

Implementación de un sistema de control predictivo para máquinas de inducción con diagnóstico en línea de barra rota bajo condiciones de oscilación de carga

Cristóbal Alonso Rubilar Zamora

2026

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor Guía:

Dr.-Ing. Margarita Norambuena (UTFSM)

Dr.-Ing. Jorge Juliet Avilés (UTFSM)

Comisión:

Dr.-Ing. Margarita Norambuena (UTFSM)

Dr.-Ing. Jorge Juliet Avilés (UTFSM)

Valparaíso, mayo, 2026.



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado
Implementación de un sistema de control predictivo para máquinas de inducción con diagnóstico en línea de barra
Título del trabajo: rota bajo condiciones de oscilación de carga

Nombre del candidato(a): Cristóbal Alonso Rubilar Zamora

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Eléctrica

Campus: Casa Central Departamento: Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Margarita Norambuena, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)
del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años


Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

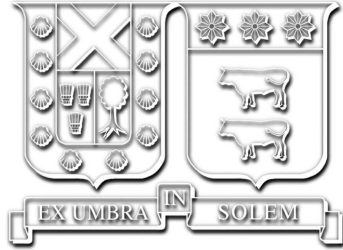
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 29.05.2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 25/05/2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



Implementación de un sistema de control predictivo para máquinas de inducción con diagnóstico en línea de barra rota bajo condiciones de oscilación de carga

Cristóbal Alonso Rubilar Zamora

2026

*“La duda es la madre de la invención”
— Galileo Galilei*

Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, me acompañaron y contribuyeron a que este proceso fuera posible.

En primer lugar, agradezco a mi madre, Carolina Zamora. Sus enseñanzas, los valores que me inculcó, su confianza y, sobre todo, su apoyo incondicional han sido fundamentales en cada etapa de este camino. Gracias por todo el amor y el sacrificio que has hecho por mí y por mi hermana; espero poder retribuirlo a lo largo de mi vida.

A mi hermana Sofía, por ayudarme a ver la vida desde otra perspectiva y por alegrar mis días incluso en los momentos más exigentes.

A mis abuelos Rubén y Cecilia, mis segundos padres, por su apoyo constante durante mi crianza y por haberme brindado una niñez llena de cariño. A mis tíos Rubén y Patricio, de quienes aprendí la importancia del esfuerzo y la dedicación. Asimismo, agradezco a mis abuelos y tías paternas por su cariño y apoyo permanente.

A mis amigos, tanto los de toda la vida como aquellos que conocí en la universidad, por acompañarme en este proceso, en las largas jornadas de estudio y en los momentos que hicieron de esta etapa algo mucho más llevadero.

A mis profesores, por su dedicación y por haberme formado en este apasionante ámbito de la ingeniería eléctrica. En especial, a mis profesores guía, Margarita Norambuena y Jorge Juliet, por su orientación, paciencia y apoyo a lo largo de este trabajo.

Finalmente, agradezco a los integrantes del pañol y, en particular, a Cristian Andrades, por su disposición y apoyo en el laboratorio, así como por las conversaciones que hicieron más grato el desarrollo de esta memoria. Su ayuda y buena voluntad hicieron posible el desarrollo del trabajo experimental de esta memoria.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	I
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas	X
Resumen	1
1. Introducción	2
2. Marco Teórico	4
2.1. Ecuaciones de la máquina asincrónica	4
2.1.1. Ecuaciones en el sistema de referencia estacionario	5
2.2. Modelo de rotor con barra rota	5
2.3. Modelo de máquina con barra rota en sistema estacionario	7
2.4. Predictor de corriente	7
2.5. Estimación de flujo y orientación de campo	9
2.5.1. Modelo de corriente estándar (coordenadas fijas al estator)	9
2.5.2. Modelo de corriente modificado (con asimetría de rotor)	9
2.5.3. Modelo de tensión (estimación sin sensor de velocidad)	10
2.5.4. Cálculo de magnitud y orientación	11
2.6. Convertidor	11
2.7. Orientación de campo	12
2.8. Control vectorial	13
2.8.1. Modulación con inyección de secuencia cero (Min-Max)	13
2.9. Comportamiento de las corrientes en el marco dq ante perturbaciones	13
2.9.1. Efecto de la asimetría de rotor (BRB)	14
2.9.2. Efecto de la oscilación de carga (LO)	14
2.9.3. Separabilidad en el marco orientado	14
2.10. Control PI y optimización	15
2.10.1. Criterio del Óptimo en Módulo (OM)	15
2.10.2. Criterio del Óptimo Simétrico (OS)	15
2.11. Control predictivo	16
2.11.1. Modelo de predicción y compensación de retardo	16
2.11.2. Función de costo	17
2.12. Visión global del sistema propuesto	17
2.12.1. Problema central	17
2.12.2. Objetivos del trabajo	17

2.12.3. Estrategia metodológica	18
3. Metodología de Diseño y Validación en Simulación	19
3.1. Modelado del Sistema y Entorno de Simulación	19
3.1.1. Parámetros de las máquinas bajo estudio	19
3.1.2. Modelación de falla por Barra Rota (BRB)	20
3.1.3. Modelación de Oscilación de Carga (LO)	21
3.1.4. Determinación del coeficiente de fricción viscosa (B)	22
3.1.5. Estrategia de diagnóstico de BRB y LO	23
3.1.5.a. Procesamiento de señales	23
3.1.5.b. Extracción de características e indicadores de falla	24
3.1.6. Esquema del sistema simulado sin control	24
3.2. Implementación y Sintonización de Estrategias de Control	25
3.2.1. Esquema del sistema simulado con control	26
3.2.2. Control Vectorial (FOC) con reguladores PI	27
3.2.2.a. Sistema Por Unidad (pu)	27
3.2.2.b. Diseño y sintonización en el dominio discreto	28
3.2.3. Control Predictivo de Corriente (PCC)	28
3.2.3.a. Generación de referencias	28
3.2.3.b. Sintonización	29
3.2.3.c. Parámetros de implementación y compensación de retardo	29
3.2.4. Control Predictivo con Modelo Adaptativo (PCC-BRB)	30
3.2.4.a. Arquitectura general del controlador	30
3.2.4.b. Estimador de flujo y predictor de corriente adaptativos	31
3.2.4.c. Algoritmo de adaptación automática	31
3.2.4.d. Criterios de búsqueda paramétrica y convergencia	32
3.2.4.e. Diseño de la validación computacional del controlador	33
4. Metodología Experimental para el Diagnóstico de Fallas	36
4.1. Procedimiento para la estimación de parámetros	36
4.1.1. Medición de resistencia de estator (R_s)	36
4.1.2. Prueba de vacío y separación de pérdidas	36
4.1.3. Prueba de rotor bloqueado a frecuencia variable	37
4.1.4. Procesamiento de datos	38
4.2. Parámetros de las máquinas bajo estudio	38
4.3. Inducción experimental de la falla de Barra Rota	39
4.3.1. Procedimiento de mecanizado	39
4.3.2. Características geométricas y estado del rotor	39
4.4. Inducción experimental de la Oscilación de Carga (LO)	40
4.4.1. Generación de la señal de consigna	40
4.4.2. Definición de puntos de operación	41
4.5. Configuración del banco de ensayos experimental	41
4.6. Estimador de flujo experimental	43
4.6.1. Modelo de corriente	44
4.6.2. Modelo de tensión	44
4.6.2.a. Implementación del integrador	45
4.6.2.b. Cálculo del enlace de flujo de rotor y orientación	45
4.7. Esquema del sistema experimental sin control	46

5. Resultados y Análisis Comparativo	48
5.1. Análisis comparativo de las máquinas simuladas bajo condiciones de barra rota en rotor y oscilación de carga	49
5.1.1. Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q	49
5.1.2. Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la asimetría de rotor	53
5.1.3. Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q	57
5.1.4. Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga	61
5.1.5. Análisis de sensibilidad cruzada: Efecto de las oscilaciones de carga sobre el valor RMS de Δi_d	65
5.1.6. Análisis de sensibilidad cruzada: Efecto de las barras rotas sobre el valor RMS de Δi_q	69
5.1.7. Evaluación de la separabilidad de fallas mediante el plano bidimensional Δi_d vs Δi_q	73
5.1.8. Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia	77
5.1.9. Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud	81
5.1.10. Evaluación del valor RMS de Δi_q como indicador de oscilación de carga mediante métricas de clasificación	84
5.2. Análisis comparativo de la máquina de laboratorio: Resultados simulados y experimentales	88
5.2.1. Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q	88
5.2.2. Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la asimetría de rotor	90
5.2.3. Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q	91
5.2.4. Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga	93
5.2.5. Análisis de sensibilidad cruzada: Efecto de las oscilaciones de carga sobre el valor RMS de Δi_d	94
5.2.6. Análisis de sensibilidad cruzada: Efecto de las barras rotas sobre el valor RMS de Δi_q	96
5.2.7. Evaluación de la separabilidad de fallas mediante el plano bidimensional Δi_d vs Δi_q	97
5.2.8. Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia	99
5.2.9. Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud	100
5.2.10. Evaluación del valor RMS de Δi_q como indicador de oscilación de carga mediante métricas de clasificación	103
5.3. Determinación de cotas óptimas para el diagnóstico	104
5.3.1. Máquinas sin control	105
5.3.2. Máquinas con control PI	108
5.4. Resultados del diagnóstico	111
5.4.1. Métricas de evaluación del desempeño	112

5.4.2. Diagnóstico simulado - máquinas sin control	113
5.4.2.a. Evaluación de autovalidación (Máquinas 1, 2 y 3)	114
5.4.2.b. Prueba de generalización (Máquinas 220201077 y 220201091)	115
5.4.3. Diagnóstico simulado - máquinas con control PI	116
5.4.4. Validación empírica - Diagnóstico sobre datos experimentales	117
5.4.4.a. Análisis de la detección dinámica (Oscilación LO)	118
5.4.4.b. Análisis de la detección de falla (Presencia y Severidad BRB)	119
5.5. Resultados del control predictivo con modelo adaptativo (PCC-BRB)	120
5.5.1. Desempeño del controlador ante carga mecánicamente estable (Sin LO)	121
5.5.1.a. Análisis de convergencia paramétrica (Sin LO)	121
5.5.1.b. Atenuación de oscilaciones eléctricas y eficiencia energética (Sin LO)	123
5.5.2. Desempeño del controlador bajo régimen oscilatorio (Con LO)	124
5.5.2.a. Análisis de convergencia paramétrica (Con LO)	124
5.5.2.b. Atenuación de oscilaciones eléctricas y eficiencia energética (Con LO)	126
6. Conclusiones	128

Apéndices **131**

A. Tablas de resultados de máquinas sin control	131
A.1. Máquina 1	131
A.1.1. Máquina sana - 0 BRB	131
A.1.1.a. 10 Nm de carga (33,3% de T_{nom})	131
A.1.1.b. 20 Nm de carga (66,7% de T_{nom})	133
A.1.1.c. 30 Nm de carga (100% de T_{nom})	134
A.1.2. Máquina con falla - 1 BRB	136
A.1.2.a. 10 Nm de carga (33,3% de T_{nom})	136
A.1.2.b. 20 Nm de carga (66,7% de T_{nom})	137
A.1.2.c. 30 Nm de carga (100% de T_{nom})	139
A.1.3. Máquina con falla - 2 BRB	140
A.1.3.a. 10 Nm de carga (33,3% de T_{nom})	140
A.1.3.b. 20 Nm de carga (66,7% de T_{nom})	142
A.1.3.c. 30 Nm de carga (100% de T_{nom})	143
A.2. Máquina 2	145
A.2.1. Máquina sana - 0 BRB	145
A.2.1.a. 2,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})	145
A.2.1.b. 5,7 Nm de carga (66,7% de T_{nom})	146
A.2.1.c. 8,1 Nm de carga (100% de T_{nom})	148
A.2.2. Máquina con falla - 1 BRB	149
A.2.2.a. 2,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})	149
A.2.2.b. 5,7 Nm de carga (66,7% de T_{nom})	151
A.2.2.c. 8,1 Nm de carga (100% de T_{nom})	152
A.2.3. Máquina con falla - 2 BRB	154
A.2.3.a. 2,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})	154

A.2.3.b. 5,7 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	155
A.2.3.c. 8,1 Nm de carga (100 % de T_{nom})	157
A.3. Máquina 3	158
A.3.1. Máquina sana - 0 BRB	158
A.3.1.a. 6,8 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	158
A.3.1.b. 15,3 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	160
A.3.1.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})	161
A.3.2. Máquina con falla - 1 BRB	163
A.3.2.a. 6,8 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	163
A.3.2.b. 15,3 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	164
A.3.2.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})	166
A.3.3. Máquina con falla - 2 BRB	167
A.3.3.a. 6,8 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	167
A.3.3.b. 15,3 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	169
A.3.3.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})	170
A.4. Máquinas Laboratorio	172
A.4.1. Máquina sana - 0 BRB (220201091)	172
A.4.1.a. 4,8 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	172
A.4.1.b. 9,7 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	173
A.4.1.c. 14,5 Nm de carga (100 % de T_{nom})	175
A.4.2. Máquina sana - 2 BRB (220201071)	176
A.4.2.a. 4,8 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	176
A.4.2.b. 9,7 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	178
A.4.2.c. 14,5 Nm de carga (100 % de T_{nom})	179

Apéndices

181

B. Tablas de resultados de máquinas con control	181
B.1. Máquina 1	181
B.1.1. Máquina sana - 0 BRB	181
B.1.1.a. 10 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	181
B.1.1.b. 20 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	183
B.1.1.c. 30 Nm de carga (100 % de T_{nom})	184
B.1.2. Máquina con falla - 1 BRB	186
B.1.2.a. 10 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	186
B.1.2.b. 20 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	187
B.1.2.c. 30 Nm de carga (100 % de T_{nom})	189
B.1.3. Máquina con falla - 2 BRB	190
B.1.3.a. 10 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	190
B.1.3.b. 20 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	192
B.1.3.c. 30 Nm de carga (100 % de T_{nom})	193
B.2. Máquina 2	195
B.2.1. Máquina sana - 0 BRB	195
B.2.1.a. 2,7 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	195
B.2.1.b. 5,4 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	196
B.2.1.c. 8,1 Nm de carga (100 % de T_{nom})	198
B.2.2. Máquina con falla - 1 BRB	199

B.2.2.a. 2,7 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	199
B.2.2.b. 5,4 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	201
B.2.2.c. 8,1 Nm de carga (100 % de T_{nom})	202
B.2.3. Máquina con falla - 2 BRB	204
B.2.3.a. 2,7 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	204
B.2.3.b. 5,4 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	205
B.2.3.c. 8,1 Nm de carga (100 % de T_{nom})	207
B.3. Máquina 3	208
B.3.1. Máquina sana - 0 BRB	208
B.3.1.a. 6,7 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	208
B.3.1.b. 13,5 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	210
B.3.1.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})	211
B.3.2. Máquina con falla - 1 BRB	213
B.3.2.a. 6,7 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	213
B.3.2.b. 13,5 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	214
B.3.2.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})	216
B.3.3. Máquina con falla - 2 BRB	217
B.3.3.a. 6,7 Nm de carga (33,3 % de T_{nom})	217
B.3.3.b. 13,5 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})	219
B.3.3.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})	220

Bibliografía

Índice de Figuras

2.1.	Modelo de rotor con barra rota, indicada por la barra naranja. Fuente: [1]	5
2.2.	Modelo del convertidor trifásico de dos niveles. Fuente: [2]	11
2.3.	Diagrama de bloques del lazo de control PI. Fuente: [2]	15
2.4.	Diagrama de bloques de control vectorial con control predictivo de corriente (PCC). Fuente: [3]	16
3.1.	Implementación del modelo de máquina con falla BRB en PLECS	21
3.2.	Esquema de simulación incluyendo modelo BRB y perturbación de carga (LO)	22
3.3.	Esquema general del sistema simulado sin control para la evaluación del diagnóstico	25
3.4.	Esquema general del sistema simulado operando en lazo cerrado, válido para las evaluaciones con control FOC-PI y FOC-PCC	26
4.1.	Vista del rotor en estado sano antes de la intervención	40
4.2.	Detalle de la perforación realizada en la Máquina 220201077 para emular la ruptura de barra	40
4.3.	Vista frontal del banco de ensayos: convertidor, máquina asincrónica y osciloscopio	43
4.4.	Vista trasera del banco de ensayos: acople mecánico, máquina DC y sistema de medición de torque	43
4.5.	Esquema general del banco de pruebas experimental y arquitectura de adquisición de datos	46
5.1.	Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q para la máquina 1	50
5.2.	Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q para la máquina 2	51
5.3.	Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q para la máquina 3	52
5.4.	Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la asimetría de rotor para la máquina 1	54
5.5.	Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la asimetría de rotor para la máquina 2	55
5.6.	Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la asimetría de rotor para la máquina 3	56
5.7.	Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q para la máquina 1	58
5.8.	Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q para la máquina 2	59
5.9.	Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q para la máquina 3	60

5.10. Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga para la máquina 1.	62
5.11. Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga para la máquina 2.	63
5.12. Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga para la máquina 3.	64
5.13. Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_d y las oscilaciones de carga para la máquina 1.	66
5.14. Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_d y las oscilaciones de carga para la máquina 2.	67
5.15. Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_d y las oscilaciones de carga para la máquina 3.	68
5.16. Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_q y la cantidad de barras rotas para la máquina 1.	70
5.17. Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_q y la cantidad de barras rotas para la máquina 2.	71
5.18. Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_q y la cantidad de barras rotas para la máquina 3.	72
5.19. Mapa de diagnóstico bidimensional (valor RMS de Δi_d vs Δi_q) para la máquina 1.	74
5.20. Mapa de diagnóstico bidimensional (valor RMS de Δi_d vs Δi_q) para la máquina 2.	75
5.21. Mapa de diagnóstico bidimensional (valor RMS de Δi_d vs Δi_q) para la máquina 3.	76
5.22. Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia para la máquina 1.	78
5.23. Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia para la máquina 2.	79
5.24. Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia para la máquina 3.	80
5.25. Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud para la máquina 1.	82
5.26. Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud para la máquina 2.	82
5.27. Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud para la máquina 3.	83
5.28. Desempeño de clasificación del valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones en la máquina 1.	85
5.29. Desempeño de clasificación del valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones en la máquina 2.	86
5.30. Desempeño de clasificación del valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones en la máquina 3.	87
5.31. Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q	89
5.32. Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la falla.	90
5.33. Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q	92
5.34. Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga.	93
5.35. Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_d y las oscilaciones de carga.	95

5.36. Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_q y la cantidad de barras rotas.	96
5.37. Mapa de diagnóstico bidimensional simulado y experimental para distintos niveles de carga.	98
5.38. Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia.	99
5.39. Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud.	101
5.40. Espectro armónico de tensión medido en la alimentación trifásica del banco experimental mediante analizador de redes.	102
5.41. Desempeño de clasificación del valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones (simulado vs. experimental).	103
5.42. Distribución estadística y determinación del umbral óptimo en el valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones mecánicas (Máquinas sin control).	106
5.43. Distribución estadística y determinación de los puntos óptimos del nivel de carga mediante el valor RMS de i_q (Máquinas sin control).	107
5.44. Distribución, cotas óptimas y errores de clasificación del valor RMS de Δi_d a distintos niveles de carga (Máquinas sin control).	108
5.45. Distribución estadística, umbral óptimo y error de clasificación en el valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones (Máquinas con control PI).	109
5.46. Distribución estadística y determinación de los puntos óptimos del nivel de carga mediante el valor RMS de i_q (Máquinas con control PI).	110
5.47. Distribución, cotas óptimas y reducción drástica de errores de clasificación del valor RMS de Δi_d a distintos niveles de carga (Máquinas con control PI).	111
5.48. Dispersión de datos experimentales y frontera de decisión constante de Δi_q para la detección de oscilaciones.	118
5.49. Diagnóstico de asimetría sobre datos experimentales estables (Sin LO). Las curvas ascendentes representan los umbrales interpolados por el algoritmo.	119
5.50. Diagnóstico de asimetría sobre datos experimentales oscilatorios (Con LO). Las curvas ascendentes representan los umbrales interpolados por el algoritmo.	120

Índice de Tablas

2.1.	Fasores de tensión y estados de conmutación	12
3.1.	Parámetros de las máquinas de inducción simuladas.	20
4.1.	Parámetros de las máquinas de inducción (Marelli Motori A3C 100 LA4).	38
4.2.	Matriz de calibración experimental: Relación entre porcentajes de carga/oscilación y señales de control inyectadas.	41
5.1.	Rendimiento del diagnóstico en el conjunto de autovalidación (Máquinas 1, 2 y 3).	115
5.2.	Rendimiento del diagnóstico en el conjunto de generalización (Máquinas 220201077 y 220201091).	115
5.3.	Rendimiento del diagnóstico con Control PI en el conjunto de autovalidación (Máquinas 1, 2 y 3).	116
5.4.	Rendimiento global del diagnóstico sobre datos experimentales reales (222 muestras).	117
5.5.	Resultados de convergencia del algoritmo de adaptación paramétrica (Sin LO).	122
5.6.	Comparativa de indicadores eléctricos pre y post-adaptación del PCC-BRB operando con carga estable (Sin LO).	123
5.7.	Resultados de convergencia del algoritmo de adaptación paramétrica operando con oscilación de carga (Con LO).	125
5.8.	Comparativa de indicadores eléctricos pre y post-adaptación del PCC-BRB operando con oscilación de carga (Con LO).	126
A.1.	Resultados de RMS I_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	131
A.2.	Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	132
A.3.	Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	132
A.4.	Resultados de RMS I_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	133
A.5.	Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	133
A.6.	Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	134
A.7.	Resultados de RMS I_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	134

A.8.	Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	135
A.9.	Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	135
A.10.	Resultados de RMS i_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	136
A.11.	Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	136
A.12.	Resultados de RMS Δi_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	137
A.13.	Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	137
A.14.	Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	138
A.15.	Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	138
A.16.	Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	139
A.17.	Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	139
A.18.	Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	140
A.19.	Resultados de RMS i_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	140
A.20.	Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	141
A.21.	Resultados de RMS Δi_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	141
A.22.	Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	142
A.23.	Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	142
A.24.	Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	143
A.25.	Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	143
A.26.	Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	144
A.27.	Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	144
A.28.	Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	145
A.29.	Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	145
A.30.	Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	146
A.31.	Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	146

A.32. Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	147
A.33. Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	147
A.34. Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	148
A.35. Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	148
A.36. Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	149
A.37. Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	149
A.38. Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	150
A.39. Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	150
A.40. Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	151
A.41. Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	151
A.42. Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	152
A.43. Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	152
A.44. Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	153
A.45. Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	153
A.46. Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	154
A.47. Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	154
A.48. Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	155
A.49. Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	155
A.50. Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	156
A.51. Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	156
A.52. Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	157
A.53. Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	157
A.54. Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	158
A.55. Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	158

A.56. Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	159
A.57. Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	159
A.58. Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	160
A.59. Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	160
A.60. Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	161
A.61. Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	161
A.62. Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	162
A.63. Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	162
A.64. Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	163
A.65. Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	163
A.66. Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	164
A.67. Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	164
A.68. Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	165
A.69. Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	165
A.70. Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	166
A.71. Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	166
A.72. Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	167
A.73. Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	167
A.74. Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	168
A.75. Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	168
A.76. Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	169
A.77. Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	169
A.78. Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	170
A.79. Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	170

A.80.	Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	171
A.81.	Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	171
A.82.	Resultados de RMS i_q para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	172
A.83.	Resultados de RMS Δi_d para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	172
A.84.	Resultados de RMS Δi_q para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	173
A.85.	Resultados de RMS i_q para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	173
A.86.	Resultados de RMS Δi_d para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	174
A.87.	Resultados de RMS Δi_q para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	174
A.88.	Resultados de RMS i_q para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	175
A.89.	Resultados de RMS Δi_d para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	175
A.90.	Resultados de RMS Δi_q para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	176
A.91.	Resultados de RMS i_q para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	176
A.92.	Resultados de RMS Δi_d para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	177
A.93.	Resultados de RMS Δi_q para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	177
A.94.	Resultados de RMS i_q para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	178
A.95.	Resultados de RMS Δi_d para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	178
A.96.	Resultados de RMS Δi_q para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	179
A.97.	Resultados de RMS i_q para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	179
A.98.	Resultados de RMS Δi_d para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	180
A.99.	Resultados de RMS Δi_q para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	180
B.1.	Resultados de RMS i_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	181
B.2.	Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	182
B.3.	Resultados de RMS Δi_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	182

B.4.	Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	183
B.5.	Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	183
B.6.	Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	184
B.7.	Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	184
B.8.	Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	185
B.9.	Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	185
B.10.	Resultados de RMS i_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	186
B.11.	Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	186
B.12.	Resultados de RMS Δi_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	187
B.13.	Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	187
B.14.	Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	188
B.15.	Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	188
B.16.	Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	189
B.17.	Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	189
B.18.	Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	190
B.19.	Resultados de RMS i_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	190
B.20.	Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	191
B.21.	Resultados de RMS Δi_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	191
B.22.	Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	192
B.23.	Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	192
B.24.	Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	193
B.25.	Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	193
B.26.	Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	194
B.27.	Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	194

B.28. Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	195
B.29. Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	195
B.30. Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	196
B.31. Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	196
B.32. Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	197
B.33. Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	197
B.34. Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	198
B.35. Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	198
B.36. Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	199
B.37. Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	199
B.38. Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	200
B.39. Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	200
B.40. Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	201
B.41. Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	201
B.42. Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	202
B.43. Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	202
B.44. Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	203
B.45. Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	203
B.46. Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	204
B.47. Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	204
B.48. Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	205
B.49. Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	205
B.50. Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	206
B.51. Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	206

B.52. Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	207
B.53. Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	207
B.54. Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	208
B.55. Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	208
B.56. Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	209
B.57. Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	209
B.58. Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	210
B.59. Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	210
B.60. Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	211
B.61. Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	211
B.62. Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	212
B.63. Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	212
B.64. Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	213
B.65. Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	213
B.66. Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	214
B.67. Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	214
B.68. Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	215
B.69. Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	215
B.70. Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	216
B.71. Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	216
B.72. Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	217
B.73. Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	217
B.74. Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	218
B.75. Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	218

B.76. Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	219
B.77. Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	219
B.78. Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	220
B.79. Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	220
B.80. Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	221
B.81. Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).	221

Resumen

El diagnóstico en línea y la mitigación activa de fallas por rotura de barras (BRB) en rotores de máquinas de inducción bajo condiciones de oscilación de carga mecánica (LO) presentan dificultades relevantes, debido a la superposición de dinámicas que afectan las señales eléctricas del sistema. En este contexto, se implementan y validan estrategias de diagnóstico y control orientadas a discriminar y mitigar los efectos de la asimetría del rotor en presencia de oscilaciones de carga.

Como primer aporte, se propone un algoritmo de diagnóstico dinámico bidimensional basado en el análisis de las componentes de corriente en un marco de referencia orientado con el enlace de flujo de rotor (i_{sd} e i_{sq}). Mediante filtrado digital y la extracción de valores RMS de las componentes fluctuantes, se definen dos indicadores desacoplados: el valor RMS de Δi_q , asociado a las oscilaciones de carga, y el valor RMS de Δi_d , sensible a la asimetría del rotor. A partir de estos indicadores, se construyen cotas óptimas de clasificación utilizando datos simulados. El método se valida computacionalmente en PLECS —tanto en operación sin control como bajo regulación PI— y se corrobora empíricamente mediante mediciones en un banco de ensayos operando de forma exclusiva bajo conexión directa a la red, evidenciando una mejora significativa en la capacidad de discriminación respecto de enfoques basados en proporciones fijas. [\[1\]](#).

Como segundo aporte, se desarrolla un Control Predictivo de Corriente con Modelo Adaptativo (PCC-BRB), orientado a la mitigación activa de la falla. Esta estrategia incorpora la asimetría del rotor en el estimador de flujo y en el modelo de predicción, representando la resistencia de rotor mediante una matriz dependiente de la posición angular. A través de un algoritmo de búsqueda paramétrica, el controlador estima en línea la severidad de la falla (N_{brb}) y su posición angular (θ_{r0}), permitiendo la adaptación dinámica del modelo.

Los resultados obtenidos demuestran que el esquema PCC-BRB permite suprimir de manera efectiva las dinámicas eléctricas asociadas a la falla, alcanzando reducciones superiores al 60 % en las oscilaciones de las corrientes de estator en condiciones exigentes de operación. Asimismo, se observan mejoras en la distorsión armónica total (THD) y reducciones en las pérdidas por efecto Joule en el estator de hasta un 13,9 %, confirmando que la estrategia propuesta contribuye tanto al diagnóstico como a la mejora del desempeño energético del accionamiento.

Capítulo 1

Introducción

Las máquinas de inducción son ampliamente utilizadas en la industria debido a su bajo costo y fácil mantenimiento. Sin embargo, estas máquinas pueden desarrollar fallas internas por desgaste mecánico o térmico, siendo una de las más comunes y críticas la rotura de barras en el rotor (BRB, del inglés *Broken Rotor Bar*) [4]. Esta falla reduce la eficiencia de operación y puede derivar en daños mayores si no es detectada tempranamente [5].

Entre las técnicas de diagnóstico, el Análisis de Firma de Corriente del Motor (*Motor Current Signature Analysis*, MCSA) se reconoce ampliamente por su eficacia en la detección temprana de BRB [5-7]. Su naturaleza no invasiva, simplicidad operativa y posibilidad de implementación remota la han convertido en un estándar industrial [8,9]. No obstante, la MCSA también presenta limitaciones importantes, ya que su precisión diagnóstica puede verse comprometida por falsas alarmas (falsos positivos) o por la omisión de fallas reales (falsos negativos) [10,11]. Los falsos positivos suelen originarse en irregularidades benignas del rotor o por la presencia de oscilaciones de carga de baja frecuencia (LO, por sus siglas en inglés *Load Oscillations*) [12]. Estas oscilaciones, que pueden confundirse con los componentes espectrales de una BRB real, representan un desafío significativo para el diagnóstico en entornos industriales reales [11,13-15].

En este contexto, estudios recientes han explorado estrategias de diagnóstico basadas en el análisis de las componentes de corriente en el eje directo y en cuadratura (i_{sd} e i_{sq}), lo que permite distinguir con mayor precisión entre fallas reales por BRB y efectos dinámicos inducidos por oscilaciones de carga en máquinas sin control [1]. Sin embargo, el alcance de dichos estudios se ha limitado a condiciones específicas de conexión directa a la red, lo que plantea dudas sobre su desempeño en entornos industriales modernos, donde los accionamientos operan regulados por lazos de control cerrado (como el control PI), cuya acción correctiva tiende a enmascarar las firmas naturales de la falla.

Por otra parte, aún persiste una brecha en la integración de estas estrategias de diagnóstico con técnicas de control avanzado. En particular, la aplicación de un control predictivo que adapte dinámicamente los parámetros de la máquina según el diagnóstico en tiempo real, ofrece una oportunidad concreta para mejorar el desempeño global del sistema eléctrico. Este enfoque permitiría no solo detectar, sino anticipar y mitigar los efectos perjudiciales de fallas incipientes, manteniendo una operación estable incluso bajo severas perturbaciones externas.

En respuesta a estos problemas, la presente memoria propone el desarrollo de un sistema

de control predictivo de corriente con modelo adaptativo (FOC-PCC-BRB), capaz de modificar dinámicamente los parámetros internos del control en función del estado estimado de rotura de barras del rotor bajo condiciones simultáneas de oscilación de carga. Esta constituye la contribución principal del trabajo.

Para que dicha estrategia resulte técnicamente viable, es necesario disponer previamente de un método de diagnóstico capaz de distinguir las firmas asociadas a asimetrías de rotor y perturbaciones mecánicas, incluso bajo control en lazo cerrado. Por esta razón, una parte significativa de la investigación se dedica al desarrollo, análisis y validación experimental de un algoritmo de diagnóstico bidimensional basado en los indicadores Δi_d y Δi_q en el marco de referencia orientado con el enlace de flujo de rotor. Este análisis incluye operación en conexión directa a la red (DOL), bajo control vectorial FOC-PI y validación experimental sobre un banco de pruebas real.

Bajo esta perspectiva, el desarrollo del sistema diagnóstico no constituye un objetivo aislado, sino la base metodológica necesaria para la posterior implementación del FOC-PCC-BRB. La estructura del documento refleja deliberadamente esta progresión: primero se caracteriza la fenomenología asociada a BRB y LO en distintos esquemas de accionamiento, y posteriormente dicho conocimiento se integra en el controlador predictivo adaptativo para evaluar su capacidad de mitigación activa frente a la asimetría de rotor.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Ecuaciones de la máquina asincrónica

El comportamiento dinámico de una máquina asincrónica puede ser modelado mediante cuatro ecuaciones electromagnéticas, referidas a un sistema de referencia arbitrario k , y una quinta ecuación electromecánica. Este conjunto de ecuaciones corresponde al modelo dinámico clásico de la máquina de inducción en variables de estado, ampliamente reportado en la literatura [16]. A continuación, se presentan las expresiones fundamentales empleadas a lo largo de este trabajo:

$$\mathbf{v}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \boldsymbol{\psi}_s \quad (2.1)$$

$$0 = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \boldsymbol{\psi}_r \quad (2.2)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \quad (2.3)$$

$$\boldsymbol{\psi}_r = L_m \mathbf{i}_s + L_r \mathbf{i}_r \quad (2.4)$$

$$T = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Im \{ \boldsymbol{\psi}_r^* \mathbf{i}_s \} , \quad (2.5)$$

donde \mathbf{v}_s es el fasor espacial de tensión de estator, \mathbf{i}_s e \mathbf{i}_r son los fasores espaciales de corriente de estator y rotor, respectivamente, $\boldsymbol{\psi}_s$ y $\boldsymbol{\psi}_r$ corresponden a los fasores espaciales de los enlaces de flujo de estator y rotor, respectivamente, R_s y R_r son las resistencias por fase de estator y rotor, respectivamente, L_s y L_r las inductancias propias de estator y rotor, respectivamente, y L_m la inductancia mutua, ω_k es la velocidad angular del sistema de referencia, ω la velocidad eléctrica del rotor, p el número de pares de polos y T el momento electromagnético desarrollado.

Considerando la descomposición de los fasores espaciales en sus componentes real e imaginaria, tal que $\mathbf{v}_s = (v_{sd} + jv_{sq})$, $\mathbf{i}_s = (i_{sd} + ji_{sq})$, $\boldsymbol{\psi}_s = (\psi_{sd} + j\psi_{sq})$, $\mathbf{i}_r = (i_{rd} + ji_{rq})$ y $\boldsymbol{\psi}_r = (\psi_{rd} + j\psi_{rq})$, las ecuaciones (2.1) a (2.4) dan lugar a las siguientes ocho expresiones escalares:

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_k \psi_{sq} \quad (2.6)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_k \psi_{sd} \quad (2.7)$$

$$0 = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_k - \omega) \psi_{rq} \quad (2.8)$$

$$0 = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_k - \omega) \psi_{rd} \quad (2.9)$$

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (2.10)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (2.11)$$

$$\psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \quad (2.12)$$

$$\psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \quad (2.13)$$

2.1.1. Ecuaciones en el sistema de referencia estacionario

Al seleccionar un sistema de referencia fijo al estator, la velocidad del marco de coordenadas es nula ($\omega_k = 0$). En este contexto, el eje d se denomina alfa (α) y el eje q se denomina beta (β), simplificando el modelo a:

$$\mathbf{v}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \quad (2.14)$$

$$0 = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} - j\omega \boldsymbol{\psi}_r \quad (2.15)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \quad (2.16)$$

$$\boldsymbol{\psi}_r = L_m \mathbf{i}_s + L_r \mathbf{i}_r \quad (2.17)$$

$$T = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Im \{ \boldsymbol{\psi}_r^* \mathbf{i}_s \} \quad (2.18)$$

2.2. Modelo de rotor con barra rota

Una máquina asincrónica de jaula de ardilla que presenta N_{BRB} barras rotas adyacentes, de un total de N_{barras} , puede ser representada utilizando las ecuaciones fundamentales (2.1) a (2.5), siempre y cuando la falla sea leve (e.g., una barra rota) [17]. Para modelar esta asimetría de rotor, se define un marco de referencia fijo al rotor, donde el eje q se alinea con la posición espacial de la barra dañada, tal como se ilustra en la Figura 2.1

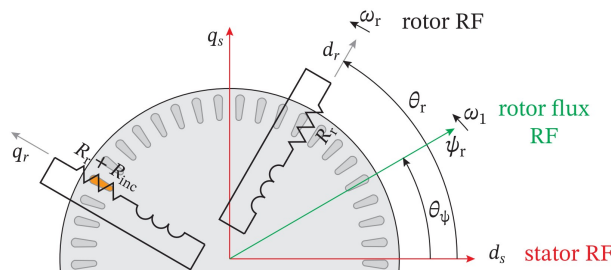


Figura 2.1: Modelo de rotor con barra rota, indicada por la barra naranja. Fuente: [1]

El efecto de la falla se incorpora aumentando la resistencia del rotor en el eje q en una magnitud R_{inc} :

$$R_{inc} = \frac{2N_{BRB}}{N_{barras}} R_r, \quad (2.19)$$

mientras que la resistencia del eje d permanece inalterada. En consecuencia, las resistencias de rotor quedan definidas como:

$$R_{rd} = R_r \quad (2.20)$$

$$R_{rq} = R_r + R_{inc}. \quad (2.21)$$

Para utilizar estos parámetros en el modelo estacionario ($\alpha\beta$), es necesario aplicar la transformación de coordenadas $dq \rightarrow \alpha\beta$, considerando que los parámetros no se transforman directamente igual que las variables de estado.

Partiendo de la Ley de Ohm en el marco de referencia fijo al rotor:

$$\mathbf{v}_{dq} = R_{dq} \dot{\mathbf{i}}_{dq}. \quad (2.22)$$

Multiplicando por la izquierda por la matriz de transformación $T_{dq \rightarrow \alpha\beta}$:

$$T_{dq \rightarrow \alpha\beta} \mathbf{v}_{dq} = T_{dq \rightarrow \alpha\beta} R_{dq} \dot{\mathbf{i}}_{dq}. \quad (2.23)$$

Para referir la corriente al nuevo sistema, se introduce la matriz de transformación y su inversa ($T_{\alpha\beta \rightarrow dq}$):

$$T_{dq \rightarrow \alpha\beta} \mathbf{v}_{dq} = T_{dq \rightarrow \alpha\beta} R_{dq} T_{\alpha\beta \rightarrow dq} T_{dq \rightarrow \alpha\beta} \dot{\mathbf{i}}_{dq}. \quad (2.24)$$

De esta forma, la matriz de resistencia de rotor en el marco $\alpha\beta$ se obtiene como:

$$R_{r\alpha\beta} = T_{dq \rightarrow \alpha\beta} R_{rdq} T_{\alpha\beta \rightarrow dq}, \quad (2.25)$$

es decir:

$$R_{r\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{rd} & 0 \\ 0 & R_{rq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \\ -\sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

donde θ_r es la posición angular eléctrica del rotor. Desarrollando el producto matricial y aplicando identidades trigonométricas, se obtiene:

$$R_{r\alpha\beta} = \frac{R_{rd} + R_{rq}}{2} I + \frac{R_{rd} - R_{rq}}{2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_r) & \sin(2\theta_r) \\ \sin(2\theta_r) & -\cos(2\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

donde I es la matriz identidad. Sustituyendo (2.20) y (2.21), la expresión se reduce a:

$$R_{r\alpha\beta} = \left(R_r + \frac{R_{inc}}{2} \right) I + \frac{-R_{inc}}{2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_r) & \sin(2\theta_r) \\ \sin(2\theta_r) & -\cos(2\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Finalmente, empleando la relación (2.19), se llega a:

$$R_{r\alpha\beta} = R_r \left(1 + \frac{N_{BRB}}{N_{barras}} \right) I - R_r \frac{N_{BRB}}{N_{barras}} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_r) & \sin(2\theta_r) \\ \sin(2\theta_r) & -\cos(2\theta_r) \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

que en forma matricial explícita es:

$$R_{r\alpha\beta} = \begin{bmatrix} R_r + R_r \frac{N_{BRB}}{N_{barras}} (1 - \cos(2\theta_r)) & -R_r \frac{N_{BRB}}{N_{barras}} \sin(2\theta_r) \\ -R_r \frac{N_{BRB}}{N_{barras}} \sin(2\theta_r) & R_r + R_r \frac{N_{BRB}}{N_{barras}} (1 + \cos(2\theta_r)) \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Este resultado evidencia que la presencia de una barra rota introduce un acoplamiento resistivo entre los ejes α y β , que depende de la posición del rotor. Para simplificar la notación, se definen los términos $R_{r\alpha}$, $R_{r\beta}$ y $R_{r\lambda}$ tal que:

$$R_{r\alpha\beta} = \begin{bmatrix} R_{r\alpha} & R_{r\lambda} \\ R_{r\lambda} & R_{r\beta} \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

2.3. Modelo de máquina con barra rota en sistema estacionario

En el sistema de referencia fijo al estator ($\omega_k = 0$), las ecuaciones generales de la máquina se reescriben considerando la asimetría del rotor. Considerando las descomposiciones vectoriales y que $R_r = R_{r\alpha\beta}$, el sistema de ecuaciones escalares resultante es:

$$v_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \quad (2.32)$$

$$v_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \quad (2.33)$$

$$0 = R_{r\alpha} i_{r\alpha} + R_{r\lambda} i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega \psi_{r\beta} \quad (2.34)$$

$$0 = R_{r\beta} i_{r\beta} + R_{r\lambda} i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \omega \psi_{r\alpha} \quad (2.35)$$

$$\psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \quad (2.36)$$

$$\psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \quad (2.37)$$

$$\psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} \quad (2.38)$$

$$\psi_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta} \quad (2.39)$$

2.4. Predictor de corriente

Sustituyendo las ecuaciones (2.34), (2.36) y (2.38) en la ecuación (2.32), se obtiene la dinámica de la tensión del estator en función de la corriente de estator y el enlace flujo de rotor para el eje α :

$$v_{s\alpha} = \frac{di_{s\alpha}}{dt} \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) + i_{s\alpha} \left(R_s + \frac{L_m^2 R_{r\alpha}}{L_r^2} \right) + i_{s\beta} \frac{L_m^2 R_{r\lambda}}{L_r^2} - \psi_{r\alpha} \frac{L_m R_{r\alpha}}{L_r^2} - \psi_{r\beta} \left(\frac{L_m R_{r\lambda}}{L_r^2} + \frac{L_m}{L_r} \omega \right) \quad (2.40)$$

De manera análoga, para el eje β se obtiene:

$$v_{s\beta} = \frac{di_{s\beta}}{dt} \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) + i_{s\beta} \left(R_s + \frac{L_m^2 R_{r\beta}}{L_r^2} \right) + i_{s\alpha} \frac{L_m^2 R_{r\lambda}}{L_r^2} + \psi_{r\alpha} \left(-\frac{L_m R_{r\lambda}}{L_r^2} + \frac{L_m}{L_r} \omega \right) - \psi_{r\beta} \frac{L_m R_{r\beta}}{L_r^2} \quad (2.41)$$

Para obtener el modelo predictivo discreto, se aproxima la derivada de la corriente mediante la discretización de Euler hacia adelante:

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x[k+1] - x[k]}{T_s} \quad (2.42)$$

donde T_s representa el periodo de muestreo. Aplicando esta aproximación en (2.40) y (2.41):

$$v_{s\alpha}[k] = \frac{i_{s\alpha}[k+1] - i_{s\alpha}[k]}{T_s} \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) + i_{s\alpha}[k] \left(R_s + \frac{L_m^2 R_{r\alpha}}{L_r^2} \right) + i_{s\beta}[k] \frac{L_m^2 R_{r\lambda}}{L_r^2} - \psi_{r\alpha}[k] \frac{L_m R_{r\alpha}}{L_r^2} - \psi_{r\beta}[k] \left(\frac{L_m R_{r\lambda}}{L_r^2} + \frac{L_m}{L_r} \omega[k] \right) \quad (2.43)$$

$$v_{s\beta}[k] = \frac{i_{s\beta}[k+1] - i_{s\beta}[k]}{T_s} \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) + i_{s\beta}[k] \left(R_s + \frac{L_m^2 R_{r\beta}}{L_r^2} \right) + i_{s\alpha}[k] \frac{L_m^2 R_{r\lambda}}{L_r^2} + \psi_{r\alpha}[k] \left(-\frac{L_m R_{r\lambda}}{L_r^2} + \frac{L_m}{L_r} \omega[k] \right) - \psi_{r\beta}[k] \frac{L_m R_{r\beta}}{L_r^2} \quad (2.44)$$

Despejando la corriente futura $i_s[k+1]$ se obtienen las ecuaciones de predicción finales:

$$i_{s\alpha}[k+1] = i_{s\alpha}[k] + \frac{T_s}{\left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right)} \left(-i_{s\alpha}[k] \left(R_s + \frac{L_m^2 R_{r\alpha}}{L_r^2} \right) - i_{s\beta}[k] \frac{L_m^2 R_{r\lambda}}{L_r^2} + \psi_{r\alpha}[k] \frac{L_m R_{r\alpha}}{L_r^2} + \psi_{r\beta}[k] \left(\frac{L_m R_{r\lambda}}{L_r^2} + \frac{L_m}{L_r} \omega[k] \right) + v_{s\alpha}[k] \right) \quad (2.45)$$

$$i_{s\beta}[k+1] = i_{s\beta}[k] + \frac{T_s}{\left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right)} \left(-i_{s\beta}[k] \left(R_s + \frac{L_m^2 R_{r\beta}}{L_r^2} \right) - i_{s\alpha}[k] \frac{L_m^2 R_{r\lambda}}{L_r^2} - \psi_{r\alpha}[k] \left(-\frac{L_m R_{r\lambda}}{L_r^2} + \frac{L_m}{L_r} \omega[k] \right) + \psi_{r\beta}[k] \frac{L_m R_{r\beta}}{L_r^2} + v_{s\beta}[k] \right) \quad (2.46)$$

2.5. Estimación de flujo y orientación de campo

Dado que el enlace de flujo de rotor no es una variable medible directamente, es necesario emplear estimadores basados en las variables eléctricas disponibles (corrientes y tensiones) y, en algunos casos, la velocidad mecánica. En este trabajo se utilizan tres estrategias de estimación distintas, seleccionadas según el escenario de operación (simulación o experimental) y la calidad de las señales disponibles.

2.5.1. Modelo de corriente estándar (coordenadas fijas al estator)

Esta estrategia se basa en las ecuaciones clásicas de la máquina de inducción sin asimetrías. Se utiliza tanto en la simulación del control vectorial (FOC) como en el procesamiento experimental de datos cuando la medición de velocidad es confiable [16].

A partir de la ecuación del rotor (2.15), despejando la derivada del enlace de flujo, se obtiene la dinámica del estimador en el marco estacionario $\alpha\beta$:

$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{L_m}{\tau_r} i_s - \left(\frac{1}{\tau_r} - j\omega \right) \psi_r \quad (2.47)$$

donde $\tau_r = L_r/R_r$ es la constante de tiempo del rotor. Discretizando mediante la aproximación de Euler, se obtienen las ecuaciones recursivas implementadas:

$$\psi_{r\alpha}[k+1] = \psi_{r\alpha}[k] + T_s \left(\frac{L_m}{\tau_r} i_{s\alpha}[k] - \frac{1}{\tau_r} \psi_{r\alpha}[k] - \omega[k] \psi_{r\beta}[k] \right) \quad (2.48)$$

$$\psi_{r\beta}[k+1] = \psi_{r\beta}[k] + T_s \left(\frac{L_m}{\tau_r} i_{s\beta}[k] - \frac{1}{\tau_r} \psi_{r\beta}[k] + \omega[k] \psi_{r\alpha}[k] \right) \quad (2.49)$$

2.5.2. Modelo de corriente modificado (con asimetría de rotor)

Para la implementación del control predictivo (MPC) en simulación, donde se busca mitigar los efectos de las barras rotas, se emplea un modelo extendido, que incorpora explícitamente los parámetros de asimetría ($R_{r\alpha}$, $R_{r\beta}$, $R_{r\lambda}$) descritos en la Sección 2.3.

Reemplazando las ecuaciones de enlace de flujo (2.38)-(2.39) en las ecuaciones de tensión del rotor asimétrico (2.34)-(2.35), y aplicando la discretización, se obtienen las expresiones que permiten estimar el enlace de flujo de rotor considerando la falla:

$$\begin{aligned} \psi_{r\alpha}[k+1] = \psi_{r\alpha}[k] + T_s \left(-\psi_{r\alpha}[k] \frac{R_{r\alpha}}{L_r} + i_{s\alpha}[k] \frac{L_m R_{r\alpha}}{L_r} \right. \\ \left. - \psi_{r\beta}[k] \left(\frac{R_{r\lambda}}{L_r} + \omega[k] \right) + i_{s\beta}[k] \frac{L_m R_{r\lambda}}{L_r} \right) \quad (2.50) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_{r\beta}[k+1] = \psi_{r\beta}[k] + T_s \left(-\psi_{r\beta}[k] \frac{R_{r\beta}}{L_r} + i_{s\beta}[k] \frac{L_m R_{r\beta}}{L_r} \right. \\ \left. - \psi_{r\alpha}[k] \left(\frac{R_{r\lambda}}{L_r} - \omega[k] \right) + i_{s\alpha}[k] \frac{L_m R_{r\lambda}}{L_r} \right) \end{aligned} \quad (2.51)$$

Este modelo permite al controlador predecir con mayor exactitud la evolución de las corrientes en presencia de fallas, mejorando la capacidad de seguimiento y reduciendo oscilaciones.

2.5.3. Modelo de tensión (estimación sin sensor de velocidad)

En el entorno experimental, la señal de velocidad puede presentar ruido significativo que degrada la estimación basada en el modelo de corriente. Para estos casos, se utiliza el *modelo de tensión*, el cual estima el enlace de flujo de rotor integrando la fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) del estator y no depende de la velocidad mecánica.

El enlace de flujo de estator se obtiene integrando la ecuación de tensión (2.14):

$$\psi_s = \int (v_s - R_s i_s) dt \quad (2.52)$$

Posteriormente, el enlace de flujo de rotor se calcula algebraicamente utilizando la relación de enlace de flujos:

$$\psi_r = \frac{L_r}{L_m} (\psi_s - \sigma L_s i_s) \quad (2.53)$$

donde $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ es el coeficiente de dispersión total.

Debido a que la integración pura es susceptible a la acumulación de error por componentes de corriente continua en las mediciones, en la implementación práctica se reemplaza el integrador ideal ($1/s$) por un pseudo-integrador o filtro paso bajo de frecuencia de corte ω_c . Si bien esta corresponde a una solución sencilla y ampliamente utilizada, no es la alternativa más adecuada para accionamientos que operan en la zona de baja frecuencia. En este contexto, el valor de ω_c no se define como arbitrariamente bajo, sino que debe seleccionarse en función de la frontera inferior del rango de frecuencias de operación, de modo de minimizar su impacto sobre la dinámica del sistema en dicha banda. Definiendo el operador diferencial $p \triangleq \frac{d}{dt}$, el modelo del pseudo-integrador puede expresarse como:

$$\psi_s = \frac{v_s - R_s i_s}{p + \omega_c} \quad (2.54)$$

Esta técnica asegura la estabilidad del estimador y elimina la acumulación de errores de DC. Es fundamental seleccionar una frecuencia de corte ω_c que sea despreciable frente a la frecuencia fundamental de operación de la máquina ($\omega_c \ll \omega_e$). De esta forma, en el rango de frecuencias de trabajo, el filtro introduce un error de fase y magnitud insignificante respecto al integrador ideal, preservando la precisión de la orientación de campo necesaria para las transformaciones de coordenadas [16].

2.5.4. Cálculo de magnitud y orientación

Independientemente del modelo utilizado para obtener las componentes $\psi_{r\alpha}$ y $\psi_{r\beta}$, la magnitud y posición del enlace de flujo de rotor necesarias para la orientación de campo se calculan como:

$$|\psi_r| [k] = \sqrt{\psi_{r\alpha}[k]^2 + \psi_{r\beta}[k]^2} \quad (2.55)$$

$$\theta_\psi [k] = \arctan \left(\frac{\psi_{r\beta}[k]}{\psi_{r\alpha}[k]} \right) \quad (2.56)$$

2.6. Convertidor

La máquina de inducción es alimentada mediante un convertidor de potencia de topología *Voltage Source Inverter* (VSI) trifásico de dos niveles. Este dispositivo permite sintetizar tensiones de amplitud y frecuencia variables a partir de un bus de tensión continua V_{dc} . La estructura de potencia se compone de tres piernas (una por fase), integradas por dos interruptores de potencia complementarios (típicamente IGBTs), tal como se ilustra en la Figura 2.2(a).

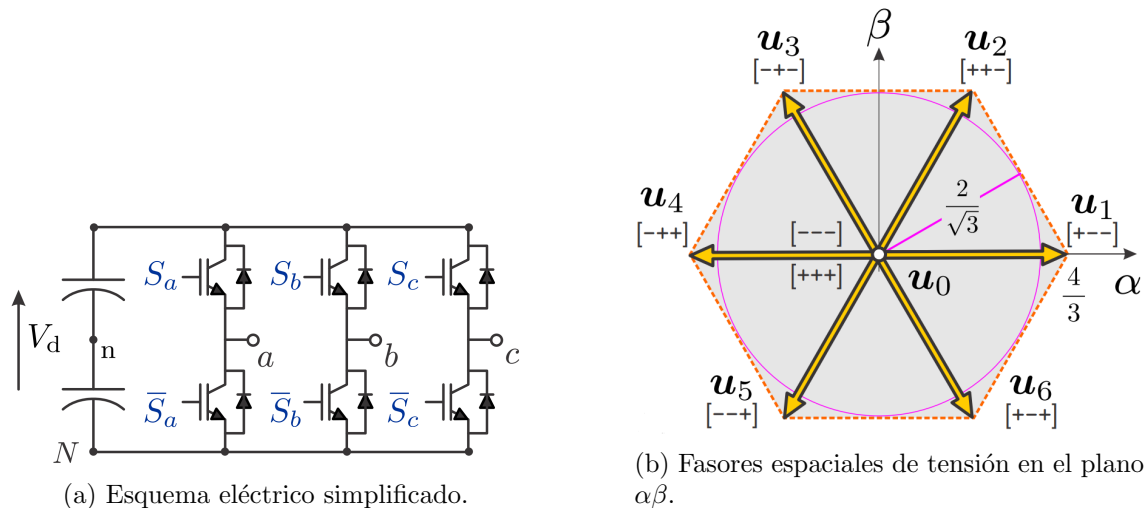


Figura 2.2: Modelo del convertidor trifásico de dos niveles. Fuente: [2].

Con el propósito de evitar cortocircuitos en la fuente de DC, los interruptores de una misma pierna operan de manera complementaria. El estado de conducción de la pierna $x \in \{a, b, c\}$ queda definido por la señal lógica de disparo S_x :

- $S_x = 1$: Interruptor superior cerrado e inferior abierto (fase conectada al positivo V_{dc}).
- $S_x = 0$: Interruptor superior abierto e inferior cerrado (fase conectada al negativo).

La tensión de salida del convertidor se modela como un fasor espacial complejo v_s en

el marco de referencia estacionario, determinado por la combinación de los estados de conmutación [2](#):

$$\mathbf{v}_s = \frac{2}{3}V_{dc}(S_a + \mathbf{a}S_b + \mathbf{a}^2S_c) \quad (2.57)$$

donde el operador espacial es $\mathbf{a} = e^{j2\pi/3}$. Descomponiendo la ecuación [\(2.57\)](#) en sus componentes real e imaginaria, se obtienen las tensiones en coordenadas $\alpha\beta$ aplicadas al modelo de la máquina:

$$v_{s\alpha} = V_{dc} \left(\frac{2}{3}S_a - \frac{1}{3}S_b - \frac{1}{3}S_c \right) \quad (2.58)$$

$$v_{s\beta} = V_{dc} \left(\frac{1}{\sqrt{3}}S_b - \frac{1}{\sqrt{3}}S_c \right) \quad (2.59)$$

Dada la existencia de tres piernas independientes con dos estados posibles, se generan $2^3 = 8$ combinaciones de disparo. Esto da lugar a ocho vectores de tensión discretos: seis vectores activos (\mathbf{v}_1 a \mathbf{v}_6) y dos vectores nulos (\mathbf{v}_0 y \mathbf{v}_7), cuyas magnitudes y componentes se detallan en la Tabla [2.1](#) y se visualizan en la Figura [2.2](#)(b).

Tabla 2.1: Fasores de tensión y estados de conmutación

Vector	S_a	S_b	S_c	$v_{s\alpha}$	$v_{s\beta}$
\mathbf{v}_0	0	0	0	0	0
\mathbf{v}_1	1	0	0	$\frac{2}{3}V_{dc}$	0
\mathbf{v}_2	1	1	0	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
\mathbf{v}_3	0	1	0	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
\mathbf{v}_4	0	1	1	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	0
\mathbf{v}_5	0	0	1	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
\mathbf{v}_6	1	0	1	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
\mathbf{v}_7	1	1	1	0	0

2.7. Orientación de campo

Para alcanzar un desempeño dinámico elevado, se emplea la estrategia de Control por Campo Orientado (FOC). El principio fundamental radica en referir las variables eléctricas de la máquina a un sistema de coordenadas rotatorio (dq) orientado con el fasor espacial de enlace de flujo de rotor ψ_r .

La orientación se establece imponiendo que el eje directo (d) coincida con la dirección instantánea del enlace de flujo de rotor, lo que implica anular su componente en cuadratura:

$$\psi_r = \psi_{rd} \quad (2.60)$$

Para implementar esta transformación, se utiliza el ángulo del enlace de flujo de rotor θ_ψ , obtenido a partir del estimador descrito previamente (Ec. [\(2.56\)](#)). Las corrientes del estator en el sistema fijo al estator ($\alpha\beta$) se proyectan entonces al marco orientado con el

enlace de flujo de rotor dq mediante la transformación de Park:

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_\psi & \sin \theta_\psi \\ -\sin \theta_\psi & \cos \theta_\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

2.8. Control vectorial

El propósito del control vectorial es desacoplar el control de flujo y torque, emulando el comportamiento de una máquina de corriente continua con excitación independiente. Al aplicar la condición de orientación (2.60) en la ecuación de torque (2.5), se obtiene:

$$T = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} i_{sq} \quad (2.62)$$

Esta expresión muestra que, bajo orientación de campo, el enlace de flujo de rotor queda gobernado por la componente i_{sd} , mientras que el torque electromagnético depende directamente de i_{sq} . Esta separación establece dos canales físicos desacoplados: uno asociado al flujo magnético y otro a la producción de torque.

2.8.1. Modulación con inyección de secuencia cero (Min-Max)

Las tensiones de referencia provenientes del control vectorial (v_{sd}^*, v_{sq}^*), una vez transformadas al dominio del tiempo trifásico (v_a^*, v_b^*, v_c^*), se modulan utilizando la técnica de inyección de tercer armónico o “Min-Max”. Este método maximiza la utilización de la tensión del bus DC, extendiendo el rango lineal de operación en un 15,5% respecto a la modulación por suboscilación.

La técnica consiste en adicionar una tensión de secuencia cero (v_{offset}) calculada en cada instante de muestreo:

$$v_{offset} = -\frac{1}{2} (\text{mín}(v_a^*, v_b^*, v_c^*) + \text{máx}(v_a^*, v_b^*, v_c^*)) \quad (2.63)$$

La tensión final de modulación resulta en $v_{x,mod} = v_x^* + v_{offset}$ (para $x \in \{a, b, c\}$). Esta operación desplaza uniformemente las tres referencias de fase, reduciendo sus valores máximos y permitiendo un mejor aprovechamiento del bus DC.

Dado que v_{offset} corresponde a una componente de secuencia cero (idéntica en las tres fases), esta se cancela al calcular tensiones de línea a línea, por ejemplo $v_{ab} = v_{a,mod} - v_{b,mod} = v_a^* - v_b^*$. En consecuencia, las corrientes de la máquina no se ven afectadas por la inyección.

2.9. Comportamiento de las corrientes en el marco dq ante perturbaciones

La interpretación física introducida por el control vectorial permite establecer una relación directa entre la naturaleza de una perturbación y su manifestación en las corrientes del estator. En particular, perturbaciones que afectan el flujo magnético del rotor se reflejan predominantemente en la componente i_{sd} , mientras que perturbaciones que alteran el balance de torque se manifiestan en i_{sq} .

2.9.1. Efecto de la asimetría de rotor (BRB)

La rotura de barras en el rotor introduce una asimetría eléctrica que modifica la distribución de corrientes de rotor y, en consecuencia, el enlace de flujo de rotor. Al estar el eje d alineado con dicho enlace de flujo, esta perturbación se traduce en oscilaciones de baja frecuencia que se manifiestan principalmente en la componente i_{sd} .

Este comportamiento ha sido formalizado mediante análisis de pequeña señal del modelo de la máquina con asimetría de rotor, donde se demuestra que, bajo condiciones de carga constante, la amplitud de las oscilaciones en el eje directo domina sobre la del eje en cuadratura [1].

2.9.2. Efecto de la oscilación de carga (LO)

Las oscilaciones de carga corresponden a perturbaciones de origen mecánico que afectan directamente el balance de torque del sistema. En consecuencia, su efecto se acopla principalmente al canal de producción de torque, manifestándose como una modulación de la corriente i_{sq} .

En contraste, la componente i_{sd} , asociada al establecimiento del flujo magnético, no se ve directamente afectada por este tipo de perturbaciones, por lo que sus variaciones resultan considerablemente menores en comparación con las observadas en i_{sq} .

2.9.3. Separabilidad en el marco orientado

El análisis anterior, respaldado por el modelo dinámico presentado en [1], muestra que la naturaleza de la perturbación determina la dirección predominante de las oscilaciones en el plano d - q : mientras que una falla por rotura de barras afecta principalmente la componente i_{sd} , una oscilación de carga impacta la componente i_{sq} .

Esta propiedad resulta fundamental para el diagnóstico, ya que ambos fenómenos generan firmas espectrales similares en las corrientes trifásicas del estator (MCSA), pero pueden ser diferenciados al analizar sus proyecciones en el marco orientado con el enlace de flujo de rotor, donde sus efectos quedan desacoplados.

No obstante, la validez de esta separabilidad depende de la precisión de la orientación de campo. En particular, el estimador de flujo debe proporcionar un ángulo θ_ψ suficientemente alineado con la orientación real del enlace de flujo de rotor, de modo que las componentes proyectadas sobre los ejes d y q representen correctamente los fenómenos de magnetización y torque, respectivamente. Asimismo, el estimador debe operar en condiciones estacionarias, donde los errores dinámicos de estimación sean reducidos, evitando desviaciones transitorias significativas en la orientación del marco de referencia.

Cuando existe un error de orientación, la transformación al marco dq proyecta parcialmente las oscilaciones de un eje sobre el otro. Como consecuencia, una perturbación mecánica asociada a LO puede inducir variaciones adicionales sobre i_{sd} , mientras que una asimetría de rotor puede reflejarse parcialmente en i_{sq} . Este acoplamiento cruzado reduce la separabilidad de los indicadores Δi_d y Δi_q , pudiendo degradar la precisión del diagnóstico y generar falsos positivos ante condiciones de oscilación mecánica severa.

2.10. Control PI y optimización

Los lazos de regulación de corriente y velocidad se implementan mediante controladores Proporcional-Integral (PI). La función de transferencia en el dominio de Laplace es:

$$C(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{\tau_n s} \right) \quad (2.64)$$

donde k_p es la ganancia proporcional y τ_n es la constante de tiempo de acción integral (tiempo de reajuste). La estructura general del lazo de control se presenta en la Figura 2.3.

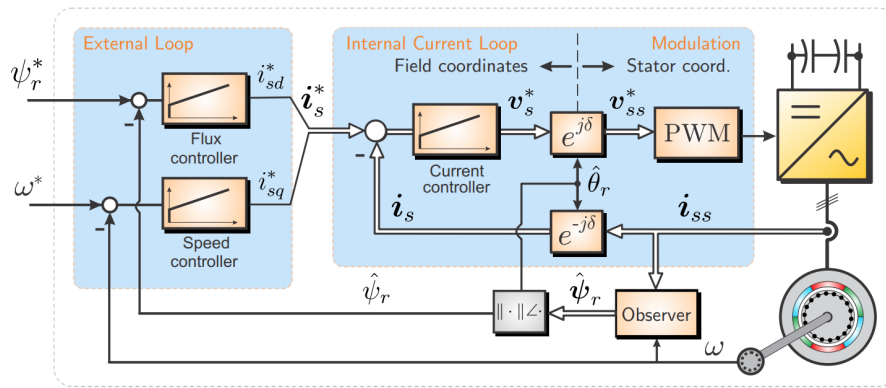


Figura 2.3: Diagrama de bloques del lazo de control PI. Fuente: [2].

Para la determinación analítica de los parámetros k_p y τ_n , se utilizan los métodos de optimización descritos por Fröhr y Orthenburger [18].

2.10.1. Criterio del Óptimo en Módulo (OM)

Este criterio se aplica a plantas aproximables a un sistema de primer orden con una constante de tiempo dominante (τ_{dom}) y constantes menores sumadas (τ_Σ).

El objetivo es obtener una magnitud de la función de transferencia de lazo cerrado unitaria ($|G(j\omega)| \approx 1$) en un amplio ancho de banda. Según [18], los parámetros se calculan compensando la constante dominante:

$$\tau_n = \tau_{dom} \quad (2.65)$$

$$k_p = \frac{k_{dom}}{2k_{proc}\tau_\Sigma} \quad (2.66)$$

donde k_{proc} es la ganancia estática del proceso. Esto asegura una respuesta rápida con un sobrepaso mínimo (típicamente 4,3%) [18].

2.10.2. Criterio del Óptimo Simétrico (OS)

Se utiliza cuando la planta posee, además de constantes pequeñas sumadas, un integrador puro o constantes de tiempo dominantes no compensables, sin afectar severamente la

respuesta a perturbaciones.

El método maximiza el margen de fase a la frecuencia de cruce para garantizar estabilidad y amortiguamiento. Los parámetros óptimos son:

$$\tau_n = 4\tau_\Sigma \tag{2.67}$$

$$k_p = \frac{1}{2k_{proc}\tau_\Sigma} \tag{2.68}$$

Como indica [18], esta configuración ofrece una respuesta más rápida ante perturbaciones de carga, a costa de un mayor sobrepaso en la respuesta al escalón, el cual puede mitigarse mediante pre-filtros de referencia, proceso también conocido como alisamiento.

2.11. Control predictivo

Como alternativa al control PI, se implementa una estrategia de control predictivo de corriente (PCC) basada en conjunto finito (FCS-MPC). Este esquema emplea el modelo discreto de la máquina para predecir las corrientes futuras correspondientes a cada fasor espacial de tensión del inversor, seleccionando aquel que minimiza una función de costo predefinida [3].

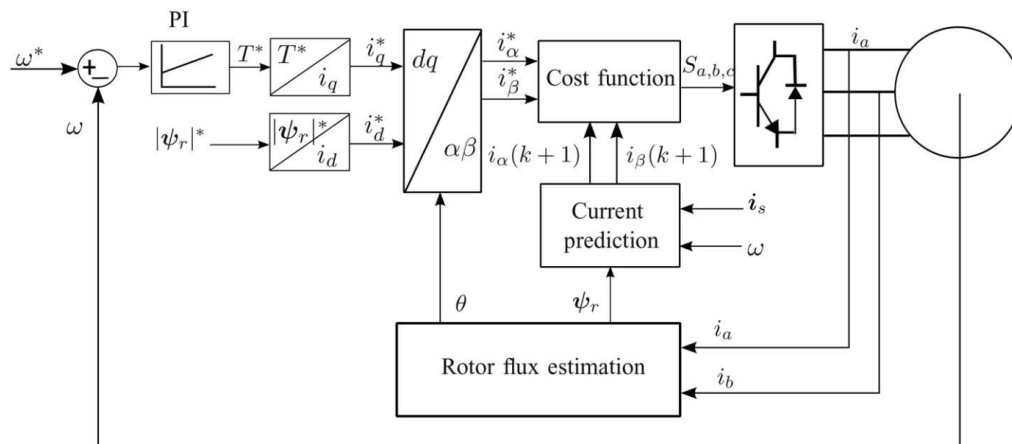


Figura 2.4: Diagrama de bloques de control vectorial con control predictivo de corriente (PCC). Fuente: [3].

2.11.1. Modelo de predicción y compensación de retardo

La predicción se fundamenta en la discretización de las ecuaciones de la máquina. No obstante, para compensar el retardo inherente al cálculo digital (donde la acción calculada en k se aplica en $k + 1$), la predicción se proyecta a dos pasos futuros ($k + 2$) [3]:

1. **Estimación a $k+1$:** Se estima la corriente $\hat{i}_s[k+1]$ utilizando las mediciones actuales y la tensión aplicado en el intervalo presente.

2. **Predicción a $k+2$:** A partir de la estimación previa, se calculan las siete trayectorias futuras de corriente $\hat{i}_s[k+2]_j$ para cada uno de los fasores espaciales \mathbf{v}_j disponibles en la Tabla 2.1:

$$\hat{i}_s[k+2]_j = f(\hat{i}_s[k+1], \hat{\psi}_r[k+1], \mathbf{v}_j) \quad \forall j \in \{0, \dots, 6\} \quad (2.69)$$

2.11.2. Función de costo

La selección del fasor espacial óptimo \mathbf{v}_{opt} se realiza minimizando la función de costo g_j , la cual penaliza el error absoluto entre la referencia y la predicción:

$$g_j = |i_{s\alpha}^* - \hat{i}_{s\alpha}[k+2]_j| + |i_{s\beta}^* - \hat{i}_{s\beta}[k+2]_j| + F_{lim} \quad (2.70)$$

donde $i_{s\alpha}^*$ e $i_{s\beta}^*$ son las referencias generadas por el lazo exterior. El término F_{lim} actúa como una restricción dura (hard constraint) para proteger al convertidor, tomando un valor infinito si la corriente predicha excede los límites físicos de los semiconductores [3].

2.12. Visión global del sistema propuesto

Las herramientas teóricas desarrolladas en este capítulo constituyen la base de un sistema integrado de diagnóstico y control orientado a abordar la detección y mitigación de fallas en máquinas asincrónicas de jaula de ardilla bajo condiciones operativas realistas.

2.12.1. Problema central

Las oscilaciones de carga mecánica (LO) generan firmas en la corriente del estator similares a las producidas por fallas de rotura de barras (BRB), lo que dificulta su diagnóstico mediante técnicas clásicas como el análisis de firma de corriente (MCSA). Esta ambigüedad se mantiene —e incluso se acentúa— cuando la máquina opera bajo control en lazo cerrado, debido a la acción correctiva del regulador.

A partir de la interpretación física establecida en la Sección 2.9, se propone un enfoque basado en el análisis de las componentes i_{sd} e i_{sq} , el cual permite explotar la separabilidad entre perturbaciones de origen eléctrico y mecánico en el marco de referencia sincrónico.

2.12.2. Objetivos del trabajo

Sobre esta base, el presente trabajo se estructura en dos objetivos principales:

- **Diagnóstico:** desarrollar y validar un algoritmo basado en las componentes oscilatorias Δi_d y Δi_q que permita detectar y diferenciar la presencia de fallas BRB y oscilaciones de carga LO. Este análisis se realiza de manera progresiva en tres condiciones de operación: máquinas sin control (conectadas directamente a la red), máquinas bajo control vectorial FOC-PI y, finalmente, máquinas reales en un entorno experimental.

- **Mitigación activa:** diseñar un esquema de control predictivo adaptativo (PCC-BRB) capaz de estimar en línea los parámetros de la falla (número de barras rotas y posición angular) e incorporarlos en el modelo interno del controlador, con el fin de compensar sus efectos sobre las corrientes y mejorar el desempeño eléctrico del sistema.

Cabe destacar que el desarrollo del algoritmo de diagnóstico no se plantea como un objetivo independiente del controlador predictivo adaptativo, sino como la base fenomenológica que sustenta su implementación. La identificación y validación de los indicadores Δi_d y Δi_q como representaciones desacopladas de las asimetrías de rotor y las oscilaciones de carga, respectivamente, constituye el vínculo conceptual entre el análisis diagnóstico y el FOC-PCC-BRB. Estos mismos indicadores son posteriormente utilizados por el esquema adaptativo para interpretar el estado dinámico de la máquina y ajustar su modelo interno durante la operación.

2.12.3. Estrategia metodológica

El cumplimiento de estos objetivos se aborda mediante dos etapas metodológicas complementarias.

En el Capítulo 3 se desarrolla la metodología de diseño y validación en simulación, donde se implementan los modelos de fallas BRB y LO, así como las estrategias de control FOC-PI y FOC-PCC-BRB. En este entorno controlado, se evalúa, por una parte, la precisión del diagnóstico basada en las componentes i_{sd} e i_{sq} en máquinas sin control y bajo regulación FOC-PI. Por otra parte, se analiza el desempeño del control predictivo adaptativo (PCC-BRB), cuyo objetivo no es la clasificación explícita de fallas, sino la estimación de parámetros de asimetría del rotor (número de barras rotas y posición angular) y la mitigación de sus efectos sobre las corrientes del estator.

Posteriormente, en el Capítulo 4 se presenta la metodología experimental, cuyo propósito es validar el algoritmo de diagnóstico bajo condiciones reales de operación. Para ello, se realiza la identificación de los parámetros eléctricos, mecánicos y constructivos relevantes de las máquinas, la inducción física de fallas en el rotor y la generación controlada de oscilaciones de carga, evaluando el desempeño del sistema frente a mediciones reales. Cabe destacar que la validación experimental se centra en el algoritmo de diagnóstico, mientras que la estrategia de mitigación activa se evalúa exclusivamente en simulación.

De este modo, la simulación y la experimentación constituyen etapas consecutivas de validación que permiten verificar tanto la consistencia teórica como la aplicabilidad práctica de la propuesta.

Capítulo 3

Metodología de Diseño y Validación en Simulación

Este capítulo describe la metodología utilizada para el diseño, implementación y validación preliminar de las estrategias propuestas mediante herramientas computacionales. El desarrollo se centra en el modelado del entorno de simulación (Sección 3.1), donde se replican las condiciones dinámicas de las máquinas, y en la implementación de las estrategias de control (Sección 3.2).

Cabe destacar que las estrategias de control evaluadas corresponden a distintas implementaciones del control por campo orientado (FOC). En particular, se consideran dos esquemas: uno basado en reguladores proporcional-integral (FOC-PI) y otro basado en control predictivo de corriente (FOC-PCC). Por su parte, la metodología experimental para la validación del diagnóstico de fallas en máquinas reales será abordada en el Capítulo 4.

3.1. Modelado del Sistema y Entorno de Simulación

Para el desarrollo de las simulaciones se empleó el software PLECS (*Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation*) en co-simulación con Python para la automatización de los escenarios de prueba. Esta sección detalla la implementación de los modelos para el diagnóstico de barra rota (BRB) y oscilación de carga (LO), así como la configuración del control por campo orientado (FOC) y sus dos variantes: FOC-PI y FOC-PCC.

3.1.1. Parámetros de las máquinas bajo estudio

Se consideraron tres máquinas de inducción con diferentes características nominales para validar la precisión de los métodos propuestos. Los parámetros eléctricos y mecánicos de cada máquina se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros de las máquinas de inducción simuladas.

Parámetro	Máquina 1 [1]	Máquina 2 [19]	Máquina 3 [19]
Tensión nominal (V_n)	236 V	460 V	380 V
Corriente nominal (I_n)	13 A	2,44 A	7,3 A
Frecuencia nominal (f_n)	50 Hz	60 Hz	50 Hz
Velocidad nominal (n_n)	945 rpm	1760 rpm	1410 rpm
Momento nominal (T_n)	30 Nm	8,1 Nm	20,3 Nm
Potencia nominal (P_n)	4 HP	2 HP	4 HP
Resistencia estator (R_s)	0,65 Ω	4,05 Ω	2,283 Ω
Resistencia rotor (R_r)	0,61 Ω	2,60 Ω	2,133 Ω
Inductancia estator (L_s)	48,9 mH	552,7 mH	157,8 mH
Inductancia rotor (L_r)	48,9 mH	552,7 mH	157,8 mH
Inductancia mutua (L_m)	45,0 mH	538,7 mH	146,7 mH
Inercia (J)	0,019 kg·m ²	0,06 kg·m ²	0,06 kg·m ²
Barras de rotor (N_{barras})	30	28	28
Pares de polos (p)	3	2	2
Fricción viscosa (B)	0,003 Nms/rad	0,001 Nms/rad	0,001 Nms/rad

3.1.2. Modelación de falla por Barra Rota (BRB)

La falla de barra rota se modeló utilizando el bloque *Slip-Ring IM* en PLECS, configurado con una razón de vueltas estator/rotor unitaria para acceder directamente a los terminales del devanado de rotor.

El principio de modelado consiste en introducir una asimetría resistiva en el circuito del rotor. Mediante el bloque *Probe*, se obtienen las corrientes de rotor (i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}). Dado que estas variables están referidas al marco de coordenadas del rotor, la transformación a componentes $\alpha - \beta$ de rotor equivale a una transformación $d - q$ orientada al rotor, simplificando la inyección de la falla. Es por esto que para la notación de variables con referencia fija al rotor se usarán los subíndices d_r y q_r . Las ecuaciones que rigen el modelo de la asimetría son:

$$i_{d_r} = i_{ra} \quad (3.1)$$

$$i_{q_r} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{rb} - i_{rc}) \quad (3.2)$$

La caída de tensión adicional debido a la falla se calcula como:

$$v_{d_r} = R_d \cdot i_{d_r} \quad (3.3)$$

$$v_{q_r} = R_q \cdot i_{q_r} , \quad (3.4)$$

donde las resistencias ficticias se definen para emular la barra rota en el eje q :

$$R_d = 0, \quad R_q = \frac{2 \cdot R_r \cdot N_{BRB}}{N_{barras}} \quad (3.5)$$

Finalmente, estas tensiones se transforman nuevamente al dominio trifásico para controlar fuentes de tensión conectadas en serie con los devanados del rotor (Figura 3.1):

$$v_{ra} = v_{dr}, \quad v_{rb} = \frac{\sqrt{3}}{2}v_{qr}, \quad v_{rc} = -\frac{\sqrt{3}}{2}v_{qr} \quad (3.6)$$

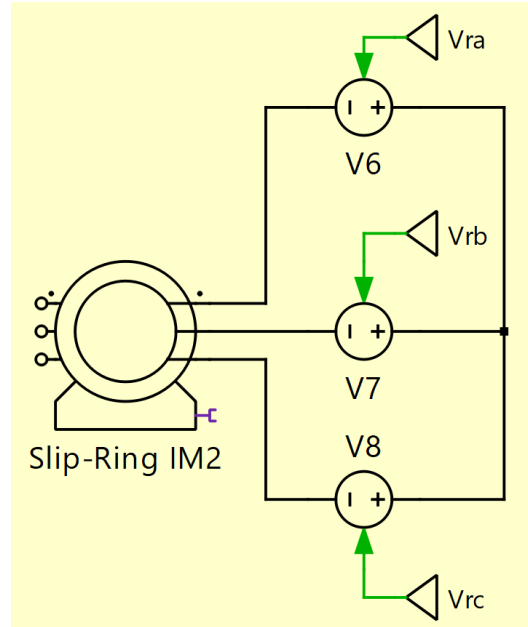


Figura 3.1: Implementación del modelo de máquina con falla BRB en PLECS.

Este esquema permite simular dinámicamente la severidad de la falla variando el parámetro $N_{BRB} \in \{0, 1, 2\}$.

3.1.3. Modelación de Oscilación de Carga (LO)

La oscilación de carga se modela mediante el bloque *Torque (Controlled)* acoplado al eje mecánico. El torque de carga aplicado se compone de una componente constante y una componente oscilatoria sinusoidal.

Para configurar correctamente la frecuencia de oscilación, se calculan previamente los parámetros nominales de operación: el deslizamiento nominal s_n , el torque nominal T_n y la frecuencia de deslizamiento nominal $f_{s,n}$:

$$s_n = \frac{f_{n,red} - p \cdot (n_n/60)}{f_{n,red}} \quad (3.7)$$

$$T_n = \frac{30 \cdot P_n}{\pi \cdot n_n} \quad (3.8)$$

$$f_{s,n} = s_n \cdot f_{n,red} \quad (3.9)$$

donde p es el número de pares de polos de la máquina.

La Figura 3.2 muestra la implementación en PLECS, donde el bloque *Sine Wave Generator* inyecta la perturbación.

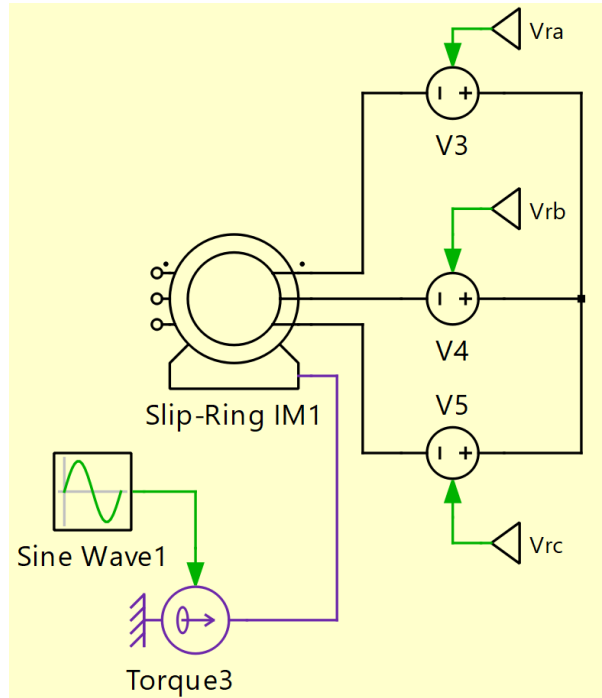


Figura 3.2: Esquema de simulación incluyendo modelo BRB y perturbación de carga (LO).

Para evaluar la precisión del diagnóstico bajo variaciones de carga y perturbación mecánica, se definieron los siguientes escenarios de simulación:

- **Torque base (T_{load}):** 33,3 %, 66,7 % y 100 % de T_n .
- **Amplitud de oscilación (A_{LO}):** Barrido desde 10 % a 200 % de $0,05T_n$ (en pasos de 10 %).
- **Frecuencia de oscilación (f_{LO}):** Barrido desde 10 % a 200 % de $2f_{s,n}$ (en pasos de 10 %).

Cabe señalar que el modelo de simulación considera únicamente el momento de inercia intrínseco del rotor de la máquina asincrónica, sin incluir la contribución de un sistema de carga acoplado. En aplicaciones reales y en ensayos experimentales, cualquier máquina o freno utilizado para imponer el torque de carga aporta inercia adicional al sistema rotatorio, lo que incrementa la constante de tiempo mecánica y acentúa el efecto de filtrado frente a perturbaciones de alta frecuencia.

Esta simplificación metodológica permite aislar la dinámica propia de la máquina asincrónica bajo estudio. No obstante, debe tenerse en consideración al momento de comparar los resultados de simulación con los obtenidos en el banco de pruebas, donde la inercia total del sistema es significativamente mayor.

3.1.4. Determinación del coeficiente de fricción viscosa (B)

La literatura técnica reporta valores típicos de coeficiente de fricción viscosa en el rango de $B = 0,003$ [Nms/rad] para máquinas de inducción de baja potencia [20,21].

En consecuencia, para las simulaciones se adoptó el siguiente criterio:

- **Máquina 1:** $B = 0,003$ [Nm/rad/s] (valor teórico estándar).
- **Máquinas 2 y 3:** $B = 0,001$ [Nm/rad/s], respetando los datos reportados en la fuente bibliográfica original [19].

3.1.5. Estrategia de diagnóstico de BRB y LO

El diagnóstico se fundamenta en el análisis de las firmas de corriente en el dominio del tiempo sincrónico. El proceso inicia con la estimación del ángulo de flujo de rotor para realizar la orientación de campo y la transformación de coordenadas de las corrientes de estator $i_{abc} \rightarrow i_{\alpha\beta} \rightarrow i_{dq}$.

El método de detección se fundamenta en el comportamiento de las componentes de corriente en el marco de referencia orientado al flujo de rotor frente a distintas perturbaciones, el cual puede interpretarse a partir del modelo matemático desarrollado en el Capítulo 2. En condiciones de orientación de campo, la componente i_{sd} se asocia principalmente a la generación de flujo, mientras que i_{sq} está directamente vinculada a la producción de torque electromagnético. Esta propiedad de desacoplamiento permite distinguir entre perturbaciones de origen eléctrico y mecánico.

De acuerdo con lo establecido en la Sección 2.9, la presencia de una asimetría eléctrica en el rotor (falla BRB) se asocia a un incremento en las oscilaciones de la componente de eje directo (Δi_d), mientras que una perturbación mecánica del tipo oscilación de carga (LO) se manifiesta principalmente en la componente de eje en cuadratura (Δi_q).

En presencia de una falla por rotura de barras (BRB), la asimetría en el rotor introduce términos dependientes de la posición angular en el modelo, generando un acoplamiento que se manifiesta como oscilaciones en la componente asociada al flujo. Por otro lado, una oscilación de carga (LO) actúa directamente sobre la dinámica mecánica del sistema, perturbando el equilibrio de momento y reflejándose principalmente en la componente i_{sq} . Sobre la base de este comportamiento, y siguiendo el análisis presentado en [1], se adoptan las siguientes hipótesis de falla:

1. **Máquina sana:** Las corrientes i_{sd} e i_{sq} permanecen aproximadamente constantes en estado estacionario, salvo perturbaciones de baja magnitud asociadas a ruido y conmutación.
2. **Falla BRB:** La asimetría del rotor introduce oscilaciones de baja frecuencia predominantemente en la corriente de eje directo (i_{sd}), cuya amplitud depende de la severidad de la falla.
3. **Falla LO:** Las oscilaciones del torque de carga inducen variaciones predominantes en la corriente de eje en cuadratura (i_{sq}), asociada directamente a la producción de momento electromagnético.

3.1.5.a. Procesamiento de señales

Para aislar las componentes de falla, las señales i_{sd} e i_{sq} son sometidas a una cadena de acondicionamiento digital:

1. **Eliminación de componente DC:** Se aplica un filtro de media móvil con ventana de 50.000 muestras (equivalente a 2 segundos a $f_s = 25$ kHz) para remover el valor medio y analizar solo las componentes alternas.
2. **Filtrado de ruido:** Se emplea un filtro pasa-bajos Butterworth de cuarto orden con frecuencia de corte $f_c = 30$ Hz, para atenuar el ruido de conmutación y medición.

3.1.5.b. Extracción de características e indicadores de falla

Finalmente, a partir de las señales acondicionadas, se calculan los indicadores de diagnóstico basados en el valor eficaz (RMS). Para garantizar que los resultados sean comparables entre las distintas máquinas estudiadas, los indicadores se normalizan respecto a la corriente base (I_n) de cada motor (corriente nominal RMS).

En coherencia con el marco teórico presentado en el Capítulo 2, estos indicadores no solo representan magnitudes eléctricas, sino que permiten interpretar físicamente el origen de la perturbación: un aumento en Δi_d indica la presencia de una asimetría eléctrica en el rotor, mientras que un aumento en Δi_q se asocia a perturbaciones mecánicas externas.

Se definen tres indicadores clave:

- **Indicador de punto de operación (i_q):** Corresponde al valor RMS de la corriente i_{sq} sin procesar (con componente continua). Este valor se normaliza para obtener una medida en porcentaje de por unidad [% pu], indicando el nivel de carga mecánica de la máquina.

$$i_q = \frac{RMS(i_{sq})}{I_n} \cdot 100 \quad [\%pu] \quad (3.10)$$

- **Indicador de severidad de Barra Rota (Δi_d):** Se calcula a partir del valor RMS de las componentes no continuas de la corriente directa (Δi_{sd}), obtenida tras el filtrado. Dado que las magnitudes de falla incipiente son bajas, el valor se expresa como un porcentaje de la base [% pu].

$$\Delta i_d = \frac{RMS(\Delta i_{sd})}{I_n} \cdot 100 \quad [\%pu] \quad (3.11)$$

- **Indicador de severidad de Oscilación de Carga (Δi_q):** Se calcula a partir del valor RMS de las componentes no continuas de la corriente en cuadratura (Δi_{sq}), obtenida tras el filtrado. Análogamente, se expresa como porcentaje de la base [% pu].

$$\Delta i_q = \frac{RMS(\Delta i_{sq})}{I_n} \cdot 100 \quad [\%pu] \quad (3.12)$$

Estos indicadores cuantitativos son posteriormente tabulados para crear cotas que permitan diagnosticar cuando una máquina presente condiciones de BRB o LO.

3.1.6. Esquema del sistema simulado sin control

La Figura 3.3 presenta el diagrama de bloques simplificado del sistema simulado bajo un régimen de conexión directa a la red.

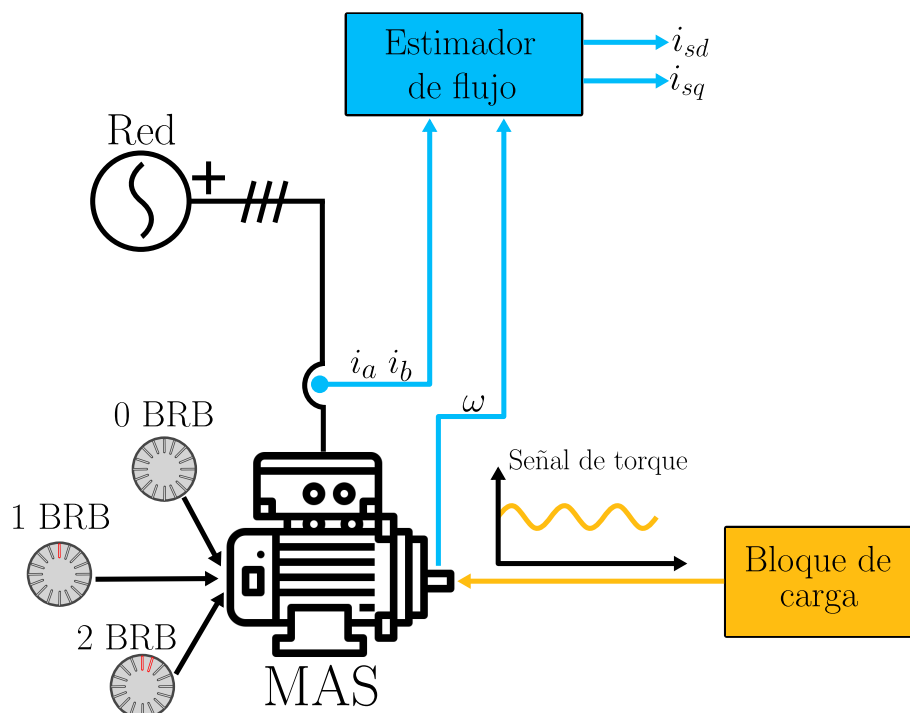


Figura 3.3: Esquema general del sistema simulado sin control para la evaluación del diagnóstico.

Tal como se observa en el esquema, el núcleo del montaje virtual corresponde al modelo de la máquina asincrónica (MAS), la cual es alimentada directamente desde una red trifásica de tensión. Para emular los distintos estados de salud del rotor, el modelo de la máquina fue parametrizado, de modo que permite conmutar estructuralmente entre tres condiciones operativas: máquina sana (0 BRB), falla incipiente (1 BRB) y falla severa (2 BRB).

Por el lado mecánico, el eje del motor está acoplado a un bloque dinámico de carga. Este módulo es el encargado de recibir e inyectar la señal de torque al sistema, la cual combina matemáticamente el nivel de exigencia mecánica base (33,3 %, 66,7 % o 100 % de la carga nominal) con las perturbaciones fluctuantes utilizadas para emular el fenómeno de oscilación de carga (LO).

Finalmente, para efectos de adquisición y procesamiento de datos, el sistema emula la captura de las corrientes de estator de fase (i_a , i_b) y la velocidad mecánica del rotor (ω). Estas mediciones brutas son canalizadas hacia el estimador de flujo, el cual se encarga de calcular el ángulo de orientación del campo magnético y ejecutar las transformaciones matemáticas de Clarke y Park. Como resultado, este estimador entrega las componentes de corriente proyectadas en el marco sincrónico (i_{sd} e i_{sq}), las cuales constituyen las señales de entrada directas para la posterior etapa de diagnóstico bidimensional.

3.2. Implementación y Sintonización de Estrategias de Control

Una vez definido el modelo dinámico de la planta y las condiciones de falla, se procedió al diseño de los esquemas de control encargados de gobernar las máquinas. A continuación, se detalla la metodología de implementación digital y sintonización para el Control Vectorial

(FOC) y el Control Predictivo (PCC).

3.2.1. Esquema del sistema simulado con control

La Figura 3.4 presenta el diagrama de bloques del sistema de accionamiento electromecánico operando bajo un esquema de regulación en lazo cerrado.

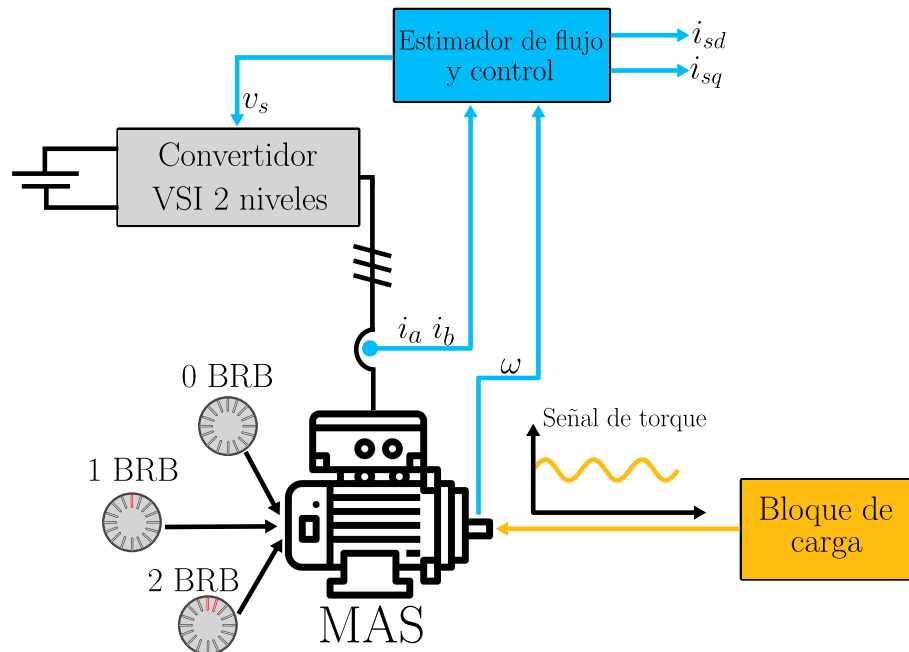


Figura 3.4: Esquema general del sistema simulado operando en lazo cerrado, válido para las evaluaciones con control FOC-PI y FOC-PCC.

A diferencia del escenario sin control, en esta arquitectura la máquina asíncrona (MAS) no se conecta directamente a la red. En su lugar, el estator es alimentado a través de un convertidor de fuente de tensión de dos niveles (VSI 2 niveles), el cual modula la energía proveniente de una fuente continua para gobernar la dinámica del motor. La inyección de asimetrías en el rotor (0, 1 o 2 BRB) y la aplicación de perturbaciones mecánicas a través del bloque de carga (oscilaciones LO) operan bajo la misma lógica descrita en el esquema sin control.

La característica central de esta topología es la retroalimentación continua de las mediciones de corriente de estator (i_a , i_b) y de la velocidad del eje (ω) hacia el bloque de estimación y control. Para abarcar los distintos objetivos de esta investigación, dicho bloque asume dos roles operativos estrictamente diferenciados según la fase del estudio:

Para contextualizar las estrategias de control consideradas, es necesario precisar los objetivos que guían esta etapa de la investigación. Por una parte, se busca evaluar la factibilidad de implementar un sistema de diagnóstico de fallas basado en variables eléctricas en un esquema de control en lazo cerrado, manteniendo consistencia con los resultados obtenidos en máquinas sin control. Por otra, se propone utilizar información paramétrica de la máquina para modificar el comportamiento del sistema en condiciones de falla mediante una estrategia de control predictiva adaptativa.

Para abordar estos objetivos, el sistema se implementa bajo un esquema de control por campo orientado (FOC), dentro del cual se emplean distintas estrategias de regulación de corriente según la fase de estudio. En este contexto, como aporte de esta memoria se propone el control predictivo de corriente con modelo adaptativo (PCC-BRB), el cual permite estimar en línea la severidad de la falla de barras rotas y su posición angular, incorporando esta información en el modelo predictivo para compensar activamente sus efectos. Su formulación e implementación se desarrollan en detalle en la Sección [3.2.4](#).

- **Fase de diagnóstico (FOC-PI):** El sistema opera bajo control vectorial clásico con reguladores proporcionales-integrales (PI), con el objetivo de evaluar si es posible construir un sistema de diagnóstico de fallas consistente con el caso sin control. En esta etapa, se analiza la precisión para detectar la presencia de barras rotas y/o oscilaciones de carga a partir de las corrientes (i_{sd} e i_{sq}), en un escenario donde la acción de control podría modificar el comportamiento de estas. En particular, se evalúa si la propiedad de separabilidad entre Δi_d y Δi_q , establecida en el análisis teórico, se mantiene observable a pesar de la acción correctiva del controlador.
- **Fase de mitigación (FOC-PCC-BRB):** En la etapa final, se implementa el esquema de control predictivo adaptativo propuesto. Este controlador utiliza mediciones de corriente para estimar en línea la cantidad de barras rotas y su posición angular, actualizando el modelo matemático de la máquina dentro del esquema predictivo. Cabe señalar que, en una etapa inicial, el controlador opera sin adaptación, equivalente a un esquema FOC-PCC convencional, para posteriormente activar la actualización paramétrica. El objetivo en esta fase no es la diferenciación de fallas, sino la compensación de la asimetría de rotor, buscando reducir las oscilaciones en las corrientes de estator (i_{sd} e i_{sq}) y mejorar el desempeño eléctrico global del accionamiento.

Independientemente de la estrategia de control implementada, el sistema siempre se encarga de calcular y enviar los estados de conmutación óptimos al inversor VSI, al mismo tiempo que provee las señales proyectadas en el marco de referencia orientado con el enlace de flujo de estator (i_{sd} e i_{sq}) para su posterior evaluación y análisis.

3.2.2. Control Vectorial (FOC) con reguladores PI

La primera estrategia implementada corresponde al Control por Campo Orientado (FOC), estructurado en lazos en cascada: dos lazos internos rápidos para las corrientes de estator (i_{sd}, i_{sq}) y dos lazos externos más lentos para la velocidad mecánica (ω_m) y el enlace de flujo de rotor (ψ_r).

3.2.2.a. Sistema Por Unidad (pu)

Para simplificar el diseño de los controladores y generalizar la sintonización para las tres máquinas bajo estudio, el sistema de control se implementó utilizando un sistema de magnitudes normalizadas o “por unidad” (pu) [\[22\]](#). Las bases del sistema se definieron a partir de los valores nominales de la máquina (tensión *peak* de fase V_b y corriente *peak* de fase I_b) y la frecuencia base del sistema (ω_b):

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b}, \quad L_b = \frac{Z_b}{\omega_b}, \quad \psi_b = L_b I_b, \quad T_b = \frac{3}{2} p \psi_b I_b \quad (3.13)$$

Esta normalización desacopla el diseño del controlador de los parámetros físicos específicos de cada motor, permitiendo utilizar ganancias similares para máquinas de distintas potencias.

3.2.2.b. Diseño y sintonización en el dominio discreto

Para garantizar una comparación equitativa con la estrategia predictiva (descrita en la sección siguiente), se diferenciaron las frecuencias de operación para el control y la estimación:

- **Estimación de flujo:** Se ejecuta a una frecuencia de 25 kHz ($T_s = 40\mu s$) para mantener una alta precisión en la orientación de campo.
- **Lazos de control y modulación PWM:** Se configuraron a una frecuencia de 5,5 kHz. Esta frecuencia fue seleccionada para igualar la tasa de conmutación promedio que presenta el control predictivo en estado estacionario, permitiendo así comparar el desempeño de ambas estrategias bajo condiciones de estrés de conmutación y pérdidas similares.

El diseño de los controladores PI se realizó en el plano Z , considerando esta tasa de muestreo del control ($T_{ctrl} \approx 181,8\mu s$). Para la sintonización se utilizó la herramienta *rltool* de MATLAB, aplicando la técnica del Lugar Geométrico de las Raíces (Root Locus).

Para el control de enlace de flujo de rotor, la referencia se establece a partir de la corriente de magnetización nominal $i_{mr}^* = |\psi_r^*|/L_m$ [16], que en el sistema por unidad permite establecer la referencia i_{sd}^* directamente.

3.2.3. Control Predictivo de Corriente (PCC)

La segunda estrategia evaluada es el Control Predictivo de Corriente basado en modelo de conjunto finito (FCS-MPC). Esta estrategia reemplaza los lazos internos de corriente y el modulador PWM por un algoritmo de optimización basado en la función de costo (2.70).

3.2.3.a. Generación de referencias

El esquema de control mantiene un lazo externo clásico para la regulación de velocidad, implementado mediante un controlador PI que genera la referencia de torque electromagnético (T^*). A partir de este requerimiento de torque y de la referencia de enlace de flujo de rotor ($|\psi_r^*|$), se calculan las referencias de corriente necesarias para la función de costo [3]:

$$i_{sd}^* = \frac{|\psi_r^*|}{L_m} \quad (3.14)$$

$$i_{sq}^* = \frac{2}{3p} \frac{L_r}{L_m} \frac{T^*}{|\psi_r^*|} \quad (3.15)$$

Es importante notar que en el esquema predictivo implementado, estas referencias (i_{sd}^* , i_{sq}^*) son comparadas directamente contra las predicciones de corriente del modelo para seleccionar el fasor de tensión óptimo en cada instante de muestreo.

3.2.3.b. Sintonización

Una de las principales ventajas estructurales del PCC frente a otras estrategias predictivas (como el Control Predictivo de Torque, PTC) es la homogeneidad de las variables en la función de costo. Tal como se establece en [3], al controlar corrientes en ambos ejes (i_{sd} , i_{sq}), ambas magnitudes poseen la misma naturaleza y unidades, lo que elimina la necesidad de emplear factores de ponderación para equilibrar la función de optimización.

En consecuencia, para la minimización de la función de costo en el lazo interno, no se utilizaron factores de ponderación (pesos unitarios), asignando idéntica prioridad al seguimiento de las referencias de eje directo y en cuadratura.

Por otro lado, debido a la naturaleza no lineal del control predictivo, la sintonización del controlador PI del lazo externo de velocidad se realizó mediante un enfoque heurístico iterativo. Las ganancias k_p y k_i se ajustaron con el objetivo de minimizar las oscilaciones de la velocidad mecánica en condiciones nominales de operación (carga y velocidad de referencia nominales, sin falla ni perturbaciones externas). Para ello, se toleró la presencia de un sobrepaso en la respuesta transitoria.

3.2.3.c. Parámetros de implementación y compensación de retardo

Para la implementación del esquema predictivo, se estableció una frecuencia de muestreo única de 25 kHz ($T_s = 40\mu s$).

Un desafío crítico en la implementación digital del control predictivo es el retardo inherente entre la adquisición de datos y la aplicación del nuevo estado de conmutación. Para mitigar este efecto, se adoptó una estrategia de compensación de retardo estándar en la literatura experimental [3], definiendo un horizonte de predicción de dos pasos ($N = 2$). Esto implica que, utilizando las mediciones en el instante k , el algoritmo estima el estado en $k + 1$ y calcula las predicciones para $k + 2$, seleccionando así la acción de control óptima que será aplicada al inicio del siguiente intervalo de muestreo.

Es importante destacar que, en el control FCS-MPC, la frecuencia de conmutación es variable. En las simulaciones realizadas en estado estacionario nominal, se observó que con un $T_s = 40\mu s$, la frecuencia de conmutación promedio resultante en los semiconductores es de aproximadamente 5,5 kHz. Este valor empírico fundamentó la elección de la frecuencia de portadora para el control vectorial (Sección 3.2.2), validando la comparativa entre ambos métodos.

3.2.4. Control Predictivo con Modelo Adaptativo (PCC-BRB)

Esta estrategia avanzada extiende el esquema de Control Predictivo de Corriente (PCC) convencional, incorporando explícitamente el conocimiento de la asimetría del rotor. A diferencia del PCC estándar, que supone un modelo de máquina sana y simétrica, esta variante emplea un modelo dinámico adaptativo, que actualiza la matriz de resistencia de rotor en tiempo real.

El núcleo de esta propuesta radica en un algoritmo de búsqueda que evalúa diferentes hipótesis sobre la severidad de la falla (número de barras rotas, N_{brb}) y su ubicación espacial (posición angular inicial, θ_{r0}). El sistema selecciona dinámicamente la configuración paramétrica que minimiza las oscilaciones de baja frecuencia, logrando que el controlador anticipe y compense activamente las deformaciones del enlace de flujo de rotor. A continuación, se detallan las etapas funcionales de esta metodología.

3.2.4.a. Arquitectura general del controlador

El sistema de control opera en el marco de referencia estacionario ortogonal $\alpha\beta$. Las corrientes trifásicas medidas (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) se transforman mediante la matriz de Clarke, mientras que la velocidad mecánica se convierte a su equivalente eléctrico multiplicándola por el número de pares de polos.

La arquitectura consta de un lazo de control de velocidad externo y un lazo de corriente predictivo interno. El lazo externo utiliza un controlador PI con mecanismo *anti-windup* para procesar el error de velocidad y generar la referencia de torque electromagnético (T_{ref}). A partir de este torque y de una referencia de enlace de flujo constante (orientación de campo), se calculan las corrientes de referencia en el marco sincrónico ($i_{d,ref}, i_{q,ref}$). La transformación de estas referencias de vuelta al marco $\alpha\beta$ se realiza utilizando el ángulo de campo proporcionado por un estimador de flujo adaptativo.

El lazo interno emplea un algoritmo FCS-MPC con un horizonte de predicción de dos pasos ($k + 2$), para compensar los retardos de procesamiento. En cada período de muestreo (configurado a 25 kHz), el controlador evalúa los ocho fasores espaciales de tensión espaciales del inversor, predice la evolución de la corriente de estator utilizando el modelo matemático asimétrico de la máquina, y aplica el fasor espacial que minimiza la función de costo cuadrática g (error entre corrientes predichas y de referencia).

Cabe mencionar que, durante la fase de diseño de la arquitectura, se intentó incorporar un lazo de control PI adicional dedicado al seguimiento estricto de la referencia de la corriente i_{sd} . El propósito empírico de esta variante era forzar una corriente magnetizante rígidamente estable para suprimir las oscilaciones inyectadas por la rotura de barras. Sin embargo, las simulaciones preliminares demostraron que este enfoque interfería negativamente con la dinámica del controlador predictivo, degradando significativamente la estabilidad de la velocidad y aumentando la oscilación de las corrientes i_d e i_q en todos los escenarios de falla. Por este motivo, la topología con control PI sobre i_{sd}^* fue descartada y sus resultados no forman parte del análisis de la presente memoria.

3.2.4.b. Estimador de flujo y predictor de corriente adaptativos

Un aspecto diferenciador de esta implementación es que el modelo dinámico de barras rotas no se restringe únicamente a la etapa de predicción del PCC, sino que se incorpora simultáneamente en el predictor de corriente y en el estimador de flujo del rotor. Para ello, la resistencia de rotor R_r deja de modelarse como un escalar constante y pasa a representarse mediante una matriz dependiente de la posición instantánea del rotor $\theta_r(t) = \theta_{r0} + \omega t$, descomponiéndose en las componentes $R_{r\alpha}$, $R_{r\beta}$ y $R_{r\lambda}$. Estas componentes dependen de la severidad de la falla (N_{brb}) y de la posición angular inicial de la barra rota (θ_{r0}), incorporándose directamente tanto en las ecuaciones del estimador de flujo como en las ecuaciones de predicción de corriente derivadas en las Secciones 2.5 y 2.4 respectivamente.

Como consecuencia, el ángulo del enlace de flujo calculado se vuelve sensible a la asimetría del rotor, generando un marco de referencia sincrónico $d-q$ dinámicamente adaptado a la condición de falla. En este marco adaptado, las corrientes proyectadas i_d e i_q reflejan directamente la discrepancia entre el modelo interno del controlador y la planta física. Para alimentar el algoritmo de adaptación con esta información, resulta necesario aislar las componentes oscilatorias de las señales de corriente mediante un doble proceso de filtrado:

1. **Filtro pasa bajos:** Se implementa un filtro Butterworth de cuarto orden para eliminar el ruido de conmutación de alta frecuencia introducido por el inversor.
2. **Filtro de componente continua (DC):** Se aplica un filtro de ventana deslizante promediada sobre las últimas 50.000 muestras (equivalente a 2 segundos a 25 kHz). Al restar este valor medio dinámico de la señal original, se obtienen las componentes fluctuantes Δi_d y Δi_q , utilizadas como indicadores directos del error de compensación del modelo.

En este esquema, la resistencia de rotor nominal R_r se considera un parámetro conocido, mientras que la severidad de la falla N_{brb} y la posición angular inicial θ_{r0} corresponden a parámetros desconocidos que son estimados en línea mediante el algoritmo de búsqueda paramétrica presentado en la sección siguiente. Dicho algoritmo ajusta iterativamente (N_{brb} , θ_{r0}) durante la operación normal de la máquina, minimizando las componentes oscilatorias Δi_d y Δi_q . De esta forma, tanto el estimador de flujo como el predictor de corriente operan sobre un mismo modelo adaptado a la condición real del rotor, evitando inconsistencias internas que degradarían simultáneamente el desempeño del control y la precisión del diagnóstico.

3.2.4.c. Algoritmo de adaptación automática

El proceso de adaptación se ejecuta mediante un algoritmo iterativo de dos etapas que busca minimizar una segunda función de costo (J_{adapt}), estrictamente separada de la etapa de predicción del MPC y orientada a la identificación de los parámetros de la falla.

La necesidad de esta función surge del hecho de que, si el modelo interno del controlador supone parámetros de asimetría incorrectos —en particular, el número de barras rotas (N_{brb}) y su posición angular inicial (θ_{r0})—, la compensación realizada por el estimador

de flujo y el predictor será imprecisa, lo que se traduce en oscilaciones residuales de baja frecuencia en las corrientes de estator proyectadas en el marco orientado con el enlace de flujo de rotor (i_{sd} e i_{sq}). Por el contrario, cuando estos parámetros se aproximan a la condición real de la máquina, dichas oscilaciones tienden a minimizarse.

En este contexto, la función de costo se define como una medida de la intensidad de estas oscilaciones residuales, evaluadas sobre las componentes fluctuantes de corriente (sin componente continua y expresadas en porcentaje de por unidad, es decir Δi_d y Δi_q):

$$J_{adapt} = w_1 \cdot \Delta i_d + w_2 \cdot \Delta i_q \quad (3.16)$$

donde w_1 y w_2 son factores de ponderación. La minimización de J_{adapt} permite seleccionar la combinación de parámetros (N_{brb} , θ_{r0}) que mejor representa la asimetría real, lo que a su vez favorece la reducción de las oscilaciones en i_{sd} e i_{sq} y, consecuentemente, una mejora en el desempeño eléctrico del sistema.

Cabe destacar que en esta formulación se ha excluido intencionalmente la componente de oscilación de la velocidad mecánica ($\Delta \omega_m$). Las evaluaciones preliminares mostraron que, debido a la inercia del sistema, su magnitud es despreciable en comparación con la de las corrientes bajo las condiciones de operación consideradas, por lo que su inclusión no aporta información relevante para el proceso de adaptación.

Para efectos de esta implementación, se ha establecido $w_1 = w_2 = 1$, otorgando igual importancia a ambas componentes. El algoritmo opera secuencialmente en dos estados:

- **Estado 0 (Medición y Acumulación):** Se espera un tiempo inicial de 2 s para la estabilización del filtro DC. Luego, durante una ventana de medición ($T_{med} = 8$ s), se acumula suma de los cuadrados de las señales fluctuantes. Al finalizar este período, se calculan los valores RMS y se evalúa J_{adapt} .
- **Estado 1 (Evaluación y Decisión):** El valor de J_{adapt} calculado se compara con el mejor costo histórico registrado. Si el costo disminuye, se supone que la combinación de parámetros evaluada permite una compensación más efectiva de la asimetría, por lo que el modelo se actualiza y el algoritmo continúa con la siguiente iteración.

Cabe destacar que, a diferencia del algoritmo de diagnóstico bidimensional, esta función de costo no tiene como objetivo clasificar ni diferenciar explícitamente entre tipos de perturbaciones, sino minimizar su efecto global sobre las corrientes. En este sentido, el controlador PCC-BRB no identifica de forma directa la naturaleza de la perturbación (BRB o LO), sino que interpreta cualquier incremento en Δi_d y Δi_q como una discrepancia entre el modelo interno y la planta, ajustando sus parámetros para compensarla.

3.2.4.d. Criterios de búsqueda paramétrica y convergencia

La exploración del espacio de soluciones bidimensional se realiza de manera estructurada, para garantizar convergencia y eficiencia computacional. Inicialmente, suponiendo la existencia de al menos una barra rota ($N_{brb} = 1$), el algoritmo ejecuta un barrido espacial completo para la posición angular θ_{r0} en el intervalo $[0, 2\pi)$ con incrementos discretos de $\pi/6$ [rad] (12 puntos de evaluación).

Si durante este barrido se encuentra una configuración angular que reduce J_{adapt} , el algoritmo supone que ha detectado la ubicación física de la falla y congela el valor óptimo

de θ_{r0} . Esta estrategia reduce la dimensionalidad del problema, evitando repetir barridos angulares en iteraciones futuras. Una vez fijada la posición, el algoritmo incrementa la severidad estimada (N_{brb}) y evalúa únicamente si el incremento de barras rotas mejora la respuesta del sistema.

El algoritmo define dos criterios de parada estrictos para declarar la convergencia del modelo:

1. **Criterio de máquina sana:** Si tras completar el primer barrido espacial suponiendo $N_{brb} = 1$, la configuración que arroja el menor costo oscilatorio sigue siendo el modelo simétrico ($N_{brb} = 0$), el algoritmo fuerza una detención inmediata, diagnosticando que la máquina no presenta fallas en el rotor.
2. **Criterio de tolerancia de mejora:** Si el algoritmo ejecuta dos barridos o incrementos consecutivos sin lograr una reducción en la función de costo global J_{adapt} , se supone que se ha alcanzado el mínimo local óptimo. La búsqueda se detiene, y el estimador y predictor adoptan de forma permanente el par paramétrico ($N_{brb_optimo}, \theta_{r0_optimo}$) que demostró la mayor atenuación de oscilaciones de i_d e i_q .

3.2.4.e. Diseño de la validación computacional del controlador

Para evaluar la efectividad y resiliencia de esta nueva estrategia de control adaptativo (PCC-BRB), se diseña una batería de pruebas mediante simulaciones dinámicas en el entorno PLECS. El objetivo fundamental de este ensayo es determinar la capacidad del controlador para adaptar su modelo interno a la asimetría del rotor (BRB) y reducir las oscilaciones de i_d e i_q bajo dos regímenes mecánicos distintos: un escenario base con carga estable (sin LO) y un escenario de alta complejidad con presencia simultánea e ininterrumpida de oscilaciones de carga (con LO).

Las pruebas se ejecutan sobre el conjunto de motores de autovalidación (Máquinas 1, 2 y 3). Para aislar y observar claramente el desempeño del algoritmo de adaptación, los ensayos se dividen empíricamente en dos fases según la perturbación mecánica externa impuesta:

- **Fase 1 (Carga estable - Sin LO):** La carga mecánica se mantiene sin oscilaciones, anulando cualquier perturbación externa ($T_{osc} = 0$). Esto permite establecer una línea base de rendimiento, evaluando la convergencia del algoritmo exclusivamente ante la asimetría pura del rotor.
- **Fase 2 (Régimen oscilatorio - Con LO):** Se inyecta una perturbación, configurando su magnitud estrictamente en una vez la frecuencia de oscilación base ($1 \times f_{osc_base}$) y una vez la amplitud de oscilación base ($1 \times T_{osc_base}$) correspondiente a cada máquina.

Para ambas fases de evaluación, se realiza un barrido paramétrico combinando tres variables operativas de la máquina simulada:

- **Severidad de la falla:** Se evalúa el comportamiento del controlador con la máquina sana (0 BRB), con falla leve (1 BRB) y con falla severa (2 BRB).

- **Exigencia mecánica (Carga base):** Cada condición de salud del rotor será sometida a niveles de carga continuos, correspondientes al 33,3%, 66,7% y 100% del torque nominal de cada topología.
- **Posición angular de la asimetría ($\theta_{r,real}$):** Para desafiar la resolución espacial del algoritmo de búsqueda (cuyo paso discreto de barrido es de $\pi/6$ radianes eléctricos), se configura la posición mecánica inicial del rotor en la simulación en un ángulo fijo de $\pi/5$ rad. Dado que el estimador y el controlador operan en el marco eléctrico, esta posición física se traduce en un ángulo eléctrico efectivo de $\theta_{r0} = p \cdot \pi/5$ rad. Esta desalineación intencional permite verificar la capacidad del controlador para minimizar la función de costo y converger al nodo eléctrico óptimo más cercano, incluso cuando la falla no coincide exactamente con los puntos del barrido.

Para cuantificar el desempeño y las ventajas operativas aportadas por la estrategia PCC-BRB, la extracción de datos se divide conceptualmente en dos etapas. En primer lugar, se verifica la efectividad de la convergencia paramétrica, evaluando exclusivamente al final del ensayo (en régimen estacionario de post-adaptación) las siguientes variables de estado interno del controlador:

- **Número de barras rotas óptimo (N_{brb_optimo}):** Para evaluar la exactitud del algoritmo para identificar correctamente la severidad de la falla. Se contrasta el valor final estimado por la función de costo adaptativa con el estado físico real configurado en la simulación (0, 1 o 2 BRB).
- **Posición angular inicial (θ_{r0_optimo}):** Para analizar la precisión del algoritmo en la detección de la ubicación espacial de la asimetría. Se verificará a qué punto del barrido converge el sistema para compensar la ubicación real impuesta ($\theta_{r0} = p \cdot \pi/5$).

En segundo lugar, para cuantificar la atenuación de oscilaciones en i_d e i_q y la eficiencia de la estrategia, se contrastan cuatro indicadores midiendo su valor en dos ventanas temporales continuas de ocho segundos: la ventana de pre-adaptación (iniciada a los cuatro segundos de simulación para omitir transitorios de arranque, operando con un modelo asimétrico forzado a $N_{brb} = 0$) y la ventana de post-adaptación (últimos ocho segundos del ensayo, operando con el modelo adaptado óptimo). Los indicadores comparativos son:

- **Fluctuación del eje directo (RMS Δi_d):** Para evaluar el grado de mitigación de las oscilaciones de baja frecuencia en la corriente magnetizante, las cuales son el reflejo directo de la asimetría espacial del rotor.
- **Fluctuación del eje en cuadratura (RMS Δi_q):** Para cuantificar la reducción del rizado en la corriente formadora de torque, lo que se traduce directamente en un esfuerzo mecánico más suave y estable frente a la carga.
- **Distorsión Armónica Total (THD):** Para analizar el impacto del modelo adaptado sobre el espectro de alta frecuencia de las corrientes. Su cálculo promediado permite verificar si el ajuste paramétrico mejora la selección de vectores del FCS-MPC, reduciendo el ruido de conmutación.
- **Pérdidas de estator ($P_{loss,3\phi}$):** Para evaluar la eficiencia energética del accionamiento. Este valor se calcula como la suma de las pérdidas por efecto Joule en las

tres fases del estator durante la ventana de evaluación respectiva. Una reducción en estas pérdidas indica que el controlador logra mantener la velocidad de referencia inyectando corrientes efectivas de menor magnitud, optimizando el esfuerzo de control global.

Esta matriz de validación integral permite comprobar si el algoritmo converge correctamente a los parámetros físicos de la planta y cuantificar el grado de mitigación de perturbaciones logrado frente a distintos niveles de deslizamiento y exigencia mecánica combinada.

Capítulo 4

Metodología Experimental para el Diagnóstico de Fallas

Este capítulo detalla los procedimientos experimentales llevados a cabo para la identificación de parámetros eléctricos, mecánicos y constructivos relevantes de las máquinas de inducción utilizadas. Se describe la aplicación de los estándares internacionales IEEE Std 112-2017 [23] y NEMA MG 1 [24] para la obtención de los parámetros del circuito equivalente, fundamentales para la validación de los modelos de simulación presentados en el capítulo anterior.

4.1. Procedimiento para la estimación de parámetros

Para la determinación de los parámetros eléctricos y mecánicos de las máquinas, se siguió el Método 2 de prueba de impedancia descrito en la sección 5.10.4 de la norma IEEE Std 112-2017 [23]. Este método se basa en pruebas de vacío y rotor bloqueado a múltiples frecuencias, procesadas mediante algoritmos de ajuste numérico.

4.1.1. Medición de resistencia de estator (R_s)

Como paso preliminar y fundamental, se determinó la resistencia de los devanados del estator mediante inyección de corriente continua (DC). Para garantizar que el valor medido corresponda a las condiciones reales de operación, la medición se realizó tras un periodo de calentamiento de la máquina, asegurando estabilidad térmica en los devanados.

4.1.2. Prueba de vacío y separación de pérdidas

El objetivo de esta prueba es determinar las pérdidas rotacionales (núcleo y fricción). La máquina se operó sin carga mecánica acoplada al eje, alimentada a frecuencia nominal ($f_n = 50$ Hz).

Utilizando un analizador de redes, se registraron las variables eléctricas de entrada (tensión de fase V_{ph} , corriente de línea I_1 y potencia activa total P_{in}) para distintos niveles de tensión. Se realizaron 20 puntos de medición, abarcando un rango desde el 100% de la

tensión nominal hasta el punto donde la corriente aumenta por inestabilidad, descendiendo en pasos de aproximadamente 10 V.

Para cada punto de operación, se calcularon las pérdidas en el cobre del estator ($P_{Cu,s}$) y las pérdidas rotacionales (P_{rot}). Dado que la máquina es trifásica y simétrica, las pérdidas óhmicas totales se calculan como:

$$P_{Cu,s} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_s \quad (4.1)$$

$$P_{rot} = P_{in} - P_{Cu,s} \quad (4.2)$$

Donde P_{rot} agrupa las pérdidas en el núcleo (P_{fe}) y las pérdidas mecánicas por roce y ventilación (P_{r+v}). De acuerdo con la teoría de máquinas eléctricas, las pérdidas en el núcleo son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la tensión inducida por el flujo en el entrehierro (E_1^2). Dado que en la prueba de vacío la corriente absorbida es reducida, la caída de tensión en la impedancia serie resulta despreciable, permitiendo suponer que la tensión inducida es aproximadamente igual a la tensión en terminales ($E_1^2 \approx V_{ph}^2$). Siguiendo el procedimiento establecido en la norma, se graficó P_{rot} en función de V_{ph}^2 . Mediante una regresión lineal sobre la zona de no saturación de la curva y extrapolando el intercepto con el eje de ordenadas (tensión nula, $V_{ph} \rightarrow 0$), se aislaron las pérdidas por roce y ventilación (P_{r+v}).

Cabe señalar que estas pérdidas no son intrínsecamente constantes, sino que dependen de la velocidad mecánica del rotor (ω_m). Sin embargo, durante la prueba de vacío la máquina opera a frecuencia nominal y con deslizamiento reducido, por lo que la velocidad se mantiene aproximadamente constante. Bajo esta condición, resulta válido tratar P_{r+v} como constante para efectos de la separación de pérdidas mediante extrapolación.

Finalmente, las pérdidas en el núcleo a tensión nominal se aislaron restando la componente mecánica:

$$P_{fe} = P_{rot}(V_{ph}) - P_{r+v} \quad (4.3)$$

4.1.3. Prueba de rotor bloqueado a frecuencia variable

Para determinar las inductancias de dispersión y la resistencia de rotor, se aplicó el Método 2 de impedancia (IEEE Std 112).

La norma sugiere realizar mediciones a frecuencia nominal (f_n), mitad de frecuencia ($0,5f_n$) y un cuarto de frecuencia ($0,25f_n$). Sin embargo, debido a las limitaciones operativas de la fuente de tensión disponible en el laboratorio, la frecuencia mínima alcanzable fue de 15 Hz. En consecuencia, el barrido de frecuencias se adaptó a los siguientes puntos de prueba:

- 100 % de f_n (50 Hz).
- 50 % de f_n (25 Hz).
- 30 % de f_n (15 Hz).

En cada punto se bloqueó mecánicamente el rotor y se aplicó una tensión reducida, tal que circulara la corriente nominal, registrando tensión, corriente y potencia.

4.1.4. Procesamiento de datos

Dado que las máquinas bajo estudio corresponden a un diseño NEMA A [24], se supuso una distribución equitativa de las reactancias de dispersión ($X_{\sigma 1}/X_{\sigma 2} = 1$).

Los datos experimentales fueron procesados mediante un algoritmo desarrollado en Python. Este *script* automatiza el procedimiento iterativo prescrito por la norma IEEE 112. El algoritmo realiza los cálculos cíclicos de las reactancias, actualizando los valores en cada paso hasta que la variación entre dos iteraciones consecutivas es inferior al umbral de convergencia del 0,1 %, garantizando así el cumplimiento estricto del estándar y eliminando el error humano en el cálculo repetitivo.

4.2. Parámetros de las máquinas bajo estudio

Se utilizaron dos máquinas de inducción trifásicas del fabricante *Marelli Motori*, modelo A3C 100 LA4, idénticas en placa. Antes de inducir las fallas destructivas (perforación de barras), se realizó la identificación de parámetros eléctricos, mecánicos y constructivos relevantes de ambas unidades en estado sano.

Los parámetros presentados en la Tabla 4.1 provienen de dos fuentes distintas:

- **Parámetros del circuito equivalente** (R_s, R_r, L_s, L_r, L_m): Fueron calculados experimentalmente siguiendo la metodología descrita en la sección anterior, basada en el estándar IEEE 112-2017 [23].
- **Parámetros constructivos y nominales**: Valores como el momento de inercia (J), los pares de polos (p) y los valores nominales de placa, fueron adoptados directamente de la hoja de datos técnica proporcionada por el fabricante [25].

Tabla 4.1: Parámetros de las máquinas de inducción (Marelli Motori A3C 100 LA4).

Parámetro	Máquina 220201077	Máquina 220201091
Tensión nominal (V_n)	380 V	380 V
Corriente nominal (I_n)	4,7 A	4,7 A
Frecuencia nominal (f_n)	50 Hz	50 Hz
Velocidad nominal (n_n)	1450 rpm	1450 rpm
Potencia nominal (P_n)	2,2 kW	2,2 kW
Resistencia estator (R_s)	2,00 Ω	2,00 Ω
Resistencia rotor (R_r)	2,65 Ω	3,28 Ω
Inductancia estator (L_s)	345,27 mH	348,98 mH
Inductancia rotor (L_r)	345,27 mH	348,98 mH
Inductancia mutua (L_m)	331,37 mH	334,16 mH
Momento de inercia (J)	0,012 kg·m ²	0,012 kg·m ²
Barras de rotor (N_{barras})	28	28
Pares de polos (p)	2	2

4.3. Inducción experimental de la falla de Barra Rota

Para la validación experimental de los algoritmos de diagnóstico, se emuló la falla de barra rota (BRB) mediante la interrupción física de la continuidad eléctrica en la jaula de ardilla. Siguiendo la metodología establecida en la literatura [1], se procedió a perforar una de las barras del rotor en la zona adyacente al anillo de cortocircuito.

Es importante destacar que este procedimiento destructivo se aplicó exclusivamente a la Máquina 220201077. La segunda unidad disponible (Máquina 220201091) se mantuvo intacta en su estado original de fábrica, utilizándose como referencia de control (patrón de máquina sana) y para validar que las desviaciones observadas fueran efectivamente producto de la falla inducida y no de diferencias constructivas.

4.3.1. Procedimiento de mecanizado

El proceso de inducción de falla en el rotor de la Máquina 220201077 fue el siguiente:

1. **Intento preliminar:** Inicialmente, se realizó una perforación con una broca de 4 mm de diámetro y 5 mm de profundidad. Sin embargo, las pruebas posteriores no evidenciaron asimetrías significativas en las corrientes, indicando que la sección transversal de la barra no había sido interrumpida en su totalidad, manteniendo aún conducción eléctrica.
2. **Falla consolidada** ($N_{BRB} = 1$): Se profundizó la perforación utilizando una broca de 7 mm de diámetro hasta alcanzar una profundidad de 20 mm. Esta intervención logró seccionar completamente la barra, lo cual fue corroborado experimentalmente al observar las oscilaciones características en la corriente de eje directo (i_{sd}) y el desbalance dinámico de la máquina.
3. **Falla severa** ($N_{BRB} = 2$): Para el escenario de dos barras rotas, se replicó el procedimiento de perforación profunda en la barra inmediatamente adyacente a la primera.

4.3.2. Características geométricas y estado del rotor

Las dimensiones físicas del rotor (sin tener en cuenta el eje) corresponden a una longitud axial de 13,52 cm y un diámetro de 10,08 cm.

La Figura 4.1 presenta el estado original del rotor antes de la intervención. Por su parte, la Figura 4.2 muestra el detalle de la perforación realizada para el caso de una barra rota. Cabe mencionar que se observan marcas superficiales en dos barras adyacentes a la falla; estas son producto del proceso de mecanizado y, dada su profundidad despreciable, no afectan la continuidad eléctrica ni el comportamiento magnético de dichas barras sanas.



Figura 4.1: Vista del rotor en estado sano antes de la intervención.



Figura 4.2: Detalle de la perforación realizada en la Máquina 220201077 para emular la ruptura de barra.

4.4. Inducción experimental de la Oscilación de Carga (LO)

Para emular las condiciones de oscilación de carga de manera controlada y reproducible, se implementó un sistema de carga dinámica utilizando una máquina de corriente continua (DC) acoplada mecánicamente al eje de la máquina de inducción bajo prueba.

La máquina de corriente continua actúa como carga activa y es gobernada por un convertidor industrial configurado en modo de control de torque (corriente). Este controlador regula la corriente de armadura para seguir una referencia externa, mientras mantiene la corriente de campo constante en su valor nominal, asegurando una relación lineal entre la señal de consigna y el torque aplicado.

4.4.1. Generación de la señal de consigna

La señal de referencia de torque, compuesta por la superposición de una componente continua (punto de operación) y una componente alterna (perturbación oscilatoria), fue generada mediante el terminal *Gen Out* del osciloscopio Keysight DSOX1204G. Este equi-

po permite la inyección precisa de la señal compuesta:

$$v_{ref}(t) = V_{DC} + A_{LO} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{LO} \cdot t) \quad (4.4)$$

Para correlacionar los niveles de tensión de esta señal con el torque físico aplicado en el eje, se realizó un procedimiento de calibración estática utilizando una balanza mecánica acoplada a un brazo de palanca, a su vez acoplado a la máquina de corriente continua.

4.4.2. Definición de puntos de operación

El plan experimental contempla un barrido exhaustivo de condiciones para evaluar la sensibilidad del diagnóstico. Los escenarios se definieron en función de tres variables: el nivel de carga base (T_{load}), la amplitud de la oscilación (A_{LO}) y la frecuencia de la oscilación (f_{LO}), referida a la frecuencia de deslizamiento nominal ($f_{s,n}$).

La Tabla 4.2 detalla la equivalencia obtenida experimentalmente entre los porcentajes definidos y los parámetros de tensión configurados en el generador de señales.

Tabla 4.2: Matriz de calibración experimental: Relación entre porcentajes de carga/oscilación y señales de control inyectadas.

Carga Base (T_{load})		Frecuencia LO (f_{LO})		Amplitud LO (A_{LO})		
% de T_n	Señal DC [V]	% de $f_{s,n}$	Frecuencia [Hz]	% de T_n	Amp [mV]	V_{pp} [mV]
100 %	2,9	40 %	1,3	2 %	60	120
66.7 %	1,9	80 %	2,6	4 %	120	240
33.3 %	1,0	100 %	3,3	5 %	150	300
-	-	120 %	4,0	6 %	170	340
-	-	160 %	5,3	8 %	230	460
-	-	200 %	6,6	10 %	290	580

A partir de estos parámetros, se estructuró un set de pruebas compuesto por:

- **108 casos con oscilación:** Combinación de 3 niveles de carga \times 6 amplitudes \times 6 frecuencias.
- **3 casos base:** Mediciones en los 3 niveles de carga sin oscilación inyectada ($A_{LO} = 0$), para establecer la referencia sin LO.

En total, se obtuvieron 111 puntos de operación distintos, generando una base de datos para la validación de los indicadores de diagnóstico.

4.5. Configuración del banco de ensayos experimental

Para la validación empírica de los métodos de diagnóstico propuestos, se implementó un banco de pruebas compuesto por un conjunto motor-generador, instrumentación de medida y un sistema de adquisición de datos. La disposición física de los equipos y el diagrama de conexiones se presentan en las Figuras 4.3 y 4.4.

El equipamiento utilizado se detalla a continuación:

1. **Máquinas Bajo Prueba (MUT):** Corresponden a los motores de inducción *Marelli Motori* (códigos 220201077 y 220201091). Una de ellas se mantiene sana como referencia, mientras que la otra es sometida a la falla de barra rota. Ambas máquinas están instrumentadas para la medición de corrientes de estator, variables base para la posterior estimación de flujo y cálculo de las componentes i_{sd} e i_{sq} .
2. **Emulador de Carga (Máquina DC):** Máquina de corriente continua acoplada mecánicamente al eje de la máquina de inducción. Esta actúa como carga dinámica, permitiendo imponer perfiles de torque constante o variantes en el tiempo (Oscilación de Carga - LO) controlados por corriente de armadura.
3. **Sistema de Adquisición de Datos (DAQ):** Se utilizó un osciloscopio *Keysight DSOX1204G* de cuatro canales como unidad central de adquisición. Este equipo permite capturar las señales analógicas con alta tasa de muestreo y exportar los oscilogramas en formato binario raw (.bin) a una unidad de almacenamiento externa (USB) para su post-procesamiento en MATLAB.
4. **Transductores de Tensión:** Se emplearon dos puntas diferenciales de alta tensión para registrar las tensiones de línea-línea (v_{ab} y v_{bc}), necesarias para la reconstrucción de las tensiones de fase y la orientación del flujo.
5. **Transductores de Corriente:** La medición de las corrientes de fase se realizó mediante dos pinzas de efecto Hall con ancho de banda adecuado para capturar la dinámica del convertidor y las componentes armónicas de la falla. Se midieron las fases a y b . Dado que la máquina no posee conexión a neutro, la suma instantánea de las corrientes de estator debe satisfacer la Ley de Corrientes de Kirchhoff, es decir, $i_a + i_b + i_c = 0$. Bajo esta condición, la tercera corriente se obtiene como $i_c = -(i_a + i_b)$.
6. **Sistema de Medición de Torque:** Para corroborar el punto de operación mecánico, se implementó un sistema de medición de torque estático compuesto por un brazo de palanca de longitud $L = 0,5$ [m] solidario al estator de la máquina de DC (montaje oscilante) y una celda de carga analógica (balanza). El torque se determina mediante la relación $T = F \cdot L$.

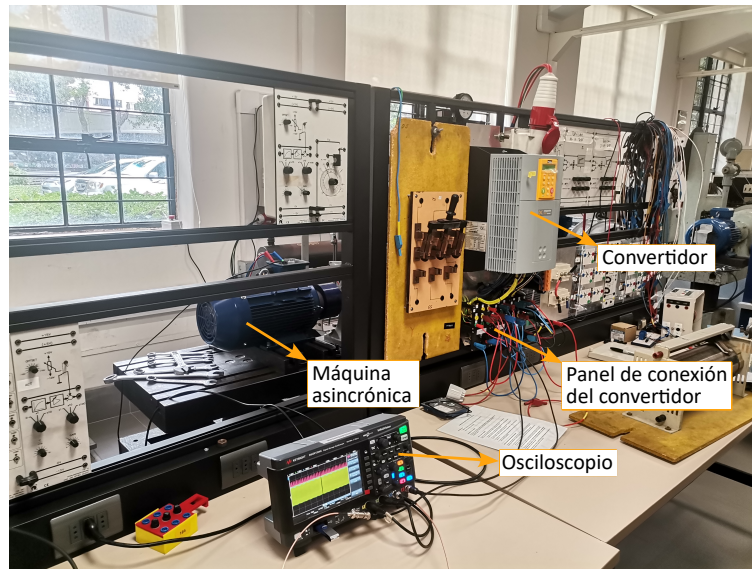


Figura 4.3: Vista frontal del banco de ensayos: convertidor, máquina asincrónica y osciloscopio.

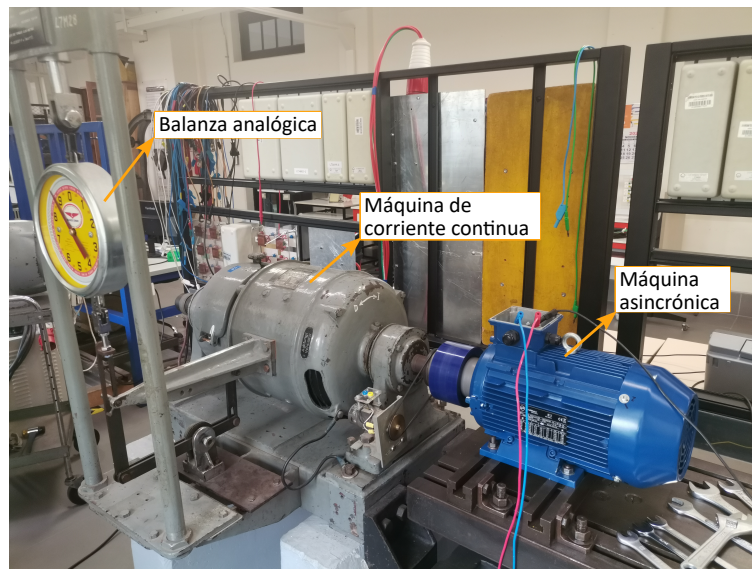


Figura 4.4: Vista trasera del banco de ensayos: acople mecánico, máquina DC y sistema de medición de torque.

4.6. Estimador de flujo experimental

La estimación del enlace de flujo de rotor se abordó mediante dos estrategias distintas, evaluando su desempeño experimentalmente.

4.6.1. Modelo de corriente

Inicialmente, se implementó el modelo de corriente en coordenadas fijas al estator. Este método requiere tres variables de entrada: las corrientes de fase (i_a, i_b) y la velocidad mecánica del rotor. La velocidad fue obtenida mediante la señal analógica entregada por el convertidor conectado a la máquina de corriente continua (máquina de carga).

Sin embargo, experimentalmente se observó que la señal de velocidad presentaba un nivel de ruido excesivo. Esto degradó significativamente la calidad de la estimación del enlace de flujo de rotor, resultando en valores que no eran consistentes con la literatura ni con las simulaciones previas. Debido a estas limitaciones prácticas, se optó por descartar este método y utilizar el modelo de tensión.

4.6.2. Modelo de tensión

El modelo de tensión presenta la ventaja de no requerir la medición de velocidad mecánica, eliminando la dependencia de sensores ruidosos o costosos. Este método estima el enlace de flujo de rotor a partir de la integración de la fuerza contraelectromotriz, para lo cual es necesario reconstruir los fasores espaciales de tensión y corriente de estator definidos como:

$$\mathbf{i}_s = \frac{2}{3}(i_a + \mathbf{a}i_b + \mathbf{a}^2i_c) \quad (4.5)$$

$$\mathbf{v}_s = \frac{2}{3}(v_a + \mathbf{a}v_b + \mathbf{a}^2v_c) \quad (4.6)$$

Donde $\mathbf{a} = e^{j2\pi/3}$. Dado que la máquina no posee conexión a neutro ($i_a + i_b + i_c = 0$), la obtención del fasor de corriente \mathbf{i}_s es directa utilizando dos sensores de corriente. Sin embargo, la reconstrucción del fasor de tensión \mathbf{v}_s requiere un tratamiento algebraico adicional al medir tensiones de línea con solo dos canales del osciloscopio (v_{ab} y v_{bc}).

Considerando que la suma de las tensiones de línea es nula ($v_{ab} + v_{bc} + v_{ca} = 0$), se determina la tercera tensión como:

$$v_{ca} = -(v_{ab} + v_{bc}) \quad (4.7)$$

El fasor espacial de tensión de línea \mathbf{v}_{sl} se relaciona con las tensiones de fase mediante:

$$\mathbf{v}_{sl} = \frac{2}{3}(v_{ab} + \mathbf{a}v_{bc} + \mathbf{a}^2v_{ca}) = \mathbf{v}_s(\sqrt{3}\angle 30^\circ) \quad (4.8)$$

De esta relación se deduce que el fasor de tensión de fase \mathbf{v}_s puede obtenerse a partir del fasor de línea rotado y escalado:

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{v}_{sl} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \right) \quad (4.9)$$

Sustituyendo las tensiones medidas en la definición de \mathbf{v}_{sl} y simplificando algebraicamente, se llega a una expresión compacta para el fasor de tensión de línea en función de solo v_{ab} y v_{bc} :

$$\mathbf{v}_{sl} = (\sqrt{3}\angle 30^\circ) \frac{2}{3}(v_{ab} - \mathbf{a}^2v_{bc}) \quad (4.10)$$

Finalmente, utilizando la relación (4.9), se obtiene la ecuación implementada experimentalmente para reconstruir el fasor de tensión de estator:

$$\mathbf{v}_s = \frac{2}{3}(v_{ab} - \mathbf{a}^2 v_{bc}) \quad (4.11)$$

Esta expresión permite calcular \mathbf{v}_s de manera precisa empleando únicamente dos canales de medición de tensión.

4.6.2.a. Implementación del integrador

El principio fundamental del modelo de tensión es la ley de Faraday, expresada en la estimación del enlace de flujo de estator ψ_s como:

$$\psi_s = \int (\mathbf{v}_s - R_s \mathbf{i}_s) dt \quad (4.12)$$

Que usando el operador $1/p$ se puede escribir de la siguiente forma:

$$\psi_s = \frac{\mathbf{v}_s - R_s \mathbf{i}_s}{p} \quad (4.13)$$

Aunque teóricamente correcto, el integrador ideal es inestable en la práctica. La presencia de componentes de corriente continua (DC) en las mediciones —ya sea por *offset* de los sensores o ruido— provoca que la salida del integrador derive (*drift*) y crezca hasta la saturación.

Para mitigar este problema, se reemplazó el integrador puro por un pseudo-integrador (o integrador con fugas), que actúa como un filtro pasa-bajos de primer orden con una frecuencia de corte muy baja:

$$\psi_s = \frac{\mathbf{v}_s - R_s \mathbf{i}_s}{p + \omega_c} \quad (4.14)$$

Donde $\omega_c = 1/\tau_f$. Esta modificación atenúa la ganancia en DC, evitando la saturación. Para frecuencias operacionales ($\omega \gg \omega_c$), el sistema se aproxima al comportamiento de un integrador ideal, presentando un desfase cercano a -90° y una ganancia proporcional a $1/\omega$. En este rango, el error de fase y magnitud respecto al integrador ideal resulta despreciable.

Para la implementación experimental se seleccionó una constante de tiempo $\tau_f = 400 [ms]$. Esto implica que el transitorio del filtro se extingue aproximadamente a los 2 segundos ($5\tau_f$), asegurando una estimación en estado estacionario a partir de ese instante. La frecuencia de corte resultante es $\omega_c = 2,5 [rad/s]$ ($0,4 [Hz]$), lo cual es suficientemente bajo para no afectar la integración de las frecuencias fundamentales de la máquina, que operan típicamente entre $1 [Hz]$ y $50 [Hz]$.

4.6.2.b. Cálculo del enlace de flujo de rotor y orientación

Una vez estimado el enlace de flujo de estator ψ_s , es necesario determinar el enlace de flujo de rotor ψ_r para realizar la orientación de campo necesaria para el diagnóstico. Utilizando

las ecuaciones del modelo dinámico de la máquina (Capítulo 2), la relación fasorial entre ambos enlaces de flujo está dada por:

$$\psi_r = \frac{L_r}{L_m} (\psi_s - \sigma L_s i_s) \quad (4.15)$$

Donde $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ es el coeficiente de dispersión total.

Finalmente, el ángulo de orientación de campo θ_{ψ_r} (posición del enlace de flujo de rotor) se obtiene directamente a partir de las componentes ortogonales del enlace flujo de rotor estimado ($\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$):

$$\theta_{\psi_r} = \arctan \left(\frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}} \right) \quad (4.16)$$

Este ángulo θ_{ψ_r} es el que se utiliza posteriormente en la Transformada de Park para proyectar las corrientes medidas del marco estacionario ($\alpha\beta$) al marco sincrónico (dq), obteniendo así las componentes i_{sd} e i_{sq} que alimentan los indicadores de diagnóstico Δi_d y Δi_q descritos en el Capítulo 3.

4.7. Esquema del sistema experimental sin control

La Figura 4.5 presenta el diagrama de bloques representativo del montaje físico utilizado en el banco de pruebas del laboratorio, operando bajo un régimen de alimentación directa.

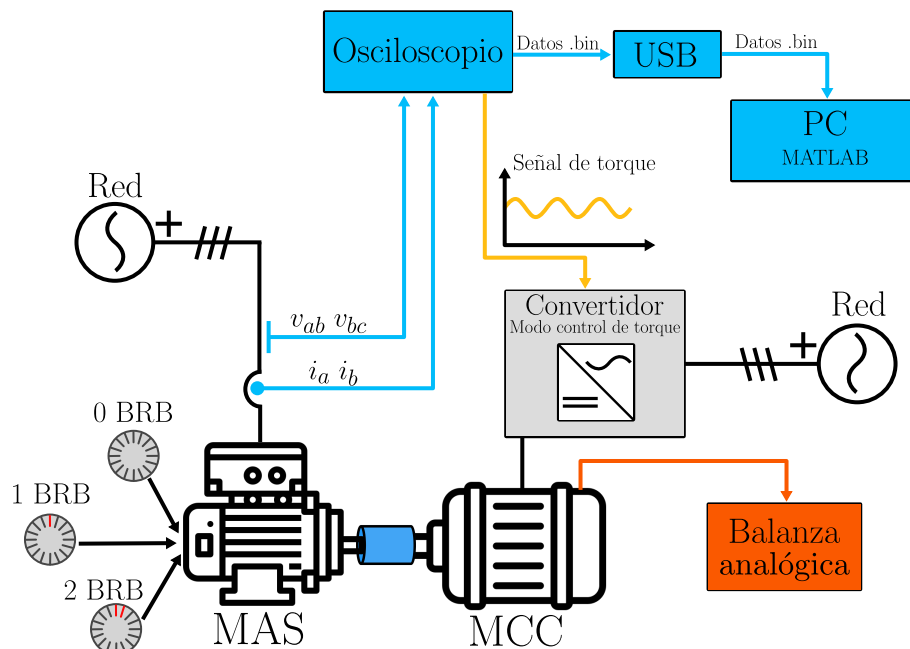


Figura 4.5: Esquema general del banco de pruebas experimental y arquitectura de adquisición de datos.

A diferencia de los entornos de simulación, este diagrama detalla la topología de *hardware* real utilizada para la validación empírica. Por el lado eléctrico, la máquina asincrónica

(MAS) bajo prueba es alimentada directamente desde la red trifásica. Para evaluar las condiciones de asimetría, el rotor de esta máquina fue intervenido físicamente, permitiendo ensayar los escenarios de máquina sana (0 BRB), falla incipiente (1 BRB) y falla severa (2 BRB).

Por el lado mecánico, el eje de la MAS se encuentra acoplado a una máquina de corriente continua (MCC), que actúa como carga activa programable. Esta MCC es gobernada por un convertidor industrial configurado en modo de control de torque, el cual recibe la señal de referencia para imponer tanto el nivel de exigencia base como las oscilaciones mecánicas de baja frecuencia (LO). El torque físico resultante en el eje es monitoreado de forma estacionaria mediante una balanza análoga.

El proceso de medición y captura de señales es realizado por un osciloscopio digital, el cual registra las corrientes de estator de fase (i_a, i_b) y las tensiones de línea (v_{ab}, v_{bc}). Las formas de onda capturadas son exportadas mediante dispositivos USB en formato binario (.bin) hacia un computador personal (PC). Es en esta plataforma donde, utilizando el *software* MATLAB, se ejecuta el procesamiento *offline* de los datos. El *script* de MATLAB implementa el estimador de flujo, que calcula el ángulo de orientación del campo magnético y proyecta las corrientes al marco sincrónico (i_{sd} e i_{sq}), para ejecutar la lógica de diagnóstico.

Es de suma importancia metodológica aclarar una limitación material surgida durante la ejecución de esta campaña, la cual fundamenta la exclusión de los resultados de 1 BRB en el análisis final. Originalmente, la totalidad de los ensayos (0, 1 y 2 BRB) fue capturada y procesada utilizando un estimador de flujo basado en el modelo de corriente de la máquina. Sin embargo, en la fase de análisis de datos se descubrió que el severo ruido de alta frecuencia inyectado por la conmutación del inversor corrompía las señales a tal punto que el cálculo del ángulo de orientación resultaba inestable. Esta pérdida de sincronía hacía los datos del modelo de corriente completamente inutilizables para aislar la tenue firma de falla.

Para sortear este obstáculo, se replanteó el procesamiento *offline* implementando un estimador basado en el modelo de tensión, el cual, al no depender de la señal de velocidad, entregó proyecciones de i_{sd} e i_{sq} de alta fidelidad. No obstante, al momento de realizar este hallazgo y corregir el método matemático de estimación, el rotor de la segunda máquina ya había sido intervenido por segunda vez para los ensayos de asimetría severa.

Dada la irreversibilidad de la prueba destructiva y la limitación de contar con solo dos motores físicos, resultó materialmente imposible retroceder para recapturar los datos de 1 barra rota. Por consiguiente, la validación experimental de esta tesis se circunscribe al contraste empírico: la comparación directa entre la máquina intacta (0 BRB) y la máquina con falla severa (2 BRB).

Capítulo 5

Resultados y Análisis Comparativo

El objetivo de este capítulo es validar la robustez del método de diagnóstico propuesto mediante análisis de su capacidad de preservar separabilidad entre estados 0/1/2 BRB y presencia de oscilación de carga bajo variaciones de torque ($33.3\%-100\% T_n$), frecuencia de oscilación ($0.1\%-2\% f_{s,n}$) y amplitud ($0.1\%-2\% T_n$). Adicionalmente, se evalúa el impacto de la estrategia de control predictivo adaptativo FOC-PCC-BRB sobre algunas variables eléctricas del accionamiento (oscilaciones en i_d e i_q , THD y pérdidas de cobre del estator). Más que una simple exposición de resultados numéricos, el análisis se centra en la interpretación fenomenológica de cómo cada condición operativa modifica los indicadores de diagnóstico Δi_d y Δi_q .

La exposición se organiza en cuatro etapas. En primer lugar, se realiza un análisis comparativo en simulación entre la operación sin control (conexión directa a la red, DOL) y la operación bajo control vectorial por campo orientado con reguladores PI (FOC-PI), evaluando el efecto de BRB y LO sobre los indicadores de diagnóstico. Posteriormente, se presenta la validación experimental para la máquina de laboratorio en condición DOL, contrastando resultados simulados y mediciones reales. A continuación, se establecen las cotas óptimas de clasificación y se evalúa el desempeño global del método diagnóstico sobre ambos esquemas de operación. Finalmente, se presentan los resultados del control predictivo con modelo adaptativo (FOC-PCC-BRB), analizando su impacto sobre las oscilaciones de i_d e i_q y el desempeño global del accionamiento.

La comparación entre DOL y FOC-PI constituye una parte importante del análisis debido a que la acción del lazo de control modifica la dinámica eléctrica y mecánica del accionamiento al imponer el seguimiento de referencias de corriente y velocidad, alterando las firmas de corriente naturalmente generadas por las fallas. Bajo este contexto, el contraste entre ambos esquemas permite evaluar la capacidad del método propuesto para conservar su precisión incluso cuando las perturbaciones son parcialmente compensadas por el controlador. Adicionalmente, ambos esquemas se evalúan sobre las mismas máquinas y puntos de operación, de modo que las diferencias observadas en los indicadores pueden atribuirse principalmente a la acción del control.

5.1. Análisis comparativo de las máquinas simuladas bajo condiciones de barra rota en rotor y oscilación de carga

En esta sección se contrastan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones detalladas en la sección 3.1 para las máquinas 1, 2 y 3. Cabe señalar que el análisis de la máquina de laboratorio ha sido excluido de este apartado, ya que se reservará de manera exclusiva para la siguiente sección de este capítulo, donde se establecerá una comparación directa de validación entre sus resultados simulados y los obtenidos experimentalmente. Si bien la totalidad de los datos numéricos se encuentra tabulada en el Apéndice A, se ha optado por una representación gráfica integral para facilitar el análisis fenomenológico comparativo del sistema.

Con el objetivo de maximizar la claridad expositiva y permitir una evaluación visual inmediata del impacto del controlador, las figuras de cada subsección han sido estructuradas en un formato comparativo unificado. Cada figura presenta el desempeño de una máquina específica dividido en dos filas horizontales que comparten la misma escala en sus ejes: la fila superior expone el escenario de operación sin control (conexión directa a la red), mientras que la fila inferior ilustra su respectiva contraparte operando en lazo cerrado con control PI. Asimismo, con el propósito de aislar y comprender el efecto de la falla física, las columnas de cada figura desglosan los resultados según la severidad del daño en el rotor (0, 1 y 2 BRB, de izquierda a derecha, respectivamente).

5.1.1. Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q

Las Figuras 5.1 a 5.3 ilustran la relación entre el valor RMS de la componente i_q y el torque de carga aplicados al eje para las máquinas 1, 2 y 3, respectivamente. Siguiendo la metodología de exposición previamente definida, cada gráfica contrasta directamente el comportamiento ante la alimentación directa (fila superior) frente a la regulación del esquema con control PI (fila inferior).

Para la correcta interpretación visual de estos planos, las mediciones se despliegan mediante diagramas de dispersión, utilizando marcadores de relleno sólido para denotar los escenarios de carga constante (sin oscilación externa) y marcadores translúcidos para identificar aquellos puntos sometidos a oscilaciones mecánicas de carga. Adicionalmente, sobre la dispersión de datos se ha superpuesto una recta de regresión para evidenciar la tendencia lineal global del conjunto.

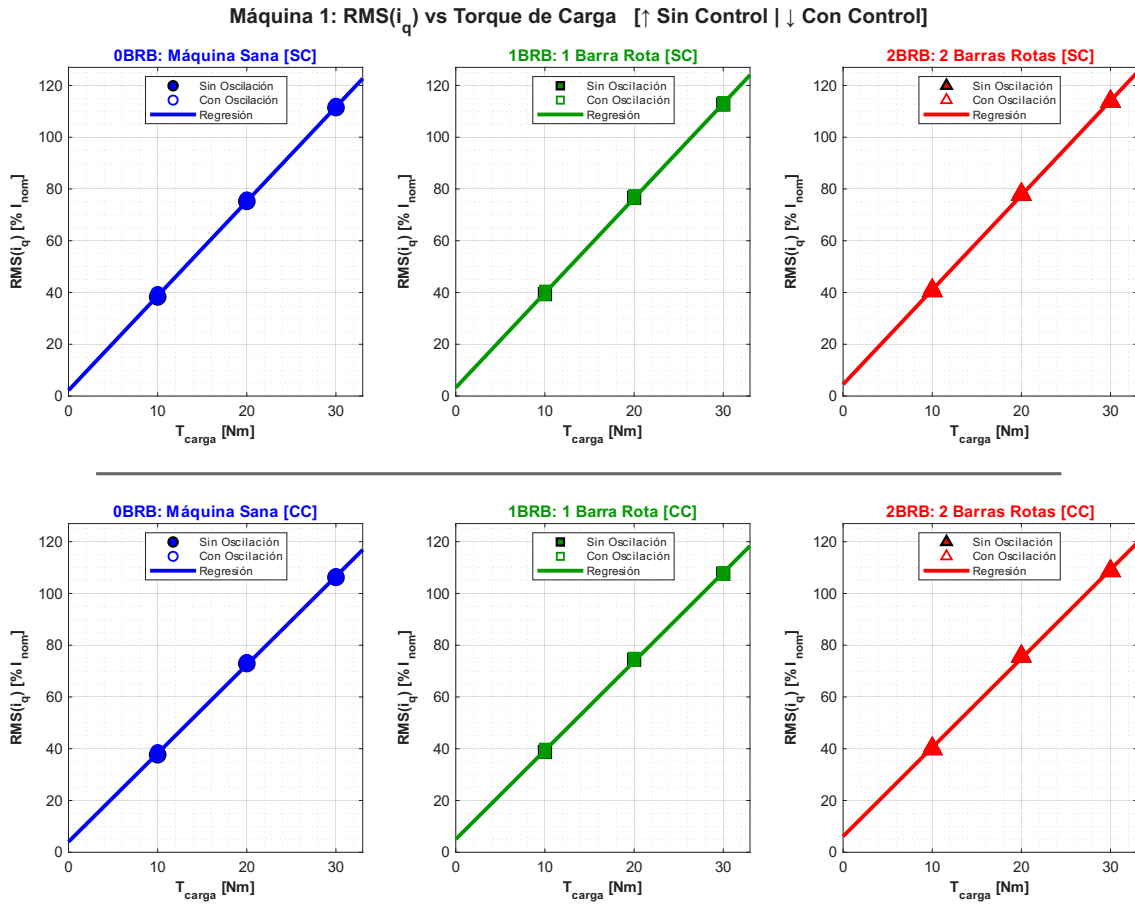


Figura 5.1: Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q para la máquina 1.

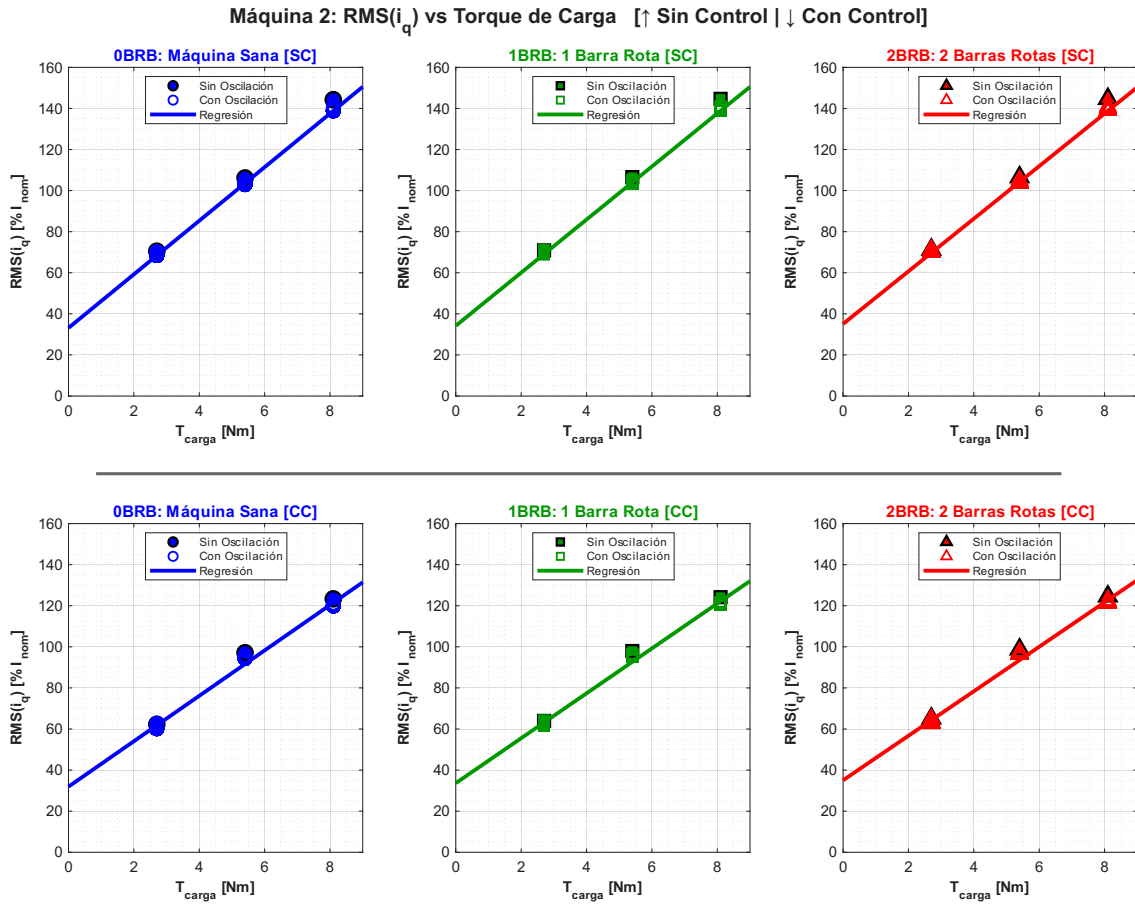


Figura 5.2: Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q para la máquina 2.

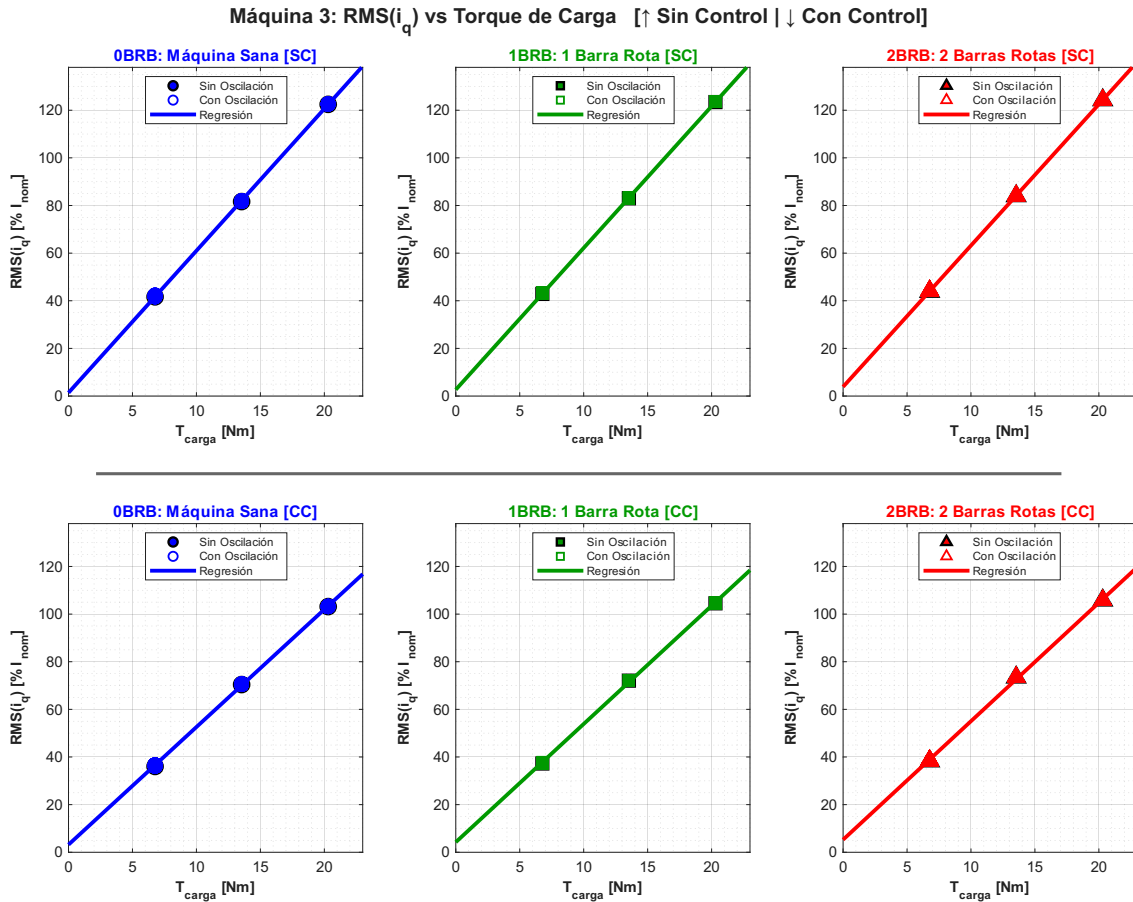


Figura 5.3: Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q para la máquina 3.

A partir de las gráficas correspondientes a los regímenes sin control (filas superiores), se observa una relación lineal y directamente proporcional entre el valor RMS de i_q y la magnitud del torque de carga aplicado. Los puntos de operación evaluados corresponden al 33,3%, 66,7% y 100% del torque nominal de cada máquina. Es importante notar que estos porcentajes mecánicos no se traducen en una relación uno a uno con el valor en por unidad (pu) de la corriente; por ejemplo, al operar con el 100% del torque nominal, el valor RMS de i_q fluctúa entre 1,1 y 1,4 pu (dependiendo de los parámetros específicos de cada motor), comportamiento que se mantiene inalterable frente a la severidad de la falla. Visualmente, se comprueba que la presencia de oscilaciones de carga introduce una ligera dispersión respecto a la recta de regresión principal, aunque no altera la tendencia macroscópica. Este fenómeno encuentra su justificación teórica en el modelo de la máquina: bajo el marco de orientación de campo, la ecuación de torque depende de los parámetros de la máquina, del flujo del rotor y de la corriente de estator en cuadratura. Suponiendo que las dos primeras variables se mantienen relativamente constantes, cualquier exigencia en el torque de carga requiere un aumento proporcional en i_q , lo que explica la clara linealidad evidenciada ante la conexión directa a la red.

Por otro lado, al contrastar estos resultados con las gráficas bajo el esquema de control PI (filas inferiores), se evidencia visualmente que la relación se vuelve mucho más estrecha y directa. A diferencia del caso sin control, al exigir el torque nominal, la acción del lazo de regulación acota los valores RMS de i_q en un rango mucho más preciso, ubicándolos de

forma consistente entre 1,05 y 1,2 pu. Una posible explicación física de este estrechamiento del rango es que, en operación DOL, el valor de i_q en régimen estacionario depende del deslizamiento, el cual a su vez es sensible a los parámetros eléctricos específicos de cada máquina (resistencia de rotor, inductancias). Al consolidar tres máquinas con parámetros distintos, esta dependencia paramétrica amplía el rango observable. Bajo FOC-PI, en cambio, la corriente en cuadratura es impuesta directamente por la referencia de torque del regulador, desacoplando la respuesta de i_q de las variaciones paramétricas individuales de cada motor.

En conjunto, las tres figuras evidencian que la relación entre i_q y el torque de carga se preserva de manera consistente entre las distintas máquinas analizadas. Esto respalda el uso del valor RMS de i_q como un indicador representativo del estado de carga mecánico y confirma su utilidad como variable de referencia dentro de la metodología de diagnóstico propuesta.

5.1.2. Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la asimetría de rotor

Las Figuras 5.4 a 5.6 ilustran la relación entre el valor RMS de la componente Δi_d y el número de barras rotas (BRB) para las máquinas 1, 2 y 3. Siguiendo el esquema de exposición unificado, cada gráfica contrasta directamente el comportamiento de la máquina ante la alimentación directa (fila superior) frente a la regulación del esquema con control PI (fila inferior).

Para interpretar adecuadamente estas figuras, cabe señalar que cada una se compone de tres columnas (subgráficos) diseñadas para abordar un análisis estadístico progresivo sobre ambas condiciones de operación: a la izquierda, un diagrama de caja (*boxplot*) que muestra la distribución global de los datos según la severidad de la falla; en el centro, un gráfico de líneas que traza la tendencia de los valores promedios en función del nivel de torque de carga mecánico aplicado; y a la derecha, un diagrama de dispersión que expone la totalidad de las mediciones, utilizando marcadores distintivos para aislar visualmente los escenarios de oscilación activa frente a los casos de carga constante.

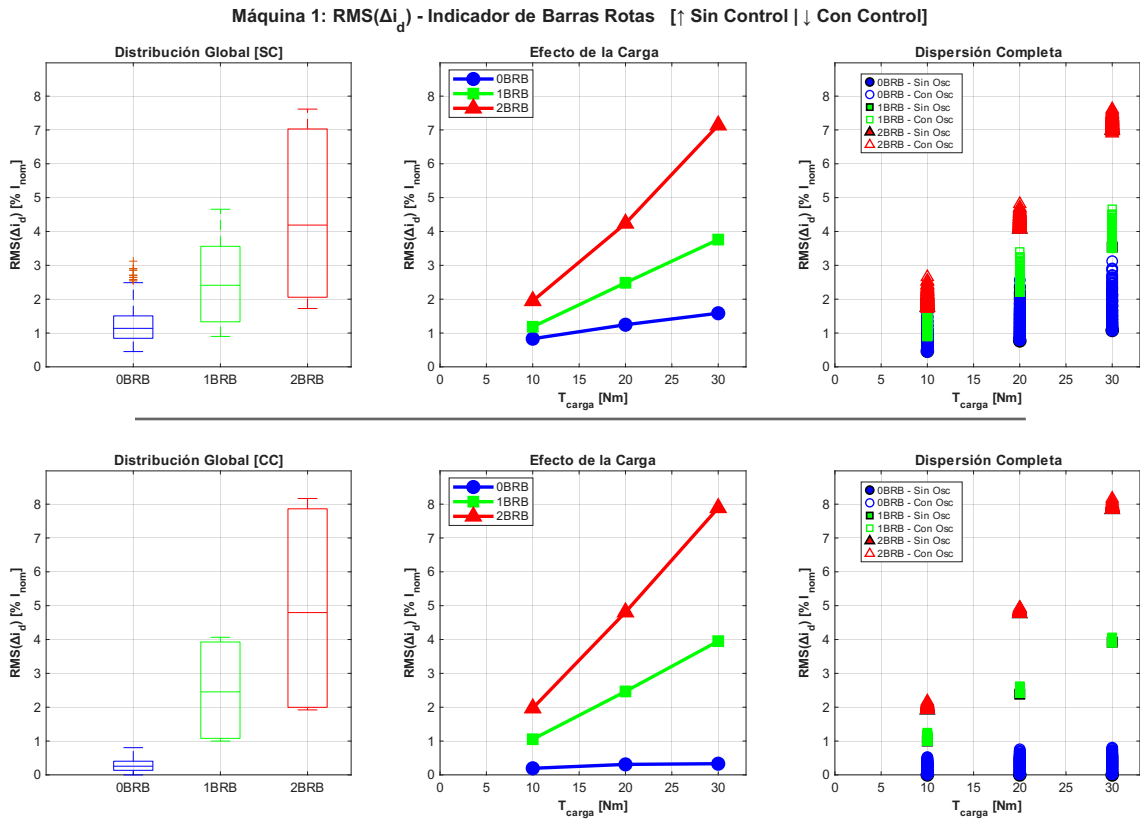


Figura 5.4: Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la asimetría de rotor para la máquina 1.

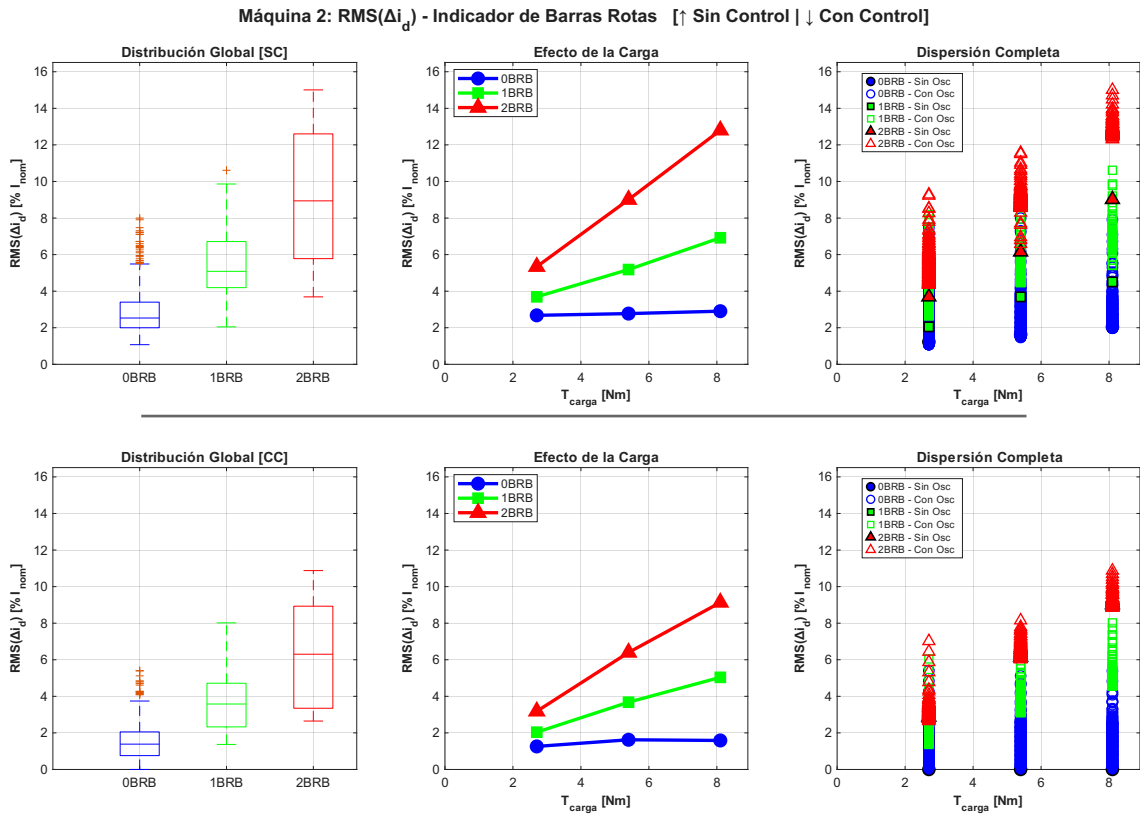


Figura 5.5: Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la asimetría de rotor para la máquina 2.

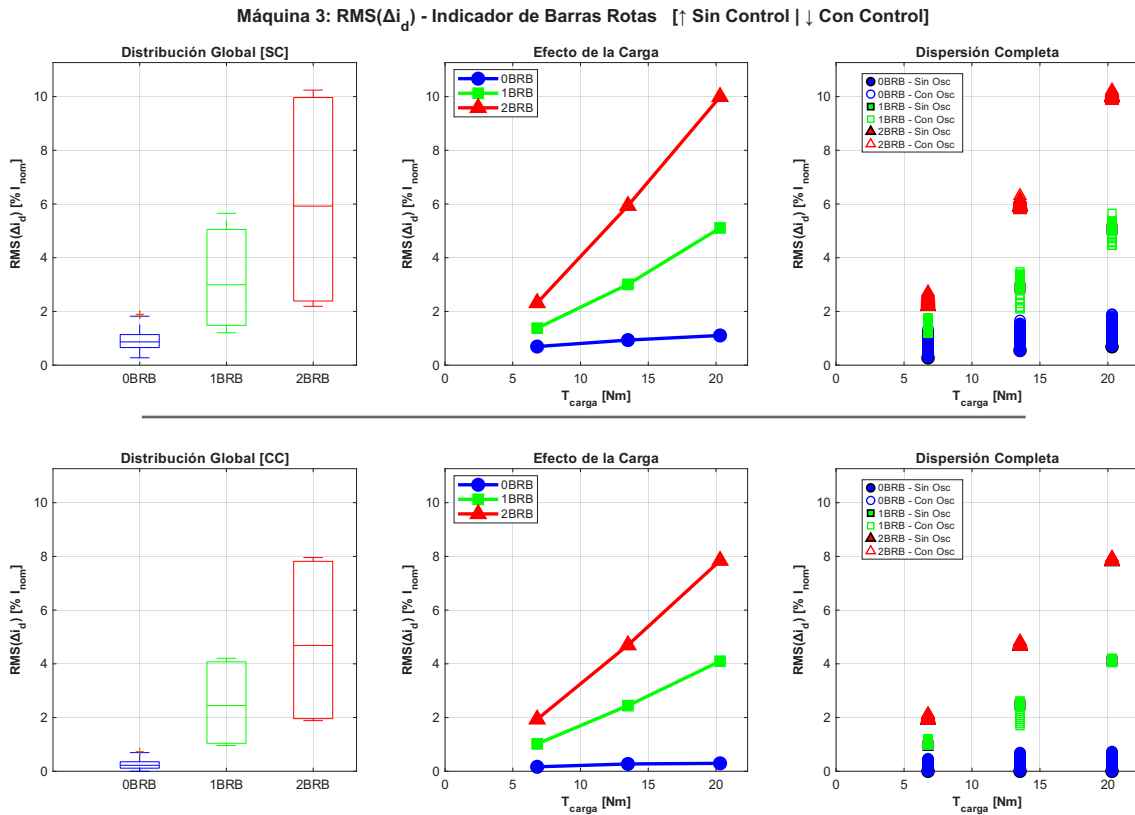


Figura 5.6: Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la asimetría de rotor para la máquina 3.

A partir de las gráficas correspondientes a los regímenes de conexión directa a la red (filas superiores), se observa una relación directa y ascendente entre el valor RMS de Δi_d y la cantidad de barras rotas. Un aspecto fundamental para destacar es que la firma de la falla se hace cada vez más notorio a medida que se incrementa el torque de carga: el indicador eleva su magnitud, tanto al aumentar la severidad del daño para una carga fija, como al aumentar la carga mecánica para una misma cantidad de barras rotas. Este comportamiento resulta sumamente provechoso, ya que amplía la distancia entre las mediciones y permite separar con claridad los estados operativos correspondientes a 0, 1 y 2 BRB en regímenes de alta exigencia. Electromagnéticamente, esto se fundamenta en que, al incrementar el torque, el deslizamiento del motor aumenta; en consecuencia, las corrientes que circulan por la jaula de ardilla son de mayor magnitud. Esto exacerba el desequilibrio magnético generado por la asimetría de rotor, haciendo que la firma de la falla se induzca con mayor severidad sobre la corriente del estator.

Por otro lado, al contrastar estos resultados con las gráficas bajo el esquema de control PI (filas inferiores), se observa de forma consistente que la acción del controlador reduce drásticamente la dispersión de los datos en los diagramas de caja y de dispersión. Esta compactación de las mediciones permite que la separación entre los escenarios de 0, 1 y 2 BRB sea nítida e identificable incluso a bajas cargas mecánicas, donde el deslizamiento es mínimo. Es razonable considerar que la dispersión observada en DOL tiene su origen en las variaciones libres del deslizamiento: ante fluctuaciones de carga o perturbaciones mecánicas, el deslizamiento oscila libremente, modulando la amplitud de las corrientes de

rotor y generando componentes de baja frecuencia que se proyectan parcialmente sobre el eje d a través del estimador de flujo. Bajo FOC-PI, el lazo de velocidad suprime estas variaciones de deslizamiento, eliminando esa fuente de contaminación cruzada sobre Δi_d y dejando como variación dominante únicamente la firma de la asimetría de rotor.

Esto sugiere que la detectabilidad de BRB mediante Δi_d no se degrada bajo control vectorial, sino que incluso puede mejorar, comportamiento consistente con que el FOC-PI atenúa las variaciones libres de deslizamiento sin eliminar la firma magnética asociada a la asimetría del rotor.

5.1.3. Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q

Las Figuras 5.7 a 5.9 ilustran la relación entre el valor RMS de la componente Δi_q y la amplitud de la oscilación de carga mecánica (T_{osc}) para las máquinas 1, 2 y 3. Siguiendo la estructura de exposición emparejada, cada gráfica contrasta directamente el comportamiento ante la alimentación directa (fila superior) frente a la regulación del esquema con control PI (fila inferior).

Para la correcta interpretación de estos gráficos, cabe destacar que los resultados de cada figura se desglosan en columnas de izquierda a derecha según la severidad de la asimetría de rotor (0, 1 y 2 BRB). Adicionalmente, cada diagrama de dispersión consolida la totalidad de los puntos obtenidos en el estudio paramétrico, incluyendo los tres niveles de carga mecánica media evaluados (33,3 %, 66,7 % y 100 % del torque nominal), junto con el barrido completo de amplitudes y frecuencias de oscilación de carga definidos en la subsección 3.1.3. De este modo, cada punto representado corresponde a una condición de operación única dentro del espacio de condiciones analizado.

Esta representación permite visualizar el comportamiento global del indicador frente a la perturbación mecánica en todo el rango operativo considerado, sin discriminar explícitamente entre condiciones individuales de carga u oscilación. Como tendencia general, los puntos asociados a menores niveles de carga tienden a ubicarse en la zona inferior del plano, mientras que aquellos correspondientes a mayores niveles presentan valores basales más elevados de RMS Δi_q . No obstante, este escalonamiento no siempre es claramente distinguible debido al solapamiento entre mediciones, particularmente en regímenes donde la dinámica de la oscilación domina la respuesta del sistema.

Un aspecto clave de estos diagramas de dispersión es la incorporación de una línea base de referencia: en el origen del eje de las abscisas ($T_{osc} = 0$) se han graficado mediante marcadores de diamante los escenarios operando a carga constante (sin oscilación externa). A partir de este piso base, se despliegan con marcadores circulares las mediciones correspondientes a los escenarios donde la oscilación de carga se encuentra activa.

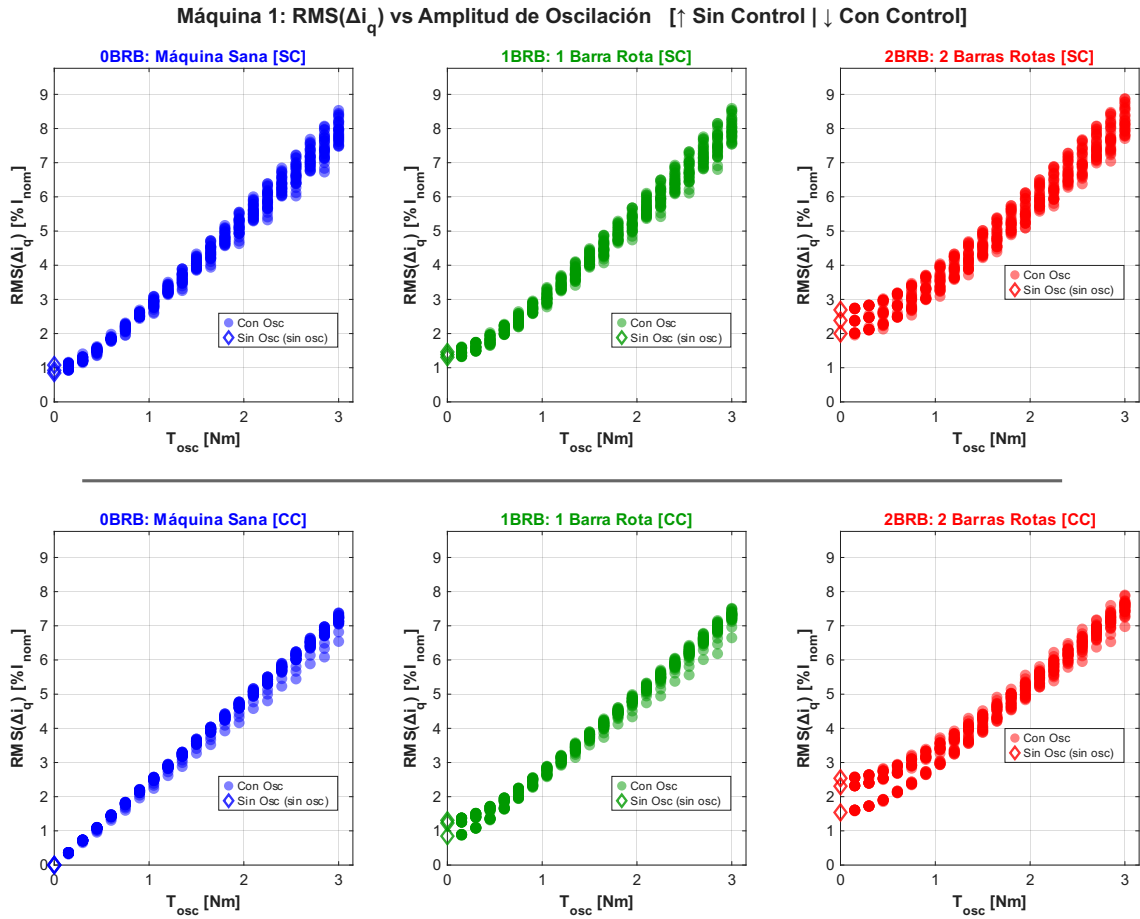


Figura 5.7: Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q para la máquina 1.

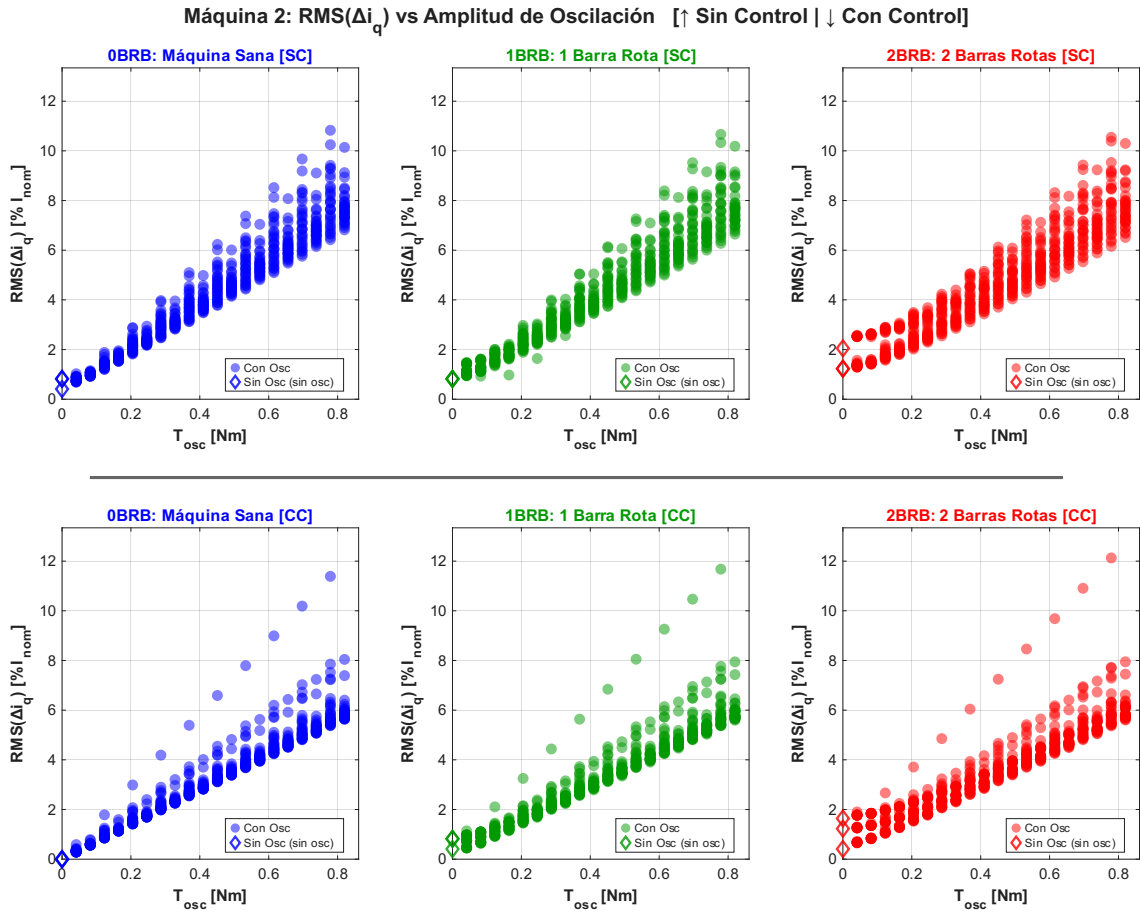


Figura 5.8: Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q para la máquina 2.

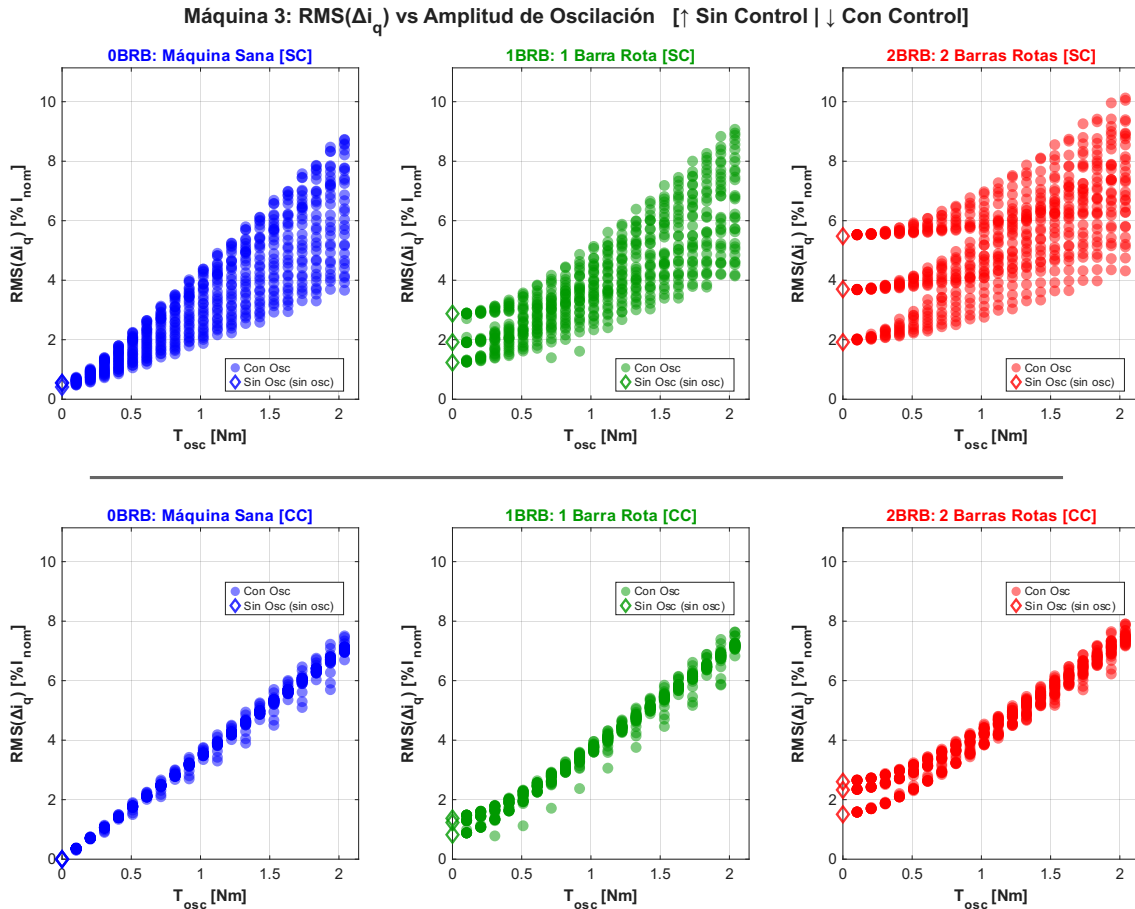


Figura 5.9: Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q para la máquina 3.

El análisis de las gráficas correspondientes a los regímenes sin control (filas superiores) revela una relación directamente proporcional entre la amplitud de la perturbación mecánica y el valor RMS de Δi_q : a mayor amplitud de oscilación, mayor es la magnitud de la fluctuación en la corriente. Un aspecto destacable es el efecto que introduce la severidad de la falla en esta tendencia. Se observa que el incremento en la cantidad de barras rotas eleva el umbral mínimo o “piso” de Δi_q (visible claramente en los marcadores ubicados en $T_{osc} = 0$), generando una pronunciada curvatura en la distribución de los datos para amplitudes bajas. Teóricamente, esto ocurre porque la asimetría del rotor produce un torque pulsante inherente, el cual induce una oscilación base en el eje en cuadratura incluso frente a perturbaciones mecánicas nulas o leves, dominando el comportamiento de la corriente en esa zona.

Adicionalmente, en conexión directa a la red, la dispersión de los datos experimenta un cambio notorio a lo largo del eje horizontal. Para amplitudes de oscilación bajas, las mediciones se encuentran densamente agrupadas. Sin embargo, a medida que la amplitud aumenta, los puntos comienzan a esparcirse significativamente formando un “abanico”. Esta mayor dispersión ocurre porque en las gráficas convergen simultáneamente los distintos niveles de carga base y las distintas frecuencias de oscilación evaluadas; la interacción descontrolada de estas variables sobre el deslizamiento amplifica el rango de respuestas posibles del motor.

Al contrastar estos resultados con los escenarios de control PI (filas inferiores), se evidencia que, si bien el comportamiento lineal primario se mantiene, la distribución de los datos cambia radicalmente. El extenso abanico generado a altas amplitudes de perturbación desaparece, condensando las mediciones en un rango de dispersión mucho más acotado y predecible. Desde la teoría de control, este fenómeno se explica por la rigidez que impone el lazo cerrado: para mantener la velocidad constante frente a una carga oscilante, el controlador comanda a la corriente en cuadratura a generar un torque electromagnético que sea un reflejo opuesto y exacto de la perturbación externa. Al eliminar las variaciones libres de velocidad y deslizamiento que ocurrían en conexión directa a la red, el controlador suprime la dispersión cruzada generada por las diferentes frecuencias operativas, forzando a que el valor RMS de Δi_q dependa de forma casi exclusiva de la amplitud de la oscilación exigida.

5.1.4. Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga

Las Figuras 5.10 a 5.12 ilustran la relación entre el valor RMS de la componente Δi_q y la frecuencia de la oscilación de carga (f_{LO}) para las máquinas 1, 2 y 3. Siguiendo la estructura de exposición emparejada, cada gráfica contrasta directamente el comportamiento ante la alimentación directa (fila superior) frente a la regulación del esquema con control PI (fila inferior).

Para una correcta interpretación de estos resultados, es necesario precisar que cada diagrama de dispersión consolida la totalidad de los puntos obtenidos en las simulaciones. En particular, se integran los datos correspondientes a los tres niveles de carga mecánica media evaluados (33,3%, 66,7% y 100% del torque nominal), junto con el conjunto completo de amplitudes de oscilación consideradas en la subsección 3.1.3. De este modo, cada punto representado corresponde a una condición de operación única, definida por una combinación específica de carga, amplitud y frecuencia de oscilación.

Al igual que en el análisis previo, los resultados se desglosan en columnas de izquierda a derecha según la severidad de la falla (0, 1 y 2 BRB). Asimismo, se incorpora una línea base de referencia: en el origen del eje de las abscisas ($f_{LO} = 0$) se han graficado mediante marcadores de diamante los escenarios operando a carga constante (sin oscilación externa). A partir de este piso base, se despliegan con marcadores circulares las mediciones correspondientes a los escenarios donde la oscilación de carga se encuentra activa.

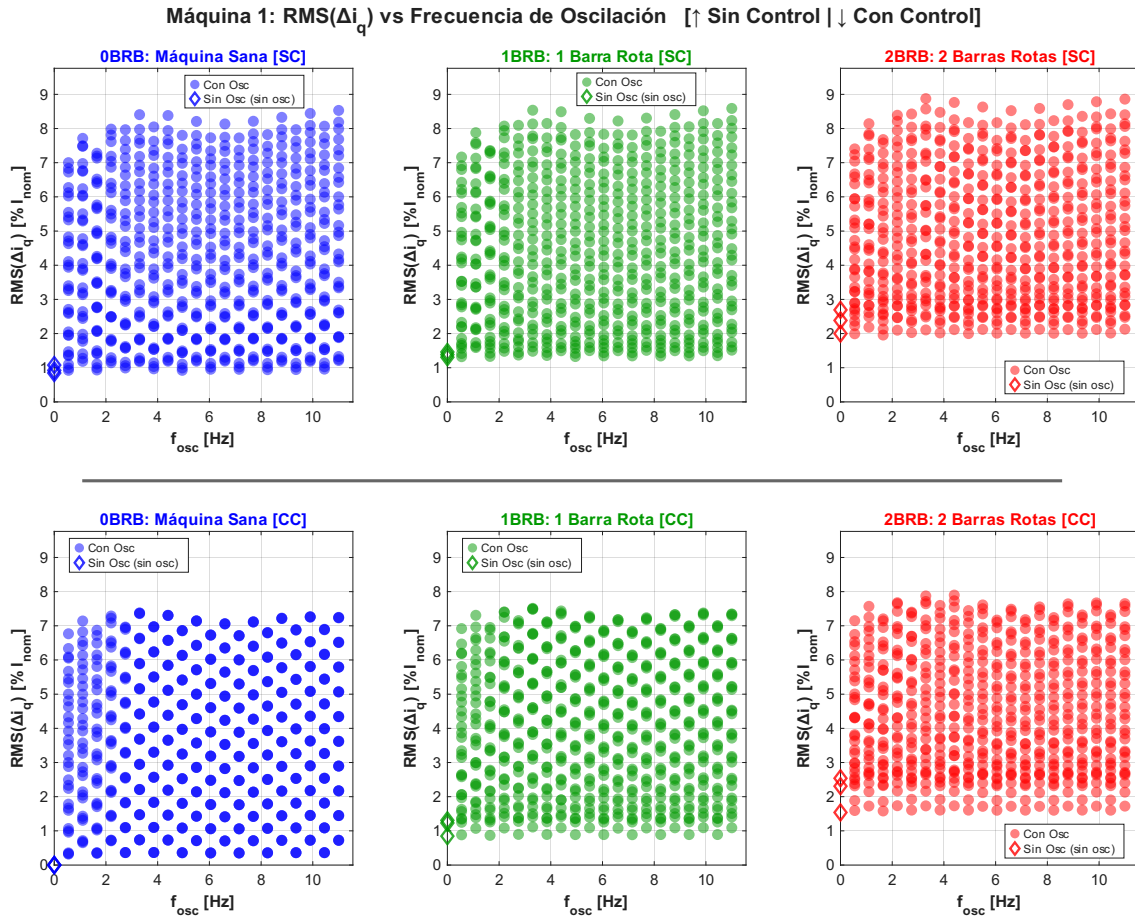


Figura 5.10: Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga para la máquina 1.

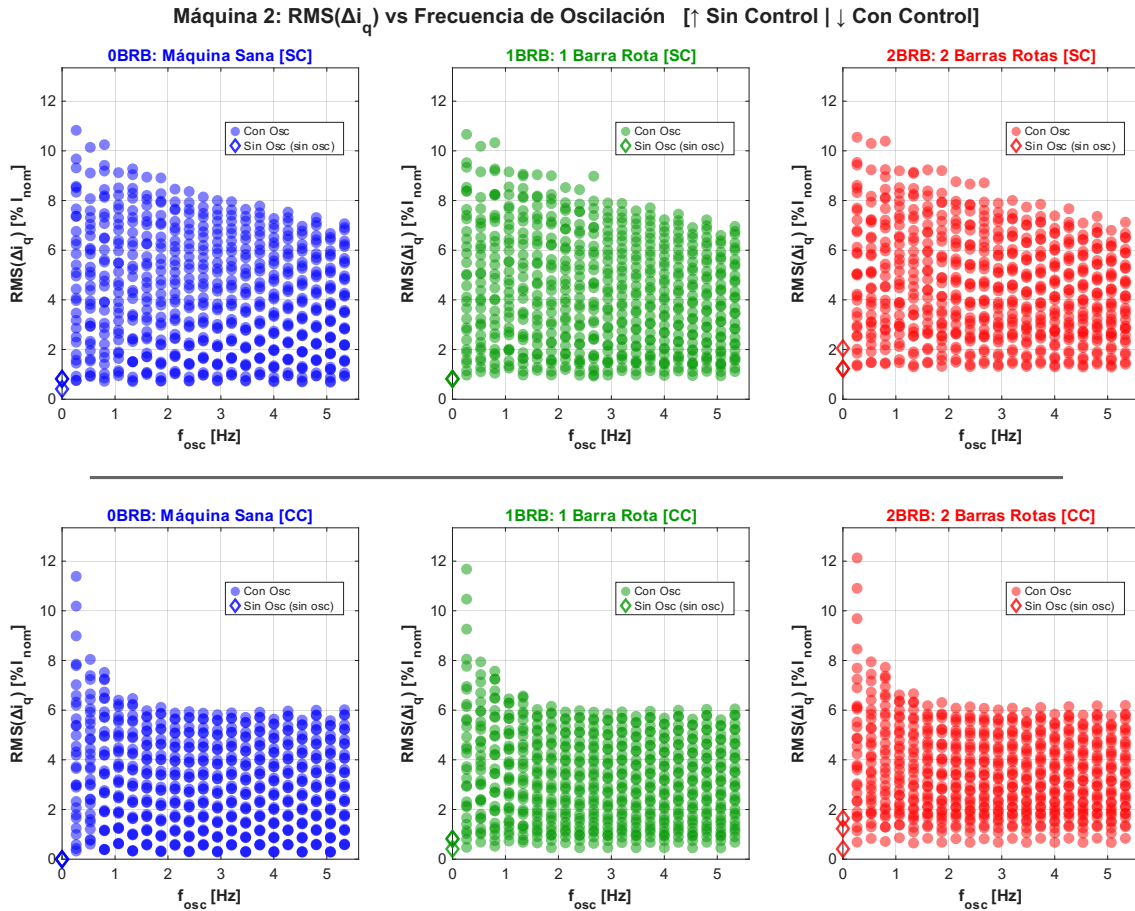


Figura 5.11: Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga para la máquina 2.

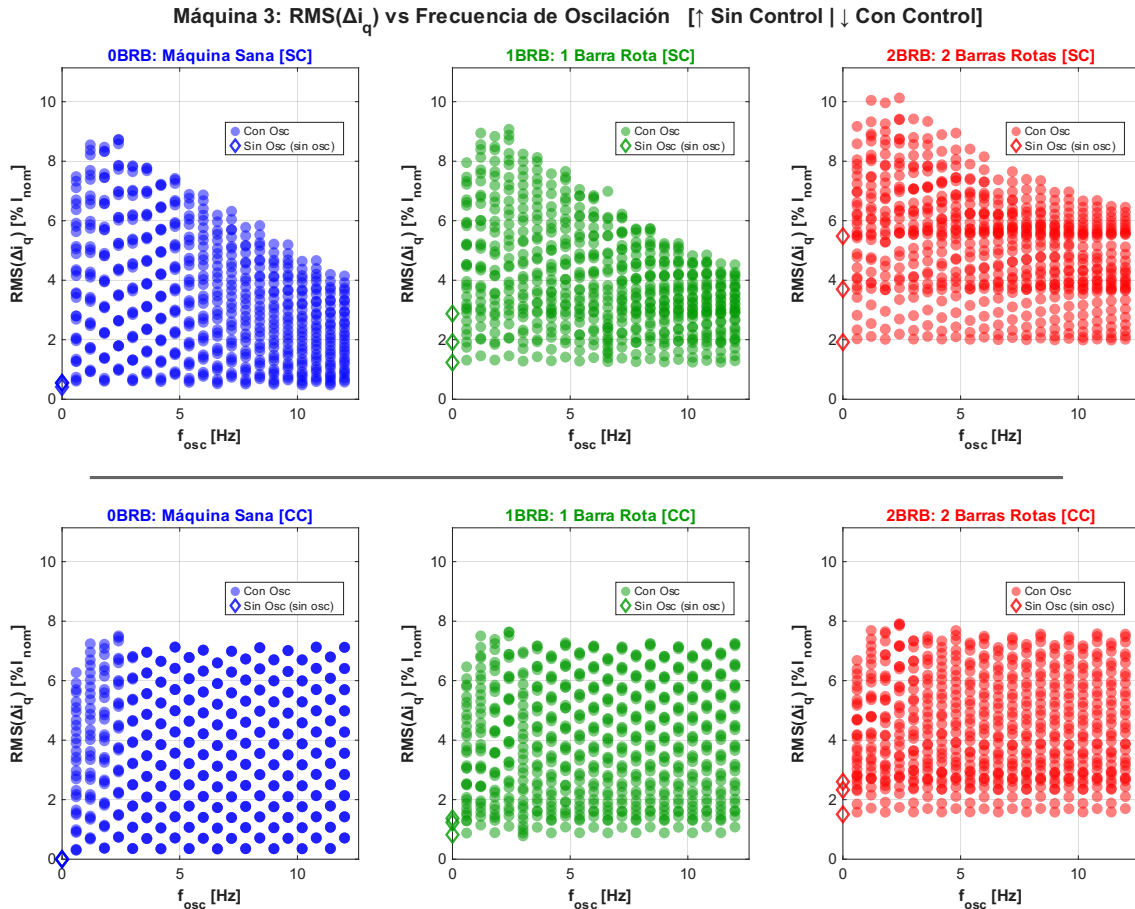


Figura 5.12: Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga para la máquina 3.

A partir de los diagramas de dispersión correspondientes a la operación sin control (filas superiores), se advierte que, a diferencia de la fuerte dependencia observada con la amplitud, no existe una correlación dominante entre la frecuencia de oscilación y el valor RMS de Δi_q . Sin embargo, un hallazgo de suma relevancia —especialmente notorio en las máquinas 2 y 3— es la formación de una envolvente superior decreciente a medida que aumenta la frecuencia de la perturbación (f_{LO}). Desde una perspectiva electromecánica, este comportamiento se explica por la inercia del rotor, la cual actúa de manera natural como un filtro mecánico pasabajos. Ante perturbaciones mecánicas de alta frecuencia, la masa rotatoria del sistema amortigua físicamente los cambios de velocidad; al existir una menor variación real en el deslizamiento del motor, la fluctuación inducida en la corriente i_q resulta correspondientemente menor.

De forma consistente con el análisis de amplitud, en estos resultados también se ratifica que el incremento en la severidad de la falla eleva progresivamente el umbral mínimo de los valores RMS de Δi_q (fenómeno claramente visible en los marcadores base ubicados en $f_{LO} = 0$). Este desplazamiento del límite inferior corrobora que el torque pulsante inherente a la asimetría del rotor impone una componente base de fluctuación en el eje en cuadratura, la cual domina la señal en la zona baja de la gráfica independientemente de la frecuencia a la que oscile la carga exterior.

Por otra parte, al evaluar el comportamiento bajo el esquema de control PI (filas inferiores), se observa que la dinámica frecuencial experimenta dos alteraciones drásticas. En primer lugar, la envolvente superior decreciente se torna sustancialmente más pronunciada: la acción del controlador, en sinergia con el filtro inercial del rotor, percibe un error de velocidad mínimo a altas frecuencias, forzando a que las respuestas de la corriente colapsen hacia un rango estrecho de forma anticipada. En segundo lugar, se evidencia una atenuación generalizada en los valores mínimos del indicador RMS de Δi_q respecto a la alimentación directa, producto de la eficiente supresión de las fluctuaciones de velocidad por parte del lazo cerrado. En consonancia con esta caída global de la señal, el “piso” o límite inferior de las mediciones también disminuye su magnitud; no obstante, conserva su comportamiento fundamental inherente a la falla, experimentando un incremento progresivo a medida que aumenta el número de BRB. Esto demuestra de manera concluyente que, si bien el controlador PI logra mitigar el impacto de las oscilaciones de carga, no es capaz de anular la asimetría física del rotor, la cual sigue imponiendo una oscilación base sobre la corriente en el eje en cuadratura, aunque con una intensidad atenuada.

5.1.5. Análisis de sensibilidad cruzada: Efecto de las oscilaciones de carga sobre el valor RMS de Δi_d

Las Figuras 5.13 a 5.15 exploran la relación “cruzada” empírica entre el valor RMS de la componente Δi_d y las oscilaciones de carga mecánica para las máquinas 1, 2 y 3. En la literatura sobre el control de la máquina de inducción, se supone teóricamente que el eje d (asociado al flujo magnetizante) y el eje q (asociado al torque electromagnético) se encuentran desacoplados. Para evaluar esta premisa frente a perturbaciones, las gráficas contrastan el comportamiento bajo alimentación directa (fila superior) frente a la regulación estricta del esquema con control PI (fila inferior).

Para una correcta interpretación visual, cada fila se divide en dos columnas (subgráficos): el de la izquierda presenta la dispersión de los valores en función de la amplitud de la oscilación (T_{osc}), mientras que el de la derecha detalla la respuesta frente a la frecuencia de dicha oscilación (f_{osc}). Al igual que en análisis previos, se ha incorporado una línea base de referencia en el origen de las abscisas ($T_{osc} = 0$ y $f_{osc} = 0$) graficando con marcadores de diamante los escenarios operando a carga constante, a partir de los cuales se despliegan con marcadores circulares las mediciones con oscilación activa.

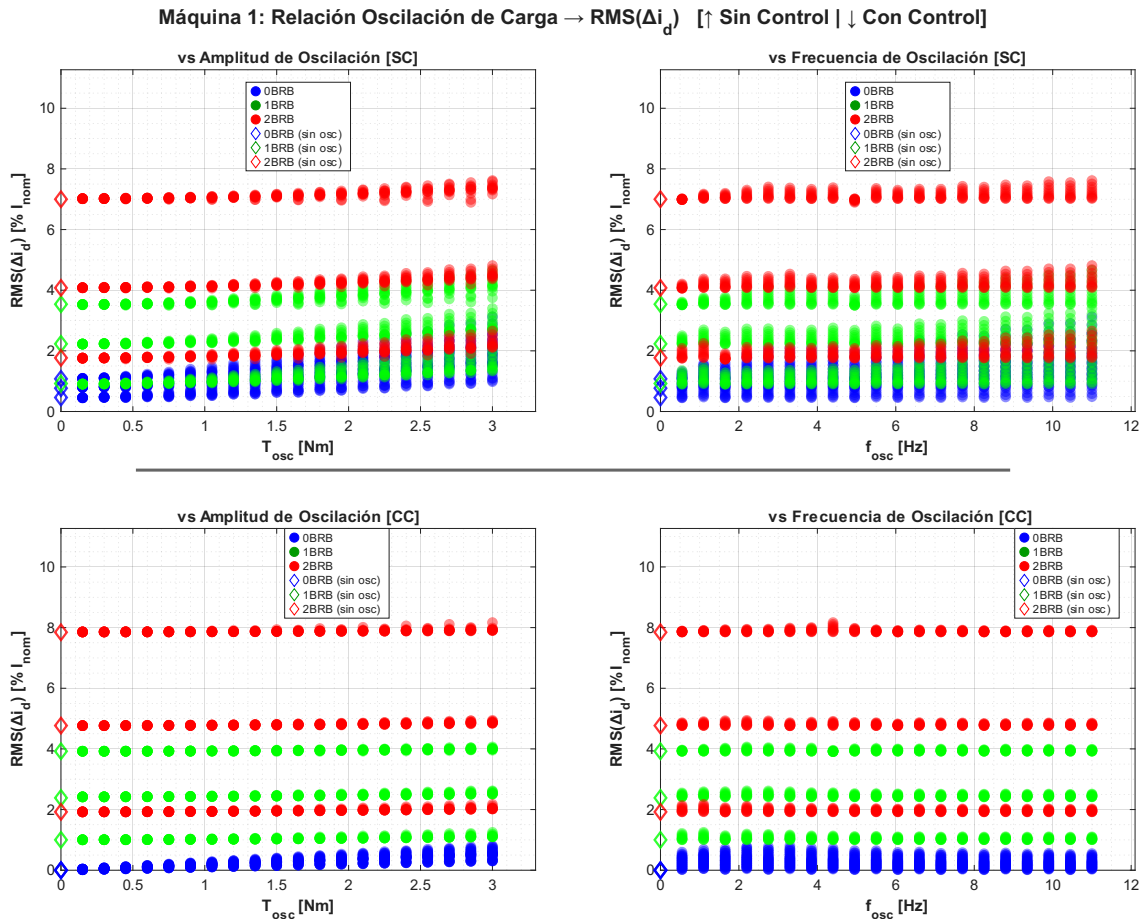


Figura 5.13: Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_d y las oscilaciones de carga para la máquina 1.

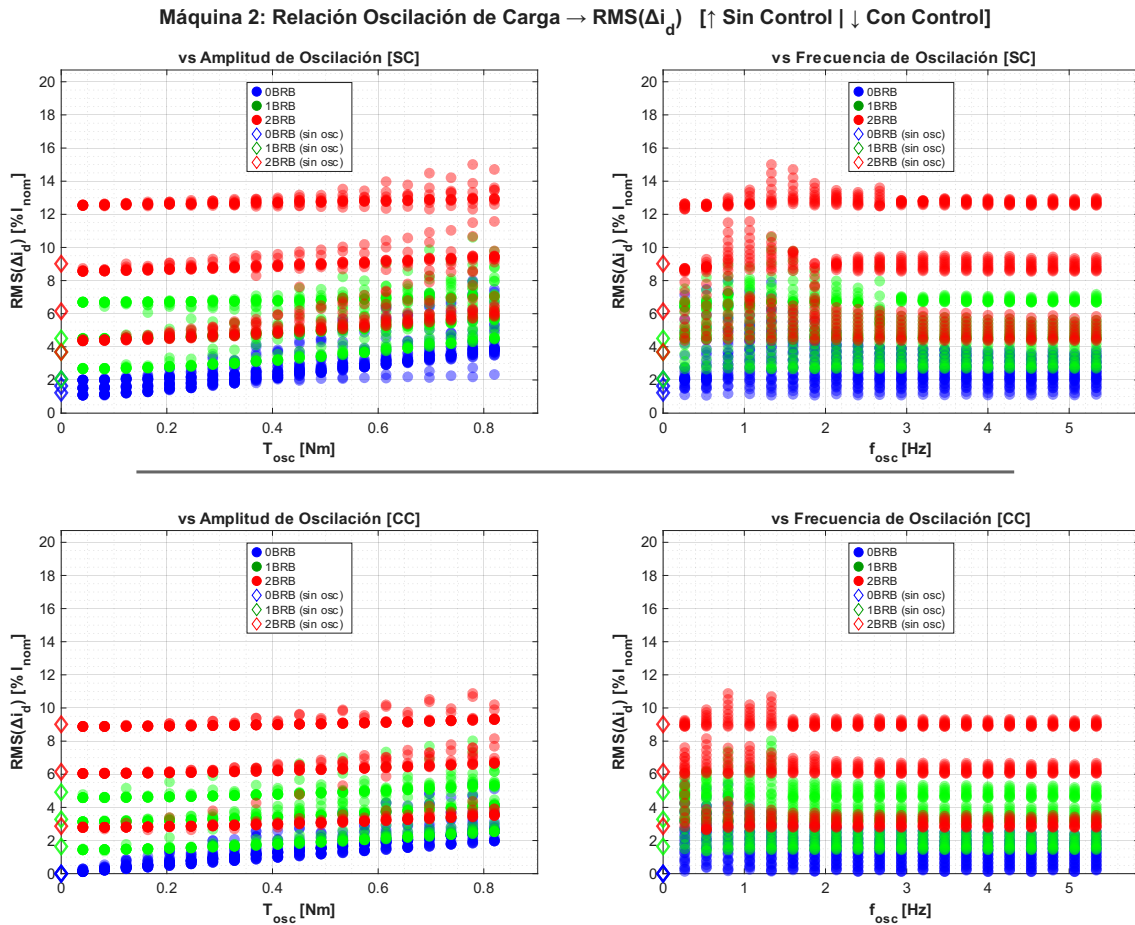


Figura 5.14: Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_d y las oscilaciones de carga para la máquina 2.

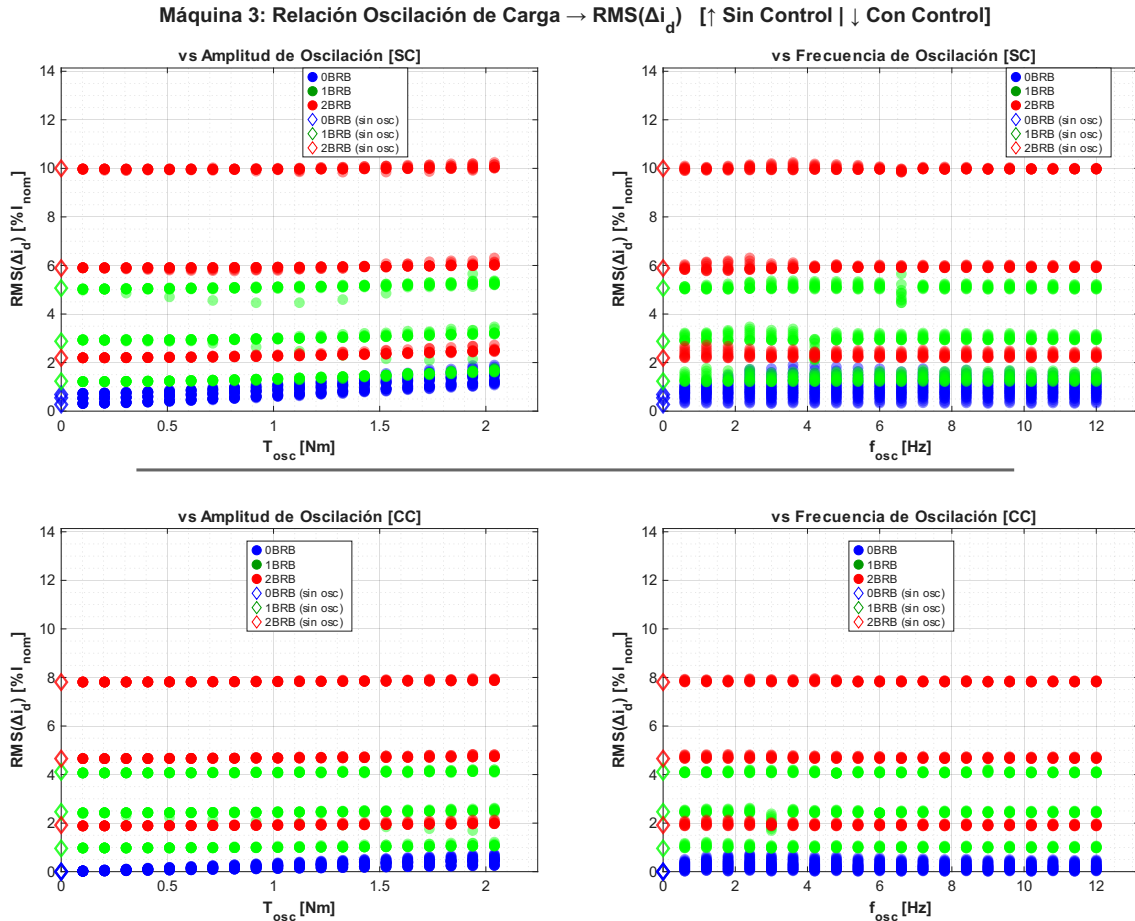


Figura 5.15: Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_d y las oscilaciones de carga para la máquina 3.

A partir de los resultados bajo alimentación directa (filas superiores), se observa que el valor RMS de Δi_d presenta una dependencia menor, pero perceptible, frente a la amplitud de la oscilación mecánica. Específicamente, el indicador experimenta un ligero incremento a medida que aumenta la magnitud de la perturbación, comportamiento que se manifiesta de forma consistente independientemente de la severidad de la falla (número de BRB).

Una posible explicación física para este comportamiento es la aparición de un acoplamiento cruzado asociado al estimador de flujo. Variaciones rápidas en el deslizamiento podrían introducir errores transitorios en el ángulo estimado θ_ψ , desalineando momentáneamente el marco de referencia orientado con el enlace de flujo del rotor. Bajo esta hipótesis, una fracción de la corriente de torque (i_q) se proyectaría sobre el eje d , elevando el valor RMS de Δi_d de forma aproximadamente proporcional a la amplitud de la oscilación. Esta interpretación resulta consistente con la observación de que el efecto prácticamente desaparece bajo FOC-PI, donde el control de velocidad reduce significativamente las variaciones de deslizamiento que podrían alimentar este error de orientación.

Por el contrario, al analizar los subgráficos de la derecha, se evidencia una nula correlación entre el valor RMS de Δi_d y la frecuencia de oscilación, lo que sugiere que la periodicidad temporal de la perturbación no modifica de manera apreciable el estado medio de magnetización de la máquina.

Al evaluar el comportamiento bajo el esquema de control PI (filas inferiores), se evidencia que la relación de sensibilidad cruzada se mitiga de manera significativa. La leve tendencia ascendente observada sin control frente a la amplitud de la oscilación se aplana considerablemente, mientras que la influencia de la frecuencia se vuelve prácticamente inexistente, compactando aún más los datos.

Una explicación técnicamente consistente es que la regulación FOC-PI reduce el acoplamiento dinámico entre los ejes d y q al mantener el flujo del rotor aproximadamente constante y compensar activamente las fluctuaciones de torque. Como consecuencia, las perturbaciones mecánicas tenderían a permanecer confinadas mayoritariamente al eje en cuadratura, disminuyendo su proyección residual sobre Δi_d . Esto explicaría por qué, bajo control vectorial, las variaciones del indicador quedan dominadas principalmente por la severidad de la asimetría del rotor y no por las oscilaciones externas de carga.

Estos resultados sugieren que la componente Δi_d conserva una dependencia predominantemente asociada a la asimetría del rotor incluso en presencia de perturbaciones mecánicas externas. En consecuencia, tanto en operación DOL como bajo FOC-PI, las oscilaciones de carga ejercen únicamente una influencia secundaria sobre el indicador, mientras que la severidad de la falla continúa siendo el factor dominante en su variación. Esto refuerza la utilidad de Δi_d como variable diagnóstica para la detección de BRB.

5.1.6. Análisis de sensibilidad cruzada: Efecto de las barras rotas sobre el valor RMS de Δi_q

Las Figuras 5.16 a 5.18 exploran la relación “cruzada” entre el valor RMS de Δi_q y la severidad de la falla de rotor (cantidad de barras rotas) para las máquinas 1, 2 y 3. Siguiendo la estructura matricial establecida, cada gráfica contrasta la operación bajo alimentación directa (fila superior) frente a la regulación estricta con control PI (fila inferior).

Para aislar los distintos efectos, cada fila se divide en dos columnas (subgráficos): la de la izquierda presenta diagramas de caja organizados por condición de operación (con y sin perturbación mecánica) para cada nivel de falla, mientras que la de la derecha ilustra el efecto del nivel de carga base sobre la dispersión de los datos, exhibiendo el rango empírico (mínimo y máximo) y su valor promedio.

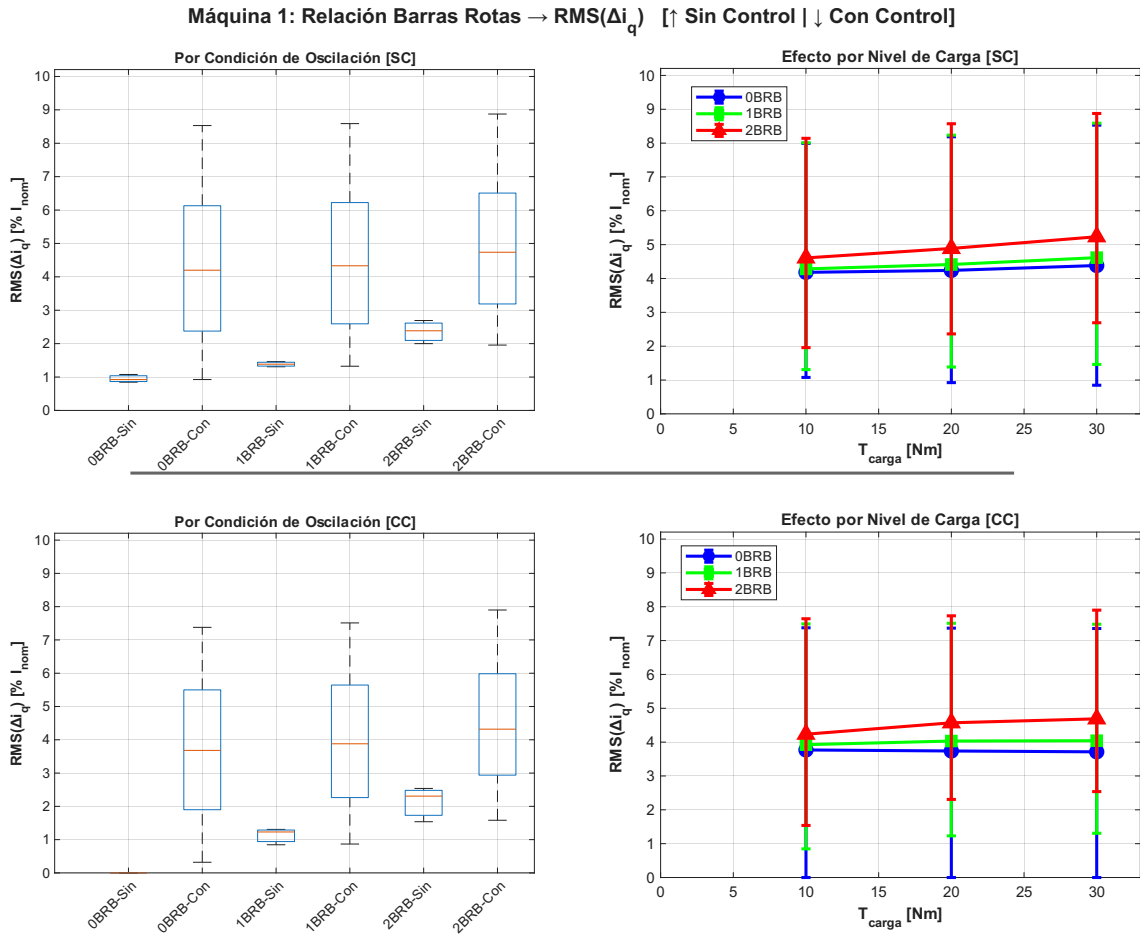


Figura 5.16: Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_q y la cantidad de barras rotas para la máquina 1.

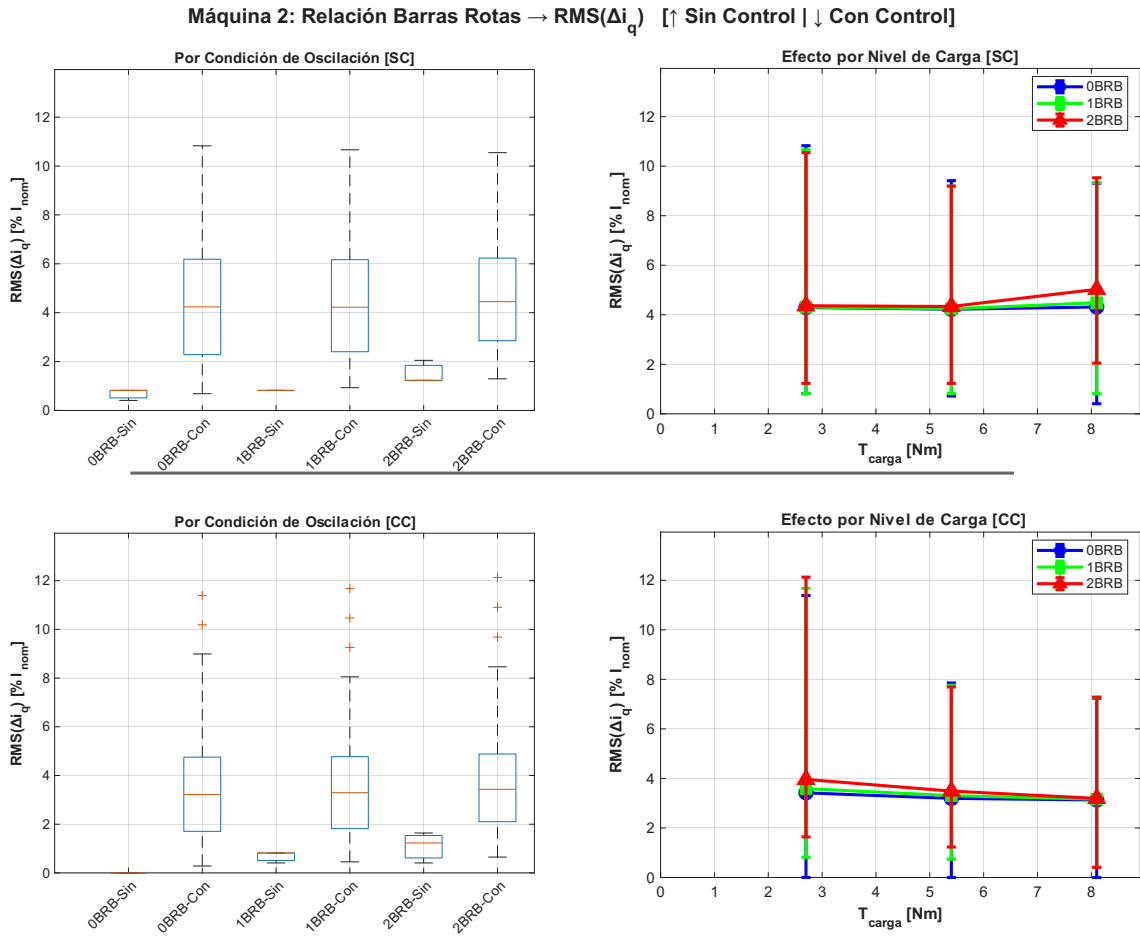


Figura 5.17: Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_q y la cantidad de barras rotas para la máquina 2.

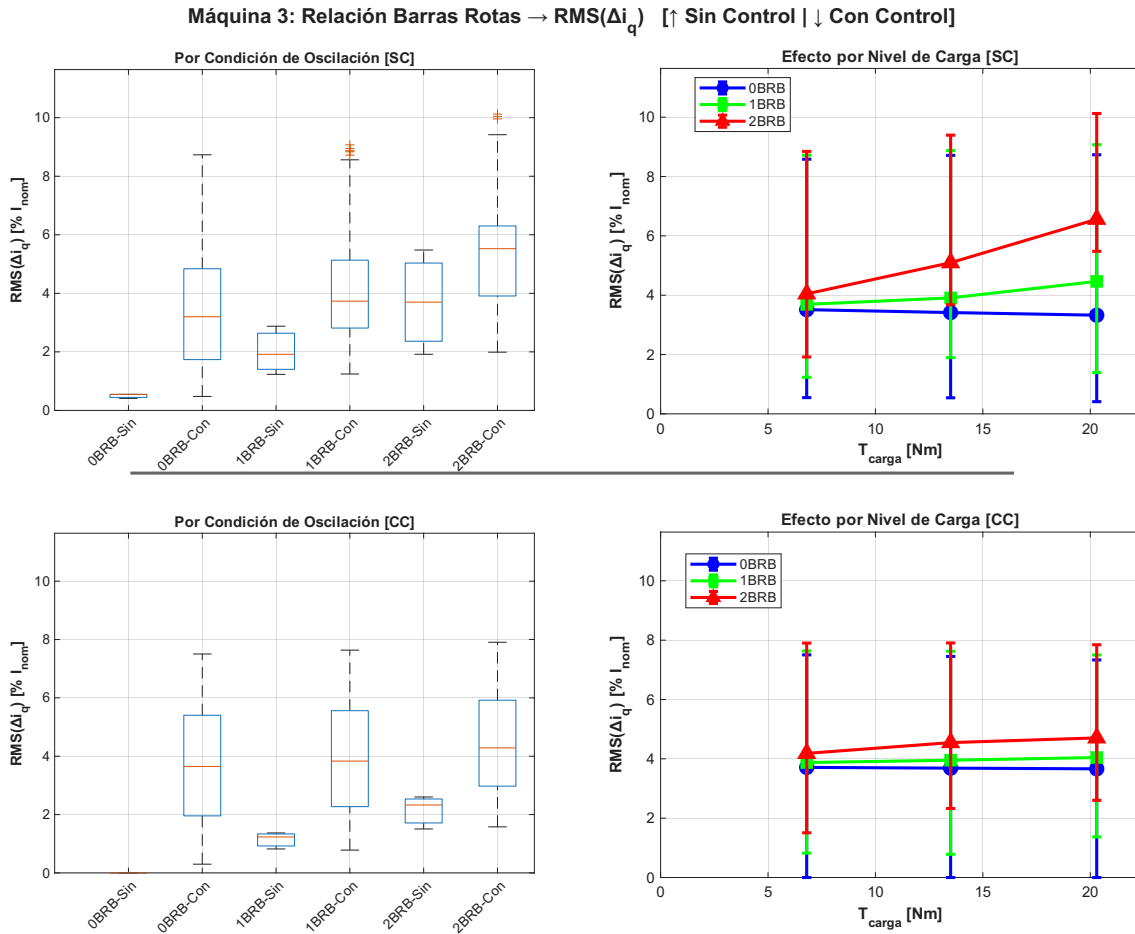


Figura 5.18: Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_q y la cantidad de barras rotas para la máquina 3.

Del análisis de las filas correspondientes a la operación sin control (filas superiores), se desprende que la cantidad de barras rotas ejerce una influencia secundaria sobre los valores RMS de Δi_q . Si bien el efecto no es tan pronunciado como en el eje de magnetización, se aprecia consistentemente que un mayor nivel de daño (cantidad de BRB) eleva el límite inferior o “piso” de las mediciones, arrastrando consigo el valor promedio. Físicamente, este incremento base se justifica por la asimetría de rotor: la falla genera un torque pulsante característico que se ve reflejado de manera directa como una oscilación base en la corriente en cuadratura, incluso en ausencia de oscilaciones mecánicas externas.

Adicionalmente, el subgráfico de la derecha revela que al aumentar el torque de carga, el valor RMS de Δi_q exhibe un comportamiento ascendente análogo al observado previamente en el eje d . Al operar con mayor exigencia mecánica, el deslizamiento del motor aumenta, amplificando la magnitud de las corrientes de rotor asimétricas. Aunque esta dinámica logra separar de cierta forma los valores promedios según la severidad de la falla en regímenes de alta carga, la amplia dispersión generada por las oscilaciones mecánicas provoca un solapamiento masivo de los rangos de operación. Esta superposición empírica evidencia que el valor RMS de Δi_q no es suficiente para identificar la presencia de BRB, validando su rol exclusivo como cuantificador de perturbaciones de carga en la metodología de diagnóstico propuesta.

Al contrastar estos resultados con el esquema de control PI (filas inferiores), se observa una reconfiguración interesante en la dispersión de los datos. En regímenes de alta exigencia mecánica (cerca del torque nominal), la acción del lazo cerrado reduce significativamente el rango de los valores RMS de Δi_q en comparación con la alimentación directa, ya que el controlador restringe activamente las grandes variaciones libres de velocidad. Por el contrario, a bajos niveles de carga, el rango de dispersión resulta levemente mayor que sin control. No obstante esta dinámica cruzada en las amplitudes de los rangos, se comprueba de forma consistente que el valor promedio del indicador RMS de Δi_q bajo control PI es siempre menor o igual al de su contraparte sin control, independientemente de la carga o del número de barras rotas. Esto reafirma que el lazo cerrado suprime exitosamente la dinámica oscilatoria, aunque mantiene el solapamiento, ratificando empíricamente que la asimetría de rotor debe evaluarse de forma exclusiva en el eje directo (d).

5.1.7. Evaluación de la separabilidad de fallas mediante el plano bidimensional Δi_d vs Δi_q

Las Figuras 5.19 a 5.21 sientan las bases empíricas para la construcción del algoritmo de diagnóstico propuesto. En ellas se ilustra la distribución conjunta de los valores RMS de Δi_d y Δi_q en función de la severidad de la falla (0, 1 y 2 BRB). Siguiendo la estructura de exposición emparejada, cada gráfica contrasta directamente el comportamiento en régimen de alimentación directa (fila superior) frente a la operación con control PI (fila inferior) para las máquinas 1, 2 y 3.

Para una correcta interpretación de estos mapas de diagnóstico, cabe señalar que cada figura está compuesta por columnas (subgráficos) que aíslan el efecto de la carga base, evaluando el sistema al 33,3%, 66,7% y 100% de su torque nominal. En cada plano bidimensional, el eje de las abscisas representa el valor RMS de Δi_q (asociado al torque mecánico), mientras que el eje de las ordenadas representa el valor RMS de Δi_d (asociado al flujo de magnetización). Cada punto graficado corresponde a un escenario operativo específico: la severidad de la falla se distingue mediante diferentes colores y formas geométricas, empleando marcadores de relleno sólido para denotar los casos de carga constante y marcadores translúcidos para identificar los escenarios donde la carga mecánica presenta un comportamiento oscilatorio.

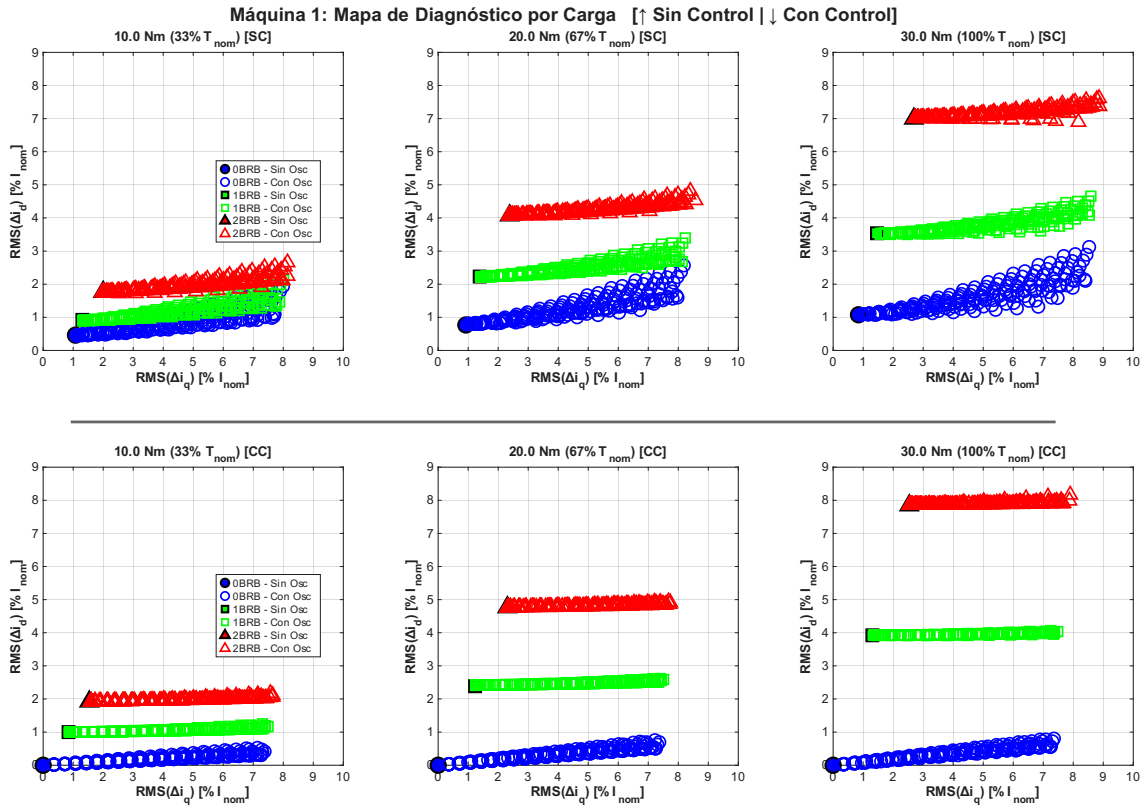


Figura 5.19: Mapa de diagnóstico bidimensional (valor RMS de Δi_d vs Δi_q) para la máquina 1.

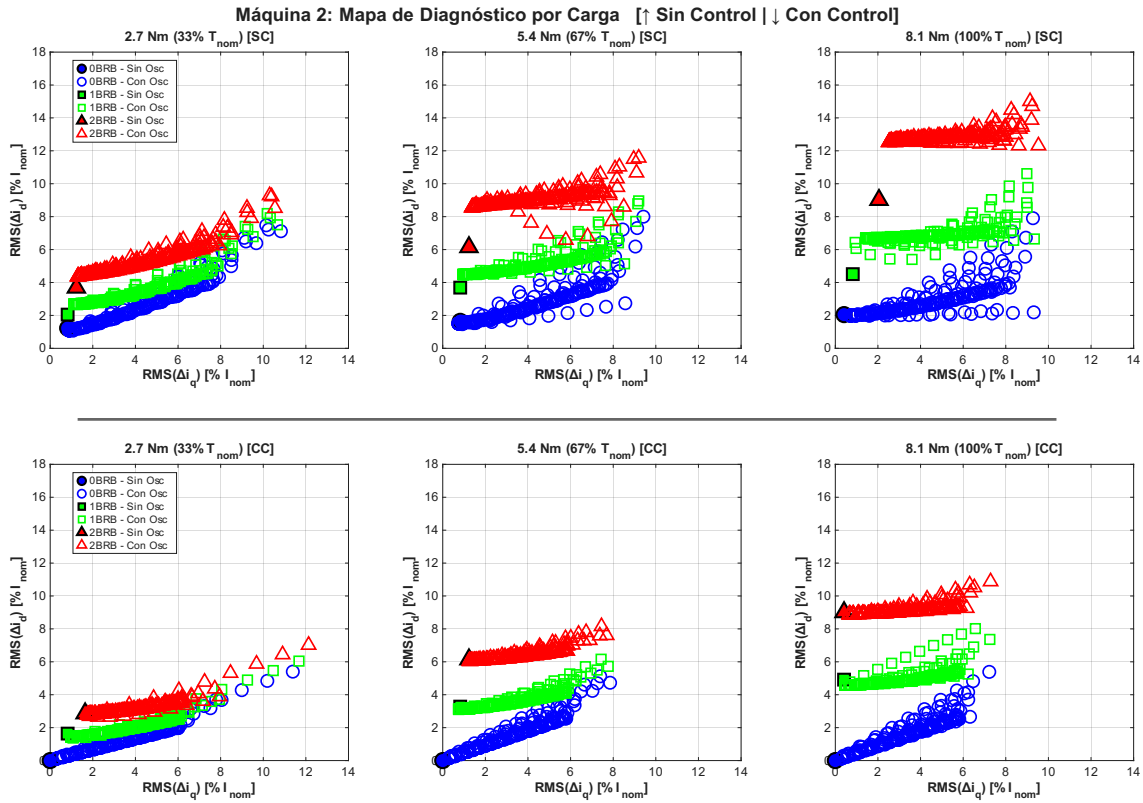


Figura 5.20: Mapa de diagnóstico bidimensional (valor RMS de Δi_d vs Δi_q) para la máquina 2.

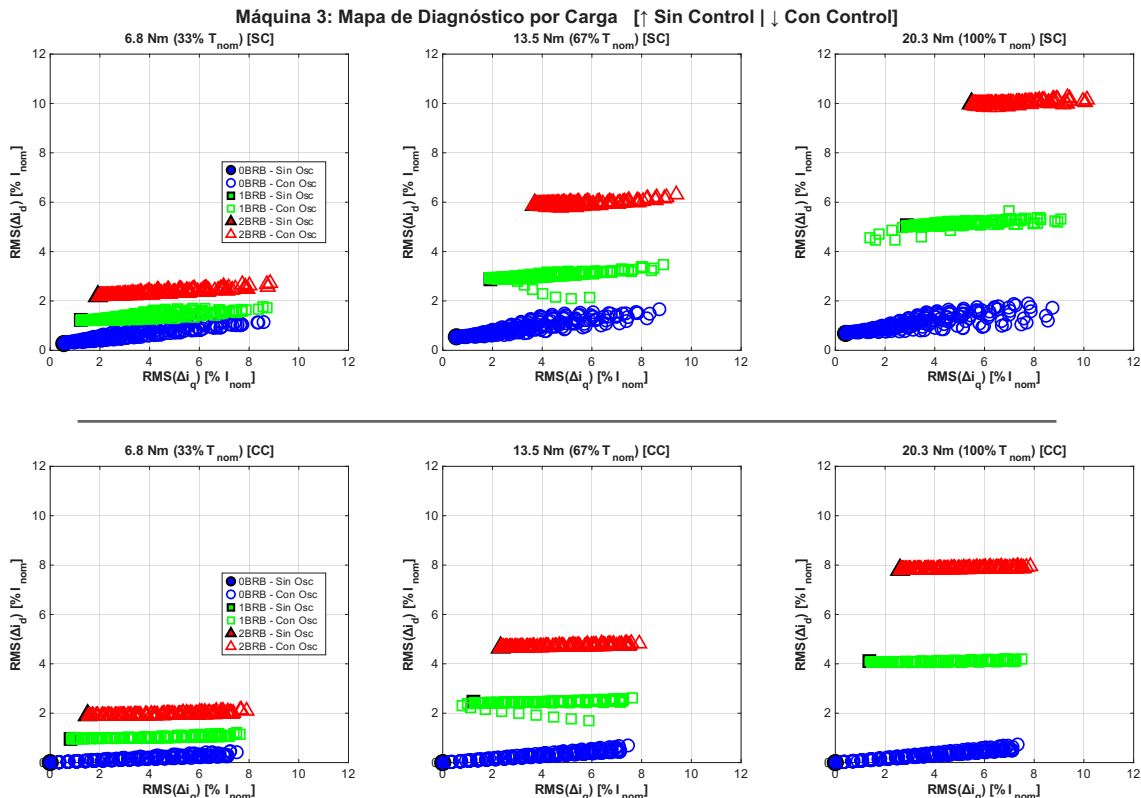


Figura 5.21: Mapa de diagnóstico bidimensional (valor RMS de Δi_d vs Δi_q) para la máquina 3.

Al analizar los planos de dispersión bajo alimentación directa (filas superiores), se evidencia un patrón de comportamiento consistente en todas las máquinas estudiadas. Por un lado, el valor RMS de Δi_d (en el eje vertical) demuestra una notable capacidad discriminatoria para separar las mediciones según el número de barras rotas. Esta separabilidad se optimiza drásticamente a medida que el nivel de carga mecánica se aproxima a los valores nominales. Por el contrario, en regímenes de baja carga (33,3%), la reducida exigencia atenúa la magnitud de las corrientes de rotor asimétricas, provocando que los valores de Δi_d se solapen verticalmente y dificultando el diagnóstico.

Por otro lado, el valor RMS de Δi_q (en el eje horizontal) presenta una distribución complementaria. Se observa que este indicador no exhibe una separación significativa en función del número de BRB, incluso al operar a plena carga nominal, expandiéndose horizontalmente en forma de abanico debido a las oscilaciones mecánicas. Este comportamiento corrobora que la corriente en el eje en cuadratura está gobernada casi en su totalidad por los requerimientos del torque y sus perturbaciones, siendo poco sensible a la asimetría eléctrica del rotor. Esta complementariedad geométrica es precisamente lo que fundamenta el método propuesto: mientras Δi_q absorbe y cuantifica la dispersión horizontal generada por las perturbaciones de carga (evitando falsos diagnósticos), Δi_d actúa como el clasificador primario en el eje vertical para determinar la severidad de la falla.

Al contrastar estos mapas con los obtenidos bajo el esquema de control vectorial PI (filas inferiores), se observa una mejora sustancial en la resolución diagnóstica del plano bidimensional. La acción del lazo cerrado “limpia” el ruido de baja frecuencia de la máquina,

lo que reduce drásticamente la dispersión vertical de los valores RMS de Δi_d . Esta condensación de los datos mitiga casi por completo el solapamiento entre las distintas condiciones de falla (0, 1 y 2 BRB), logrando una separabilidad nítida incluso en los escenarios más críticos de baja exigencia mecánica. Simultáneamente, el valor RMS de Δi_q restringe su amplio abanico horizontal hacia rangos más acotados, pero mantiene su rol funcional al absorber las fluctuaciones remanentes del torque sin comprometer la lectura del eje de magnetización. Esta compactación general de los grupos de datos demuestra de manera contundente que, al implementar la metodología en accionamientos regulados por control de velocidad, la exactitud del algoritmo de diagnóstico serán significativamente mayores que en motores de conexión directa a la red.

En conjunto, estas figuras muestran que la representación conjunta en el plano $(\Delta i_d, \Delta i_q)$ incrementa la separabilidad entre las distintas condiciones operativas analizadas. Esto respalda la hipótesis de que la proyección de las asimetrías magnéticas y de las perturbaciones mecánicas sobre ejes ortogonales permite mejorar la capacidad del diagnóstico para determinar y discriminar la presencia de BRB y/o oscilaciones de carga.

5.1.8. Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia

Las Figuras 5.22 a 5.24 grafican el impacto de la amplitud de oscilación de carga sobre el valor RMS de Δi_q , separando el comportamiento según la frecuencia de la perturbación (f_{osc}) para las máquinas 1, 2 y 3. Estas figuras complementan la dispersión global observada en apartados previos, permitiendo desglosar la interacción temporal entre ambas variables mecánicas. Siguiendo el formato de exposición unificado, cada gráfica contrasta la operación bajo alimentación directa (fila superior) frente a la regulación estricta con control PI (fila inferior).

Para facilitar su interpretación, cada figura se compone de columnas (subgráficos) separadas por la severidad de la falla (0, 1 y 2 BRB). En cada plano, se despliega la totalidad de los puntos de medición empíricos utilizando marcadores de baja opacidad. Dado que por cada combinación de amplitud y frecuencia se evaluaron tres condiciones de carga mecánica base, los gráficos superponen líneas continuas que representan la tendencia del valor promedio de Δi_q para cada frecuencia específica. Adicionalmente, se emplea una escala cromática para diferenciar dichas frecuencias: el color azul corresponde a los valores más bajos de oscilación, transitando gradualmente hacia el color rojo para indicar los valores más altos. Como punto de referencia, sobre el eje de las ordenadas ($T_{osc} = 0$) se han posicionado los valores promedio correspondientes a la operación estacionaria a carga constante.

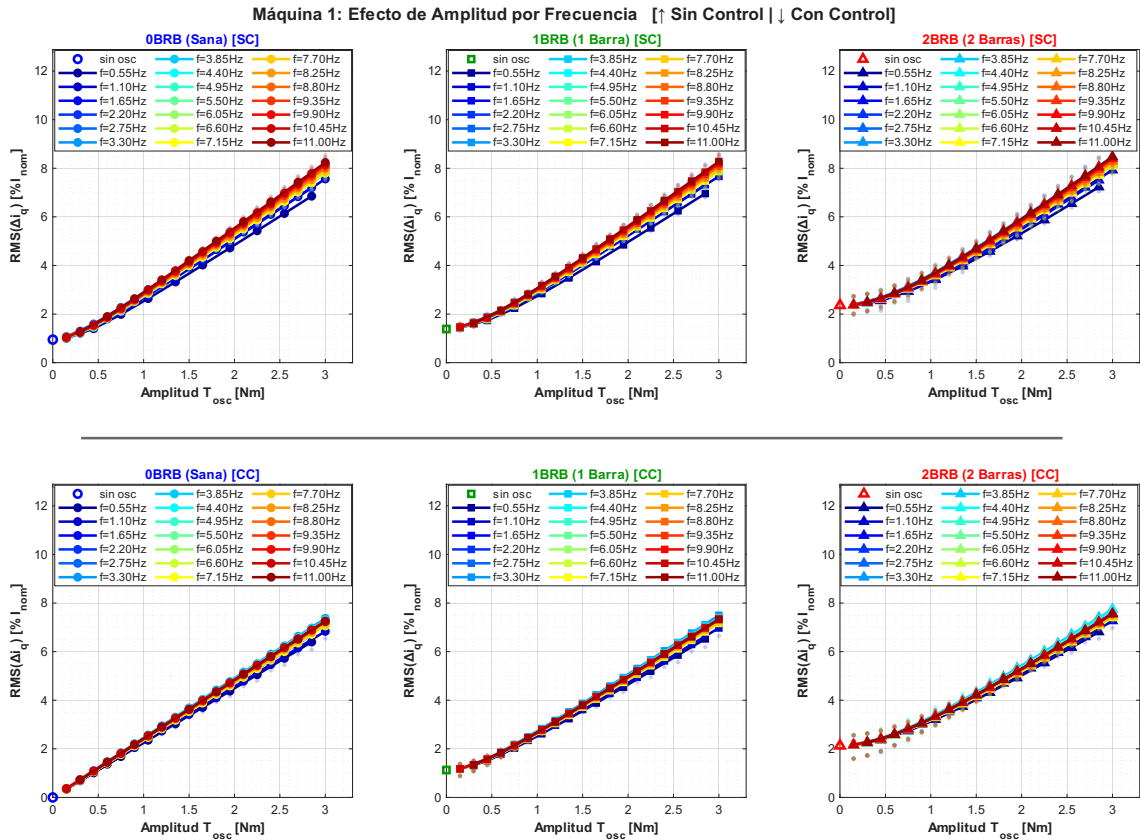


Figura 5.22: Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia para la máquina 1.

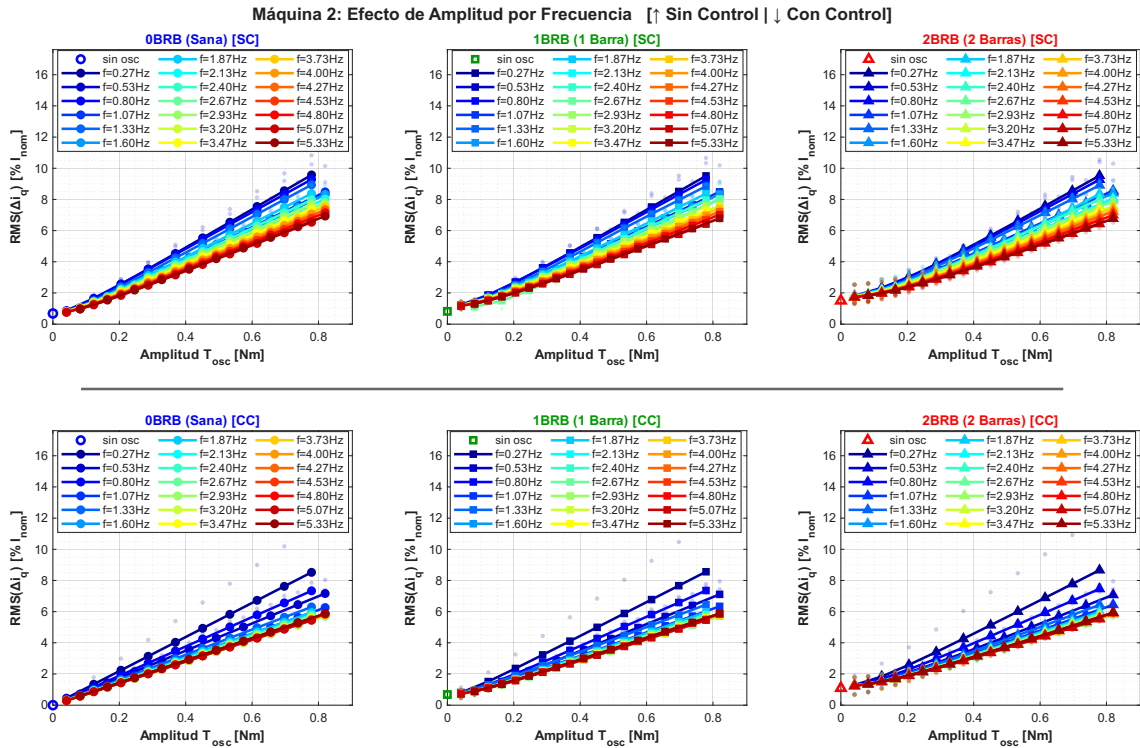


Figura 5.23: Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia para la máquina 2.

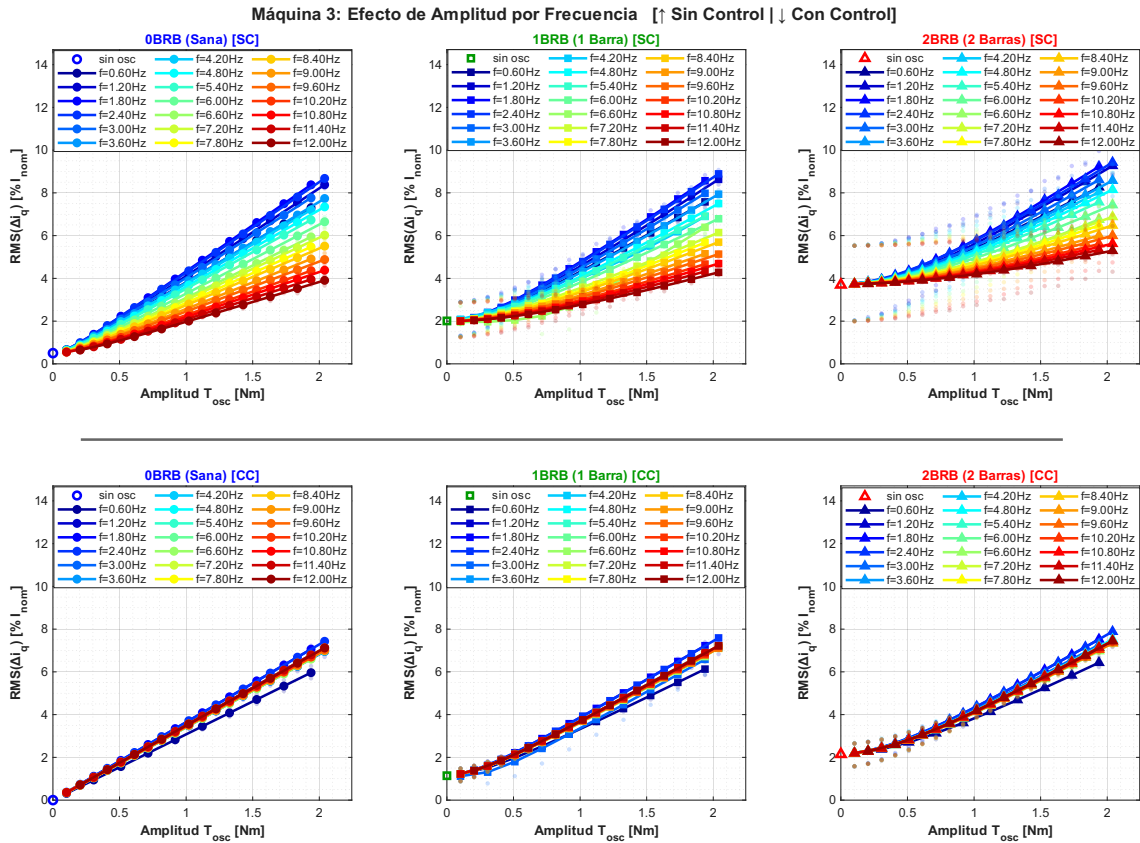


Figura 5.24: Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia para la máquina 3.

A partir de las gráficas bajo alimentación directa (filas superiores), se evidencia de manera contundente que, ante una amplitud de oscilación fija, las perturbaciones mecánicas de baja frecuencia inducen valores RMS de Δi_q significativamente mayores que las perturbaciones de alta frecuencia. Este fenómeno de atenuación frecuencial es particularmente notorio en las máquinas 2 y 3, las cuales se caracterizan por poseer un mayor momento de inercia. Tal como se postuló en análisis previos, el momento de inercia actúa inherentemente como un filtro mecánico pasabajos. En consecuencia, las máquinas con alta inercia oponen una mayor resistencia a los cambios rápidos de velocidad, amortiguando físicamente las fluctuaciones de alta frecuencia e impidiendo que estas perturbaciones mecánicas logren reflejarse con severidad en la corriente de estator del eje en cuadratura. En contraste, las oscilaciones lentas (de baja frecuencia) sí logran perturbar efectivamente la velocidad del rotor, generando grandes variaciones libres en el deslizamiento que se traducen en un incremento directo del valor RMS de Δi_q .

Al evaluar los escenarios con control PI (filas inferiores), se observa que el comportamiento frecuencial subyacente se mantiene intacto: las perturbaciones de baja frecuencia continúan exigiendo mayores valores RMS de Δi_q en comparación con las de alta frecuencia. Sin embargo, la acción del lazo cerrado modifica drásticamente la magnitud de la dispersión general de los datos. Tal como se evidenció en la evaluación de amplitudes globales, el controlador PI compensa activamente las variaciones de velocidad, logrando que el amplio “abanico” generado a altas amplitudes de oscilación colapse hacia un rango mucho más acotado. Esta compresión de las respuestas confirma que la regulación vectorial estandariza

el esfuerzo de corriente requerido por el motor frente a perturbaciones conocidas, mitigando la dispersión caótica inducida por la interacción libre del deslizamiento y la inercia que caracteriza a la conexión directa a la red.

5.1.9. Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud

Las Figuras 5.25 a 5.27 grafican el impacto de la frecuencia de oscilación de carga sobre el valor RMS de Δi_q , separando el comportamiento según la amplitud de la perturbación (T_{osc}) para las máquinas 1, 2 y 3. Estas figuras complementan la dispersión global observada en apartados previos, permitiendo desglosar la interacción temporal entre ambas variables mecánicas. Siguiendo el esquema de exposición unificado, cada gráfica contrasta la operación bajo alimentación directa (fila superior) frente a la regulación estricta con control PI (fila inferior).

Para facilitar su interpretación, cada figura se compone de columnas (subgráficos) separadas por la severidad de la falla (0, 1 y 2 BRB). En cada plano, se despliega la totalidad de los puntos de medición empíricos utilizando marcadores de baja opacidad. Dado que por cada combinación de amplitud y frecuencia se evaluaron tres condiciones de carga mecánica base, los gráficos superponen líneas continuas que representan la tendencia del valor promedio de Δi_q para cada amplitud de oscilación evaluada. En este caso, el código de colores se utiliza para identificar las amplitudes: el color azul señala las amplitudes de perturbación más bajas, transitando gradualmente hacia el color rojo para identificar las amplitudes más altas. Como punto de referencia, sobre el eje de las ordenadas ($f_{osc} = 0$) se han posicionado mediante marcadores de diamante los valores promedio correspondientes a la operación estacionaria a carga constante (sin oscilación externa).

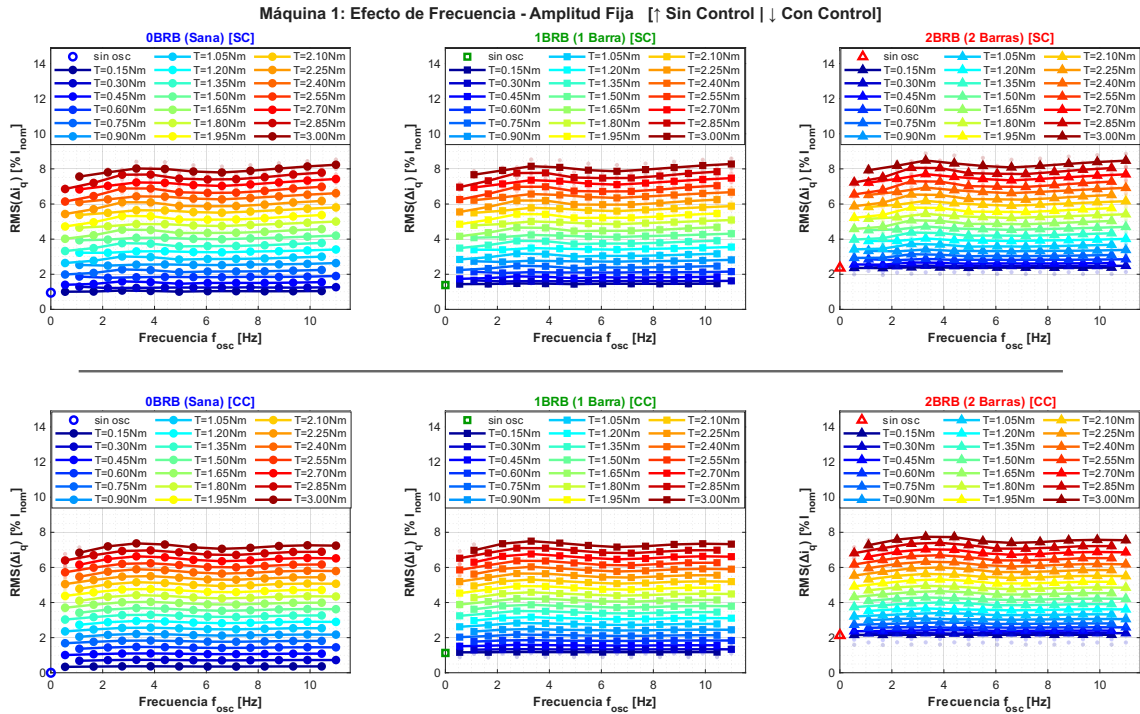


Figura 5.25: Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud para la máquina 1.

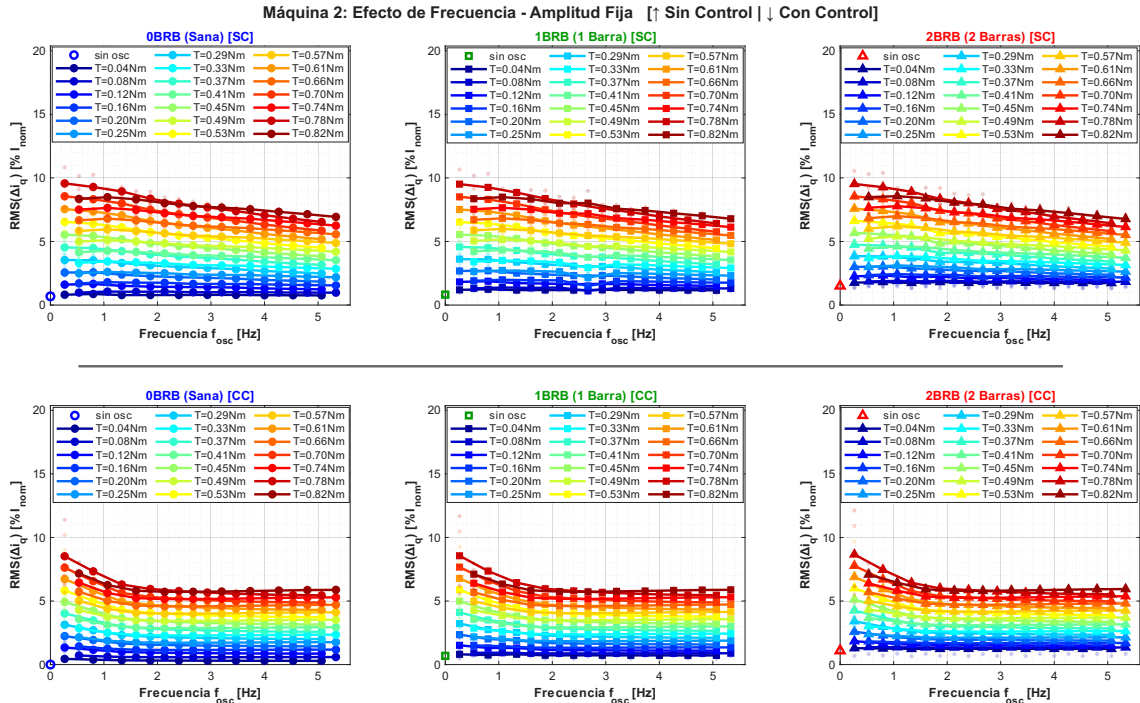


Figura 5.26: Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud para la máquina 2.

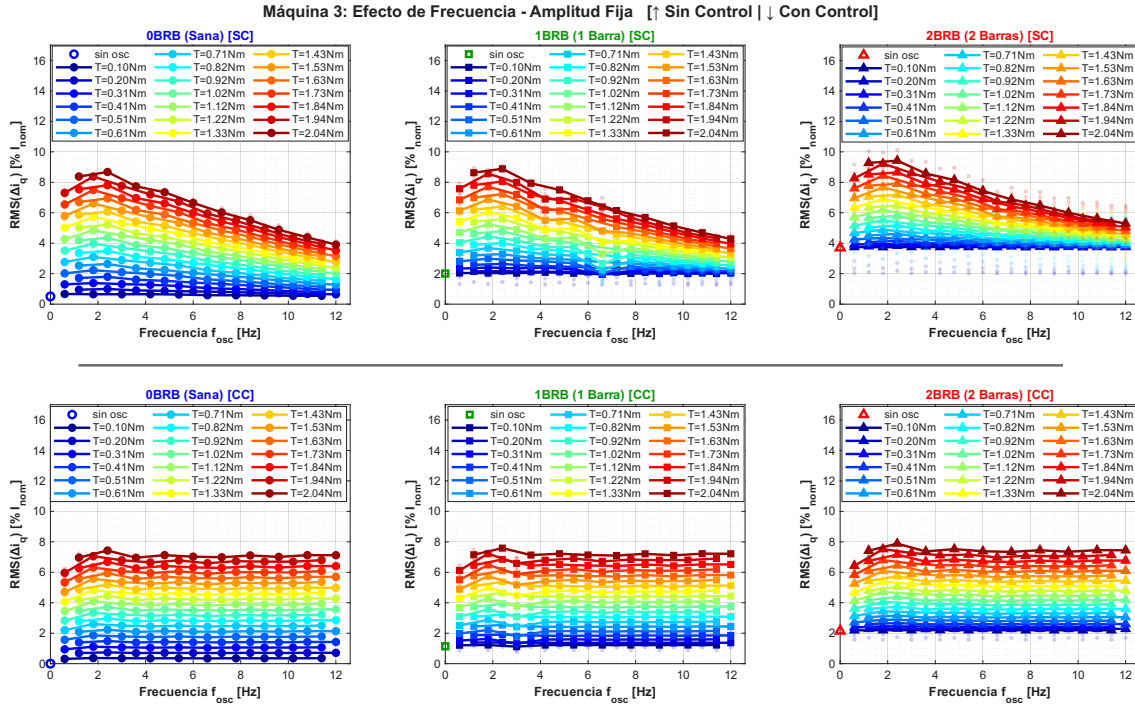


Figura 5.27: Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud para la máquina 3.

A partir de las gráficas bajo alimentación directa (filas superiores), el análisis revela que, como regla general, una mayor amplitud de oscilación se traduce en valores RMS de Δi_q más elevados, provocando una clara separación vertical entre las curvas a bajas frecuencias. Sin embargo, este comportamiento está fuertemente condicionado por la rapidez de la perturbación, especialmente en las máquinas que poseen un alto momento de inercia (como las máquinas 2 y 3). Se observa que, a medida que la frecuencia de oscilación de carga aumenta, los valores promedios correspondientes a las distintas amplitudes tienden a converger, agrupándose bajo una envolvente superior fuertemente decreciente.

Este fenómeno físico reafirma la acción del rotor como un filtro mecánico pasabajos. A bajas frecuencias, el rotor logra seguir la perturbación mecánica, reflejando proporcionalmente la amplitud de la oscilación en la corriente del eje en cuadratura (q). En contraste, a altas frecuencias, la inercia del sistema domina la dinámica y opone una enorme resistencia a los cambios bruscos de velocidad. En consecuencia, la variación del deslizamiento se amortigua drásticamente sin importar cuán grande sea la amplitud de la perturbación mecánica externa, forzando a que las respuestas en la corriente colapsen hacia valores considerablemente menores.

Al contrastar estos resultados con el esquema de control PI (filas inferiores), se observa que la relación proporcional entre la amplitud de oscilación y el valor RMS de Δi_q se mantiene estructuralmente. No obstante, en congruencia con lo expuesto en subsecciones anteriores, la acción del lazo cerrado acentúa drásticamente el efecto de atenuación frecuencial provocado por la inercia. El controlador PI compensa los errores de velocidad de manera tan eficiente que la envolvente superior decreciente se torna mucho más pronunciada, haciendo que las curvas colapsen hacia rangos de dispersión significativamente más estrechos de forma anticipada. Sumado a esto, la compresión general de los datos reduce

el piso mínimo para cada condición de barras rotas en comparación con la alimentación directa, confirmando empíricamente que la regulación vectorial estandariza y minimiza el esfuerzo de control frente a perturbaciones rápidas.

5.1.10. Evaluación del valor RMS de Δi_q como indicador de oscilación de carga mediante métricas de clasificación

Las Figuras 5.28 a 5.30 ilustran la capacidad del valor RMS de Δi_q para discriminar la presencia de perturbaciones mecánicas en las máquinas 1, 2 y 3, evaluando el desempeño global del indicador, sin hacer distinción por la cantidad de barras rotas. Siguiendo el esquema unificado, se contrasta la operación bajo conexión directa a la red (fila superior) frente a la regulación con control PI (fila inferior).

Para evaluar cuantitativamente el desempeño de este indicador, como herramienta de diagnóstico, el problema se aborda como un modelo de clasificación binaria. Para facilitar la interpretación visual, las columnas de cada figura (separadas por nivel de carga base al 33,3 %, 66,7 % y 100 % del torque nominal) dividen el espacio de operación en dos regiones principales:

- **Zona estable:** Corresponde a la clase negativa, agrupando aquellos puntos operativos donde la perturbación mecánica es nula o se considera despreciable. Físicamente, engloba todos los escenarios donde la amplitud de la oscilación de carga es estrictamente menor al 5 % del torque nominal (T_{nom}) de la máquina.
- **Zona oscilante:** Corresponde a la clase positiva, concentrando los escenarios que presentan fluctuaciones mecánicas severas. Agrupa los puntos donde la amplitud de la perturbación es mayor o igual al 5 % de T_{nom} .

Para efectuar la discriminación entre ambas zonas, se trazaron límites de decisión globales basados en el valor RMS de Δi_q normalizado en porcentaje de pu. Para los escenarios bajo alimentación directa, el umbral óptimo se fijó en 4,17 %, mientras que para los regímenes con control PI se estableció un umbral ajustado de 3,67 %. La fundamentación de estos umbrales globales se detallará en profundidad en los apartados posteriores.

Para medir la calidad de esta clasificación respecto a los umbrales propuestos, los gráficos reportan dos métricas estadísticas fundamentales:

- **Exactitud (Acc, del inglés *Accuracy*):** Mide la proporción de predicciones correctas sobre el total de casos evaluados. Si bien es intuitiva, puede resultar una métrica engañosa si las clases en el conjunto de datos se encuentran desbalanceadas.
- **Coefficiente de Correlación de Matthews (MCC):** Es una métrica estadística que evalúa clasificadores binarios, contemplando simultáneamente verdaderos y falsos positivos, así como verdaderos y falsos negativos. Su valor oscila entre -1 y 1 (donde 1 representa una clasificación perfecta). Su inclusión garantiza que la evaluación del indicador es confiable, independientemente de la distribución de los datos experimentales.

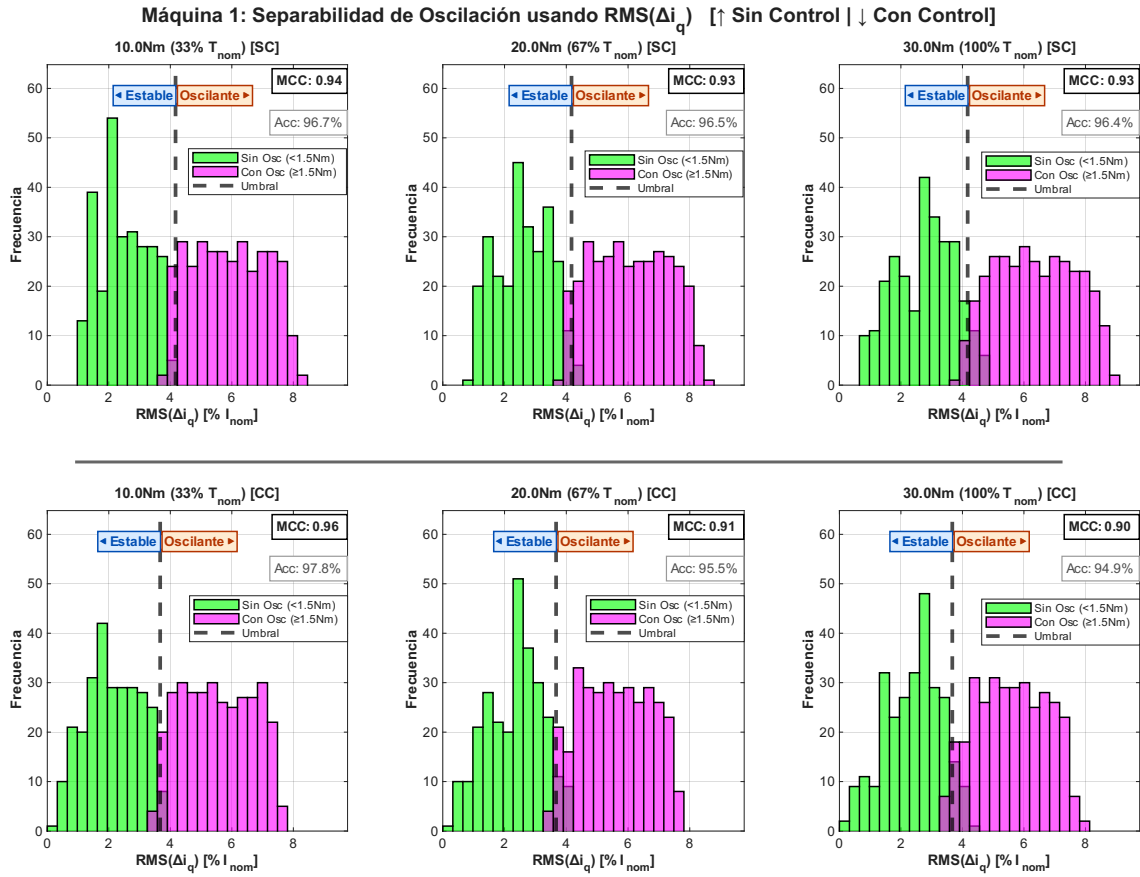


Figura 5.28: Desempeño de clasificación del valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones en la máquina 1.

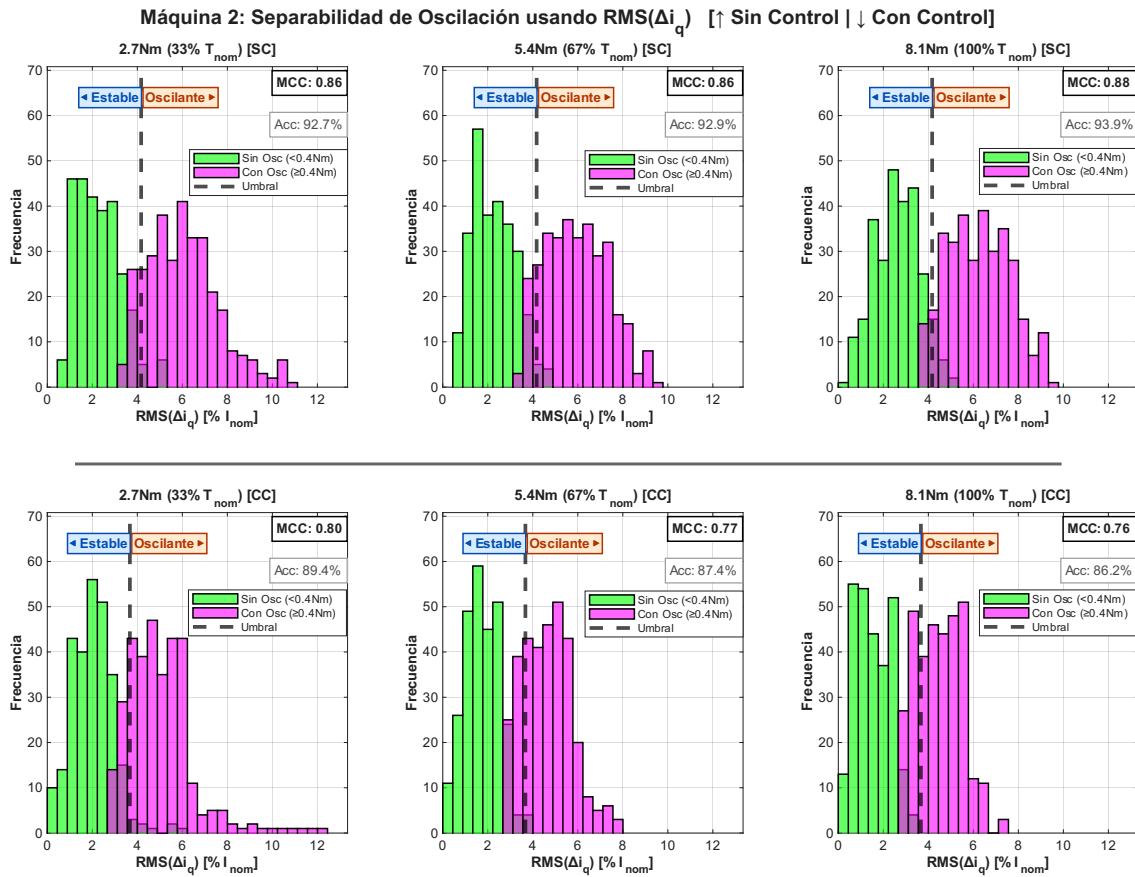


Figura 5.29: Desempeño de clasificación del valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones en la máquina 2.

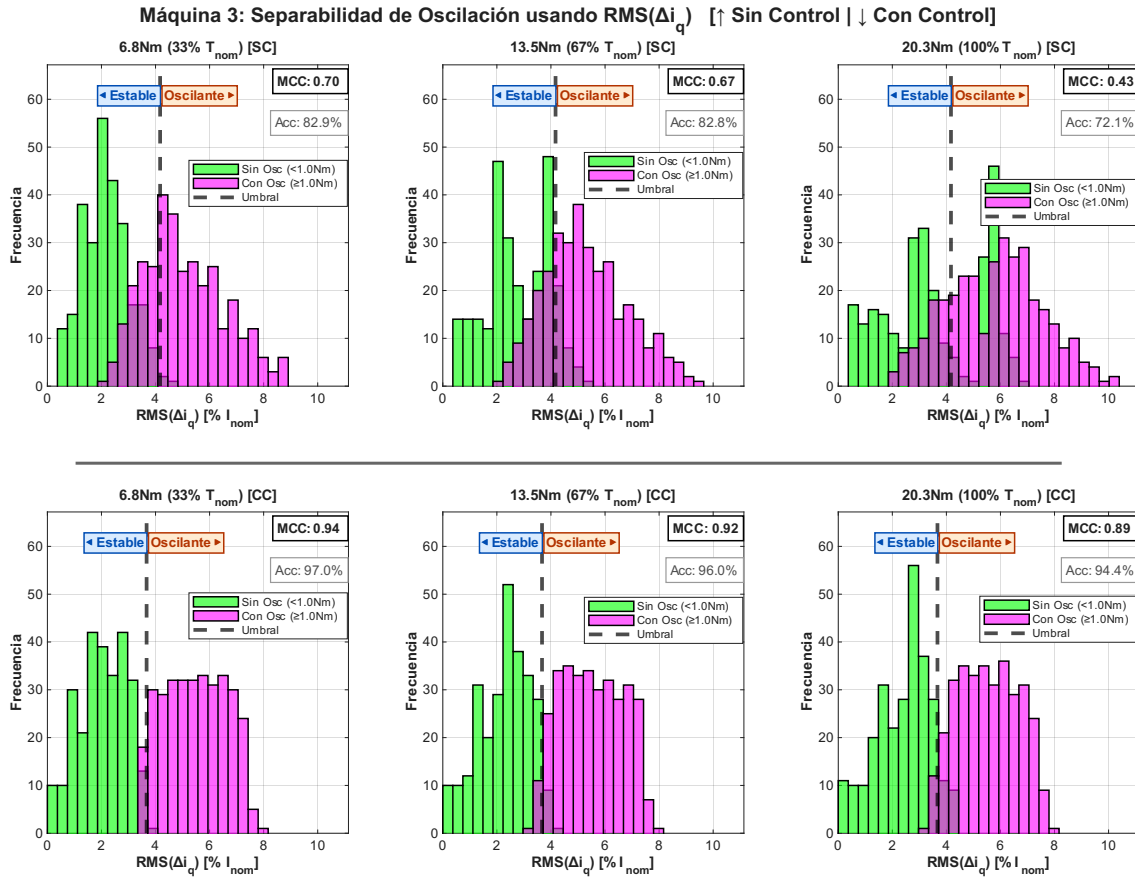


Figura 5.30: Desempeño de clasificación del valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones en la máquina 3.

Al analizar los resultados globales bajo alimentación directa (filas superiores), se corrobora que el valor RMS de Δi_q constituye un excelente indicador para diagnosticar la presencia de perturbaciones mecánicas severas. Aunque la separación entre las condiciones de operación (con y sin oscilación) presenta leves solapamientos y no alcanza la nítida división que exhibe el indicador Δi_d frente a barras rotas, su desempeño estadístico es altamente satisfactorio. El hallazgo más trascendental de este análisis radica en la generalización de la métrica: las gráficas demuestran que es factible utilizar un único valor umbral porcentual normalizado (en por unidad) para obtener una alta exactitud diagnóstica transversalmente a través de distintas topologías de máquinas en lazo abierto.

Por otro lado, al evaluar los regímenes bajo control PI (filas inferiores), se observa que la dispersión general de los valores RMS de Δi_q es considerablemente menor en comparación con las máquinas sin control. Sin embargo, a diferencia de la mejora drástica que el lazo cerrado aportaba al diagnóstico de barras rotas en el eje d , el diagnóstico de oscilaciones mecánicas en el eje q no experimenta un beneficio estadístico evidente. La superposición o solapamiento en la frontera de decisión entre los escenarios estables y oscilantes ocurre con una frecuencia similar a la observada en conexión directa a la red. Esto demuestra empíricamente que, si bien el controlador PI compacta la respuesta global de la corriente mediante el umbral ajustado al 3,67%, la compleja dinámica introducida por el esfuerzo de control continuo impide una separación perfectamente nítida de las perturbaciones limítrofes, manteniendo una tasa de falsos positivos y negativos análoga a la operación sin

control.

5.2. Análisis comparativo de la máquina de laboratorio: Resultados simulados y experimentales

En esta sección se desarrolla el análisis comparativo entre los resultados experimentales obtenidos en el banco de pruebas y las simulaciones correspondientes a las máquinas de laboratorio. Con el objetivo de garantizar un contraste riguroso, se ha establecido una correspondencia estricta entre los modelos físicos y computacionales. Dado que la máquina física 220201091 corresponde al motor sin intervenir (sano, 0 BRB), y la máquina 220201077 fue intervenida mediante las dos perforaciones de su rotor para emular la falla (2 BRB), el entorno de simulación replica exactamente esta configuración. De este modo, el modelo de la máquina sana emplea los parámetros eléctricos y mecánicos específicos de la máquina 220201091, mientras que el modelo con falla utiliza los parámetros correspondientes a la máquina 220201077.

5.2.1. Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q

En esta subsección se evalúa la influencia del torque de carga mecánico sobre la componente de corriente en cuadratura. Para ello, la Figura [5.31](#) presenta una comparativa directa entre los resultados simulados (fila superior) y los obtenidos experimentalmente (fila inferior). En ambos casos se ilustra la evolución del valor RMS de i_q a medida que se incrementa la exigencia mecánica en el eje, permitiendo contrastar la fidelidad del modelo computacional frente a la dinámica real de la máquina.

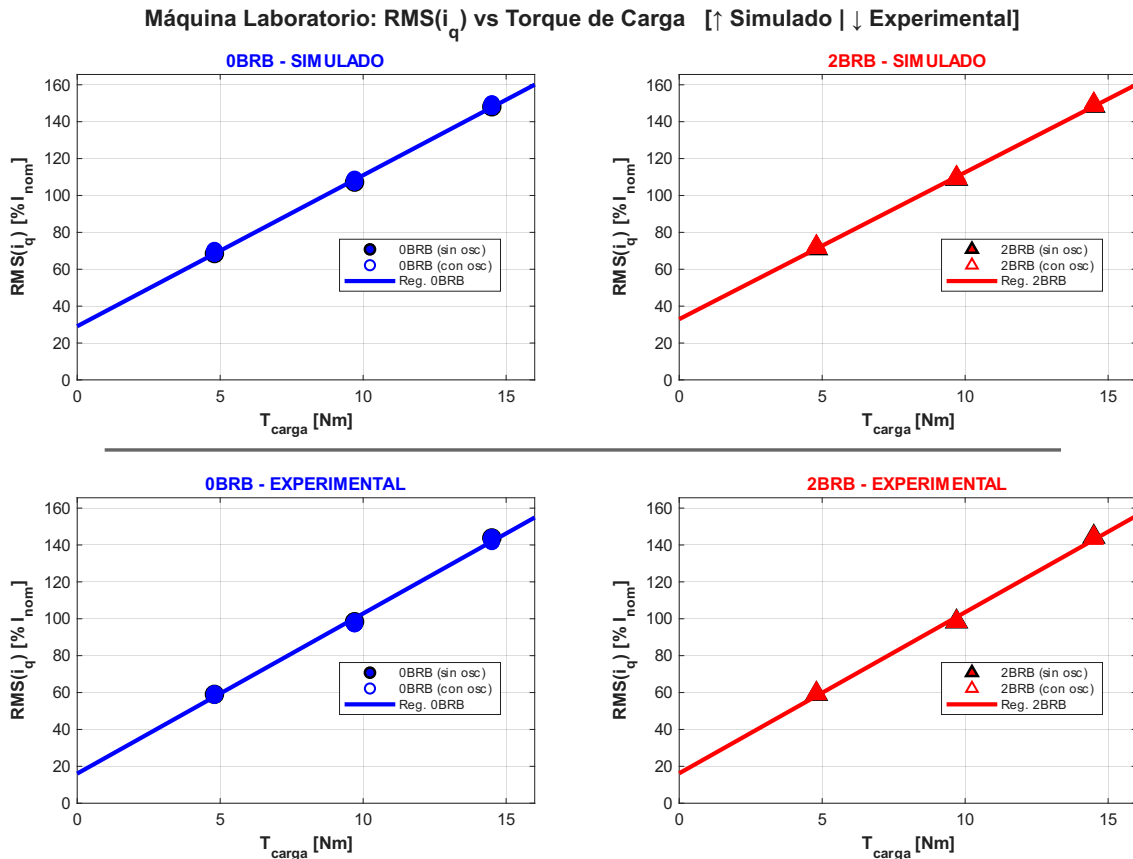


Figura 5.31: Efecto del torque de carga sobre el valor RMS de i_q .

Al analizar los resultados desplegados en la gráfica, se observa a nivel macroscópico que las predicciones del modelo simulado son altamente consistentes con las mediciones empíricas. La relación lineal y directamente proporcional entre el torque de carga y la corriente i_q se mantiene inalterable en ambos escenarios. Al examinar el detalle cuantitativo, se evidencia que las simulaciones tienden a sobreestimar levemente los valores RMS de i_q , una diferencia más pronunciada a bajos niveles de exigencia mecánica. Esta discrepancia responde a la complejidad de modelar con exactitud absoluta las no linealidades y pérdidas mecánicas reales presentes en la máquina física, tales como fricción, ventilación y efectos asociados al accionamiento DC. Sin embargo, a medida que el sistema se aproxima a sus niveles nominales de carga, donde el torque electromagnético pasa a dominar la dinámica operativa, la diferencia entre los resultados simulados y experimentales se reduce considerablemente.

En conjunto, estos resultados demuestran que el modelo matemático logra representar adecuadamente la dinámica electromecánica dominante asociada a la componente i_q , preservando correctamente la tendencia física del fenómeno incluso ante las no idealidades presentes en el banco de pruebas. Esto confirma la utilidad de la simulación como herramienta de análisis e interpretación del comportamiento de carga de la máquina, aunque las magnitudes absolutas requieran una calibración empírica para su extrapolación precisa al sistema experimental.

5.2.2. Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la asimetría de rotor

En esta subsección se evalúa la sensibilidad del valor RMS de Δi_d frente a la severidad de la falla en el rotor (0 y 2 BRB). Para ello, la Figura 5.32 presenta el contraste directo entre el entorno simulado (fila superior) y el banco de pruebas experimental (fila inferior). Para proporcionar un análisis estadístico exhaustivo, la gráfica se desglosa en diagramas de caja para ver la distribución global, un gráfico de líneas que detalla el efecto progresivo del nivel de carga, y un diagrama de dispersión que mapea la totalidad de los puntos evaluados.

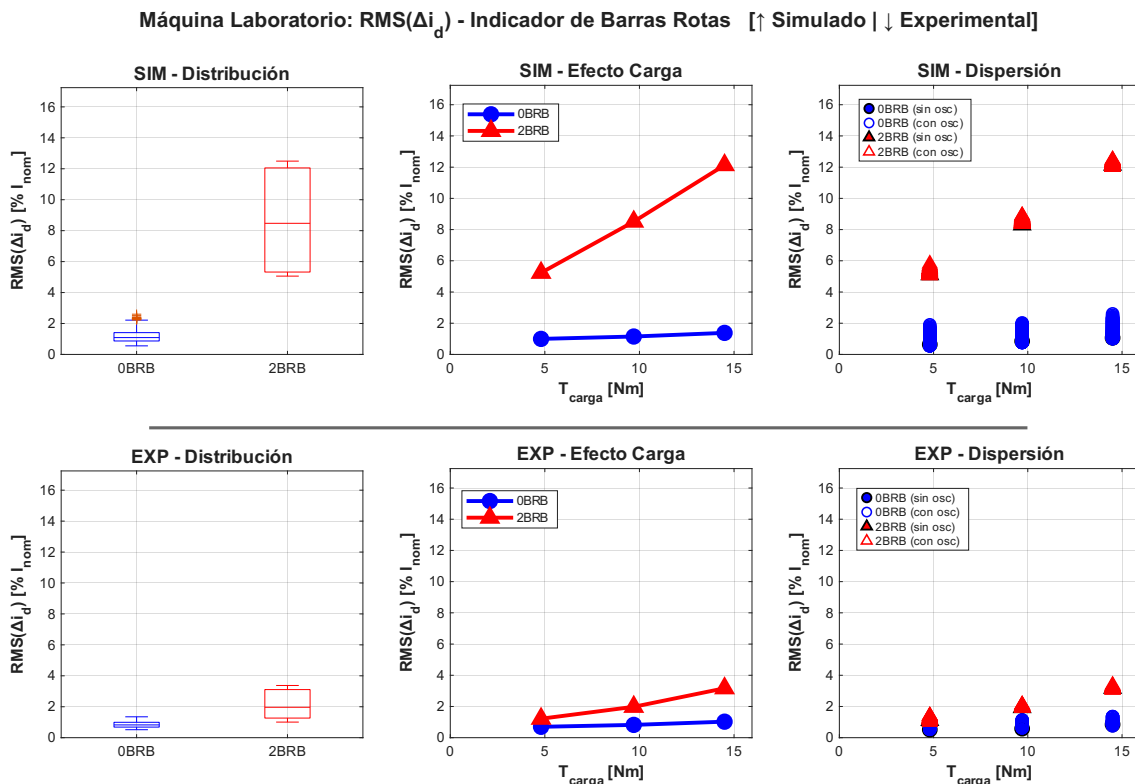


Figura 5.32: Sensibilidad del valor RMS de Δi_d ante la severidad de la falla.

Al contrastar los resultados de ambas filas, se observan diferencias cuantitativas significativas, aunque el comportamiento cualitativo general se preserva. Por un lado, las simulaciones capturan correctamente la fenomenología subyacente de la máquina: el valor RMS de Δi_d aumenta progresivamente junto con la carga mecánica, y la distancia diagnóstica entre el estado sano (0 BRB) y el defectuoso (2 BRB) se amplía de manera consecuente ante una mayor exigencia del torque. Sin embargo, el modelo computacional tiende a sobreestimar drásticamente la magnitud del indicador, arrojando valores simulados que son aproximadamente varias veces más altos que los registrados en el laboratorio.

Una posible explicación física para este comportamiento es que el modelo matemático idealizado asume un aislamiento resistivo perfecto entre las barras adyacentes del rotor. En la máquina real, sin embargo, la perforación de una barra podría permitir la aparición de trayectorias alternativas de conducción a través del núcleo de hierro laminado y de las barras vecinas, atenuando parcialmente el desequilibrio electromagnético neto en el

entrehierro. Bajo esta interpretación, la perturbación magnética que finalmente se refleja en el estator tendría una magnitud menor a la proyectada por la simulación idealizada.

Esta discrepancia cuantitativa se hace especialmente crítica en regímenes de baja exigencia mecánica (alrededor del 33,3 % del torque nominal). Mientras que la simulación proyecta una separación nítida e idealizada entre los estados de 0 y 2 BRB incluso a baja carga, la realidad experimental evidencia una clara superposición o solapamiento de los resultados. Por otro lado, cabe destacar que los resultados experimentales exhiben una menor varianza, lo cual se traduce en una dispersión de datos notablemente más acotada en comparación con su contraparte simulada, siendo este fenómeno particularmente notorio en los registros correspondientes a la máquina sana (0 BRB).

En conjunto, estos resultados sugieren que las magnitudes absolutas de Δi_d obtenidas en simulación no son directamente transferibles a la máquina física sin un proceso de recalibración experimental, ya que el modelo idealizado sobreestima la amplitud de la firma asociada a la falla. Sin embargo, pese a esta discrepancia cuantitativa, la tendencia fenomenológica principal se conserva en ambos entornos: el indicador aumenta de manera consistente tanto con la severidad de la asimetría como con la carga mecánica aplicada. Esto respalda que el modelo matemático captura adecuadamente la dinámica electromagnética dominante del fenómeno, aun cuando ciertos efectos físicos presentes en la máquina real modifiquen la amplitud final de la respuesta observada.

5.2.3. Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q

En esta subsección se analiza la relación entre la magnitud de las perturbaciones mecánicas, expresada a través de la amplitud de oscilación (T_{osc}), y la respuesta en el valor RMS de la componente Δi_q . La Figura 5.33 despliega los diagramas de dispersión, contrastando el comportamiento del entorno simulado frente al experimental, incorporando como punto de referencia en el origen ($T_{osc} = 0$) los escenarios operando a carga constante.

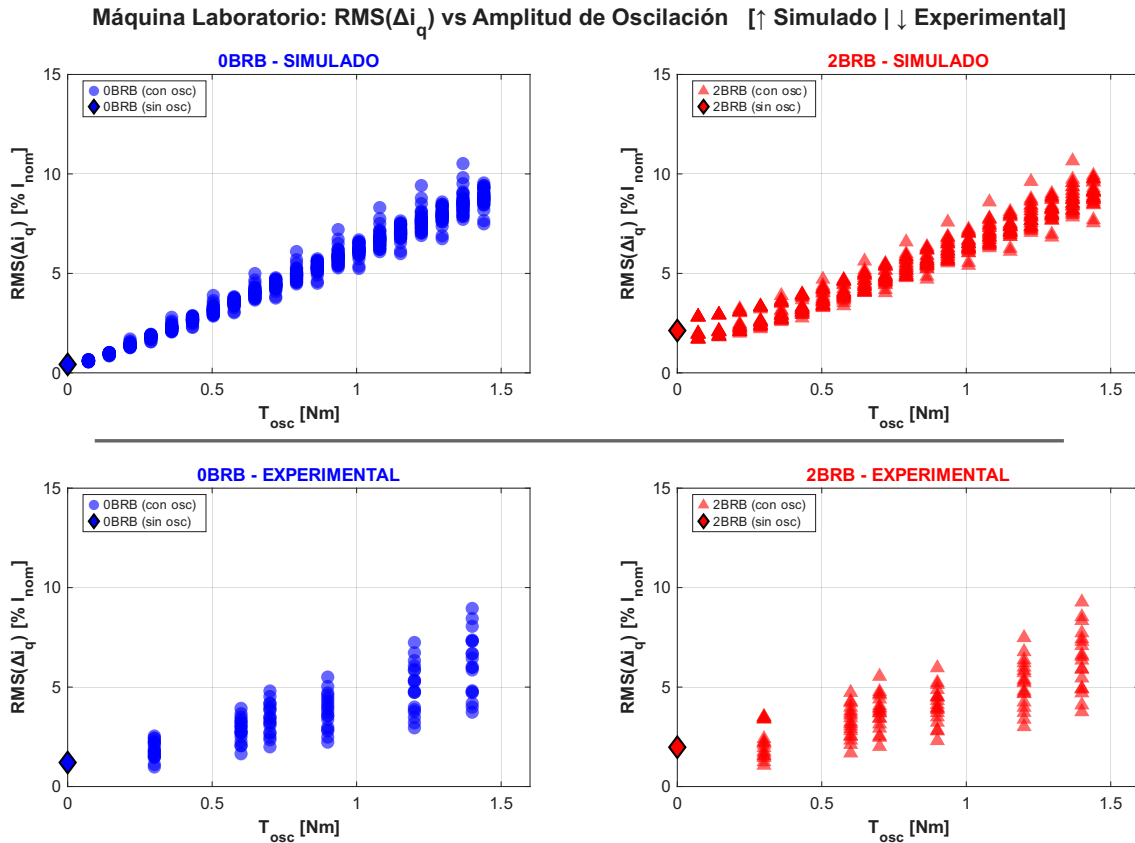


Figura 5.33: Impacto de la amplitud de oscilación mecánica sobre el valor RMS de Δi_q .

Al observar los diagramas, es importante notar de manera preliminar que el volumen de datos simulados supera con creces a los puntos experimentales, dado que el entorno computacional permite ejecutar un barrido paramétrico mucho más denso. A pesar de esta diferencia en la resolución del muestreo, la tendencia fenomenológica macroscópica se mantiene intacta de manera transversal: se corrobora una relación directamente proporcional donde el incremento en la amplitud de la perturbación eleva consecuentemente el valor RMS de Δi_q , tanto para la máquina sana como para aquella con falla.

Sin embargo, el contraste revela una diferencia notable en la distribución de las mediciones al someter el sistema a alta exigencia dinámica. Los resultados experimentales exhiben una varianza sustancialmente mayor a medida que aumenta la amplitud de la oscilación, abriendo un “abanico” de dispersión mucho más amplio que el proyectado por la simulación. Desde una perspectiva electromecánica y de control, esta expansión del abanico experimental se justifica por la presencia de dinámicas complejas ausentes en el modelo matemático idealizado. En el banco de pruebas real, las oscilaciones de carga severas interactúan con factores físicos como desalineaciones del eje, vibraciones estructurales o armónicos en la red.

Una posible explicación técnica para este comportamiento es que, en el banco de pruebas real, las oscilaciones mecánicas no son perturbaciones perfectamente sinusoidales ni aisladas, sino que podrían interactuar con diversos fenómenos físicos presentes en el sistema experimental. Entre ellos, es razonable considerar efectos asociados a holguras mecánicas en los acoples, resonancias estructurales del montaje o armónicos provenientes del conver-

tidor de la máquina de carga DC. Estas dinámicas no modeladas podrían superponerse a la perturbación mecánica principal e incrementar la dispersión del valor RMS de Δi_q a medida que aumenta la exigencia dinámica de la prueba.

5.2.4. Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga

En esta subsección se analiza el impacto de la frecuencia de oscilación de carga (f_{osc}) sobre el valor RMS de Δi_q . La Figura 5.34 presenta los diagramas de dispersión respectivos, contrastando el entorno simulado con las mediciones empíricas.

Para una correcta interpretación, es importante señalar que los diagramas de dispersión no corresponden a un escenario con amplitud fija, sino que consolidan la totalidad de los datos disponibles en cada entorno. En el caso de las simulaciones, se incluyen todas las combinaciones del barrido paramétrico de amplitud y frecuencia de oscilación, evaluadas en los tres niveles de carga mecánica media (33,3 %, 66,7 % y 100 % de T_n). Por su parte, los datos experimentales integran todas las combinaciones de amplitud y frecuencia definidas en la Tabla 4.2, igualmente evaluadas en los distintos niveles de carga.

Esta integración da lugar a distribuciones de puntos con densidades distintas entre ambos casos, lo que responde directamente a la diferencia entre un barrido de alta resolución en simulación y una matriz discreta de mediciones en el banco de pruebas.

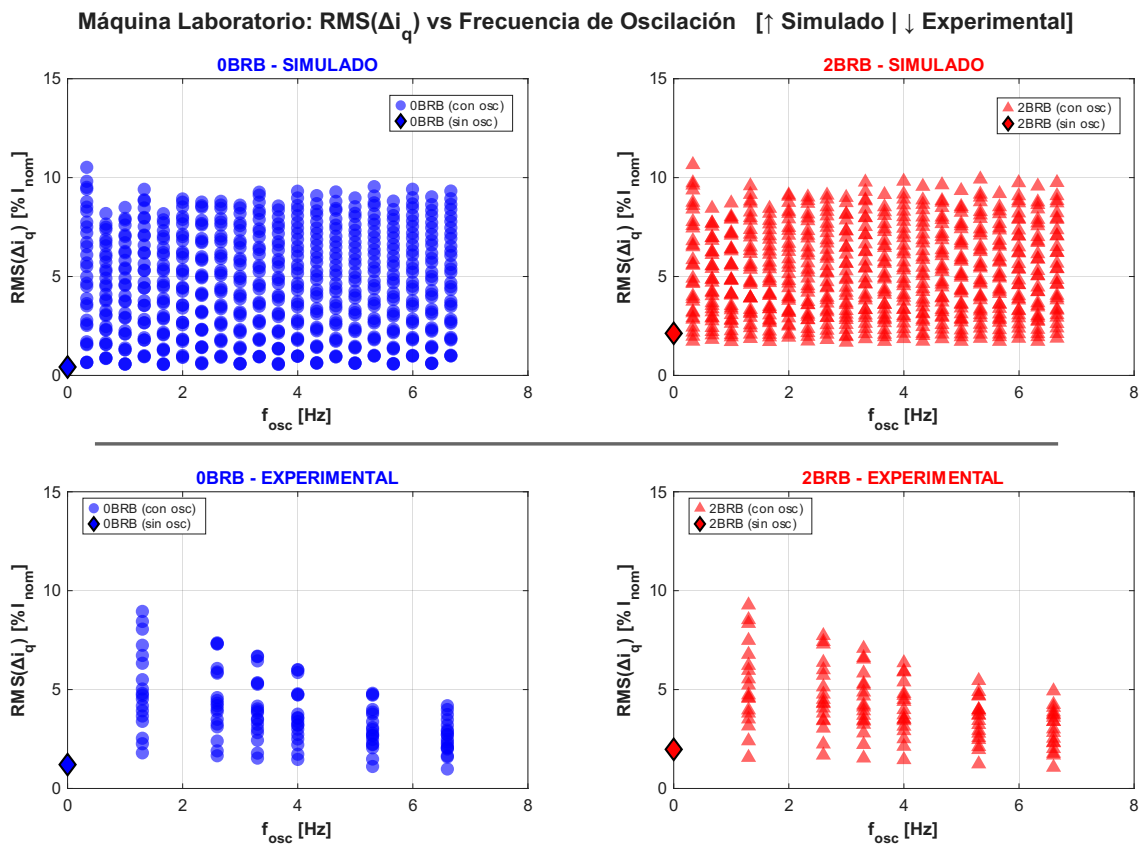


Figura 5.34: Respuesta frecuencial del valor RMS de Δi_q frente a oscilaciones de carga.

Al comparar los resultados de ambas filas, se evidencia una diferencia dinámica significativa que trasciende la mera diferencia en la densidad de los datos muestreados. Según el análisis paramétrico expuesto en la subsección 5.1.4, el comportamiento del modelo simulado (fila superior) es característico de un sistema con bajo momento de inercia, donde las respuestas de corriente permanecen dispersas en un rango amplio sin una dependencia marcada respecto de la frecuencia de oscilación. En contraste, los datos experimentales (fila inferior) exhiben el comportamiento típico de un sistema con elevada inercia mecánica: a medida que la frecuencia de oscilación aumenta, los puntos de dispersión colapsan progresivamente bajo una envolvente superior decreciente.

Esta divergencia encuentra su origen en la configuración física del banco de pruebas. Tal como se indicó en la subsección 3.1.3, el modelo de simulación considera únicamente el momento de inercia intrínseco del rotor, mientras que el sistema experimental incorpora además una máquina de corriente continua de 5,5 kW acoplada mecánicamente al eje. Debido a su construcción de mayor masa rotatoria, característica de máquinas de diseño más antiguo, el conjunto experimental posee una inercia total considerablemente superior a la representada en el modelo computacional.

Físicamente, esta masa inercial combinada actúa como un filtro mecánico pasabajos. Ante perturbaciones de alta frecuencia, la inercia del sistema amortigua los cambios de velocidad, reduciendo las fluctuaciones de deslizamiento y limitando, en consecuencia, la magnitud de las oscilaciones que logran proyectarse sobre el valor RMS de Δi_q . Esto explica por qué las perturbaciones de alta frecuencia presentan una respuesta electromagnética progresivamente atenuada en los resultados experimentales.

En términos prácticos, estos resultados sugieren que en accionamientos industriales con alta inercia mecánica total, la sensibilidad del diagnóstico basado en corrientes del estator tenderá a concentrarse principalmente en perturbaciones de baja frecuencia, ya que las oscilaciones rápidas pueden amortiguarse mecánicamente antes de manifestarse de forma significativa en las variables eléctricas.

5.2.5. Análisis de sensibilidad cruzada: Efecto de las oscilaciones de carga sobre el valor RMS de Δi_d

En esta subsección se explora empíricamente el comportamiento del indicador de falla frente a perturbaciones dinámicas externas, analizando la relación de sensibilidad cruzada entre las oscilaciones de carga mecánica y la componente de corriente en el eje directo. La Figura 5.35 contrasta el comportamiento simulado (fila superior) con las mediciones del laboratorio (fila inferior), evaluando la influencia tanto de la amplitud (T_{osc}) como de la frecuencia (f_{osc}) de la perturbación sobre el valor RMS de Δi_d .

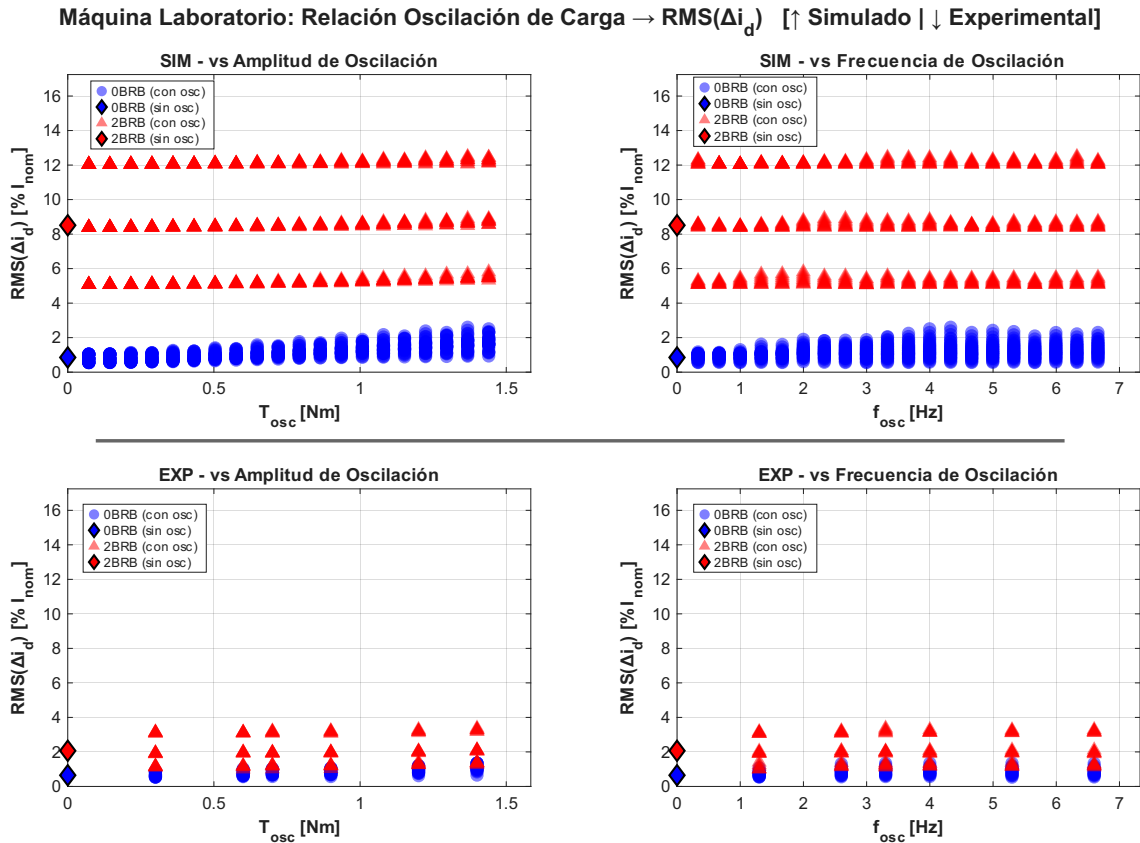


Figura 5.35: Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_d y las oscilaciones de carga.

Al analizar las gráficas, el hallazgo más trascendental es la notable estabilidad del indicador frente a la dinámica mecánica. Se observa de manera consistente, tanto en el entorno simulado como en el experimental, que la presencia de oscilaciones de carga no afecta en medida apreciable al valor RMS de Δi_d . Las tendencias se mantienen prácticamente constantes y horizontales al incrementar tanto la amplitud de la perturbación como su frecuencia de oscilación. Esta independencia dinámica confirma que las variaciones bruscas en el torque y el deslizamiento —que sí perturban severamente al eje en cuadratura— no logran acoplarse de forma significativa sobre el eje directo, preservando la firma de la falla.

Respecto al contraste cuantitativo entre ambas filas, la única diferencia apreciable radica en la magnitud absoluta de los valores: el modelo simulado proyecta niveles de Δi_d considerablemente más altos para la condición de 2 BRB en comparación con las mediciones reales. Sin embargo, como ya fue explorado y justificado en profundidad en la subsección [5.2.2](#), esta discrepancia responde a las idealizaciones matemáticas del modelo computacional y no invalida la tendencia fenomenológica. En síntesis, la planitud de estas curvas valida el valor RMS de Δi_d como un indicador de asimetrías de rotor altamente confiable y prácticamente inmune a las oscilaciones de carga.

5.2.6. Análisis de sensibilidad cruzada: Efecto de las barras rotas sobre el valor RMS de Δi_q

En esta subsección se invierte el análisis de sensibilidad cruzada para evaluar de qué manera la asimetría del rotor (barras rotas) interfiere o se refleja sobre el eje en cuadratura, el cual teóricamente debería estar dominado de forma exclusiva por las perturbaciones de la carga. La Figura 5.36 ilustra esta relación contrastando el entorno simulado (fila superior) frente a las mediciones experimentales (fila inferior). Las gráficas detallan tanto la distribución de los datos según la condición de oscilación (diagramas de caja a la izquierda) como el efecto del nivel de carga base sobre los rangos y promedios operativos (barras de error a la derecha).

Máquina Laboratorio: Relación Barras Rotas \rightarrow RMS(Δi_q) [\uparrow Simulado | \downarrow Experimental]

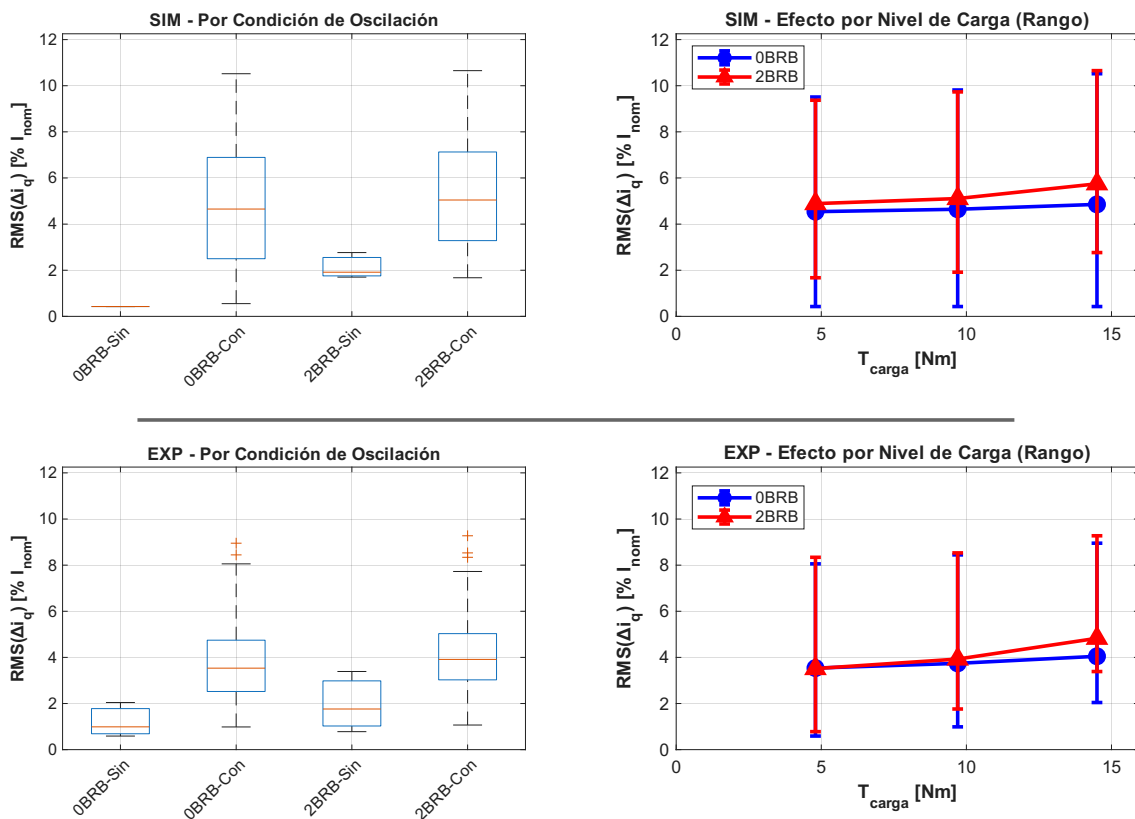


Figura 5.36: Análisis de sensibilidad cruzada entre el valor RMS de Δi_q y la cantidad de barras rotas.

Al evaluar las tendencias centrales de los datos, se constata un comportamiento cualitativo sumamente similar entre el entorno simulado y el experimental. En ambos escenarios, se evidencia que la presencia de la falla (2 BRB) ejerce un efecto apenas marginal sobre el valor RMS de Δi_q . Esta leve influencia ascendente en los promedios se manifiesta casi de manera exclusiva cuando la máquina opera a niveles de exigencia cercanos al torque nominal. Físicamente, esto ocurre porque a plena carga el deslizamiento del motor es mayor, incrementando la magnitud de las corrientes asimétricas en la jaula de ardilla y generando un pequeño torque pulsante base que se refleja tenuemente en el eje q . Por el

contrario, para niveles de carga mecánicos bajos (33,3%), el efecto de las barras rotas sobre el valor RMS de Δi_q se vuelve prácticamente imperceptible, confirmando que esta variable no es apta para diagnosticar la falla.

La diferencia más sustancial entre el modelo matemático y la realidad física radica en la magnitud de los rangos de dispersión (barras de error). Se observa claramente que el rango de fluctuación de Δi_q en los datos simulados es considerablemente más amplio que en los resultados experimentales. Esta divergencia cuantitativa confirma y refuerza la conclusión extraída en la subsección 5.2.4: el momento de inercia aumentado presente en el banco de pruebas de laboratorio —producto del acoplamiento con la máquina de corriente continua— actúa como un severo filtro pasabajos. Esta enorme masa rotatoria impide que las perturbaciones mecánicas de carga logren generar grandes variaciones libres de velocidad, acotando drásticamente las fluctuaciones del deslizamiento real y, por consiguiente, restringiendo los rangos de variación de la corriente en cuadratura a bandas mucho más estrechas que las predichas por la simulación de baja inercia.

5.2.7. Evaluación de la separabilidad de fallas mediante el plano bidimensional Δi_d vs Δi_q

En esta subsección se consolida la validación empírica de la metodología de diagnóstico propuesta, evaluando la distribución conjunta de los indicadores en el plano bidimensional. La Figura 5.37 ilustra los mapas de dispersión del valor RMS de Δi_d (eje vertical) frente al valor RMS de Δi_q (eje horizontal), segmentando los resultados en tres columnas de acuerdo con el nivel de carga mecánica base (aproximadamente 33,3%, 66,7% y 100% del torque nominal). Siguiendo la estructura establecida, se contrasta la operación simulada (fila superior) con las mediciones experimentales (fila inferior).

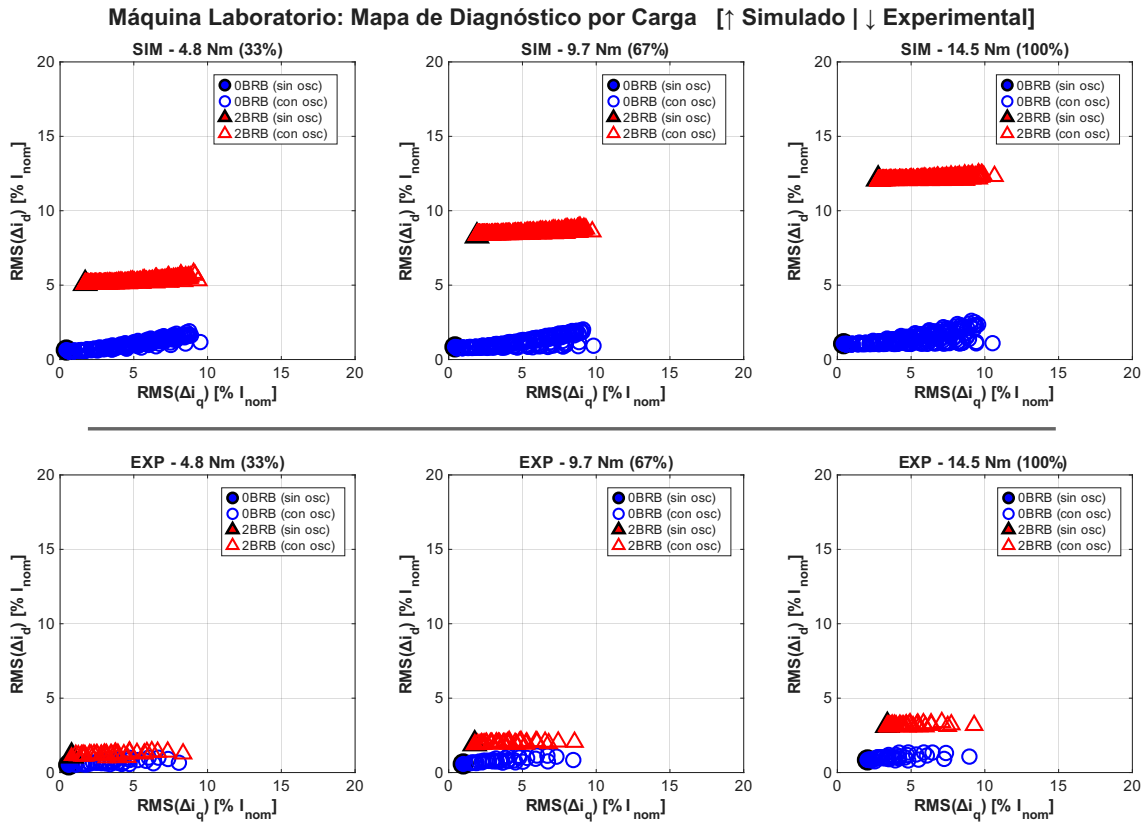


Figura 5.37: Mapa de diagnóstico bidimensional simulado y experimental para distintos niveles de carga.

Al analizar la capacidad de clasificación en el eje vertical (Δi_d), se corrobora que el entorno simulado proyecta una separación nítida e idealizada entre las condiciones de 0 y 2 BRB transversalmente a todas las cargas. Sin embargo, al observar los resultados experimentales, se evidencia que esta distancia diagnóstica se reduce considerablemente. En regímenes de baja exigencia mecánica (33,3 %), existe una superposición evidente entre los puntos de la máquina sana y la defectuosa, dificultando un diagnóstico certero en esa zona operativa. No obstante, a medida que el sistema se aproxima a la carga nominal, el incremento en el deslizamiento amplifica el desequilibrio en el rotor real, logrando restablecer una separación vertical satisfactoria en el banco de pruebas.

Por otro lado, la lectura del eje horizontal (Δi_q) revela un comportamiento complementario. Si bien se advierte que un mayor nivel de carga base eleva levemente el “piso” mínimo de las mediciones en este eje, resulta concluyente que el indicador Δi_q es incapaz de separar la condición de 0 BRB frente a la de 2 BRB, generando un solapamiento masivo de los estados. Esta incapacidad de clasificación en el eje horizontal es precisamente lo que valida el método bidimensional propuesto: demuestra empíricamente que la corriente en cuadratura absorbe casi en su totalidad las fluctuaciones de carga sin contaminar de sobremanera la lectura de magnetización, ratificando de forma categórica que el valor RMS de Δi_d debe emplearse como el indicador primario y exclusivo para la detección de asimetrías de rotor.

5.2.8. Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia

En esta subsección se desglosa la interacción dinámica conjunta de las perturbaciones mecánicas, analizando el impacto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q , pero separando el comportamiento según la frecuencia a la que ocurre dicha perturbación. La Figura 5.38 presenta las curvas de tendencia promedio para cada frecuencia evaluada, contrastando nuevamente el entorno de simulación (fila superior) frente a los resultados empíricos del laboratorio (fila inferior).

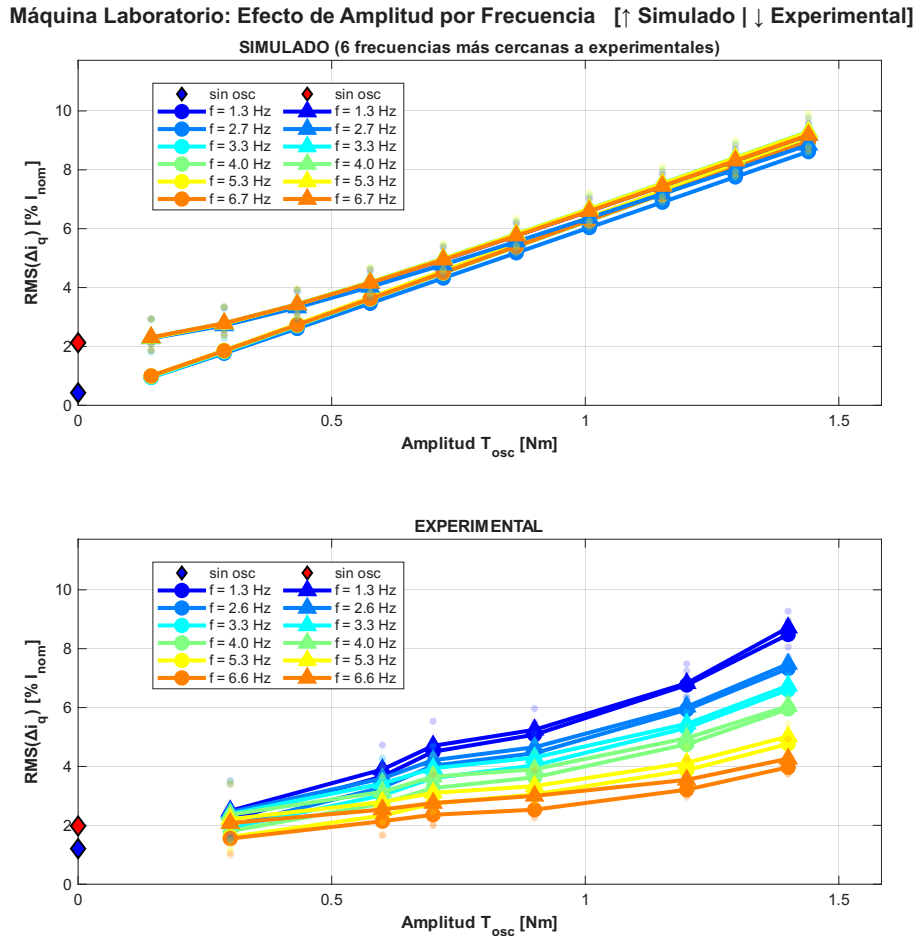


Figura 5.38: Efecto de la amplitud de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por frecuencia.

Al evaluar las gráficas, se constata como primera premisa que ambos entornos comparten la tendencia macroscópica principal discutida en subsecciones previas: independientemente de la frecuencia evaluada, un incremento sostenido en la amplitud de la oscilación (T_{osc}) se traduce invariablemente en un mayor valor RMS de Δi_q . Sin embargo, la forma en que el sistema procesa las distintas frecuencias revela una profunda divergencia dinámica entre el modelo matemático y el motor real.

En los datos simulados, se observa una notable superposición de las curvas; las respuestas correspondientes a las distintas frecuencias de oscilación se agrupan en un haz estrecho

para una misma cantidad de barras rotas. Esto indica que el modelo computacional —al poseer un bajo momento de inercia configurado— resulta altamente sensible a la amplitud, pero relativamente insensible a la rapidez de la perturbación. Por el contrario, en los datos experimentales, el parámetro de frecuencia introduce una dramática separación vertical de las curvas. Se evidencia de forma nítida que, frente a una misma amplitud de oscilación exigida, las perturbaciones de alta frecuencia inducen valores RMS de Δi_q sustancialmente menores. Este comportamiento empírico ratifica de manera concluyente el fenómeno analizado en la subsección [5.2.4](#): la masa rotatoria del banco de pruebas físico actúa como un filtro mecánico pasabajos, amortiguando físicamente las fluctuaciones de alta frecuencia y suprimiendo su capacidad de perturbar el deslizamiento y la corriente de estator.

5.2.9. Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud

En esta subsección se aborda la perspectiva complementaria de la dinámica oscilatoria, analizando el impacto de la frecuencia de oscilación (f_{osc}) sobre el valor RMS de Δi_q , categorizado según la amplitud de la perturbación mecánica. La Figura [5.39](#) despliega las curvas de tendencia promedio para cada nivel de amplitud evaluado, estableciendo el contraste directo entre las predicciones del modelo simulado (fila superior) y las mediciones obtenidas en el banco de pruebas (fila inferior).

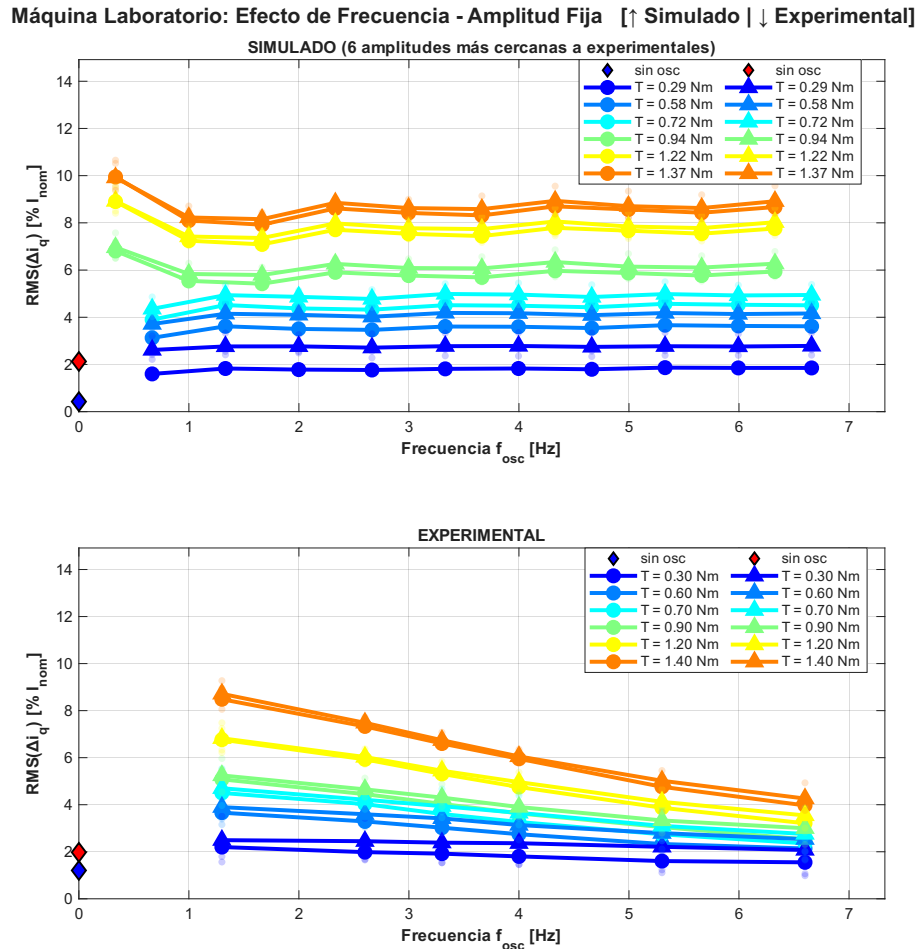


Figura 5.39: Efecto de la frecuencia de oscilación sobre el valor RMS de Δi_q parametrizado por amplitud.

Al examinar las gráficas, resalta de inmediato la disparidad en el comportamiento del sistema a altas tasas de oscilación. Tal como se ha fundamentado en las subsecciones precedentes, los resultados experimentales exhiben una pronunciada envolvente superior decreciente: a medida que la frecuencia aumenta, las curvas colapsan hacia valores RMS de Δi_q notablemente menores, sin importar la amplitud exigida. Este fenómeno, ausente en las simulaciones (donde las curvas se mantienen relativamente horizontales y separadas), confirma que el modelo matemático no contempla la inercia masiva que aporta la máquina de corriente continua acoplada en el laboratorio, la cual actúa en la realidad física como un severo amortiguador mecánico pasabajos frente a fluctuaciones rápidas.

A pesar de esta divergencia en la zona de alta frecuencia, resulta destacable que, en el espectro de bajas frecuencias, los resultados empíricos y simulados presentan magnitudes comparables y tendencias análogas, evidenciándose una alta convergencia especialmente bajo la condición de falla (2 BRB). En esta zona operativa lenta, la masa del rotor físico sí logra seguir la perturbación mecánica, reflejando la oscilación real en la corriente de estator de forma acorde al modelo.

Por otro lado, al analizar la máquina sana (0 BRB) operando sin oscilaciones externas ($f_{osc} = 0$), se observa que el “piso” o límite inferior de los valores RMS experimentales

es mayor que su contraparte simulada. Esta discrepancia basal probablemente se relaciona con múltiples fenómenos no idealizados presentes en el entorno físico de laboratorio. Factores como desbalances de tensión, distorsión armónica en la red eléctrica, asimetrías constructivas menores del motor y vibraciones mecánicas del eje pueden inducir fluctuaciones continuas en la corriente real, elevando el nivel basal de Δi_q respecto al entorno de simulación idealizado.

Dentro de estas fuentes no idealizadas, la distorsión armónica de la tensión de red aparece como una explicación técnicamente consistente para el aumento observado del piso basal. Las mediciones realizadas mediante el analizador de redes de la Figura 5.40 registraron contenido armónico de entre el 1% y el 5% del fundamental en los órdenes 3, 5, 7, 9 y 15, mientras que el desbalance de amplitud entre fases resultó inferior al 0,5%, sugiriendo que la secuencia negativa asociada al desbalance de tensión no sería el fenómeno dominante.

En particular, los armónicos de orden 5, 7 y 11 — los de mayor contenido energético dentro del espectro medido que no inducen corrientes de secuencia cero — corresponden a secuencias negativa, positiva y negativa, respectivamente. Desde un punto de vista electromagnético, estos armónicos pueden interactuar con el campo fundamental y generar componentes pulsantes de torque, las cuales podrían proyectarse sobre la componente i_q en el marco de referencia sincrónico $d-q$. Dado que esta perturbación basal no está presente en el modelo computacional, resulta razonable considerar que contribuya parcialmente al incremento del valor mínimo de Δi_q observado experimentalmente incluso en condición sana y sin oscilación externa.

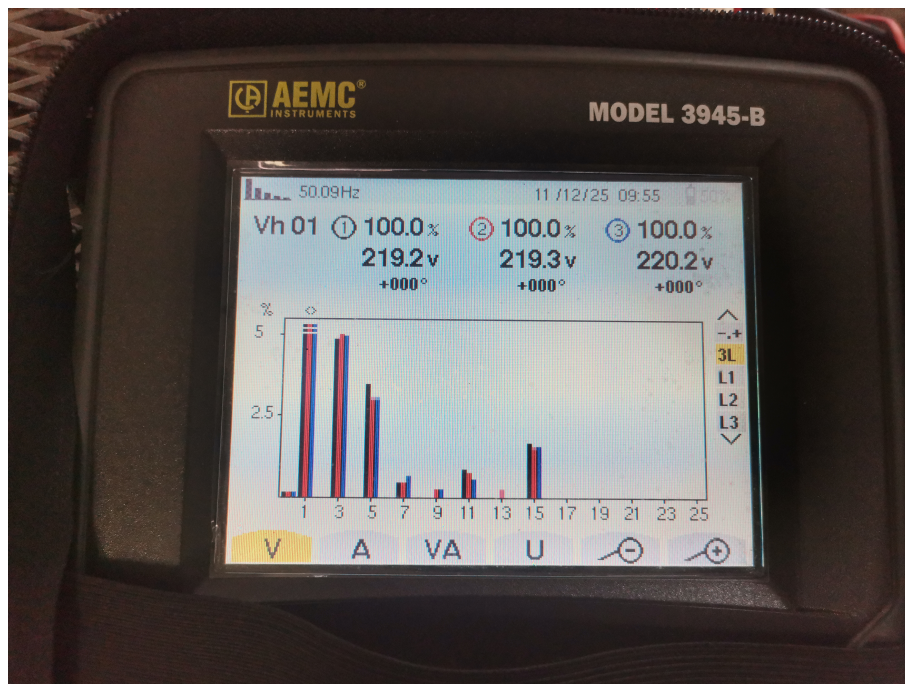


Figura 5.40: Espectro armónico de tensión medido en la alimentación trifásica del banco experimental mediante analizador de redes.

5.2.10. Evaluación del valor RMS de Δi_q como indicador de oscilación de carga mediante métricas de clasificación

En esta subsección final se evalúa la viabilidad del valor RMS de Δi_q como una herramienta de diagnóstico binario para detectar la presencia de perturbaciones mecánicas oscilatorias. Para establecer la frontera de decisión entre un estado estable y uno oscilante, se ha fijado un umbral global normalizado de 4,17%, cuya deducción y optimización se detallarán en los apartados posteriores. La Figura 5.41 presenta los histogramas de distribución para este indicador, contrastando el desempeño del clasificador en el entorno simulado (fila superior) frente a las mediciones en laboratorio (fila inferior) bajo distintos niveles de carga base.

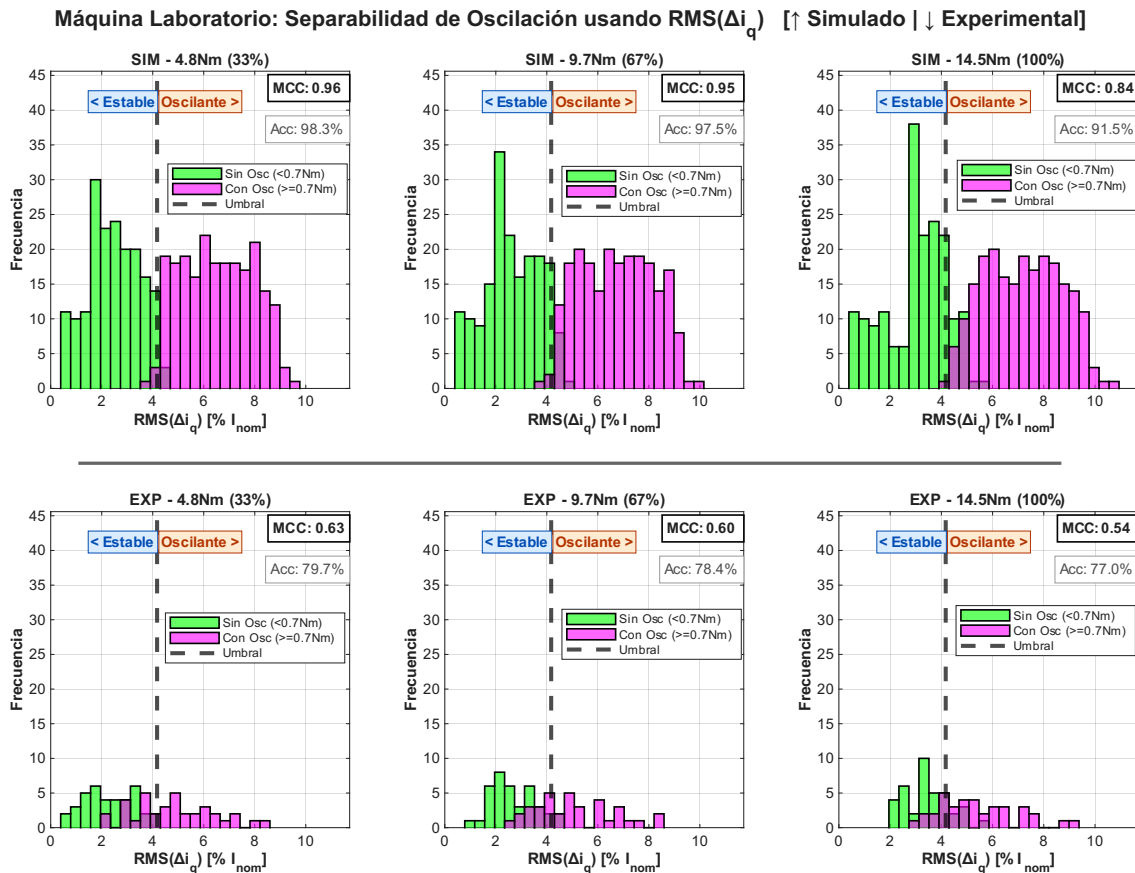


Figura 5.41: Desempeño de clasificación del valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones (simulado vs. experimental).

Al evaluar las métricas estadísticas, más allá de la evidente diferencia en la densidad muestral, resalta de inmediato una divergencia sustancial en el rendimiento del clasificador. Las predicciones del modelo simulado exhiben un diagnóstico altamente efectivo, logrando separar de forma nítida los escenarios con y sin oscilación, lo cual se refleja en valores del Coeficiente de Correlación de Matthews (MCC) superiores a 0,80. En contraste, la validación experimental revela un solapamiento mucho más pronunciado en la frontera de decisión; los falsos positivos y falsos negativos aumentan, limitando el valor máximo de MCC empírico a niveles inferiores a 0,65. Si bien estas cifras experimentales siguen representando un indicador de diagnóstico funcional y estadísticamente válido, evidencian

de manera innegable que las proyecciones del entorno simulado son excesivamente optimistas. La máquina real, al estar sujeta a ruidos en la medición y dinámicas cruzadas no modeladas, introduce una varianza que difumina los límites del umbral ideal.

A pesar de esta discrepancia en la exactitud global (Acc) y en el MCC, existe una tendencia fenomenológica crucial que ambos entornos comparten y confirman mutuamente: la precisión del diagnóstico se degrada progresivamente a medida que se incrementa el nivel de carga mecánica base. Tanto en la simulación como en el banco de pruebas, el aumento del torque exigido amplifica de manera natural las fluctuaciones basales de la corriente en cuadratura (incluso en ausencia de oscilación externa). Este incremento del piso de ruido provoca que los escenarios de oscilación leve se mezclen inevitablemente con el estado estable a alta carga, dificultando la clasificación y demostrando que el umbral estático de Δi_q pierde resolución diagnóstica en regímenes de alta exigencia mecánica.

5.3. Determinación de cotas óptimas para el diagnóstico

En esta sección se consolida la propuesta metodológica de la presente memoria, traduciendo el análisis fenomenológico previo en un conjunto de fronteras numéricas fundamentadas estadísticamente. Dado que en la siguiente sección se detallará la arquitectura y ejecución en línea del algoritmo de diagnóstico, el presente apartado se enfoca exclusivamente en la metodología empleada para extraer y calcular las cotas óptimas de clasificación, utilizando el consolidado de datos paramétricos de las máquinas industriales simuladas (máquinas 1, 2 y 3).

Para construir una herramienta de diagnóstico certero, el procesamiento de los datos y la búsqueda de los umbrales se estructuró en tres etapas analíticas:

1. **Determinación del umbral global de oscilación:** Se etiquetó la totalidad de las muestras simuladas en dos clases, definiendo como régimen dinámico oscilante aquellos escenarios sometidos a fluctuaciones de carga con una amplitud igual o superior al 5 % del torque nominal. Posteriormente, se ejecutó un barrido numérico iterativo sobre los valores RMS de Δi_q , seleccionando como umbral óptimo aquel valor que minimiza un error de clasificación ponderado de la forma

$$\mathcal{E} = \frac{w_{FP} \cdot FP + FN}{N_{muestras}}, \quad (5.1)$$

con $w_{FP} = 2$. Esta ponderación penaliza doblemente los falsos positivos respecto a los falsos negativos, priorizando un comportamiento conservador del sistema frente a falsas detecciones de oscilación de carga ya que el conjunto de datos simulados contiene más escenarios con oscilación que sin oscilación de carga.

2. **Identificación de los puntos operativos de carga:** Para establecer la base paramétrica sobre la cual el algoritmo aplicará su interpolación usando el valor RMS de i_q , fue necesario definir coordenadas numéricas exactas para los distintos niveles de exigencia. Para ello, se aislaron los conjuntos de datos operando al 33,3 %, 66,7 % y 100 % del torque nominal. Para calcular la medida de tendencia central de la corriente en cada grupo, se optó por utilizar la mediana en lugar del promedio aritmético. Esta decisión metodológica se fundamenta en la gran dispersión de datos generada al consolidar tres máquinas constructivamente distintas; al poseer parámetros

eléctricos e inercias diferentes, las respuestas de corriente varían incluso al mismo porcentaje de carga. Mientras que el promedio es sensible a esta varianza topológica y tiende a sesgarse hacia el motor con respuestas más extremas, la mediana presenta menor sesgo respecto a variaciones extremas, identificando el verdadero centro de densidad operativa generalizada e impidiendo que puntos de anclaje se desvíen hacia máquinas con desviaciones atípicas.

- 3. Parametrización de las fronteras de falla:** El conjunto de datos fue segmentado exhaustivamente, conformando subgrupos según el régimen dinámico (estable u oscilante) y el nivel de carga (33,3 %, 66,7 % o 100 %). Dentro de cada uno de estos escenarios específicos, se contrastaron las distribuciones del valor RMS de Δi_d entre las condiciones de 0 frente a 1 BRB, y 1 frente a 2 BRB. Mediante un nuevo barrido numérico, se extrajeron las fronteras de decisión exactas minimizando el error de clasificación global (proporción mínima de falsos positivos y falsos negativos sumados), conformando así una matriz discreta de umbrales óptimos para cada esquema de accionamiento.

Cabe señalar que los umbrales determinados son específicos al conjunto de máquinas simuladas (máquinas 1, 2 y 3) y al rango de condiciones paramétricas exploradas. Debido a que dichos umbrales fueron calculados utilizando el mismo conjunto de datos empleado posteriormente en la evaluación, existe riesgo de sobreajuste respecto a las condiciones simuladas. En consecuencia, los errores de clasificación reportados representan una estimación optimista del desempeño esperado frente a máquinas con parámetros o perturbaciones distintas. Esta limitación se aborda parcialmente mediante la prueba de generalización sobre las máquinas de laboratorio presentada en la Sección [5.4.4](#).

5.3.1. Máquinas sin control

Para las máquinas operando en conexión directa a la red, el primer paso consistió en definir el límite para la detección de perturbaciones mecánicas. La Figura [5.42](#) ilustra la distribución de los valores RMS de Δi_q , superponiendo los escenarios operando a carga constante (estable) frente a aquellos sometidos a oscilaciones iguales o superiores al 5 % del torque nominal.

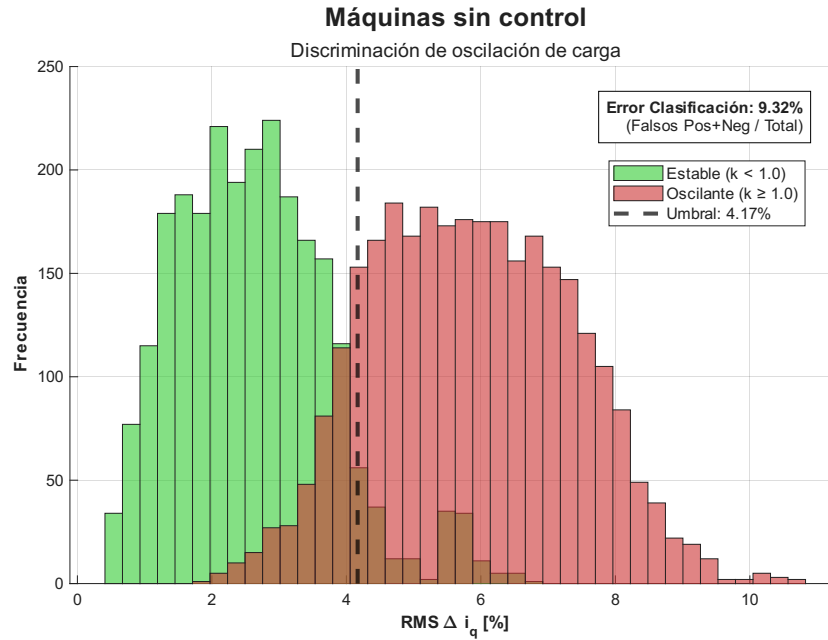


Figura 5.42: Distribución estadística y determinación del umbral óptimo en el valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones mecánicas (Máquinas sin control).

El análisis estadístico sobre la totalidad de los datos simulados en lazo abierto determinó que el umbral óptimo de separación se sitúa en un valor RMS de $\Delta i_q = 4,17\%$. Cabe señalar que, debido al natural solapamiento de las respuestas dinámicas en conexión directa a la red, la aplicación de esta cota conlleva un error de clasificación inherente del 9,32% (considerando la suma de falsos positivos y negativos). A pesar de este margen de error empírico, este valor actúa de manera efectiva como la primera frontera de decisión del algoritmo: cualquier magnitud superior advierte al sistema que el motor se encuentra sometido a un estrés dinámico externo.

Como segunda etapa, el algoritmo debe estimar el nivel de carga de la máquina para contextualizar la lectura de falla. La Figura 5.43 presenta la determinación del régimen de carga mediante la distribución estadística de los valores RMS de la corriente i_q (en por unidad).

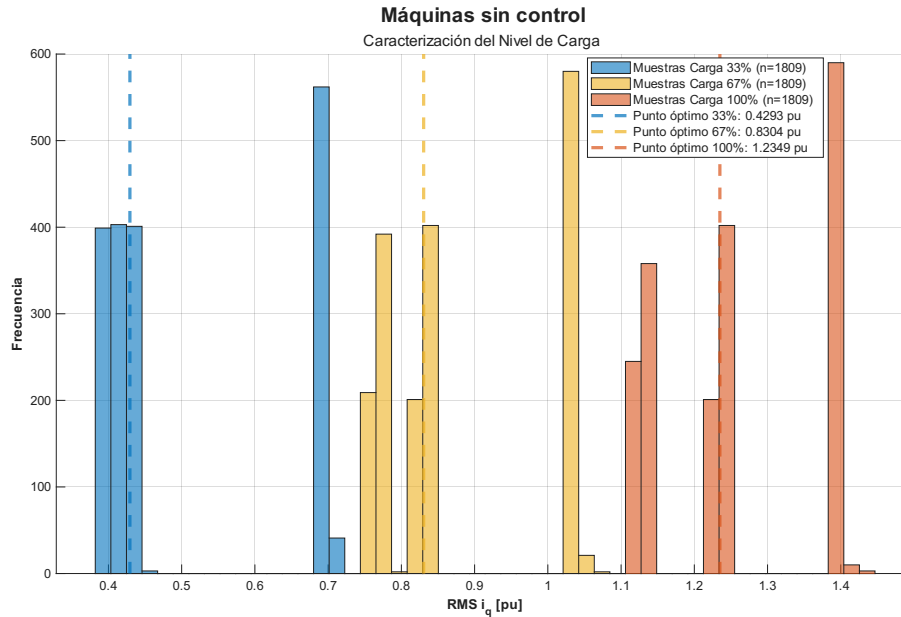


Figura 5.43: Distribución estadística y determinación de los puntos óptimos del nivel de carga mediante el valor RMS de i_q (Máquinas sin control).

En la gráfica se distinguen claramente tres agrupaciones correspondientes a los regímenes evaluados (33 %, 67 % y 100 % de la carga nominal). El cálculo de la tendencia central (mediana) para cada grupo arrojó como puntos óptimos de identificación los valores de 0,4293 pu, 0,8304 pu y 1,2349 pu, respectivamente. Estas magnitudes se establecen en el algoritmo como las coordenadas fijas del eje horizontal sobre las cuales se estructurará la interpolación de los umbrales de falla.

Una vez segregados los datos según la oscilación e identificados los puntos de anclaje para la carga, el algoritmo evalúa la severidad de la falla en el eje directo. La Figura 5.44 presenta los histogramas de distribución para el valor RMS de Δi_d , separando las mediciones según el número de barras rotas (0, 1 y 2 BRB).

Para cuantificar objetivamente la calidad de separación entre dos estados de salud consecutivos (por ejemplo, entre 0 y 1 BRB), el algoritmo de diagnóstico calcula un error de clasificación mínimo, cuyo porcentaje se reporta en la parte superior de cada subgráfico. Este indicador se obtiene mediante una búsqueda exhaustiva que evalúa 1000 umbrales candidatos distribuidos uniformemente entre los valores extremos de los conjuntos de datos que se comparan. Para cada umbral candidato, se contabilizan los falsos positivos (muestras del estado inferior que superan el límite) y los falsos negativos (muestras del estado superior que caen por debajo o igual al límite). La cota óptima definitiva (representada por la línea vertical divisoria) se fija exactamente en el umbral que minimiza la tasa de error global, definida como la suma total de equivocaciones dividida por el número total de muestras evaluadas. Por consiguiente, un error del 0 % indica una separación perfecta y libre de solapamiento entre las distribuciones.

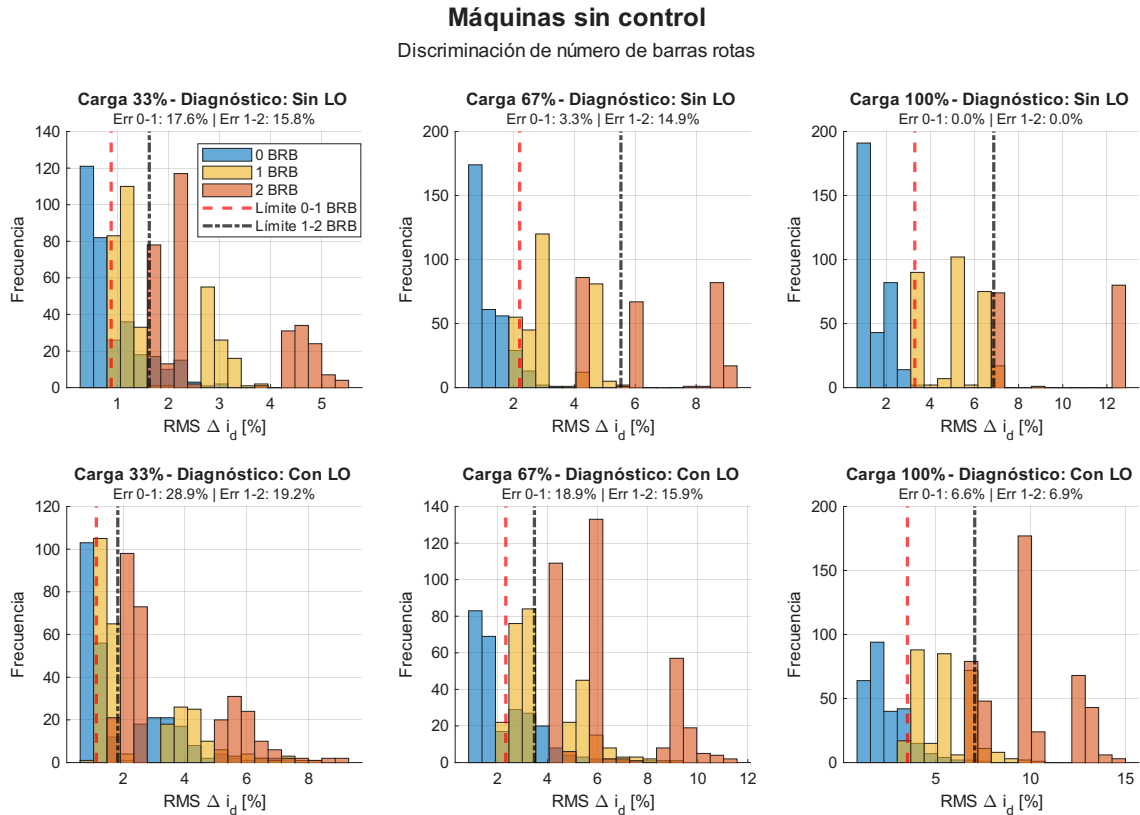


Figura 5.44: Distribución, cotas óptimas y errores de clasificación del valor RMS de Δi_d a distintos niveles de carga (Máquinas sin control).

Al observar la Figura 5.44, se evidencia numéricamente cómo el nivel de exigencia mecánica y la presencia de oscilaciones impactan la precisión y la certidumbre del diagnóstico. En regímenes de baja carga (33%), donde el deslizamiento es mínimo, las fronteras de decisión son estrechas y el solapamiento es severo. En estas condiciones sin oscilación, los errores de clasificación alcanzan un 17,6% (al discriminar entre 0 y 1 BRB) y un 15,8% (entre 1 y 2 BRB). Este escenario representa el peor caso operativo y se degrada aún más si la máquina presenta oscilaciones de carga simultáneas (Con LO), elevando el error de clasificación entre 0 y 1 BRB hasta un crítico 28,9%.

Sin embargo, a medida que el sistema transita hacia exigencias mayores, el incremento en el deslizamiento amplifica la firma electromagnética de la falla, distanciando los grupos y mitigando los errores de clasificación de forma drástica. Por ejemplo, al alcanzar un 67% de carga sin oscilación, el error de diagnóstico entre 0 y 1 BRB se desploma a tan solo un 3,3%.

5.3.2. Máquinas con control PI

La metodología de extracción de umbrales fue replicada para el consolidado de datos de las máquinas operando en lazo cerrado con control vectorial de velocidad. La Figura 5.45 expone la distribución respectiva para el eje en cuadratura frente a perturbaciones de carga bajo este esquema.

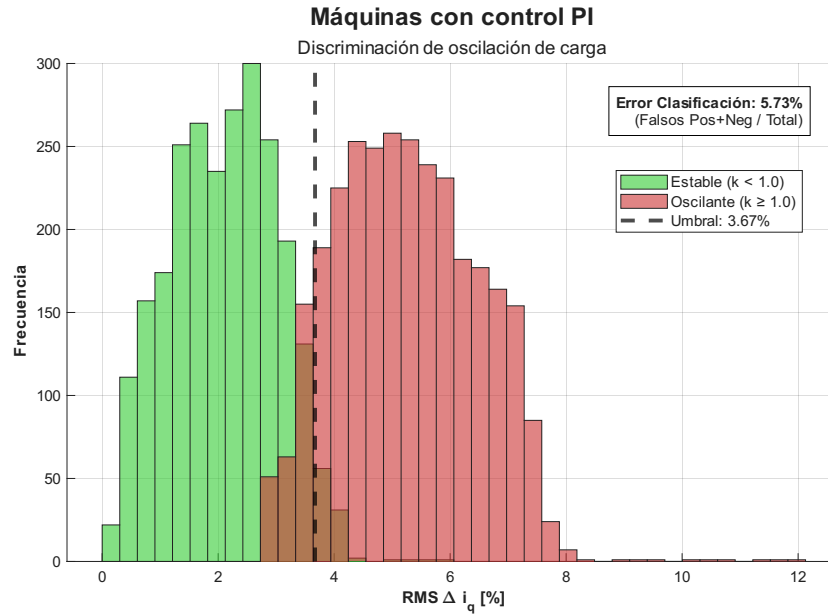


Figura 5.45: Distribución estadística, umbral óptimo y error de clasificación en el valor RMS de Δi_q para la detección de oscilaciones (Máquinas con control PI).

Para el régimen regulado por control PI, el umbral óptimo de oscilación se ajustó en un valor RMS de $\Delta i_q = 3,67\%$. Como primera gran mejora introducida por el esquema de control, la distribución de los datos se vuelve más predecible, reduciendo el error de clasificación global de detección de oscilaciones a un 5,73 % (en contraste con el 9,32 % obtenido sin control). La acción del controlador compensa activamente las variaciones de velocidad, acotando el esfuerzo de corriente y comprimiendo la distribución estadística de los datos hacia rangos de operación más definidos.

Para ejecutar la segunda etapa del diagnóstico, se procedió a determinar el estado de carga en este régimen regulado, tal como se observa en la Figura [5.46](#).

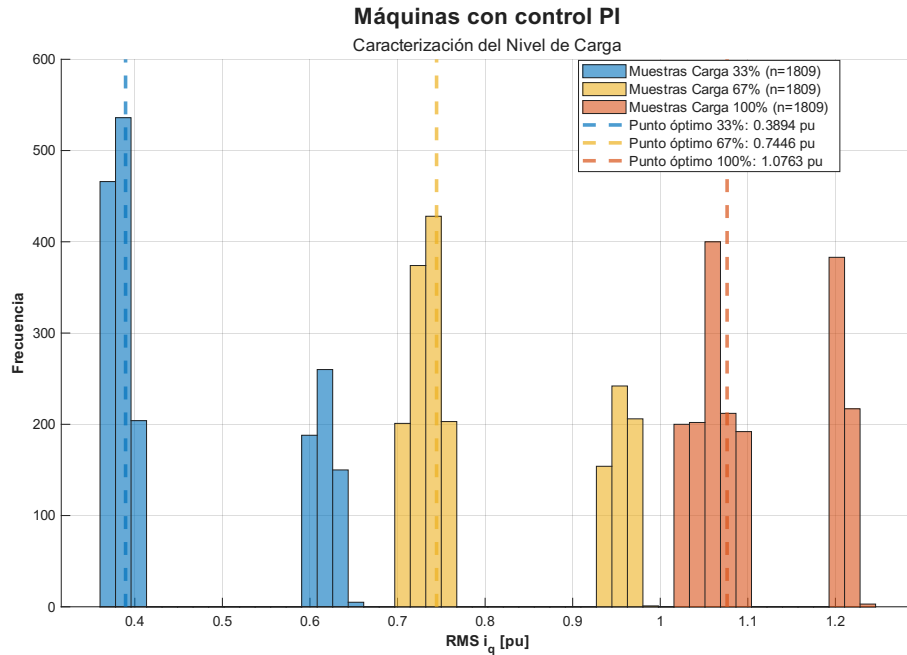


Figura 5.46: Distribución estadística y determinación de los puntos óptimos del nivel de carga mediante el valor RMS de i_q (Máquinas con control PI).

Al igual que en la operación a lazo abierto, el lazo de corriente i_q bajo control PI refleja fielmente la exigencia de torque, conformando tres agrupaciones claramente identificables correspondientes al 33 %, 67 % y 100 % de la carga nominal. El análisis estadístico arrojó como puntos óptimos de identificación para este esquema los valores de 0,3894 pu, 0,7446 pu y 1,0763 pu, respectivamente. Estas referencias constituyen los nodos exactos sobre los cuales el algoritmo efectuará la interpolación matemática de las cotas de falla, garantizando un ajuste preciso al estado real de la máquina.

Finalmente, la Figura 5.47 ilustra las fronteras de decisión paramétricas y las tasas de error para el indicador de asimetría de rotor (Δi_d) operando en lazo cerrado. Cabe destacar que los porcentajes de error de clasificación reportados en cada subgráfico fueron calculados utilizando la misma metodología de minimización de falsos positivos y falsos negativos detallada en la subsección anterior, lo que permite una comparación analítica directa y justa entre ambos esquemas de operación.

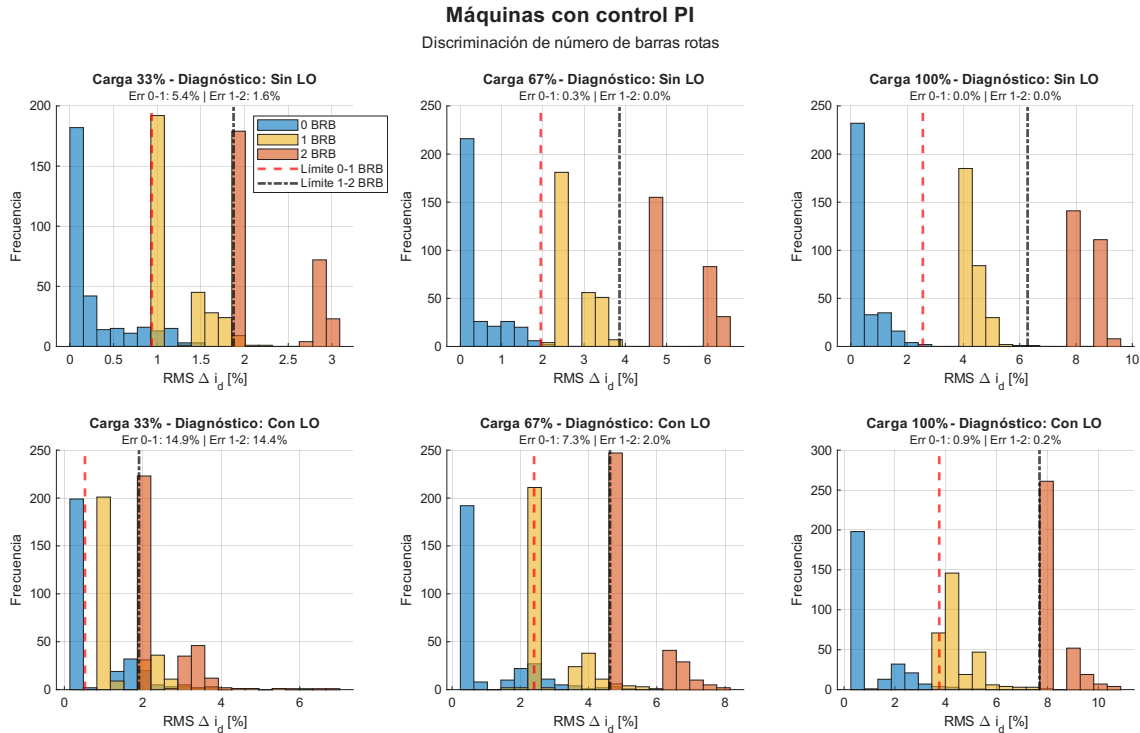


Figura 5.47: Distribución, cotas óptimas y reducción drástica de errores de clasificación del valor RMS de Δi_d a distintos niveles de carga (Máquinas con control PI).

La acción del control PI resulta extraordinariamente ventajoso para la certidumbre del diagnóstico. Al suprimir la dinámica cruzada y las fluctuaciones de baja frecuencia, los histogramas correspondientes a 0, 1 y 2 BRB exhiben grupos sumamente compactos y separados. Esta compresión se traduce en una caída drástica de las tasas de error. En el escenario más desfavorable (33% de carga sin oscilación), los errores caen a un 5,4% (0-1 BRB) y 1,6% (1-2 BRB), lo cual representa una mejora sustancial frente a los errores superiores al 15% del accionamiento sin control. Aún bajo la presencia de oscilaciones severas a baja carga, el error máximo se restringe a un 14,9%.

Más destacable aún es el desempeño del algoritmo a medida que aumenta la exigencia mecánica. A partir del 67% de la carga nominal, el error de diagnóstico prácticamente desaparece en el nivel de carga nominal, tanto en estado estable como oscilatorio.

5.4. Resultados del diagnóstico

En esta sección se evalúa la precisión de la estrategia de diagnóstico propuesta frente a escenarios operativos de alta complejidad. Para validar integralmente el algoritmo, se ejecutaron pruebas utilizando tanto simulaciones dinámicas orientadas a la evaluación continua como datos experimentales extraídos directamente del banco de pruebas en el laboratorio.

El algoritmo propuesto opera bajo una lógica de diagnóstico secuencial estructurada en tres etapas fundamentales:

1. **Detección de régimen dinámico:** Como primer filtro, se evalúa el valor RMS de

la componente fluctuante Δi_q frente al umbral global óptimo parametrizado. Esto permite clasificar el estado operativo de la máquina, determinando si se encuentra en un régimen mecánicamente estable o si está sometida a una oscilación de carga severa.

2. **Estimación del estado de carga:** Aprovechando la relación directamente proporcional entre el torque mecánico y la corriente en el eje en cuadratura, se utiliza el valor RMS de i_q para estimar el nivel de exigencia de la máquina. El algoritmo ubica el punto de operación actual comparándolo con los valores de anclaje óptimos.
3. **Clasificación de severidad de falla:** Una vez identificado el régimen dinámico y estimado el nivel de carga, se procede a evaluar el eje directo. El algoritmo interpola dinámicamente los umbrales de decisión para el valor RMS de Δi_d en función del estado de carga, permitiendo separar con alta resolución los escenarios de 0, 1 y 2 BRB bajo cualquier condición operativa instantánea.

5.4.1. Métricas de evaluación del desempeño

Para cuantificar la efectividad de la metodología propuesta y establecer un marco de referencia comparativo, los resultados obtenidos se contrastan frente a un método de diagnóstico extraído de la literatura [1] (denominado en adelante Método de Referencia), el cual basa su clasificación en una proporción o ratio fijo entre las amplitudes de las componentes de magnetización y torque (Ratio $\Delta i_d/\Delta i_q = 1, 19$).

Adicionalmente, resulta pertinente contextualizar conceptualmente la metodología propuesta respecto al enfoque clásico de diagnóstico industrial basado en Análisis de Firma de Corriente del Motor (MCSA). Este método identifica fallas de barras rotas mediante el análisis espectral de las corrientes de estator, buscando bandas laterales en torno a la frecuencia fundamental asociadas al deslizamiento de la máquina. Sin embargo, bajo presencia simultánea de oscilaciones de carga y control vectorial en lazo cerrado, dichas componentes espectrales tienden a perder separabilidad física. Esto ocurre debido a que las perturbaciones mecánicas oscilatorias introducen armónicos de baja frecuencia que pueden superponerse con las bandas laterales asociadas a BRB, mientras que, en algunos casos, la acción del controlador FOC-PI atenúa activamente las oscilaciones de corriente y reduce la amplitud de las firmas espectrales de la falla. Como consecuencia, la detectabilidad del MCSA clásico se degrada precisamente en los escenarios operativos estudiados en este trabajo.

La metodología propuesta evita esta ambigüedad mediante la descomposición en el marco orientado con el enlace de flujo de rotor $d-q$, separando físicamente las perturbaciones asociadas a magnetización (Δi_d) y torque (Δi_q). Bajo este enfoque, las asimetrías eléctricas del rotor y las oscilaciones mecánicas se proyectan sobre ejes ortogonales distintos, preservando la separabilidad de sus firmas incluso en presencia de control vectorial y perturbaciones simultáneas.

Para el Método Propuesto (Cotas Óptimas), cuya arquitectura basada en umbrales de magnitud absoluta permite filtrar el ruido basal y evaluar la severidad de la falla de forma ortogonal, se han definido los siguientes indicadores:

- **Precisión Total (BRB Exacto + LO):** Es la métrica más rigurosa del estudio. Representa el porcentaje de casos donde el algoritmo acertó simultáneamente tanto

en la cantidad exacta de barras rotas (0, 1 o 2 BRB) como en el estado dinámico de la carga (presencia o ausencia de oscilación, LO).

- **Precisión Detección Presencia BRB:** Evalúa la capacidad del algoritmo como un clasificador binario de salud del rotor. Mide el porcentaje de acierto al distinguir si la máquina está sana (0 BRB) o defectuosa (≥ 1 BRB), independientemente del nivel de severidad exacto o de la presencia de oscilaciones.
- **Precisión conteo Exacto BRB:** Indica el porcentaje de éxito exclusivo en la clasificación de severidad de la asimetría (acertar exactamente si hay 0, 1 o 2 BRB), aislando el desempeño del eje directo sin penalizar si el diagnóstico de oscilación fue incorrecto.
- **Precisión Detección Oscilación LO:** Refleja la efectividad del eje en cuadratura (primera etapa del algoritmo) para detectar perturbaciones mecánicas. Mide el acierto al clasificar si la carga es estable u oscilante, independientemente del estado de salud del rotor.

Por su parte, el Método de Referencia (Ratio 1,19) presenta una limitación matemática intrínseca y crítica: al basar su diagnóstico exclusivamente en la proporción entre dos señales sin considerar un umbral mínimo de magnitud, el algoritmo carece de un estado base o zona de operación “sana”. Incluso en un motor en perfectas condiciones (0 BRB y sin oscilación), las asimetrías constructivas naturales del rotor generan pequeñas corrientes residuales; al dividir estas señales de baja magnitud, el ratio resultante obliga matemáticamente al sistema a decantarse por una falla de rotor (si el ratio $> 1,19$) o una oscilación de carga (si el ratio $< 1,19$). Esto provoca un sobrediagnóstico crónico y falsos positivos permanentes. Para evaluar este método estático bajo sus propias restricciones lógicas, sus métricas homólogas se definen de la siguiente manera:

- **Precisión General (BRB o LO):** Mide el porcentaje de éxito global del método al aplicar su regla de ratio. Ya que el método es binario, cuando exista la condición de BRB y LO al mismo tiempo, el método siempre fallará.
- **Precisión Detección Presencia BRB:** Evalúa el éxito del método de referencia para advertir la existencia de una asimetría de rotor frente al total de los casos probados. Sin importar si hay LO o no.
- **Precisión Detección Oscilación LO:** Evalúa la capacidad del ratio estático para identificar correctamente la presencia de perturbaciones mecánicas externas frente al total de los casos probados. Sin importar si hay BRB o no.

A continuación, se presentan los resultados de precisión obtenidos al someter ambos enfoques a las bases de datos de validación.

5.4.2. Diagnóstico simulado - máquinas sin control

Para evaluar exhaustivamente el desempeño de la propuesta bajo un régimen de conexión directa a la red, se diseñó una batería de validación basada en simulaciones dinámicas aleatorias (enfoque de Monte Carlo). Este método permite someter al algoritmo a una

infinidad de combinaciones operativas, evitando el sesgo estadístico de evaluar únicamente puntos de operación discretos predefinidos.

Para garantizar la representatividad y el balance de los datos, cada set de evaluación (base de datos) se estructuró con exactamente 900 simulaciones independientes, manteniendo clases perfectamente equilibradas respecto a la asimetría del rotor: 300 casos evaluando la máquina sana (0 BRB), 300 casos con falla leve (1 BRB) y 300 casos con falla severa (2 BRB).

Para cada una de estas 900 simulaciones, las condiciones dinámicas del sistema se parametrizaron de forma completamente aleatoria utilizando distribuciones uniformes, bajo las siguientes reglas de generación:

- **Nivel de carga mecánica:** El punto de operación base se seleccionó al azar entre un límite inferior predeterminado para la prueba (0,3 pu o 0,75 pu) y la carga nominal de la máquina (1,0 pu).
- **Dinámica de la perturbación:** Para los escenarios oscilantes, tanto la amplitud de la oscilación (T_{osc}) como su frecuencia (f_{osc}) se dimensionaron aleatoriamente multiplicando los valores base característicos de cada máquina por un factor continuo variable entre 0,1 y 2,0 (10 % al 200 % de exigencia).
- **Condición de estabilidad:** Para asegurar que la primera etapa del algoritmo (detección de oscilación) sea desafiada adecuadamente frente a falsos positivos, se configuró un 10 % de probabilidad estricta de que el caso simulado no presentara oscilación alguna, operando en régimen mecánico estable.

Con el objetivo de demostrar la precisión del método, el análisis de estos escenarios aleatorios se ha dividido en dos fases evaluativas. En primer lugar, se evalúa el rendimiento sobre el conjunto de autovalidación (Máquinas 1, 2 y 3), correspondiente a los mismos motores utilizados para extraer las cotas óptimas. Posteriormente, se realiza una prueba de generalización sobre dos motores externos (Máquinas 220201077 y 220201091), evaluando la capacidad del método para emitir diagnósticos certeros en topologías que el algoritmo jamás había procesado previamente.

5.4.2.a. Evaluación de autovalidación (Máquinas 1, 2 y 3)

La Tabla [5.1](#) resume los porcentajes de precisión obtenidos tras evaluar los escenarios aleatorizados para este primer grupo de motores, contrastando el algoritmo propuesto frente al método de referencia estático. Los resultados se segmentan según el rango de carga aleatoria exigida ($> 0,3$ pu y $> 0,75$ pu).

Tabla 5.1: Rendimiento del diagnóstico en el conjunto de autovalidación (Máquinas 1, 2 y 3).

Metodología	Métrica de Evaluación	Rango > 0,3 pu	Rango > 0,75 pu
Método Propuesto (Cotas Óptimas)	Precisión Total (BRB Exacto + LO)	78,78 %	83,11 %
	Precisión Detección Presencia BRB	94,78 %	98,00 %
	Precisión Conteo Exacto BRB	88,11 %	93,11 %
	Precisión Detección Oscilación LO	89,89 %	90,00 %
Método Referencia (Ratio 1,19)	Precisión General (Excluyente)	42,56 %	47,67 %
	Precisión Detección Presencia BRB	63,00 %	72,67 %
	Precisión Detección Oscilación LO	68,89 %	72,22 %

El análisis de esta primera tabla expone de forma categórica la superioridad del método bidimensional propuesto. A pesar del estrés dinámico introducido por la aleatorización de variables, la métrica más estricta de todas (Precisión Total) alcanza casi un 79 % en todo el rango operativo, y sube a un 83,11 % en regímenes de alta carga. Sin embargo, el dato de mayor relevancia industrial es la Detección de Presencia BRB: el algoritmo logra identificar que el motor tiene algún nivel de asimetría en el 98,00 % de los casos (para > 0,75 pu), demostrando ser una herramienta de monitoreo de condición sumamente confiable y resistente a las falsas alarmas provocadas por fluctuaciones cruzadas.

Por el contrario, el Método de Referencia exhibe un colapso predictivo evidente bajo esta metodología de evaluación aleatoria. Su Precisión General no logra superar el 48 % en el mejor de los escenarios. Tal como se justificó teóricamente, su naturaleza excluyente —basada en un único ratio divisorio— provoca que, ante la presencia simultánea de oscilación y barras rotas (condición altamente probable en este barrido Monte Carlo), la masiva inyección energética en el denominador (Δi_q) invisibilice la asimetría del rotor, reduciendo drásticamente su capacidad de detectar fallas y cayendo a un deficiente 63 % de acierto global a carga variable.

5.4.2.b. Prueba de generalización (Máquinas 220201077 y 220201091)

Para comprobar que los umbrales calculados matemáticamente no generaron un sobreajuste sobre las máquinas de calibración, el algoritmo se ejecutó sin ninguna modificación ni re-entrenamiento sobre un nuevo set aleatorio de 900 simulaciones aplicadas a dos motores asincrónicos totalmente distintos. Los resultados se exponen en la Tabla [5.2](#).

Tabla 5.2: Rendimiento del diagnóstico en el conjunto de generalización (Máquinas 220201077 y 220201091).

Metodología	Métrica de Evaluación	Rango > 0,3 pu	Rango > 0,75 pu
Método Propuesto (Cotas Óptimas)	Precisión Total (BRB Exacto + LO)	91,67 %	93,67 %
	Precisión Detección Presencia BRB	99,11 %	100,00 %
	Precisión Conteo Exacto BRB	96,11 %	100,00 %
	Precisión Detección Oscilación LO	95,56 %	93,67 %
Método Referencia (Ratio 1,19)	Precisión General (Excluyente)	44,22 %	49,00 %
	Precisión Detección Presencia BRB	66,33 %	75,89 %
	Precisión Detección Oscilación LO	70,22 %	71,11 %

De manera sumamente destacable, el algoritmo propuesto no solo logró generalizar el diagnóstico de forma impecable, sino que elevó su rendimiento a niveles de excelencia. Para el rango de alta carga operativa ($> 0,75$ pu), expuesto a condiciones de torque y oscilación completamente aleatorias, el algoritmo alcanzó un 100,00 % de precisión absoluta tanto en la detección de la presencia de la falla como en el conteo exacto de las barras rotas, obteniendo un acierto total simultáneo del 93,67 %. Este incremento en el desempeño respecto al grupo de calibración valida definitivamente la precisión de la etapa de estimación de carga (Paso 2): la interpolación matemática dinámica de las fronteras de falla utilizando el valor RMS de i_q se adapta de manera universal a topologías desconocidas.

El método de referencia, evaluado sobre este mismo ecosistema de datos independientes y aleatorizados, continuó demostrando sus deficiencias estructurales, estancándose por debajo del 50 % de precisión general. En síntesis, estos resultados confirman de forma contundente que la estrategia de evaluación bidimensional secuencial, combinada con la lectura absoluta de magnitud y la parametrización interpolada, resuelve cabalmente el problema de diagnóstico en motores de inducción sujetos a condiciones severas y variables.

5.4.3. Diagnóstico simulado - máquinas con control PI

Con el propósito de evaluar la precisión del algoritmo sobre esquemas de accionamiento industriales regulados, se procedió a repetir la batería de validación aleatorizada de Monte Carlo (900 simulaciones por set), pero esta vez implementando un control vectorial de velocidad de tipo PI en lazo cerrado.

Es importante destacar una consideración metodológica crucial para esta subsección: el análisis de simulaciones con control PI se restringió exclusivamente al conjunto de autovalidación (Máquinas 1, 2 y 3).

La Tabla 5.3 resume los porcentajes de precisión obtenidos al someter el algoritmo propuesto y el método de referencia estático al estrés de la carga variable y las oscilaciones bajo el régimen regulado.

Tabla 5.3: Rendimiento del diagnóstico con Control PI en el conjunto de autovalidación (Máquinas 1, 2 y 3).

Metodología	Métrica de Evaluación	Rango $> 0,3$ pu	Rango $> 0,75$ pu
Método Propuesto (Cotas Óptimas)	Precisión Total (BRB Exacto + LO)	81,00 %	87,22 %
	Precisión Detección Presencia BRB	96,89 %	99,67 %
	Precisión Conteo Exacto BRB	85,44 %	93,56 %
	Precisión Detección Oscilación LO	94,78 %	92,89 %
Método Referencia (Ratio 1,19)	Precisión General (Excluyente)	40,78 %	45,11 %
	Precisión Detección Presencia BRB	60,33 %	72,22 %
	Precisión Detección Oscilación LO	68,78 %	70,11 %

El análisis de estos resultados confirma empíricamente la fenomenología descrita durante el proceso de extracción de umbrales. La presencia del lazo de control PI representa una mejora sistémica sustancial para la efectividad del Método Propuesto. Al comparar estas métricas con las obtenidas en conexión directa a la red (Tabla 5.1), se observa que la Precisión Total experimenta un incremento general, alcanzando un notable 87,22 % en el régimen de alta exigencia mecánica.

La mejora más trascendental se manifiesta en la precisión de detección de la oscilación LO, la cual alcanza casi un 95 % en el espectro de baja carga, en contraste con el 90 % obtenido para las mismas máquinas en el caso sin control. Físicamente, la acción del controlador suprime la dinámica cruzada de baja frecuencia y compensa las variaciones de velocidad, comprimiendo la dispersión de las corrientes y permitiendo que los umbrales de diagnóstico operen sobre señales mucho más deterministas. Esto se refleja directamente en la detección de presencia de BRB, que alcanza un 99,67 % ($> 0,75$ pu), confirmando que el algoritmo diseñado logra su máxima confiabilidad cuando se implementa sobre máquinas controladas.

En agudo contraste, el Método de Referencia evidencia un deterioro en su desempeño respecto al escenario sin control, cayendo a una precisión general alarmante que oscila entre el 40 % y el 45 %. Esta degradación es la prueba definitiva de su fragilidad matemática: el control PI, en su esfuerzo por mantener la velocidad constante, inyecta y altera la magnitud de las corrientes, distorsionando la amplitud de los peaks en el espectro frecuencial.

5.4.4. Validación empírica - Diagnóstico sobre datos experimentales

Para concluir el proceso de evaluación, se sometió al algoritmo a la prueba más exigente del estudio: la validación con datos experimentales reales obtenidos en el banco de pruebas del laboratorio. El objetivo fundamental de este ensayo es determinar si un algoritmo parametrizado e interpolado exclusivamente con datos de simulación matemática es capaz de transferir sus reglas de decisión de manera directa a un motor físico sometido a condiciones severas en la vida real.

El conjunto de datos empíricos consta de 222 mediciones, equitativamente distribuidas en 111 muestras de la máquina en estado sano (0 BRB) y 111 muestras operando con falla severa (2 BRB). A diferencia de las simulaciones de validación previas, el diagnóstico se puso a prueba utilizando estrictamente las mediciones que se capturaron para comparar fenomenológicamente los resultados simulados y experimentales. Es decir, no existe aleatoriedad intencional en la cantidad de carga mecánica ni en la frecuencia o amplitud de oscilación.

La Tabla 5.4 resume el rendimiento global de ambos métodos (Propuesto y Referencia) al procesar la totalidad de la base de datos experimental utilizando los umbrales precalculados en el entorno simulado.

Tabla 5.4: Rendimiento global del diagnóstico sobre datos experimentales reales (222 muestras).

Metodología	Métrica de Evaluación	Aciertos	Precisión (%)
Método Propuesto (Cotas Simuladas)	Precisión Total (BRB Exacto + LO)	87	39,19 %
	Precisión Detección Presencia BRB	111	50,00 %
	Precisión Conteo Exacto BRB	111	50,00 %
	Precisión Detección Oscilación LO	174	78,38 %
Método Referencia (Ratio 1,19)	Precisión General (Excluyente)	88	39,64 %
	Precisión Detección Presencia BRB	112	50,45 %
	Precisión Detección Oscilación LO	174	78,38 %

Al examinar las métricas globales, se evidencia una caída dramática en la precisión general de ambos métodos, rondando apenas el 39%. Sin embargo, para comprender la fenomenología electromecánica detrás de este resultado aparentemente deficiente, es imperativo desglosar el rendimiento evaluando separadamente el comportamiento del eje en cuadratura (dinámica de carga) frente al eje directo (firma de falla).

5.4.4.a. Análisis de la detección dinámica (Oscilación LO)

El resultado más revelador de esta validación se encuentra en la métrica de Detección de Oscilación LO. El método propuesto alcanzó un muy destacable 78,38% de precisión al identificar si el motor físico estaba bajo un régimen estable u oscilante, a pesar de estar utilizando el umbral global de $\Delta i_q = 4,17\%$ extraído de una simulación matemática genérica.

La Figura 5.48 presenta la dispersión de todos los datos experimentales, graficando la magnitud RMS de Δi_q frente al valor RMS de i_q . Sobre estos datos se superpone el umbral de oscilación constante extraído del simulador.

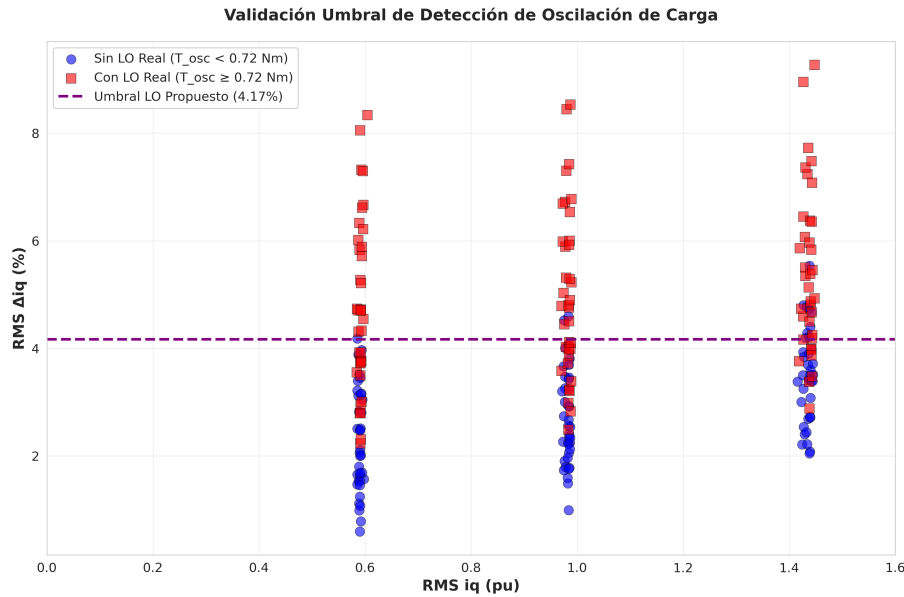


Figura 5.48: Dispersión de datos experimentales y frontera de decisión constante de Δi_q para la detección de oscilaciones.

Al observar la gráfica, se evidencia que la frontera simulada actúa como un límite horizontal que discrimina efectivamente entre regímenes con y sin perturbación de carga, logrando separación sin importar el nivel de carga base del motor.

El alto porcentaje de acierto demuestra empíricamente un pilar central de esta propuesta: la relación de transferencia de energía entre el torque mecánico externo y la fluctuación de la corriente en cuadratura es altamente determinista. El modelo electromecánico de PLECS logró replicar con excelente fidelidad esta dinámica macroscópica, permitiendo que un filtro de primera etapa calibrado computacionalmente funcione de manera generalizable en un entorno físico.

5.4.4.b. Análisis de la detección de falla (Presencia y Severidad BRB)

En contraste con el éxito logrado en el eje q , la clasificación de falla en el eje d experimentó un colapso en su precisión. La métrica de Presencia BRB resultó exactamente en un 50,00 %, lo que estadísticamente revela que el algoritmo detectó correctamente todos los casos sanos (111 verdaderos negativos) pero falló en todos los casos defectuosos (111 falsos negativos). Es decir, el algoritmo diagnosticó las 222 pruebas reales como “máquinas sanas”.

Este fenómeno no obedece a un error en la arquitectura del algoritmo ni a un fracaso del método de interpolación, sino que constituye una consecuencia directa del problema de calibración analizado en la Subsección 5.2.2. En particular, las amplitudes experimentales de Δi_d asociadas a BRB resultaron sistemáticamente menores a las obtenidas en simulación, especialmente bajo condiciones de alta carga. Como consecuencia, los umbrales derivados del modelo computacional exigían firmas de falla más intensas que las realmente observadas en el banco experimental, provocando que múltiples casos reales quedaran por debajo de la frontera de clasificación.

Una posible explicación física para esta discrepancia es que la máquina real presente trayectorias de conducción no consideradas en el modelo idealizado, producto de las perforaciones, las cuales podrían atenuar parcialmente la perturbación magnética reflejada en el estator. Bajo esta interpretación, la transferencia directa de umbrales desde simulación hacia datos experimentales introduce naturalmente una tendencia al subdiagnóstico.

Para ilustrar visualmente este colapso predictivo, las Figuras 5.49 y 5.50 presentan la dispersión completa de los datos experimentales en función del nivel de carga estimado (i_q en pu). Sobre estos puntos se superponen los umbrales dinámicos de severidad (0-1 BRB y 1-2 BRB) que el algoritmo interpola matemáticamente por tramos.

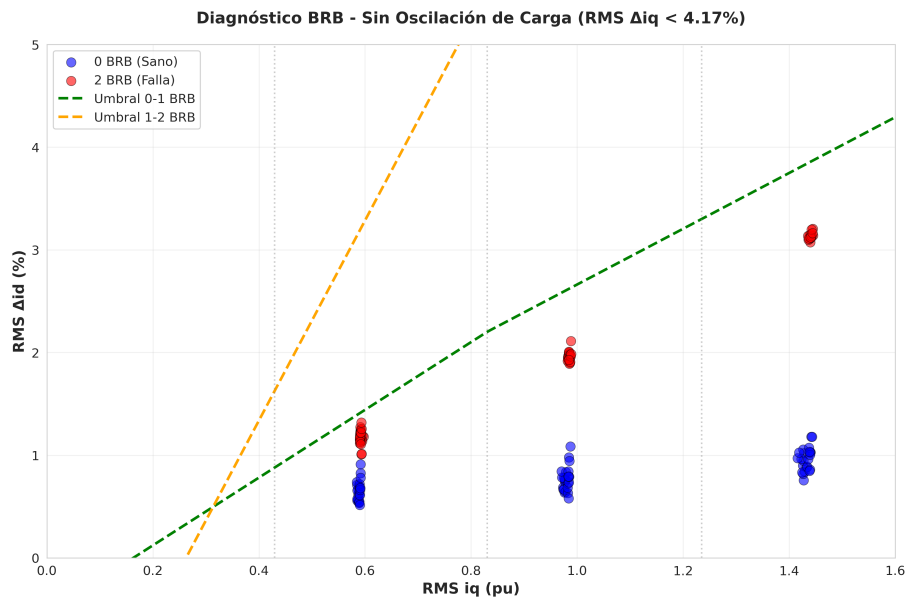


Figura 5.49: Diagnóstico de asimetría sobre datos experimentales estables (Sin LO). Las curvas ascendentes representan los umbrales interpolados por el algoritmo.

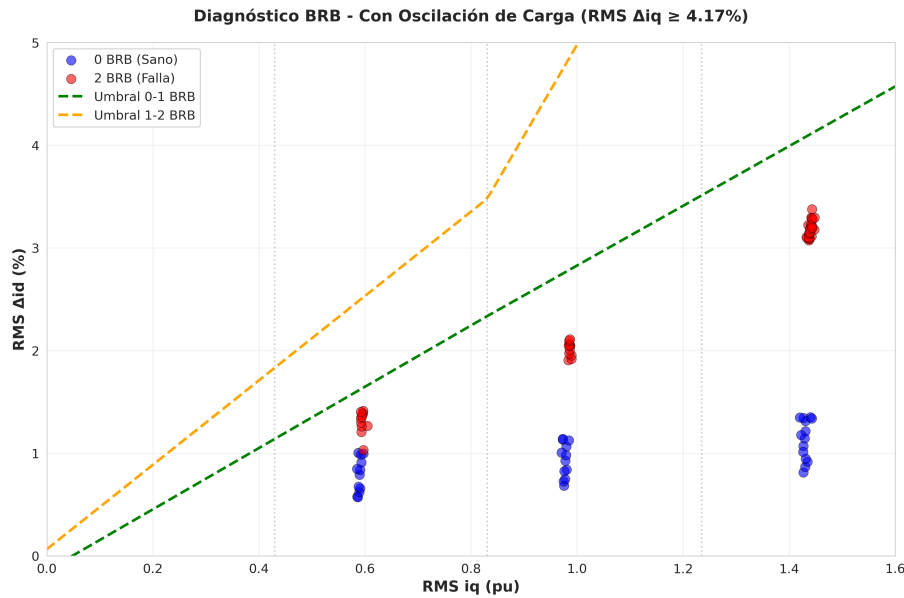


Figura 5.50: Diagnóstico de asimetría sobre datos experimentales oscilatorios (Con LO). Las curvas ascendentes representan los umbrales interpolados por el algoritmo.

Al examinar ambos gráficos, el contraste entre la teoría y la práctica es absoluto. Mientras que la interpolación del algoritmo traza curvas de decisión ascendentes que exigen una respuesta magnética severa a medida que aumenta la carga, las mediciones empíricas de la máquina real exhiben una firma de asimetría considerablemente más atenuada. Incluso los datos correspondientes a una falla física severa de 2 BRB no logran aproximarse a la primera frontera de detección (límite 0-1 BRB) calculada por el simulador.

Este comportamiento es consistente con las discrepancias fenomenológicas discutidas en secciones previas y sugiere que el modelo matemático aún no logra representar completamente los mecanismos físicos asociados a la circulación de corrientes en un rotor defectuoso real. En consecuencia, la amplitud de las firmas diagnósticas simuladas tiende a diferir de la respuesta observada experimentalmente, especialmente bajo condiciones de alta carga mecánica.

Desde una perspectiva metodológica, estos resultados evidencian que la extrapolación directa de umbrales absolutos obtenidos en simulación hacia máquinas físicas presenta limitaciones importantes. La discrepancia observada entre los niveles simulados y experimentales de Δi_d demuestra que fenómenos no modelados pueden alterar significativamente la magnitud de las firmas diagnósticas reales.

En la misma línea, el Método de Referencia (Ratio 1,19) tampoco logró diagnosticar adecuadamente la falla, obteniendo un 50,45 % de precisión general, correspondiente prácticamente al desempeño de una clasificación aleatoria entre condición sana y defectuosa.

5.5. Resultados del control predictivo con modelo adaptativo (PCC-BRB)

Tal como se definió en el diseño metodológico, la validación de esta estrategia de control se realizó evaluando el desempeño de las Máquinas 1, 2 y 3. Para cada topología, se varió

la carga mecánica exigida (33,3 %, 66,7 % y 100 % del torque nominal) y la severidad de la asimetría del rotor (0, 1 y 2 BRB). Con el objetivo de evaluar la capacidad de la adaptación para atenuar las firmas de falla y oscilación de carga, todos estos escenarios se ejecutaron manteniendo siempre activa una perturbación mecánica constante, configurada en 1 vez la frecuencia de oscilación base ($1 \times f_{osc_base}$) y 1 vez la amplitud de oscilación base ($1 \times T_{osc_base}$) correspondiente a cada máquina en particular.

Además de las exigencias dinámicas, es imperativo establecer las condiciones geométricas iniciales. La posición física de la asimetría en el rotor fue fijada intencionalmente en un ángulo mecánico de $\pi/5$ rad (36°). Dado que el estimador y el controlador operan en el marco de referencia sincrónico, los ángulos eléctricos reales esperados dependen del número de pares de polos (p) de cada máquina ($\theta_{r0} = p \cdot \pi/5$).

- Para la Máquina 1 ($p = 3$), la falla se ubica en un ángulo eléctrico efectivo de $\theta_{r0} = 3\pi/5$ rad (108°).
- Para las Máquinas 2 y 3 ($p = 2$), la falla se posiciona en $\theta_{r0} = 2\pi/5$ rad (72°).

Al utilizar un algoritmo de búsqueda paramétrica con pasos discretos de $\pi/6$ rad (30° eléctricos), los ángulos reales de la falla caen deliberadamente fuera de los nodos exactos de evaluación. Esta desalineación fuerza al algoritmo a encontrar la combinación (N_{brb}, θ_{r0}) que, si bien puede no ser el equivalente geométrico exacto, representa el óptimo capaz de minimizar las oscilaciones en la función de costo.

5.5.1. Desempeño del controlador ante carga mecánicamente estable (Sin LO)

Con el objetivo de establecer una línea base de rendimiento y aislar el efecto de la compensación de asimetría, la primera fase de evaluación se realizó sometiendo al controlador predictivo adaptativo a un régimen de carga puramente estable. En este escenario, la perturbación mecánica externa fue anulada ($T_{osc} = 0$), permitiendo observar la capacidad del algoritmo para converger exclusivamente ante la firma electromagnética producida por la rotura de barras, sin la interferencia de componentes de baja frecuencia cruzadas.

5.5.1.a. Análisis de convergencia paramétrica (Sin LO)

La Tabla [5.5](#) detalla el estado final de convergencia del estimador adaptativo al minimizar la función de costo J_{adapt} bajo estas condiciones de carga constante. Para evidenciar visualmente el funcionamiento de la búsqueda, los ángulos θ_{r0_optimo} se han tabulado explícitamente como fracciones múltiplos del paso ($\pi/6$).

Tabla 5.5: Resultados de convergencia del algoritmo de adaptación paramétrica (Sin LO).

Máquina	BRB Real	Carga [% pu]	N_{brb_optimo}	θ_{r0_optimo}
1	0	33,3	0	0
		66,7	0	0
		100	0	0
	1	33,3	2	$\frac{9\pi}{6}$
		66,7	3	$\frac{3\pi}{6}$
		100	3	$\frac{9\pi}{6}$
	2	33,3	5	$\frac{3\pi}{6}$
		66,7	5	$\frac{9\pi}{6}$
		100	5	$\frac{9\pi}{6}$
2	0	33,3	0	0
		66,7	0	0
		100	0	0
	1	33,3	1	$\frac{3\pi}{6}$
		66,7	1	$\frac{9\pi}{6}$
		100	1	$\frac{8\pi}{6}$
	2	33,3	3	$\frac{9\pi}{6}$
		66,7	2	$\frac{9\pi}{6}$
		100	2	$\frac{2\pi}{6}$
3	0	33,3	0	0
		66,7	0	0
		100	0	0
	1	33,3	1	$\frac{3\pi}{6}$
		66,7	4	$\frac{8\pi}{6}$
		100	4	$\frac{8\pi}{6}$
	2	33,3	5	$\frac{8\pi}{6}$
		66,7	6	$\frac{2\pi}{6}$
		100	7	$\frac{8\pi}{6}$

El análisis de la Tabla 5.5 arroja conclusiones fundamentales sobre el comportamiento basal del algoritmo adaptativo. El hallazgo más destacable es la precisión absoluta en el diagnóstico de la máquina sana: en el 100% de los escenarios operando con 0 BRB, el estimador converge exactamente a $N_{brb_optimo} = 0$ y $\theta_{r0_optimo} = 0$.

Ante la presencia de asimetrías reales (1 y 2 BRB), el algoritmo detecta exitosamente la falla y la mapea sobre los nodos de su grilla espacial (seleccionando múltiplos de $\pi/6$ para compensar la ubicación física desalineada). Un fenómeno analítico crucial que se extrae de esta tabla es la tendencia sistemática del algoritmo a sobreestimar la severidad de la falla ($N_{brb_optimo} > \text{BRB Real}$), alcanzando valores de hasta 7 barras en la Máquina 3. Dado que en este ensayo la carga es puramente estable ($T_{osc} = 0$), queda comprobado empíricamente que esta sobreestimación no es un error inducido por ruido mecánico. Por el contrario, es el mecanismo natural mediante el cual la función de minimización compensa las dinámicas físicas del rotor. Para cancelar la oscilación, el algoritmo deduce que es energéticamente

óptimo inyectar una matriz de resistencia artificialmente más severa.

5.5.1.b. Atenuación de oscilaciones eléctricas y eficiencia energética (Sin LO)

La Tabla 5.6 presenta la evaluación comparativa de las variables RMS Δi_d , RMS Δi_q , THD y las pérdidas de cobre del estator ($P_{loss,3\phi}$), registradas en las ventanas de pre-adaptación y post-adaptación. Cabe precisar que el indicador $P_{loss,3\phi}$ considera exclusivamente las pérdidas óhmicas en el estator, calculadas como la suma de las contribuciones instantáneas de cada fase, esto es, $i_a^2 R_s + i_b^2 R_s + i_c^2 R_s$. Se incluye una columna de variación relativa ($\Delta \%$) donde un valor positivo indica el nivel de mitigación o mejora logrado por el modelo adaptativo frente a su condición inicial.

Tabla 5.6: Comparativa de indicadores eléctricos pre y post-adaptación del PCC-BRB operando con carga estable (Sin LO).

Máquina	BRB	Carga [% pu]	RMS Δi_d [% pu]			RMS Δi_q [% pu]			THD			$P_{loss,3\phi}$ [W]		
			Ini.	Fin.	$\Delta \%$	Ini.	Fin.	$\Delta \%$	Ini.	Fin.	$\Delta \%$	Ini.	Fin.	$\Delta \%$
1	0	33,3	0,099	0,081	18,2%	0,008	0,009	-12,5%	0,062	0,061	1,6%	179,9	178,5	0,8%
		66,7	0,096	0,098	-2,1%	0,010	0,009	10,0%	0,047	0,047	0,0%	239,2	239,2	0,0%
		100	0,106	0,079	25,5%	0,024	0,014	41,7%	0,037	0,036	2,7%	321,1	320,8	0,1%
	1	33,3	0,344	0,315	8,4%	0,840	0,291	65,4%	0,062	0,062	0,0%	181,2	177,9	1,8%
		66,7	0,453	0,333	26,5%	1,359	0,456	66,4%	0,048	0,047	2,1%	241,5	233,1	3,5%
		100	0,504	0,397	21,2%	2,104	0,838	60,2%	0,037	0,035	5,4%	323,0	318,7	1,3%
2	33,3	0,468	0,539	-15,2%	1,556	0,660	57,6%	0,061	0,061	0,0%	183,0	174,8	4,5%	
	66,7	0,674	0,714	-5,9%	2,735	1,241	54,6%	0,048	0,046	4,2%	244,1	231,4	5,2%	
	100	0,898	0,580	35,4%	3,994	2,094	47,6%	0,037	0,034	8,1%	325,7	318,2	2,3%	
2	0	33,3	0,332	0,316	4,8%	0,013	0,014	-7,7%	0,151	0,151	0,0%	44,1	44,1	0,0%
		66,7	0,312	0,321	-2,9%	0,019	0,015	21,1%	0,127	0,127	0,0%	66,1	66,1	0,0%
		100	0,330	0,331	-0,3%	0,015	0,015	0,0%	0,113	0,113	0,0%	86,1	86,1	0,0%
	1	33,3	0,985	0,758	23,0%	0,926	0,530	42,8%	0,149	0,148	0,7%	45,5	43,1	5,3%
		66,7	1,410	0,954	32,3%	0,987	0,652	33,9%	0,127	0,126	0,8%	68,0	64,1	5,7%
		100	1,645	1,219	25,9%	1,133	1,187	-4,8%	0,116	0,117	-0,9%	89,2	84,0	5,8%
2	33,3	1,743	1,246	28,5%	1,503	0,842	44,0%	0,148	0,158	-6,8%	46,6	40,1	13,9%	
	66,7	2,215	1,206	45,6%	1,637	1,433	12,5%	0,127	0,131	-3,1%	69,3	62,3	10,1%	
	100	3,337	1,451	56,5%	2,259	2,176	3,7%	0,115	0,118	-2,6%	91,8	81,7	11,0%	
3	0	33,3	0,116	0,113	2,6%	0,013	0,012	7,7%	0,097	0,097	0,0%	165,9	165,9	0,0%
		66,7	0,086	0,086	0,0%	0,013	0,011	15,4%	0,074	0,074	0,0%	238,7	238,7	0,0%
		100	0,135	0,089	34,1%	0,081	0,017	79,0%	0,057	0,056	1,8%	343,7	343,6	0,0%
	1	33,3	0,616	0,385	37,5%	0,797	0,697	12,5%	0,095	0,097	-2,1%	169,3	166,6	1,6%
		66,7	0,503	0,491	2,4%	1,592	0,478	70,0%	0,075	0,073	2,7%	242,7	234,5	3,4%
		100	0,786	0,329	58,1%	2,272	0,697	69,3%	0,057	0,054	5,3%	343,6	349,7	-1,8%
2	33,3	0,548	0,472	13,9%	1,701	0,314	81,5%	0,096	0,097	-1,0%	170,4	161,6	5,2%	
	66,7	0,806	0,566	29,8%	3,092	0,956	69,1%	0,074	0,072	2,7%	245,4	233,4	4,9%	
	100	1,078	0,388	64,0%	4,616	1,627	64,8%	0,057	0,054	5,3%	344,9	357,8	-3,7%	

Los resultados obtenidos en régimen de carga estable exhiben un nivel de desempeño extraordinario por parte del algoritmo predictivo adaptativo. Al no existir oscilaciones mecánicas de baja frecuencia que enmascaren o se acoplen con las firmas de la falla, la estrategia PCC-BRB despliega todo su potencial.

El control predictivo adaptativo reduce de manera importante la oscilación en las corrientes. En la Máquina 3 operando a plena carga (100%) con asimetría severa (2 BRB), el algoritmo logra atenuar la fluctuación magnetizante (Δi_d) en un 64,0%, mientras que la oscilación de i_q (Δi_q) experimenta una atenuación del 64,8%. De igual manera, en la Máquina 1 con 1 BRB, la fluctuación del eje de torque cae un 66,4% bajo carga nominal.

Estas atenuaciones masivas confirman que la inyección dinámica de la matriz de resistencia adaptada fuerza al inversor a generar las tensiones exactas para cancelar los campos pulsantes inversos.

Finalmente, la estabilización de las corrientes lograda por el controlador se traduce en una mejora medible en la calidad de la energía y, en la mayoría de los casos, en el esfuerzo térmico. Como se observa en los datos, el THD de la corriente inyectada mejora levemente o se mantiene estable, confirmando que la mitigación de las bajas frecuencias no introduce degradación en el espectro de conmutación. De manera paralela, las pérdidas de cobre del estator presentan reducciones relevantes en las Máquinas 1 y 2, alcanzando disminuciones de hasta un 13,9 %.

No obstante, la Máquina 3 exhibe un comportamiento diferenciado bajo condiciones de alta carga. En particular, para operación al 100 % de carga, se observa un leve incremento en las pérdidas de cobre del estator (-1,8 % para 1 BRB y -3,7 % para 2 BRB), a pesar de que las componentes oscilatorias de corriente son significativamente atenuadas. Este resultado evidencia un compromiso inherente de la estrategia de control: la supresión activa de las oscilaciones eléctricas requiere la inyección de corrientes de compensación que pueden incrementar marginalmente el valor eficaz total de corriente. Dado que las pérdidas óhmicas dependen del cuadrado de la corriente, este aumento se traduce en un mayor esfuerzo térmico en el estator.

En consecuencia, el algoritmo prioriza la estabilidad eléctrica del sistema, incluso a costa de una leve penalización en eficiencia energética en escenarios de alta exigencia. Este comportamiento es consistente con un esquema de control orientado a la atenuación de oscilaciones más que a la optimización estricta de pérdidas.

5.5.2. Desempeño del controlador bajo régimen oscilatorio (Con LO)

Para desafiar la capacidad del controlador para atenuar las firmas de falla y oscilación de carga, la segunda fase de validación inyecta oscilaciones mecánicas sostenidas en la carga.

5.5.2.a. Análisis de convergencia paramétrica (Con LO)

La Tabla [5.7](#) presenta los resultados del estado final de convergencia del algoritmo bajo esta perturbación externa.

Tabla 5.7: Resultados de convergencia del algoritmo de adaptación paramétrica operando con oscilación de carga (Con LO).

Máquina	BRB Real	Carga [% pu]	N_{brb_optimo}	θ_{r0_optimo}
1	0	33,3	1	$\frac{10\pi}{6}$
		66,7	0	0
		100	0	0
	1	33,3	2	$\frac{9\pi}{6}$
		66,7	2	$\frac{3\pi}{6}$
		100	2	$\frac{3\pi}{6}$
	2	33,3	3	$\frac{4\pi}{6}$
		66,7	4	$\frac{9\pi}{6}$
		100	5	$\frac{3\pi}{6}$
2	0	33,3	0	0
		66,7	0	0
		100	0	0
	1	33,3	1	$\frac{3\pi}{6}$
		66,7	1	$\frac{9\pi}{6}$
		100	1	$\frac{3\pi}{6}$
	2	33,3	1	$\frac{3\pi}{6}$
		66,7	2	$\frac{3\pi}{6}$
		100	2	$\frac{9\pi}{6}$
3	0	33,3	0	0
		66,7	0	0
		100	0	0
	1	33,3	1	$\frac{10\pi}{6}$
		66,7	0	0
		100	2	$\frac{8\pi}{6}$
	2	33,3	1	$\frac{2\pi}{6}$
		66,7	6	$\frac{8\pi}{6}$
		100	7	$\frac{8\pi}{6}$

El análisis de la Tabla 5.7 revela comportamientos sumamente interesantes respecto a cómo el controlador interactúa con el modelo matemático. En primer lugar, destaca la precisión del algoritmo para identificar la máquina sana (0 BRB): a excepción de un caso en la Máquina 1, el controlador converge consistentemente a $N_{brb} = 0$, demostrando una gran resistencia a emitir falsos positivos a pesar de la fuerte perturbación de baja frecuencia introducida por la oscilación de carga.

Respecto a la convergencia angular, se observa cómo el algoritmo selecciona puntos de su barrido ($\frac{3\pi}{6}$, $\frac{4\pi}{6}$, etc.) buscando emular la falla que se encuentra oculta entre ellos ($\frac{3\pi}{5}$ o $\frac{2\pi}{5}$). Sin embargo, ante la presencia de asimetrías reales severas, el algoritmo exhibe una clara tendencia a sobreestimar el número de barras rotas ($N_{brb_optimo} > \text{BRB Real}$), fenómeno particularmente agudo a plena carga. Lejos de ser un error de código, este resultado es la respuesta directa del algoritmo de minimización frente a las limitaciones de un modelo

matemático.

El controlador descubre que inyectar una severidad matemática mayor (N_{brb} artificialmente alto) y ubicarse en un nodo angular adyacente le permite generar una deformación de flujo de la magnitud exacta necesaria para cancelar las oscilaciones en la máquina. El algoritmo no busca la verdad topológica, sino la compensación energética óptima.

5.5.2.b. Atenuación de oscilaciones eléctricas y eficiencia energética (Con LO)

Para verificar empíricamente que la convergencia paramétrica analizada se traduce en una mejora real del comportamiento del accionamiento, la Tabla 5.8 contrasta los indicadores de mérito extraídos en las ventanas de pre-adaptación (Ini.) y post-adaptación (Fin.).

Tabla 5.8: Comparativa de indicadores eléctricos pre y post-adaptación del PCC-BRB operando con oscilación de carga (Con LO).

Máquina	BRB	Carga [% pu]	RMS Δi_d [% pu]			RMS Δi_q [% pu]			THD			$P_{loss,3\phi}$ [W]		
			Ini.	Fin.	Δ %	Ini.	Fin.	Δ %	Ini.	Fin.	Δ %	Ini.	Fin.	Δ %
1	0	33,3	0,293	0,154	47,4 %	3,402	3,449	-1,4 %	0,062	0,061	1,6 %	180,4	178,2	1,2 %
		66,7	0,147	0,153	-4,1 %	3,300	3,301	0,0 %	0,048	0,048	0,0 %	239,2	239,2	0,0 %
		100	0,206	0,205	0,5 %	3,195	3,195	0,0 %	0,037	0,037	0,0 %	320,9	320,9	0,0 %
	1	33,3	0,440	0,350	20,5 %	3,509	3,425	2,4 %	0,062	0,062	0,0 %	181,4	178,0	1,9 %
		66,7	0,510	0,531	-4,1 %	3,531	3,388	4,0 %	0,048	0,047	2,1 %	241,6	235,8	2,4 %
		100	0,617	0,477	22,7 %	3,806	3,414	10,3 %	0,037	0,036	2,7 %	323,1	319,5	1,1 %
	2	33,3	0,500	0,399	20,2 %	3,728	3,546	4,9 %	0,061	0,062	-1,6 %	182,9	177,8	2,8 %
		66,7	0,740	0,606	18,1 %	4,220	3,615	14,3 %	0,048	0,046	4,2 %	244,3	233,4	4,5 %
		100	0,970	0,682	29,7 %	5,085	4,054	20,3 %	0,037	0,034	8,1 %	325,8	318,4	2,3 %
2	0	33,3	0,518	0,534	-3,1 %	2,829	2,827	0,1 %	0,148	0,147	0,7 %	44,9	44,9	0,0 %
		66,7	0,443	0,449	-1,4 %	2,392	2,390	0,1 %	0,126	0,126	0,0 %	66,1	66,1	0,0 %
		100	0,465	0,444	4,5 %	2,143	2,146	-0,1 %	0,114	0,114	0,0 %	86,1	86,1	0,0 %
	1	33,3	1,268	0,765	39,7 %	2,943	2,958	-0,5 %	0,149	0,148	0,7 %	45,7	43,2	5,5 %
		66,7	1,770	1,025	42,1 %	2,580	2,531	1,9 %	0,126	0,127	-0,8 %	67,9	64,2	5,4 %
		100	2,188	1,536	29,8 %	2,502	2,395	4,3 %	0,115	0,117	-1,7 %	89,3	84,0	5,9 %
	2	33,3	2,123	1,179	44,5 %	3,165	3,189	-0,8 %	0,148	0,150	-1,4 %	46,7	44,2	5,4 %
		66,7	2,645	1,554	41,2 %	2,896	2,876	0,7 %	0,127	0,132	-3,9 %	69,4	62,4	10,1 %
		100	3,455	2,362	31,6 %	3,063	3,068	-0,2 %	0,115	0,118	-2,6 %	92,0	81,6	11,3 %
3	0	33,3	0,202	0,228	-12,9 %	3,751	3,784	-0,9 %	0,098	0,097	1,0 %	167,1	166,3	0,5 %
		66,7	0,300	0,250	16,7 %	3,600	3,686	-2,4 %	0,075	0,074	1,3 %	240,5	239,1	0,6 %
		100	0,282	0,292	-3,5 %	3,592	3,595	-0,1 %	0,060	0,060	0,0 %	343,9	343,9	0,0 %
	1	33,3	0,637	0,472	25,9 %	3,830	3,895	-1,7 %	0,096	0,097	-1,0 %	169,6	167,0	1,5 %
		66,7	0,554	0,571	-3,1 %	3,910	3,883	0,7 %	0,075	0,075	0,0 %	242,9	242,9	0,0 %
		100	0,782	0,479	38,7 %	4,157	3,703	10,9 %	0,057	0,056	1,8 %	343,8	345,4	-0,5 %
	2	33,3	0,634	0,527	16,9 %	4,102	3,962	3,4 %	0,096	0,097	-1,0 %	170,9	169,2	1,0 %
		66,7	0,852	0,718	15,7 %	4,716	3,881	17,7 %	0,075	0,072	4,0 %	245,6	233,7	4,8 %
		100	1,108	0,563	49,2 %	5,642	4,228	25,1 %	0,058	0,054	6,9 %	345,0	357,8	-3,7 %

Los resultados cuantitativos demuestran el éxito rotundo del esquema de control. En los escenarios de máquina sana (0 BRB), los indicadores se mantienen prácticamente inalterados, validando que el controlador no inyecta distorsiones indeseadas cuando no hay fallas que mitigar.

Por el contrario, al operar bajo la condición de asimetría rotórica severa (2 BRB), la inyección de la matriz adaptada produce una compresión sustancial del espectro oscilatorio. La componente Δi_d experimenta caídas dramáticas en las tres topologías (por ejemplo, en la Máquina 2 al 100 % de carga, la oscilación cae de 3,455 % a 2,362 %). De forma

simultánea, y confirmando que la adaptación resuelve el acoplamiento cruzado de los ejes magnéticos, la oscilación de la corriente i_q (Δi_q) también se mitiga notablemente (cayendo de 5,085 % a 4,054 % en la Máquina 1).

Esta estabilización dinámica no penaliza la conmutación, dado que el THD se mantiene estable o incluso disminuye levemente. Finalmente, la consecuencia termodinámica de un perfil de corrientes más limpio y un torque más estable es la reducción generalizada de las pérdidas de estator por efecto Joule. En regímenes de alta exigencia con 2 BRB, la reducción oscila entre 7 W y 11 W ($P_{loss,3\phi}$ en la Máquina 2 cae de 92,0 W a 81,6 W), probando que el PCC-BRB no solo protege la integridad mecánica del eje al suprimir vibraciones de baja frecuencia, sino que opera el accionamiento de manera significativamente más eficiente.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que el FOC-PCC-BRB no solo atenúa la firma magnética asociada a la asimetría de rotor (Δi_d), sino que también reduce de manera consistente las oscilaciones eléctricas reflejadas en Δi_q , incluso bajo condiciones simultáneas de BRB y LO activa. Esta reducción conjunta de ambas componentes se traduce en un comportamiento eléctrico más estable y menores pérdidas.

Capítulo 6

Conclusiones

El presente trabajo de título abordó el desafío de diagnosticar y mitigar fallas por rotura de barras (BRB) en rotores de máquinas de inducción, operando bajo la perturbación constante de oscilaciones de carga mecánica (LO). A partir del desarrollo, implementación y evaluación exhaustiva de las estrategias propuestas, tanto en entornos de simulación como en un banco de pruebas experimental, se extraen las siguientes conclusiones fundamentales.

En primer lugar, se comprobó categóricamente que el enfoque de diagnóstico dinámico bidimensional basado en el marco de referencia sincrónico ortogonal (i_{sd} e i_{sq}) supera las limitaciones inherentes del Análisis de Firma de Corriente (MCSA). La evaluación desacoplada de la corriente magnetizante y la corriente formadora de torque demostró ser un mecanismo altamente efectivo para segregar las dinámicas cruzadas. Mientras que las fluctuaciones mecánicas se reflejan predominantemente en el eje en cuadratura (Δi_q), la asimetría física del rotor imprime su firma principal en el eje directo (Δi_d). Esta segregación permite aislar la falla y evitar las falsas alarmas que tradicionalmente afectan a los sistemas industriales. Un resultado de particular relevancia para el control de accionamientos modernos fue el hallazgo bajo régimen de lazo cerrado con control PI. Lejos de imposibilitar el diagnóstico, se demostró que la acción correctiva del regulador comprime las distribuciones estadísticas de las corrientes. Esta compresión se traduce en una mejora sustancial en la certidumbre diagnóstica: las tasas de error de clasificación entre los distintos estados de salud del rotor cayeron de valores superiores al 15 % (en conexión directa a la red) a un 5,4 % operando bajo control PI, demostrando que la topología propuesta es ideal para accionamientos regulados.

Desde la perspectiva de la validación experimental, se obtuvo un resultado relevante respecto a la implementación del estimador de flujo. Durante los ensayos empíricos, se observó una degradación significativa en el desempeño del estimador basado en el modelo de corriente, manifestada en la pérdida de fidelidad del ángulo de orientación y en la consecuente distorsión de las proyecciones ortogonales.

Este comportamiento no se atribuye a una limitación intrínseca del estimador, sino principalmente a la calidad de la señal de velocidad mecánica (ω) disponible en el banco de pruebas, la cual presenta un nivel de ruido considerable al ser obtenida desde el sistema de carga. En sistemas industriales que emplean plataformas digitales de control con sensores dedicados de alta precisión, tales como encoders o resolvers, es esperable que el estimador basado en modelo de corriente alcance un desempeño significativamente superior.

No obstante, la necesidad de migrar hacia un modelo de tensión para recuperar la fidelidad de los datos en el presente montaje experimental pone de manifiesto que el estimador de flujo —y, de manera más general, la calidad de las señales de entrada— constituye un factor crítico para la correcta implementación de estas estrategias en entornos reales.

Respecto al diseño del Controlador Predictivo de Corriente con Modelo Adaptativo (PCC-BRB), se concluye que la inyección dinámica de una matriz de resistencia de rotor asimétrica dota al accionamiento de una resiliencia superior frente a fallas. El algoritmo de búsqueda demostró una convergencia estable hacia los parámetros óptimos de compensación electromagnética. Destaca notablemente la precisión del estimador para diagnosticar la máquina sana: en el 100% de los escenarios evaluados bajo régimen de carga estable, el algoritmo convergió a $N_{brb_optimo} = 0$, demostrando una tasa nula de falsos positivos y garantizando que el control no inyecta inestabilidades cuando el motor opera en condiciones normales. Desde un punto de vista analítico, uno de los hallazgos más interesantes de esta investigación es el comportamiento de “sobreestimación paramétrica” del controlador ante asimetrías severas. El algoritmo evidenció una clara tendencia a calcular un número de barras rotas óptimo superior al daño físico real ($N_{brb_optimo} > \text{BRB Real}$).

Los resultados cuantitativos confirmaron que la convergencia del modelo adaptativo se traduce en una mejora directa y sustancial del desempeño operativo de la máquina. La estrategia PCC-BRB logró suprimir de manera categórica las dinámicas cruzadas originadas por el rotor defectuoso. Bajo condiciones de asimetría severa operando a plena carga, el sistema logró atenuar las fluctuaciones magnetizantes (Δi_d) y las oscilaciones de la corriente formadora de torque (Δi_q) en magnitudes superiores al 60%. Esta drástica estabilización de las corrientes de estator no solo protege la integridad mecánica del eje al suprimir vibraciones torsionales de baja frecuencia, sino que opera como un optimizador de eficiencia activa. Se constató que el esquema adaptativo es capaz de mantener o mejorar levemente la Distorsión Armónica Total (THD) de la corriente inyectada, asegurando la calidad de la energía. Como consecuencia termodinámica directa de este perfil de corrientes más limpio, el esfuerzo térmico de la máquina se redujo significativamente, alcanzando disminuciones comprobadas en las pérdidas por efecto Joule del estator de hasta un 13,9% en regímenes de baja carga.

En síntesis, esta memoria demuestra que la integración de algoritmos de diagnóstico con estrategias de control predictivo adaptativo promete una solución integral y altamente competitiva. El esquema PCC-BRB propuesto es capaz de prolongar la vida útil, reducir el consumo energético y asegurar la continuidad operativa de máquinas de inducción con fallas, satisfaciendo las exigencias de confiabilidad de la industria moderna. A partir de los resultados obtenidos, las decisiones de diseño adoptadas y las limitaciones experimentales observadas durante el desarrollo de esta investigación, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro para expandir y perfeccionar esta tecnología:

- **Mejora del modelo matemático de la asimetría de rotor:** Desarrollar y validar modelos matemáticos más complejos de la barra rota, permitiendo que las simulaciones reflejen con exactitud el comportamiento empírico del motor defectuoso.
- **Exploración de funciones de costo orientadas a eficiencia en el PCC-BRB:** Estudiar las limitaciones actuales del algoritmo adaptativo y proponer nuevas formulaciones para la función de minimización (J_{adapt}). Se sugiere orientar los pesos de compensación o agregar términos que busquen explícitamente la disminución de las

pérdidas de estator, optimizando directamente el rendimiento.

- **Implementación en plataformas digitales de control en tiempo real:** Trasladar el esquema de control adaptativo PCC-BRB desde simuladores *offline* hacia una plataforma de procesamiento digital embebido (como DSP o FPGA) operando directamente sobre máquinas de inducción reales. Dado que en esta memoria se evidenció una discrepancia significativa entre los resultados obtenidos mediante modelos y aquellos medidos en el banco de pruebas, resulta más pertinente priorizar la validación en sistemas físicos reales por sobre entornos *Hardware-in-the-Loop*. Esta etapa permitirá evaluar tanto la viabilidad temporal del algoritmo para frecuencias de muestreo industriales como su capacidad de atenuación de firmas de falla y oscilación de carga frente a los fenómenos propios del entorno experimental, tales como ruido, retardos y no linealidades.

Apéndice A

Tablas de resultados de máquinas sin control

A.1. Máquina 1

A.1.1. Máquina sana - 0 BRB

A.1.1.a. 10 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																					
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																					
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	
Frecuencia de oscilación (Factor de I_{LO})	0,0	0,384																					
	0,1		0,384																				
	0,2			0,383																			
	0,3				0,384																		
	0,4					0,384																	
	0,5						0,384																
	0,6							0,383															
	0,7								0,384														
	0,8									0,385													
	0,9										0,385												
	1,0											0,385											
	1,1												0,385										
	1,2													0,386									
	1,3														0,387								
	1,4															0,387							
	1,5																0,388						
	1,6																	0,388					
	1,7																		0,388				
	1,8																			0,389			
	1,9																				0,389		
2,0																					0,391		

Tabla A.1: Resultados de RMS I_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,462																				
	0,1		0,451																			
	0,2			0,477																		
	0,3				0,459																	
	0,4					0,482																
	0,5						0,524															
	0,6							0,525														
	0,7								0,578													
	0,8									0,673												
	0,9										0,625											
	1,0											0,741										
	1,1												0,786									
	1,2													0,885								
	1,3														0,974							
	1,4															0,969						
	1,5																1,955					
	1,6																	1,959				
	1,7																		1,939			
	1,8																			1,216		
	1,9																				1,393	
2,0																					1,936	

Tabla A.2: Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,769																				
	0,1		1,127																			
	0,2			1,462																		
	0,3				1,499																	
	0,4					1,830																
	0,5						2,250															
	0,6							2,486														
	0,7								2,898													
	0,8									3,211												
	0,9										3,470											
	1,0											3,889										
	1,1												4,258									
	1,2													4,588								
	1,3														4,927							
	1,4															5,313						
	1,5																5,653					
	1,6																	6,383				
	1,7																		6,383			
	1,8																			6,817		
	1,9																				7,116	
2,0																					7,549	

Tabla A.3: Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.1.1.b. 20 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,752																			
	0,1		0,753																		
	0,2			0,752																	
	0,3				0,753																
	0,4					0,753															
	0,5						0,753														
	0,6							0,752													
	0,7								0,753												
	0,8									0,753											
	0,9										0,754										
	1,0											0,753									
	1,1												0,754								
	1,2													0,754							
	1,3														0,755						
	1,4															0,756					
	1,5																0,755				
	1,6																	0,756			
	1,7																		0,756		
	1,8																			0,756	
	1,9																				0,757
2,0																					0,757

Tabla A.4: Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,769																			
	0,1		0,793																		
	0,2			0,822																	
	0,3				0,800																
	0,4					0,824															
	0,5						0,844														
	0,6							0,832													
	0,7								0,828												
	0,8									0,879											
	0,9										0,933										
	1,0											0,938									
	1,1												0,982								
	1,2													0,982							
	1,3														0,940						
	1,4															0,964					
	1,5																0,964				
	1,6																	0,964			
	1,7																		0,964		
	1,8																			0,964	
	1,9																				0,964
2,0																					0,964

Tabla A.5: Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,385																				
	0,1		2,364																			
	0,2			2,490																		
	0,3				2,579																	
	0,4					2,882																
	0,5						3,128															
	0,6							3,296														
	0,7								3,393													
	0,8									3,773												
	0,9										3,796											
	1,0											3,925										
	1,1												4,143									
	1,2													4,565								
	1,3														4,757							
	1,4															5,260						
	1,5																5,977					
	1,6																	6,518				
	1,7																		6,729			
	1,8																			6,381		
	1,9																				7,451	
2,0																					7,451	

Tabla A.6: Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.1.1.c. 30 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,138																				
	0,1		1,138																			
	0,2			1,137																		
	0,3				1,138																	
	0,4					1,138																
	0,5						1,139															
	0,6							1,138														
	0,7								1,138													
	0,8									1,138												
	0,9										1,138											
	1,0											1,138										
	1,1												1,138									
	1,2													1,139								
	1,3														1,139							
	1,4															1,140						
	1,5																1,139					
	1,6																	1,139				
	1,7																		1,140			
	1,8																			1,145		
	1,9																				1,146	
2,0																					1,141	

Tabla A.7: Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	7,000																				
	0,1		7,164																			
	0,2			7,232																		
	0,3				7,220																	
	0,4					7,284																
	0,5						7,377															
	0,6							7,199														
	0,7								7,214													
	0,8									7,187												
	0,9										7,160											
	1,0											7,258										
	1,1												7,200									
	1,2													7,232								
	1,3														7,186							
	1,4															7,229						
	1,5																7,193					
	1,6																	7,222				
	1,7																		7,198			
	1,8																			7,227		
	1,9																				7,211	
2,0																					7,248	

Tabla A.8: Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,692																				
	0,1		2,725																			
	0,2			2,824																		
	0,3				2,925																	
	0,4					3,126																
	0,5						3,185															
	0,6							3,184														
	0,7								3,184													
	0,8									3,137												
	0,9										3,398											
	1,0											3,172										
	1,1												3,400									
	1,2													3,421								
	1,3														3,167							
	1,4															3,368						
	1,5																3,649					
	1,6																	3,170				
	1,7																		3,162			
	1,8																			3,399		
	1,9																				3,166	
2,0																					2,837	

Tabla A.9: Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.1.2. Máquina con falla - 1 BRB

A.1.2.a. 10 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,394																			
	0,1		0,394																		
	0,2			0,393																	
	0,3				0,394																
	0,4					0,394															
	0,5						0,395														
	0,6							0,394													
	0,7								0,394												
	0,8									0,395											
	0,9										0,396										
	1,0											0,395									
	1,1												0,395								
	1,2													0,396							
	1,3														0,397						
	1,4															0,398					
	1,5																0,399				
	1,6																	0,399			
	1,7																		0,400		
	1,8																			0,400	
	1,9																				0,413
2,0																				0,423	

Tabla A.10: Resultados de RMS i_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,924																			
	0,1		0,912																		
	0,2			0,917																	
	0,3				0,915																
	0,4					0,915															
	0,5						0,947														
	0,6							0,947													
	0,7								0,988												
	0,8									0,998											
	0,9										1,128										
	1,0											1,385									
	1,1												1,385								
	1,2													1,114							
	1,3														1,176						
	1,4															1,269					
	1,5																1,343				
	1,6																	1,449			
	1,7																		1,560		
	1,8																			1,723	
	1,9																				1,850
2,0																				1,989	

Tabla A.11: Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,377																				
	0,1		1,323																			
	0,2			1,592																		
	0,3				1,678																	
	0,4					1,968																
	0,5						2,371															
	0,6							2,671														
	0,7								3,449													
	0,8									3,318												
	0,9										3,713											
	1,0											4,195										
	1,1												4,443									
	1,2													4,750								
	1,3														4,992							
	1,4															5,436						
	1,5																5,727					
	1,6																	6,900				
	1,7																		6,455			
	1,8																			6,455		
	1,9																				7,230	
2,0																					8,988	

Tabla A.12: Resultados de RMS Δi_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.1.2.b. 20 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,766																				
	0,1		0,767																			
	0,2			0,766																		
	0,3				0,767																	
	0,4					0,767																
	0,5						0,767															
	0,6							0,766														
	0,7								0,767													
	0,8									0,767												
	0,9										0,767											
	1,0											0,767										
	1,1												0,767									
	1,2													0,767								
	1,3														0,767							
	1,4															0,767						
	1,5																0,767					
	1,6																	0,767				
	1,7																		0,767			
	1,8																			0,767		
	1,9																				0,767	
2,0																					0,771	

Tabla A.13: Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,238																			
	0,1		2,222																		
	0,2			2,237																	
	0,3				2,229																
	0,4					2,241															
	0,5						2,265														
	0,6							2,263													
	0,7								2,296												
	0,8									2,326											
	0,9										2,330										
	1,0											2,417									
	1,1												2,386								
	1,2													2,457							
	1,3														2,563						
	1,4															2,588					
	1,5																2,656				
	1,6																	2,683			
	1,7																		2,761		
	1,8																			2,786	
	1,9																				2,874
2,0																					2,896

Tabla A.14: Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,385																			
	0,1		1,418																		
	0,2			1,639																	
	0,3				1,769																
	0,4					1,578															
	0,5						1,834														
	0,6							2,438													
	0,7								2,787												
	0,8									3,134											
	0,9										3,518										
	1,0											3,850									
	1,1												4,638								
	1,2													5,963							
	1,3														5,386						
	1,4															5,742					
	1,5																6,476				
	1,6																	6,725			
	1,7																		7,253		
	1,8																			7,492	
	1,9																				7,726
2,0																					8,323

Tabla A.15: Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.1.2.c. 30 Nm de carga (100% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,127																				
	0,1		1,128																			
	0,2			1,127																		
	0,3				1,128																	
	0,4					1,127																
	0,5						1,127															
	0,6							1,127														
	0,7								1,127													
	0,8									1,128												
	0,9										1,128											
	1,0											1,128										
	1,1												1,128									
	1,2													1,128								
	1,3														1,129							
	1,4															1,128						
	1,5																1,129					
	1,6																	1,129				
	1,7																		1,130			
	1,8																			1,129		
	1,9																				1,130	
2,0																					1,130	

Tabla A.16: Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	3,538																				
	0,1		3,524																			
	0,2			3,538																		
	0,3				3,527																	
	0,4					3,532																
	0,5						3,552															
	0,6							3,583														
	0,7								3,570													
	0,8									3,562												
	0,9										3,593											
	1,0											3,512										
	1,1												3,527									
	1,2													3,535								
	1,3														3,574							
	1,4															3,617						
	1,5																3,675					
	1,6																	3,723				
	1,7																		3,774			
	1,8																			3,888		
	1,9																				4,973	
2,0																					4,854	

Tabla A.17: Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																					
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																					
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,462																					
	0,1		1,573																				
	0,2			1,735																			
	0,3				1,893																		
	0,4					2,172																	
	0,5						2,417																
	0,6							2,737															
	0,7								3,366														
	0,8									3,719													
	0,9										4,358												
	1,0											4,424											
	1,1												4,715										
	1,2													4,976									
	1,3														5,144								
	1,4															5,411							
	1,5																5,875						
	1,6																	6,116					
	1,7																		6,613				
	1,8																			6,827			
	1,9																				7,356		
2,0																					8,712		
																						8,535	
																							8,491
																							8,297
																							8,221
																							8,343
																							8,412
																							8,521
																							8,520
																							8,147
																							8,588

Tabla A.18: Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.1.3. Máquina con falla - 2 BRB

A.1.3.a. 10 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valor RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,405																			
	0,1		0,457																		
	0,2			0,447																	
	0,3				0,457																
	0,4					0,443															
	0,5						0,462														
	0,6							0,460													
	0,7								0,467												
	0,8									0,465											
	0,9										0,475										
	1,0											0,462									
	1,1												0,483								
	1,2													0,484							
	1,3														0,493						
	1,4															0,415					
	1,5																0,412				
	1,6																	0,412			
	1,7																		0,419		
	1,8																			0,411	
	1,9																				0,413
2,0																					0,413

Tabla A.19: Resultados de RMS i_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,769																			
	0,1	1,758																			
	0,2		1,772																		
	0,3	1,749		1,731																	
	0,4		1,762		1,772																
	0,5	1,762		1,772		1,789															
	0,6		1,763		1,775		1,792														
	0,7	1,761		1,769		1,784		1,873													
	0,8		1,765		1,779		1,837		1,830												
	0,9	1,759		1,764		1,776		1,796		1,826											
	1,0		1,766		1,780		1,835		1,835		1,875										
	1,1	1,767		1,769		1,786		1,814		1,850		1,895									
	1,2		1,766		1,782		1,892		1,846		1,893		1,948								
	1,3	1,762		1,773		1,795		1,830		1,874		1,929		1,948							
	1,4		1,767		1,787		1,822		1,865		1,924		1,987		2,619						
	1,5	1,761		1,774		1,879		1,841		1,895		1,960		2,359		2,121					
	1,6		1,767		1,794		1,828		1,882		1,947		2,255		2,114		2,213				
	1,7	1,762		1,780		1,814		1,865		1,932		2,933		2,153		2,223		2,313			
	1,8		1,768		1,794		1,838		1,900		1,976		2,674		2,170		2,283		2,448		
	1,9	1,763		1,785		1,825		1,885		1,961		2,533		2,158		2,275		2,412			
2,0		1,771		1,842		1,858		1,935		2,228		2,125		2,242		2,379		2,586			

Tabla A.20: Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,000																			
	0,1	1,994																			
	0,2		2,186		2,240		2,671		3,234		3,865		4,536		5,233		5,946		6,671		7,443
	0,3	1,957		2,133		2,616		3,178		3,816		4,495		5,283		5,923		6,656		7,396	8,142
	0,4		2,998		2,471		2,542		3,255		3,623		4,295		4,997		5,718		6,451		7,282
	0,5	2,292		2,332		2,486		2,822		3,428		4,800		4,775		5,492		6,223		6,965	7,713
	0,6		2,173		2,486		3,214		3,645		4,320		5,244		5,748		6,484		7,229		7,990
	0,7	2,185		2,322		2,779		3,368		4,292		4,792		5,421		6,148		6,886		7,636	
	0,8		2,116		2,494		3,232		3,639		4,335		4,997		5,712		6,436		7,175		7,917
	0,9	2,000		2,244		2,687		3,249		3,877		4,546		5,238		5,947		6,667		7,394	
	1,0		2,128		2,492		3,792		3,679		4,254		4,931		5,627		6,335		7,045		7,775
	1,1	2,119		2,270		2,714		3,269		3,888		4,545		5,225		5,927		6,627		7,341	
	1,2		2,117		2,482		2,990		3,581		4,222		4,891		5,580		6,281		6,991		7,776
	1,3	2,112		2,269		2,714		3,271		3,896		4,549		5,240		5,928		6,637		7,352	
	1,4		2,124		2,500		3,196		3,622		4,273		4,952		5,657		6,361		7,066		7,872
	1,5	2,987		2,275		2,726		3,296		3,936		4,639		5,369		6,139		6,937		7,767	
	1,6		2,116		2,495		3,268		3,644		4,311		5,063		5,723		6,457		7,187		7,935
	1,7	2,122		2,282		2,753		3,343		3,993		4,684		5,398		6,127		6,867		7,614	
	1,8		2,118		2,566		3,568		3,682		4,362		5,074		5,814		6,543		7,293		8,049
	1,9	2,147		2,298		2,782		3,382		4,456		5,148		5,872		6,611		7,361		8,118	
2,0		2,128		2,529		3,843		3,726		4,414		5,133		5,870		6,620		7,377		8,148	

Tabla A.21: Resultados de RMS Δi_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.1.3.b. 20 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,778																			
	0,1		0,779																		
	0,2			0,778																	
	0,3				0,779																
	0,4					0,779															
	0,5						0,780														
	0,6							0,779													
	0,7								0,780												
	0,8									0,780											
	0,9										0,782										
	1,0											0,779									
	1,1												0,782								
	1,2													0,785							
	1,3														0,781						
	1,4															0,787					
	1,5																0,781				
	1,6																	0,782			
	1,7																		0,782		
	1,8																			0,782	
	1,9																				0,783
2,0																				0,784	

Tabla A.22: Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	4,077																			
	0,1		4,767																		
	0,2			4,839																	
	0,3				4,824																
	0,4					4,921															
	0,5						4,167														
	0,6							4,153													
	0,7								4,122												
	0,8									4,125											
	0,9										4,132										
	1,0											4,180									
	1,1												4,199								
	1,2													4,217							
	1,3														4,216						
	1,4															4,260					
	1,5																4,293				
	1,6																	4,355			
	1,7																		4,433		
	1,8																			4,483	
	1,9																				4,589
2,0																				4,813	

Tabla A.23: Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,385																				
	0,1		2,364																			
	0,2			2,490																		
	0,3				2,579																	
	0,4					2,882																
	0,5						3,128															
	0,6							3,296														
	0,7								3,796													
	0,8									3,925												
	0,9										4,147											
	1,0											4,522										
	1,1												4,816									
	1,2													5,157								
	1,3														5,851							
	1,4															5,932						
	1,5																6,297					
	1,6																	6,724				
	1,7																		6,386			
	1,8																			6,813		
	1,9																				7,225	
2,0																					8,430	

Tabla A.24: Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.1.3.c. 30 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,138																				
	0,1		1,138																			
	0,2			1,137																		
	0,3				1,138																	
	0,4					1,138																
	0,5						1,139															
	0,6							1,137														
	0,7								1,138													
	0,8									1,138												
	0,9										1,139											
	1,0											1,138										
	1,1												1,138									
	1,2													1,139								
	1,3														1,139							
	1,4															1,139						
	1,5																1,139					
	1,6																	1,140				
	1,7																		1,140			
	1,8																			1,140		
	1,9																				1,140	
2,0																					1,141	

Tabla A.25: Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	7,000																				
	0,1		7,164																			
	0,2			7,232																		
	0,3				7,220																	
	0,4					7,284																
	0,5						7,377															
	0,6							7,589														
	0,7								7,438													
	0,8									7,422												
	0,9										7,422											
	1,0											7,573										
	1,1												7,573									
	1,2													7,557								
	1,3														7,633							
	1,4															7,633						
	1,5																7,633					
	1,6																	7,633				
	1,7																		7,633			
	1,8																			7,633		
	1,9																				7,633	
2,0																					7,617	

Tabla A.26: Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,692																				
	0,1		2,725																			
	0,2			2,824																		
	0,3				2,925																	
	0,4					3,126																
	0,5						3,469															
	0,6							3,768														
	0,7								4,000													
	0,8									4,248												
	0,9										4,567											
	1,0											4,923										
	1,1												4,563									
	1,2													4,876								
	1,3														4,876							
	1,4															4,893						
	1,5																4,555					
	1,6																	4,933				
	1,7																		4,933			
	1,8																			4,962		
	1,9																				4,962	
2,0																					4,962	

Tabla A.27: Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.2. Máquina 2

A.2.1. Máquina sana - 0 BRB

A.2.1.a. 2,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																					
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																					
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,705																					
	0,1	0,685		0,687		0,690		0,691		0,693		0,696		0,698		0,700		0,720		0,743			
	0,2		0,685		0,686		0,687		0,689		0,690		0,691		0,693		0,694		0,695		0,696		
	0,3		0,683		0,683		0,684		0,684		0,684		0,684		0,685		0,685		0,685		0,686		
	0,4			0,684		0,685		0,686		0,687		0,688		0,689		0,692		0,691		0,693		0,694	
	0,5				0,684		0,684		0,684		0,685		0,685		0,687		0,688		0,689		0,690		0,688
	0,6					0,684		0,684		0,685		0,685		0,684		0,685		0,686		0,687		0,688	
	0,7						0,684		0,685		0,685		0,686		0,687		0,687		0,688		0,689		0,696
	0,8							0,684		0,685		0,684		0,685		0,686		0,687		0,688		0,689	0,689
	0,9								0,684		0,684		0,684		0,685		0,685		0,686		0,687		0,687
	1,0									0,684		0,685		0,686		0,686		0,687		0,688		0,689	0,690
	1,1										0,684		0,685		0,685		0,685		0,687		0,687		0,688
	1,2											0,684		0,685		0,685		0,685		0,687		0,687	0,688
	1,3												0,684		0,685		0,685		0,687		0,687		0,688
	1,4													0,684		0,685		0,685		0,686		0,687	0,687
	1,5														0,684		0,685		0,686		0,686		0,687
	1,6															0,684		0,685		0,686		0,687	0,688
	1,7																0,684		0,685		0,686		0,686
	1,8																	0,684		0,685		0,686	0,687
	1,9																		0,684		0,685		0,686
2,0																			0,683		0,684	0,686	

Tabla A.28: Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																						
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																						
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0		
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,230																						
	0,1	1,146		1,497		2,914		2,769		3,478		4,211		4,930		5,660		6,389		7,116		7,474		
	0,2		1,738		1,546		2,252		2,926		3,671		4,428		5,189		5,951		6,713		7,216		7,474	
	0,3		1,182		1,646		2,269		2,932		3,629		4,338		5,537		5,773		6,494		7,216		7,474	
	0,4			1,164		1,460		1,865		2,322		2,876		3,366		3,816		4,329		4,847		5,368		5,368
	0,5			1,834		1,276		1,629		2,431		2,535		2,984		3,477		3,977		4,482		4,993		4,993
	0,6			1,138		1,348		1,648		1,998		2,375		2,770		3,175		3,585		4,163		4,421		4,421
	0,7			1,820		1,230		1,524		1,845		2,226		2,629		3,446		3,469		3,899		4,332		4,332
	0,8			1,153		1,352		1,625		1,942		2,284		2,642		3,112		3,385		3,765		4,148		4,148
	0,9			1,878		1,227		1,474		1,785		2,131		2,499		2,879		3,268		3,663		4,061		4,061
	1,0			1,117		1,280		1,524		1,818		2,148		2,481		2,833		3,193		3,558		3,926		3,926
	1,1			1,894		1,222		1,454		1,746		2,732		2,429		2,782		3,159		3,527		3,954		3,954
	1,2			1,126		1,293		1,535		1,825		2,143		2,477		2,823		3,176		3,534		3,896		3,896
	1,3			1,114		1,244		1,476		1,769		2,774		2,413		2,768		3,117		3,478		3,844		3,844
	1,4			1,134		1,340		1,547		1,836		2,150		2,486		2,822		3,171		3,525		3,883		3,883
	1,5			1,946		1,225		1,442		1,714		2,179		2,342		2,678		3,233		3,374		3,729		3,729
	1,6			1,129		1,294		1,533		1,817		2,128		2,456		2,795		3,142		3,493		3,849		3,849
	1,7			1,853		1,196		1,396		1,653		1,945		2,259		2,586		2,922		3,264		3,617		3,617
	1,8			1,126		1,289		1,524		1,846		2,113		2,438		2,774		3,118		3,467		3,819		3,819
	1,9			1,944		1,218		1,424		1,682		1,972		2,282		2,632		2,934		3,274		3,611		3,611
2,0			1,133		1,298		1,533		1,813		2,118		2,443		2,773		3,113		3,459		3,879		3,879	

Tabla A.29: Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,820																				
	0,1		0,927																			
	0,2			1,721																		
	0,3				1,885																	
	0,4					1,852																
	0,5						2,321															
	0,6							2,423														
	0,7								2,980													
	0,8									3,163												
	0,9										3,681											
	1,0											3,782										
	1,1												3,594									
	1,2													3,760								
	1,3														3,493							
	1,4															4,484						
	1,5																5,157					
	1,6																	5,876				
	1,7																		5,739			
	1,8																			6,446		
	1,9																				6,642	
2,0																					6,819	

Tabla A.30: Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.2.1.b. 5,7 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,061																				
	0,1		1,297																			
	0,2			1,298																		
	0,3				1,287																	
	0,4					1,320																
	0,5						1,297															
	0,6							1,289														
	0,7								1,335													
	0,8									1,296												
	0,9										1,294											
	1,0											1,312										
	1,1												1,312									
	1,2													1,298								
	1,3														1,341							
	1,4															1,297						
	1,5																1,299					
	1,6																	1,329				
	1,7																		1,374			
	1,8																			1,300		
	1,9																				1,358	
2,0																					1,364	

Tabla A.31: Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,639																				
	0,1		1,500																			
	0,2			1,467																		
	0,3				1,625																	
	0,4					1,649																
	0,5						1,688															
	0,6							1,736														
	0,7								1,766													
	0,8									1,846												
	0,9										1,963											
	1,0											1,812										
	1,1												1,815									
	1,2													1,993								
	1,3														2,477							
	1,4															2,559						
	1,5																2,882					
	1,6																	2,888				
	1,7																		3,215			
	1,8																			3,557		
	1,9																				3,974	
2,0																					3,855	

Tabla A.32: Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,820																				
	0,1		0,752																			
	0,2			0,920																		
	0,3				0,854																	
	0,4					1,814																
	0,5						1,586															
	0,6							2,495														
	0,7								2,496													
	0,8									2,222												
	0,9										2,466											
	1,0											2,962										
	1,1												2,962									
	1,2													3,122								
	1,3														3,122							
	1,4															3,674						
	1,5																3,885					
	1,6																	4,653				
	1,7																		5,422			
	1,8																			6,514		
	1,9																				6,848	
2,0																					7,740	

Tabla A.33: Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.2.1.c. 8,1 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,443																			
	0,1		1,389																		
	0,2			1,389																	
	0,3				1,388																
	0,4					1,389															
	0,5						1,389														
	0,6							1,388													
	0,7								1,389												
	0,8									1,388											
	0,9										1,388										
	1,0											1,389									
	1,1												1,389								
	1,2													1,389							
	1,3														1,389						
	1,4															1,390					
	1,5																1,389				
	1,6																	1,389			
	1,7																		1,389		
	1,8																			1,390	
	1,9																				1,396
2,0																					1,389

Tabla A.34: Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,049																			
	0,1		1,988																		
	0,2			1,981																	
	0,3				1,984																
	0,4					1,987															
	0,5						1,972														
	0,6							1,986													
	0,7								1,986												
	0,8									1,992											
	0,9										1,988										
	1,0											1,994									
	1,1												1,994								
	1,2													1,994							
	1,3														1,994						
	1,4															1,996					
	1,5																1,996				
	1,6																	1,996			
	1,7																		1,990		
	1,8																			1,998	
	1,9																				1,998
2,0																					2,049

Tabla A.35: Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,410																			
	0,1		0,758		1,571		2,569		3,467		4,436		5,482		6,383		7,359		8,336		9,313
	0,2			0,946		1,697		2,331		3,717		3,817		4,567		5,321		6,748		6,837	7,588
	0,3				0,723		1,483		2,219		3,577		3,962		4,759		5,615		6,473		7,333
	0,4					0,947		1,638		2,388		3,156		3,929		4,768		5,486		6,266	7,462
	0,5						0,781		1,552		2,444		3,488		4,382		5,359		6,338		8,297
	0,6							1,471		1,857		2,729		3,626		4,486		5,375		6,265	7,158
	0,7								0,733		1,496		2,388		3,362		4,234		5,165		6,996
	0,8									1,488		1,872		2,617		3,441		4,272		5,165	6,783
	0,9										0,728		1,433		2,264		3,121		3,988		4,860
	1,0											0,980		1,732		2,484		3,282		4,864	4,894
	1,1												0,736		1,478		2,196		3,114		4,665
	1,2													0,973		1,676		2,437		3,214	3,999
	1,3														0,730		1,363		2,113		2,889
	1,4															0,978		1,663		2,433	3,162
	1,5																0,750		1,292		2,132
	1,6																	0,944		1,623	2,318
	1,7																		0,696		1,248
	1,8																			0,934	1,569
	1,9																				1,843
2,0																				2,198	

Tabla A.36: Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.2.2. Máquina con falla - 1 BRB

A.2.2.a. 2,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,709																			
	0,1		0,692		0,694		0,697		0,699		0,713		0,732		0,753		0,773		0,793		0,711
	0,2			0,692		0,694		0,695		0,697		0,698		0,699		0,754		0,717		0,728	0,738
	0,3				0,698		0,700		0,691		0,691		0,692		0,693		0,693		0,694		0,694
	0,4					0,692		0,693		0,694		0,695		0,696		0,697		0,698		0,699	0,700
	0,5						0,700		0,692		0,692		0,693		0,695		0,695		0,696		0,697
	0,6							0,700		0,691		0,692		0,692		0,693		0,693		0,694	0,694
	0,7								0,700		0,692		0,692		0,694		0,696		0,696		0,698
	0,8									0,700		0,691		0,692		0,694		0,695		0,696	0,696
	0,9										0,698		0,691		0,691		0,694		0,695		0,695
	1,0											0,692		0,692		0,693		0,694		0,696	0,698
	1,1												0,698		0,700		0,691		0,695		0,695
	1,2													0,698		0,692		0,693		0,694	0,696
	1,3														0,698		0,691		0,692		0,696
	1,4															0,698		0,691		0,691	0,695
	1,5																0,698		0,700		0,691
	1,6																	0,700		0,691	0,692
	1,7																		0,697		0,691
	1,8																			0,698	0,700
	1,9																				0,691
2,0																				0,691	

Tabla A.37: Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,049																				
	0,1		2,679																			
	0,2			2,655																		
	0,3				2,930																	
	0,4					2,745																
	0,5						2,809															
	0,6							2,818														
	0,7								2,937													
	0,8									3,000												
	0,9										2,947											
	1,0											2,966										
	1,1												2,957									
	1,2													2,995								
	1,3														2,978							
	1,4															2,978						
	1,5																2,959					
	1,6																	2,959				
	1,7																		2,930			
	1,8																			2,930		
	1,9																				2,951	
2,0																					2,876	

Tabla A.38: Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,820																				
	0,1		1,149																			
	0,2			1,284																		
	0,3				1,234																	
	0,4					1,343																
	0,5						1,652															
	0,6							1,813														
	0,7								2,264													
	0,8									2,491												
	0,9										2,935											
	1,0											3,080										
	1,1												3,080									
	1,2													3,590								
	1,3														3,751							
	1,4															4,191						
	1,5																4,398					
	1,6																	4,683				
	1,7																		4,683			
	1,8																			4,683		
	1,9																				4,364	
2,0																					4,364	

Tabla A.39: Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.2.2.b. 5,7 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,066																			
	0,1		1,330		1,349		1,369		1,390		1,411		1,433		1,456		1,479		1,533		1,527
	0,2			1,329		1,340		1,358		1,362		1,375		1,387		1,422		1,414		1,427	1,449
	0,3		1,319		1,319		1,319		1,319		1,320		1,330		1,322		1,322		1,321		1,325
	0,4			1,327		1,334		1,342		1,349		1,357		1,365		1,374		1,382		1,393	1,398
	0,5		1,321		1,325		1,330		1,335		1,343		1,346		1,352		1,357		1,363		1,369
	0,6			1,320		1,322		1,321		1,323		1,325		1,328		1,332		1,337		1,341	1,347
	0,7		1,329		1,324		1,328		1,333		1,339		1,348		1,358		1,368		1,379		1,390
	0,8			1,327		1,322		1,325		1,328		1,331		1,336		1,348		1,347		1,354	1,362
	0,9		1,319		1,320		1,327		1,322		1,325		1,328		1,331		1,336		1,349		1,346
	1,0			1,322		1,325		1,328		1,332		1,337		1,343		1,349		1,356		1,363	1,371
	1,1		1,320		1,326		1,322		1,324		1,327		1,330		1,334		1,338		1,343		1,350
	1,2			1,320		1,323		1,322		1,324		1,327		1,329		1,333		1,337		1,342	1,348
	1,3		1,323		1,322		1,325		1,328		1,331		1,335		1,348		1,345		1,351		1,358
	1,4			1,320		1,323		1,322		1,323		1,326		1,329		1,332		1,336		1,347	1,346
	1,5		1,320		1,320		1,329		1,322		1,324		1,327		1,336		1,334		1,338		1,343
	1,6			1,327		1,322		1,324		1,328		1,333		1,334		1,338		1,343		1,348	1,354
	1,7		1,319		1,320		1,321		1,321		1,323		1,325		1,327		1,336		1,334		1,338
	1,8			1,320		1,323		1,321		1,323		1,325		1,328		1,338		1,334		1,338	1,343
	1,9		1,320		1,329		1,322		1,324		1,327		1,329		1,333		1,336		1,347		1,345
2,0			1,319		1,319		1,322		1,322		1,323		1,325		1,327		1,330		1,333	1,337	

Tabla A.40: Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	3,689																			
	0,1		4,477		4,484		4,511		4,559		4,627		4,713		4,813		4,920		5,029		5,136
	0,2			4,481		4,517		4,586		4,679		4,793		4,924		5,074		5,247		5,445	5,673
	0,3		4,522		4,730		5,079		5,524		6,022		6,549		7,097		7,672		8,287		8,958
	0,4			4,523		4,717		5,040		5,452		5,919		6,419		6,944		7,505		8,116	8,783
	0,5		4,473		4,552		4,758		5,069		5,450		5,867		6,299		6,740		7,204		7,711
	0,6			4,482		4,573		4,753		5,000		5,283		5,574		5,854		6,119		6,384	6,673
	0,7		4,498		4,554		4,632		4,733		4,866		5,046		5,289		5,601		5,979		6,410
	0,8			4,509		4,574		4,675		4,811		4,979		5,178		5,404		5,656		5,930	6,223
	0,9		4,486		4,526		4,608		4,728		4,883		5,068		5,281		5,516		5,771		6,044
	1,0			4,488		4,528		4,602		4,708		4,845		5,010		5,199		5,410		5,639	5,884
	1,1		4,487		4,526		4,600		4,706		4,843		5,006		5,192		5,397		5,619		5,854
	1,2			4,495		4,539		4,612		4,713		4,840		4,991		5,164		5,355		5,562	5,784
	1,3		4,489		4,525		4,592		4,688		4,814		4,968		5,146		5,343		5,557		5,783
	1,4			4,503		4,553		4,631		4,732		4,856		4,999		5,159		5,335		5,526	5,730
	1,5		4,489		4,524		4,587		4,675		4,787		4,921		5,074		5,245		5,432		5,634
	1,6			4,497		4,540		4,609		4,703		4,819		4,957		5,114		5,287		5,477	5,680
	1,7		4,486		4,514		4,567		4,645		4,746		4,868		5,010		5,169		5,343		5,532
	1,8			4,497		4,538		4,604		4,693		4,804		4,935		5,085		5,252		5,433	5,629
	1,9		4,489		4,521		4,577		4,656		4,756		4,877		5,016		5,172		5,342		5,527
2,0			4,498		4,539		4,604		4,692		4,802		4,931		5,078		5,242		5,420	5,611	

Tabla A.41: Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	4,508																			
	0,1	6,691		6,638		6,553		6,466		6,405		6,386		6,414		6,480		6,563		6,645	
	0,2		6,655		6,534		6,384		6,264		6,241		6,350		6,549		6,738		6,839		6,835
	0,3	6,687		6,579		6,433		6,356		6,445		6,698		6,971		7,133		7,176		7,165	
	0,4		6,643		6,524		6,434		6,481		6,732		7,106		7,449		7,682		7,829		7,953
	0,5	6,688		6,679		6,714		6,830		7,083		7,546		8,224		9,034		9,862		10,613	
	0,6		6,698		6,706		6,750		6,866		7,098		7,477		7,994		8,595		9,205		9,773
	0,7	6,694		6,692		6,712		6,769		6,879		7,058		7,318		7,665		8,089		8,567	
	0,8		6,705		6,709		6,723		6,759		6,831		6,950		7,122		7,354		7,642		7,978
	0,9	6,692		6,673		6,655		6,652		6,679		6,747		6,867		7,043		7,276		7,559	
	1,0		6,435		6,070		5,694		5,429		5,402		5,693		6,284		7,080		7,967		8,840
	1,1	6,712		6,748		6,791		6,836		6,877		6,912		6,941		6,967		6,995		7,036	
	1,2		6,712		6,730		6,749		6,770		6,793		6,819		6,850		6,890		6,943		7,014
	1,3	6,708		6,732		6,759		6,791		6,826		6,867		6,914		6,970		7,036		7,116	
	1,4		6,707		6,721		6,738		6,761		6,790		6,827		6,872		6,927		6,994		7,074
	1,5	6,702		6,713		6,728		6,749		6,776		6,810		6,853		6,906		6,971		7,049	
	1,6		6,704		6,714		6,730		6,752		6,782		6,820		6,867		6,925		6,994		7,075
	1,7	6,699		6,704		6,714		6,729		6,751		6,780		6,818		6,866		6,924		6,994	
	1,8		6,703		6,712		6,728		6,750		6,780		6,817		6,863		6,919		6,985		7,061
	1,9	6,701		6,712		6,728		6,752		6,782		6,822		6,870		6,927		6,993		7,069	
2,0		6,694		6,697		6,709		6,734		6,772		6,825		6,893		6,974		7,066		7,167	

Tabla A.44: Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,820																			
	0,1	1,463		2,000		2,782		3,655		4,568		5,503		6,450		7,406		8,369		9,339	
	0,2		1,547		1,986		2,573		3,240		3,955		4,695		5,445		6,193		6,935		7,671
	0,3	1,434		1,842		2,479		3,224		4,028		4,865		5,716		6,567		7,409		8,241	
	0,4		1,537		1,982		2,589		3,286		4,031		4,792		5,547		6,291		7,029		7,769
	0,5	1,419		1,877		2,617		3,501		4,472		5,470		6,435		7,329		8,162		8,989	
	0,6		1,617		2,216		2,970		3,788		4,636		5,500		6,375		7,257		8,145		9,040
	0,7	1,442		1,924		2,658		3,495		4,378		5,286		6,208		7,137		8,069		9,000	
	0,8		1,612		2,158		2,849		3,605		4,395		5,205		6,027		6,856		7,689		8,522
	0,9	1,425		1,836		2,495		3,263		4,084		4,934		5,801		6,678		7,558		8,438	
	1,0		0,931		0,974		1,639		2,562		3,599		4,695		5,810		6,915		7,979		8,980
	1,1	1,478		1,940		2,585		3,301		4,045		4,803		5,568		6,338		7,116		7,901	
	1,2		1,602		2,107		2,742		3,432		4,150		4,882		5,624		6,372		7,126		7,885
	1,3	1,454		1,853		2,443		3,117		3,830		4,563		5,309		6,063		6,824		7,589	
	1,4		1,590		2,071		2,682		3,352		4,051		4,767		5,493		6,227		6,966		7,709
	1,5	1,440		1,797		2,344		2,978		3,652		4,349		5,058		5,776		6,499		7,226	
	1,6		1,567		2,018		2,600		3,243		3,917		4,608		5,311		6,020		6,735		7,453
	1,7	1,433		1,759		2,269		2,866		3,506		4,168		4,844		5,529		6,219		6,913	
	1,8		1,550		1,975		2,530		3,149		3,799		4,468		5,148		5,836		6,529		7,226
	1,9	1,423		1,714		2,184		2,743		3,347		3,976		4,619		5,271		5,931		6,595	
2,0		1,553		1,959		2,487		3,075		3,693		4,329		4,976		5,631		6,292		6,958	

Tabla A.45: Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.2.3. Máquina con falla - 2 BRB

A.2.3.a. 2,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																					
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																					
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,713																					
	0,1		0,699		0,713		0,733		0,752		0,775		0,789		0,717		0,713		0,714		0,716		
	0,2			0,699		0,754		0,715		0,725		0,734		0,743		0,752		0,762		0,773	0,783		
	0,3				0,698		0,698		0,698		0,698		0,698		0,697		0,697		0,697		0,697		
	0,4					0,699		0,699		0,699		0,700		0,711		0,722		0,737		0,755	0,775		
	0,5						0,698		0,698		0,698		0,699		0,700		0,700		0,745		0,715	0,727	
	0,6							0,698		0,698		0,698		0,698		0,698		0,698		0,699	0,700	0,713	
	0,7								0,699		0,699		0,699		0,700		0,731		0,712		0,722	0,733	
	0,8									0,698		0,698		0,699		0,699		0,699		0,700	0,745	0,713	
	0,9										0,698		0,698		0,698		0,699		0,699		0,699	0,700	
	1,0											0,699		0,699		0,722		0,753		0,711	0,718	0,726	
	1,1												0,698		0,699		0,699		0,699		0,712	0,769	
	1,2													0,698		0,699		0,699		0,700	0,786	0,764	
	1,3														0,698		0,699		0,722		0,752	0,717	
	1,4															0,699		0,699		0,700	0,712	0,766	
	1,5																0,699		0,699		0,700	0,736	
	1,6																	0,699		0,700	0,746	0,716	
	1,7																		0,699		0,700	0,711	
	1,8																			0,699	0,700	0,714	0,764
	1,9																				0,700	0,742	0,793
2,0																				0,699	0,700	0,711	

Tabla A.46: Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	3,689																				
	0,1		4,381		4,539		4,823		5,207		5,668		6,182		6,733		7,311		7,907		8,516	
	0,2			4,428		4,648		4,985		5,415		5,919		6,488		7,116		7,796		8,523	9,288	
	0,3				4,458		4,684		4,915		5,171		5,503		5,968		6,595		7,373		8,265	9,222
	0,4					4,430		4,696		5,088		5,527		5,951		6,317		6,600		6,795	6,926	7,046
	0,5						4,554		4,808		5,109		5,430		5,756		6,071		6,362		6,633	6,905
	0,6							4,609		4,810		5,032		5,274		5,531		5,790		6,037	6,264	6,484
	0,7								4,694		4,989		5,290		5,538		5,712		5,845		6,001	6,246
	0,8									4,732		4,938		5,160		5,392		5,630		5,874	6,124	6,380
	0,9										4,797		5,005		5,233		5,474		5,729		5,995	6,273
	1,0											4,640		4,808		5,001		5,213		5,440	5,678	6,183
	1,1												4,713		4,808		4,899		5,111		5,345	5,596
	1,2													4,937		5,140		5,345		5,596	5,861	6,140
	1,3														4,937		5,140		5,345		5,596	6,113
	1,4															4,937		5,140		5,345	5,596	6,113
	1,5																4,937		5,140		5,345	6,113
	1,6																	4,937		5,140		5,345
	1,7																		4,937		5,140	
	1,8																			4,937		
	1,9																				4,937	
2,0																					4,937	

Tabla A.47: Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,230																				
	0,1	1,341		2,014		2,957		3,983		5,044		6,123		7,216		8,318		9,429		10,547		
	0,2		1,474	2,206		3,106		3,987		4,957		5,970		6,985		7,123		8,175		9,235		10,299
	0,3	1,467		2,190		3,060		3,987		4,957		5,970		6,985		7,026		8,121		9,247		10,392
	0,4		1,467	2,122		2,932		3,781		4,625		5,446		6,241		7,012		7,766		8,518		9,266
	0,5	1,304		1,805		2,558		3,390		4,242		5,096		5,948		6,797		7,643		8,489		9,335
	0,6		1,459	1,995		2,661		3,369		4,090		4,816		5,546		6,282		7,022		7,766		8,510
	0,7	1,323		1,745		2,361		3,076		3,858		4,684		5,527		6,359		7,164		7,937		8,710
	0,8		1,491	2,000		2,625		3,299		3,996		4,705		5,421		6,141		6,862		7,585		8,308
	0,9	1,313		1,721		2,336		3,032		3,765		4,515		5,274		6,038		6,805		7,573		8,340
	1,0		1,438	1,907		2,506		3,161		3,843		4,539		5,243		5,952		6,665		7,380		8,095
	1,1	1,323		1,718		2,299		2,957		3,651		4,362		5,083		5,811		6,542		7,276		8,010
	1,2		1,440	1,897		2,480		2,863		3,119		3,785		4,466		5,155		5,850		6,549		7,251
	1,3	1,319		1,689		2,237		2,863		3,525		4,206		4,898		5,596		6,298		7,003		7,705
	1,4		1,442	1,888		2,455		3,078		3,728		4,393		5,067		5,746		6,430		7,116		7,802
	1,5	1,304		1,632		2,140		2,728		3,354		4,000		4,658		5,324		5,994		6,667		7,340
	1,6		1,422	1,843		2,388		2,989		3,618		4,263		4,918		5,578		6,243		6,910		7,577
	1,7	1,299		1,602		2,079		2,637		3,234		3,851		4,481		5,118		5,761		6,407		7,054
	1,8		1,414	1,817		2,340		2,919		3,528		4,152		4,786		5,426		6,070		6,717		7,364
	1,9	1,293		1,572		2,019		2,547		3,116		3,705		4,308		4,919		5,535		6,154		6,773
2,0		1,411	1,795		2,296		2,852		3,437		4,039		4,649		5,267		5,888		6,512		7,131	

Tabla A.48: Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.2.3.b. 5,7 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,066																				
	0,1	1,346		1,363		1,382		1,413		1,422		1,443		1,466		1,495		1,516		1,542		
	0,2		1,345	1,353		1,363		1,375		1,388		1,417		1,466		1,495		1,516		1,542		1,563
	0,3	1,336		1,334		1,332		1,333		1,334		1,336		1,339		1,346		1,342		1,341		1,344
	0,4		1,342	1,347		1,354		1,363		1,373		1,384		1,393		1,459		1,462		1,462		1,414
	0,5	1,338		1,340		1,343		1,347		1,352		1,359		1,367		1,375		1,382		1,390		1,398
	0,6		1,335	1,335		1,336		1,338		1,344		1,344		1,344		1,348		1,352		1,356		1,368
	0,7	1,337		1,348		1,347		1,356		1,367		1,377		1,386		1,393		1,396		1,396		1,382
	0,8		1,336	1,337		1,338		1,348		1,345		1,344		1,356		1,357		1,365		1,373		1,382
	0,9	1,336		1,336		1,336		1,336		1,338		1,344		1,344		1,348		1,353		1,359		1,359
	1,0		1,338	1,344		1,343		1,347		1,351		1,356		1,363		1,363		1,369		1,377		1,386
	1,1	1,337		1,336		1,338		1,338		1,344		1,343		1,347		1,351		1,357		1,363		1,363
	1,2		1,336	1,336		1,337		1,339		1,340		1,342		1,342		1,346		1,349		1,354		1,360
	1,3	1,337		1,338		1,340		1,342		1,345		1,349		1,353		1,359		1,364		1,379		1,379
	1,4		1,336	1,337		1,337		1,338		1,338		1,340		1,342		1,346		1,350		1,354		1,359
	1,5	1,337		1,336		1,337		1,338		1,339		1,350		1,344		1,347		1,358		1,355		1,367
	1,6		1,337	1,338		1,340		1,342		1,345		1,348		1,352		1,356		1,370		1,367		1,367
	1,7	1,336		1,336		1,336		1,336		1,338		1,340		1,341		1,344		1,347		1,359		1,359
	1,8		1,337	1,337		1,337		1,338		1,340		1,342		1,342		1,345		1,348		1,351		1,355
	1,9	1,337		1,337		1,338		1,340		1,342		1,344		1,347		1,356		1,354		1,358		1,358
2,0		1,336	1,336		1,336		1,336		1,336		1,337		1,339		1,348		1,343		1,346		1,349	

Tabla A.49: Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	6,148																				
	0,1		8,573																			
	0,2			8,634																		
	0,3				8,834																	
	0,4					8,873																
	0,5						8,921															
	0,6							8,928														
	0,7								8,803													
	0,8									8,933												
	0,9										8,940											
	1,0											8,949										
	1,1												8,997									
	1,2													8,927								
	1,3														8,932							
	1,4															8,904						
	1,5																8,902					
	1,6																	8,964				
	1,7																		8,983			
	1,8																			8,903		
	1,9																				8,903	
2,0																					8,937	

Tabla A.50: Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,230																				
	0,1		1,390																			
	0,2			1,484																		
	0,3				1,988																	
	0,4					2,245																
	0,5						2,712															
	0,6							2,788														
	0,7								3,026													
	0,8									3,378												
	0,9										3,892											
	1,0											3,959										
	1,1												4,529									
	1,2													4,608								
	1,3														4,334							
	1,4															4,556						
	1,5																4,805					
	1,6																	5,076				
	1,7																		5,289			
	1,8																			5,587		
	1,9																				6,334	
2,0																					6,676	

Tabla A.51: Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.2.3.c. 8,1 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,447																				
	0,1		1,390																			
	0,2			1,390																		
	0,3				1,389																	
	0,4					1,390																
	0,5						1,390															
	0,6							1,389														
	0,7								1,389													
	0,8									1,390												
	0,9										1,390											
	1,0											1,390										
	1,1												1,390									
	1,2													1,390								
	1,3														1,390							
	1,4															1,390						
	1,5																1,390					
	1,6																	1,390				
	1,7																		1,390			
	1,8																			1,390		
	1,9																				1,390	
2,0																					1,390	

Tabla A.52: Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	9,016																				
	0,1		12,553																			
	0,2			12,597																		
	0,3				12,649																	
	0,4					12,665																
	0,5						12,750															
	0,6							12,844														
	0,7								12,909													
	0,8									12,993												
	0,9										12,899											
	1,0											12,970										
	1,1												12,859									
	1,2													12,953								
	1,3														12,871							
	1,4															12,700						
	1,5																12,523					
	1,6																	12,871				
	1,7																		12,973			
	1,8																			12,973		
	1,9																				12,973	
2,0																					12,973	

Tabla A.53: Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,049																				
	0,1		2,543																			
	0,2			2,620																		
	0,3				2,812																	
	0,4					2,940																
	0,5						3,394															
	0,6							3,684														
	0,7								4,132													
	0,8									4,201												
	0,9										4,639											
	1,0											3,996										
	1,1												4,492									
	1,2													3,984								
	1,3														4,319							
	1,4															4,956						
	1,5																5,115					
	1,6																	5,377				
	1,7																		5,667			
	1,8																			6,324		
	1,9																				6,993	
2,0																					7,669	

Tabla A.54: Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.3. Máquina 3

A.3.1. Máquina sana - 0 BRB

A.3.1.a. 6,8 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,416																				
	0,1		0,417																			
	0,2			0,417																		
	0,3				0,417																	
	0,4					0,417																
	0,5						0,417															
	0,6							0,417														
	0,7								0,417													
	0,8									0,418												
	0,9										0,418											
	1,0											0,418										
	1,1												0,418									
	1,2													0,418								
	1,3														0,418							
	1,4															0,419						
	1,5																0,418					
	1,6																	0,418				
	1,7																		0,418			
	1,8																			0,418		
	1,9																				0,418	
2,0																					0,419	

Tabla A.55: Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,274																				
	0,1		0,486																			
	0,2			0,486																		
	0,3				0,491																	
	0,4					0,512																
	0,5						0,539															
	0,6							0,578														
	0,7								0,641													
	0,8									0,613												
	0,9										0,698											
	1,0											0,745										
	1,1												0,798									
	1,2													0,875								
	1,3														0,898							
	1,4															0,976						
	1,5																0,912					
	1,6																	0,972				
	1,7																		0,972			
	1,8																			0,972		
	1,9																				0,977	
2,0																					0,977	

Tabla A.56: Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,548																				
	0,1		5,502																			
	0,2			5,463																		
	0,3				5,372																	
	0,4					5,570																
	0,5						5,823															
	0,6							5,953														
	0,7								6,309													
	0,8									6,398												
	0,9										6,056											
	1,0											6,423										
	1,1												6,826									
	1,2													6,850								
	1,3														6,850							
	1,4															6,850						
	1,5																6,850					
	1,6																	6,850				
	1,7																		6,850			
	1,8																			6,850		
	1,9																				6,850	
2,0																					6,850	

Tabla A.57: Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.3.1.b. 15,3 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,816																			
	0,1		0,817																		
	0,2			0,818																	
	0,3				0,817																
	0,4					0,817															
	0,5						0,817														
	0,6							0,817													
	0,7								0,817												
	0,8									0,818											
	0,9										0,818										
	1,0											0,818									
	1,1												0,818								
	1,2													0,818							
	1,3														0,818						
	1,4															0,819					
	1,5																0,818				
	1,6																	0,818			
	1,7																		0,818		
	1,8																			0,818	
	1,9																				0,818
2,0																					0,818

Tabla A.58: Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,548																			
	0,1		0,720																		
	0,2			0,720																	
	0,3				0,722																
	0,4					0,772															
	0,5						0,794														
	0,6							0,839													
	0,7								0,885												
	0,8									0,865											
	0,9										0,972										
	1,0											1,625									
	1,1												1,439								
	1,2													1,316							
	1,3														1,361						
	1,4															1,194					
	1,5																1,147				
	1,6																	1,212			
	1,7																		1,234		
	1,8																			1,347	
	1,9																				1,416
2,0																					1,467

Tabla A.59: Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,548																				
	0,1	7,381																				
	0,2		7,279																			
	0,3		7,251		7,204																	
	0,4			7,313		7,416																
	0,5			7,328		7,424		7,608														
	0,6				7,369		7,504		7,715													
	0,7					7,392		7,538														
	0,8						7,389		7,536													
	0,9							7,459		7,632												
	1,0								7,550		7,742											
	1,1									7,637		7,840										
	1,2										7,714		7,925									
	1,3											7,718		7,921								
	1,4												7,741		7,938							
	1,5													7,780		7,971						
	1,6														7,938		8,168					
	1,7															8,046		8,260				
	1,8																8,086		8,293			
	1,9																	8,094		8,291		
2,0																		8,048		8,229		
																			8,028		8,196	

Tabla A.60: Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.3.1.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,225																				
	0,1	1,225																				
	0,2		1,225																			
	0,3		1,225		1,225																	
	0,4			1,225		1,225																
	0,5			1,225		1,225		1,225														
	0,6				1,225		1,225		1,225													
	0,7					1,225		1,225														
	0,8						1,225		1,225													
	0,9							1,225		1,225												
	1,0								1,225		1,226											
	1,1									1,225		1,225										
	1,2										1,225		1,225									
	1,3											1,225		1,225								
	1,4												1,225		1,225							
	1,5													1,225		1,226						
	1,6														1,226		1,225					
	1,7															1,226		1,225				
	1,8																1,225		1,225			
	1,9																	1,225		1,225		
2,0																		1,225		1,225		

Tabla A.61: Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,685																				
	0,1	1,177																				
	0,2		1,154																			
	0,3		1,170		1,169																	
	0,4			1,183		1,213																
	0,5			1,176		1,195		1,239														
	0,6				1,183		1,217		1,275													
	0,7				1,183		1,290		1,262		1,337											
	0,8				1,170		1,189		1,233		1,300											
	0,9				1,179		1,244		1,251		1,318											
	1,0				1,186		1,217		1,269		1,336											
	1,1				1,176		1,193		1,229		1,282											
	1,2				1,186		1,230		1,283		1,352											
	1,3				1,175		1,189		1,222		1,272											
	1,4				1,185		1,213		1,258		1,319											
	1,5				1,177		1,194		1,228		1,278											
	1,6				1,188		1,218		1,263		1,323											
	1,7				1,177		1,192		1,224		1,271											
	1,8				1,185		1,212		1,253		1,392											
	1,9				1,177		1,195		1,222		1,265											
2,0				1,184		1,273		1,246		1,296												

Tabla A.62: Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,411																				
	0,1	12,426																				
	0,2		12,228		12,490																	
	0,3		12,341		12,242		12,107															
	0,4			12,358		12,364		12,433														
	0,5			12,406		12,432		12,512														
	0,6			12,421		12,477		12,581														
	0,7			12,406		12,423		12,486		12,594												
	0,8			12,398		12,388		12,405		12,464												
	0,9			12,398		12,395		12,431		12,504												
	1,0			12,411		12,405		12,428		12,485												
	1,1			12,411		12,425		12,468		12,539												
	1,2			12,417		12,417		12,446		12,500												
	1,3			12,407		12,411		12,439		12,490												
	1,4			12,407		12,401		12,410		12,439												
	1,5			12,406		12,404		12,421		12,456												
	1,6			12,410		12,410		12,422		12,451												
	1,7			12,411		12,417		12,438		12,473												
	1,8			12,410		12,410		12,420		12,443												
	1,9			12,408		12,405		12,414		12,435												
2,0			12,404		12,405		12,416		12,438													

Tabla A.63: Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.3.2. Máquina con falla - 1 BRB

A.3.2.a. 6,8 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,429																			
	0,1		0,428																		
	0,2			0,428																	
	0,3				0,428																
	0,4					0,428															
	0,5						0,428														
	0,6							0,428													
	0,7								0,428												
	0,8									0,428											
	0,9										0,428										
	1,0											0,428									
	1,1												0,428								
	1,2													0,428							
	1,3														0,428						
	1,4															0,428					
	1,5																0,428				
	1,6																	0,428			
	1,7																		0,428		
	1,8																			0,428	
	1,9																				0,428
2,0																					0,428

Tabla A.64: Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,233																				
	0,1		1,294																			
	0,2			1,277																		
	0,3				1,288																	
	0,4					1,277																
	0,5						1,277															
	0,6							1,289														
	0,7								1,293													
	0,8									1,288												
	0,9										1,297											
	1,0											1,297										
	1,1												1,296									
	1,2													1,299								
	1,3														1,311							
	1,4															1,298						
	1,5																1,317					
	1,6																	1,300				
	1,7																		1,326			
	1,8																			1,299		
	1,9																				1,320	
2,0																					1,298	

Tabla A.65: Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,233																			
	0,1		5,481																		
	0,2			5,460																	
	0,3				5,378																
	0,4					5,556															
	0,5						5,806														
	0,6							5,928													
	0,7								6,001												
	0,8									6,025											
	0,9										6,176										
	1,0											6,014									
	1,1												6,134								
	1,2													6,248							
	1,3														6,571						
	1,4															6,299					
	1,5																6,602				
	1,6																	6,936			
	1,7																		6,949		
	1,8																			7,011	
	1,9																				7,019
2,0																				6,676	

Tabla A.66: Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.3.2.b. 15,3 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,830																			
	0,1		0,830																		
	0,2			0,830																	
	0,3				0,830																
	0,4					0,831															
	0,5						0,839														
	0,6							0,832													
	0,7								0,832												
	0,8									0,833											
	0,9										0,834										
	1,0											0,833									
	1,1												0,835								
	1,2													0,838							
	1,3														0,831						
	1,4															0,837					
	1,5																0,831				
	1,6																	0,837			
	1,7																		0,837		
	1,8																			0,837	
	1,9																				0,840
2,0																				0,837	

Tabla A.67: Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,877																			
	0,1		2,947																		
	0,2			2,938																	
	0,3				2,939																
	0,4					2,958															
	0,5						2,962														
	0,6							2,965													
	0,7								2,987												
	0,8									2,997											
	0,9										2,840										
	1,0											2,990									
	1,1												2,754								
	1,2													2,555							
	1,3														2,555						
	1,4															2,411					
	1,5																2,343				
	1,6																	2,343			
	1,7																		2,343		
	1,8																			2,343	
	1,9																				2,343
2,0																					2,343

Tabla A.68: Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,918																			
	0,1		7,141																		
	0,2			7,084																	
	0,3				7,036																
	0,4					7,242															
	0,5						7,420														
	0,6							7,517													
	0,7								7,591												
	0,8									7,551											
	0,9										7,831										
	1,0											7,950									
	1,1												8,077								
	1,2													8,170							
	1,3														8,170						
	1,4															8,170					
	1,5																8,170				
	1,6																	8,170			
	1,7																		8,170		
	1,8																			8,170	
	1,9																				8,170
2,0																					8,170

Tabla A.69: Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.3.2.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,234																				
	0,1		1,234																			
	0,2			1,235																		
	0,3				1,235																	
	0,4					1,235																
	0,5						1,235															
	0,6							1,235														
	0,7								1,235													
	0,8									1,235												
	0,9										1,235											
	1,0											1,235										
	1,1												1,235									
	1,2													1,235								
	1,3														1,236							
	1,4															1,236						
	1,5																1,236					
	1,6																	1,236				
	1,7																		1,236			
	1,8																			1,236		
	1,9																				1,236	
2,0																					1,236	

Tabla A.70: Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	5,068																				
	0,1		5,125																			
	0,2			5,117																		
	0,3				5,126																	
	0,4					5,137																
	0,5						5,140															
	0,6							5,154														
	0,7								5,176													
	0,8									5,178												
	0,9										5,195											
	1,0											5,213										
	1,1												5,213									
	1,2													5,214								
	1,3														5,214							
	1,4															5,214						
	1,5																5,214					
	1,6																	5,214				
	1,7																		5,214			
	1,8																			5,214		
	1,9																				5,214	
2,0																					5,214	

Tabla A.71: Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,877																			
	0,1		11,652																		
	0,2			11,519																	
	0,3				11,520																
	0,4					11,647															
	0,5						11,791														
	0,6							11,860													
	0,7								11,878												
	0,8									11,857											
	0,9										11,902										
	1,0											11,953									
	1,1												11,918								
	1,2													11,903							
	1,3														11,918						
	1,4															11,903					
	1,5																11,925				
	1,6																	11,925			
	1,7																		11,912		
	1,8																			11,912	
	1,9																				11,884
2,0																					11,884

Tabla A.72: Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.3.3. Máquina con falla - 2 BRB

A.3.3.a. 6,8 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,438																			
	0,1		0,439																		
	0,2			0,439																	
	0,3				0,439																
	0,4					0,439															
	0,5						0,439														
	0,6							0,439													
	0,7								0,439												
	0,8									0,440											
	0,9										0,440										
	1,0											0,440									
	1,1												0,440								
	1,2													0,440							
	1,3														0,440						
	1,4															0,440					
	1,5																0,440				
	1,6																	0,440			
	1,7																		0,440		
	1,8																			0,440	
	1,9																				0,440
2,0																					0,440

Tabla A.73: Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,192																			
	0,1		2,187																		
	0,2			2,173																	
	0,3				2,152																
	0,4					2,177															
	0,5						2,177														
	0,6							2,196													
	0,7								2,219												
	0,8									2,215											
	0,9										2,236										
	1,0											2,242									
	1,1												2,255								
	1,2													2,288							
	1,3														2,297						
	1,4															2,329					
	1,5																2,334				
	1,6																	2,376			
	1,7																		2,387		
	1,8																			2,429	
	1,9																				2,440
2,0																					2,421

Tabla A.74: Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,918																			
	0,1		5,477																		
	0,2			5,383																	
	0,3				5,206																
	0,4					5,437															
	0,5						5,650														
	0,6							5,782													
	0,7								5,880												
	0,8									5,909											
	0,9										6,045										
	1,0											6,176									
	1,1												6,283								
	1,2													6,400							
	1,3														6,617						
	1,4															6,734					
	1,5																6,751				
	1,6																	6,756			
	1,7																		6,756		
	1,8																			6,817	
	1,9																				6,813
2,0																					6,467

Tabla A.75: Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.3.3.b. 15,3 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,840																			
	0,1		0,841																		
	0,2			0,840																	
	0,3				0,840																
	0,4					0,840															
	0,5						0,840														
	0,6							0,840													
	0,7								0,840												
	0,8									0,840											
	0,9										0,840										
	1,0											0,840									
	1,1												0,840								
	1,2													0,840							
	1,3														0,840						
	1,4															0,840					
	1,5																0,840				
	1,6																	0,840			
	1,7																		0,840		
	1,8																			0,840	
	1,9																				0,840
2,0																					0,840

Tabla A.76: Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	5,890																			
	0,1		5,910																		
	0,2			5,886																	
	0,3				5,866																
	0,4					5,870															
	0,5						5,886														
	0,6							5,896													
	0,7								5,898												
	0,8									5,905											
	0,9										5,906										
	1,0											5,906									
	1,1												5,906								
	1,2													5,906							
	1,3														5,906						
	1,4															5,906					
	1,5																5,906				
	1,6																	5,906			
	1,7																		5,906		
	1,8																			5,906	
	1,9																				5,906
2,0																					5,906

Tabla A.77: Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	3,699																			
	0,1		7,613																		
	0,2			7,483																	
	0,3				7,359																
	0,4					7,540															
	0,5						7,747														
	0,6							7,857													
	0,7								7,818												
	0,8									7,920											
	0,9										8,010										
	1,0											8,092									
	1,1												8,151								
	1,2													8,225							
	1,3														8,215						
	1,4															8,220					
	1,5																8,241				
	1,6																	8,289			
	1,7																		8,310		
	1,8																			8,313	
	1,9																				8,267
2,0																					8,241

Tabla A.78: Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.3.3.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,242																			
	0,1		1,243																		
	0,2			1,242																	
	0,3				1,242																
	0,4					1,242															
	0,5						1,242														
	0,6							1,243													
	0,7								1,243												
	0,8									1,243											
	0,9										1,243										
	1,0											1,243									
	1,1												1,243								
	1,2													1,243							
	1,3														1,243						
	1,4															1,243					
	1,5																1,243				
	1,6																	1,243			
	1,7																		1,243		
	1,8																			1,243	
	1,9																				1,243
2,0																					1,243

Tabla A.79: Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.4. Máquinas Laboratorio

A.4.1. Máquina sana - 0 BRB (220201091)

A.4.1.a. 4,8 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,713																			
	0,1	0,714																			
	0,2		0,715																		
	0,3		0,714	0,714																	
	0,4			0,714	0,715																
	0,5			0,714	0,714	0,715															
	0,6				0,714	0,714	0,714														
	0,7					0,714	0,714	0,715													
	0,8						0,714	0,715	0,716												
	0,9							0,714	0,714	0,714											
	1,0								0,715	0,715	0,715										
	1,1									0,715	0,715	0,716									
	1,2										0,715	0,715	0,715								
	1,3											0,715	0,715	0,716							
	1,4												0,715	0,716	0,717						
	1,5													0,716	0,716	0,716	0,716				
	1,6														0,716	0,716	0,717	0,717			
	1,7															0,716	0,717	0,718	0,718		
	1,8																0,716	0,717	0,718	0,718	
	1,9																	0,716	0,717	0,718	0,718
2,0																		0,716	0,717	0,718	

Tabla A.82: Resultados de RMS i_q para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	5,106																			
	0,1	5,077																			
	0,2		5,079																		
	0,3			5,083																	
	0,4				5,088																
	0,5					5,119															
	0,6						5,161														
	0,7							5,130													
	0,8								5,121												
	0,9									5,110											
	1,0										5,205										
	1,1											5,201									
	1,2												5,203								
	1,3													5,208							
	1,4														5,208						
	1,5															5,254					
	1,6																5,270				
	1,7																	5,332			
	1,8																		5,298		
	1,9																			5,298	
2,0																				5,298	

Tabla A.83: Resultados de RMS Δi_d para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,702																				
	0,1		1,725																			
	0,2			1,816																		
	0,3				2,056																	
	0,4					2,409																
	0,5						2,664															
	0,6							3,200														
	0,7								3,368													
	0,8									3,979												
	0,9										4,128											
	1,0											4,793										
	1,1												5,627									
	1,2													6,474								
	1,3														6,539							
	1,4															6,141						
	1,5																6,692					
	1,6																	6,961				
	1,7																		7,268			
	1,8																			7,787		
	1,9																				8,081	
2,0																					8,618	

Tabla A.84: Resultados de RMS Δi_q para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.4.1.b. 9,7 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,089																				
	0,1		1,089																			
	0,2			1,090																		
	0,3				1,089																	
	0,4					1,089																
	0,5						1,090															
	0,6							1,089														
	0,7								1,089													
	0,8									1,090												
	0,9										1,090											
	1,0											1,091										
	1,1												1,091									
	1,2													1,091								
	1,3														1,091							
	1,4															1,091						
	1,5																1,091					
	1,6																	1,091				
	1,7																		1,091			
	1,8																			1,091		
	1,9																				1,091	
2,0																					1,093	

Tabla A.85: Resultados de RMS i_q para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	8,298																			
	0,1		8,395																		
	0,2			8,392																	
	0,3				8,389																
	0,4					8,392															
	0,5						8,406														
	0,6							8,433													
	0,7								8,423												
	0,8									8,445											
	0,9										8,473										
	1,0											8,501									
	1,1												8,473								
	1,2													8,546							
	1,3														8,505						
	1,4															8,542					
	1,5																8,599				
	1,6																	8,659			
	1,7																		8,584		
	1,8																			8,533	
	1,9																				8,569
2,0																					8,579

Tabla A.86: Resultados de RMS Δi_d para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,915																			
	0,1		1,976																		
	0,2			2,046																	
	0,3				2,252																
	0,4					2,554															
	0,5						2,745														
	0,6							3,181													
	0,7								3,728												
	0,8									3,946											
	0,9										4,454										
	1,0											4,927									
	1,1												5,165								
	1,2													5,733							
	1,3														6,300						
	1,4															6,350					
	1,5																6,821				
	1,6																	6,533			
	1,7																		6,826		
	1,8																			8,210	
	1,9																				8,709
2,0																					8,739

Tabla A.87: Resultados de RMS Δi_q para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.4.1.c. 14,5 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,485																			
	0,1		1,487																		
	0,2			1,487																	
	0,3				1,486																
	0,4					1,487															
	0,5						1,486														
	0,6							1,486													
	0,7								1,487												
	0,8									1,488											
	0,9										1,487										
	1,0											1,487									
	1,1												1,488								
	1,2													1,487							
	1,3														1,488						
	1,4															1,488					
	1,5																1,488				
	1,6																	1,488			
	1,7																		1,489		
	1,8																			1,489	
	1,9																				1,489
2,0																				1,491	

Tabla A.88: Resultados de RMS i_q para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	12,128																			
	0,1		12,037																		
	0,2			12,045																	
	0,3				12,038																
	0,4					12,051															
	0,5						12,051														
	0,6							12,053													
	0,7								12,075												
	0,8									12,073											
	0,9										12,107										
	1,0											12,138									
	1,1												12,138								
	1,2													12,183							
	1,3														12,229						
	1,4															12,224					
	1,5																12,224				
	1,6																	12,277			
	1,7																		12,337		
	1,8																			12,370	
	1,9																				12,451
2,0																				12,428	

Tabla A.89: Resultados de RMS Δi_d para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,766																				
	0,1		2,837																			
	0,2			2,898																		
	0,3				3,210																	
	0,4					3,330																
	0,5						3,485															
	0,6							3,791														
	0,7								4,202													
	0,8									4,466												
	0,9										4,909											
	1,0											5,422										
	1,1												5,742									
	1,2													6,280								
	1,3														6,857							
	1,4															7,140						
	1,5																7,561					
	1,6																	8,110				
	1,7																		8,315			
	1,8																			8,830		
	1,9																				9,569	
2,0																					9,748	

Tabla A.90: Resultados de RMS Δi_q para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.4.2. Máquina sana - 2 BRB (220201071)

A.4.2.a. 4,8 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,713																				
	0,1		0,714																			
	0,2			0,715																		
	0,3				0,714																	
	0,4					0,715																
	0,5						0,715															
	0,6							0,714														
	0,7								0,715													
	0,8									0,716												
	0,9										0,714											
	1,0											0,715										
	1,1												0,715									
	1,2													0,715								
	1,3														0,716							
	1,4															0,716						
	1,5																0,716					
	1,6																	0,717				
	1,7																		0,718			
	1,8																			0,718		
	1,9																				0,718	
2,0																					0,719	

Tabla A.91: Resultados de RMS i_q para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	5,106																			
	0,1		5,077																		
	0,2			5,079																	
	0,3				5,083																
	0,4					5,088															
	0,5						5,119														
	0,6							5,161													
	0,7								5,130												
	0,8									5,121											
	0,9										5,110										
	1,0											5,205									
	1,1												5,201								
	1,2													5,203							
	1,3														5,203						
	1,4															5,208					
	1,5																5,204				
	1,6																	5,217			
	1,7																		5,193		
	1,8																			5,193	
	1,9																				5,193
2,0																					5,193

Tabla A.92: Resultados de RMS Δi_d para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,702																			
	0,1		1,725																		
	0,2			1,816																	
	0,3				1,862																
	0,4					1,862															
	0,5						1,708														
	0,6							1,927													
	0,7								1,733												
	0,8									1,810											
	0,9										1,674										
	1,0											1,851									
	1,1												1,715								
	1,2													1,857							
	1,3														1,724						
	1,4															1,850					
	1,5																1,718				
	1,6																	1,869			
	1,7																		1,869		
	1,8																			1,869	
	1,9																				1,869
2,0																					1,869

Tabla A.93: Resultados de RMS Δi_q para 4,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.4.2.b. 9,7 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,089																				
	0,1		1,089																			
	0,2			1,090																		
	0,3				1,089																	
	0,4					1,089																
	0,5						1,090															
	0,6							1,089														
	0,7								1,090													
	0,8									1,090												
	0,9										1,089											
	1,0											1,090										
	1,1												1,091									
	1,2													1,090								
	1,3														1,090							
	1,4															1,091						
	1,5																1,091					
	1,6																	1,091				
	1,7																		1,091			
	1,8																			1,092		
	1,9																				1,091	
2,0																					1,092	

Tabla A.94: Resultados de RMS i_q para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	8,298																				
	0,1		8,395																			
	0,2			8,392																		
	0,3				8,389																	
	0,4					8,392																
	0,5						8,406															
	0,6							8,433														
	0,7								8,470													
	0,8									8,464												
	0,9										8,481											
	1,0											8,530										
	1,1												8,533									
	1,2													8,573								
	1,3														8,573							
	1,4															8,556						
	1,5																8,592					
	1,6																	8,592				
	1,7																		8,592			
	1,8																			8,592		
	1,9																				8,592	
2,0																					8,592	

Tabla A.95: Resultados de RMS Δi_d para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,915																				
	0,1		1,976																			
	0,2			2,046																		
	0,3				2,252																	
	0,4					2,554																
	0,5						2,745															
	0,6							3,181														
	0,7								3,728													
	0,8									3,946												
	0,9										4,454											
	1,0											4,102										
	1,1												4,363									
	1,2													4,901								
	1,3														4,643							
	1,4															4,729						
	1,5																5,150					
	1,6																	5,978				
	1,7																		6,821			
	1,8																			6,826		
	1,9																				7,012	
2,0																					7,361	

Tabla A.96: Resultados de RMS Δi_q para 9,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

A.4.2.c. 14,5 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,485																				
	0,1		1,487																			
	0,2			1,487																		
	0,3				1,486																	
	0,4					1,487																
	0,5						1,487															
	0,6							1,486														
	0,7								1,487													
	0,8									1,488												
	0,9										1,487											
	1,0											1,487										
	1,1												1,488									
	1,2													1,487								
	1,3														1,488							
	1,4															1,488						
	1,5																1,489					
	1,6																	1,488				
	1,7																		1,488			
	1,8																			1,488		
	1,9																				1,488	
2,0																					1,489	

Tabla A.97: Resultados de RMS i_q para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	12,128																			
	0,1	12,037																			
	0,2		12,045																		
	0,3	12,037		12,038																	
	0,4		12,043		12,051																
	0,5	12,040		12,045		12,051															
	0,6		12,041		12,047		12,053														
	0,7	12,041		12,050		12,062		12,075													
	0,8		12,043		12,051		12,061		12,073												
	0,9	12,038		12,047		12,061		12,081		12,107											
	1,0		12,041		12,053		12,073		12,101		12,138										
	1,1	12,042		12,057		12,079		12,106		12,140		12,180									
	1,2		12,042		12,054		12,073		12,098		12,130		12,171								
	1,3	12,042		12,058		12,080		12,107		12,140		12,178		12,224							
	1,4		12,041		12,049		12,061		12,076		12,095		12,120		12,150		12,188				
	1,5	12,040		12,049		12,063		12,081		12,103		12,130		12,164		12,205		12,254			
	1,6		12,044		12,057		12,075		12,098		12,125		12,157		12,194		12,236		12,283		
	1,7	12,039		12,046		12,055		12,067		12,081		12,099		12,120		12,148		12,182			
	1,8		12,035		12,037		12,046		12,061		12,083		12,113		12,152		12,199		12,256		
	1,9	12,036		12,046		12,070		12,107		12,155		12,213		12,277		12,347		12,420			
2,0		12,039		12,043		12,049		12,060		12,077		12,101		12,133		12,172		12,219			

Tabla A.98: Resultados de RMS Δi_d para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,766																			
	0,1	2,837																			
	0,2		2,898																		
	0,3	2,817		3,069																	
	0,4		2,930		3,330																
	0,5	2,817		3,055		3,485															
	0,6		2,905		3,262		3,791														
	0,7	2,819		3,089		3,575		4,202													
	0,8		2,927		3,296		3,829		4,466												
	0,9	2,822		3,093		3,576		4,199		4,909											
	1,0		2,920		3,328		3,925		4,639		5,422										
	1,1	2,816		3,089		3,584		4,225		4,956		5,742									
	1,2		2,930		3,345		3,946		4,663		5,449		6,280								
	1,3	2,829		3,142		3,688		4,380		5,160		5,992		6,857							
	1,4		2,927		3,329		3,913		4,610		5,376		6,185		7,023						
	1,5	2,822		3,110		3,625		4,287		5,040		5,848		6,693		7,561					
	1,6		2,928		3,350		3,965		4,698		5,500		6,346		7,219		8,110				
	1,7	2,820		3,101		3,606		4,254		4,990		5,781		6,605		7,452					
	1,8		2,907		3,297		3,878		4,581		5,361		6,189		7,049		7,932				
	1,9	2,780		3,019		3,533		4,227		5,026		5,888		6,786		7,704		8,634			
2,0		2,939		3,343		3,925		4,620		5,389		6,207		7,060		7,938		8,835			

Tabla A.99: Resultados de RMS Δi_q para 14,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

Apéndice B

Tablas de resultados de máquinas con control

B.1. Máquina 1

B.1.1. Máquina sana - 0 BRB

B.1.1.a. 10 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																					
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																					
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	
Frecuencia de oscilación (Factor de I_{LO})	0,0	0,377																					
	0,1		0,377																				
	0,2			0,376	0,378																		
	0,3				0,377	0,376	0,378																
	0,4					0,377	0,377	0,378															
	0,5						0,377	0,378	0,379														
	0,6							0,377	0,378	0,379													
	0,7								0,378	0,378	0,379												
	0,8									0,378	0,378	0,379											
	0,9										0,378	0,379											
	1,0											0,378	0,379										
	1,1												0,378	0,379									
	1,2													0,378	0,379								
	1,3														0,380	0,381							
	1,4															0,380	0,381						
	1,5																0,381	0,382					
	1,6																	0,381	0,382				
	1,7																		0,382	0,382			
	1,8																			0,382	0,382		
1,9																				0,382	0,383		
2,0																					0,382	0,384	

Tabla B.1: Resultados de RMS i_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																			
	0,1	0,027		0,081		0,135		0,189		0,242		0,296		0,349		0,402		0,455		0,508	
	0,2		0,053		0,105		0,158		0,211		0,263		0,316		0,368		0,421		0,473		0,525
	0,3	0,025		0,075		0,126		0,176		0,226		0,276		0,326		0,376		0,426		0,476	
	0,4		0,047		0,094		0,141		0,189		0,236		0,283		0,330		0,377		0,424		0,472
	0,5	0,022		0,066		0,110		0,154		0,198		0,242		0,285		0,329		0,373		0,417	
	0,6		0,041		0,083		0,124		0,166		0,207		0,249		0,290		0,332		0,373		0,414
	0,7	0,020		0,059		0,098		0,137		0,176		0,215		0,254		0,293		0,332		0,371	
	0,8		0,037		0,074		0,111		0,148		0,186		0,223		0,260		0,297		0,334		0,371
	0,9	0,018		0,053		0,088		0,124		0,159		0,194		0,230		0,265		0,301		0,336	
	1,0		0,034		0,068		0,102		0,136		0,170		0,204		0,238		0,272		0,305		0,339
	1,1	0,016		0,049		0,082		0,115		0,148		0,181		0,213		0,246		0,279		0,312	
	1,2		0,032		0,064		0,096		0,128		0,160		0,192		0,224		0,257		0,289		0,321
	1,3	0,016		0,047		0,079		0,110		0,142		0,174		0,205		0,237		0,268		0,300	
	1,4		0,031		0,063		0,094		0,125		0,157		0,188		0,219		0,251		0,282		0,313
	1,5	0,016		0,047		0,078		0,109		0,140		0,171		0,202		0,234		0,265		0,296	
	1,6		0,031		0,062		0,093		0,124		0,156		0,187		0,218		0,249		0,280		0,311
	1,7	0,016		0,046		0,077		0,108		0,139		0,170		0,201		0,232		0,263		0,294	
	1,8		0,031		0,062		0,092		0,123		0,154		0,185		0,216		0,246		0,277		0,308
	1,9	0,015		0,046		0,077		0,107		0,138		0,168		0,199		0,230		0,260		0,291	
2,0		0,030		0,061		0,091		0,122		0,152		0,182		0,213		0,243		0,273		0,304	

Tabla B.2: Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																			
	0,1	0,356		1,069		1,781		2,494		3,206		3,919		4,631		5,343		6,055		6,767	
	0,2		0,714		1,429		2,143		2,857		3,571		4,286		5,000		5,714		6,428		7,141
	0,3	0,362		1,085		1,808		2,532		3,255		3,978		4,701		5,425		6,148		6,871	
	0,4		0,729		1,457		2,186		2,915		3,644		4,372		5,101		5,830		6,558		7,287
	0,5	0,367		1,100		1,833		2,566		3,299		4,032		4,765		5,498		6,231		6,964	
	0,6		0,738		1,476		2,214		2,951		3,689		4,427		5,165		5,903		6,640		7,378
	0,7	0,367		1,101		1,836		2,570		3,304		4,038		4,772		5,507		6,241		6,975	
	0,8		0,731		1,462		2,193		2,923		3,654		4,385		5,116		5,847		6,578		7,309
	0,9	0,361		1,084		1,806		2,528		3,251		3,973		4,695		5,418		6,140		6,863	
	1,0		0,715		1,430		2,144		2,859		3,574		4,289		5,004		5,719		6,433		7,148
	1,1	0,354		1,063		1,772		2,481		3,190		3,899		4,608		5,317		6,026		6,735	
	1,2		0,706		1,413		2,119		2,826		3,532		4,239		4,945		5,652		6,358		7,065
	1,3	0,354		1,061		1,768		2,475		3,182		3,889		4,596		5,303		6,011		6,718	
	1,4		0,712		1,424		2,136		2,848		3,561		4,273		4,985		5,697		6,409		7,121
	1,5	0,358		1,074		1,791		2,507		3,223		3,940		4,656		5,372		6,089		6,805	
	1,6		0,723		1,445		2,168		2,890		3,613		4,335		5,058		5,780		6,503		7,225
	1,7	0,363		1,088		1,813		2,538		3,263		3,988		4,713		5,438		6,163		6,888	
	1,8		0,727		1,454		2,180		2,907		3,634		4,361		5,088		5,814		6,541		7,268
	1,9	0,363		1,089		1,815		2,541		3,268		3,994		4,720		5,446		6,172		6,898	
2,0		0,725		1,450		2,174		2,899		3,624		4,349		5,073		5,798		6,523		7,247	

Tabla B.3: Resultados de RMS Δi_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.1.1.b. 20 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,729																			
	0,1		0,730																		
	0,2			0,729																	
	0,3				0,730																
	0,4					0,729															
	0,5						0,730														
	0,6							0,729													
	0,7								0,730												
	0,8									0,730											
	0,9										0,730										
	1,0											0,731									
	1,1												0,730								
	1,2													0,730							
	1,3														0,731						
	1,4															0,731					
	1,5																0,731				
	1,6																	0,732			
	1,7																		0,732		
	1,8																			0,732	
	1,9																				0,732
2,0																					0,733

Tabla B.4: Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																			
	0,1		0,032																		
	0,2			0,069																	
	0,3				0,112																
	0,4					0,151															
	0,5						0,183														
	0,6							0,209													
	0,7								0,230												
	0,8									0,249											
	0,9										0,266										
	1,0											0,283									
	1,1												0,301								
	1,2													0,326							
	1,3														0,340						
	1,4															0,355					
	1,5																0,370				
	1,6																	0,385			
	1,7																		0,400		
	1,8																			0,415	
	1,9																				0,430
2,0																					0,445

Tabla B.5: Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																				
	0,1		0,333																			
	0,2			0,682																		
	0,3				1,061																	
	0,4					1,445																
	0,5						1,827															
	0,6							2,211														
	0,7								2,567													
	0,8									2,921												
	0,9										3,247											
	1,0											3,570										
	1,1												3,894									
	1,2													4,233								
	1,3														4,590							
	1,4															4,978						
	1,5																5,365					
	1,6																	5,772				
	1,7																		6,154			
	1,8																			6,532		
	1,9																				6,889	
2,0																					7,238	

Tabla B.6: Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.1.1.c. 30 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,062																				
	0,1		1,063																			
	0,2			1,062																		
	0,3				1,063																	
	0,4					1,062																
	0,5						1,063															
	0,6							1,062														
	0,7								1,063													
	0,8									1,063												
	0,9										1,063											
	1,0											1,062										
	1,1												1,063									
	1,2													1,063								
	1,3														1,063							
	1,4															1,064						
	1,5																1,063					
	1,6																	1,063				
	1,7																		1,064			
	1,8																			1,063		
	1,9																				1,064	
2,0																					1,065	

Tabla B.7: Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																			
	0,1	0,023		0,070		0,116		0,162		0,209		0,255		0,301		0,348		0,394		0,441	
	0,2		0,055		0,110		0,165		0,220		0,275		0,330		0,385		0,440		0,495		0,550
	0,3	0,034		0,102		0,169		0,237		0,305		0,373		0,440		0,508		0,575		0,643	
	0,4		0,0780		0,156		0,233		0,311		0,389		0,466		0,544		0,621		0,699		0,776
	0,5	0,041		0,123		0,204		0,286		0,368		0,449		0,531		0,613		0,694		0,776	
	0,6		0,081		0,161		0,242		0,322		0,402		0,483		0,563		0,644		0,724		0,804
	0,7	0,038		0,115		0,191		0,267		0,344		0,420		0,496		0,573		0,649		0,725	
	0,8		0,072		0,144		0,216		0,289		0,361		0,433		0,505		0,577		0,649		0,721
	0,9	0,034		0,102		0,170		0,238		0,306		0,374		0,442		0,510		0,578		0,646	
	1,0		0,065		0,129		0,194		0,258		0,323		0,387		0,452		0,517		0,581		0,646
	1,1	0,031		0,093		0,155		0,217		0,278		0,340		0,402		0,464		0,526		0,588	
	1,2		0,060		0,120		0,180		0,240		0,300		0,360		0,420		0,479		0,539		0,599
	1,3	0,029		0,088		0,146		0,205		0,264		0,322		0,381		0,439		0,498		0,556	
	1,4		0,058		0,116		0,174		0,231		0,289		0,347		0,405		0,463		0,520		0,578
	1,5	0,029		0,086		0,143		0,200		0,257		0,315		0,372		0,429		0,486		0,543	
	1,6		0,057		0,114		0,171		0,228		0,284		0,341		0,398		0,455		0,512		0,569
	1,7	0,028		0,085		0,141		0,197		0,254		0,310		0,367		0,423		0,480		0,536	
	1,8		0,056		0,112		0,168		0,224		0,280		0,336		0,392		0,448		0,504		0,560
	1,9	0,028		0,083		0,139		0,194		0,249		0,305		0,360		0,416		0,471		0,527	
2,0		0,055		0,110		0,165		0,220		0,275		0,329		0,384		0,439		0,494		0,549	

Tabla B.8: Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																			
	0,1	0,320		0,961		1,601		2,242		2,883		3,523		4,164		4,805		5,446		6,087	
	0,2		0,654		1,308		1,962		2,617		3,271		3,925		4,580		5,234		5,888		6,543
	0,3	0,342		1,025		1,709		2,392		3,076		3,759		4,443		5,126		5,810		6,494	
	0,4		0,708		1,417		2,125		2,834		3,542		4,251		4,959		5,667		6,376		7,084
	0,5	0,363		1,089		1,815		2,541		3,267		3,993		4,719		5,445		6,171		6,897	
	0,6		0,736		1,471		2,207		2,943		3,678		4,414		5,150		5,885		6,621		7,357
	0,7	0,367		1,101		1,834		2,568		3,302		4,035		4,769		5,503		6,236		6,970	
	0,8		0,731		1,461		2,192		2,922		3,653		4,383		5,114		5,844		6,575		7,305
	0,9	0,361		1,083		1,805		2,526		3,248		3,970		4,692		5,414		6,136		6,858	
	1,0		0,714		1,428		2,142		2,857		3,571		4,285		4,999		5,713		6,427		7,141
	1,1	0,354		1,062		1,770		2,478		3,186		3,895		4,603		5,311		6,019		6,727	
	1,2		0,706		1,411		2,116		2,822		3,527		4,233		4,938		5,644		6,349		7,055
	1,3	0,353		1,059		1,765		2,471		3,177		3,883		4,589		5,296		6,002		6,708	
	1,4		0,711		1,422		2,133		2,844		3,555		4,266		4,977		5,688		6,399		7,110
	1,5	0,358		1,073		1,788		2,503		3,218		3,933		4,649		5,364		6,079		6,794	
	1,6		0,721		1,443		2,164		2,885		3,607		4,328		5,049		5,771		6,492		7,213
	1,7	0,362		1,086		1,810		2,533		3,257		3,981		4,705		5,429		6,153		6,877	
	1,8		0,726		1,451		2,177		2,902		3,628		4,353		5,079		5,805		6,530		7,256
	1,9	0,362		1,087		1,812		2,537		3,262		3,987		4,712		5,437		6,162		6,887	
2,0		0,724		1,447		2,171		2,894		3,618		4,341		5,065		5,788		6,512		7,235	

Tabla B.9: Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.1.2. Máquina con falla - 1 BRB

B.1.2.a. 10 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,388																			
	0,1		0,388																		
	0,2			0,387																	
	0,3				0,388																
	0,4					0,388															
	0,5						0,388														
	0,6							0,387													
	0,7								0,388												
	0,8									0,388											
	0,9										0,389										
	1,0											0,388									
	1,1												0,389								
	1,2													0,389							
	1,3														0,390						
	1,4															0,390					
	1,5																0,391				
	1,6																	0,392			
	1,7																		0,392		
	1,8																			0,393	
	1,9																				0,393
2,0																					0,394

Tabla B.10: Resultados de RMS i_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,000																			
	0,1		1,004																		
	0,2			1,007																	
	0,3				1,009																
	0,4					1,011															
	0,5						1,022														
	0,6							1,021													
	0,7								1,023												
	0,8									1,035											
	0,9										1,037										
	1,0											1,048									
	1,1												1,048								
	1,2													1,052							
	1,3														1,052						
	1,4															1,065					
	1,5																1,062				
	1,6																	1,070			
	1,7																		1,078		
	1,8																			1,086	
	1,9																				1,095
2,0																					1,102

Tabla B.11: Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																					
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																					
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,846																					
	0,1		0,884		1,344		1,970		2,647		3,344		4,052		4,764		5,481		6,199		6,919		
	0,2			1,073		1,644		2,306		3,000		3,707		4,421		5,140		5,861		6,584		7,308	
	0,3		0,868		1,318		1,948		2,632		3,338		4,053		4,774		5,498		6,224		6,952		7,676
	0,4			1,083		1,665		2,337		3,041		3,758		4,482		5,210		5,941		6,673		7,407	
	0,5		0,897		1,382		2,029		2,724		3,438		4,162		4,891		5,623		6,357		7,093		7,829
	0,6			1,112		1,708		2,388		3,097		3,819		4,549		5,282		6,018		6,755		7,493	
	0,7		0,895		1,376		2,018		2,710		3,422		4,143		4,869		5,599		6,330		7,063		7,799
	0,8			1,090		1,671		2,340		3,039		3,751		4,471		5,195		5,921		6,649		7,379	
	0,9		0,891		1,357		1,985		2,663		3,360		4,068		4,780		5,496		6,215		6,934		7,654
	1,0			1,090		1,655		2,306		2,988		3,683		4,385		5,091		5,800		6,511		7,223	
	1,1		0,891		1,346		1,959		2,622		3,305		3,997		4,695		5,397		6,100		6,805		7,511
	1,2			1,077		1,631		2,271		2,943		3,629		4,321		5,018		5,718		6,419		7,122	
	1,3		0,887		1,336		1,945		2,605		3,285		3,975		4,671		5,370		6,071		6,773		7,476
	1,4			1,084		1,644		2,290		2,967		3,658		4,356		5,058		5,763		6,470		7,178	
	1,5		0,892		1,352		1,972		2,642		3,331		4,030		4,735		5,443		6,153		6,864		7,576
	1,6			1,090		1,660		2,318		3,005		3,707		4,415		5,128		5,843		6,560		7,278	
	1,7		0,892		1,358		1,987		2,666		3,364		4,072		4,785		5,501		6,220		6,940		7,660
	1,8			1,092		1,667		2,328		3,020		3,726		4,438		5,155		5,874		6,595		7,317	
	1,9		0,893		1,361		1,991		2,670		3,369		4,078		4,792		5,509		6,229		6,949		7,671
2,0			1,091		1,663		2,322		3,012		3,715		4,425		5,140		5,857		6,576		7,295		

Tabla B.12: Resultados de RMS Δi_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.1.2.b. 20 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,744																				
	0,1		0,744		0,745		0,745		0,746		0,747		0,748		0,749		0,750		0,751		0,752	
	0,2			0,743		0,743		0,742		0,742		0,741		0,741		0,741		0,741		0,741		0,741
	0,3		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747		0,747		0,748	
	0,4			0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747
	0,5		0,744		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,746		0,746		0,748	
	0,6			0,744		0,743		0,743		0,743		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745
	0,7		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,745		0,746		0,747		0,747	
	0,8			0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747
	0,9		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747		0,748	
	1,0			0,744		0,744		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,745		0,746
	1,1		0,744		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747	
	1,2			0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747
	1,3		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747		0,747	
	1,4			0,744		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,745		0,746		0,746
	1,5		0,744		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747	
	1,6			0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747
	1,7		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,745		0,746		0,747		0,747	
	1,8			0,744		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747
	1,9		0,744		0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747	
2,0			0,744		0,744		0,744		0,744		0,745		0,745		0,745		0,746		0,746		0,747	

Tabla B.13: Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,385																				
	0,1		2,419																			
	0,2			2,420																		
	0,3				2,423																	
	0,4					2,428																
	0,5						2,440															
	0,6							2,434														
	0,7								2,440													
	0,8									2,442												
	0,9										2,443											
	1,0											2,445										
	1,1												2,447									
	1,2													2,458								
	1,3														2,461							
	1,4															2,466						
	1,5																2,474					
	1,6																	2,483				
	1,7																		2,500			
	1,8																			2,506		
	1,9																				2,513	
2,0																					2,513	

Tabla B.14: Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,231																				
	0,1		1,250																			
	0,2			1,386																		
	0,3				1,616																	
	0,4					1,898																
	0,5						2,243															
	0,6							2,524														
	0,7								2,857													
	0,8									3,196												
	0,9										3,539											
	1,0											3,893										
	1,1												4,239									
	1,2													4,568								
	1,3														4,951							
	1,4															5,278						
	1,5																5,555					
	1,6																	5,843				
	1,7																		6,149			
	1,8																			6,545		
	1,9																				6,846	
2,0																					7,172	

Tabla B.15: Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.1.2.c. 30 Nm de carga (100% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,076																				
	0,1		1,076																			
	0,2			1,075																		
	0,3				1,076																	
	0,4					1,076																
	0,5						1,076															
	0,6							1,075														
	0,7								1,076													
	0,8									1,076												
	0,9										1,077											
	1,0											1,076										
	1,1												1,077									
	1,2													1,077								
	1,3														1,077							
	1,4															1,076						
	1,5																1,077					
	1,6																	1,077				
	1,7																		1,077			
	1,8																			1,077		
	1,9																				1,077	
2,0																					1,078	

Tabla B.16: Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	3,900																				
	0,1		3,922																			
	0,2			3,923																		
	0,3				3,927																	
	0,4					3,931																
	0,5						3,930															
	0,6							3,927														
	0,7								3,933													
	0,8									3,934												
	0,9										3,943											
	1,0											3,944										
	1,1												3,955									
	1,2													3,957								
	1,3														3,970							
	1,4															3,972						
	1,5																3,988					
	1,6																	3,991				
	1,7																		4,009			
	1,8																			4,008		
	1,9																				4,032	
2,0																					4,036	

Tabla B.17: Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,308																				
	0,1		1,362																			
	0,2			1,475																		
	0,3				1,683																	
	0,4					1,958																
	0,5						2,256															
	0,6							2,559														
	0,7								2,872													
	0,8									3,128												
	0,9										3,500											
	1,0											3,821										
	1,1												3,770									
	1,2													4,438								
	1,3														4,780							
	1,4															5,116						
	1,5																5,844					
	1,6																	5,915				
	1,7																		6,293			
	1,8																			6,664		
	1,9																				7,008	
2,0																					7,346	

Tabla B.18: Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.1.3. Máquina con falla - 2 BRB

B.1.3.a. 10 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,398																				
	0,1		0,399																			
	0,2			0,398																		
	0,3				0,399																	
	0,4					0,399																
	0,5						0,399															
	0,6							0,398														
	0,7								0,399													
	0,8									0,399												
	0,9										0,400											
	1,0											0,399										
	1,1												0,400									
	1,2													0,400								
	1,3														0,401							
	1,4															0,401						
	1,5																0,402					
	1,6																	0,402				
	1,7																		0,403			
	1,8																			0,403		
	1,9																				0,404	
2,0																					0,405	

Tabla B.19: Resultados de RMS i_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,923																				
	0,1		1,924																			
	0,2			1,928																		
	0,3				1,921																	
	0,4					1,933																
	0,5						1,934															
	0,6							1,934														
	0,7								1,940													
	0,8									1,944												
	0,9										1,950											
	1,0											1,950										
	1,1												1,955									
	1,2													1,962								
	1,3														1,962							
	1,4															1,967						
	1,5																1,982					
	1,6																	1,993				
	1,7																		1,999			
	1,8																			2,011		
	1,9																				2,017	
2,0																					2,030	

Tabla B.20: Resultados de RMS Δi_d para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,538																				
	0,1		1,596																			
	0,2			1,726																		
	0,3				1,857																	
	0,4					2,148																
	0,5						2,381															
	0,6							2,711														
	0,7								2,979													
	0,8									3,345												
	0,9										3,629											
	1,0											4,309										
	1,1												4,708									
	1,2													4,985								
	1,3														4,985							
	1,4															4,757						
	1,5																5,102					
	1,6																	5,818				
	1,7																		6,187			
	1,8																			6,501		
	1,9																				6,828	
2,0																					7,548	

Tabla B.21: Resultados de RMS Δi_q para 10 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.1.3.b. 20 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,757																			
	0,1		0,757																		
	0,2			0,756																	
	0,3				0,757																
	0,4					0,757															
	0,5						0,757														
	0,6							0,756													
	0,7								0,757												
	0,8									0,757											
	0,9										0,758										
	1,0											0,757									
	1,1												0,758								
	1,2													0,758							
	1,3														0,758						
	1,4															0,758					
	1,5																0,758				
	1,6																	0,759			
	1,7																		0,759		
	1,8																			0,759	
	1,9																				0,760
2,0																				0,760	

Tabla B.22: Resultados de RMS i_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	4,769																			
	0,1		4,767																		
	0,2			4,769																	
	0,3				4,774																
	0,4					4,775															
	0,5						4,778														
	0,6							4,766													
	0,7								4,783												
	0,8									4,796											
	0,9										4,794										
	1,0											4,810									
	1,1												4,806								
	1,2													4,806							
	1,3														4,801						
	1,4															4,802					
	1,5																4,801				
	1,6																	4,812			
	1,7																		4,821		
	1,8																			4,836	
	1,9																				4,852
2,0																				4,858	

Tabla B.23: Resultados de RMS Δi_d para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,308																				
	0,1		2,317																			
	0,2			2,396																		
	0,3				2,539																	
	0,4					2,713																
	0,5						2,924															
	0,6							3,143														
	0,7								3,445													
	0,8									3,753												
	0,9										4,006											
	1,0											4,238										
	1,1												4,513									
	1,2													4,823								
	1,3														5,148							
	1,4															5,484						
	1,5																5,823					
	1,6																	6,206				
	1,7																		6,566			
	1,8																			6,920		
	1,9																				7,250	
2,0																					7,578	

Tabla B.24: Resultados de RMS Δi_q para 20 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.1.3.c. 30 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,087																				
	0,1		1,087																			
	0,2			1,088																		
	0,3				1,087																	
	0,4					1,087																
	0,5						1,088															
	0,6							1,088														
	0,7								1,088													
	0,8									1,087												
	0,9										1,088											
	1,0											1,087										
	1,1												1,088									
	1,2													1,088								
	1,3														1,088							
	1,4															1,088						
	1,5																1,088					
	1,6																	1,089				
	1,7																		1,089			
	1,8																			1,089		
	1,9																				1,089	
2,0																					1,089	

Tabla B.25: Resultados de RMS i_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	7,800																			
	0,1		7,857																		
	0,2			7,857																	
	0,3				7,859																
	0,4					7,859															
	0,5						7,860														
	0,6							7,860													
	0,7								7,860												
	0,8									7,862											
	0,9										7,862										
	1,0											7,862									
	1,1												7,862								
	1,2													7,862							
	1,3														7,862						
	1,4															7,862					
	1,5																7,862				
	1,6																	7,862			
	1,7																		7,862		
	1,8																			7,862	
	1,9																				7,862
2,0																					7,862

Tabla B.26: Resultados de RMS Δi_d para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,538																			
	0,1		2,554																		
	0,2			2,619																	
	0,3				2,736																
	0,4					2,885															
	0,5						3,106														
	0,6							3,388													
	0,7								3,723												
	0,8									3,739											
	0,9										4,218										
	1,0											4,408									
	1,1												4,628								
	1,2													4,920							
	1,3														5,250						
	1,4															5,592					
	1,5																5,926				
	1,6																	6,301			
	1,7																		6,645		
	1,8																			6,992	
	1,9																				7,321
2,0																					7,649

Tabla B.27: Resultados de RMS Δi_q para 30 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.2. Máquina 2

B.2.1. Máquina sana - 0 BRB

B.2.1.a. 2,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																						
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																						
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0		
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,623																						
	0,1	0,602		0,605		0,608		0,611		0,614		0,617		0,620		0,623		0,626		0,629				
	0,2		0,602		0,603		0,604		0,605		0,606		0,607		0,609		0,610		0,611		0,613			
	0,3		0,601		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,604			
	0,4			0,602		0,602		0,603		0,604		0,604		0,605		0,606		0,607		0,608		0,609		
	0,5		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,605		0,605		0,606		0,606	
	0,6			0,601		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,604		
	0,7		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,605		0,605		0,606		0,606	
	0,8			0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,604		0,605		0,606		0,606
	0,9		0,601		0,601		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,604	
	1,0			0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,604		0,605		0,606		0,606
	1,1		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,603		0,604		0,605		0,605	
	1,2			0,601		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,603		0,604		0,604
	1,3		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,604		0,605		0,605	
	1,4			0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,604		0,605		0,605
	1,5		0,601		0,601		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,604	
	1,6			0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,603		0,604		0,604		0,605
	1,7		0,601		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,603		0,604		0,604	
	1,8			0,601		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,603		0,604		0,604
	1,9		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,605		0,605	
2,0			0,601		0,601		0,601		0,602		0,602		0,602		0,603		0,603		0,604		0,605		0,604	

Tabla B.28: Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																						
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																						
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0		
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																						
	0,1	0,283		0,852		1,426		1,999		2,571		3,142		3,711		4,278		4,842		5,404		3,680		
	0,2		0,362		0,729		1,098		1,467		1,836		2,205		2,575		2,943		3,312		3,680		3,680	
	0,3		0,171		0,498		0,832		1,167		1,503		1,839		2,175		2,511		2,847		3,182		3,182	
	0,4			0,257		0,506		0,758		1,012		1,265		1,519		1,773		2,027		2,281		2,535		2,535
	0,5		0,145		0,390		0,644		0,900		1,156		1,413		1,669		1,926		2,183		2,439		2,439	
	0,6			0,230		0,442		0,658		0,874		1,092		1,309		1,526		1,744		1,961		2,179		2,179
	0,7		0,137		0,353		0,578		0,805		1,032		1,260		1,488		1,716		1,944		2,172		2,172	
	0,8			0,221		0,420		0,623		0,827		1,031		1,235		1,440		1,644		1,849		2,054		2,054
	0,9		0,132		0,334		0,546		0,759		0,973		1,188		1,402		1,617		1,832		2,046		2,046	
	1,0			0,216		0,410		0,608		0,807		1,006		1,206		1,406		1,606		1,805		2,005		2,005
	1,1		0,127		0,320		0,524		0,729		0,935		1,141		1,348		1,554		1,761		1,967		1,967	
	1,2			0,211		0,403		0,599		0,796		0,993		1,191		1,388		1,586		1,784		1,982		1,982
	1,3		0,123		0,309		0,506		0,706		0,907		1,107		1,307		1,508		1,709		1,910		1,910	
	1,4			0,208		0,399		0,594		0,790		0,987		1,184		1,381		1,578		1,775		1,972		1,972
	1,5		0,120		0,302		0,495		0,691		0,887		1,084		1,280		1,477		1,674		1,871		1,871	
	1,6			0,207		0,399		0,594		0,790		0,987		1,184		1,381		1,578		1,776		1,973		1,973
	1,7		0,118		0,298		0,490		0,683		0,877		1,071		1,265		1,460		1,654		1,849		1,849	
	1,8			0,208		0,400		0,596		0,792		0,989		1,187		1,384		1,582		1,779		1,977		1,977
	1,9		0,119		0,297		0,487		0,679		0,871		1,063		1,256		1,449		1,642		1,835		1,835	
2,0			0,210		0,401		0,597		0,794		0,991		1,188		1,385		1,583		1,780		1,977		1,977	

Tabla B.29: Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																				
	0,1		0,587																			
	0,2			0,789																		
	0,3				1,177																	
	0,4					1,277																
	0,5						1,704															
	0,6							1,798														
	0,7								2,258													
	0,8									2,359												
	0,9										2,819											
	1,0											2,943										
	1,1												2,948									
	1,2													3,368								
	1,3														3,537							
	1,4															3,980						
	1,5																4,592					
	1,6																	4,715				
	1,7																		5,203			
	1,8																			5,317		
	1,9																				5,421	
2,0																					6,017	

Tabla B.30: Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.2.1.b. 5,4 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,971																				
	0,1		0,944																			
	0,2			0,944																		
	0,3				0,943																	
	0,4					0,944																
	0,5						0,943															
	0,6							0,943														
	0,7								0,944													
	0,8									0,944												
	0,9										0,943											
	1,0											0,944										
	1,1												0,944									
	1,2													0,943								
	1,3														0,944							
	1,4															0,944						
	1,5																0,944					
	1,6																	0,945				
	1,7																		0,944			
	1,8																			0,944		
	1,9																				0,945	
2,0																					0,945	

Tabla B.31: Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																						
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																						
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0		
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																						
	0,1		0,279		0,769		1,265		1,761		2,257		2,752		3,248		3,742		4,236		4,729			
	0,2			0,538		1,047		1,557		2,067		2,577		3,087		3,596		4,105		4,613		5,121		
	0,3				0,758		1,250		1,742		2,235		2,728		3,220		3,713		4,205		4,697			
	0,4					0,731		1,089		1,448		1,808		2,167		2,527		2,886		3,246		3,605		
	0,5						0,537		0,889		1,242		1,595		1,948		2,302		2,655		3,009		3,363	
	0,6							0,591		0,884		1,177		1,471		1,765		2,058		2,352		2,647		
	0,7								0,762		1,066		1,370		1,674		1,979		2,284		2,589		2,893	
	0,8									0,813		1,083		1,354		1,625		1,896		2,168		2,439		2,710
	0,9										0,989		1,272		1,555		1,837		2,120		2,403		2,686	
	1,0											1,049		1,311		1,573		1,836		2,098		2,360		2,623
	1,1												1,217		1,487		1,758		2,028		2,298		2,568	
	1,2													1,036		1,293		1,551		1,809		2,067		2,326
	1,3														1,181		1,442		1,704		1,965		2,227	
	1,4															1,551		1,758		1,965		2,172		2,379
	1,5																1,551		1,758		1,965		2,172	
	1,6																	1,551		1,758		1,965		2,172
	1,7																		1,551		1,758		1,965	
	1,8																			1,551		1,758		1,965
	1,9																				1,551		1,758	
2,0																					1,551		1,758	

Tabla B.32: Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																						
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																						
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0		
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																						
	0,1		0,429		1,250		2,073		2,897		3,722		4,547		5,372		6,199		7,026		7,854		8,681	
	0,2			0,756		1,492		2,230		2,967		3,705		4,442		5,180		5,917		6,654		7,391		
	0,3				1,154		1,916		2,679		3,441		4,204		4,967		5,730		6,492		7,255		8,018	
	0,4					1,233		1,846		2,460		3,075		3,689		4,303		4,917		5,531		6,145		
	0,5						1,628		2,280		2,931		3,582		4,234		4,885		5,536		6,188		6,840	
	0,6							1,714		2,286		2,858		3,430		4,002		4,574		5,146		5,718		
	0,7								2,153		2,769		3,385		4,001		4,617		5,233		5,849		6,465	
	0,8									2,252		2,815		3,379		3,943		4,506		5,070		5,633		
	0,9										2,097		2,696		3,296		3,895		4,495		5,095		5,694	
	1,0											2,255		2,819		3,384		3,948		4,512		5,076		5,640
	1,1												2,057		2,645		3,233		3,820		4,408		4,996	
	1,2													2,267		2,833		3,399		3,966		4,532		5,099
	1,3														2,603		3,181		3,759		4,337		4,916	
	1,4															2,852		3,422		3,992		4,562		5,132
	1,5																3,147		3,718		4,290		4,862	
	1,6																	3,450		4,024		4,599		5,173
	1,7																		3,694		4,262		4,829	
	1,8																			4,048		4,626		5,204
	1,9																				4,242		4,807	
2,0																					4,424		4,979	

Tabla B.33: Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.2.1.c. 8,1 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,234																				
	0,1		1,200		1,201		1,202		1,204		1,205		1,206		1,208		1,209		1,211		1,212	
	0,2			1,200		1,201		1,201		1,202		1,203		1,204		1,205		1,206		1,207		1,208
	0,3		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199	
	0,4			1,199		1,200		1,200		1,201		1,201		1,202		1,202		1,203		1,204		1,204
	0,5		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,201		1,201		1,202		1,202		1,202	
	0,6			1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200
	0,7		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,201		1,201		1,201		1,202		1,202	
	0,8			1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,201		1,201		1,201		1,202
	0,9		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200	
	1,0			1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,201		1,201		1,201		1,202
	1,1		1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,200		1,201		1,201	
	1,2			1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200
	1,3		1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,201		1,201		1,201	
	1,4			1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,200		1,201		1,201
	1,5		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200	
	1,6			1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,200		1,201		1,201		1,201
	1,7		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,200		1,201	
	1,8			1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,200
	1,9		1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,200		1,201		1,201	
2,0			1,199		1,199		1,199		1,199		1,199		1,200		1,200		1,200		1,200		1,201	

Tabla B.34: Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																				
	0,1		0,137		0,413		0,691		0,970		1,250		1,531		1,812		2,093		2,376		2,660	
	0,2			0,405		0,813		1,221		1,630		2,038		2,447		2,856		3,265		3,674		4,083
	0,3		0,290		0,856		1,423		1,991		2,558		3,125		3,691		4,258		4,824		5,390	
	0,4			0,421		0,836		1,250		1,665		2,081		2,495		2,910		3,325		3,740		4,154
	0,5		0,201		0,589		0,978		1,367		1,757		2,146		2,536		2,925		3,315		3,704	
	0,6			0,317		0,629		0,942		1,256		1,569		1,882		2,195		2,509		2,822		3,135
	0,7		0,163		0,478		0,795		1,113		1,430		1,748		2,066		2,383		2,701		3,018	
	0,8			0,281		0,558		0,836		1,115		1,393		1,672		1,950		2,229		2,508		2,786
	0,9		0,148		0,432		0,719		1,007		1,294		1,582		1,869		2,157		2,445		2,732	
	1,0			0,266		0,530		0,794		1,059		1,323		1,588		1,853		2,117		2,382		2,647
	1,1		0,140		0,408		0,678		0,949		1,220		1,492		1,763		2,034		2,305		2,577	
	1,2			0,260		0,517		0,774		1,032		1,290		1,548		1,806		2,064		2,322		2,580
	1,3		0,135		0,392		0,652		0,913		1,173		1,433		1,694		1,954		2,215		2,476	
	1,4			0,257		0,511		0,765		1,020		1,274		1,529		1,784		2,038		2,293		2,547
	1,5		0,132		0,383		0,636		0,889		1,142		1,396		1,650		1,903		2,157		2,411	
	1,6			0,257		0,509		0,762		1,015		1,269		1,522		1,775		2,029		2,282		2,536
	1,7		0,131		0,376		0,625		0,874		1,124		1,373		1,622		1,872		2,121		2,370	
	1,8			0,256		0,508		0,760		1,013		1,266		1,518		1,771		2,024		2,277		2,530
	1,9		0,129		0,372		0,618		0,864		1,111		1,357		1,603		1,850		2,097		2,343	
2,0			0,255		0,506		0,757		1,009		1,261		1,513		1,765		2,017		2,269		2,521	

Tabla B.35: Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,639																				
	0,1		1,496																			
	0,2			1,369																		
	0,3				1,491																	
	0,4					1,456																
	0,5						1,486															
	0,6							1,503														
	0,7								1,576													
	0,8									1,575												
	0,9										1,642											
	1,0											1,667										
	1,1												1,661									
	1,2													1,661								
	1,3														1,661							
	1,4															1,661						
	1,5																1,661					
	1,6																	1,661				
	1,7																		1,661			
	1,8																			1,661		
	1,9																				1,661	
2,0																					1,661	

Tabla B.38: Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,820																				
	0,1		1,139																			
	0,2			1,076																		
	0,3				1,451																	
	0,4					1,546																
	0,5						1,909															
	0,6							1,995														
	0,7								1,836													
	0,8									1,975												
	0,9										1,975											
	1,0											1,977										
	1,1												1,977									
	1,2													1,977								
	1,3														1,977							
	1,4															1,977						
	1,5																1,977					
	1,6																	1,977				
	1,7																		1,977			
	1,8																			1,977		
	1,9																				1,977	
2,0																					1,977	

Tabla B.39: Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.2.2.b. 5,4 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,980																			
	0,1		0,954																		
	0,2			0,954																	
	0,3				0,953																
	0,4					0,954															
	0,5						0,954														
	0,6							0,953													
	0,7								0,954												
	0,8									0,954											
	0,9										0,953										
	1,0											0,954									
	1,1												0,954								
	1,2													0,954							
	1,3														0,954						
	1,4															0,954					
	1,5																0,954				
	1,6																	0,954			
	1,7																		0,954		
	1,8																			0,954	
	1,9																				0,954
2,0																					0,954

Tabla B.40: Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	3,279																			
	0,1		3,139																		
	0,2			3,162																	
	0,3				3,115																
	0,4					3,197															
	0,5						3,207														
	0,6							3,208													
	0,7								3,258												
	0,8									3,258											
	0,9										3,308										
	1,0											3,324									
	1,1												3,382								
	1,2													3,408							
	1,3														3,409						
	1,4															3,524					
	1,5																3,599				
	1,6																	3,599			
	1,7																		3,717		
	1,8																			3,867	
	1,9																				4,010
2,0																					4,116

Tabla B.41: Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,820																				
	0,1	0,801		1,404		2,149		2,930		3,724		4,526		5,332		6,141		6,952		7,765		
	0,2		1,009		1,631		2,323		3,038		3,763		4,492		5,225		5,959		6,695		7,432	
	0,3	0,748		1,272		1,963		2,695		3,442		4,197		4,955		5,717		6,479		7,243		
	0,4		0,975		1,480		2,048		2,637		3,236		3,841		4,449		5,058		5,669		6,281	
	0,5	0,776		1,226		1,802		2,417		3,046		3,682		4,323		4,966		5,610		6,256		
	0,6		0,911		1,355		1,869		2,408		2,958		3,514		4,074		4,636		5,199		5,764	
	0,7	0,758		1,161		1,696		2,272		2,864		3,464		4,068		4,674		5,283		5,892		
	0,8		0,896		1,328		1,831		2,360		2,901		3,448		3,999		4,552		5,106		5,662	
	0,9	0,753		1,137		1,652		2,208		2,780		3,361		3,946		4,534		5,123		5,714		
	1,0		0,892		1,322		1,825		2,353		2,894		3,441		3,991		4,544		5,099		5,654	
	1,1	0,748		1,118		1,619		2,162		2,722		3,290		3,863		4,439		5,016		5,595		
	1,2		0,890		1,322		1,826		2,357		2,900		3,449		4,002		4,557		5,114		5,672	
	1,3	0,745		1,103		1,594		2,126		2,676		3,234		3,797		4,363		4,931		5,500		
	1,4		0,890		1,325		1,833		2,368		2,914		3,467		4,023		4,582		5,142		5,704	
	1,5	0,743		1,094		1,577		2,103		2,646		3,198		3,755		4,314		4,875		5,438		
	1,6		0,893		1,332		1,845		2,384		2,935		3,492		4,053		4,616		5,181		5,747	
	1,7	0,742		1,090		1,569		2,091		2,630		3,178		3,730		4,286		4,843		5,402		
	1,8		0,895		1,339		1,855		2,398		2,952		3,513		4,077		4,644		5,212		5,782	
	1,9	0,742		1,088		1,564		2,083		2,620		3,165		3,715		4,268		4,823		5,379		
2,0		0,897		1,342		1,860		2,404		2,960		3,523		4,088		4,656		5,226		5,797		

Tabla B.42: Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.2.2.c. 8,1 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,242																				
	0,1	1,207		1,208		1,210		1,211		1,212		1,214		1,215		1,216		1,218		1,219		
	0,2		1,207		1,208		1,209		1,210		1,211		1,211		1,212		1,213		1,214		1,215	
	0,3	1,206		1,206		1,206		1,206		1,206		1,206		1,206		1,206		1,206		1,206		
	0,4		1,207		1,207		1,208		1,208		1,209		1,209		1,210		1,210		1,211		1,212	
	0,5	1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208		1,208		1,208		1,209		
	0,6		1,206		1,206		1,206		1,206		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207	
	0,7	1,206		1,207		1,207		1,207		1,208		1,208		1,208		1,208		1,209		1,209		
	0,8		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208		1,208		1,208		1,209		1,209	
	0,9	1,206		1,206		1,206		1,206		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		
	1,0		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208		1,208		1,208		1,208		1,209	
	1,1	1,206		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208		1,208		
	1,2		1,206		1,206		1,206		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207	
	1,3	1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208		1,208		1,208		
	1,4		1,206		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208		1,208	
	1,5	1,206		1,206		1,206		1,206		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		
	1,6		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208		1,208		1,208	
	1,7	1,206		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208		
	1,8		1,206		1,206		1,206		1,206		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208	
	1,9	1,206		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208		1,208		
2,0		1,206		1,206		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,207		1,208		1,208		

Tabla B.43: Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	4,918																				
	0,1	4,586		4,599		4,629		4,675		4,736		4,812		4,903		5,008		5,125		5,256		
	0,2		4,602		4,656		4,746		4,869		5,024		5,207		5,416		5,648		5,900		6,169	
	0,3	4,597		4,680		4,837		5,062		5,345		5,679		6,054		6,463		6,901		7,361		
	0,4		4,620		4,698		4,816		4,970		5,159		5,377		5,622		5,889		6,177		6,482	
	0,5	4,778		5,161		5,539		5,912		6,279		6,640		6,994		7,342		7,684		8,018		
	0,6		4,580		4,599		4,644		4,712		4,804		4,917		5,051		5,204		5,374		5,560	
	0,7	4,583		4,599		4,641		4,706		4,795		4,906		5,038		5,189		5,357		5,542		
	0,8		4,590		4,614		4,658		4,720		4,800		4,897		5,010		5,137		5,279		5,434	
	0,9	4,586		4,604		4,642		4,700		4,777		4,872		4,984		5,113		5,256		5,412		
	1,0		4,598		4,630		4,680		4,748		4,833		4,933		5,047		5,174		5,312		5,461	
	1,1	4,587		4,605		4,640		4,692		4,761		4,845		4,945		5,058		5,185		5,325		
	1,2		4,594		4,620		4,661		4,717		4,787		4,872		4,970		5,080		5,202		5,335	
	1,3	4,588		4,606		4,641		4,691		4,756		4,835		4,928		5,034		5,152		5,282		
	1,4		4,595		4,621		4,662		4,718		4,787		4,870		4,965		5,072		5,191		5,320	
	1,5	4,588		4,606		4,639		4,687		4,748		4,824		4,912		5,012		5,124		5,247		
	1,6		4,595		4,621		4,662		4,716		4,785		4,866		4,960		5,066		5,182		5,309	
	1,7	4,588		4,606		4,638		4,683		4,743		4,815		4,900		4,996		5,104		5,222		
	1,8		4,595		4,620		4,659		4,713		4,780		4,861		4,953		5,058		5,173		5,298	
	1,9	4,588		4,604		4,634		4,678		4,736		4,806		4,888		4,982		5,087		5,202		
2,0		4,594		4,618		4,656		4,709		4,775		4,854		4,946		5,049		5,163		5,287		

Tabla B.44: Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,410																				
	0,1	0,478		1,036		1,666		2,310		2,959		3,611		4,265		4,921		5,578		6,236		
	0,2		0,687		1,235		1,813		2,399		2,989		3,580		4,172		4,765		5,358		5,951	
	0,3	0,522		1,198		1,940		2,693		3,450		4,209		4,969		5,729		6,490		7,251		
	0,4		0,729		1,311		1,922		2,540		3,162		3,785		4,409		5,034		5,659		6,285	
	0,5	0,678		1,332		1,988		2,644		3,300		3,956		4,611		5,265		5,919		6,572		
	0,6		0,654		1,178		1,734		2,299		2,867		3,438		4,009		4,582		5,154		5,728	
	0,7	0,461		0,976		1,566		2,171		2,780		3,393		4,006		4,621		5,236		5,851		
	0,8		0,656		1,170		1,715		2,269		2,827		3,386		3,947		4,509		5,071		5,633	
	0,9	0,459		0,956		1,528		2,115		2,707		3,302		3,898		4,495		5,092		5,690		
	1,0		0,635		1,143		1,684		2,235		2,791		3,348		3,908		4,468		5,030		5,592	
	1,1	0,461		0,950		1,510		2,085		2,665		3,248		3,832		4,417		5,002		5,588		
	1,2		0,669		1,186		1,734		2,290		2,850		3,412		3,975		4,538		5,102		5,667	
	1,3	0,459		0,937		1,487		2,052		2,622		3,195		3,769		4,344		4,919		5,495		
	1,4		0,673		1,195		1,746		2,306		2,869		3,434		4,000		4,567		5,135		5,702	
	1,5	0,459		0,931		1,474		2,032		2,596		3,162		3,729		4,297		4,866		5,434		
	1,6		0,677		1,203		1,759		2,323		2,891		3,461		4,031		4,603		5,175		5,747	
	1,7	0,457		0,924		1,463		2,017		2,577		3,139		3,703		4,267		4,832		5,398		
	1,8		0,679		1,209		1,768		2,336		2,907		3,480		4,054		4,629		5,205		5,780	
	1,9	0,455		0,919		1,455		2,007		2,564		3,124		3,685		4,247		4,809		5,372		
2,0		0,679		1,210		1,770		2,340		2,913		3,488		4,063		4,640		5,217		5,794		

Tabla B.45: Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.2.3. Máquina con falla - 2 BRB

B.2.3.a. 2,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,652																			
	0,1		0,626																		
	0,2			0,626																	
	0,3				0,625																
	0,4					0,626															
	0,5						0,626														
	0,6							0,626													
	0,7								0,626												
	0,8									0,626											
	0,9										0,626										
	1,0											0,627									
	1,1												0,627								
	1,2													0,627							
	1,3														0,627						
	1,4															0,628					
	1,5																0,627				
	1,6																	0,628			
	1,7																		0,629		
	1,8																			0,628	
	1,9																				0,630
2,0																					0,629

Tabla B.46: Resultados de RMS i_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,869																			
	0,1		2,846																		
	0,2			2,697																	
	0,3				2,805																
	0,4					2,831															
	0,5						2,861														
	0,6							2,869													
	0,7								2,914												
	0,8									2,922											
	0,9										2,998										
	1,0											2,989									
	1,1												2,989								
	1,2													2,982							
	1,3														2,982						
	1,4															2,977					
	1,5																2,973				
	1,6																	2,797			
	1,7																		2,805		
	1,8																			2,818	
	1,9																				2,805
2,0																					2,798

Tabla B.47: Resultados de RMS Δi_d para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,639																				
	0,1		1,901																			
	0,2			1,849																		
	0,3				2,075																	
	0,4					2,137																
	0,5						2,411															
	0,6							2,476														
	0,7								2,822													
	0,8									2,903												
	0,9										3,282											
	1,0											3,388										
	1,1												3,399									
	1,2													3,758								
	1,3														3,907							
	1,4															4,304						
	1,5																4,431					
	1,6																	4,973				
	1,7																		5,543			
	1,8																			5,518		
	1,9																				6,135	
2,0																					6,073	

Tabla B.48: Resultados de RMS Δi_q para 2,7 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.2.3.b. 5,4 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,988																				
	0,1		0,964																			
	0,2			0,964																		
	0,3				0,963																	
	0,4					0,964																
	0,5						0,964															
	0,6							0,963														
	0,7								0,964													
	0,8									0,964												
	0,9										0,963											
	1,0											0,964										
	1,1												0,964									
	1,2													0,963								
	1,3														0,964							
	1,4															0,965						
	1,5																0,964					
	1,6																	0,965				
	1,7																		0,965			
	1,8																			0,964		
	1,9																				0,965	
2,0																					0,965	

Tabla B.49: Resultados de RMS i_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	6,148																				
	0,1		6,038																			
	0,2			6,059																		
	0,3				6,050																	
	0,4					6,150																
	0,5						6,163															
	0,6							6,152														
	0,7								6,228													
	0,8									6,183												
	0,9										6,223											
	1,0											6,165										
	1,1												6,228									
	1,2													6,202								
	1,3														6,283							
	1,4															6,275						
	1,5																6,313					
	1,6																	6,356				
	1,7																		6,391			
	1,8																			6,358		
	1,9																				6,386	
2,0																					6,661	

Tabla B.50: Resultados de RMS Δi_d para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,230																				
	0,1		1,289																			
	0,2			1,445																		
	0,3				1,696																	
	0,4					1,750																
	0,5						2,058															
	0,6							2,121														
	0,7								2,390													
	0,8									2,565												
	0,9										2,949											
	1,0											3,053										
	1,1												3,425									
	1,2													3,572								
	1,3														3,902							
	1,4															4,118						
	1,5																4,396					
	1,6																	4,689				
	1,7																		4,909			
	1,8																			5,268		
	1,9																				5,432	
2,0																					5,840	

Tabla B.51: Resultados de RMS Δi_q para 5,4 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.2.3.c. 8,1 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,246																				
	0,1		1,212		1,213		1,215		1,216		1,217		1,219		1,220		1,221		1,223		1,224	
	0,2			1,212		1,213		1,214		1,215		1,216		1,217		1,218		1,219		1,220		
	0,3		1,211		1,211		1,211		1,211		1,211		1,211		1,211		1,211		1,211		1,211	
	0,4			1,212		1,212		1,213		1,213		1,214		1,214		1,215		1,215		1,216		1,216
	0,5		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,214		1,214		1,215		1,215		1,216	
	0,6			1,211		1,211		1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213
	0,7		1,211		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,213		1,214		1,214		1,215	
	0,8			1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,213		1,214		1,214
	0,9		1,211		1,211		1,211		1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212	
	1,0			1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,213		1,214		1,214
	1,1		1,211		1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,213		1,213	
	1,2			1,211		1,211		1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213
	1,3		1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,213		1,214	
	1,4			1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,213
	1,5		1,211		1,211		1,211		1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212	
	1,6			1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,213		1,214
	1,7		1,211		1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,213	
	1,8			1,211		1,211		1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213
	1,9		1,211		1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,213	
2,0			1,211		1,211		1,212		1,212		1,212		1,212		1,212		1,213		1,213		1,213	

Tabla B.52: Resultados de RMS i_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	9,016																				
	0,1		8,882		8,897		8,919		8,947		8,982		9,024		9,073		9,128		9,190		9,259	
	0,2			8,897		8,936		8,994		9,071		9,167		9,280		9,411		9,558		9,720		9,897
	0,3		8,889		8,948		9,053		9,202		9,392		9,622		9,888		10,188		10,519		10,876	
	0,4			8,893		8,937		9,008		9,106		9,231		9,380		9,552		9,747		9,963		10,198
	0,5		8,896		8,962		9,066		9,207		9,382		9,589		9,825		10,089		10,377		10,687	
	0,6			8,876		8,884		8,903		8,932		8,970		9,019		9,077		9,145		9,223		9,311
	0,7		8,877		8,885		8,906		8,939		8,983		9,040		9,109		9,189		9,280		9,383	
	0,8			8,881		8,894		8,917		8,950		8,992		9,044		9,105		9,175		9,254		9,342
	0,9		8,878		8,889		8,910		8,942		8,984		9,036		9,098		9,171		9,252		9,344	
	1,0			8,884		8,900		8,926		8,961		9,005		9,059		9,121		9,191		9,269		9,356
	1,1		8,880		8,891		8,912		8,940		8,978		9,023		9,077		9,140		9,210		9,289	
	1,2			8,885		8,901		8,925		8,958		8,997		9,045		9,100		9,163		9,233		9,310
	1,3		8,881		8,894		8,915		8,945		8,983		9,028		9,082		9,143		9,211		9,287	
	1,4			8,887		8,904		8,929		8,962		9,002		9,050		9,105		9,167		9,237		9,313
	1,5		8,881		8,895		8,916		8,946		8,982		9,026		9,077		9,135		9,201		9,273	
	1,6			8,887		8,904		8,929		8,962		9,003		9,050		9,105		9,167		9,236		9,311
	1,7		8,881		8,894		8,915		8,943		8,978		9,021		9,070		9,127		9,190		9,259	
	1,8			8,886		8,903		8,928		8,960		9,000		9,046		9,100		9,161		9,229		9,303
	1,9		8,881		8,893		8,913		8,939		8,973		9,014		9,062		9,117		9,178		9,245	
2,0			8,886		8,902		8,925		8,957		8,995		9,041		9,094		9,154		9,221		9,294	

Tabla B.53: Resultados de RMS Δi_d para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																					
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																					
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,410																					
	0,1	0,686		1,138		1,718		2,333		2,961		3,596		4,235		4,877		5,521		6,167			
	0,2		0,832		1,301		1,836		2,393		2,960		3,531		4,106		4,683		5,260		5,839		
	0,3		0,713		1,290		1,999		2,738		3,489		4,245		5,004		5,764		6,525		7,286		
	0,4			0,859		1,381		1,969		2,578		3,197		3,820		4,447		5,075		5,704		6,334	
	0,5			0,650		1,095		1,695		2,333		2,985		3,644		4,306		4,971		5,637		6,304	
	0,6				0,841		1,301		1,825		2,370		2,924		3,484		4,046		4,611		5,176		5,743
	0,7					1,100		1,646		2,227		2,821		3,423		4,027		4,634		5,242		5,852	
	0,8					0,824		1,271		1,782		2,316		2,860		3,410		3,962		4,516		5,071	
	0,9					0,676		1,077		1,604		2,166		2,742		3,325		3,912		4,500		5,091	
	1,0						0,820		1,262		1,771		2,303		2,844		3,391		3,942		4,495		5,049
	1,1						0,679		1,077		1,595		2,148		2,715		3,288		3,864		4,443		5,023
	1,2							0,835		1,288		1,804		2,342		2,889		3,441		3,996		4,553	
	1,3								1,063		1,568		2,109		2,664		3,226		3,791		4,358		4,927
	1,4									1,295		1,814		2,355		2,905		3,460		4,018		4,578	
	1,5										1,554		2,087		2,635		3,190		3,748		4,309		4,871
	1,6											1,826		2,371		2,925		3,484		4,046		4,611	
	1,7												2,073		2,617		3,167		3,722		4,278		4,836
	1,8													2,380		2,938		3,501		4,067		4,634	
	1,9														2,602		3,149		3,701		4,255		4,811
2,0															2,941		3,505		4,073		4,642		

Tabla B.54: Resultados de RMS Δi_q para 8,1 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.3. Máquina 3

B.3.1. Máquina sana - 0 BRB

B.3.1.a. 6,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																					
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																					
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,360																					
	0,1	0,361		0,361		0,361		0,362		0,362		0,363		0,363		0,364		0,365		0,366		0,368	
	0,2		0,361		0,361		0,362		0,362		0,363		0,364		0,364		0,365		0,366		0,367		0,368
	0,3			0,361		0,361		0,362		0,362		0,363		0,363		0,364		0,365		0,366		0,367	
	0,4				0,361		0,362		0,362		0,363		0,363		0,364		0,365		0,365		0,367		0,368
	0,5					0,361		0,362		0,362		0,363		0,363		0,364		0,365		0,366		0,367	
	0,6						0,361		0,362		0,362		0,363		0,363		0,364		0,365		0,366		0,368
	0,7							0,361		0,362		0,362		0,363		0,363		0,364		0,365		0,366	
	0,8								0,361		0,362		0,362		0,363		0,363		0,364		0,365		0,368
	0,9									0,361		0,362		0,362		0,363		0,363		0,364		0,365	
	1,0										0,361		0,362		0,363		0,363		0,364		0,365		0,368
	1,1											0,361		0,362		0,363		0,363		0,364		0,365	
	1,2												0,361		0,362		0,363		0,363		0,366		0,368
	1,3													0,361		0,362		0,363		0,364		0,365	
	1,4														0,361		0,362		0,363		0,366		0,368
	1,5															0,361		0,362		0,365		0,366	
	1,6																0,361		0,362		0,366		0,368
	1,7																	0,361		0,362		0,367	
	1,8																		0,361		0,362		0,368
	1,9																			0,361		0,367	
2,0																				0,361		0,368	

Tabla B.55: Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																			
	0,1		0,022																		
	0,2			0,047																	
	0,3				0,069																
	0,4					0,085															
	0,5						0,093														
	0,6							0,101													
	0,7								0,112												
	0,8									0,124											
	0,9										0,135										
	1,0											0,143									
	1,1												0,151								
	1,2													0,163							
	1,3														0,175						
	1,4															0,187					
	1,5																0,196				
	1,6																	0,206			
	1,7																		0,218		
	1,8																			0,232	
	1,9																				0,245
2,0																					0,255

Tabla B.56: Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																			
	0,1		0,330																		
	0,2			0,724																	
	0,3				1,141																
	0,4					1,501															
	0,5						1,793														
	0,6							2,089													
	0,7								2,451												
	0,8									2,852											
	0,9										3,213										
	1,0											3,514									
	1,1												3,822								
	1,2													4,196							
	1,3														4,517						
	1,4															4,895					
	1,5																5,294				
	1,6																	5,706			
	1,7																		6,085		
	1,8																			6,419	
	1,9																				6,801
2,0																					7,127

Tabla B.57: Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.3.1.b. 13,5 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,704																			
	0,1		0,705																		
	0,2			0,705																	
	0,3				0,705																
	0,4					0,705															
	0,5						0,705														
	0,6							0,705													
	0,7								0,705												
	0,8									0,705											
	0,9										0,705										
	1,0											0,706									
	1,1												0,706								
	1,2													0,706							
	1,3														0,706						
	1,4															0,706					
	1,5																0,706				
	1,6																	0,706			
	1,7																		0,707		
	1,8																			0,707	
	1,9																				0,708
2,0																					0,708

Tabla B.58: Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																			
	0,1		0,027																		
	0,2			0,064																	
	0,3				0,106																
	0,4					0,139															
	0,5						0,159														
	0,6							0,175													
	0,7								0,194												
	0,8									0,215											
	0,9										0,233										
	1,0											0,246									
	1,1												0,261								
	1,2													0,280							
	1,3														0,302						
	1,4															0,321					
	1,5																0,348				
	1,6																	0,373			
	1,7																		0,403		
	1,8																			0,443	
	1,9																				0,492
2,0																					0,492

Tabla B.59: Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																				
	0,1		0,020																			
	0,2			0,052																		
	0,3				0,099																	
	0,4					0,147																
	0,5						0,181															
	0,6							0,205														
	0,7								0,229													
	0,8									0,252												
	0,9										0,271											
	1,0											0,285										
	1,1												0,300									
	1,2													0,320								
	1,3														0,342							
	1,4															0,363						
	1,5																0,380					
	1,6																	0,397				
	1,7																		0,420			
	1,8																			0,445		
	1,9																				0,467	
2,0																					0,486	

Tabla B.62: Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,000																				
	0,1		0,300																			
	0,2			0,900																		
	0,3				1,339																	
	0,4					1,467																
	0,5						1,779															
	0,6							2,084														
	0,7								2,450													
	0,8									2,851												
	0,9										3,211											
	1,0											3,512										
	1,1												3,818									
	1,2													4,191								
	1,3														4,513							
	1,4															4,890						
	1,5																5,338					
	1,6																	5,558				
	1,7																		6,049			
	1,8																			6,253		
	1,9																				6,415	
2,0																					6,779	

Tabla B.63: Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.3.2. Máquina con falla - 1 BRB

B.3.2.a. 6,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,373																			
	0,1		0,372																		
	0,2			0,372																	
	0,3				0,372																
	0,4					0,372															
	0,5						0,372														
	0,6							0,372													
	0,7								0,372												
	0,8									0,372											
	0,9										0,372										
	1,0											0,372									
	1,1												0,372								
	1,2													0,372							
	1,3														0,372						
	1,4															0,372					
	1,5																0,372				
	1,6																	0,372			
	1,7																		0,372		
	1,8																			0,372	
	1,9																				0,372
2,0																					0,372

Tabla B.64: Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,959																			
	0,1		0,976																		
	0,2			0,982																	
	0,3				0,980																
	0,4					0,981															
	0,5						0,968														
	0,6							0,976													
	0,7								0,975												
	0,8									0,976											
	0,9										0,977										
	1,0											0,976									
	1,1												0,975								
	1,2													0,976							
	1,3														0,975						
	1,4															0,976					
	1,5																0,977				
	1,6																	0,976			
	1,7																		0,977		
	1,8																			0,976	
	1,9																				0,975
2,0																					0,976

Tabla B.65: Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,822																			
	0,1	0,878																			
	0,2		1,147																		
	0,3	0,890		1,399																	
	0,4		1,105		1,714																
	0,5	0,882		1,341		1,967															
	0,6		1,072		1,620		2,255														
	0,7	0,883		1,327		1,934		2,590													
	0,8		1,080		1,643		2,294		2,975												
	0,9	0,888		1,346		1,965		2,634		3,323											
	1,0		1,072		1,623		2,261		2,931		3,614										
	1,1	0,884		1,322		1,920		2,568		3,237		3,915									
	1,2		1,071		1,617		2,251		2,916		3,594		4,279								
	1,3	0,886		1,337		1,949		2,612		3,294		3,986		4,684							
	1,4		1,080		1,639		2,285		2,961		3,652		4,349		5,050						
	1,5	0,885		1,333		1,942		2,601		3,279		3,968		4,662		5,360					
	1,6		1,073		1,622		2,257		2,923		3,603		4,291		4,982		5,676				
	1,7	0,886		1,334		1,942		2,600		3,279		3,966		4,660		5,357		6,056			
	1,8		1,080		1,641		2,288		2,966		3,658		4,357		5,060		5,766				
	1,9	0,888		1,347		1,966		2,635		3,323		4,022		4,725		5,432		6,141			
2,0		1,080		1,640		2,286		2,964		3,655		4,353		5,055		5,760					

Tabla B.66: Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.3.2.b. 13,5 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,721																			
	0,1	0,720																			
	0,2		0,720																		
	0,3	0,720		0,720																	
	0,4		0,720		0,720																
	0,5	0,720		0,720		0,720															
	0,6		0,720		0,720		0,720														
	0,7	0,720		0,720		0,720		0,720													
	0,8		0,720		0,720		0,720		0,720												
	0,9	0,720		0,720		0,720		0,720		0,721											
	1,0		0,720		0,720		0,720		0,720		0,721										
	1,1	0,720		0,720		0,720		0,720		0,721		0,721									
	1,2		0,720		0,720		0,720		0,720		0,721		0,721								
	1,3	0,720		0,720		0,720		0,720		0,721		0,721		0,721							
	1,4		0,720		0,720		0,720		0,720		0,721		0,721		0,721						
	1,5	0,720		0,720		0,720		0,720		0,721		0,721		0,721		0,722					
	1,6		0,720		0,720		0,720		0,720		0,721		0,721		0,722		0,722				
	1,7	0,720		0,720		0,720		0,720		0,721		0,721		0,721		0,722		0,722			
	1,8		0,720		0,720		0,720		0,720		0,721		0,721		0,722		0,722				
	1,9	0,720		0,720		0,720		0,720		0,721		0,721		0,721		0,722		0,722			
2,0		0,720		0,720		0,720		0,720		0,721		0,721		0,722		0,722					

Tabla B.67: Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,466																				
	0,1		2,425																			
	0,2			2,427																		
	0,3				2,427																	
	0,4					2,434																
	0,5						2,229															
	0,6							2,443														
	0,7								2,438													
	0,8									2,445												
	0,9										2,449											
	1,0											2,412										
	1,1												2,411									
	1,2													2,412								
	1,3														2,415							
	1,4															2,419						
	1,5																2,490					
	1,6																	2,425				
	1,7																		2,508			
	1,8																			2,433		
	1,9																				2,433	
2,0																					2,442	

Tabla B.68: Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,233																				
	0,1		1,287																			
	0,2			1,439																		
	0,3				1,672																	
	0,4					1,949																
	0,5						1,122															
	0,6							2,486														
	0,7								2,762													
	0,8									3,132												
	0,9										3,462											
	1,0											3,733										
	1,1												3,378									
	1,2													3,067								
	1,3														3,427							
	1,4															3,112						
	1,5																3,411					
	1,6																	3,073				
	1,7																		3,412			
	1,8																			3,111		
	1,9																				3,111	
2,0																					3,111	

Tabla B.69: Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.3.2.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,045																			
	0,1		1,046																		
	0,2			1,046																	
	0,3				1,046																
	0,4					1,046															
	0,5						1,046														
	0,6							1,046													
	0,7								1,046												
	0,8									1,046											
	0,9										1,046										
	1,0											1,046									
	1,1												1,046								
	1,2													1,046							
	1,3														1,046						
	1,4															1,046					
	1,5																1,046				
	1,6																	1,046			
	1,7																		1,046		
	1,8																			1,046	
	1,9																				1,046
2,0																					1,046

Tabla B.70: Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	4,110																			
	0,1		4,068																		
	0,2			4,068																	
	0,3				4,071																
	0,4					4,073															
	0,5						4,077														
	0,6							4,083													
	0,7								4,083												
	0,8									4,083											
	0,9										4,083										
	1,0											4,083									
	1,1												4,083								
	1,2													4,083							
	1,3														4,083						
	1,4															4,083					
	1,5																4,083				
	1,6																	4,083			
	1,7																		4,083		
	1,8																			4,083	
	1,9																				4,083
2,0																					4,083

Tabla B.71: Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,370																				
	0,1		1,469		1,696		2,075		2,539		3,050		3,587		4,141		4,705		5,276		5,853	
	0,2			1,582		1,959		2,462		2,926		3,030		3,632		4,254		4,888		5,531		6,179
	0,3				1,810		2,322		2,926		3,574		4,247		4,935		5,631		6,334		7,041	
	0,4					2,057		2,635		3,277		3,952		4,645		5,351		6,063		6,781		7,502
	0,5						2,305		2,900		3,540		4,205		4,884		5,573		6,267		6,966	
	0,6							2,569		3,173		3,809		4,464		5,131		5,805		6,484		7,167
	0,7								2,851		3,477		4,129		4,796		5,472		6,154		6,841	
	0,8									3,088		3,736		4,406		5,087		5,777		6,473		7,172
	0,9										3,519		4,183		4,861		5,549		6,244		6,942	
	1,0											3,148		3,788		4,447		5,118		5,797		6,481
	1,1												3,430		4,071		4,728		5,395		6,068	
	1,2													3,144		3,779		4,434		5,100		5,774
	1,3														3,486		4,142		4,812		5,493	
	1,4															3,831		4,498		5,176		5,862
	1,5																4,107		4,773		5,450	
	1,6																	4,437		5,105		5,780
	1,7																		4,798		5,474	
	1,8																			5,181		5,868
	1,9																				5,547	6,240
2,0																					5,866	

Tabla B.72: Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.3.3. Máquina con falla - 2 BRB

B.3.3.a. 6,7 Nm de carga (33,3% de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,382																				
	0,1		0,383		0,383		0,383		0,384		0,384		0,385		0,386		0,387		0,388		0,389	
	0,2			0,383		0,383		0,383		0,384		0,384		0,385		0,386		0,387		0,388		0,390
	0,3				0,383		0,383		0,384		0,384		0,385		0,386		0,387		0,388		0,389	
	0,4					0,383		0,383		0,384		0,384		0,385		0,386		0,387		0,388		0,390
	0,5						0,383		0,384		0,384		0,385		0,386		0,386		0,388		0,389	
	0,6							0,383		0,384		0,384		0,385		0,386		0,387		0,388		0,389
	0,7								0,383		0,384		0,385		0,385		0,386		0,387		0,388	
	0,8									0,384		0,384		0,385		0,386		0,387		0,388		0,389
	0,9										0,384		0,385		0,385		0,386		0,387		0,388	
	1,0											0,384		0,385		0,386		0,387		0,388		0,389
	1,1												0,385		0,385		0,386		0,387		0,388	
	1,2													0,385		0,386		0,387		0,388		0,389
	1,3														0,385		0,386		0,387		0,388	
	1,4															0,385		0,386		0,387		0,389
	1,5																0,385		0,386		0,387	
	1,6																	0,385		0,386		0,389
	1,7																		0,385		0,386	
	1,8																			0,387		0,388
	1,9																				0,387	0,388
2,0																					0,389	

Tabla B.73: Resultados de RMS i_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,918																			
	0,1	1,886		1,891		1,901		1,915		1,933		1,956		1,982		2,013		2,048		2,087	
	0,2		1,888	1,888	1,897		1,912		1,930		1,948		1,976		1,982		2,014		2,050		2,133
	0,3	1,886		1,894		1,907		1,925		1,948		1,976		2,008		2,045		2,087		2,131	
	0,4		1,889	1,888	1,898		1,910		1,926		1,946		1,970		1,996		2,026		2,059		2,095
	0,5	1,886		1,891		1,899		1,910		1,923		1,939		1,957		1,978		2,000		2,025	
	0,6		1,887	1,887	1,892		1,900		1,911		1,925		1,941		1,960		1,981		2,005		2,030
	0,7	1,885		1,888		1,893		1,902		1,912		1,925		1,941		1,958		1,978		2,000	
	0,8		1,885	1,888	1,889		1,895		1,903		1,915		1,929		1,945		1,963		1,984		2,007
	0,9	1,885		1,888		1,893		1,901		1,910		1,922		1,936		1,952		1,969		1,989	
	1,0		1,885	1,888	1,888		1,894		1,901		1,911		1,922		1,936		1,952		1,969		1,989
	1,1	1,885		1,887		1,891		1,898		1,906		1,916		1,929		1,942		1,958		1,976	
	1,2		1,885	1,887	1,889		1,894		1,901		1,910		1,921		1,934		1,948		1,964		1,982
	1,3	1,884		1,886		1,890		1,896		1,904		1,914		1,926		1,940		1,955		1,972	
	1,4		1,886	1,886	1,889		1,894		1,901		1,910		1,921		1,933		1,947		1,963		1,981
	1,5	1,884		1,886		1,890		1,896		1,903		1,913		1,924		1,937		1,952		1,968	
	1,6		1,885	1,888	1,888		1,893		1,900		1,908		1,918		1,930		1,944		1,959		1,976
	1,7	1,884		1,887		1,891		1,896		1,904		1,913		1,924		1,937		1,951		1,967	
	1,8		1,885	1,888	1,888		1,893		1,899		1,908		1,918		1,930		1,944		1,959		1,976
	1,9	1,884		1,887		1,891		1,897		1,904		1,914		1,925		1,938		1,952		1,968	
2,0		1,885	1,888	1,888		1,893		1,899		1,908		1,918		1,930		1,943		1,958		1,975	

Tabla B.74: Resultados de RMS Δi_d para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,507																				
	0,1	1,579		1,851		2,300		2,845		3,440		4,064		4,704		5,356		6,015		6,680		
	0,2		1,717	1,851		2,156		2,736		3,384		4,069		4,775		5,493		6,219		6,951		7,687
	0,3	1,580		1,917		2,472		3,132		3,843		4,581		5,336		6,100		6,871		7,647		7,902
	0,4		1,740	1,891		2,205		2,810		3,481		4,187		4,912		5,650		6,396		7,147		7,902
	0,5	1,584		1,891		2,391		2,989		3,637		4,313		5,005		5,707		6,416		7,130		7,257
	0,6		1,700	1,876		2,099		2,632		3,232		3,870		4,528		5,200		5,880		6,567		7,257
	0,7	1,584		1,876		2,353		2,926		3,549		4,199		4,866		5,543		6,228		6,917		7,362
	0,8		1,700	1,889		2,106		2,650		3,263		3,912		4,583		5,267		5,960		6,659		7,362
	0,9	1,587		1,889		2,379		2,963		3,597		4,259		4,936		5,625		6,320		7,020		7,236
	1,0		1,695	1,889		2,090		2,620		3,219		3,854		4,512		5,182		5,861		6,546		7,236
	1,1	1,583		1,867		2,333		2,895		3,506		4,144		4,800		5,466		6,140		6,818		7,194
	1,2		1,697	1,874		2,089		2,615		3,209		3,839		4,491		5,156		5,830		6,510		7,194
	1,3	1,583		1,874		2,351		2,926		3,550		4,202		4,871		5,550		6,236		6,928		7,305
	1,4		1,703	1,874		2,106		2,644		3,250		3,893		4,556		5,233		5,918		6,609		7,305
	1,5	1,583		1,872		2,346		2,916		3,536		4,184		4,849		5,524		6,206		6,894		7,199
	1,6		1,696	1,875		2,089		2,615		3,209		3,841		4,493		5,159		5,834		6,514		7,199
	1,7	1,584		1,875		2,349		2,919		3,539		4,186		4,850		5,524		6,206		6,892		7,303
	1,8		1,699	1,884		2,101		2,638		3,244		3,887		4,551		5,229		5,915		6,606		7,303
	1,9	1,585		1,884		2,368		2,949		3,580		4,237		4,911		5,596		6,288		6,985		7,303
2,0		1,700	1,884		2,101		2,638		3,243		3,885		4,548		5,225		5,910		6,600		7,296	

Tabla B.75: Resultados de RMS Δi_q para 6,8 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.3.3.b. 13,5 Nm de carga (66,7 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	0,734																			
	0,1		0,734																		
	0,2			0,734																	
	0,3				0,734																
	0,4					0,734															
	0,5						0,734														
	0,6							0,734													
	0,7								0,734												
	0,8									0,734											
	0,9										0,734										
	1,0											0,734									
	1,1												0,734								
	1,2													0,734							
	1,3														0,734						
	1,4															0,734					
	1,5																0,734				
	1,6																	0,734			
	1,7																		0,734		
	1,8																			0,734	
	1,9																				0,734
2,0																					0,734

Tabla B.76: Resultados de RMS i_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	4,658																			
	0,1		4,659																		
	0,2			4,658																	
	0,3				4,663																
	0,4					4,661															
	0,5						4,672														
	0,6							4,668													
	0,7								4,677												
	0,8									4,687											
	0,9										4,689										
	1,0											4,700									
	1,1												4,715								
	1,2													4,717							
	1,3														4,743						
	1,4															4,733					
	1,5																4,770				
	1,6																	4,800			
	1,7																		4,758		
	1,8																			4,786	
	1,9																				4,812
2,0																					4,786

Tabla B.77: Resultados de RMS Δi_d para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,329																			
	0,1		2,344																		
	0,2			2,420																	
	0,3				2,599																
	0,4					2,761															
	0,5						2,984														
	0,6							3,102													
	0,7								3,406												
	0,8									3,675											
	0,9										3,975										
	1,0											4,217									
	1,1												4,472								
	1,2													4,798							
	1,3														4,978						
	1,4															5,153					
	1,5																5,487				
	1,6																	6,138			
	1,7																		6,424		
	1,8																			6,801	
	1,9																				7,086
2,0																				7,373	

Tabla B.78: Resultados de RMS Δi_q para 13,5 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

B.3.3.c. 20,3 Nm de carga (100 % de T_{nom})

		Valores RMS i_q (pu)																			
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																			
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	1,058																			
	0,1		1,058																		
	0,2			1,058																	
	0,3				1,058																
	0,4					1,058															
	0,5						1,058														
	0,6							1,058													
	0,7								1,058												
	0,8									1,058											
	0,9										1,058										
	1,0											1,058									
	1,1												1,058								
	1,2													1,058							
	1,3														1,058						
	1,4															1,059					
	1,5																1,059				
	1,6																	1,059			
	1,7																		1,059		
	1,8																			1,060	
	1,9																				1,060
2,0																				1,060	

Tabla B.79: Resultados de RMS i_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_d (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	7,808																				
	0,1		7,813																			
	0,2			7,813																		
	0,3				7,813																	
	0,4					7,817																
	0,5						7,820															
	0,6							7,822														
	0,7								7,825													
	0,8									7,825												
	0,9										7,825											
	1,0											7,825										
	1,1												7,825									
	1,2													7,825								
	1,3														7,825							
	1,4															7,825						
	1,5																7,825					
	1,6																	7,825				
	1,7																		7,825			
	1,8																			7,825		
	1,9																				7,825	
2,0																					7,825	

Tabla B.80: Resultados de RMS Δi_d para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

		Valores RMS Δi_q (% pu)																				
		Amplitud de oscilación de carga (Factor de A_{LO})																				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Frecuencia de oscilación (Factor de f_{LO})	0,0	2,603																				
	0,1		2,643																			
	0,2			2,715																		
	0,3				2,837																	
	0,4					3,021																
	0,5						3,192															
	0,6							3,355														
	0,7								3,699													
	0,8									3,929												
	0,9										4,138											
	1,0											4,374										
	1,1												4,645									
	1,2													4,934								
	1,3														5,298							
	1,4															5,617						
	1,5																5,898					
	1,6																	6,188				
	1,7																		6,525			
	1,8																			6,912		
	1,9																				7,268	
2,0																					7,564	

Tabla B.81: Resultados de RMS Δi_q para 20,3 Nm de carga constante (valores redondeados a tres decimales).

Bibliografía

- [1] K. Drobnič, M. Nemeč, H. Lavrič, V. Ambrožič, and R. Fišer, “Detection of broken rotor bars in presence of load oscillations,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 40 012–40 027, 2025.
- [2] A. Mora Castro, “Apuntes para la asignatura accionamientos eléctricos: Control vectorial de máquinas de inducción,” Apuntes de clase, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Valparaíso, Chile, 2021.
- [3] F. Wang, S. Li, X. Mei, W. Xie, J. Rodríguez, and R. M. Kennel, “Model-based predictive direct control strategies for electrical drives: An experimental evaluation of ptc and pcc methods,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 3, pp. 671–681, 2015.
- [4] Y. Gritli, A. Bellini, C. Rossi, D. Casadei, F. Filippetti, and G.-A. Capolino, “Condition monitoring of mechanical faults in induction machines from electrical signatures: Review of different techniques,” in *2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2017, pp. 77–84.
- [5] M. E. E.-D. Atta, D. K. Ibrahim, and M. I. Gilany, “Broken bar fault detection and diagnosis techniques for induction motors and drives: State of the art,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 88 504–88 526, 2022.
- [6] Z. Song, P. A. Panagiotou, J. C. Mayo-Maldonado, I. Arvanitakis, J. A. Antonino-Daviu, and K. N. Gyftakis, “Isolation of induction motor rotor fault signatures by stray magnetic flux and torque monitoring,” in *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2024, pp. 1–8.
- [7] G. Niu, X. Dong, and Y. Chen, “Motor fault diagnostics based on current signatures: A review,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1–19, 2023.
- [8] D. Matic, Kanović, D. Reljić, F. Kulić, D. Oros, and V. Vasić, “Broken bar detection using current analysis — a case study,” in *2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2013, pp. 407–411.
- [9] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G.-A. Capolino, “Advances in diagnostic techniques for induction machines,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4109–4126, 2008.

- [10] S. B. Lee, D. Hyun, T.-j. Kang, C. Yang, S. Shin, H. Kim, S. Park, T.-S. Kong, and H.-D. Kim, "Identification of false rotor fault indications produced by online mcsa for medium-voltage induction machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 1, pp. 729–739, 2016.
- [11] M. Drif, H. Kim, J. Kim, S. B. Lee, and A. J. M. Cardoso, "Active and reactive power spectra-based detection and separation of rotor faults and low-frequency load torque oscillations," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 2702–2710, 2017.
- [12] M. Nemeč, V. Ambrožič, R. Fišer, D. Nedeljković, and K. Drobnič, "Induction motor broken rotor bar detection based on rotor flux angle monitoring," *Energies*, vol. 12, no. 5, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/5/794>
- [13] H. Kim, S. B. Lee, S. B. Park, S. H. Kia, and G.-A. Capolino, "Reliable detection of rotor faults under the influence of low frequency load torque oscillations for applications with speed reduction couplings," in *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2015, pp. 56–63.
- [14] M. Hoseintabar Marzebali, R. Bazghandi, and V. Abolghasemi, "Rotor asymmetries faults detection in induction machines under the impacts of low-frequency load torque oscillation," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1–11, 2022.
- [15] J. Bonet-Jara, V. Fernandez-Cavero, F. Vedreno-Santos, D. Morinigo-Sotelo, and J. Pons-Llinares, "Very accurate time-frequency representation of induction motors harmonics for fault diagnosis under load variations," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 60, no. 3, pp. 3903–3911, 2024.
- [16] D. J. Barrios Bustamante, "Control digital de velocidad para un banco de pruebas," Valparaíso, Chile, 2007. [Online]. Available: <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/61314>
- [17] Q. Fu, S. Yue, B. He, and N. Fu, "Multiple coupled circuit modelling approach for squirrel cage induction machine under single-broken-bar fault with stator winding functions decomposed in d-q rotor reference frame," *IET Electric Power Applications*, vol. 13, no. 7, pp. 889–900, 2019. [Online]. Available: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-epa.2018.5397>
- [18] F. Fröhr and F. Orttenburger, *Introducción al control electrónico*. Barcelona, España: Marcombo Boixareu Editores, 1986, edición en colaboración con Siemens AG.
- [19] S. S. Duvvuri, S. KP, S. D. K. Varma, S. Gogula, V. S. B. C. Duvvury, and V. S. N. N. Raju, "Broken rotor bar fault in 3- squirrel-cage induction motors: A critical observations," in *2023 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, 2023, pp. 1–6.
- [20] K. A. Elrmali, "Estimating parameters of a three-phase induction motor using matlab/simulink," Diapositivas de presentación, 2017, disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/estimating-parameters-of-im/78882923>.

-
- [21] V. S. S. P. K. Hari, A. Tripathi, and G. Narayanan, "Experimental determination of mechanical parameters in sensorless vector-controlled induction motor drive," *Sadhana*, vol. 42, no. 8, pp. 1285–1297, 2017.
- [22] J. Juliet, "Sistema pu para análisis de máquinas eléctricas en estado transitorio," Apuntes de curso, Máquinas Eléctricas 1 (EL1326), Valparaíso, Chile, 2024, documento interno.
- [23] *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, IEEE Power and Energy Society Std. IEEE Std 112-2017, 2017.
- [24] *NEMA MG 1-2016: Motors and Generators*, National Electrical Manufacturers Association Std., 2016, (Revisión utilizada correspondiente a MG 1-2016 o posterior).
- [25] Marelli Motori, *APF Motor Series - Technical Catalogue Low Voltage*, March 2019, cOMCATIND003-03/2019. [Online]. Available: <https://www.marellimotori.com>