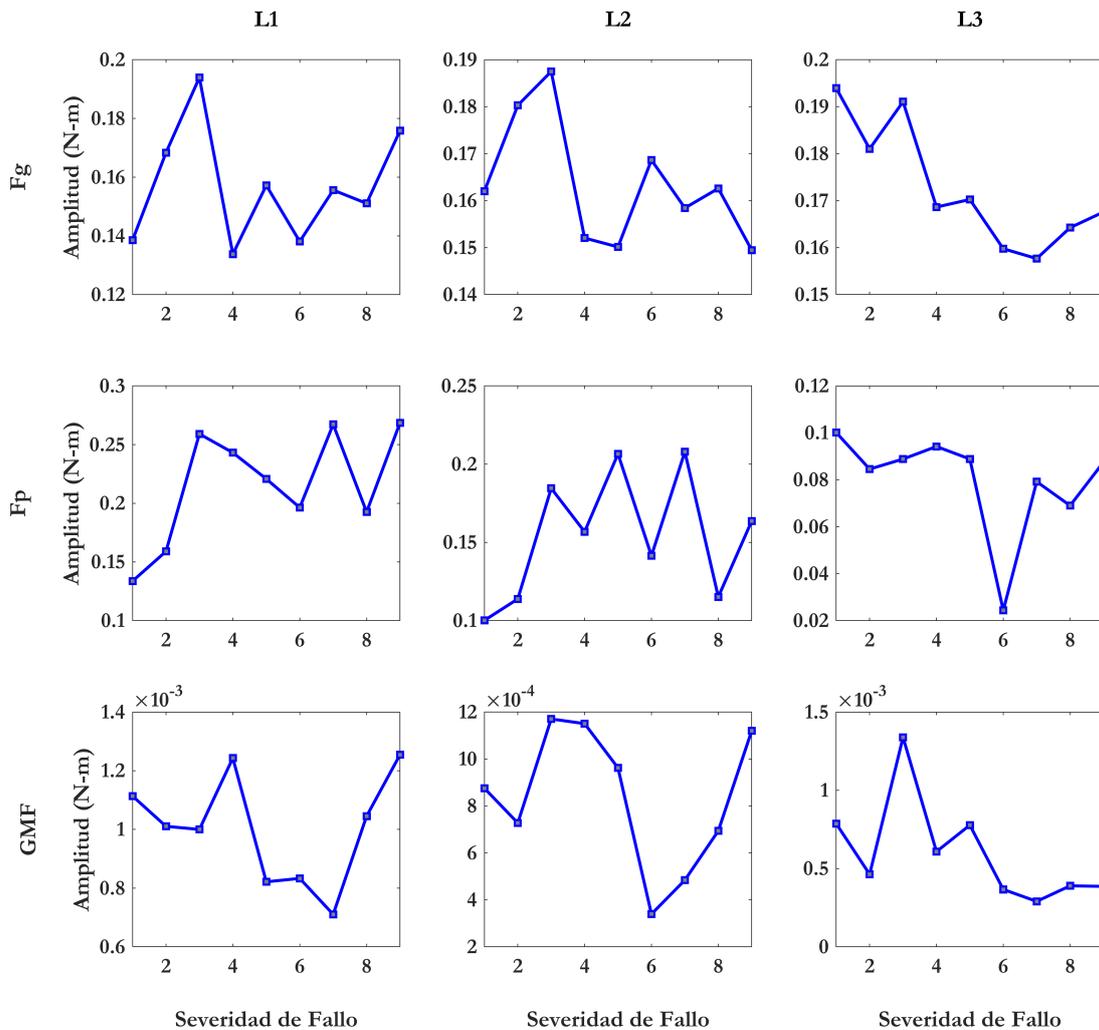


Figura 4.5: Curvas de amplitud vs. nivel de severidad de fallo de la componente Fg, Fp y GMF de la señal de par, usando el motor M2

En general en la Figura 4.4 y Figura 4.5, todas las gráficas muestran un comportamiento no uniforme conforme aumenta la severidad del fallo, además de mostrar valores diferentes entre los niveles de fallo, para cada carga. Esto último es una característica particularmente importante al momento de usar la amplitud en estas frecuencias como indicador de condición de la máquina. Particularmente, la amplitud de la señal normal P1 es bastante diferenciable del resto de las condiciones de fallo.

4.2 Estudio de sensibilidad usando el espectro de amplitud con la técnica de rellenado de ceros y el espectro de potencia

Para mejorar la estimación de la amplitud de las componentes de interés de la señal de par, se ha empleado en todas las muestras un rellenado de ceros como se presenta en la Sección 2.4 para calcular la transformada de Fourier y además se ha trazado el espectro de potencia como procesamiento de señal alternativo al espectro de amplitud utilizado.

En la Figura 4.6 se ha trazado los espectros de amplitud de las señales de par y vibración con la técnica de rellenado de ceros, para mostrar las características que presentan los espectros. Cabe indicar que con el fin de comparación, las señales utilizadas corresponden al tipo de fallo moderado, las mismas con las que se trazaron los espectros de frecuencia de la Figura 4.2.

En la Figura 4.6(a), se aprecia que las amplitudes de las señales de vibración y par son fácilmente identificadas. También, se puede observar que las frecuencias de las componentes de las señales no coinciden exactamente, sin embargo la diferencia entre estas es considerada mínima. En la Figura 4.6(b), se puede observar que las amplitudes de las señales se identifican con facilidad, además las frecuencias de las componentes son coincidentes. En la Figura 4.6(c), el espectro de vibración muestra claramente la amplitud de la componente GMF y también de sus bandas laterales. En cambio, en el espectro de par es apenas visible la componente GMF debido a ser de pequeña amplitud en relación al ruido de alrededor, debido a esta razón fue necesario ampliar los límites de los ejes en comparación de la Figura 4.2(c) para evitar que la señal de par oculte la señal de vibración.

En la Figura 4.7 se ha trazado el espectro de potencia de las señales de par y vibración, de igual manera que en el caso anterior, usando las señales con las que se determinaron los espectros de la Figura 4.2 de severidad de fallo moderado, con el fin de tener una referencia de comparación.

En la Figura 4.7(a) y Figura 4.7(b) se pueden identificar fácilmente las amplitudes y frecuencias de las componentes de interés. En la Figura 4.7(c) se logra apreciar sin dificultad la amplitud y la frecuencia de la componente GMF y sus bandas laterales de

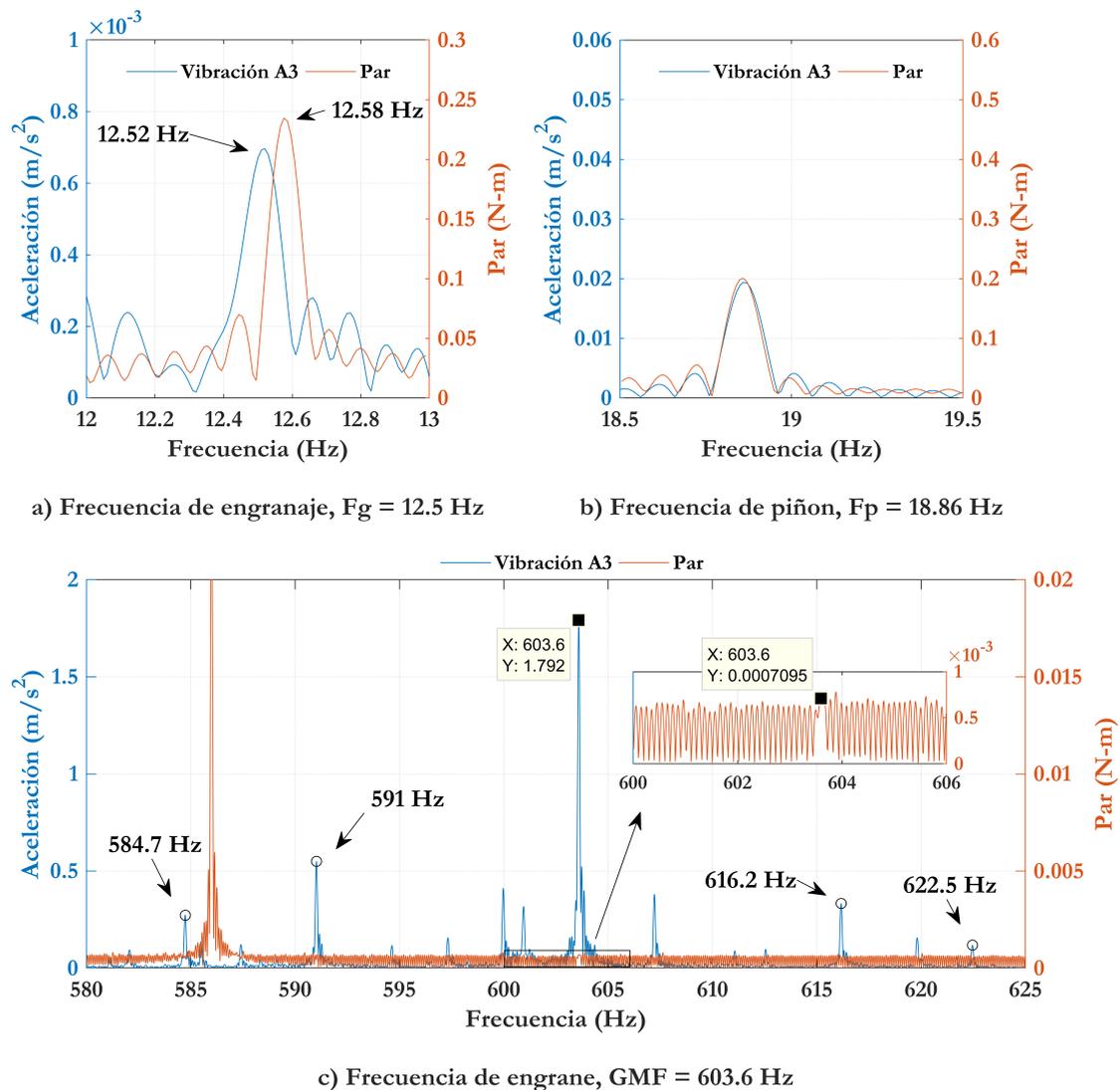


Figura 4.6: Comparación en frecuencia de la señal de par y la señal de vibración A3 de la caja de engranajes aplicada la técnica de rellenado de ceros, con fallo de rotura de diente del 50%, usando el motor M1 con carga L3

la señal de vibración. En esta última figura en el espectro de potencia de la señal de par, uno de los picos más altos mostrados, representa la GMF, lo que indica que se puede identificar de mejor manera esta componente y por ende los cambios en potencia que se puedan suscitar frente a diferentes niveles de severidad de fallos.

De igual manera que en la sección anterior, Sección 4.1, se presentan los resultados de las amplitudes y las potencias identificadas en los espectros contra el nivel de severidad de fallo. Las amplitudes y potencias graficadas corresponden a los promedios obtenidos de las muestras clasificadas por nivel de fallo, carga y motor. En la Figura 4.8 se presenta las gráficas correspondientes al motor M1, mientras en la Figura 4.9 se encuentran las correspondientes al motor M2.

En la Figura 4.8 se logra apreciar que el comportamiento de las curvas sigue la misma tendencia en los dos métodos empleados, a excepción de F_g y GMF para la carga L3. Al

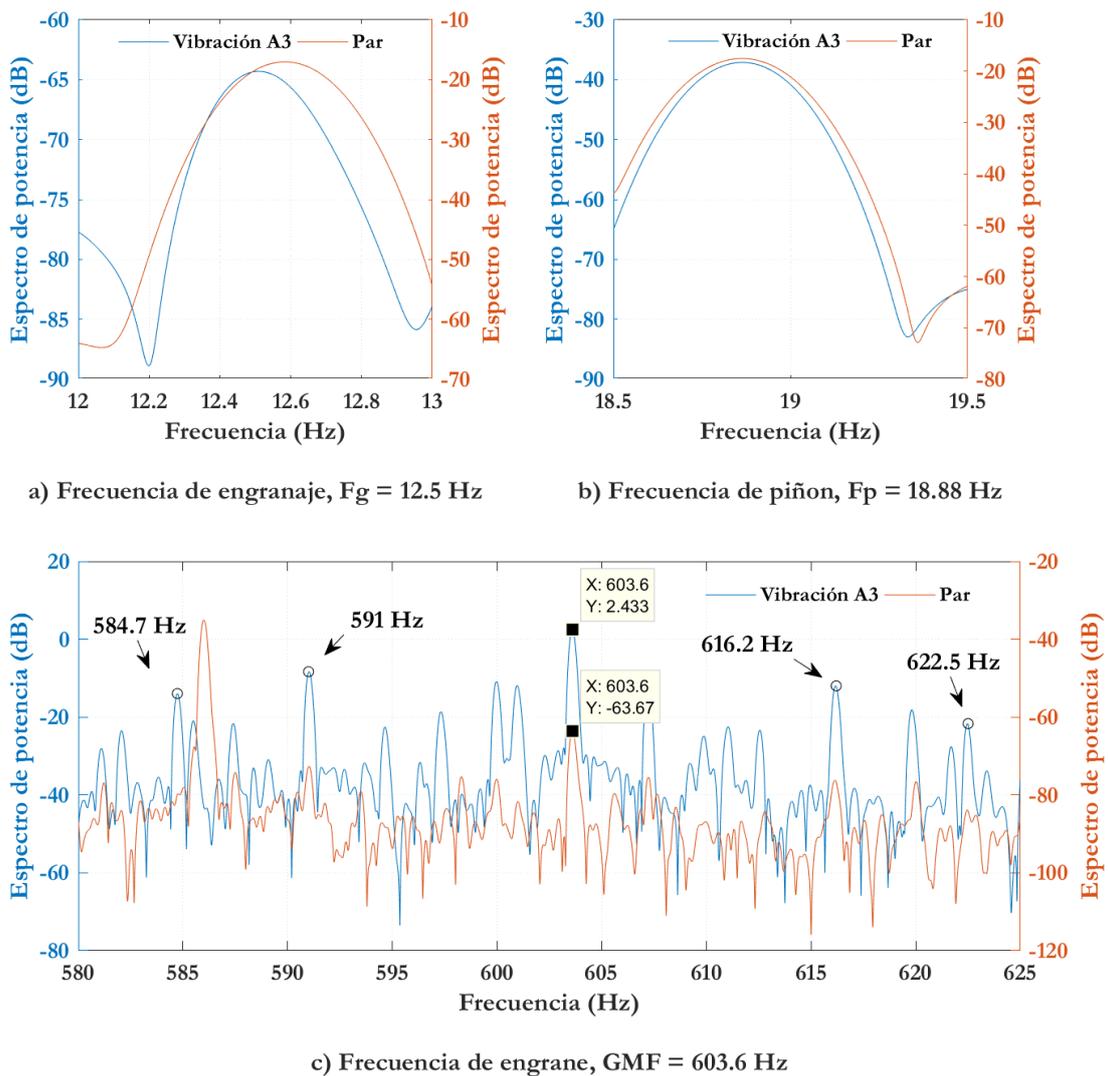


Figura 4.7: Comparación en frecuencia de la señal de par y la señal de vibración A3 de la caja de engranajes mediante el espectro de potencia, con fallo de rotura de diente del 50%, usando el motor M1 con carga L3

comparar estos dos últimos pares de curvas con sus semejantes en carga de la Figura 4.4, se aprecia que las curvas con el método del espectro de potencia guardan mayor similitud en tendencia que la curva obtenida por el método de rellenado de ceros.

Al comparar las Figuras 4.4 y 4.8 para F_g , se aprecia una tendencia mejor definida para las cargas L1 y L2 por el método del espectro de potencia. Con este aumento en la precisión de la estimación de las amplitudes por parte de la técnica del espectro de potencia, se puede asegurar que el aumento de carga puede cambiar la tendencia observada en otras cargas, como sucede en la curva de L3 para F_g de la Figura 4.8 en consideración de las cargas L1 y L2.

En la Figura 4.9 se logra apreciar que el comportamiento de las curvas al igual que anteriormente sigue la misma tendencia en los dos métodos empleados, a excepción de F_g en la carga L3. Estas curvas correspondientes a los dos métodos empleados, no guardan

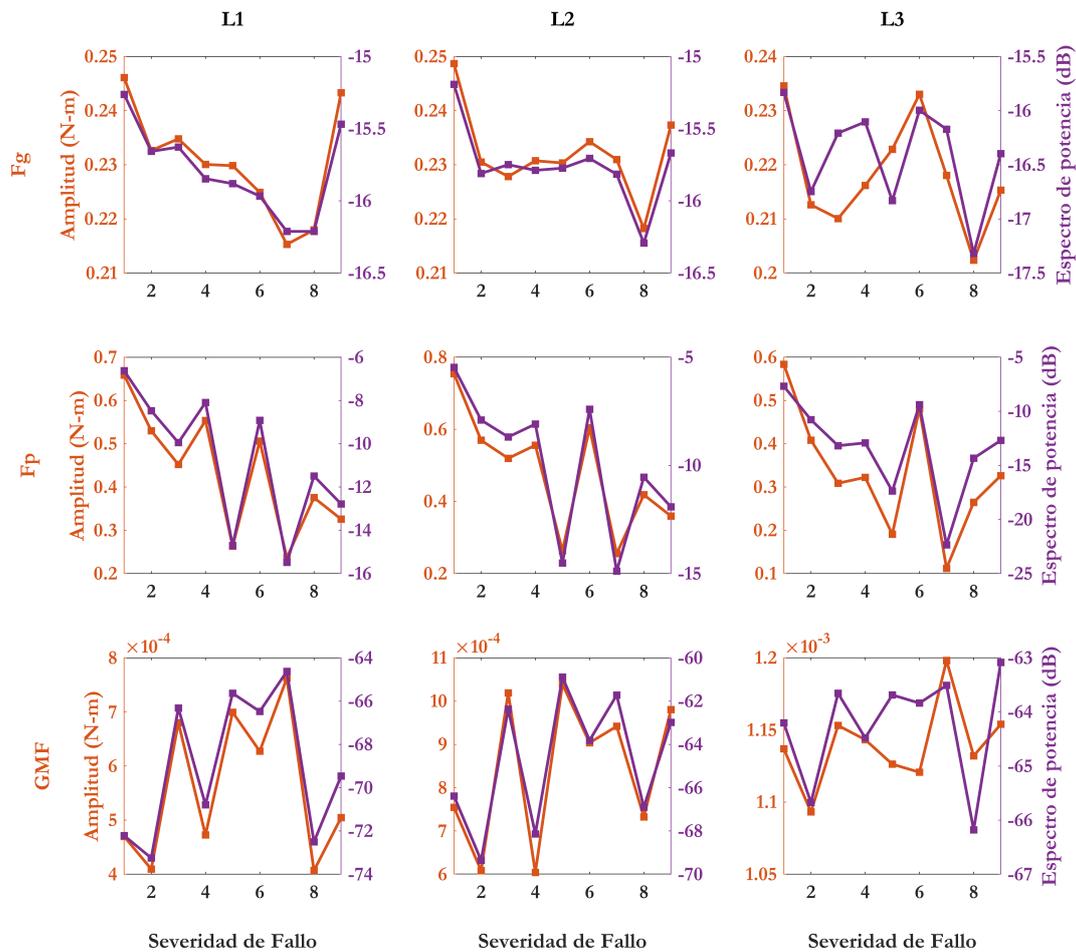


Figura 4.8: Curvas de amplitud vs. nivel de severidad de fallo de la componente Fg, Fp y GMF de la señal de par, motor M1 y empleando dos técnicas distintas.

ninguna similitud con la curva semejante de la Figura 4.5. A pesar de ello, si son comparables entre sí, por carga, las tendencias de los dos métodos empleados; en la Figura 4.9, se observa que el método del espectro de potencia es el que mejor describe los cambios en la magnitud. El resto de curvas de las Figuras 4.9 y 4.5 guardan las mismas tendencias.

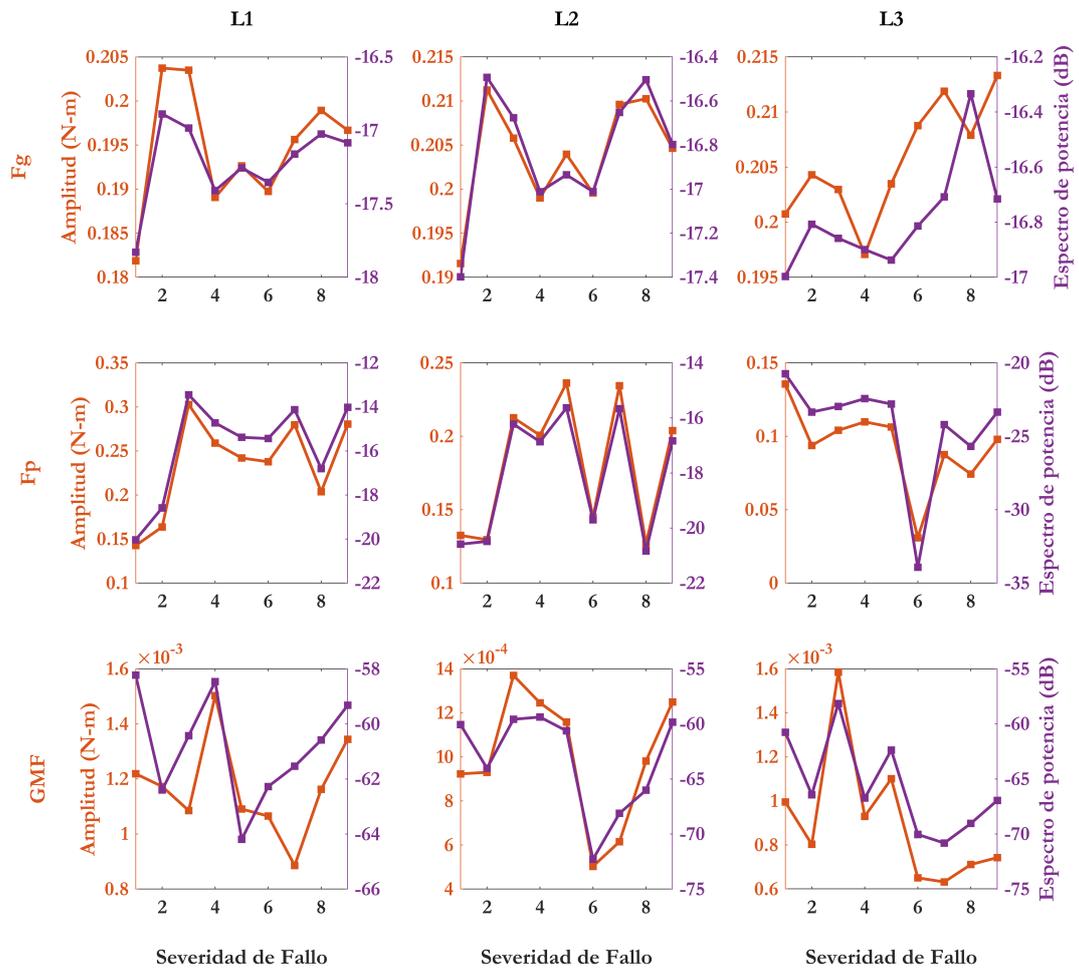


Figura 4.9: Curvas de amplitud vs. nivel de severidad de fallo de la componente Fg, Fp y GMF de la señal de par, motor M2 y empleando dos técnicas distintas.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajo futuro

5.1 Conclusiones

El análisis en frecuencia de la señal de par eléctrico en estado estable ha permitido identificar cambios en amplitud de sus frecuencias de interés como son la frecuencia de engranaje Fg , frecuencia de piñón Fp y frecuencia de engrane de engranajes (GMF). Estos cambios han sido evidenciados a partir de una condición leve del fallo hasta alcanzar una condición severa, como es el caso de pérdida del 12.5% hasta el 100% del diente del piñón, respectivamente. Por lo tanto, se puede afirmar que la señal de par eléctrico en estado estable como estimación del par de carga, es sensible al fallo por rotura de diente de una caja de engranajes y por ende puede ser utilizada para detectar el fallo.

Para estimar el par de carga se ha basado en la ecuación mecánica de la máquina de inducción. Debido a que el monitoreo de la señales se realiza en régimen estacionario, la aceleración de la máquina es nula y por lo tanto el par eléctrico y el par de carga son iguales. La estimación del par eléctrico es un método no invasivo que requiere solo conocer la resistencia eléctrica de uno de los devanados del motor y la medición de la señales de tensiones y corrientes trifásicas. Por tal razón, la convierten en un método adecuado para monitorear la señal de par de carga. Cabe mencionar que la estimación del par eléctrico al estar basada en variables estáticas se puede aplicar para cualquier máquina de inducción trifásica, esto ocurre, debido a que no existen diferentes tipos de construcción de estatores, al contrario de lo que ocurre con los rotores, por lo que el cálculo es el mismo.

Para verificar que, en efecto, el par de carga puede ser estimado a partir de par eléctrico en estado estable, se hizo un análisis del modelo matemático del motor de inducción en presencia de cargas constantes, lo que requirió de la estimación de los parámetros eléctricos y mecánicos del modelo del motor, para la respectiva comparación y validación teórica-experimental.

El modelo del motor de jaula de ardilla simple es empleado para modelar los motores que se usaron en el banco de pruebas del laboratorio de vibraciones de la UPS, a pesar de

que se deduce que estos pertenecen al diseño NEMA Clase B, es decir de rotor de barras profundas. Esta decisión se tomó debido a que el modelo de jaula de ardilla aún puede representar con una buena aproximación el comportamiento del motor en el estado estable, con menor complejidad en su implementación, además existen varias fuentes bibliográficas en las que ya ha sido estudiado ampliamente.

Los parámetros del motor que se obtuvieron mediante la técnica de optimización utilizada, mostraron un error mínimo del 0.45% de la función de costo. Posteriormente, se simuló el comportamiento del motor bajo las mismas condiciones con las que se levantaron las señales transitorias para comparar el desempeño del modelo con las señales experimentales. En esta comparación se observó que las señales de par eléctrico y velocidad en estado estacionario presentaron un error menor al 2.4% y 0.8%, cuyos valores se consideran aceptables para representar el modelo del motor. Se compararon también las señales de corriente medidas y simuladas, el error entre estas señales en estado estacionario comprendió el 13.5%, el cual se atribuye a que el modelo no considera las pérdidas que se producen en el hierro del motor.

Las señales de par eléctrico en estado estable obtenidas vía simulación introduciendo el par del freno magnético en el modelo del motor, han mostrado un error relativo porcentual bajo para la carga L1, mientras que para L2 y L3 el error es muy bajo. De igual manera se ha apreciado este comportamiento en el error relativo para las señales de velocidad. Por lo tanto, se demuestra que los parámetros del modelo del motor identificados proveen del comportamiento adecuado del motor de laboratorio, para las señales de velocidad, y los pares eléctricos y de carga analizados en estado estable.

Para estimar el par eléctrico en estado estable debido a la presencia de fallo por rotura de diente en la caja de engranajes, se sigue el mismo procedimiento con el que se estimó el par eléctrico en estado estable bajo carga constante, con la consideración de que no se usa el filtro Savitsky-Golay para suavizar la señal por cuanto se tienen componentes frecuenciales propios del par de carga de la caja de engranajes.

Se han empleado tres técnicas de procesamiento de señales para determinar los espectros de frecuencia de las señales de par eléctrico, mediante los espectros se identifican las componentes de frecuencia de interés. La primera técnica es la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para determinar el espectro de amplitud de la señal. La segunda técnica es una variación de la FFT en la que se aplica un rellenado de ceros a la señal de par para estimar con mayor exactitud las amplitudes en el espectro, esta técnica fue empleada al observar que en ciertos casos los picos de la componente de la frecuencia del engranaje se mostraban truncados; esto ocurre cuando la frecuencia de la componente no corresponde a las frecuencias espaciadas del espectro. La tercera técnica es el cálculo del espectro de potencia.

El uso de estos tres métodos permitió verificar las tendencias observadas en las componentes de interés conforme el nivel de severidad del fallo aumenta y para apreciar de mejor manera la componente de frecuencia GMF en el espectro. Las dos últimas técnicas presentaron mayor similitud entre sí, se pueden tomar como apropiadas para el caso de estudio. Sin embargo, la segunda técnica presentó cambios drásticos en amplitud comparado FFT clásica tomando como referencia ciertas componentes; no se observó estos cambios con la amplitud del espectro de potencia. De esta manera, el espectro de potencia muestra ser el más apropiado para observar la sensibilidad en la señal de par de eléctrico del caso de estudio de este proyecto. Sin embargo, con la FFT y su variante también se ha demostrado esta sensibilidad.

Por otra parte, se ha podido evidenciar que los patrones de fallo conforme la severidad del fallo aumenta no son los mismos entre las pruebas con los diferentes motores, lo mismo ocurre para diferentes cargas como se puede evidenciar más en el motor M2. Se resalta que las magnitudes obtenidas por las diferentes técnicas se diferencian entre los niveles de severidad de fallos, también respecto a la condición normal, para cada carga, por lo que puede ser posible el uso de esta señal de par eléctrico en estado estable en modelos computacionales para detección y clasificación de fallos.

5.2 Trabajo futuro

Con el fin de detectar fallos en la caja de engranajes basado en modelos matemáticos se pretende generar señales residuales entre el par eléctrico en estado estable del modelo del sistema y el par eléctrico estimado. Por lo tanto, resulta necesario mejorar el modelado de los motores de los bancos de prueba del laboratorio que se desarrollaron en este proyecto, para que pueda representar con mayor precisión su comportamiento dinámico. Esto supone:

- 1 La obtención de la función periódica del par de carga de la caja de engranajes para poder ingresarla al modelo matemático, y
- 2 El desarrollo de un modelo de la caja de engranajes que represente de manera adecuada su comportamiento y obtener el par desarrollado.

El primer punto requiere un procesamiento de señales apropiado del par eléctrico en estado estable, para eliminar las componentes de par constante, del par motor y del par del sistema de poleas, como una aproximación aceptable. El segundo punto está actualmente en desarrollo en el grupo de investigación GIDTEC.

Adicionalmente, además del enfoque basado en modelo matemático, se puede desarrollar un modelo computacional basado en datos, para la obtención de un clasificador de severidad de fallos en la caja de engranajes, usando aprendizaje automático (*machine learning*, en inglés), sobre las señales de par eléctrico.

Anexo A

Funcionamiento del freno electromagnético Pasqualini

Los frenos comúnmente han sido utilizados para medir la potencia mecánica entregada por motores eléctricos de corriente continua o alterna. Dentro de estos equipos se encuentra el freno electromagnético Pasqualini, el cual ha sido ampliamente usado por su precisión [55]. En la Figura A.1 se presentan sus partes. Este dispositivo aplica al eje de un motor giratorio, un par de torsión que se puede cuantificar y medir [56].

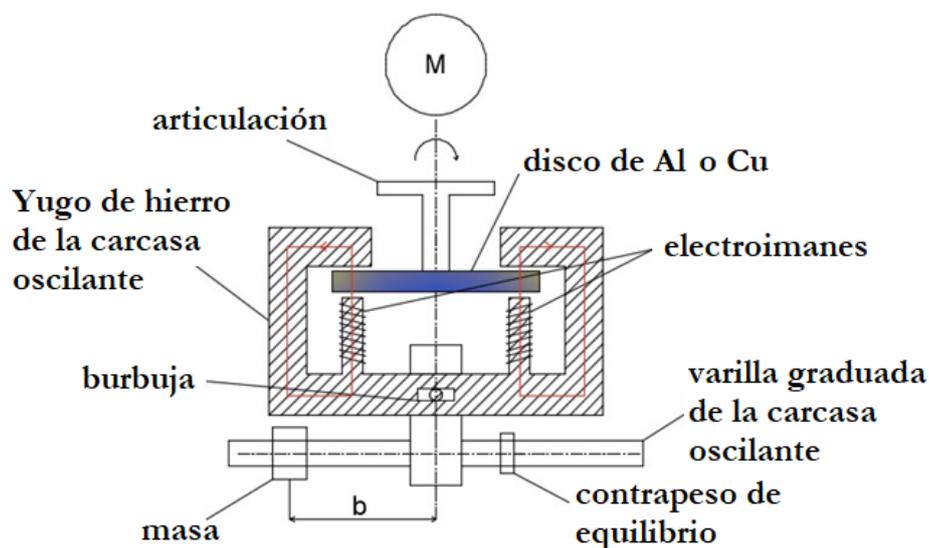


Figura A.1: Partes del freno Pasqualini [56]

En la Figura A.1 el motor se conecta a través de una articulación a un disco de aluminio o de cobre macizos. Alrededor del disco se coloca una carcasa oscilante que es libre de girar alrededor de su eje y es coaxial al eje del pasador del motor [56]. La carcasa visible en la Figura A.1 consiste en un yugo de hierro donde se colocan 2 bobinas de cobre (electroimanes), una varilla graduada de dos masas, las cuales se pueden mover a lo largo de esta. Estas masas son el contrapeso de equilibrio, útil para ajustar el paralelismo de

la varilla al suelo, y la masa real, cuyos pesos se colocan de acuerdo con la potencia del motor. Las dos bobinas presentes en la carcasa oscilante están conectadas a una fuente de corriente continua, la cual regula la corriente de excitación [56].

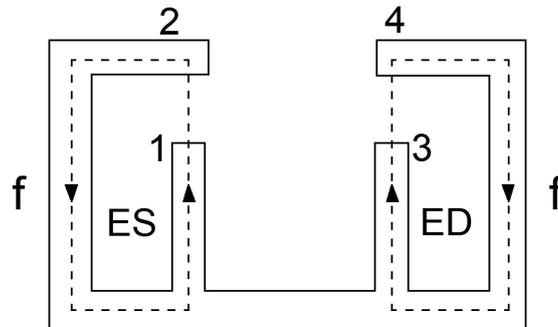


Figura A.2: Yugo de hierro del freno Pasqualini

Cuando el disco se encuentra rotando, se inducen corrientes que son mayores cuanto mayor sea la velocidad del disco y cuanto mayor sea la intensidad en los electroimanes [55]. En la Figura A.2 se muestra el yugo o núcleo de hierro del freno electromagnético Pasqualini, aquí, el flujo producido por el electroimán ES sigue el recorrido de la flecha f a través del entrehierro 1-2 y el disco de cobre. De manera similar ocurre con el flujo del electroimán ED, el entrehierro 3-4 y el disco [55]. Las corrientes inducidas y el flujo variable ocasionado por la rotación producen una fuerza mecánica que actúa sobre el disco. Esta fuerza se presenta en forma de par, que reduce la velocidad de giro y tiende a detener el disco. El fenómeno descrito ocurre debido a la ley de Faraday-Lenz [56].

Cuando la corriente de excitación es cero, no se producen fuerzas electromotrices sobre el disco por lo que no ocurre ningún fenómeno. Cabe mencionar que los materiales del disco que pueden ser cobre o aluminio son materiales paramagnéticos cuyas permeabilidades magnéticas son cercanas a la unidad por lo que no se encuentran sujetos a efectos de histéresis [56].

En el laboratorio de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, el disco del freno electromagnético Pasqualini es de material cobre. Para realizar medidas del par de torsión se usa la varilla graduada, la masa y el contrapeso de equilibrio.

Glosario

Caja de engranajes Se encarga de la transmisión mecánica. Consta de un conjunto de engranajes ubicados dentro de una carcasa [57].

Engranaje Encaje de dos o más ruedas dentadas entre sí [58].

Falla Característica de un elemento de un sistema que ha dejado de funcionar [59].

Fallo Defecto presente en un elemento mientras cumple su función normal en un sistema [24].

Fallo incipiente Característica de un fallo que se encuentra en una etapa inicial [24].

Mantenimiento Basado en la Condición (MBC) Es un tipo de mantenimiento cuya estrategia consiste en decidir o recomendar acciones de mantenimiento usando información reunida a través del monitoreo de la condición [59].

Mantenimiento Correctivo (MCo) También conocido como mantenimiento reactivo, es el mantenimiento que se le da a una máquina cuando esta ha dejado de funcionar [60].

Mantenimiento Predictivo (MPd) Este tipo de mantenimiento evalúa la condición presente y pasada de una máquina para conocer su estado de salud, de esta manera se puede efectuar la tarea de mantenimiento de acuerdo a la necesidad de la máquina. Para conocer la condición de la máquina se puede requerir instrumentos como: transductores, acondicionadores de señal, unidades de adquisición de datos, sistemas de análisis de señal basados en computadora y rutinas de diagnóstico controladas por software [60].

Mantenimiento Preventivo (MP) También conocido como mantenimiento periódico debido a que es realizado de manera periódica con una frecuencia fija. El principio de esta técnica de mantenimiento es que una máquina pueda cumplir sus funciones en cualquier instante [60].

Monitoreo de la condición El monitoreo de la condición se puede definir como un medio para determinar la condición de la máquina y prevenir una falla de la misma. El monitoreo de la condición consiste en recopilar y procesar datos provenientes de diversos sensores para obtener información significativa. Además, las técnicas de monitoreo de la condición se pueden emplear para detectar y diagnosticar fallos en la máquina [24].

Motor de inducción Transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Su principio de funcionamiento esta basado en la inducción electromagnética que se produce en el estator y actúa sobre el rotor del motor [35].

Par de carga Es el par de torsión que actúa como restricción impuesta al rotor [35].

Par eléctrico Es el par que actúa para acelerar el rotor de una máquina eléctrica [35].

Bibliografía

- [1] J. Koochaki, J. A. Bokhorst, H. Wortmann, and W. Klingenberg, “Condition based maintenance in the context of opportunistic maintenance,” *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 23, pp. 6918–6929, dec 2012. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2011.636924>
- [2] V. H. Coria, S. Maximov, F. Rivas-Dávalos, C. L. Melchor, and J. L. Guardado, “Analytical method for optimization of maintenance policy based on available system failure data,” *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 135, pp. 55–63, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2014.11.003>
- [3] M. Bevilacqua and M. Braglia, “Analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection,” *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 70, no. 1, pp. 71–83, oct 2000.
- [4] T. Mitoma, H. Wang, and P. Chen, “Fault diagnosis and condition surveillance for plant rotating machinery using partially-linearized neural network,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 55, no. 4, pp. 783–794, nov 2008.
- [5] R. Sánchez, “Diagnóstico de fallos en cajas de engranajes con base en la fusión de datos de señales de vibración, corriente y emisión acústica,” Ph.D. dissertation, Universidad Pontificia Bolivariana, 2018. [Online]. Available: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/4020https://tinyurl.com/y6b9bqpg>
- [6] A. K. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, “A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, oct 2006.
- [7] R. Ahmad and S. Kamaruddin, “An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 63, no. 1, pp. 135–149, 2012.
- [8] N. Alonso, R. García-Martín, and P. Fernández, “Determination of the bending strength geometry factor J for the calculation of stress in parallel-axis gears as a

- function of the reference correction and slope angle of the gear tooth,” *International Journal of Mechanical Engineering and Automation*, vol. 3, no. 1, pp. 27–33, 2016.
- [9] A. Bahramighahnavieh, P. Mosaddegh, and S. Akbarzadeh, “Investigation of the Hertzian Stress Distribution on the Surface of the Straight Bevel Gear,” in *Mechanics and Computational Mechanics*, ser. Applied Mechanics and Materials, vol. 307. Trans Tech Publications Ltd, 2013, pp. 304–307.
- [10] A. Cubillo, S. Perinpanayagam, and M. Esperon-Miguez, “A review of physics-based models in prognostics: Application to gears and bearings of rotating machinery,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 8, pp. 1–21, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/1687814016664660>
- [11] S. Rajagopalan, T. G. Habetler, R. G. Harley, T. G. Sebastian, and B. Lequesne, “Current/Voltage-based detection of faults in gears coupled to electric motors,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 6, pp. 1412–1420, nov 2006. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4012304/>
- [12] M. Amarnath, S. Chandramohan, and S. Seetharaman, “Experimental investigations of surface wear assessment of spur gear teeth,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 18, no. 7, pp. 1009–1024, jun 2012. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1077546311399947>
- [13] S. H. Kia, H. Henao, and G. A. Capolino, “Torsional vibration effects on induction machine current and torque signatures in gearbox-based electromechanical system,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4689–4699, nov 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5166501/>
- [14] R. Isermann, “Model-based fault-detection and diagnosis - Status and applications,” *Annual Reviews in Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, jan 2005.
- [15] A. K. Jalan and A. R. Mohanty, “Model based fault diagnosis in rotating machinery,” *International Journal of Performability Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 515–523, 2011.
- [16] X. Liang, M. J. Zuo, and W. Chen, “Dynamics-Based Vibration Signal Modeling for Tooth Fault Diagnosis of Planetary Gearboxes,” in *Fault Diagnosis and Detection*. InTech, may 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/67529>
- [17] J. Park, J. M. Ha, H. Oh, B. D. Youn, J. Choi, and N. H. Kim, “Model-Based Fault Diagnosis of a Planetary Gear: A Novel Approach Using Transmission Error,” *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 65, no. 4, pp. 1830–1841, 2016.

- [18] G. Terörde and R. Belmans, "Speed, flux and torque estimation of induction motor drives with adaptive system model," in *IEE Conference Publication*, no. 487, 2002, pp. 498–503.
- [19] L. Aarniovuori, H. Karkkainen, M. Niemela, P. Lindh, and J. Pyrhonen, "Induction motor torque estimation accuracy using motor terminal variables," in *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., aug 2017, pp. 1–7. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8002304/>
- [20] J. Rengifo, J. M. Aller, A. Bueno, J. Viola, and J. Restrepo, "Parameter estimation method for induction machines using the instantaneous impedance during a dynamic start-up," in *Proceedings of the 6th Andean Region International Conference, Andescon 2012*. IEEE, nov 2012, pp. 11–14. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6424110/>
- [21] O. A. Morfín, C. E. Castañeda, R. Ruiz-Cruz, F. A. Valenzuela, M. A. Murillo, A. E. Quezada, and N. Padilla, "The Squirrel-Cage Induction Motor Model and Its Parameter Identification Via Steady and Dynamic Tests," *Electric Power Components and Systems*, vol. 46, no. 3, pp. 302–315, feb 2018.
- [22] A. S. Vacacela Costa, "Establecimiento de tres bases de datos para la detección de fallos en rodamientos mediante señales acústicas, vibracionales y de corriente," Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2020.
- [23] A. R. Mohanty and C. Kar, "Fault detection in a multistage gearbox by demodulation of motor current waveform," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1285–1297, jun 2006. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1667926/>
- [24] D. E. Chingal Imaicela, "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," Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2018.
- [25] H. F. Llivicura Orellana, "Señales de vibración: Evaluación de indicadores de condición extraídos del dominio de frecuencia para el Diagnóstico de fallos en Cajas de engranajes rectos," Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2019.

- [26] R. K. Mobley and R. K. Mobley, *Maintenance Fundamentals*. Oxford: Elsevier Science & Technology, 2004. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=226728>
- [27] W. C. Bolton and I. Koppel, *Mechanical Science*. Somerset: John Wiley & Sons, Incorporated, 2006. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=697071>
- [28] P. R. N. Childs, T. H. C. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, and Y. Yamane, *Mechanical Design*. Jordan Hill, UNITED KINGDOM: Elsevier Science & Technology, 2003. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=288872>
- [29] J. Pintor Borobia, “Teoría de Máquinas: Mecanismos de contacto directo: Engranajes,” Iruña, p. 42, 1997.
- [30] R. K. Mobley and R. K. Mobley, *Vibration Fundamentals*. Oxford: Elsevier Science & Technology, 1999. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=294437>
- [31] M. R. Carangui Vintimilla, “Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas de una caja reductora combinando fallos de rodamientos y engranajes rectos para fines investigativos en la Universidad Politécnica Salesiana,” Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2014. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6281>
- [32] J. Moya Rodríguez, G. Ruano, R. Espinosa, Y. Bernal Aguilar, E. Fírvida, A. Machado, Y. Peña, J. Antonio, C. Montero, and G. Leyva, “Bancos de prueba para el ensayo de transmisiones por engranajes,” 2014.
- [33] J. M. Aller, *Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a teoría general*. Caracas: Editorial Equinoccio, 2006.
- [34] J. F. Mora, *Máquinas eléctricas, 6a edc.* McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2008. [Online]. Available: <https://books.google.com.ec/books?id=2ltDPwAACAAJ>
- [35] S. Umans, A. Fitzgerald, and C. Kingsley, *Electric Machinery: Seventh Edition*. McGraw-Hill Higher Education, 2013. [Online]. Available: <https://books.google.com.ec/books?id=dZkfAAAAQBAJ>
- [36] F. R. Cevallos Aguirre and F. O. Pinos Vergara, “Estimación de eficiencia en máquinas de inducción en ambientes industriales,” Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2019.

- [37] J. M. Aller, A. Bueno, and T. Paga, "Power system analysis using space-vector transformation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 957–965, nov 2002.
- [38] J. Benzaquen, J. Rengifo, E. Albáñez, and J. M. Aller, "Parameter Estimation for Deep-Bar Induction Machines Using Instantaneous Stator Measurements From a Direct Startup," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 2, pp. 516–524, jun 2017.
- [39] W. E. Andrus, R. O. Duncan, C. W. Flint, V. A. Moore, and M. Barber, "IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement," *IEEE Std 118-1978*, vol. 1978, pp. 1–20, 1992.
- [40] O. Gutiérrez.P.S, "Protocolo de pruebas para máquinas rotativas de baja potencia fundamentadas en Normas IEEE," Cuenca, p. 169, 2012. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1762/12/UPS-CT002331.pdf>
- [41] G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair: Second Edition*. IEEE Press Series on Power Engineering, 2014, vol. 9781118057. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Electrical+Insulation+for+Rotating+Machines%3A+Design%2C+Evaluation%2C+Aging%2C+Testing%2C+and+Repair%2C+2nd+Edition-p-9781118057063>
- [42] J. M. Aller, "Mantenimiento y Ensayos en Máquinas Eléctricas," p. 61, 2011.
- [43] A. Palamides and A. Veloni, *Signals and systems laboratory with MATLAB®*. Bosa Roca: Taylor & Francis Group, 2010. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=1449798>
- [44] P. Wallisch, M. E. Lusignan, M. D. Benayoun, T. I. Baker, A. S. Dickey, and N. G. Hatsopoulos, *MATLAB® for neuroscientists: An introduction to scientific computing in MATLAB: Second edition*. San Diego, UNITED STATES: Elsevier Science & Technology, 2013. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=1517435>
- [45] K. M. A. El-Shennawy, *Communication Theory and Signal Processing for Transform Coding*. SAIF Zone, United Arab Emirates: Bentham Science Publishers, 2014. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=1777730>
- [46] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Tratamiento de señales en tiempo discreto*. Madrid: Pearson Educación, 2011.

- [47] E. W. Hansen, *Fourier Transforms Principles and Applications*. New York, United States: John Wiley & Sons, Incorporated, 2014. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=1810513>
- [48] L. Tan, *Digital Signal Processing : Fundamentals and Applications*. Burlington, UNITED STATES: Elsevier Science & Technology, 2007. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=311323>
- [49] “Amplitude Estimation and Zero Padding - MATLAB & Simulink - MathWorks Nordic.” [Online]. Available: <https://se.mathworks.com/help/signal/ug/amplitude-estimation-and-zero-padding.html>
- [50] J. L. Semmlow, *Circuits, Signals, and Systems for Bioengineers*. Burlington, United States: Elsevier Science & Technology, 2005. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=232141>
- [51] I. The MathWorks, “Resolver ecuaciones diferenciales no rígidas: método de orden medio - MATLAB ode45 - MathWorks América Latina,” p. 1, 2019. [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/ode45.html>
- [52] C. D. Córdova and D. H. Cardenas, “Análisis del régimen dinámico de un motor de inducción trifásico usando un software de simulación,” Proyecto de investigación y desarrollo previo a la obtención del Grado de Magister en métodos matemáticos y simulación numérica en ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [53] R. W. Schafer, “What Is a Savitzky-Golay Filter? [Lecture Notes],” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 28, no. 4, pp. 111–117, 2011.
- [54] J. C. Lindon, D. W. Koppelaar, and G. E. Tranter, *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*. San Diego, United Kingdom: Elsevier Science & Technology, 2016. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=4723162>
- [55] F. Tiberio, *Pruebas sobre máquinas eléctricas*, 1st ed., Editorial Vicens-Vives, Ed. Barcelona: TIP. CAT. CASALS., 1965.
- [56] L. Tagliaferri, “Determinazione diretta delle caratteristiche di funzionamento di un motore asincrono trifase,” ISIS Arturo Malignani, Údine, Italia, Tech. Rep.
- [57] “Caja de cambios — Definición de Gearbox de Oxford Dictionary en Lexico.com también significado de Gearbox.” [Online]. Available: <https://www.lexico.com/definition/gearbox>

- [58] “Engranaje — Definición de Engranaje por Oxford Dictionaries en Lexico.com también significado de Engranaje.” [Online]. Available: <https://www.lexico.com/es/definicion/engranaje>
- [59] F. D. Cajas Muñoz and C. P. Torres Díaz, “Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor recíprocante de doble etapa,” Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2018.
- [60] A. R. Mohanty, *Machinery condition monitoring: Principles and practices*. CRC Press, 2014. [Online]. Available: <https://books.google.com.ec/books?id=TXXSBQAAQBAJ>