

# PROTOTIPO DE HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA BAJO CONDICIONES DE CARGA

LIBARDO VILLAMIZAR MONTES



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍAS ÁREA INGENIERÍA ELÉCTRICA

BUCARAMANGA

2008

# PROTOTIPO DE HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA BAJO CONDICIONES DE CARGA

Autor: Ing. Libardo Villamizar Montes

Tesis para la obtención del título de master en ingeniería

Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍAS ÁREA INGENIERÍA ELÉCTRICA

BUCARAMANGA

2008

## RESUMEN

**TÍTULO:**

PROTOTIPO DE HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA BAJO CONDICIONES DE CARGA<sup>1</sup>

**AUTOR:**

LIBARDO VILLAMIZAR MONTES<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:**

Estimación, máquina síncrona, componentes de eje directo y eje de cuadratura, herramienta software, equipo de adquisición de señales eléctricas, pruebas en laboratorio.

**DESCRIPCIÓN:**

Existen muchos métodos para estimar parámetros de la máquina síncrona, estos métodos han aparecido de acuerdo a la evolución del modelo en los estudios de los sistemas de potencia. Estos estudios se han hecho complejos de acuerdo a como se desarrollan técnicas de control, tecnologías de construcción de máquinas y el crecimiento de los sistemas de potencia. Los primeros métodos utilizados para estimar fue la prueba de vacío y de corto circuito, luego se aplicó una prueba de corto circuito simétrico repentino como método de estimación y; aparecieron diferentes técnicas que permitían obtener las características transitorias y subtransitorias, como es el caso de la prueba load rejection test y la prueba de decremento. En los ochenta el grupo de investigación Hydroquebec realizó una serie de investigaciones relacionadas con la estimación en frecuencia. Sin embargo, estos métodos tenían aún ciertas características que realizan la estimación compleja, costosa y peligrosa para la integridad del equipo. Es por esto que se propuso la estimación on-line, en la cual las pruebas son tomadas mientras la máquina permanece operando bajo condiciones normales.

En esta tesis se presenta un método para estimar parámetros de la máquina síncrona bajo condiciones de carga, el método utiliza señales eléctricas de operaciones normales de la máquina síncrona; el método toma señales eléctricas mediante un equipo dimensionado e implementado dentro del proyecto. El equipo se instaló en una máquina del laboratorio de la Universidad y se logró estimar los parámetros de esta. Además, de realizar pruebas en el laboratorio se utilizó una serie de pruebas mediante el ATP para analizar diferentes características del método.

---

<sup>1</sup>Proyecto de investigación.

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Hermann Raúl Vargas Torres.

## ABSTRACT

**TITLE:**

PROTOTYPE OF SOFTWARE'S TOOL FOR THE ESTIMATION OF PARAMETERS OF SYNCHRONOUS MACHINE FROM NORMAL OPERATION<sup>1</sup>

**AUTHORS:**

LIBARDO VILLAMIZAR MONTES<sup>2</sup>

**KEY WORDS:**

Estimation, parameter, synchronous machine, direct and quadrature components model.

**DESCRIPTION:**

There are many methods to estimate the parameters of the synchronous machine, this methods appears from the evolution of the model in diferents studies of power systems. This studies has been complex with the time, the news tecniques in control or construction of machines and the growning of power systems. The firts methods used to estimate was the no load probe and short circuit probe, then it was aplicate a sudden short circuit as a method to stimation. With the time it was developent diferents techniques to obtain the trasient and subtrasient characteristics like the load rejection test or the decrement DC probe. In the eighties the investigation group Hydroquebec made a series of investigations relatives with the frecuency estimation. However, this methods have severals characteristics to make the estimation complex, expensive and dangerous for the machine. It is for this reason that was invented the on-line estimation, who can use the electrical signals of the machine in normal operation .

In this thesis is presented a method to estimate the parameters of the synchronous machine under load conditions, the method used electricals signals from the mahcine, the signals was taken from a equipment that was designed and implemented in this project. The equipment was conected to a machine of the laboratory of the University and obtain his paremeters. Besides, was used the ATP to make diferents probes to know and analize the characteristics of the methods.

---

<sup>1</sup>Master Project

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering. Director PhD. Hermann Raúl Vargas Torres.

*En los momentos de crisis, sólo la imaginación es más importante que el conocimiento*

*Albert Einstein.*

## DEDICATORIA

*A mi madre Carmen Rosa Montes y mi padre Pedro Alfonso Villamizar  
responsables de todo lo bueno que he logrado.  
A María Isabel Peñaranda por darle alegría a mi vida.*

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero empezar agradeciendo al Dr Hermann Raúl Vargas, director del proyecto, por su orientación y asesoría las cuales hicieron posible la realización de este trabajo de grado. A los profesores Dr. Gabriel Ordoñez Plata y Dr. Rodolfo Villamizar que más que orientadores son unos amigos. A los Msc. Alvaro Gomez Ruiz, Gabriel Gonzales Sua y al ing. Diego Martinez Ayala su colaboración dieron una ruta exitosa a este proyecto.*

*Ademas, a mis compañeros y amigos de maestria, al Ms. Carlos Rodriguez, Ms Carlos Cardenas, Msc. Marco Fidel Suarez, Msc. Antonio Anaya y Msc. Pedro Cruz. A mis amigos Sisy Vanesa Ruiz, Camilo Sanabira, Jose Leonardo Perez, Laura Patricia Jimenez y Maria del Pilar Cure sin ellos este proyecto no hubiera sido agradable. Gracias a todos por dejarme formar parte de su vida.*

***Msc. Libardo Villamizar Montes***

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>25</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	26
1.2. Objetivos de la tesis . . . . .	27
1.2.1. Objetivo general . . . . .	27
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	27
1.3. Organización de la presentación . . . . .	28
<b>2. Alternativas para estimar parámetros de máquinas síncronas</b>	<b>29</b>
2.1. Prueba de vacío y prueba de cortocircuito . . . . .	29
2.2. Cortocircuito simétrico repentino . . . . .	30
2.3. Prueba de expulsión de carga . . . . .	31
2.4. Prueba D.C. de decremento . . . . .	33
2.5. Prueba de respuesta en frecuencia . . . . .	35
2.6. Estimación de parámetros on-line . . . . .	37
<b>3. La máquina síncrona como un modelo matemático</b>	<b>41</b>
3.1. Introducción . . . . .	41
3.2. Descripción de la máquina síncrona . . . . .	42
3.3. Representación matemática de la máquina . . . . .	43
3.4. Modelo de segundo orden . . . . .	46
3.5. Modelo de tercer orden . . . . .	49
3.6. Comparación entre el modelo $dq0$ y el modelo en el dominio de las fases	50

<b>4. Metodología propuesta para estimar el modelo de la máquina</b>	<b>53</b>
4.1. Introducción . . . . .	53
4.2. Cálculo de los parámetros en el eje directo . . . . .	55
4.2.1. Cálculo de $aL_{ad}$ a partir de la prueba de vacío . . . . .	55
4.2.2. Cálculo de $L_d$ , $L_q$ y $a$ mediante el estado estable de la máquina . . . . .	55
4.2.3. Estimación de los flujos magnéticos $\phi_d$ y $\phi_q$ . . . . .	56
4.2.4. Estimación de la corriente de amortiguamiento $i_{kd}$ . . . . .	57
4.2.5. Cálculo de los parámetros $L_f$ y $R_f$ . . . . .	57
4.2.6. Cálculo de los parámetros $L_{kd}$ y $R_{kd}$ . . . . .	58
4.3. Cálculo de los parámetros en el eje de cuadratura . . . . .	59
4.3.1. Cálculo de la inductancia $L_{aq}$ . . . . .	59
4.3.2. Estimación de las corrientes $I_{kq}$ y $I_g$ . . . . .	59
4.3.3. Estimación de $V_{aq}$ . . . . .	60
4.3.4. Cálculo de los parámetros $L_g$ , $L_{kq}$ , $R_g$ y $R_{kq}$ . . . . .	60
<b>5. Pruebas y análisis al software implementado</b>	<b>63</b>
5.1. Introducción . . . . .	63
5.2. Estudio de caso tipo . . . . .	64
5.2.1. Análisis de los resultados de la estimación . . . . .	64
5.2.2. Índice de error de las señales en el tiempo . . . . .	69
5.3. Estudio del nivel de perturbación del sistema . . . . .	69
5.3.1. Descripción de la prueba . . . . .	70
5.4. Análisis de la metodología respecto a la frecuencia de muestreo . . . . .	72
5.5. Sensibilidad de la metodología respecto a $R_a$ y $L_l$ . . . . .	84
5.5.1. Análisis matemático de la influencia de $R_a$ y $L_l$ . . . . .	85
5.5.2. Descripción del proceso de análisis . . . . .	85
5.5.3. Método alternativo para estimar $R_a$ . . . . .	87

<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>11</b>
5.6. Influencia del ruido en el proceso de estimación . . . . .	94
5.6.1. Influencia del ruido blanco . . . . .	94
5.6.2. Influencia del ruido coloreado . . . . .	95
5.7. Análisis del sistema de prefiltrado de las señales . . . . .	103
5.8. Comparación de resultados de la metodología y un método conven- cional . . . . .	103
5.8.1. Determinación de los parámetros de eje directo . . . . .	106
5.8.2. Determinación de los parámetros del eje de cuadratura . . . . .	109
5.8.3. Comparación de los resultados . . . . .	109
<b>6. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros</b>	<b>113</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	113
6.2. Recomendaciones . . . . .	116
6.3. Trabajos futuros . . . . .	117
<b>A. Análisis de dos métodos de extrapolación</b>	<b>125</b>
A.1. Sistema en ecuaciones en diferencias mediante la regla trapezoidal . . . . .	125
A.2. Comparación de las respuestas del sistema para los dos métodos de solución . . . . .	126
A.3. Descripción del método Runge-Kuta . . . . .	127
<b>B. Análisis del método para estimar <math>R_{g_f}</math>, <math>L_{g_f}</math>, <math>R_{kq}</math>, <math>L_{kq}</math></b>	<b>131</b>
B.1. Descripción del método analítico . . . . .	131
B.2. Resultados de comparación de los métodos . . . . .	133
<b>C. Estudio de señales de ruido</b>	<b>135</b>
C.1. Ruido aditivo . . . . .	135
C.2. Cuantificación del ruido en las señales de entrada . . . . .	135
C.3. Analisis de señales de ruido . . . . .	140

---

C.3.1. El ruido blanco . . . . .	140
C.3.2. Ruido compuesto por funciones cosenoidales . . . . .	140
C.3.3. Ruido compuesto por funciones senoidales . . . . .	143
C.3.4. Ruido coseno con fase de valor aleatorio . . . . .	145
C.3.5. Ruido rojo . . . . .	149
C.3.6. Ruido rosado . . . . .	149
C.3.7. Ruido marron . . . . .	151
C.3.8. Ruido azul . . . . .	151
C.3.9. Ruido violeta o purpura . . . . .	155
<b>D. Prefiltrado de las señales de entrada</b>	<b>161</b>
D.1. Descripción del filtro Kalman . . . . .	161
D.2. Modelo de estimación de las señales . . . . .	162
<b>E. Manual de usuario</b>	<b>165</b>
E.1. Introduccion . . . . .	165
E.2. Instalación . . . . .	165
E.2.1. Requerimientos . . . . .	165
E.2.2. Procedimiento de instalación . . . . .	166
E.3. Ejecución . . . . .	166
E.4. Buscar . . . . .	169
E.5. Ejecutar . . . . .	169
E.6. Resultados . . . . .	173
E.7. Comparar . . . . .	174
<b>F. Descripción del equipo EGM</b>	<b>177</b>
F.1. Introducción . . . . .	177
F.2. Descripción del equipo . . . . .	177

---

F.2.1.	Tarjeta de adquisición de datos . . . . .	178
F.2.2.	Sistema transductor de señales de tensión . . . . .	178
F.2.3.	Sistema transductor de señales de corriente . . . . .	181
F.2.4.	Sistema transductor de velocidad angular . . . . .	181
F.3.	Características del equipo EGM . . . . .	182
<b>G.</b>	<b>Estimación de una máquina del laboratorio</b>	<b>187</b>
G.1.	Introducción . . . . .	187
G.2.	Pruebas preliminares . . . . .	188
G.2.1.	Calibración y patronamiento del equipo . . . . .	188
G.2.2.	Prueba de vacío . . . . .	188
G.2.3.	Prueba de corto . . . . .	188
G.2.4.	Resistencia de armadura e inductancia de dispersión . . . . .	189
G.3.	Estimación de los parámetros . . . . .	191
G.4.	Validación de los modelos . . . . .	191



# Índice de figuras

2.1.	Señal envolvente de la corriente de cortocircuito. . . . .	31
2.2.	Perfil de decaimiento de la tensión en el eje directo. . . . .	32
2.3.	Perfil de decaimiento de la tensión en el eje de cuadratura. . . . .	33
2.4.	Pruebas D.C. de decremento. . . . .	34
2.5.	Prueba SSFR: medida de $Z_d(s) = \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_d(s)}$ y $Z_q(s) = \frac{\Delta e_q(s)}{\Delta i_q(s)}$ . . . . .	36
2.6.	Prueba SSFR: medida de $sG(s) = \frac{\Delta i_{fd}}{\Delta i_d}$ y $sG(s) = \frac{\Delta i_{fd}}{\Delta i_q}$ . . . . .	36
2.7.	Prueba SSFR: medida de $G_{fdd} = \frac{\Delta e_{fd}}{\Delta i_d}$ y $G_{fdq} = \frac{\Delta e_{fd}}{\Delta i_d}$ . . . . .	36
2.8.	Prueba SSFR: medida $G_{fdd}(s) \frac{\Delta v_d}{\Delta v_{fd}}$ y $G_{fdq}(s) \frac{\Delta v_q}{\Delta v_{fd}}$ . . . . .	37
3.1.	Vista de perfil de la máquina síncrona. . . . .	42
3.2.	Representación de la máquina síncrona. . . . .	44
3.3.	Variación de la permeancia con la rotación de la máquina . . . . .	45
3.4.	Modelo circuital de segundo orden de la máquina síncrona. . . . .	47
3.5.	Modelo circuital de tercer orden de la máquina síncrona. . . . .	49
5.1.	Diagrama del sistema tipo utilizado en las pruebas en ATP. . . . .	64
5.2.	Comparación de las señales original y estimada de $I_d$ . . . . .	66
5.3.	Comparación de las señales original y estimada de $I_q$ . . . . .	66
5.4.	Comparación de las señales original y estimada de $I_f$ . . . . .	67
5.5.	Comparación de las señales original y estimada de $I_g$ . . . . .	67
5.6.	Comparación de las señales original y estimada de $I_{kd}$ . . . . .	68

5.7. Comparación de las señales original y estimada de $I_{kq}$ . . . . .	68
5.8. Error relativo de $L_d$ y $L_{ad}$ al variar el nivel de perturbación. . . . .	73
5.9. Error relativo de $L_q$ y $L_{aq}$ al variar el nivel de perturbación. . . . .	73
5.10. Error relativo de $L_f$ y $L_g$ al variar el nivel de perturbación. . . . .	74
5.11. Error relativo de $L_{kd}$ y $L_{kq}$ al variar el nivel de perturbación. . . . .	74
5.12. Error relativo de $R_f$ al variar el nivel de perturbación. . . . .	75
5.13. Error relativo de $R_{kd}$ al variar el nivel de perturbación. . . . .	75
5.14. Error relativo de $R_g$ al variar el nivel de perturbación. . . . .	76
5.15. Error relativo de $R_{kq}$ al variar el nivel de perturbación. . . . .	76
5.16. Corriente en los devanados de amortiguamiento del eje de cuadratura. . . . .	77
5.17. Tensión en los devanados de amortiguamiento del eje de cuadratura. . . . .	77
5.18. Error porcentual de la inductancia propia de eje directo al variar el paso de simulación. . . . .	78
5.19. Error porcentual de la inductancia propia de eje de cuadratura al variar el paso de simulación. . . . .	79
5.20. Error porcentual de la inductancia mutua de eje directo al variar el paso de simulación. . . . .	79
5.21. Error porcentual de la inductancia mutua del eje de cuadratura al variar el paso de simulación. . . . .	80
5.22. Error porcentual de la inductancia de campo al variar el paso de simulación. . . . .	80
5.23. Error porcentual de la inductancia del 1er devanado de amortiguamiento del eje de cuadratura al variar el paso de simulación. . . . .	81
5.24. Error porcentual de la inductancia del devanado de amortiguamiento del eje directo al variar el paso de simulación. . . . .	81
5.25. Error porcentual de la inductancia del 2do devanado de amortiguamiento del eje de cuadratura al variar el paso de simulación. . . . .	82
5.26. Error porcentual de la resistencia de campo al variar el paso de simulación. . . . .	82

5.27. Error porcentual de la resistencia del 1er devanado de amortiguamiento del eje de cuadratura al variar el paso de simulación. . . . .	83
5.28. Error porcentual de la resistencia del devanado de amortiguamiento de directo al variar el paso de simulación. . . . .	83
5.29. Error porcentual de la resistencia del 2do devanado de amortiguamiento de eje de cuadratura al variar el paso de simulación. . . . .	84
5.30. Error relativo de $L_d$ y $L_{ad}$ al variar $R_a$ . . . . .	87
5.31. Error relativo de $L_q$ , $L_{aq}$ , $L_f$ , $L_g$ , $L_{kd}$ y $L_{kq}$ al variar $R_a$ . . . . .	88
5.32. Error relativo de $R_f$ , $R_{kd}$ y $R_{kq}$ al variar $R_a$ . . . . .	88
5.33. Error relativo de $R_g$ al variar $R_a$ . . . . .	89
5.34. Error relativo de $L_d$ , $L_{ad}$ , $L_q$ y $L_{aq}$ al variar $L_l$ . . . . .	89
5.35. Error relativo de $L_f$ , $L_g$ , $L_{kd}$ y $L_{kq}$ al variar $L_l$ . . . . .	90
5.36. Error relativo de $R_f$ , $R_{kd}$ y $R_{kq}$ al variar $L_l$ . . . . .	90
5.37. Error relativo de $R_g$ al variar $L_l$ . . . . .	91
5.38. Índice de error de $I_d$ al variar $R_a$ . . . . .	91
5.39. Índice de error de $I_q$ al variar $R_a$ . . . . .	92
5.40. Índice de error de $I_d$ al variar $L_l$ . . . . .	92
5.41. Índice de error de $I_q$ al variar $L_l$ . . . . .	93
5.42. Corriente de eje directo mezclada con ruido blanco. . . . .	95
5.43. Corriente de eje de cuadratura mezclada con ruido blanco. . . . .	96
5.44. Corriente de campo mezclada con ruido blanco. . . . .	96
5.45. Corriente de eje directo mezclado con ruido coloreado. . . . .	99
5.46. Corriente de eje de cuadratura mezclado con ruido coloreado. . . . .	100
5.47. Corriente de campo mezclado con ruido coloreado. . . . .	100
5.48. Corriente de eje directo mezclada con ruido blanco. . . . .	104
5.49. Corriente de eje directo filtrada mediante el filtrado Kalman. . . . .	104
5.50. Corriente de eje de cuadratura mezclada con ruido blanco. . . . .	105

5.51. Corriente de eje de cuadratura mezclada con ruido blanco. . . . .	105
5.52. Tensión en terminales durante la salida de la máquina del sistema generando solo potencia reactiva. . . . .	107
5.53. Señal de tensión exponencial transitoria. . . . .	108
5.54. Parte subtransitoria de la señal de tensión. . . . .	108
5.55. Tensión de eje de cuadratura durante la salida de la máquina del sis- tema. . . . .	109
5.56. Parte subtransitoria de la señal de tensión en el eje de cuadratura. . . .	110
5.57. Parte transitoria de la señal de tensión en el eje de cuadratura. . . . .	110
A.1. Respuesta del sistema mediante el método de la regla trapezoidal. . . .	127
A.2. Respuesta del sistema mediante el método Runge-Kuta . . . . .	128
A.3. Comparación de los flujos magnéticos mediante el método Runge-Kuta.	130
A.4. Comparación de los flujos magnéticos mediante el método Runge-Kuta.	130
C.1. Señal triangular unitaria sin contaminación de ruido. . . . .	136
C.2. Señal contaminada con un SNR =500 de ruido blanco. . . . .	137
C.3. Señal contaminada con un SNR =200 de ruido blanco. . . . .	137
C.4. Señal contaminada con un SNR =100 de ruido blanco. . . . .	138
C.5. Señal contaminada con un SNR =50 de ruido blanco. . . . .	138
C.6. Señal contaminada con un SNR =20 de ruido blanco. . . . .	139
C.7. Señal contaminada con un SNR =10 de ruido blanco. . . . .	139
C.8. Señal de ruido blanco generada a través del tiempo. . . . .	141
C.9. Espectro de densidad de potencia de frecuencia de una señal de ruido blanco. . . . .	142
C.10. Señal de ruido cosenoidal generado a través del tiempo. . . . .	143
C.11. Espectro de densidad de potencia de frecuencia de una señal de ruido cosenoidal. . . . .	144
C.12. Señal de ruido senoidal generado a través del tiempo. . . . .	145

C.13. Espectro de densidad de potencia de frecuencia de una señal de ruido senoidal. . . . .	146
C.14. Señal de ruido coseno con fase aleatoria generado a través del tiempo. . . . .	147
C.15. Espectro de densidad de potencia de frecuencia de una señal de ruido coseno con fase aleatoria. . . . .	148
C.16. Señal de ruido rojo a través del tiempo. . . . .	149
C.17. Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido rojo. . . . .	150
C.18. Señal de ruido rosado a través del tiempo. . . . .	151
C.19. Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido rosado. . . . .	152
C.20. Señal de ruido marrón estándar a través del tiempo. . . . .	153
C.21. Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido marrón. . . . .	154
C.22. Señal de ruido azul estándar a través del tiempo. . . . .	155
C.23. Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido azul estándar. . . . .	156
C.24. Señal de ruido azul opcional estándar a través del tiempo. . . . .	157
C.25. Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido azul opcional. . . . .	158
C.26. Señal de ruido violeta estándar a través del tiempo. . . . .	159
C.27. Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido violeta. . . . .	160
D.1. Diagrama funcional del filtro Kalman. . . . .	162
D.2. Diagrama de flujo del algoritmo. . . . .	164
E.1. Ventana principal de la herramienta EGM. . . . .	167
E.2. Ventana parámetros. . . . .	169
E.3. Ventana de selección de los archivos de trabajo. . . . .	170
E.4. Ventana Ejecutar. . . . .	171
E.5. Ventana de resultados. . . . .	173
E.6. Ventana de comparación de los datos estimados y los datos originales. . . . .	174
E.7. Resultado de la comparación de la señal de eje directo. . . . .	175

F.1. Sistema de colección de las señales analógicas eléctricas. . . . .	179
F.2. Sistema de transmisión de señales analógicas eléctricas. . . . .	179
F.3. Tarjeta de adquisición de datos. . . . .	180
F.4. Sistema de transductor de señales de tensión. . . . .	180
F.5. Sistema de transductor de señales de corriente. . . . .	181
F.6. Sistema transductor de velocidad angular. . . . .	182
F.7. Medida del largo del equipo EGM. . . . .	183
F.8. Medida del ancho del equipo EGM. . . . .	183
F.9. Medida del alto del equipo EGM. . . . .	184
F.10. Equipo de medida EGM desplegado. . . . .	185
F.11. Equipo de medida EGM organizado y preparado para ser transportado.	185
F.12. Sistema de alimentación del equipo EGM. . . . .	186
G.1. Relación tensión en terminales y corriente de campo de la prueba de vacío. . . . .	189
G.2. Relación de la corriente de armadura y la corriente producto de la prueba de corto. . . . .	190
G.3. Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 2. . . . .	193
G.4. Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 2. . . . .	193
G.5. Comparación de las corrientes de fase para el modelo 2. . . . .	194
G.6. Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 3. . . . .	195
G.7. Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 3. . . . .	195
G.8. Comparación de las corrientes de fase para el modelo 3. . . . .	196
G.9. Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 4. . . . .	197
G.10. Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 4. . . . .	197
G.11. Comparación de las corrientes de fase para el modelo 4. . . . .	198
G.12. Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 5. . . . .	199
G.13. Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 5. . . . .	199

---

G.14.Comparación de las corrientes de fase para el modelo 5. . . . .	200
G.15.Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 6. . . . .	201
G.16.Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 6. . . . .	201
G.17.Comparación de las corrientes de fase para el modelo 6. . . . .	202
G.18.Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 7. . . . .	203
G.19.Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 7. . . . .	203
G.20.Comparación de las corrientes de fases para el modelo 7. . . . .	204
G.21.Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 8. . . . .	205
G.22.Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 8. . . . .	205
G.23.Comparación de las corrientes de fase para el modelo 8. . . . .	206



# Índice de cuadros

5.1. Datos característicos y estimados de la máquina síncrona. . . . .	65
5.2. Índices de error de las señales en el tiempo. . . . .	69
5.3. Parámetros estimados bajo diferentes niveles de ruido blanco. . . . .	97
5.4. Error relativo de los parámetros estimados bajo diferentes niveles de ruido blanco. . . . .	98
5.5. Parámetros estimados bajo diferentes niveles de ruido coloreado. . . . .	101
5.6. Error relativo de los parámetros estimados bajo diferentes niveles de ruido coloreado. . . . .	102
5.7. Datos nominales de la máquina. . . . .	106
5.8. Comparación entre los parámetros originales y los parámetros estimados . . . . .	111
B.1. Resultados de la prueba con $R_g = 2,00, L_g = 0,001, R_{kq} = 1,00, L_{kq} = 0,001$ . . . . .	133
B.2. Resultados de la prueba con $R_g = 1,00, L_g = 0,001, R_{kq} = 2,00, L_{kq} = 0,001$ . . . . .	134
B.3. Resultados de la prueba con $R_g = 20,00, L_g = 0,001, R_{kq} = 10,00, L_{kq} = 0,001$ . . . . .	134
B.4. Resultados de la prueba con $R_g = 20,00, L_g = 0,0001, R_{kq} = 10,00, L_{kq} = 0,0002$ . . . . .	134
B.5. Resultados de la prueba con $R_g = 0,10, L_g = 0,002, R_{kq} = 0,20, L_{kq} = 0,002$ . . . . .	134

C.1. Comparación entre el SNR y el NP. . . . .	140
G.1. Valores de resistencia de armadura. . . . .	190
G.2. Parámetros del modelo de la máquina síncrona de segundo orden. . .	191
G.3. Parámetros del modelo de la máquina en constantes de tiempo. . . . .	192

# Capítulo 1

## Introducción

Las simulaciones de los sistemas eléctricos juegan un papel importante en el desarrollo de la ciencia mundial. Este proceso ha permitido realizar grandes incursiones en el campo de la investigación. Actualmente los análisis de todos los sistemas eléctricos importantes son simulados para poder realizar cambios en la infraestructura, nuevos diseños o resolver problemas relacionados con la operación. Específicamente, en el área de Estabilidad y Control de Sistemas Eléctricos de Potencia, la totalidad de los estudios se realizan mediante simulaciones. Esto es debido a que este tipo de estudios requieren operaciones del sistema que pueden comprometer la continuidad del suministro de energía eléctrica.

Para realizar estas simulaciones se han requerido análisis de cada elemento del sistema eléctrico y modelarlo matemáticamente. Algunos elementos, mas importantes que otros, han tenido mayor protagonismo en el área académica, este es el caso de la máquina síncrona, el cual juega un papel básico en la operación estable e inestable del sistema eléctrico, incluso la respuesta natural del sistema se encuentra mayormente influenciado por la respuesta natural de la máquina.

Existen diferentes modelos matemáticos que representan las operaciones transitorias y estacionarias de la máquina. Por ejemplo, el modelo más conocido es el modelo implementado en la transformación de Park. Este modelo es mucho más sencillo que los modelos implementados en el dominio del tiempo, incluso es generalmente utilizado en diferentes herramientas de simulación de sistemas eléctricos de potencia. Las simulaciones se realizan en el tiempo y las señales de la operación de la máquina síncrona se transforman a las componentes de Park.

Para realizar las simulaciones es necesario contar con datos de las máquinas síncronas de los sistemas eléctricos, por lo que se han diseñado diferentes metodologías de estimación de parámetros con base a este modelo. Sin embargo, aún existen algunas dificultades que no se han resuelto completamente y que requieren investigaciones en esta área, para poder mejorar el proceso de adquisición de información de las máquinas actualmente en operación.

## 1.1. Planteamiento del problema

La simulación es un proceso que permite observar y registrar datos que en algunos casos son difíciles de obtener en un sistema real. Dado que se busca una elevada confiabilidad con los datos obtenidos, las simulaciones deben contar con componentes que representen muy bien las características del sistemas bajo diferentes condiciones. Este proceso se convierte en una opción cuando los costos de las maniobras requeridas para obtener una condición de operación son muy altos ó cuando las consecuencias que pueden ocurrir al realizar dichas maniobras comprometen la confiabilidad del sistema.

Para el caso particular de interés, modelado de la máquina síncrona, existen numerosos estudios en los que es necesario contar con un modelo y datos que representen las características transitorias y subtransitorias reales de la máquina. Dentro de estos estudios se tiene: el análisis de nuevos diseños de la máquina ante diferentes condiciones, determinación de los puntos de operación que optimizan los sistemas de potencia, mejoramiento de la capacidad y calidad de generación de la energía eléctrica, implementación de nuevos controles para los sistemas de excitación y sistemas primomotores de generación y la razón primordial de este proyecto, el analisis de la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia.

Resumiendo, el modelo matemático generalizado de la máquina síncrona cumple los requerimientos necesarios para los estudios mencionados. Los simuladores que se encuentran actualmente en el mercado cuenta con paquetes matemáticos de solución de sistemas dinámicos y son capaces de realizar análisis transitorios. Entonces, el problema se centra en contar con datos (parámetros) reales de la máquina síncrona para los diferentes estdudios electricos como el caso del analisis de estabilidad de los sistemas electricos de potencia. Se han realizado proyectos de gran magnitud en los

cuales se han obtenido datos de máquinas reales. Sin embargo, este tipo de pruebas no se han aplicado a máquina que operen en la red eléctrica Colombiana.

## 1.2. Objetivos de la tesis

### 1.2.1. Objetivo general

Diseñar e implementar una herramienta software para la estimación de parámetros de generadores sincrónicos a partir de datos tomados de simulaciones o pruebas a generadores sincrónicos reales.

### 1.2.2. Objetivos específicos

El objetivo general implica el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar una metodología para la estimación de parámetros de la máquina síncrona bajo condiciones de carga.
- Implementar el prototipo de una herramienta software que permita la estimación de los parámetros de la máquina síncrona a partir de datos tomados de simulaciones o pruebas realizadas en laboratorio.
- Especificar el sistema de adquisición de señales eléctricas requerido y adecuado para la toma de datos de las pruebas realizadas en un ambiente industrial.
- Realizar pruebas y ajustes al prototipo.
- Analizar los resultados obtenidos de las pruebas mediante simulaciones realizadas a máquinas síncronas bajo diferentes condiciones de carga o perturbaciones transitorias y bajo la influencia de ruido en las señales eléctricas.
- Elaborar un manual de usuario y una metodología para realizar pruebas que permita utilizar la herramienta.

### 1.3. Organización de la presentación

Este documento presenta una metodología alterna para estimar los parámetros de la máquina síncrona a partir de los datos de operación normal. La metodología toma señales eléctricas de la máquina en vacío, estado estable y en estado transitorio. Para obtener las características transitorias es necesario realizar una perturbación, la cual se desarrolla al variar la carga del sistema eléctrico. Además de las medidas eléctricas, la metodología requiere de los datos de la resistencia de armadura y la inductancia de dispersión. Esta metodología tiene ciertas ventajas sobre las demás, las pruebas son sencillas de realizar y no requieren hacerse en un laboratorio especializado. El documento presenta en el capítulo dos el modelo de la máquina síncrona, describe su constitución física y el modelo en el tiempo. Debido a que no es posible utilizar el modelo en el tiempo, se utiliza la transformación de Park y se presentan los modelos de segundo y tercer orden en componentes  $dq0$ .

El capítulo tres describe la metodología diseñada, el documento explica todo el proceso de estimación desde los parámetros de estado estable, hasta los parámetros de los devanados de amortiguamiento. Algunas partes de la metodología son extendidas en los apéndices del documento. Una vez sea explícita la metodología, se presenta en el capítulo cuatro las pruebas realizadas a máquinas síncronas a partir de simulaciones en ATP y pruebas realizadas en laboratorio. En estas pruebas se analizan los efectos del nivel de variación de carga en los resultados de la estimación, los efectos de error en las medidas de los valores de los parámetros de entrada como  $R_a$  o  $L_l$ . También se analiza el efecto de ruido en las señales eléctricas de entrada en los resultados. El documento finaliza con las conclusiones y los aportes realizados en esta tesis. Además, se sugieren líneas de trabajo para futuros desarrollos, de forma complementaria a los capítulos anteriormente mencionado se presentan los apéndices, los cuales incluyen las justificaciones pertinentes a la estructura de la metodología, una investigación realizada a los diferentes tipos de ruido y su cuantificación, y el sistema de prefiltrado implementado para mitigar los efectos del ruido en los resultados.

# Capítulo 2

## Alternativas para estimar parámetros de máquinas síncronas

### 2.1. Prueba de vacío y prueba de cortocircuito

La estimación de parámetros ha evolucionado de acuerdo a los cambios que ha tenido el modelo de la máquina síncrona en los estudios de los sistemas de potencia. Estos estudios se han hecho mas complejos de acuerdo a como se desarrollan técnicas de control, nuevas tecnologías en la construcción de máquinas y el crecimiento de los sistemas de potencia. Los primeros métodos utilizados para la estimación de parámetros fue la prueba de vacío y de corto circuito. La prueba de vacío permite determinar la relación estable entre la corriente del devanado de campo y la tensión en terminales, esta prueba se realiza dejando la máquina sin carga y a velocidad nominal, se varía la corriente de campo y se toma el valor de tensión en terminales. La prueba de corto-circuito se realiza cortocircuitando los terminales de los devanados de armadura y aplicando una corriente de campo tal que permita fluir la corriente nominal por los devanados de armadura. Estas dos pruebas, tal y como se mencionan solo determinan el modelo estable de la máquina, lo que impide realizar análisis transitorios.

## 2.2. Cortocircuito simétrico repentino

Esta prueba se realiza operando inicialmente la máquina síncrona sin carga a velocidad nominal, se aplica una corriente de campo para poder energizar el núcleo magnético e inducir una tensión pequeña en los terminales del estator. Después, se cortocircuitan los terminales del estator durante un lapso de tiempo, luego se retira el corto y se deja operando la máquina sin carga y a velocidad nominal. Durante todo este proceso, las corrientes de los devanados de armadura y el devanado de campo son adquiridas mediante un osciloscopio. A partir de estas señales se determinan los parámetros transitorios.

Durante la falla, en los primeros ciclos las corrientes decaen rápidamente, este periodo es denominado periodo subtransitorio, se inicia el periodo transitorio, el cual decae más lento que el anterior y finaliza cuando la máquina alcanza el estado estable. La constante de tiempo  $T_d''$  es el tiempo de duración del periodo subtransitorio y la constante  $T_d'$  es el tiempo de duración del periodo transitorio. Durante la falla no se modifica la corriente de campo, por lo que la tensión en los devanados es siempre constante. En cada uno de los tres periodos la corriente de falla se limita por la reactancia subtransitoria, transitoria y estacionaria respectivamente, los cuales pueden ser separados en los ejes directo y de cuadratura.

Para determinar estas reactancias es necesario delinear y extraer la señal envolvente de la corriente de cortocircuito de la fase A. Esta señal se define como la componente exponencial de la señal de corto, la cual se presenta en la figura 2.1.  $I_{ss}$  es la corriente de estado estable,  $\Delta I_s'$  es la diferencia entre la corriente de estado estable y la señal de corriente durante el proceso transitorio,  $\Delta I_s''$  corresponde al proceso subtransitorio. Por tanto, la componente exponencial de la señal de cortocircuito se puede dividir en tres componentes. Suponiendo una amplitud de tensión constante la reactancia subtransitoria se determina como  $U/OB$ , la reactancia transitoria se determina como  $U/OA$  y la reactancia estacionaria se determina como  $U/I_{ss}$ . A partir de estos valores se determinan las inductancias de la máquina síncrona, realizando un análisis del modelo subtransitorio durante la prueba de corto-circuito repentino.

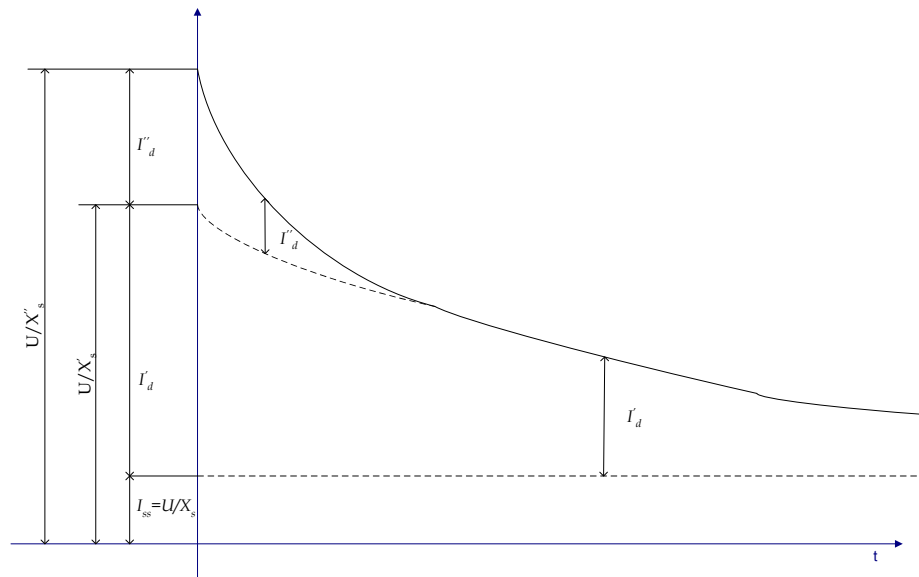


Figura 2.1: Señal envolvente de la corriente de cortocircuito.

### 2.3. Prueba de expulsión de carga

La prueba de corto-circuito repentino puede traer consecuencias graves a la máquina, es por esto que se continuó buscando diferentes alternativas para determinar los parámetros de la máquina síncrona. Un método alternativo es la prueba de expulsión de carga (*Load rejection test*), esta prueba es muy sencilla y no requiere ningún tipo de cortocircuito, lo cual asegura la integridad operacional de la máquina. Para realizar esta prueba, la máquina se conecta a una fuente o terminales de la red de interconexión asegurando que no genere potencia activa, generando solo potencia reactiva. La máquina se desconecta del sistema y se toman las señales de tensión y corriente de campo en el tiempo. Una vez se desconecta la máquina del sistema la corriente de campo se mantiene constante [Shackshaft u. Porary 1976], [Shackshaft u. Porary 1977].

La magnitud de la tensión en terminales decae rápidamente, este decaimiento sigue las características de los periodos subtransitorio, transitorio y estacionario. Por lo que las reactancias de eje directo se determinan por medio de las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3. El valor  $I_{sd0}$  se define como la corriente eficaz de armadura en el instante en que se desconecta la máquina del sistema, las constantes  $A$ ,  $B$  y  $C$  se definen en la figura 2.2.

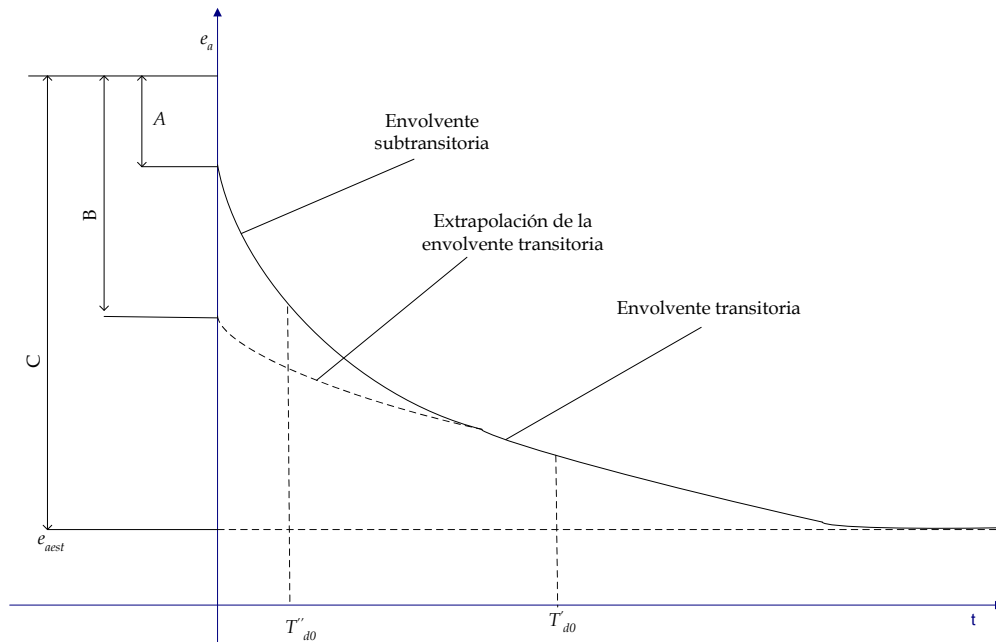


Figura 2.2: Perfil de decaimiento de la tensión en el eje directo.

$$X_d = \frac{C}{I_{sd0}} \quad (2.1)$$

$$X'_d = \frac{B}{I_{sd0}} \quad (2.2)$$

$$X''_d = \frac{A}{I_{sd0}} \quad (2.3)$$

Para determinar las constantes del eje de cuadratura originalmente se utilizó un valor de carga tal que hace que la tensión del eje directo sea cero, es decir solo exista tensión en el eje de cuadratura<sup>1</sup>. Sin embargo, no es necesario realizar ningún tipo de condición de operación en la máquina para determinar los parámetros, simplemente realizar el proceso de desconexión cuando la máquina genera cualquier tipo de potencia y determinar la de eje directo y la tensión de eje de cuadratura. Así, para determinar las reactancias del eje de cuadratura se conecta la máquina a la red eléctrica, dejando que la máquina genere potencia activa y reactiva de forma arbitraria.

<sup>1</sup>Para el caso del eje directo, se conectó una carga puramente reactiva, lo que hace que el eje de cuadratura sea cero.

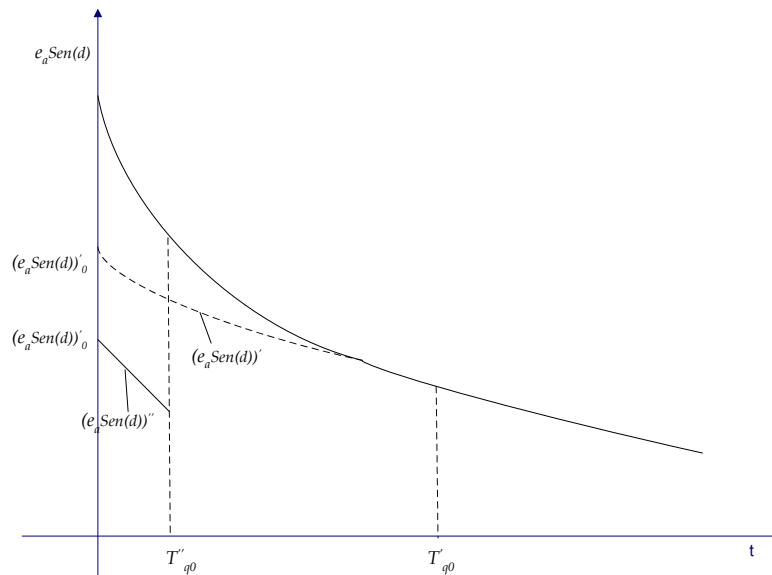


Figura 2.3: Perfil de decaimiento de la tensión en el eje de cuadratura.

Se realiza el mismo proceso que en el caso anterior, pero en este caso se determinaran los parámetros con base en las variables del eje de cuadratura. La señal de tensión del eje de cuadratura se presenta en la figura 2.3. Las reluctancias se determinan mediante las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6.

$$X_q = e_a \sin \delta / I_{sq0} \quad (2.4)$$

$$X'_q = X_q - (e_a \sin \delta)'_0 / I_{sq0} \quad (2.5)$$

$$X''_q = X_q - (e_a \sin \delta)''_0 / I_{sq0} \quad (2.6)$$

## 2.4. Prueba D.C. de decremento

Otro método alternativo a las pruebas de corto-circuito es la prueba D.C de decremento. Los parámetros de la máquina se determinan mediante un proceso que inicia energizando dos terminales de la armadura mediante una fuente de corriente continua, mientras la máquina se encuentra estática. El devanado de campo debe estar

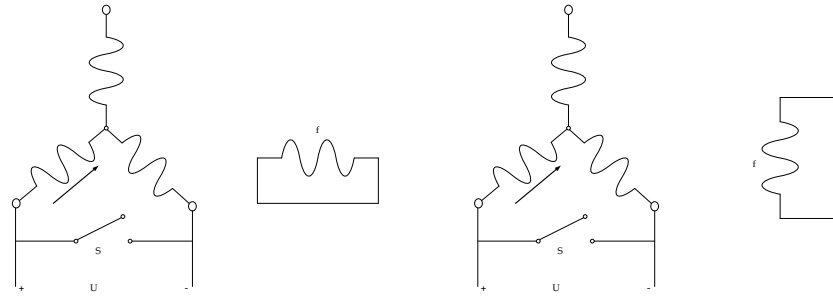


Figura 2.4: Pruebas D.C. de decremento.

cortocircuitado y el rotor debe permanecer sin movimiento, el esquema de la prueba se muestra en la figura 2.4. Después de un periodo de tiempo se cortocircuitan los terminales energizados con la fuente D.C. Una vez se cortocircuitan los terminales de la máquina, se realiza la adquisición de la señal de corriente de armadura y de la señal de corriente de campo. Este proceso se realiza dos veces, una con el rotor alineado con el eje directo y la otra con el rotor alineado con el eje de cuadratura, a partir de cada prueba se determinan las constantes en cada eje del modelo  $dq0$ .

Una vez se cortocircuitan los terminales, las corrientes de armadura y de campo decaen de acuerdo a las características subtransitorias, transitorias y estacionarias de la máquina. Estas señales se representan como la combinación de señales exponenciales, el número de componentes exponenciales utilizadas dependen del modelo que se utiliza. Para el caso del modelo de orden dos, el cual cuenta con un devanado de amortiguamiento en el eje directo y dos en el eje de cuadratura, se utilizan tres componentes exponenciales. Las componentes exponenciales de la corriente del estator obtenidas con la prueba alineando el rotor al eje directo y con la prueba alineando el rotor al eje de cuadratura, se presenta en las ecuaciones 2.7 y 2.8 respectivamente. A partir de las amplitudes y constantes de tiempo de las componentes exponenciales se determinan los parámetros de la máquina.

$$i_s(t) = \sum A_i e^{-t/T_i} = A_1 e^{-t/T_1} + A_2 e^{-t/T_2} + A_3 e^{-t/T_3} \quad (2.7)$$

$$i_s(t) = \sum A_i e^{-t/T'_i} = A_1 e^{-t/T'_1} + A_2 e^{-t/T'_2} + A_3 e^{-t/T'_3} \quad (2.8)$$

## 2.5. Prueba de respuesta en frecuencia

A partir de 1980 el centro de investigación "Ontario Hydro Research, Canadá" realizó análisis a partir de la aplicación de métodos de respuesta frecuencia como "Standstill frequency-response (SSFR)", "On-line frequency response (OLFR)" [Coultes u. Watson 1981], [de Mello u. Ribeiro 1977], [de Mello u. Hannett 1981], [Dandeno u. a. 1981b]. Estos métodos se basaron en estimar los parámetros a partir del ajuste de las curvas de respuesta en frecuencia [Dandeno u. Porary 1981]. La prueba SSFR se lleva a cabo con la unidad en reposo y desconectada del sistema. Esta prueba se divide en dos grupos de pruebas, el primer grupo de pruebas se realiza con el rotor alineado al eje directo, el segundo grupo con el rotor alineado al eje de cuadratura. El estator se energiza con una fuente de  $(\pm 60 A, \pm 20 V)$  y una frecuencia entre  $1 mHz$  y  $1 Hz$ . Los esquemas de las pruebas se presentan en las figuras 2.5, 2.6, 2.7, y 2.8. Cada prueba se aplica alineando el rotor a cada eje, de estas pruebas se obtiene señales en el dominio de la frecuencia. A partir de las señales se determinan las respectivas funciones de transferencia, mediante métodos de ajustes de curva. Las funciones de transferencia permiten determinar los parámetros de la máquina síncrona, las ecuaciones 2.9 y 2.10 representan las relaciones entre los parámetros y las constantes de la función de transferencia para el caso del eje directo.

$$L_d(s) = L_d \frac{(1 + T'_d)(1 + T''_d)}{(1 + T'_{d0})(1 + T''_{d0})} \quad (2.9)$$

$$G(s) = G_0 \frac{1 + sT_{kd}}{(1 + T'_{d0})(1 + T''_{d0})} \quad (2.10)$$

La prueba OLFR es la más cercana a la operación real de la máquina, ya que se realiza bajo las condiciones normales de operación. Para esta prueba la máquina se debe operar preferiblemente por encima de la impedancia fundamental del sistema. La excitación se modula mediante una señal senoidal o de ruido aleatorio. Se obtienen las respuesta en frecuencia en los dos ejes y se determinan los parámetros de la máquina, ajustando las curvas de la prueba. A diferencia de la prueba SSFR, esta prueba permite una señal de respuesta en frecuencias satisfactoria en los dos ejes a alrededor de las banda media, lo que permite incluir los efectos rotacionales. La desventaja de esta prueba es que se requiere realizar la prueba con la unidad conectada al sistema, por lo que aplicar una señal de ruido en la referencia de excitación puede

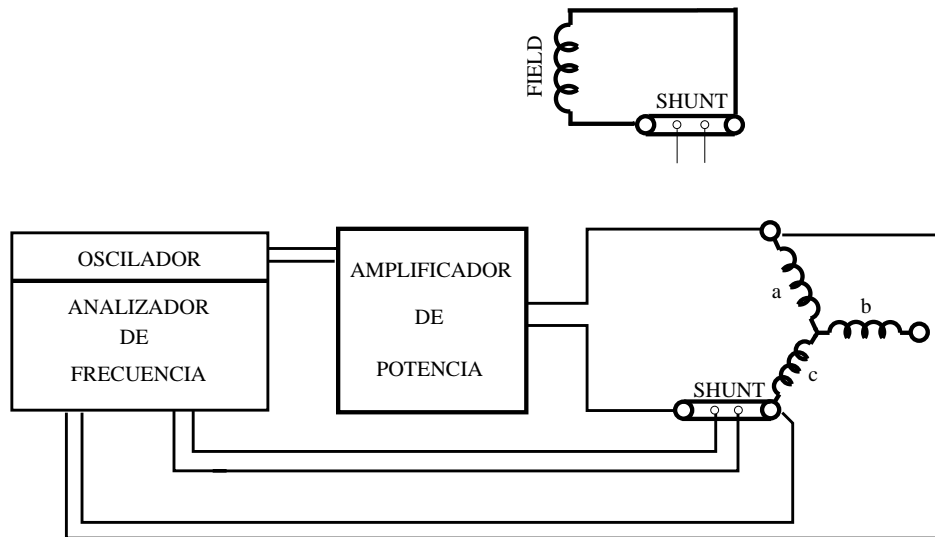


Figura 2.5: Prueba SSFR: medida de  $Z_d(s) = \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_d(s)}$  y  $Z_q(s) = \frac{\Delta e_q(s)}{\Delta i_q(s)}$ .

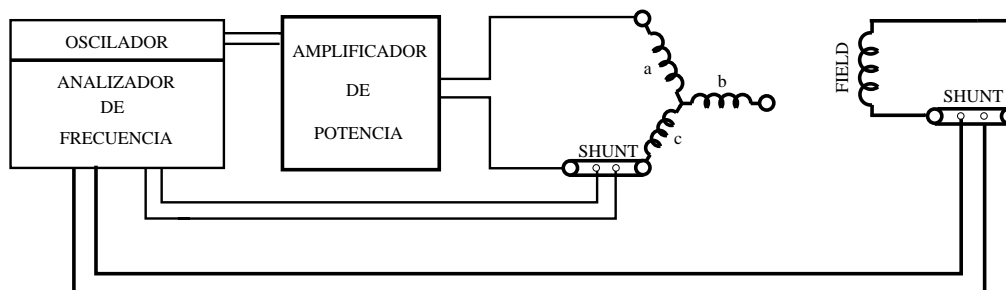


Figura 2.6: Prueba SSFR: medida de  $sG(s) = \frac{\Delta i_{fd}}{\Delta i_d}$  y  $sG(s) = \frac{\Delta i_{fd}}{\Delta i_q}$ .

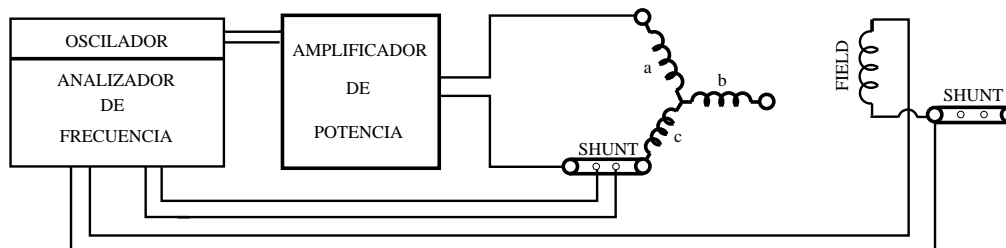


Figura 2.7: Prueba SSFR: medida de  $G_{fdd} = \frac{\Delta e_{fd}}{\Delta i_d}$  y  $G_{fdq} = \frac{\Delta e_{fd}}{\Delta i_q}$ .

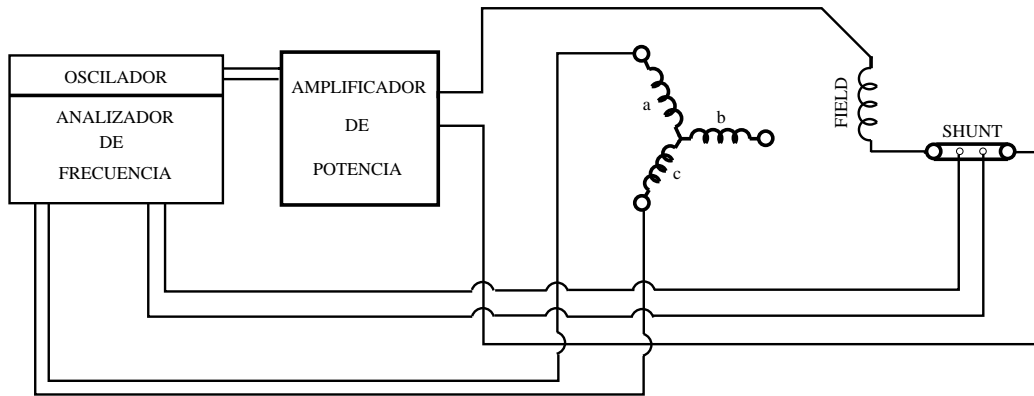


Figura 2.8: Prueba SSFR: medida  $G_{fdd}(s) \frac{\Delta v_d}{\Delta v_{fd}}$  y  $G_{fdq}(s) \frac{\Delta v_q}{\Delta v_{fd}}$ .

traer problemas de estabilidad transitoria en el sistema. Además, es necesario adecuar una carga que no permita una resonancia del sistema en el orden de frecuencias en las que se realiza la prueba.

Los aportes realizados por Hydroquebec fueron validados y presentados ante el IEEE en 1981 [Dandeno u. a. 1981a]. Los resultados de esta investigación fueron satisfactorios, por lo que son métodos confiables. Sin embargo, para realizar este de prueba es necesario de un laboratorio especializado, con fuentes variadoras de frecuencia de gran potencia. La última versión del estándar IEEE 115-1995 [IEEE 2002b] incluye la estimación de parámetros mediante la respuesta transitoria y menciona las conclusiones y recomendaciones realizadas por este centro.

## 2.6. Estimación de parámetros on-line

Desde 1987 los investigadores de la Universidad de Tsinghua, en China, investigaron la forma de resolver tres problemas importantes relacionados con el método de estimación de parámetros a partir de señales en el tiempo. El primer problema se relacionó con el dilema de la forma apropiada para definir las señales de entrada. Existe un grupo de señales que al ser manipuladas pueden perturbar dramáticamente el sistema y hacen que la operación normal del generador falle. Existen otras señales a partir de las cuales no es posible lograr obtener todas las características internas del generador. El segundo problema fue como seleccionar el modelo adecuado para una plantificación efectiva. El problema final fue como verificar la efectividad de los parámetros estimados en un sistema de gran escala. Su objetivo principal fue obtener

un método efectivo y realizar la evaluación de forma experimental tomando medidas a sistemas de gran escala. Los resultados más relevantes <sup>2</sup> se obtuvieron mediante el método on-line, se utilizó el cambio repentino en la referencia del control del sistema de excitación del generador cuando se este opera a condiciones normales, con el modelo no-lineal de segundo orden. El método se aplicó en tres turbogeneradores de 100 MVA, 200 MVA y 300 MVA y; en tres hidrogeneradores de 50 MVA, 75 MVA y 300 MVA.

La universidad de Ohio también realizó investigaciones en este tema<sup>3</sup>, enfocándose en el estudio de los efectos del ruido en los datos de entrada al estimar los parámetros mediante métodos de respuesta en frecuencia y respuesta en el dominio del tiempo. Para el caso de las pruebas de respuesta en frecuencia, se estudió mediante la simulación del modelo SSFR3 presentado por "Ontario Hydro Research, Canadá" en uno de sus análisis[Dandeno u. Porary 1981]. A cada señal tomada se introdujo una distribución de ruido conocido. Las múltiples soluciones obtenidas difieren entre si hasta en un 42 %<sup>4</sup>. Sin embargo, el realizar una comparación de las señales en frecuencia de cada solución con las obtenidas del modelo original se obtuvo un error entre  $10^{-4} - 10^{-2}$ , por tanto se concluyó que el caso de respuesta en frecuencia es una buena aproximación a la máquina. Otro efecto analizado en el estudio para el caso de respuesta en frecuencia fue la incidencia de la magnitud del ruido en la estimación de los parámetros. Para este análisis se obtuvo que el nivel de la magnitud del ruido hace diferir los resultados estimados de los originales hasta en un 18%. Por último, se analizó la sensibilidad del generador con respecto al valor determinado de resistencia de armadura, la variación del valor de  $R_a$  en un 0,5% puede producir valores irreales[Keyhani u. Dayal 1989a].

Para el caso del estudio del ruido en el dominio del tiempo se realizaron estimaciones mediante el algoritmo "Maximum likelihood Estimator". Los datos de entrada se obtuvieron mediante la simulación de un modelo creado mediante pruebas tomadas en frecuencia del método SSFR. Las curvas obtenidas en el dominio de la frecuen-

---

<sup>2</sup>El profesor Zhengming Zhao es actualmente el director del departamento de Electrónica de Potencia y Control de la Universidad de China. Él realizó investigaciones en el área de estimación de parámetros desde 1993 hasta 1997 con la colaboración de investigadores de la Universidad del estado de Ohio.

<sup>3</sup>El Dr. Ali Keyhani, profesor asociado del departamento de ingeniería eléctrica en la Universidad del estado de Ohio realiza investigaciones en el área de control de sistemas de potencia, estimación de parámetros y detección de fallas en máquinas eléctricas, transformadores y variadores de velocidad.

<sup>4</sup>Este valor es particularmente, la mayor diferencia porcentual entre la multisoluciones para el caso de la inductancia de campo.

cia se ajustaron a las constantes transitorias, subtransitorias y hypertransitorias, después se aplicó un escalón unitario a las funciones de transferencias y se obtuvieron las señales de respuesta en el tiempo. A partir las señales en el tiempo se determinaron los parámetros mediante el algoritmo mencionado. El algoritmo "Maximum Likelihood Estimator" tiene la ventaja de calcular parámetros consistentes a partir de señales con ruido superpuesto [Keyhani u. Dayal 1989b]<sup>5</sup>. En las técnicas de estimación en el dominio del tiempo no se presenta el problema de múltiples estimaciones, pero en muchas ocasiones se presentan resultados que no tienen consistencia real como es el caso de resultados obtenidos mediante el algoritmo "Least Square estimator" los cuales, no son convergentes. Los resultados obtenidos del estudio concluyeron que los errores obtenidos usando la técnica descrita son del orden de  $10^{-4}$  %, lo que hace referencia a una técnica con una única estimación y resultados muy aproximados.

En 1999 los doctores H. Bora Karayaka, Ali Keyhani, Baj L. Agrawal y Douglas A. Selin diseñaron una metodología on-line para estimar los parámetros de la máquina síncrona. En esta metodología se inicia determinando los parámetros del circuito de armadura a partir de la técnica "Recursive maximum likelihood (RML)" mediante la operación de la máquina en estado estacionario. Después con base en estos parámetros se procede a determinar los parámetros del circuito de campo y de amortiguamiento mediante el modelo "Output Error Estimation (OEM)" [Karayaka u. a. 1998], [Karayaka u. a. 1999] utilizando el estado transitorio mediante una perturbación realizada al sistema. La metodología requiere además de las señales de la máquina síncrona, la resistencia de armadura y la inductancia de dispersión. Además, para transformar las corrientes de fase a componentes  $dq0$  se requiere del ángulo de carga. En el 2000 esta metodología se perfeccionó incluyendo redes neuronales para modelar las inductancias saturadas a partir de las operaciones normales del generador [Karayaka u. a. 2000]. La técnica presenta la cualidad de obtener parámetros para el campo y amortiguamientos válidas ante grandes perturbaciones en la excitación. Sin embargo, como los parámetros del circuito de armadura se determinan sin tener en cuenta los efectos de los demás circuitos, es necesario validar al final todo el modelo y realizar ciertos ajustes a estos valores, ya que algunos de los parámetros estimados tienen valores físicamente ilógicos.

---

<sup>5</sup>Hasta 1989 este algoritmo no se aplicó a modelos del área eléctrica, por tanto, las ventajas solo se habían analizó en otras áreas de la ingeniería.

Hasta el presente solo las universidades de Ohio y Arizona realizan investigaciones buscando mejorar la metodología para obtener los parámetros en tiempo real y obtener buenos resultados bajo condiciones de alto nivel de ruido. Actualmente, existe software para análisis de flujos de potencia y estabilidad que incluyen paquetes para la identificación de parámetros como es el caso de DIGSILENT. Sin embargo, solo realizan la implementación de metodologías convencionales. El Doctor Lennart Ljung diseñó para Mathworks la toolbox IDENT, este paquete matemático permite identificar los parámetros de modelos en general a partir de señales en el dominio de la frecuencia o del tiempo [Ljung 1999], [Linköpings 2006]. Existe una versión de libre uso que realiza las mismas tareas que la toolbox de MatLab, llamada HIDEN, este software se diseñó por el departamento de ingeniería de sistemas y automatización de la Universidad de Valladolid [Valladolid 2006].

# Capítulo 3

## La máquina síncrona como un modelo matemático

### 3.1. Introducción

Las bases del modelo actual inicia en 1923 con la incursión de Andre Blondel<sup>1</sup> y su método para analizar el fenómeno oscilatorio de los alternadores [Blondel 1904]. Una década después R. H. Park propone los conceptos básicos para lo que en la actualidad se conoce como “*El análisis de la máquina síncrona en componentes  $dq0$* ”. En el modelo de la máquina, el circuito equivalente del eje directo cuenta con un devanado de campo, una inductancia de dispersión, inductancias mutuas e inductancias del devanado de amortiguamiento [Park 1929], [Park 1933].

En este capítulo se realiza una descripción de la estructura física de la máquina síncrona. A partir de esta descripción se hace una presentación matemática de la máquina en el tiempo y de la transformación  $dq0$ . En las dos últimas secciones se presentan los modelos de segundo y tercer orden respectivamente de la transformada  $dq0$

---

<sup>1</sup>Andre Blondel (1863-1938) Científico e ingeniero francés, fue empleado de the Lighthouses and Beacons service. Realizó investigaciones en fenómenos de arco eléctrico, sistemas de potencia, sistema electromecánicos, telegrafía, óptica, fotometría y acústica.

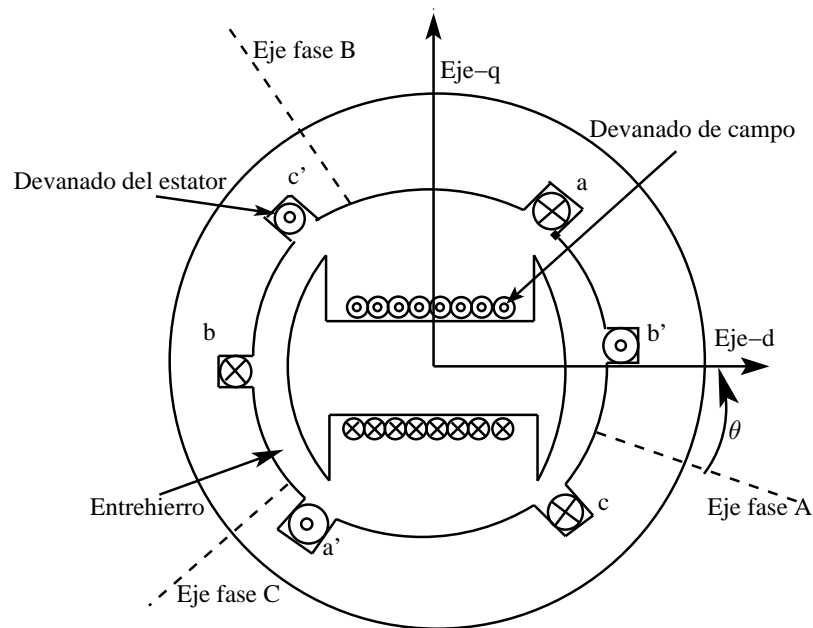


Figura 3.1: Vista de perfil de la máquina síncrona.

### 3.2. Descripción de la máquina síncrona

En la figura 3.1 se muestra la sección transversal de la máquina síncrona, la cual está compuesta por dos elementos esenciales: La armadura o estator y el campo o excitación. El devanado de campo es un circuito localizado en el eje del rotor, el cual se energiza mediante corriente continua para producir un flujo magnético constante y uniforme. El campo está compuesto por una estructura de hierro laminado al cual se le arrollan alambres de cobre, cada arrollamiento crea un polo magnético independiente.

La armadura, es el conjunto de devanados distribuidos (tres grupos de devanados  $A$ ,  $B$  y  $C$ ) sobre los cuales se induce una tensión eléctrica, cuyos valores son mayores a las aplicados al devanado de campo, por lo que estos devanados requieren de un mayor nivel de aislamiento. Además, este conjunto de devanados se sitúan en la parte fija, debido a que manejan niveles superiores de corriente que el resto de devanados de la máquina. Los devanados de la armadura se instalan de forma uniforme, con una separación de  $120^\circ$  eléctricos, este espaciamiento garantiza un balance entre las tres tensiones de fase [Anderson u. Fouad 1977].

Las máquinas utilizadas para la generación se sincronizan al sistema eléctrico, esto

hace que todas generen a una misma frecuencia eléctrica y a una determinada velocidad de sincronismo. Esta velocidad depende de la relación entre el número de polos y la frecuencia eléctrica de la red, como se presenta en la ecuación (3.1).

$$n = \frac{120}{p} f \quad (3.1)$$

donde:  $n$  es la velocidad del rotor en revoluciones por minuto,  $f$  es la frecuencia de la red eléctrica y  $p$  el número de polos que constituyen la máquina.

En Colombia se cuenta con dos fuentes primas de energía para la generación de electricidad, energía hidráulica y energía térmica. Los sistemas de generación hidráulicos requieren máquinas operen a baja velocidad, por lo que se utilizan rotores con un gran número de polos, con el fin de producir la frecuencia eléctrica nominal. Además, este tipo de máquinas utilizan un rotor de polos salientes, los cuales cuentan con grandes devanados de amortiguamiento. Los devanados de amortiguamiento son barras de cobre instaladas en la parte superior de cada polo, todas estas barras están cortocircuitadas entre sí, formando un devanado tipo jaula de ardilla. Este tipo de devanado disminuye las oscilaciones transitorias de la máquina ante perturbaciones. Para el caso de los sistemas térmicos manejan velocidades rotacionales altas, por lo que las máquinas se construyen con dos o cuatro polos distribuidos uniformemente sobre un rotor de tipo cilíndrico, estos sistemas cuentan con devanado de amortiguamiento mas pequeños que los devanados utilizados en los rotores de polos salientes [Kundur 1994].

### 3.3. Representación matemática de la máquina

La figura 3.2 representa la ubicación espacial de los devanados de la máquina, omitiendo las inductancias magnéticas entre rotor y estator. El estator está compuesto por tres inductancias, estas inductancias representan los devanados de fase. En cada una de estas inductancias se induce una tensión  $e$ , la cual genera una corriente eléctrica al conectarla a un sistema eléctrico. El rotor está compuesto por el devanado de campo y los devanados de amortiguamiento. El devanado de campo está alineado con el eje  $d$  y los devanados de amortiguamiento se ubican en ambos ejes de

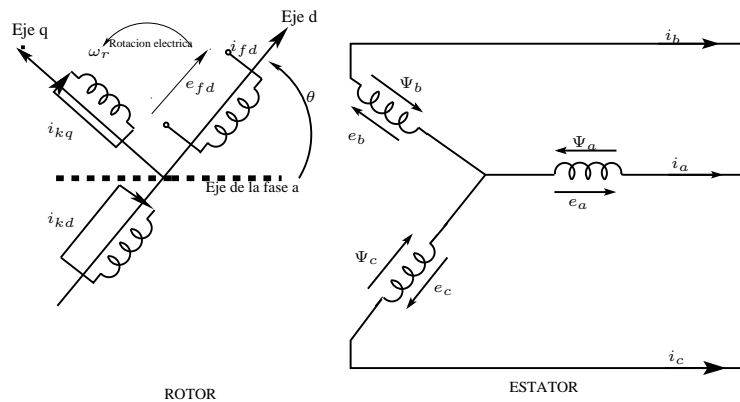


Figura 3.2: Representación de la máquina síncrona.

forma independiente. El número de devanados de amortiguamiento, con los que se modela la máquina, varía acorde a la complejidad de los efectos transitorios y subtransitorios que se deseen simular.  $\theta$  se define como el ángulo entre el eje directo y la corriente de fase  $A$ , el cual varía acorde a la velocidad de sincronismo de la máquina y el ángulo eléctrico entre el eje de cuadratura y la tensión de la fase  $A$ , la variación de este ángulo se presenta en la ecuación (3.2)[Anderson u. Fouad 1977].

$$\theta = w_r t + \delta + \frac{\pi}{2} \quad (3.2)$$

Las inductancias mutuas entre el estator y rotor varían con respecto a la posición del rotor, estas variaciones son causadas por la variación de la permeancia del flujo magnético resultante, la cual depende en gran parte de la longitud del entrehierro. En las máquinas de rotor cilíndrico, la distancia del entrierro es prácticamente constante, pero en los rotores de polos salientes la longitud del entrehierro no es uniforme y varía con respecto al ángulo mecánico. En una máquina con un rotor de polos salientes como la que se presenta en la figura 3.3, el eje directo presenta la menor longitud de entrehierro, mientras que el eje de cuadratura presenta la mayor longitud y por tanto la menor permeancia. El modelo matemático de la máquina en el dominio tiempo se describe por medio de las ecuaciones (3.3) y (3.4). Las ecuaciones se presentan para la operación de la máquina en la fase  $A$ .

$$e_a = \frac{d\psi}{dt} - R_a i_a = p\psi - R_a i_a \quad (3.3)$$

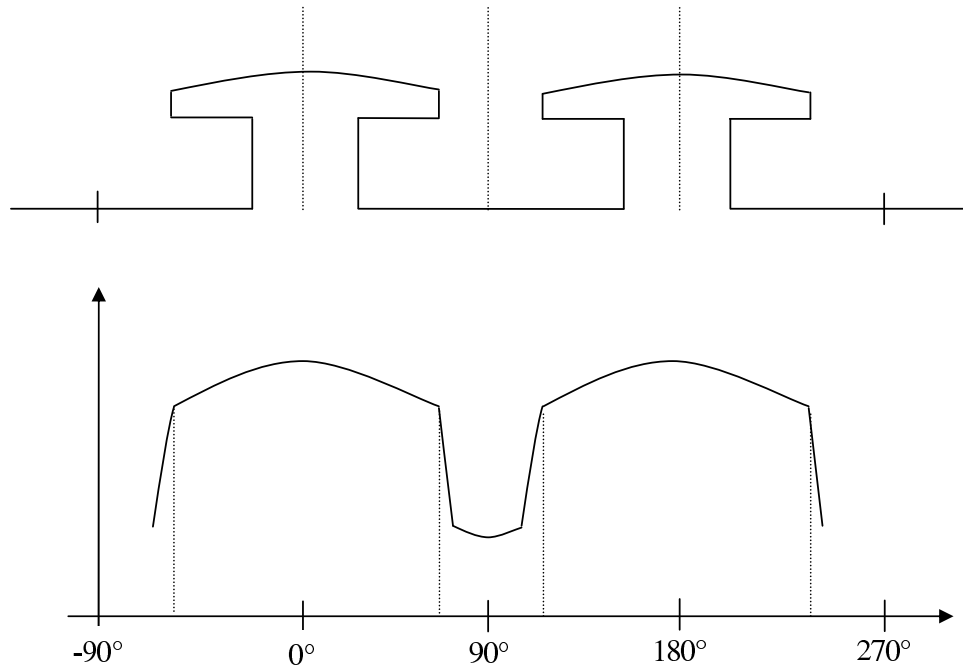


Figura 3.3: Variación de la permeancia con la rotación de la máquina

$$\psi_a = -L_{aa}i_a - L_{ab}i_b - L_{ac}i_c + L_{afd}i_{fd} + L_{akd}i_{kd} + L_{akq}i_{kq} \quad (3.4)$$

donde:

$i_a$ ,  $i_b$  y  $i_c$  son las corrientes de cada fase.

$L_{aa}$ ,  $L_{ab}$  y  $L_{ac}$  son la inductancia propia y las inductancias mutuas en el estator respectivamente.

$L_{afd}$  es la inductancia mutua entre el devanado de campo y la fase A.

$L_{akd}$  y  $L_{akq}$  son las inductancias mutuas entre los circuitos de amortiguamiento y la fase A.

$p$  se define como el operador diferencial  $\frac{d}{dt}$ .

Como se mencionó, las inductancias de la máquina varían con respecto al ángulo y este, con respecto al tiempo, por lo que este modelo cuenta con una complejidad

matemática alta. Además, el número de variables vinculadas es alto, lo que aumenta la carga computacional de las simulaciones. Para evitar estas complicaciones se propone utilizar una transformación en la cual los ejes de referencia giren a la velocidad del rotor o velocidad de sincronismo. Una transformación muy común es la transformación de Park, la cual se presenta en la ecuación (3.5).<sup>2</sup> Existen otros tipos de transformaciones como la transformación del vector espacial, este tipo de transformación es utilizado por Peter Vas para describir el modelo de la máquina síncrona y el modelo de la máquina de inducción [Vas 1993]. El modelo  $dq0$  se utiliza en ATP, por tanto, con el fin de realizar las simulaciones para las pruebas y contar con una conexión directa con este software se adoptó este tipo de transformación [Bonneville 1994].

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Bajo condiciones balanceadas de tensión y corriente, la componente de secuencia cero es nula y en estado estacionario las componentes de los ejes directo y de cuadratura son valores constantes. Sin embargo, cuando ocurre una perturbación en el sistema, sea una falla o simplemente un cambio de carga, los valores de estas componentes oscilan de acuerdo a las características propias de la máquina. A partir de este tipo de condiciones esta transformación permite obtener la información de los parámetros eléctricos.

### 3.4. Modelo de segundo orden

En la figura 3.4 se presenta el modelo circuital de la máquina, el cual está compuesto por dos circuitos eléctricos, cada uno representa un eje de la máquina, eje directo ( $d$ ) y eje de cuadratura ( $q$ ). El eje directo está alineado con el centro de los polos del rotor. El eje de cuadratura está alineado en medio de dos polos. Este modelo es

<sup>2</sup>Estas ecuaciones son denominadas componentes de Park en honor a R.H. Park, quien desarrolló los conceptos en los que están basadas estas ecuaciones. Existe otro tipo de ecuaciones propuesto por W.A. Lewis en [Lewis 1958] donde se sugieren los factores  $k_q = k_d = \sqrt{\frac{2}{3}}$ , diferentes a los usados por las componentes de Park  $k_q = k_d = \frac{2}{3}$ .

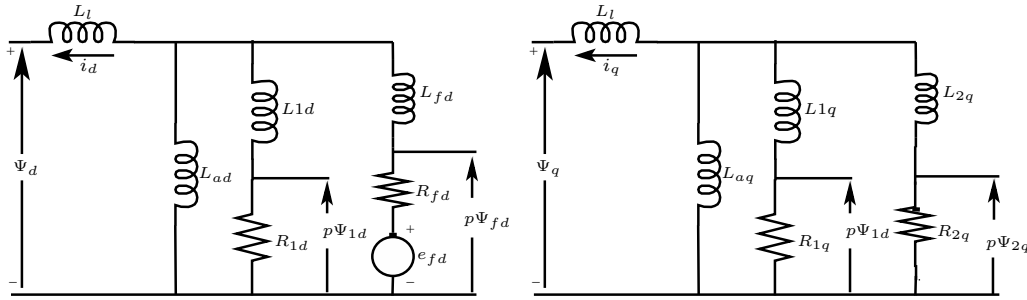


Figura 3.4: Modelo circuital de segundo orden de la máquina síncrona.

denominado de segundo orden, ya que el número de ramales  $R - L$  que tiene cada circuito es dos. El modelo circuital mencionado representa la parte lineal del sistema, es decir la variación con respecto al tiempo de los flujos magnéticos. Las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.12) representan la dinámica general de la máquina, en las cuales se añade la variación del ángulo con respecto al tiempo [Kundur 1994].

La ecuación (3.8) representa el devanado de campo, estas señales no sufren ninguna transformación, pero se asumen referidas al lado del estator, cuando se realiza la adquisición de estas señales eléctricas es necesario determinar la relación de transformación entre el devanado de campo y el devanado del estator para poder referirlas. Las ecuaciones (3.9), (3.10) y (3.11) representan los devanados de amortiguamiento, los cuales son barras de cobre cortocircuitadas, por tanto, la tensión en estos devanados es cero. Estas ecuaciones diferenciales representan la interacción electromecánica de la máquina. Sin embargo, estas ecuaciones son no lineales lo que dificulta la estimación de los parámetros. La no linealidad se centra en el producto entre el flujo magnético de los eje directo y de cuadratura y la variación con respecto del tiempo del ángulo mecánico del rotor. En el siguiente capítulo se describe como estimar los parámetros evadiendo esta no linealidad.

$$e_d = p\psi_d - \psi_q p\theta - R_a i_d \quad (3.6)$$

$$e_q = p\psi_q + \psi_d p\theta - R_a i_q \quad (3.7)$$

$$e_f = p\psi_f + \psi_f p\theta - R_f i_f \quad (3.8)$$

$$0 = p\psi_g + \psi_g p\theta - R_g i_g \quad (3.9)$$

$$0 = p\psi_{kd} + \psi_{kd} p\theta - R_{kd} i_{kd} \quad (3.10)$$

$$0 = p\psi_{kq} + \psi_{kq} p\theta - R_{kq} i_{kq} \quad (3.11)$$

$$e_0 = p\psi_0 - R_a i_0 \quad (3.12)$$

Los flujos magnéticos ligados dependen del número de corrientes en los devanados y las inductancias. En las ecuaciones (3.13), (3.14) y (3.19) se describen los flujos magnéticos principales. Las ecuaciones (3.15), (3.16), (3.17) y (3.18) representan los flujos magnéticos en los devanados de campo y devanados de amortiguamiento.

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{kd} \quad (3.13)$$

$$\psi_q = -L_q i_q + L_{aq} i_g + L_{aq} i_{kq} \quad (3.14)$$

$$\psi_f = -L_f i_f + L_{ad} i_d + L_{ad} i_{kd} \quad (3.15)$$

$$\psi_g = -L_g i_g + L_{aq} i_q + L_{aq} i_{kq} \quad (3.16)$$

$$\psi_{kd} = -L_{kd} i_{kd} + L_{ad} i_d + L_{ad} i_f \quad (3.17)$$

$$\psi_{kq} = -L_{kq} i_{kq} + L_{aq} i_q + L_{aq} i_g \quad (3.18)$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0 \quad (3.19)$$

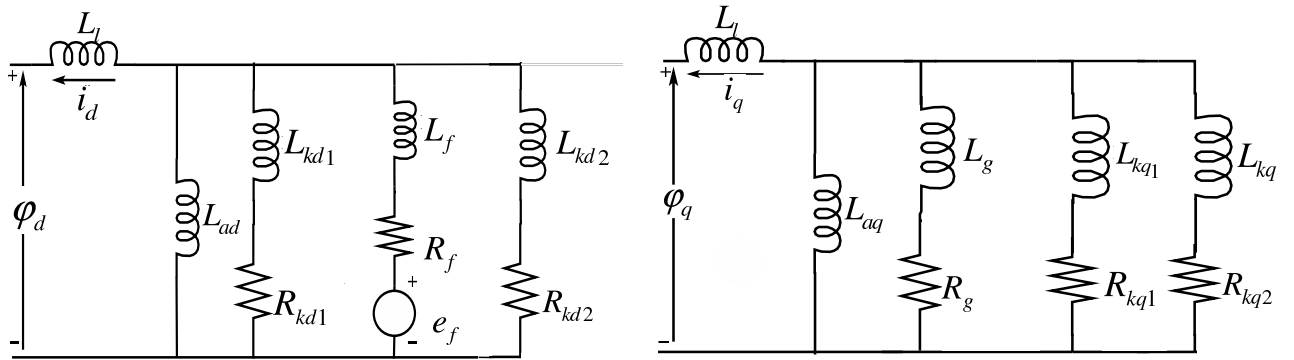


Figura 3.5: Modelo circuital de tercer orden de la máquina síncrona.

### 3.5. Modelo de tercer orden

El modelo de tercer orden, a diferencia del modelo de segundo orden, cuenta con dos devanados de amortiguamiento en el eje directo y tres devanados de amortiguamiento en el eje de cuadratura como se muestra en la figura 3.5. Este modelo circuital permite obtener una dinámica más exacta de los flujos magnéticos. Sin embargo, al incluir un devanado de amortiguamiento la solución de las ecuaciones diferenciales es más compleja.

Este sistema utiliza las mismas ecuaciones que el modelo anterior descrito en (3.6), (3.7) y (3.12). Los flujos magnéticos principales se describen en las ecuaciones (3.20), (3.21) y (3.22); estos flujos dependen de cuatro corrientes que fluyen a través de los diferentes devanados. Este modelo se ajusta mejor a las señales en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, la diferencia en el ajuste no es influyente y la complejidad de las ecuaciones diferenciales aumentan en un grado [Coultres u. Watson 1981], [Dandeno u. Porary 1981].

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{kd1} + L_{ad} i_{kd2} \quad (3.20)$$

$$\psi_q = -L_q i_q + L_{aq} i_g + L_{aq} i_{kq1} + L_{aq} i_{kq2} \quad (3.21)$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0 \quad (3.22)$$

El modelo de tercer orden cuenta con tres corrientes de amortiguamiento en el eje

de cuadratura y dos en el eje directo. Estas señales no son observables, por lo que la estimación de los parámetros de los devanados tiene mas incertidumbre y son menos exactos. El modelo de segundo orden cuenta con una menor incertidumbre y por tanto, las estimaciones son mejores. Es decir, los resultados de la estimación de un modelo de tercer orden es menos exacto que los resultados de la estimación de un modelo de segundo orden. Además, al utilizar el modelo de segundo orden los cálculos son mas sencillos. En resumen con un modelo de segundo orden se tiene menos incertidumbre en los cálculos realizados y el proceso es mas simple<sup>3</sup>. Por tanto, el modelo recomendado para realizar las estimaciones es el modelo de segundo orden. Las aplicaciones, clasificaciones y terminología normalizado de los modelos descritos en este capítulo se mencionan en [IEEE 2002a].

### 3.6. Comparación entre el modelo $dq0$ y el modelo en el dominio de las fases

El modelo  $dq0$  es el modelo utilizado para realizar simulaciones para estudios de estabilidad, el modelo en el dominio fases requiere mayor complejidad numérica que el modelo  $dq0$ . La señales, respuesta del modelo  $dq0$  son transformadas al dominio de las fases. Sin embargo, este proceso es compensado con la simplicidad matemática que se produce al transformar las señales eléctricas [Kundur, 1994]. Al implementar el modelo de la máquina con base en tres componentes giratorias con respecto a la velocidad angular del rotor, las inductancias permanecen estacionarias. Este modelo se ha utilizado por mas de 30 años en diferentes análisis de sistemas de potencia, el cual tiene ciertas limitaciones. Este modelo no permite simular sistemas eléctricos bajo la influencia de armónicos y supone una simetría perfecta entre los devanados de las fases. El modelo  $dq0$  ha sido validado ampliamente por industrias de reconocimiento en el campo de la ingeniería eléctrica [Cui u. a., 2004], [Kiriakides u. a. 2004]. Dentro de estas pruebas se válido el modelo para utilizarse bajo condiciones balanceadas y desbalanceadas de carga.

A pesar de las diferentes validaciones realizadas al modelo, se han realizado diferentes comentarios acerca del óptimo funcionamiento, por ejemplo, recientemente

---

<sup>3</sup>Para comprobar lo anterior no es necesario realizar pruebas, basta con analizar la metodología descrita en capítulos posteriores.

se publicó un artículo en la IEEE en el se mencionó que las simulaciones realizadas con el modelo  $dq0$  al realizar fallas monofásicas son erróneas [Chan u. a., 2001]. Estas conclusiones fueron analizadas y refutadas mediante una serie de pruebas presentadas en otro artículo [Wang u. a., 2007], en este artículo se comprobó lo contrario y se advierte que la anterior publicación se realizó a partir de simulaciones erróneas.

Otras discusiones presentadas recientemente, es que el modelo  $dq0$  no permite modelar de forma aproximada los fenómenos vinculados con el funcionamiento interno de las máquinas. Fenómenos como fallas internas de la máquina y saturación de la máquina. Con respecto a lo anterior, el modelo  $dq0$  no permite simular fallas internas de la máquina, pero sí permite simular la saturación. Al comparar los modelos de saturación, el  $dq0$  es más complejo que el de componentes de fase [Marti u. Louie, 1997].



# Capítulo 4

## Metodología propuesta para estimar el modelo de la máquina

### 4.1. Introducción

La metodología diseñada está basada en una serie de investigaciones realizadas a métodos de estimación convencionales en la literatura y en el análisis del comportamiento del modelo de la máquina síncrona. Para realizar esta prueba es necesario contar con la adquisición de datos eléctricos de la máquina en vacío, estado estable y bajo una perturbación. Las pruebas requieren un adquisidor de medidas eléctricas con un ancho de banda superior a los  $20kHz$ . La prueba de vacío puede realizarse antes de que la máquina se sincronice al sistema eléctrico. La prueba en estado estable se obtiene cuando la máquina está conectada al sistema eléctrico. La perturbación utilizada es un cambio de carga en el sistema. A partir de lo anterior y mediante esta metodología, no es necesario transportar la máquina a un laboratorio especializado para realizar las pruebas y obtener la estimación de los parámetros<sup>1</sup>. El método matemático de estimación utilizado se basa en la optimización del error cuadrático, con ciertas modificaciones en el algoritmo y utilizando el dominio de la frecuencia<sup>2</sup>. Los algoritmos utilizados en la metodología son el PEM (Predictor error

---

<sup>1</sup>Los métodos de estimación descritos en [Vas (1993) ], [IEEE (2002b)], [IEEE (2002a)] requieren de pruebas severas como pruebas repentinas de cortocircuito o análisis en frecuencia, los cuales son riesgosos o muy costosos.

<sup>2</sup>La estimación se realiza en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

method) y el OE (output error)<sup>3</sup>.

El PEM realiza una estimación de ecuaciones en diferencias de orden  $n$ . Es un algoritmo complejo, pero robusto y rápido. La razón de utilizar este algoritmo en las ecuaciones de segundo orden es que bajo ciertas condiciones, otros algoritmos no tienen convergencia en el proceso iterativo. El algoritmo OE se utilizó para realizar la estimación de la ecuación en el devanado de amortiguamiento del eje de cuadratura, debido a que esta estimación se realiza en el dominio de la frecuencia<sup>4</sup>. Es posible utilizar los métodos en el modelo para realizar la estimación de los parámetros directamente, como se presentan algunos modelos en los tutoriales[Ljung (1999)], [Linköpings (2006)]. Pero la estimación obtenida normalmente no tiene un significado físico, solo es una solución matemática cuya respuesta final se ajusta a la respuesta del modelo real. Una estimación directa no restringe valores de parámetros negativos, valores imaginarios o simplemente cantidades irreales.

Los modelos que se pretenden obtener mediante esta metodología serán utilizados para estudios de estabilidad transitoria y de pequeña señal. Para esto, es necesario contar con un modelo muy cercano al real, no un modelo matemático cuya respuesta final se ajusta a la respuesta deseada. Es por esto que la estimación debe ser lo más restringida posible, utilizar los fenómenos característicos de la máquina para poder obtener un modelo que satisfaga las ecuaciones y sea un modelo aceptado físicamente<sup>5</sup>.

Este capítulo describe de una forma sencilla la metodología diseñada e implementada. La sección dos realiza una descripción del proceso de estimación de parámetros en el eje directo, devanado de campo y devanado de amortiguamiento. La sección tres presenta el método para estimar los parámetros en el eje de cuadratura, junto con los parámetros de los devanados de amortiguamiento. El cálculo de los parámetros se describe mediante la presentación de las ecuaciones dinámicas de la máquina, debido a que mediante las ecuaciones es más sencillo exponer o demostrar un fenómeno físico.

---

<sup>3</sup>Los métodos algorítmicos utilizados forman parte de la tool box de Matlab de identificación de parámetros[Ljung (1999)]. Existe una toolbox de matlab libre realizada en la Universidad de Valladolid [Valladolid (2006)] cuyas funciones son utilizadas para la estimación de parámetros a partir de los algoritmos matemáticos desarrollados por MathWorks [The MathWorks (1994)].

<sup>4</sup>Este algoritmo permite realizar estimaciones a sistemas SISO en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

<sup>5</sup>Como caso de ejemplo de lo mencionado cabe mencionar que la mayoría de los resultados de estimación directa no son simulables en el ATP, el sistema no converge.

## 4.2. Cálculo de los parámetros en el eje directo

En esta sección se realiza la estimación de los parámetros del eje directo del modelo de segundo orden de la máquina síncrona. La metodología es sencilla, el fundamento básico de la metodología es estimar los parámetros de un modelo no lineal, mediante el uso de métodos algorítmicos de estimación de modelos lineales. Otra característica interesante de esta metodología es que realiza un proceso de estimación muy ajustado a los fenómenos físicos de la máquina. Por lo que los parámetros estimados son valores físicos coherentes y con una buena aproximación.

### 4.2.1. Cálculo de $aL_{ad}$ a partir de la prueba de vacío

Durante la prueba de vacío las corrientes del estator de la máquina son cero, esto implica que las corrientes de eje directo y de cuadratura son cero [Kundur (1994)], [Bergen (1986)]. Por tanto, la tensión en el eje directo es cero y la tensión en el eje de cuadratura depende solo de la corriente de campo y del valor de velocidad. A partir de este análisis se determina el producto de la inductancia mutua  $L_{ad}$  y la relación de transformación  $a$ , como se presenta en (4.1).

$$V_q = \frac{2}{3}w_s(aL_{ad})i_f^* \quad (4.1)$$

$i_f^*$  es la corriente del devanado de campo referidos al lado del rotor.

### 4.2.2. Cálculo de $L_d$ , $L_q$ y $a$ mediante el estado estable de la máquina

En estado estable las corrientes de amortiguamiento son cero y los flujos magnéticos son valores constantes [Bergen (1986)], [Kundur (1994)]. Así las derivadas con respecto al tiempo de los flujos magnéticos son nulas. Por tanto, las ecuaciones (4.2) y (4.3) se simplifican, convirtiéndose en las ecuaciones (4.4) y (4.5).

$$V_d = -R_a i_d - \phi_q w_s - p\phi_d \quad (4.2)$$

$$V_q = -R_a i_q + \phi_d w_s - p\phi_q \quad (4.3)$$

$$V_d = -R_a i_d - (L_q i_q) w_s \quad (4.4)$$

$$V_q = -R_a i_d + (L_d i_d + \frac{2}{3} a L_a d i_f^*) w_s \quad (4.5)$$

Reorganizando la ecuación (4.4) se obtiene la ecuación (4.6):

$$L_q = \frac{V_d + R_a i_d}{w_s i_q} \quad (4.6)$$

De la misma forma se toma la ecuación (4.5), obteniendo la ecuación (4.7):

$$L_d = \frac{V_q + R_a i_q - \frac{2}{3} w_s (a L_a d) i_f^*}{w_s i_d} \quad (4.7)$$

La relación de transformación entre el estator y el rotor se determina utilizando la relación (4.8):

$$a = \frac{(a L_{ad})}{(L_d - L_l)} \quad (4.8)$$

### 4.2.3. Estimación de los flujos magnéticos $\phi_d$ y $\phi_q$

Los flujos magnéticos se determinan mediante la extrapolación lineal, utilizando como valores iniciales, los valores determinados mediante las ecuaciones (4.9) y (4.10).

$$\phi_{q(t=0)} = \frac{-1}{w_s} (V_d + R_a I_d) |_{t=0} \quad (4.9)$$

$$\phi_{d(t=0)} = \frac{-1}{w_s} (V_q + R_a I_q) |_{t=0} \quad (4.10)$$

Las ecuaciones diferenciales a desarrollar se presentan en (4.11) y (4.12).

$$\frac{d\phi_q}{dt} = w_s \phi_q + V_d + R_a i_d \quad (4.11)$$

$$\frac{d\phi_d}{dt} = -w_s\phi_d + V_q + R_a i_q \quad (4.12)$$

Las ecuaciones (4.11) y (4.12) se resuelven de forma simultánea. Este sistema bidimensional no puede ser resuelto por medio del método de la regla trapezoidal, debido a la inestabilidad de las ecuaciones en diferencias. Las ecuaciones en diferencias cuentan con un polo en el círculo unitario, lo que hace que la respuesta del sistema sea oscilatoria. En los apéndices se presenta un ejemplo de comparación de la solución de este sistema mediante el método de la regla trapezoidal y el método utilizado, el método Runge-kuta, y la respectiva descripción del respectivo método.

#### 4.2.4. Estimación de la corriente de amortiguamiento $i_{kd}$

Una vez se determina el flujo magnético en el eje d, la señal de corriente de amortiguamiento en el eje directo se determina mediante la ecuación (4.13).

$$i_{kd} = \frac{\phi_d - L_d i_d}{\frac{2}{3} w_s (a L_{ad})} i_f^* \quad (4.13)$$

#### 4.2.5. Cálculo de los parámetros $L_f$ y $R_f$

A partir de la ecuación (4.14) y los datos de tensión y corriente de campo referidos al lado del rotor se define la ecuación en diferencias presentada en la ecuación (4.15). La ecuación obtenida es una ecuación en diferencias de segundo orden. A partir del método PEM se obtienen los coeficientes que acompañan a la señal de corriente de la ecuación en diferencias.

$$V_f = -R_f i_f - L_{ad}' i_d' - \frac{2}{3} a L_f i_f' - \frac{2}{3} a L_{ad}' i_{kd}' \quad (4.14)$$

$$\left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} + \frac{R_f}{2} \right\} i_f(t) - \left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} - \frac{R_f}{2} \right\} i_f(t - \Delta t) = S_{ent}(t) \quad (4.15)$$

con:  $S_{ent} = V_f + L_{ad}i'_d + \frac{2}{3}aL_{ad}i'_{kd}$  y definiendo las constantes en la ecuación (4.16):

$$a_1 = \left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} + \frac{R_f}{2} \right\} \quad y \quad a_2 = \left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} - \frac{R_f}{2} \right\} \quad (4.16)$$

Los valores de  $L_{kd}$  y  $R_{kd}$  se determinan mediante las ecuaciones (4.17) y (4.18):

$$L_f = 3 \frac{a_1 + a_2}{4a} \Delta t \quad (4.17)$$

$$R_f = a_1 - a_2 \quad (4.18)$$

#### 4.2.6. Cálculo de los parámetros $L_{kd}$ y $R_{kd}$

A partir de la ecuación (4.19) se determina la ecuación en diferencia descrita en la ecuación (4.20). Mediante el método PEM se determinan las constantes  $L_{kd}$  y  $R_{kd}$ .

$$V_{kd} = 0 = -R_{kd}i_d - L_{ad}i'_d - \frac{2}{3}aL_fi'_f - \frac{2}{3}aL_{ad}i'_f \quad (4.19)$$

$$\left\{ \frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} + \frac{R_{kd}}{2} \right\} i_{kd}(t) - \left\{ \frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} - \frac{R_{kd}}{2} \right\} i_{kd}(t - \Delta t) = S_{ent}(t) \quad (4.20)$$

Con:  $S_{ent} = L_{ad}i'_d + \frac{2}{3}aL_{ad}i'_f$  y definiendo las constantes en la ecuación (4.21):

$$a_1 = \left\{ \frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} + \frac{R_{kd}}{2} \right\} \quad y \quad a_2 = \left\{ \frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} - \frac{R_{kd}}{2} \right\} \quad (4.21)$$

Los valores de  $L_{kd}$  y  $R_{kd}$  se determinan mediante las ecuaciones (4.22) y (4.17):

$$L_{kd} = 3 \frac{a_1 + a_2}{4a} \Delta t \quad (4.22)$$

$$R_{kd} = a_1 - a_2 \quad (4.23)$$

### 4.3. Cálculo de los parámetros en el eje de cuadratura

La estimación de los parámetros del eje de cuadratura es muy similar al proceso antes mencionado. Sin embargo, los parámetros de los devanados del eje de amortiguamiento se estiman de diferente forma, debido a que no se puede adquirir datos eléctricos de ninguna de las dos corrientes <sup>6</sup>, es por esto que se utilizó una sección separada para la estimación de estos parámetros.

#### 4.3.1. Cálculo de la inductancia $L_{aq}$

El valor de la inductancia mutua se determina mediante (4.24) y el valor de  $L_q$ .

$$L_{aq} = L_q - L_l \quad (4.24)$$

#### 4.3.2. Estimación de las corrientes $I_{kq}$ y $I_g$

No es posible determinar cada señal de corriente por separado. Por lo tanto, se determinan los parámetros a partir de la suma de las dos señales  $I_{sum}$ . Para determinar la suma de las corrientes de los devanados de amortiguamiento se utiliza (4.25), reorganizando esta ecuación se obtiene (4.26).

$$\phi_q = L_q i_q + \frac{2}{3} a L_{ad} (i_g + i_{kq}) \quad (4.25)$$

$$i_{sum} = \frac{L_d i_d - \phi_d}{\frac{2}{3} a L_{ad}} \quad (4.26)$$

---

<sup>6</sup>Para el caso del eje directo, se cuenta con la adquisición de la señal de la corriente de campo lo que simplifica el proceso.

### 4.3.3. Estimación de $V_{aq}$

La señal de tensión  $V_{aq}$ , es la tensión en los terminales de los devanados de amortiguamiento o la tensión que se produce en la inductancia mutua  $L_{ad}$ . Este valor se determina mediante la ecuación (4.27).

$$V_{aq} = -L_{aq}\dot{i}'_q - \frac{2}{3}aL_{ad}(i_{sum}) \quad (4.27)$$

### 4.3.4. Cálculo de los parámetros $L_g$ , $L_{kq}$ , $R_g$ y $R_{kq}$

Tomando la señal  $V_{aq}$  y la señal de corriente  $I_{sum}$  se determina la función de transferencia presentada en (4.28). Para determinar los parámetros de la función de transferencia se utiliza el método OE en el dominio de la frecuencia. La ecuación (4.28) cuenta con 5 ecuaciones, a partir de estas ecuaciones se obtiene una solución. Sin embargo, en muchas ocasiones estos valores no tienen un significado real. Por tanto, es necesario ajustar la metodología para obtener valores aproximados a los reales.

$$\frac{I_{sum}(s)}{V_{aq}(s)} = \frac{(L_g + L_{kq})s + (R_g + R_{kq})}{(L_g L_{kq})s^2 + (R_g L_{kq} + R_{kq} L_g)s + R_g R_{kq}} \quad (4.28)$$

El proceso de estimación inicia determinando grupos factibles de parámetros mediante las constantes  $A = (L_g + L_{kq})$ ,  $B = (R_g + R_{kq})$ ,  $C = (L_g L_{kq})$  y  $D = (R_g R_{kq})$ , estas cuatro constantes permiten obtener infinitas soluciones, pero solo se determina los grupos de soluciones con valores congruentes<sup>7</sup>. Con base en las constantes A, B, C y D se determina la respuesta total del sistema a una de entrada de tensión, el valor de salida se almacena como la señal de corriente calculada  $I_{cal}$ .

Luego con base en los valores de cada grupo de parámetros determinados se determina la corriente de cada ramal RL mediante la entrada tensión antes mencionada, luego se suman las corrientes de cada ramal y se almacena el resultado como corrientes  $I_{ramx}$ . En este momento se cuenta con la corriente producto de la simulación de las constantes  $I_{cal}$  y las corrientes de los grupos  $I_{ram1}$ ,  $I_{ram2}$ , ...,  $I_{ramn}$ . Estas corrientes

<sup>7</sup>Se definen soluciones congruentes a la estimación de parámetros reales, positivos y cantidades físicas reales (mH, Ohms, etc.).

se comparan y el grupo de parámetros que realicen una mejor similitud con respecto a  $I_{cal}$  son los datos seleccionados. La mejor similitud se determina calculando la integral de la señal de error cuadrático entre la suma de las corrientes estimadas para grupo de parámetros y la corriente  $I_{cal}$ . Este proceso mezcla una estimación en frecuencia y la selección de los parámetros de mejor ajuste a las señales en el tiempo.



# Capítulo 5

## Pruebas y análisis al software implementado

### 5.1. Introducción

Para analizar y estudiar las respuesta de la metodología, es necesario realizar una serie de pruebas. En este capítulo se presentan una serie de pruebas realizadas a la metodología utilizando un sistema tipo. Mediante estas pruebas se pretende presentar los errores obtenidos en la estimación a partir de la simulación de un sistema normal y analizar la respuesta de la metodología frente a una serie de variaciones en los datos de entrada.

El capítulo inicia con la sección dos presentando un caso tipo, del cual se presentan los datos de entrada y los resultados de la estimación con la respectiva determinación de los errores. En la sección tres se presenta un análisis de los resultados de la estimación con respecto al nivel de perturbación realizado al sistema para obtener la respuesta natural de la máquina. En la sección cuatro se presenta un estudio de sensibilidad de la metodología con respecto al valor de la resistencia de armadura e inductancia de dispersión y; finaliza con el análisis de la influencia de la frecuencia de muestreo de las señales en el proceso de estimación.

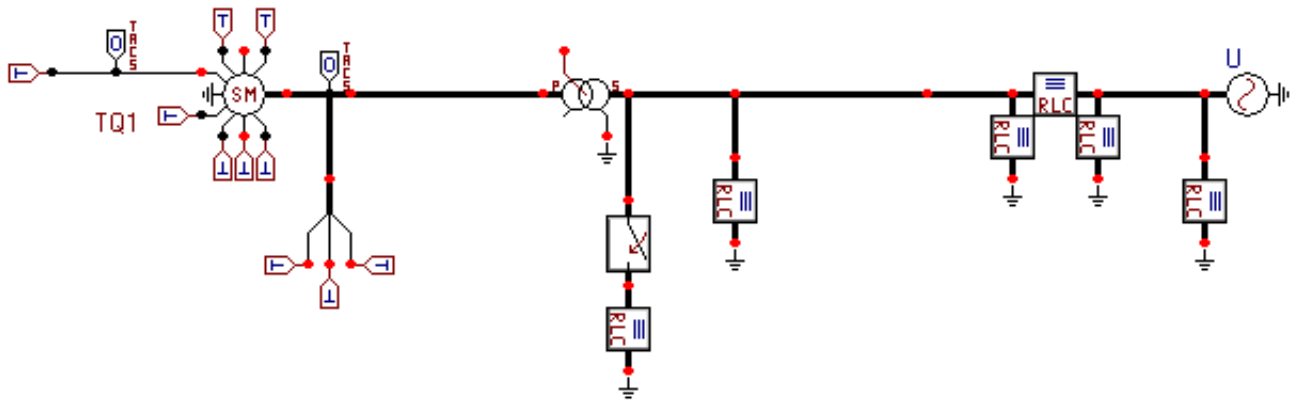


Figura 5.1: Diagrama del sistema tipo utilizado en las pruebas en ATP.

## 5.2. Estudio de caso tipo

Con el fin de verificar el buen funcionamiento de la metodología se presentan los resultados finales de la estimación de un sistema tipo, el cual se presenta en la figura 5.1. La máquina síncrona, con una potencia nominal de  $555\text{MV A}$ , se conecta a una barra infinita a través de un transformador con relación  $24\text{kV}/240\text{kV}$  y una línea de transmisión, la línea de transmisión se modela como línea mediana mediante el equivalente  $\pi$ . En el terminal del lado de alta del transformador se conectaron dos cargas, una de ellas es la que se desconecta del sistema para obtener la perturbación de la máquina la otra permanece estática durante la prueba. Todo el sistema antes mencionado se implementó en ATP, representando las líneas y cargas mediante impedancias  $RLC$ . Los datos de los parámetros de la máquina, los resultados de la estimación y el error relativo porcentual entre la estimación y los datos reales se presentan en la tabla 5.1.

### 5.2.1. Análisis de los resultados de la estimación

Los errores de mayor valor se presentan en las resistencias de los devanados de amortiguamiento del eje de cuadratura y el devanado de amortiguamiento del eje directo. Para entender por que estos parámetros presentan el mayor desvío, es necesario recordar que estos datos son estimados a partir de un proceso que incluye extrapolación lineal de los flujos magnéticos y de la derivación de las señales

Cuadro 5.1: Datos característicos y estimados de la máquina síncrona.

	<i>Valor real</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error porcentual</i>
$L_d$	1,8100	1,8101	-0,0055 %
$L_q$	1,7600	1,7631	-0,1761 %
$L_{ad}$	1,6600	1,6601	-0,0060 %
$L_{aq}$	1,6100	1,6131	-0,1925 %
$L_f$	0,1650	0,1515	8,1818 %
$L_g$	0,7252	0,9203	-26,9029 %
$L_{kd}$	0,1713	0,2228	-30,0642 %
$L_{kq}$	0,1250	0,1803	-44,2400 %
$R_f$	$6,003 \times 10^{-4}$	$4,0743 \times 10^{-4}$	32,0950 %
$R_g$	0,0062	0,0085	37,0968 %
$R_{kd}$	0,0280	0,0512	82,8571 %
$R_{kq}$	0,0237	0,0233	1,6878 %

de corriente, por lo que se presentan errores de cálculo, errores de aproximación y amplificación de señales de ruido<sup>1</sup>.

Las señales utilizadas para realizar la estimación se presentan desde la figura 5.2 hasta la figura 5.7, como líneas punteadas, en estas mismas figuras se presentan las señales obtenidas de la simulación realizada a los parámetros obtenidos de la estimación, las cuales son las líneas sólidas. La simulación de los parámetros estimados se realizó utilizando el mismo sistema tipo, solo se modificó los valores de los parámetros de la máquina síncrona, los datos de las cargas, el nivel de tensión de la barra infinita y las características del transformador son los mismos. Al comparar las señales en el tiempo se notan características similares, la parte transitoria y subtransitoria son similares, pero en estado estable existe un desfase de  $30A$  para las corrientes  $I_d$  e  $I_q$ . Para el caso de las corrientes de campo y de los devanados de amortiguamiento la máxima diferencia es de alrededor de  $0,4A$ , este desfase no se presenta en estado estable, se presenta en la parte transitoria. En estado estable las señales de corriente de los devanados de amortiguamiento son cero y no existe diferencia.

<sup>1</sup>Un error de aproximación en las señales de entrada pueden traer como consecuencia grandes desviaciones de la respuesta de la extrapolación. Además, al derivar una señal con respecto del tiempo, el ruido que contiene la señal se amplifica, debido al polo que tiene la ecuación en diferencias del proceso.

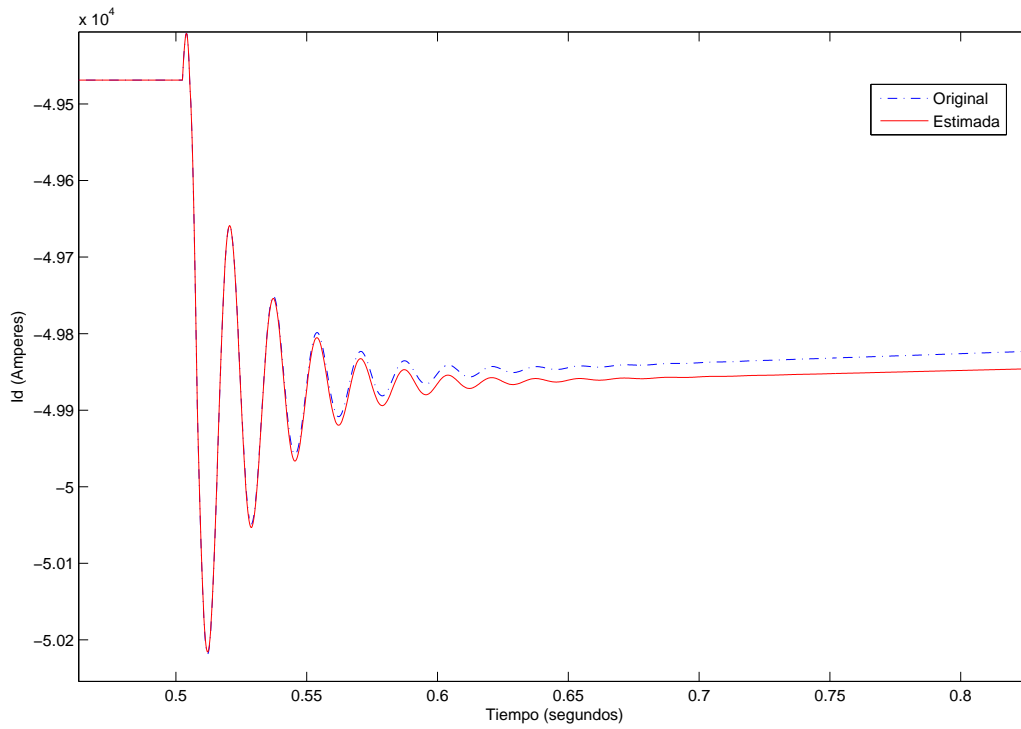


Figura 5.2: Comparación de las señales original y estimada de  $I_d$ .

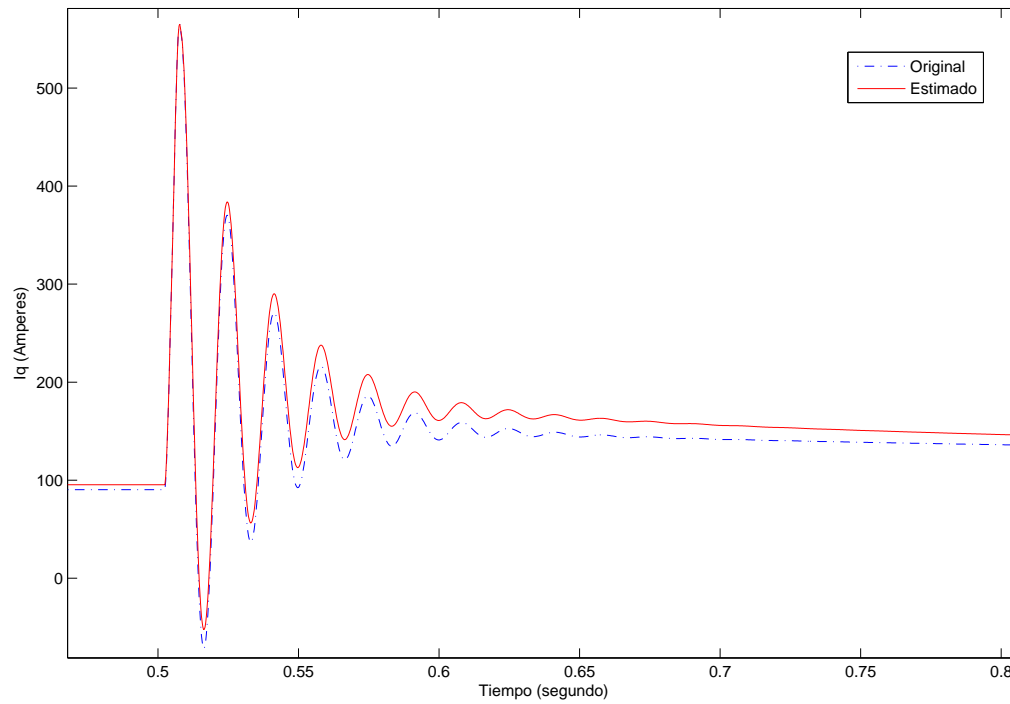
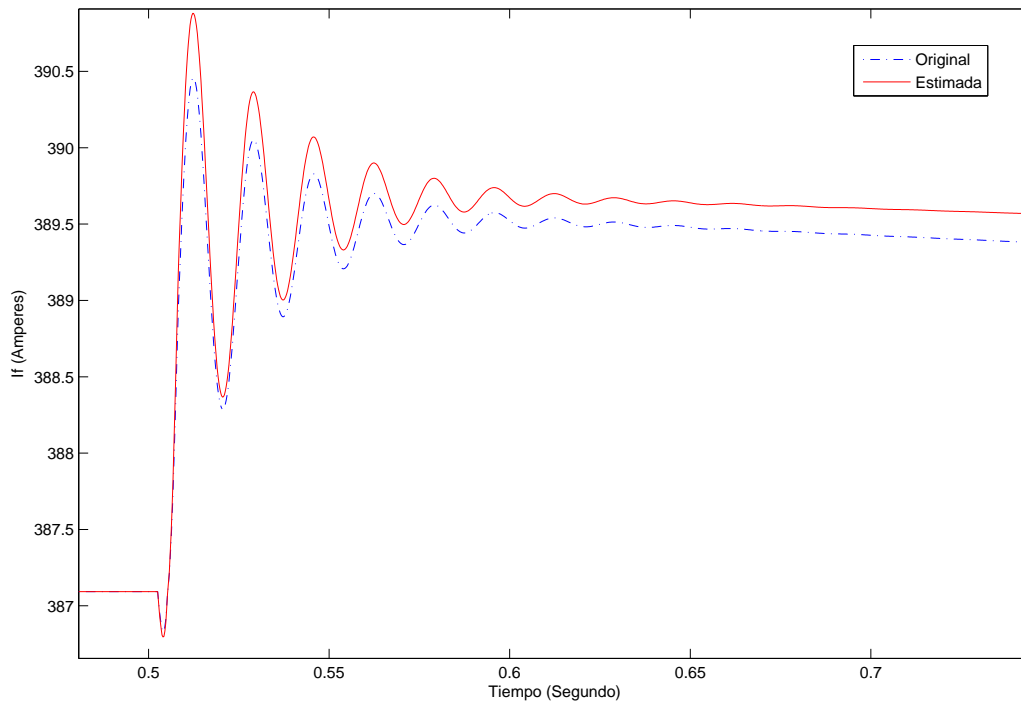
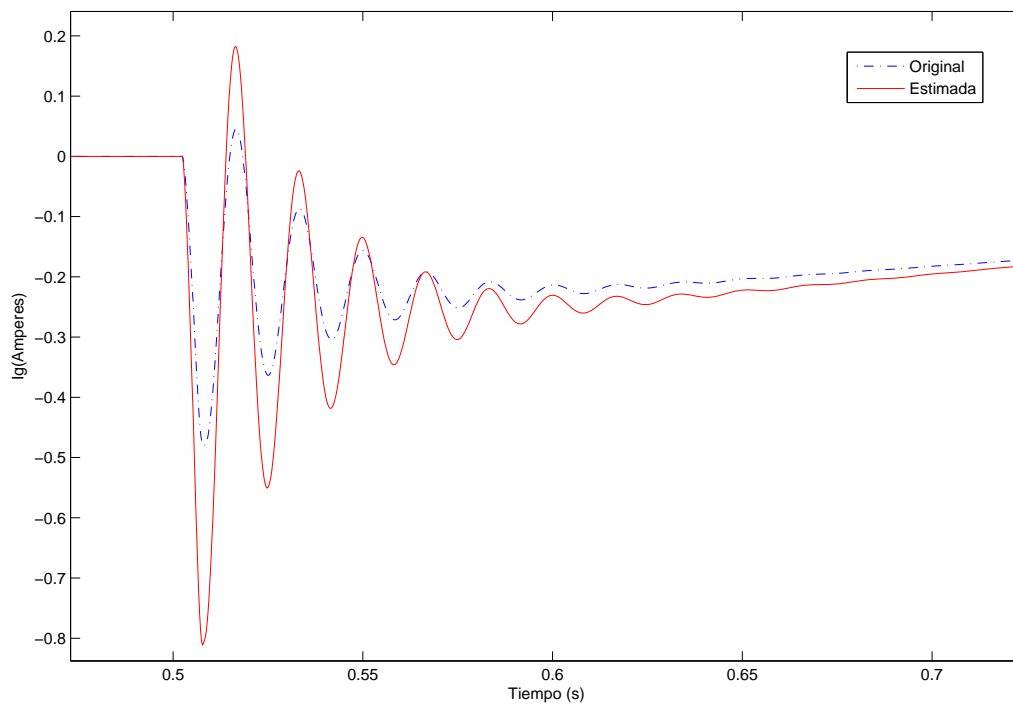


Figura 5.3: Comparación de las señales original y estimada de  $I_q$ .

Figura 5.4: Comparación de las señales original y estimada de  $I_f$ .Figura 5.5: Comparación de las señales original y estimada de  $I_g$ .

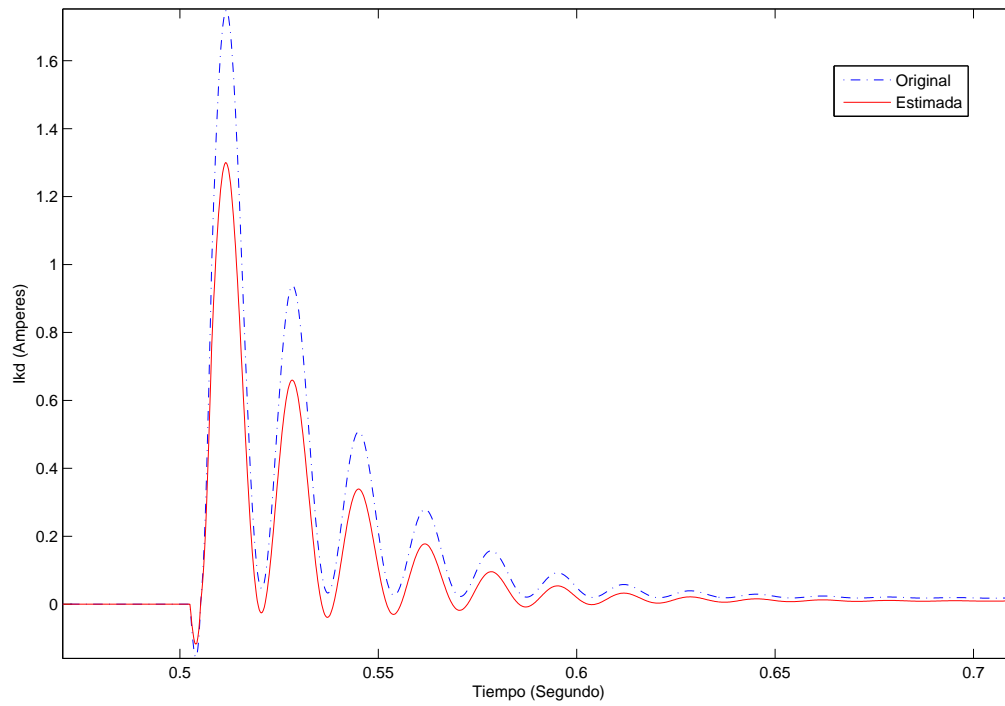


Figura 5.6: Comparación de las señales original y estimada de  $I_{kd}$ .

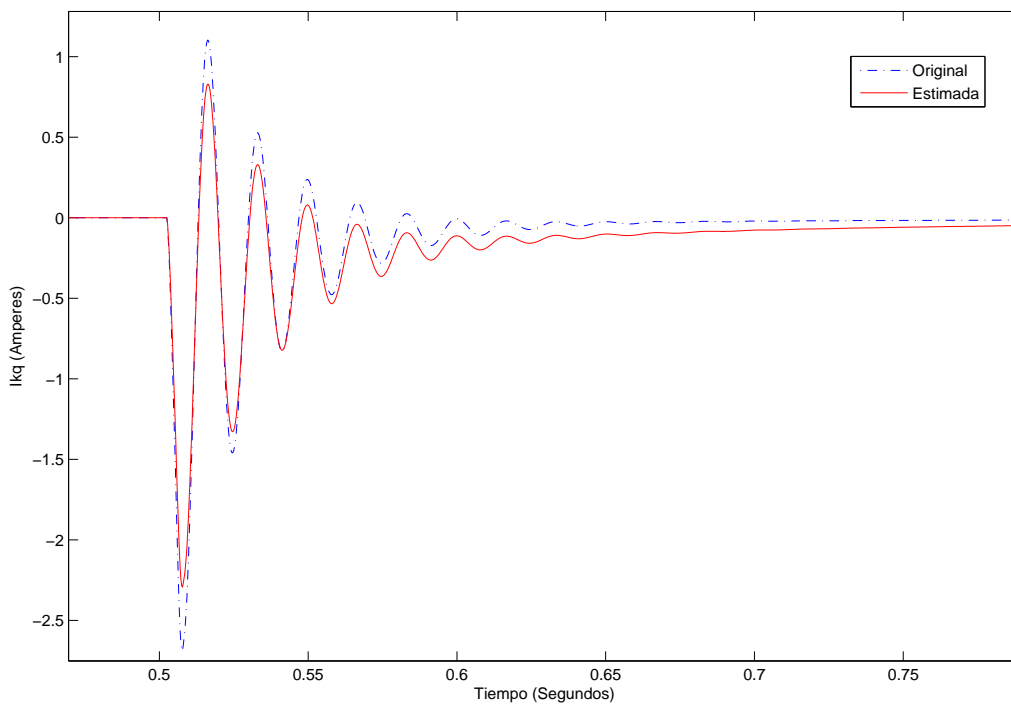


Figura 5.7: Comparación de las señales original y estimada de  $I_{kq}$ .

Cuadro 5.2: Índices de error de las señales en el tiempo.

Señal	Índice de error
$I_d$	0,0005
$I_q$	0,0020
$I_f$	0,0004
$I_g$	0,0426
$I_{kd}$	0,0034
$I_{kq}$	0,0047

### 5.2.2. Índice de error de las señales en el tiempo

Con el fin de cuantificar la diferencia entre las señales originales y las señales de la estimación se define el índice de error de las señales en el tiempo. El índice de error es la integral de la diferencia del valor absoluto entre la señal original y la señal de la estimación por periodo. En la ecuación (5.2) se presenta el índice de error, los valores  $t_1$  y  $t_2$  son el tiempo inicial y final de la señal respectivamente.  $I_{max}$  es el valor máximo del valor absoluto de la señal original, con este valor se pretende independizar el índice de las dimensiones de las señales. En la tabla 5.2 se presentan los índices de error de las señales presentadas desde la figura 5.2 hasta la figura 5.7.

$$I_e = \frac{1}{(t_1 - t_2)I_{max}} \int |e(t)| dt \quad (5.1)$$

## 5.3. Estudio del nivel de perturbación del sistema

Existen diferentes formas de obtener la respuesta natural de máquina síncrona, dentro de estas formas está la variación de carga del sistema eléctrico, fallas a tierra y la aplicación de señales de ruido como datos de entrada a los sistemas de control. Es importante resaltar que a partir de la respuesta natural es posible obtener las características eléctricas de la máquina, como son los parámetros del modelo de segundo orden.

Para el caso de las variaciones de carga en el sistema eléctrico, estas producen variaciones de tensión y corriente en los terminales de la máquina. Ante estas variaciones eléctricas la dinámica electromecánica modifica el punto de operación de la

máquina, produciendo además oscilaciones transitorias de algunos ciclos, la cual es la respuesta natural al escalón del sistema. En el caso de una falla en el sistema, se produce una perturbación del mismo tipo que la variación de carga, pero con un nivel más fuerte y consecuencias desfavorables para el sistema. La última forma de obtener la respuesta natural del sistema es la aplicación de ruido a las entradas de la máquina, esta forma permite obtener mejores resultados en la estimación, ya que el ruido esta formado por una gran cantidad de señales a diferentes frecuencias. Realizar esta práctica resulta muy compleja y costosa, por ejemplo, para ingresar ruido en la máquina se utilizan la referencia del control del devanado de campo, lo cual implica que para estas pruebas es necesario que el sistema eléctrico soporte las variaciones en la máquina ante el ruido en la referencia de la excitación. La metodología para estimar parámetros diseñada y presentada en este documento utiliza las variaciones de carga como forma de obtener la respuesta natural de la máquina.

Existen discusiones acerca del valor de carga que debe ser desconectado para obtener una buena estimación, incluso se menciona de la insuficiencia de este tipo de perturbación para producir oscilaciones lo suficiente para lograr una buena estimación, recomiendan utilizar fallas en el sistema. Esta discusiones se basan en pruebas realizadas desconectando valores muy pequeños de carga, para estos casos las oscilaciones son débiles y los métodos matemáticos de estimación no logran obtener resultados confiables. Sin embargo, esto solo ocurre para valores pequeños de carga y no es una prueba suficiente para generalizar a todos los niveles de carga. Debido a lo anterior, en esta sección se estudiará el comportamiento de los resultados de la metodología frente a datos eléctricos obtenidos de perturbaciones realizadas mediante la desconexión de diferentes niveles de carga del sistema.

### 5.3.1. Descripción de la prueba

Con el fin de llevar una secuencia en las pruebas, se utilizará el sistema descrito en la sección anterior, este sistema cuenta con una carga conectada a la barra infinita, la cual al desconectarse del sistema produce las oscilaciones eléctricas en el sistema. En estas pruebas la carga se varía secuencialmente realizando una simulación para cada nivel de carga que se desconecta del sistema, a partir de cada simulación se estiman los parámetros de la máquina. La carga que se desconecta es puramente resistiva y los valores van desde  $0,1MW$  hasta  $20MW$ , teniendo en cuenta que la máquina

es de  $555MVA$ , la carga se varía desde un  $0,02\%$  hasta un  $3,6\%$ <sup>2</sup>. Se estima que estas variaciones son significativas en la dinámica de la máquina y permite realizar el proceso de estimación sin llevar a la inestabilidad el sistema eléctrico.

En la primera columna de la tabla 5.1 se presentan los parámetros reales del modelo de la máquina, las figuras presentadas desde la figura 5.8 hasta la figura 5.15, se presentan los errores relativos porcentuales de los parámetros estimados con respecto a los datos originales de la máquina. Para el caso de la figura 5.8, se presentan los resultados de las inductancias  $L_d$  y  $L_{ad}$ , en la figura 5.9 se presentan los parámetros  $L_q$  y  $L_{aq}$ . En estas figuras se ve como el error relativo es pequeño y aumenta conforme aumenta la carga que sale del sistema, esta variación parece no tener sentido, debido a que la estimación debe mejorar al aumentar el nivel de perturbación. Sin embargo, estos valores se determinan mediante la operación de estado estable de la máquina, por lo que al aumentar el nivel de perturbación, el estado estable contiene ciertas oscilaciones pequeñas que hacen discrepar del valor real. Por tanto, el nivel de perturbación influye de forma inversa con respecto al nivel de carga, a mayor carga menor exactitud.

En el caso de las figuras 5.10 y 5.11, las cuales presentan el error relativo de los parámetros  $L_g$ ,  $L_{kq}$ ,  $L_f$  y  $L_{kd}$ , la tendencia del error es casi constante, no existe una variación importante. Específicamente, los parámetros  $L_g$  y  $L_{kq}$  presentan un salto en la tendencia, este salto no se atribuye a la variación de la carga, es posible que en ciertas ocasiones los métodos de estimación no logren óptimos resultados y se presenten resultados diferentes. El salto que se presenta en la tendencia de los errores antes mencionados, se presenta también en las figuras 5.14 y 5.15, las cuales presentan el error relativo de los parámetros  $R_g$  y  $R_{kq}$ . En estas figuras la variación del error porcentual de  $R_{kq}$  es pequeño, el error porcentual y la variación del error de  $R_g$  son altas, el error sigue una tendencia oscilatoria por lo que no es posible concluir que la estimación sea mejor al aumentar el nivel de perturbación para esta resistencia. Las figuras 5.12 y 5.13 presentan el error porcentual de  $R_f$  y  $R_{kd}$  respectivamente, la variación de  $R_f$  es pequeña, por lo que la tendencia del error porcentual se mantiene constante. Para el caso de  $R_g$ , el error porcentual medio es mayor que en el parámetro anterior y la variación del error es poca.

A partir de estos resultados se enuncia que es necesario un valor mínimo de car-

---

<sup>2</sup>En las figuras se presenta una parte de las pruebas realizadas, solo hasta las variaciones de carga hasta los  $6MW$ .

ga que perturbe el sistema para obtener una respuesta natural del sistema que nos permita estimar los parámetros y debe existir un límite máximo para que el sistema no se inestabilice. Lo anterior se debe a que no se encontró una prueba de indique que exista una disminución considerable de los errores en los parámetros a medida que se aumenta el valor de potencia que perturba el sistema. Además, debido a las oscilaciones como respuesta del sistema ante grandes perturbaciones, es difícil realizar una óptima estimación de parámetros de la máquina. Con respecto al fenómeno oscilatorio del error se plantea que las variaciones de los errores en la estimación se presentan en los métodos matemáticos de ajuste de parámetros PEM en el tiempo y en frecuencia. Para reforzar esta teoría se realizaron diferentes simulaciones para poder entender por que se da este salto, no se encontró ninguna evidencia que pueda relacionar la oscilaciones de los errores con las señales de entrada en cada estimación. Por ejemplo, para el caso de la estimación del ramal  $R_g-L_g$ , las señales de salida y entrada de la función de transferencia para tres perturbaciones distintas se presentan en las figuras 5.16 y 5.17 respectivamente. Las tres perturbaciones se realizaron sacando  $22MVA$ ,  $23MVA$  y  $24MVA$  respectivamente del sistema, según la figura 5.11, en  $23MVA$  se presentó un salto en la estimación, pero en la señales no se percibe la diferencia de las señales de entrada o de salida en el tiempo. No se capta el patrón que produce esta diferencia tan notable en los resultados.

#### 5.4. Análisis de la metodología respecto a la frecuencia de muestreo

La metodología realiza la estimación a partir de la cantidad de datos contenidos en cada señal eléctrica ingresada, a su vez, la cantidad de datos de cada señal depende de la frecuencia de muestreo utilizada. Dentro del proceso de la metodología se estiman los flujos magnéticos de la máquina a partir de las señales eléctricas de entrada, los cuales son utilizados para calcular las corrientes de amortiguamiento, estas señales se utilizan para determinar los parámetros de los devanados de amortiguamiento. El anterior análisis demuestra como la cantidad de información contenida en cada señal influye en la estimación de los parámetros, una aproximación de los resultados disminuye a medida que disminuye la información contenida en las señales eléctricas.

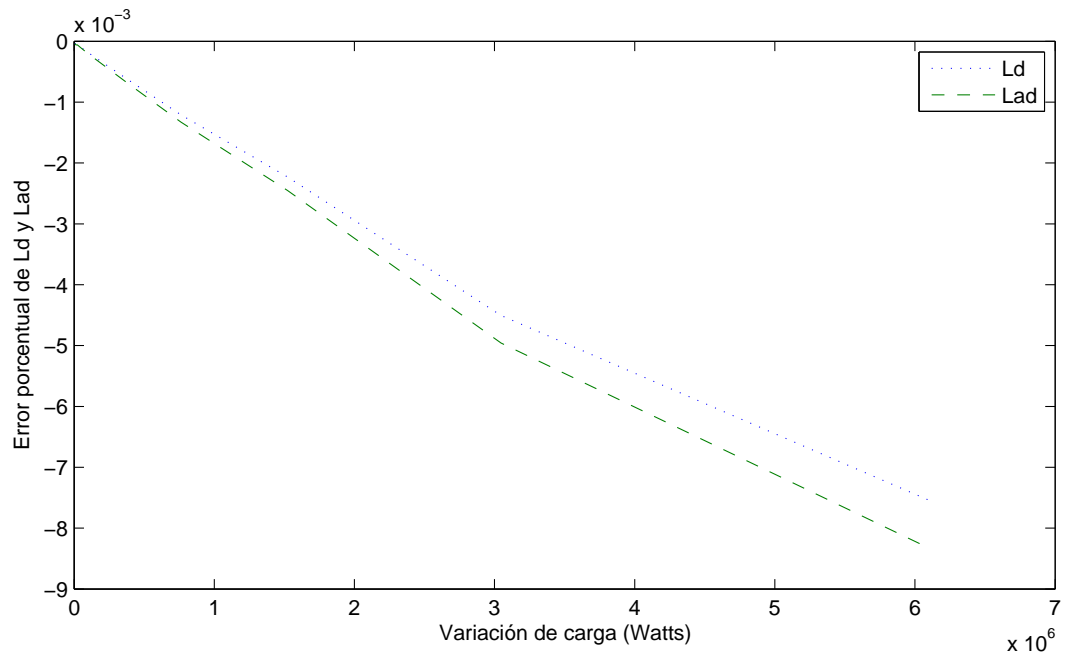


Figura 5.8: Error relativo de  $L_d$  y  $L_{ad}$  al variar el nivel de perturbación.

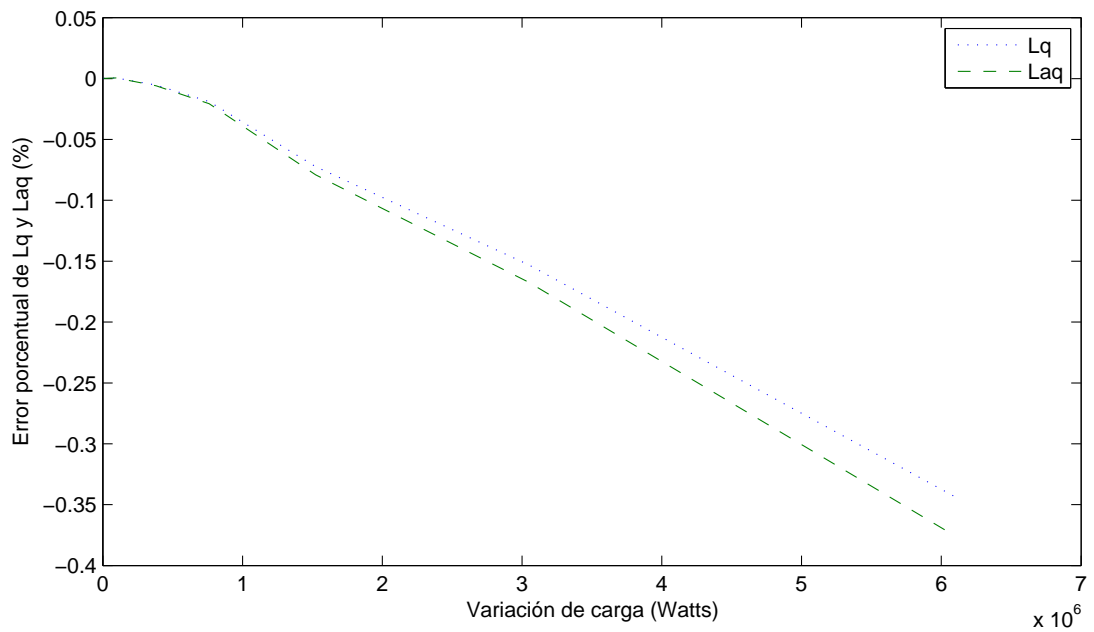


Figura 5.9: Error relativo de  $L_q$  y  $L_{aq}$  al variar el nivel de perturbación.

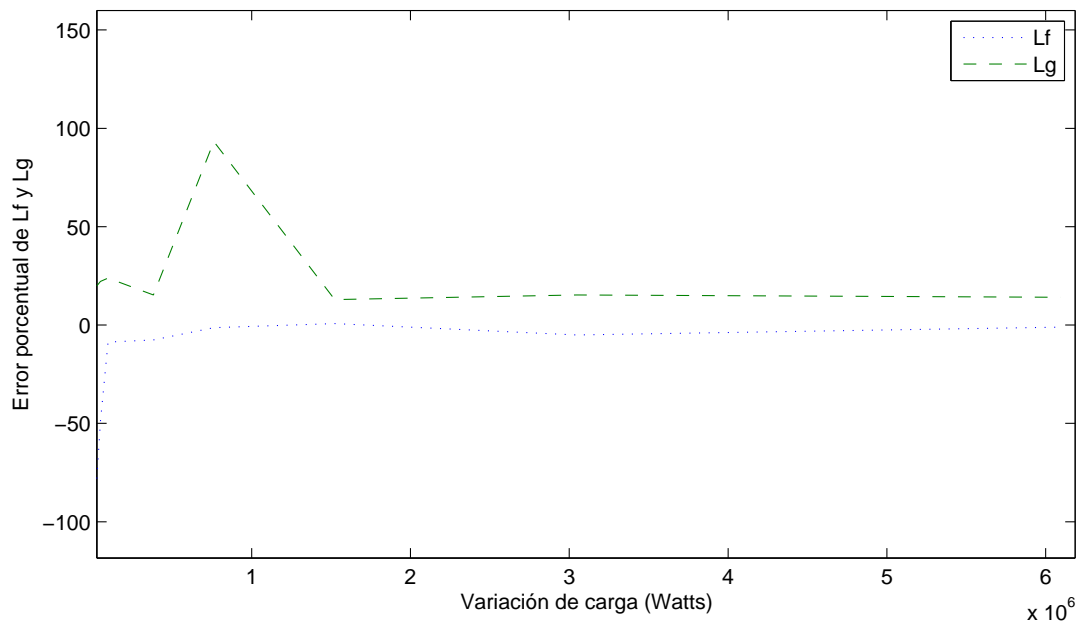


Figura 5.10: Error relativo de  $L_f$  y  $L_g$  al variar el nivel de perturbación.

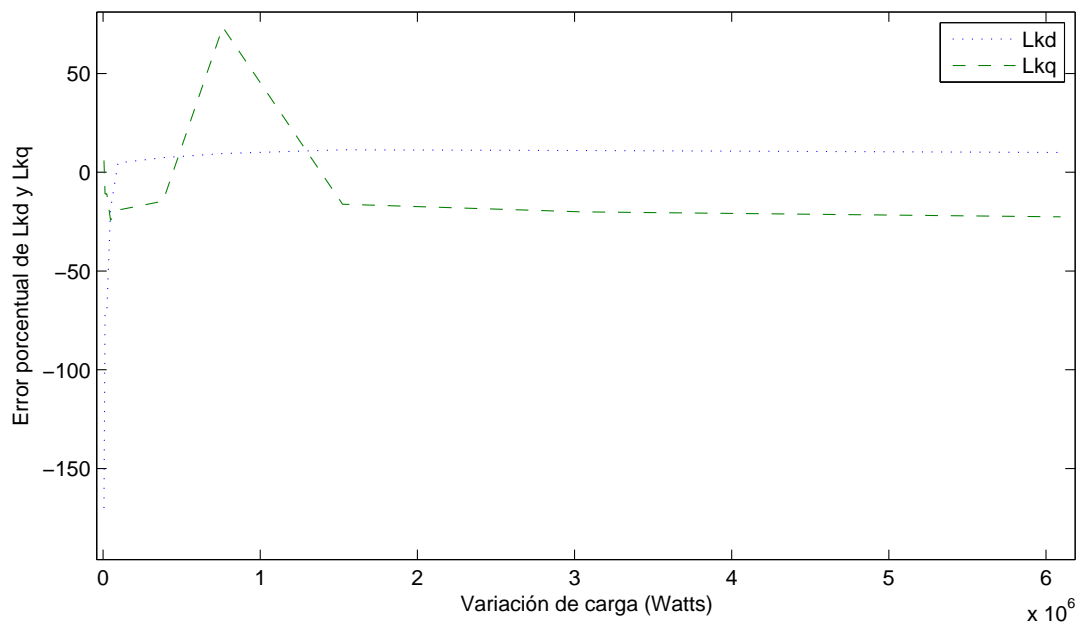


Figura 5.11: Error relativo de  $L_{kd}$  y  $L_{kq}$  al variar el nivel de perturbación.

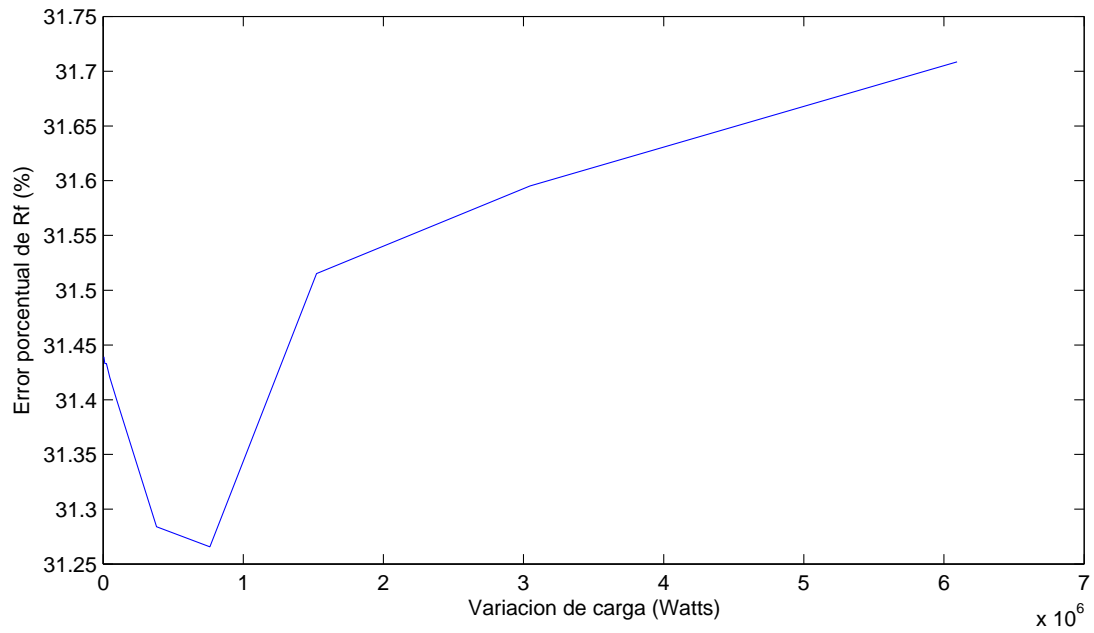


Figura 5.12: Error relativo de  $R_f$  al variar el nivel de perturbación.

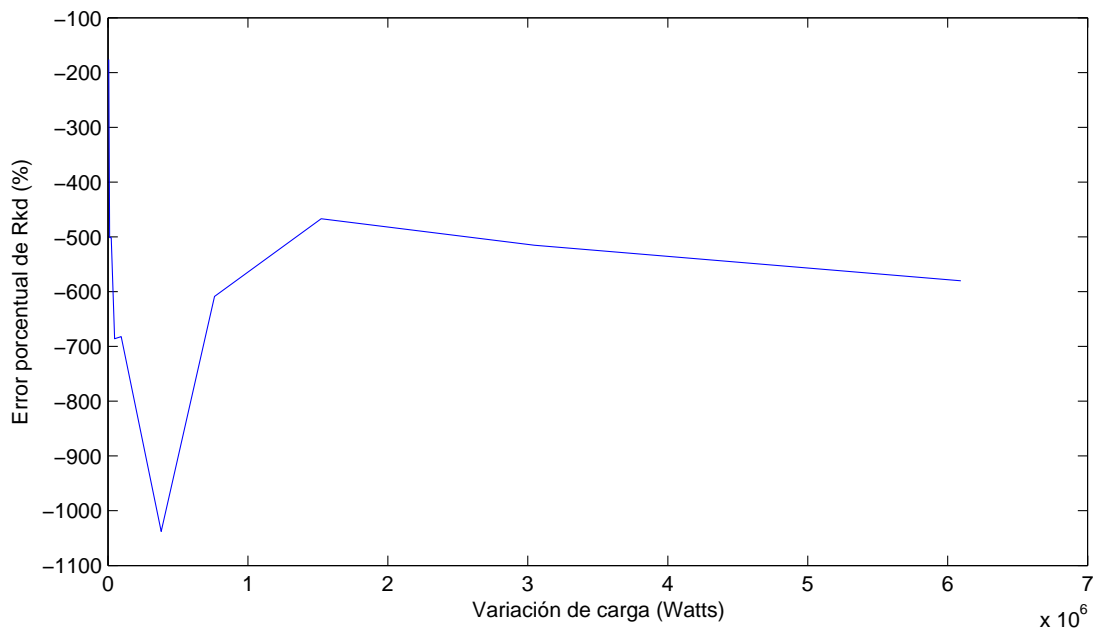


Figura 5.13: Error relativo de  $R_{kd}$  al variar el nivel de perturbación.

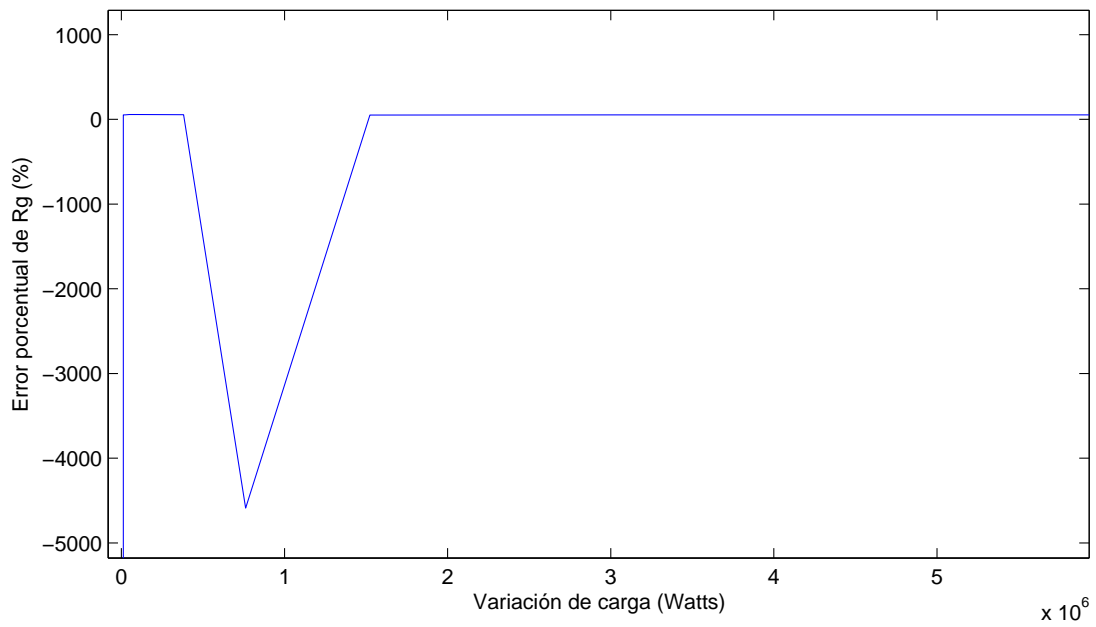


Figura 5.14: Error relativo de  $R_g$  al variar el nivel de perturbación.

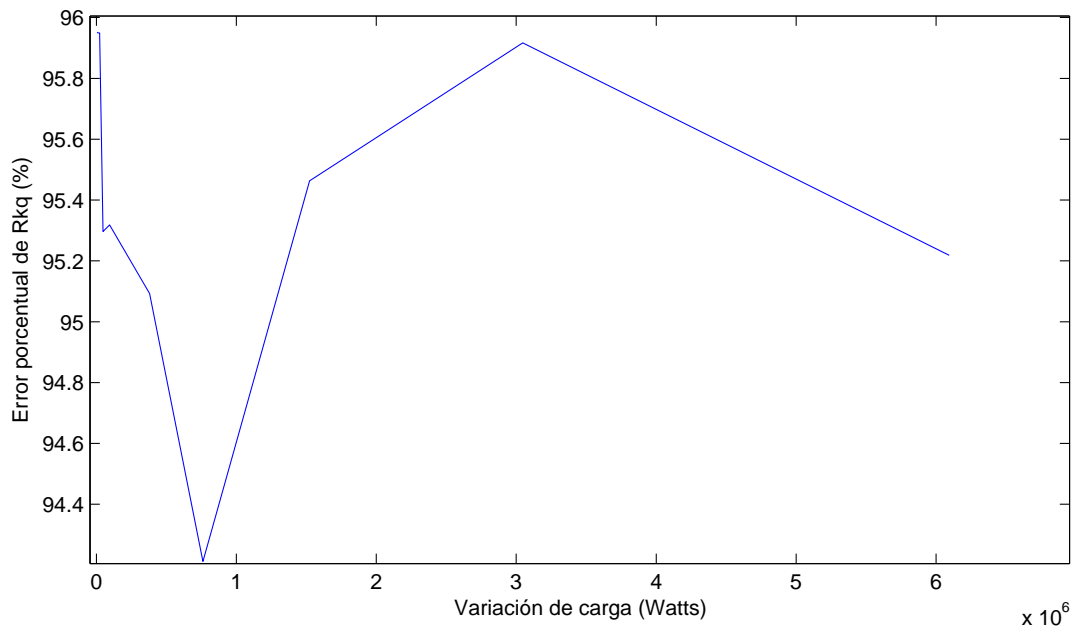


Figura 5.15: Error relativo de  $R_{kq}$  al variar el nivel de perturbación.

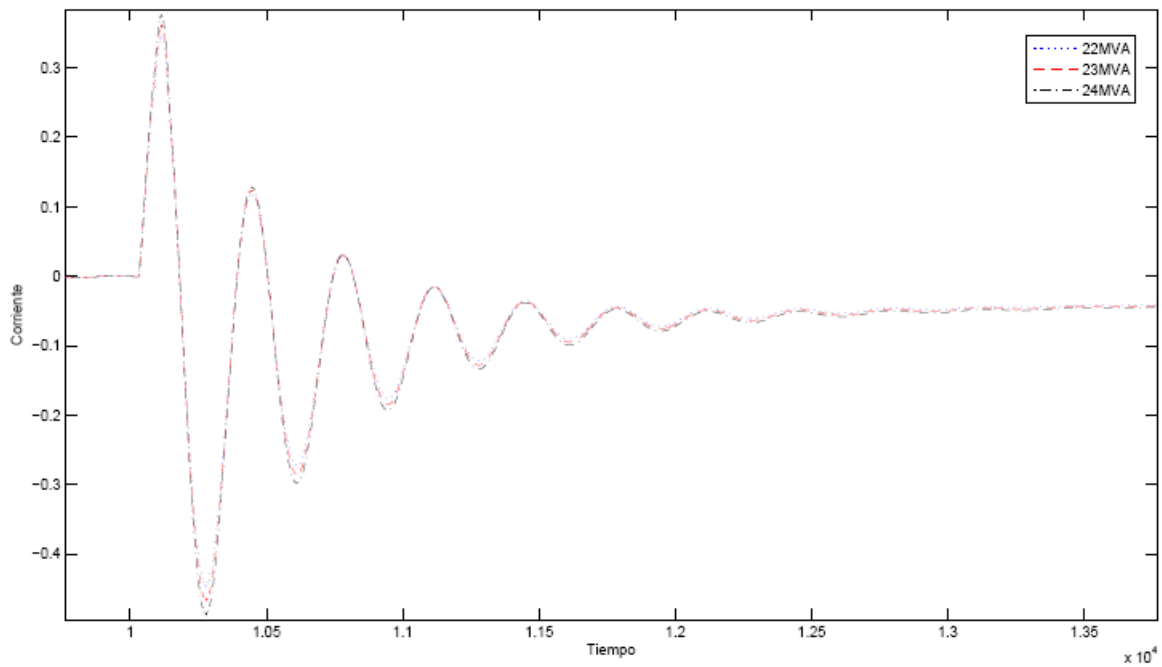


Figura 5.16: Corriente en los devanados de amortiguamiento del eje de cuadratura.

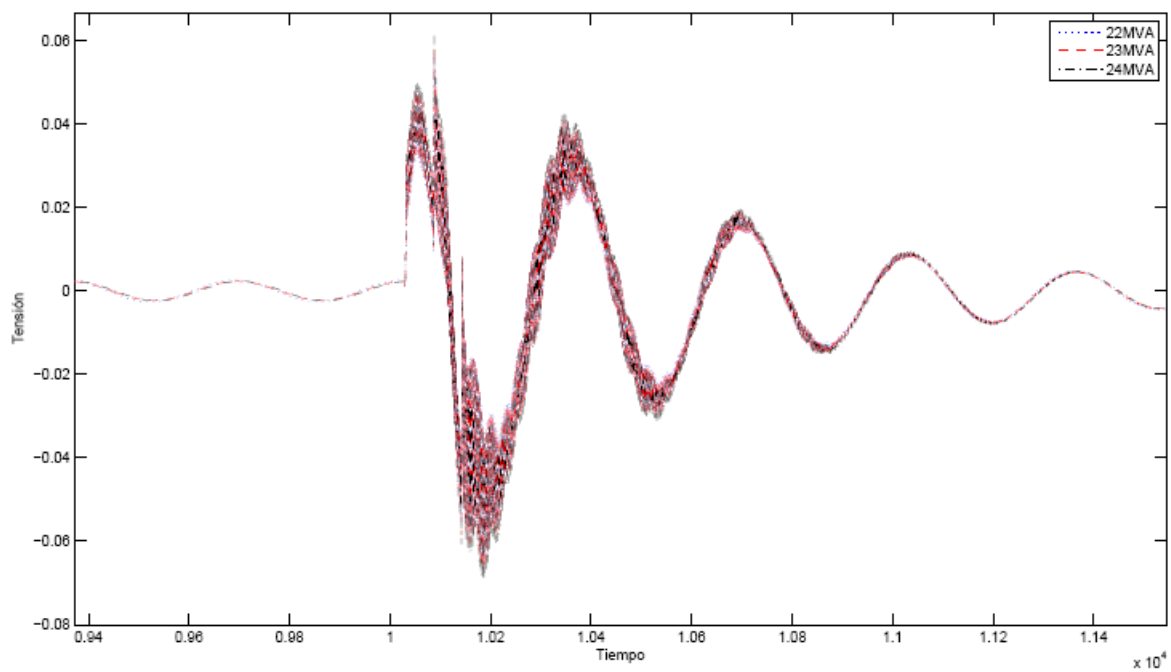


Figura 5.17: Tensión en los devanados de amortiguamiento del eje de cuadratura.

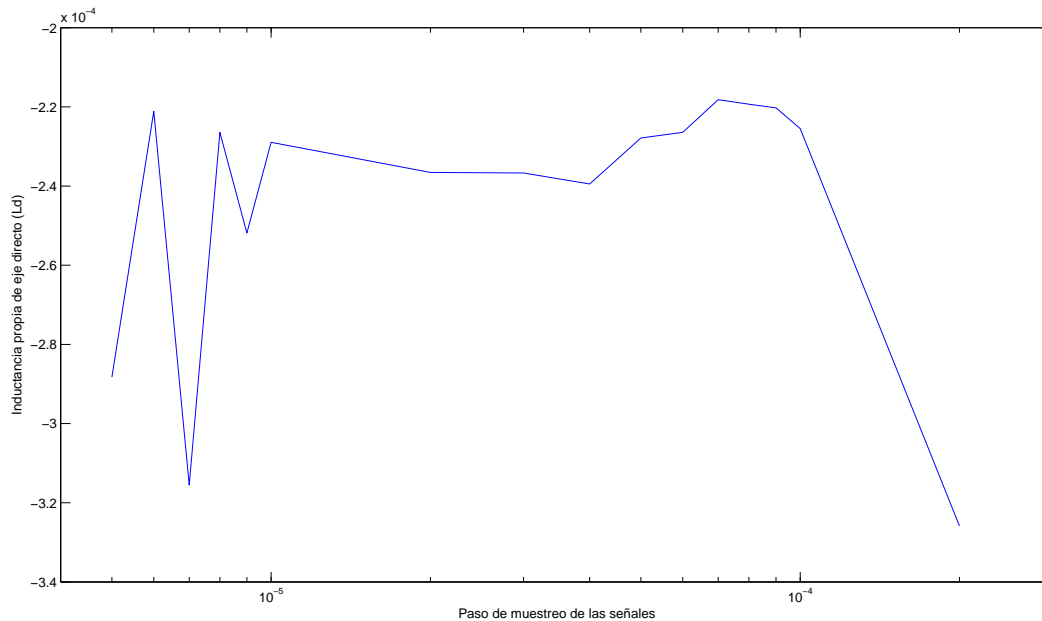


Figura 5.18: Error porcentual de la inductancia propia de eje directo al variar el paso de simulación.

Con el fin de determinar la influencia que tiene la frecuencia de muestreo en los resultados del proceso de estimación, se realizó la simulación del sistema tipo variando el paso de simulación, se utiliza el sistema tipo presentado en las secciones anteriores. A partir de los análisis realizados por *L. Wang* [Wang u. a. 2007], se limitó el paso de simulación hasta  $300ms$  para el modelo SM-59 de ATP. Con base en los resultados de cada simulación se realiza el proceso de estimación, utilizando las mismas condiciones. Los errores porcentuales calculados entre los parámetros originales y los estimados se presentan desde la figura 5.18 hasta la figura 5.29 para las diferentes frecuencias de muestreo utilizadas para las pruebas.

Para el caso de los parámetros presentados en las figuras 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21; la variación para los distintos pasos de muestreo es pequeño, por tanto no se presume de un límite en el paso de muestreo de las señales eléctricas. Sin embargo, para el caso de los parámetros de los devanados de amortiguamiento y devanado de campo es distinto, los valores se mantienen oscilando alrededor de un valor de error constante, para pasos de simulación menores a  $10^{-4}$  segundos, para valores mayores a este límite el error crece rápidamente hasta llegar a valores físicamente irreales.

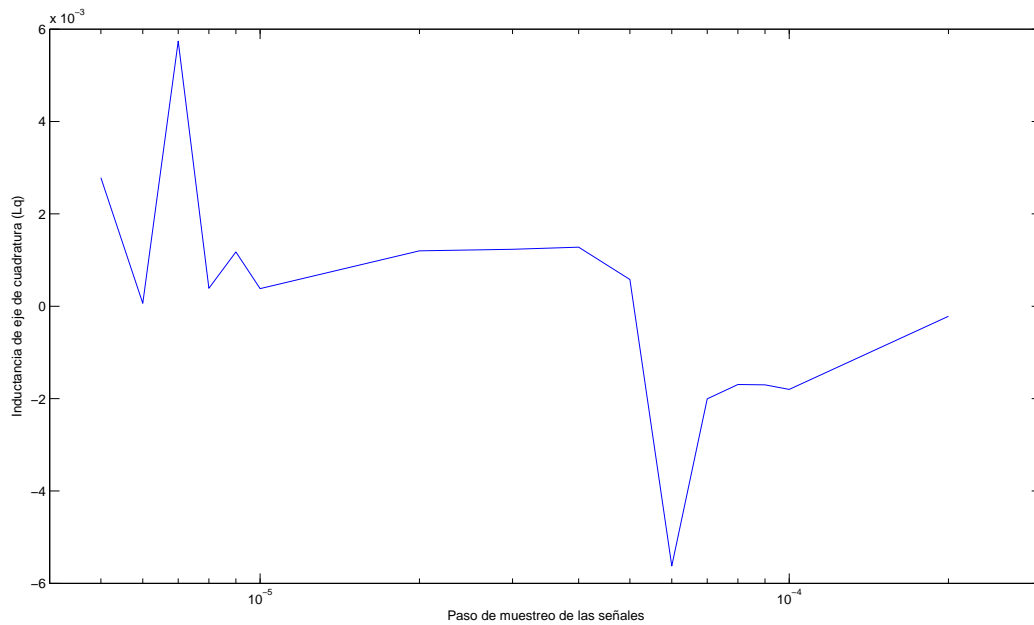


Figura 5.19: Error porcentual de la inductancia propia de eje de cuadratura al variar el paso de simulación.

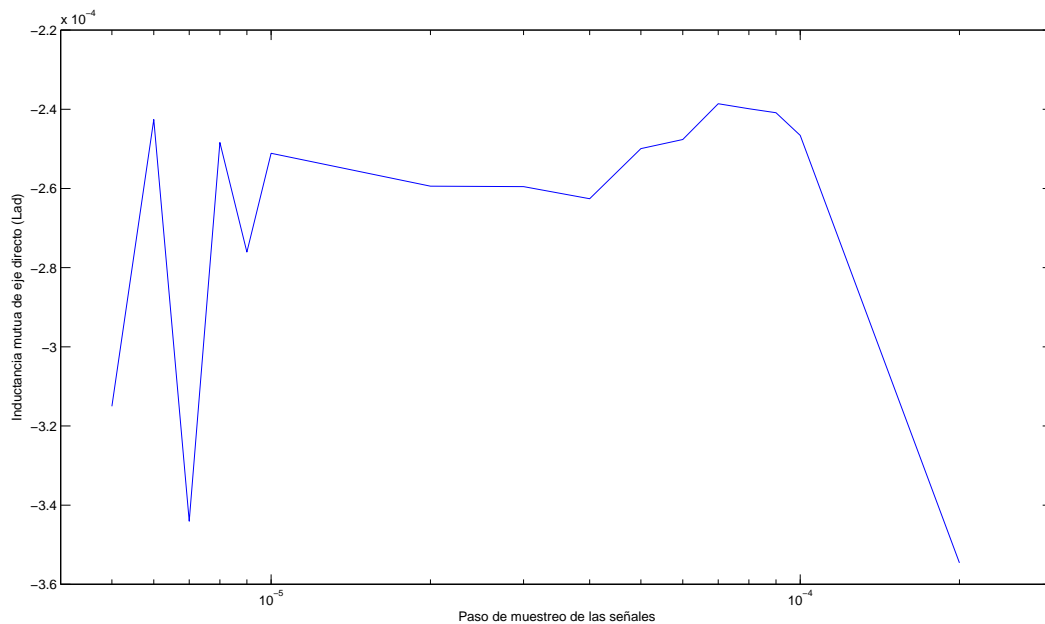


Figura 5.20: Error porcentual de la inductancia mutua de eje directo al variar el paso de simulación.

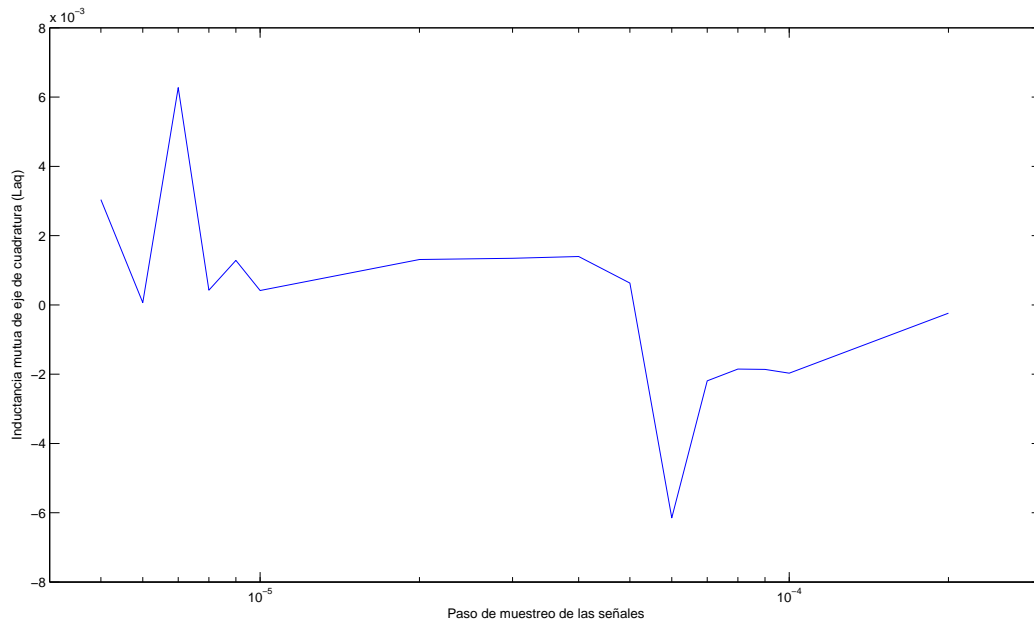


Figura 5.21: Error porcentual de la inductancia mutua del eje de cuadratura al variar el paso de simulación.

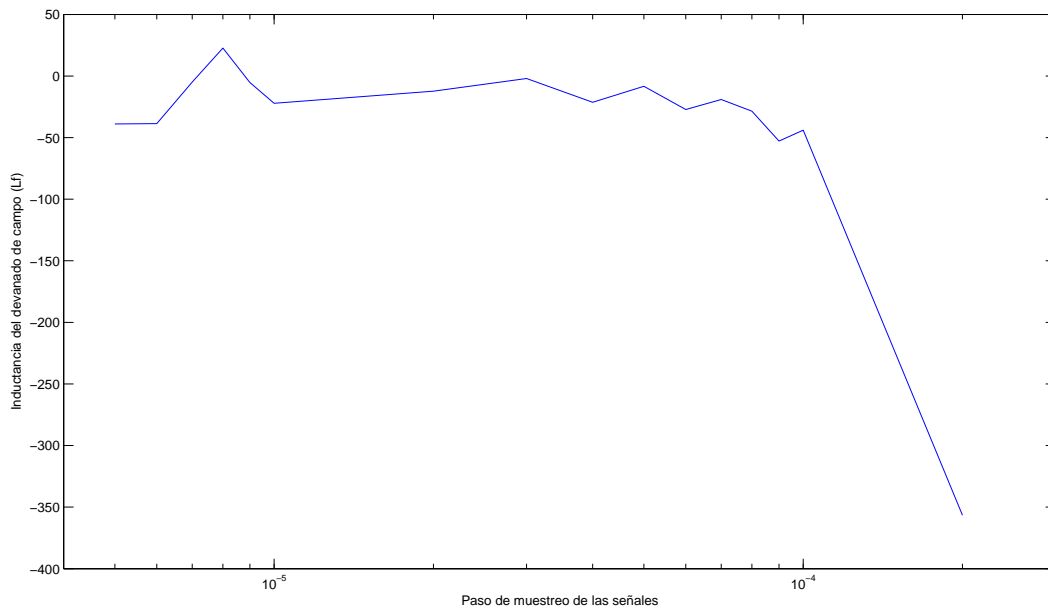


Figura 5.22: Error porcentual de la inductancia de campo al variar el paso de simulación.

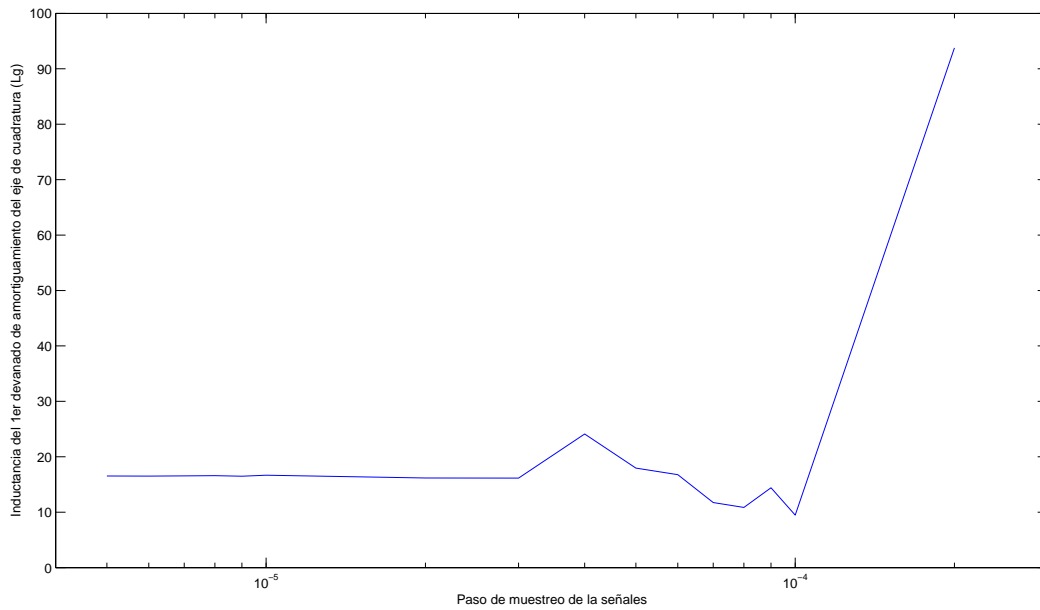


Figura 5.23: Error porcentual de la inductancia del 1er devanado de amortiguamiento del eje de cuadratura al variar el paso de simulación.

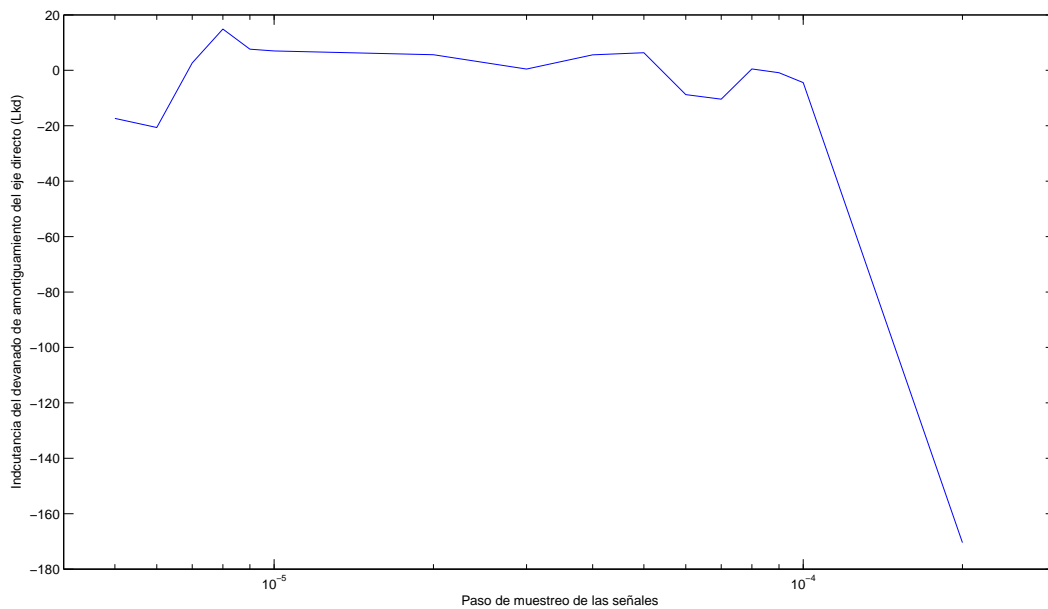


Figura 5.24: Error por centual de la inductancia del devanado de amortiguamiento del eje directo al variar el paso de simulación.

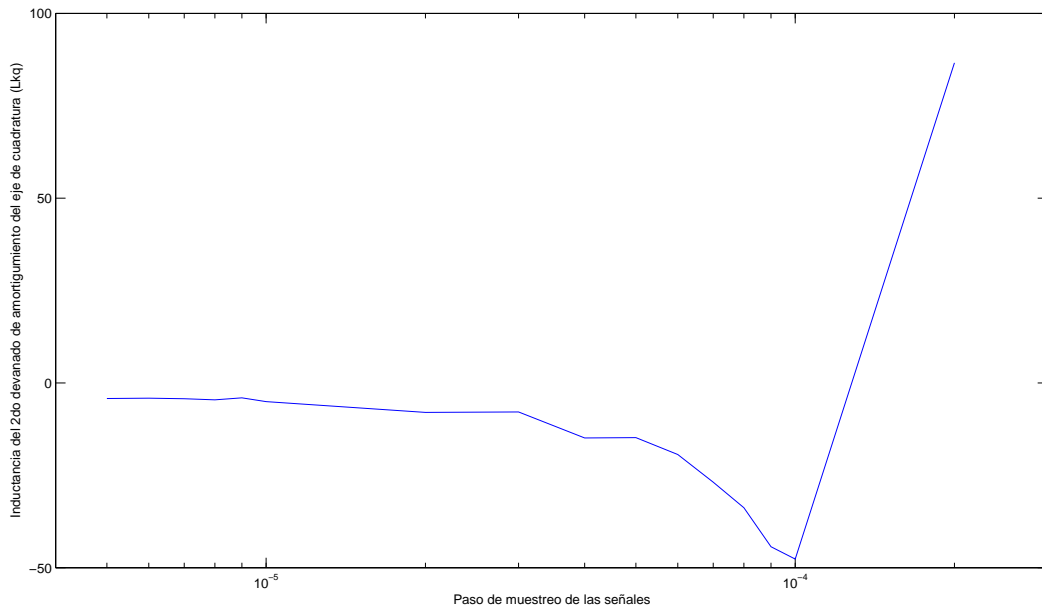


Figura 5.25: Error porcentual de la inductancia del 2do devanado de amortiguamiento del eje de cuadratura al variar el paso de simulación.

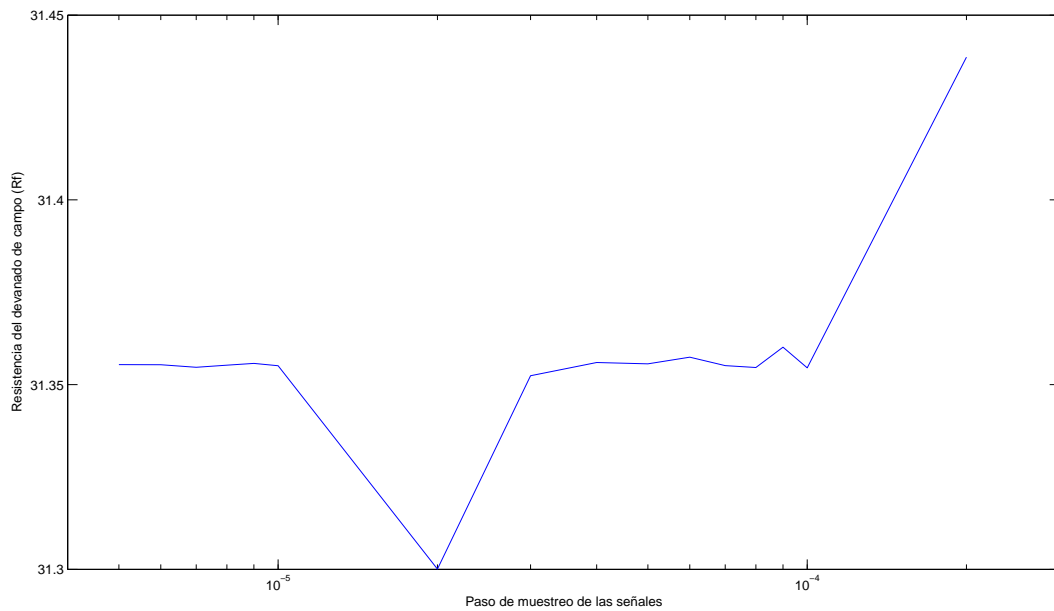


Figura 5.26: Error porcentual de la resistencia de campo al variar el paso de simulación.

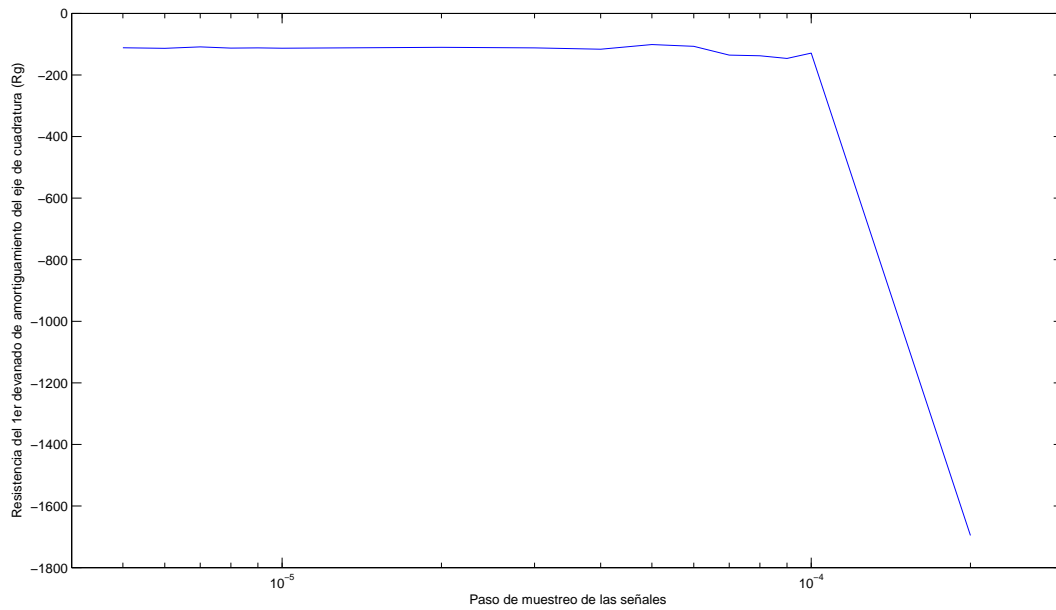


Figura 5.27: Error porcentual de la resistencia del 1er devanado de amortiguamiento del eje de cuadratura al variar el paso de simulación.

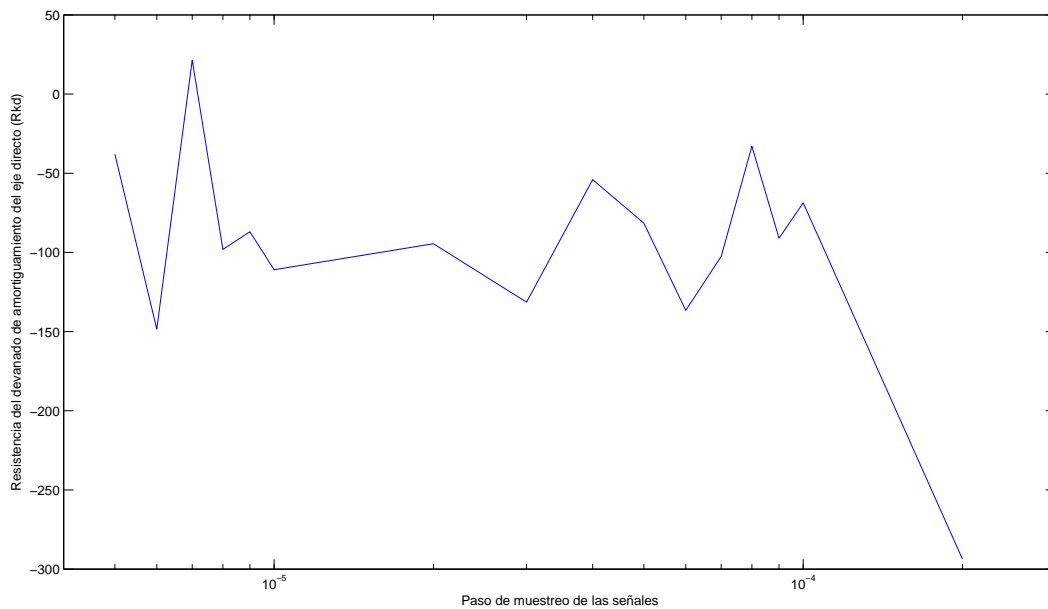


Figura 5.28: Error porcentual de la resistencia del devanado de amortiguamiento de directo al variar el paso de simulación.

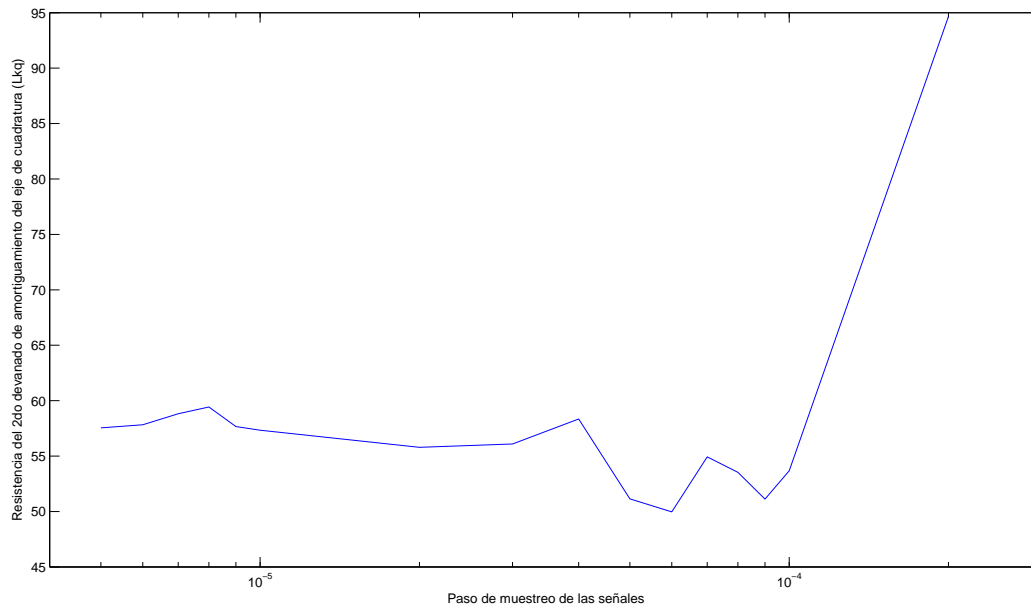


Figura 5.29: Error porcentual de la resistencia del 2do devanado de amortiguamiento de eje de cuadratura al variar el paso de simulación.

## 5.5. Sensibilidad de la metodología respecto a $R_a$ y $L_l$

Las metodologías implementadas para estimar los parámetros de la máquina síncrona requieren variables de entrada, datos tomados directamente de la operación normal de la máquina y datos nominales como la potencia, tensión y los valores de  $R_a$  y  $L_l$ . Estos últimos datos influyen en el proceso de estimación y son factores importantes en el resultado final. Sin embargo, para el caso de la metodología implementada, es ambigua aún la relación que existe entre estos valores de entrada y los resultados de la estimación.

Un análisis de sensibilidad permite determinar la robustez del proceso ante ciertos valores de entrada y determinar el nivel de influencia de cada valor de entrada. Además, los análisis de sensibilidad permiten determinar las debilidades de las metodologías y modificarlas con el fin de contar con un proceso más robusto y con un rango amplio de aplicación. En la literatura se presentan algunos análisis realizados a diferentes metodologías de estimación, las cuales son tomadas como una etapa necesaria del proceso de implementación [Keyhani u. Dayal 1989a], [Keyhani u. Dayal 1989b], [Zhao u. Xu 1995]. En esta sección se presenta un análisis de sensi-

bilidad realizado a la metodología implementada respecto a los valores de entrada  $R_a$  y  $L_l$ .

### 5.5.1. Análisis matemático de la influencia de $R_a$ y $L_l$

Para determinar las inductancias  $L_d$  y  $L_q$  se utilizan las relaciones en estado estable, estas relaciones requieren del valor de  $R_a$ , por tanto, la influencia de estos parámetros es directamente proporcional con respecto a este valor. Por otro lado, mediante la prueba de vacío se determina el producto  $aL_{ad}$ , estos valores no se puede determinar por separados,  $a$  y  $L_{ad}$  sin contar con el valor  $L_l$ . Así, la inductancia de dispersión influye directamente en el cálculo de  $a$ ,  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$ . La resistencia de armadura se utiliza para determinar los flujos magnéticos mediante la extrapolación lineal del sistema, este valor influye en las señales resultantes del proceso. A partir de estas señales de flujo se determinan las corrientes en los devanados de amortiguamiento, las cuales se utilizan para determinar  $R_f, L_f, R_{kd}, L_{kd}, R_g, L_g, R_{kq}, L_{kq}$ ; entonces existe una relación indirecta entre la resistencia de armadura y los parámetros antes mencionados. Para el caso de  $L_l$ , el valor se utiliza para determinar  $L_d, L_{ad}, L_q$  y  $L_{aq}$  como se había mencionado. Con base en estos parámetros se determinan las corrientes de amortiguamiento y con estas realizar la estimación de los parámetros de los devanados de amortiguamiento. Por tanto una variación de  $L_l$  afecta también de forma indirecta y en un grado desconocido la estimación de los parámetros  $R_f, L_f, R_{kd}, L_{kd}, R_g, L_g, R_{kq}, L_{kq}$ . En resumen no existe una forma analítica de precisar el grado y la forma de influencia de estos datos entrada en los parámetros.

### 5.5.2. Descripción del proceso de análisis

Para analizar la influencia de  $R_a$  y  $L_l$  se utiliza el sistema descrito en la secciones anteriores, en la tabla 5.1 se presentan los datos característicos de la máquina, los resultados de la estimación utilizando los datos reales de resistencia de armadura y la inductancia de dispersión. Además, se calcula el error relativo porcentual entre el error real y el error estimado. Para realizar este proceso se toma el sistema y se simula, se adquieren las señales de tensión y corriente. Se realiza el proceso de estimación variando de forma gradual  $R_a$  y  $L_l$ , para cada valor se realiza la estimación de los parámetros y se determina los errores de la estimación.

Para el paso de determinación de los errores de la estimación se realizan dos procesos, el primero es la estimación directa de los errores relativos de los parámetros, el otro proceso es tomar los parámetros producto de la estimación y realizar una nueva simulación para analizar las diferencias entre las señales producto de esta simulación y las señales originales. Para valorar estas diferencias se calculo la integral de la resta entre las corrientes originales y las corrientes obtenidas mediante los parámetros estimados.

En las figuras 5.30 y 5.31 se presentan los errores relativos porcentuales entre los valores de las inductancias reales y los valores estimados variando  $R_a$  de forma gradual, las figuras 5.32 y 5.33 presentan los errores relativos entre los valores de las resistencias reales y los valores estimados variando  $R_a$ . Las figuras 5.34, 5.35, 5.36 y 5.37 presentan los errores antes mencionados variando el valor de  $L_l$ .

Los errores de  $L_d$ ,  $L_{ad}$ ,  $L_q$ ,  $L_{aq}$ ,  $L_f$  y  $L_{kd}$  varían de forma lineal con respecto a la variación de  $R_a$ , esta relación se mantiene al variar  $L_l$ , a excepción de  $L_d$  y  $L_q$ , los cuales son independientes del valor de  $L_l$ . La pendiente de la línea que describe el error de la estimación para el caso de  $L_l$  es mayor que para el caso de  $R_a$ . La variación del error en la estimación de  $L_g$  y  $L_{kq}$  es fuerte, para el caso de las variaciones de  $R_a$  los parámetros varían siguiendo una misma forma, descienden y aumentan en los mismos puntos, de igual forma sucede para el caso de  $L_l$ , la similitud en la forma de las variaciones se mantienen.

La variación  $R_{kd}$  sigue una tendencia lineal, con una pendiente pequeña, en el caso de  $R_f$  el valor del error es contante, no existe una variación práctica, es por esto que la influencia de  $R_a$  y  $L_l$  en estos resultados es pequeña. Para el caso del valor de  $R_g$ , los resultados muestran todo lo contrario, este valor es sensible a las variaciones realizadas a partir de estos datos de entrada. Las variaciones de  $R_{kq}$  no es lineal, las variaciones entre estos últimos parámetros no mantienen ninguna simetría entre ellas.

Las figuras 5.38 y 5.39 presentan el índice de error de las corrientes  $I_d$  e  $I_q$  respectivamente para la variación de  $R_a$ . De igual forma, en las figuras 5.40 y 5.41 se presentan los índices de error para  $I_d$  e  $I_q$  variando  $L_l$ . El valor del índice es pequeño, sin embargo, la variación del índice con respecto a  $R_a$  es bastante significativo. Para el caso del índice de error con respecto a  $L_l$ , el valor permanece constante ante las variaciones en un rango amplio, desde  $-5\%$  hasta el límite inferior de  $-10\%$ <sup>3</sup>, el error

<sup>3</sup>Las variaciones de  $R_a$  y  $L_l$  se realizaron desde  $-10\%$  hasta  $10\%$ , pero un grupo de estimaciones

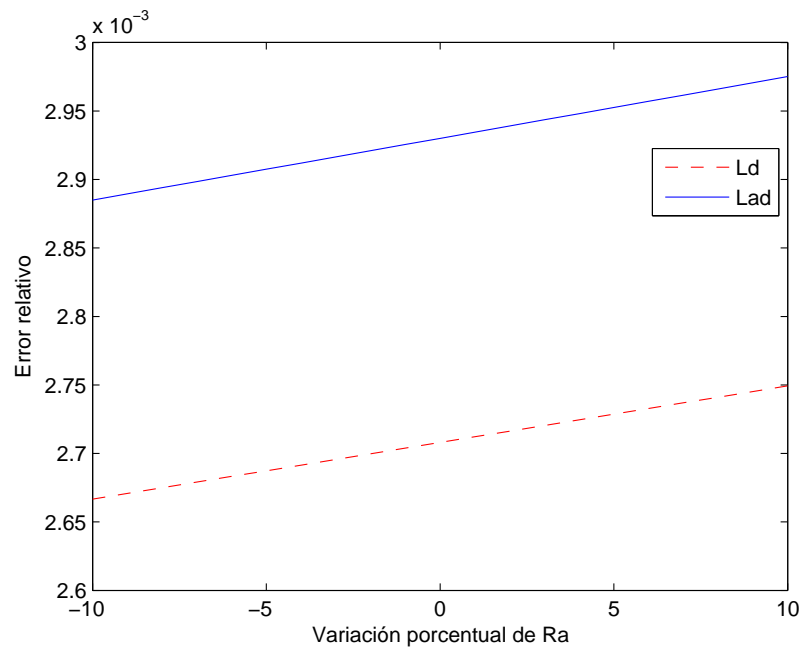


Figura 5.30: Error relativo de  $L_d$  y  $L_{ad}$  al variar  $R_a$ .

aumenta rápidamente de forma lineal, la pendiente del índice de  $I_d$  es contraria a la pendiente del índice de  $I_q$ .

La variación de los datos de entrada  $R_a$  y  $L_l$  afectan las estimaciones de los parámetros, en algunos casos, los parámetros toman valores muy distantes al valor real y el error es de orden muy superior. Además, el índice de error tiene una variación grande en el caso de  $R_a$ , en el caso de  $L_l$  este índice no es afectado de igual forma que el caso anterior. En conclusión, una buena estimación requiere de datos exactos de  $R_a$  y  $L_l$ , en mayor medida de  $R_a$ , ya que es de mucha más influencia en el proceso.

### 5.5.3. Método alternativo para estimar $R_a$

En muchas ocasiones no se cuenta con un valor aproximado de  $R_a$ <sup>4</sup>. Además, contando con el valor suministrado por el fabricante, este valor debe ser corregido por temperatura. Lo que implica una incertidumbre en el resultado final, debido a que

obtenidas no convergieron al realizar las simulaciones en ATP.

<sup>4</sup>El dato de resistencia de armadura es suministrada por el fabricante, pero en caso de no contar con este dato, es necesario realizar la respectiva medición donde probablemente se obtengan medidas con bastante incertidumbre.

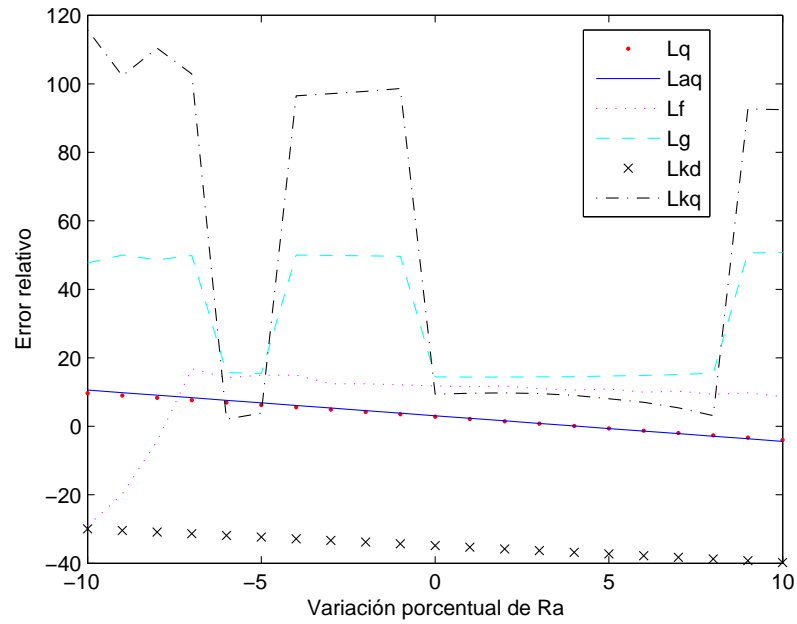


Figura 5.31: Error relativo de  $L_q$ ,  $L_{aq}$ ,  $L_f$ ,  $L_g$ ,  $L_{kd}$  y  $L_{kq}$  al variar  $R_a$ .

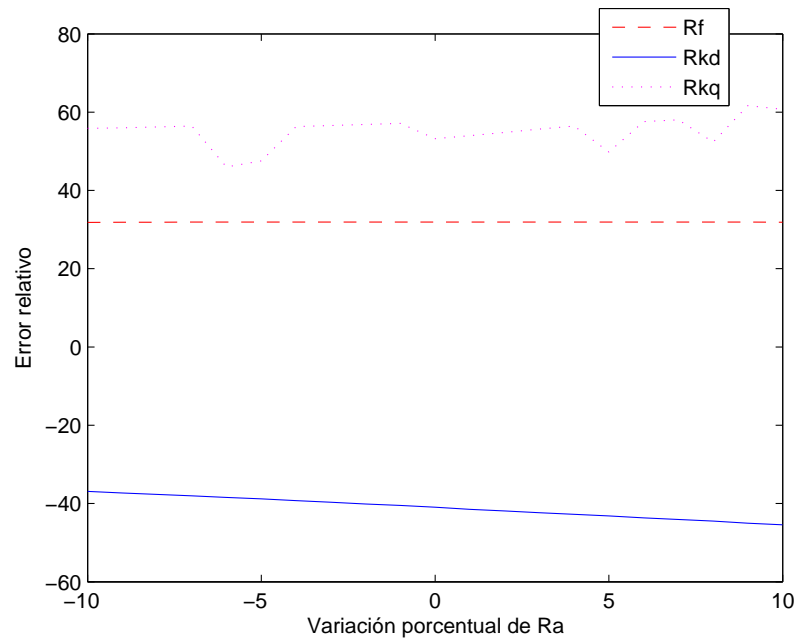


Figura 5.32: Error relativo de  $R_f$ ,  $R_{kd}$  y  $R_{kq}$  al variar  $R_a$ .

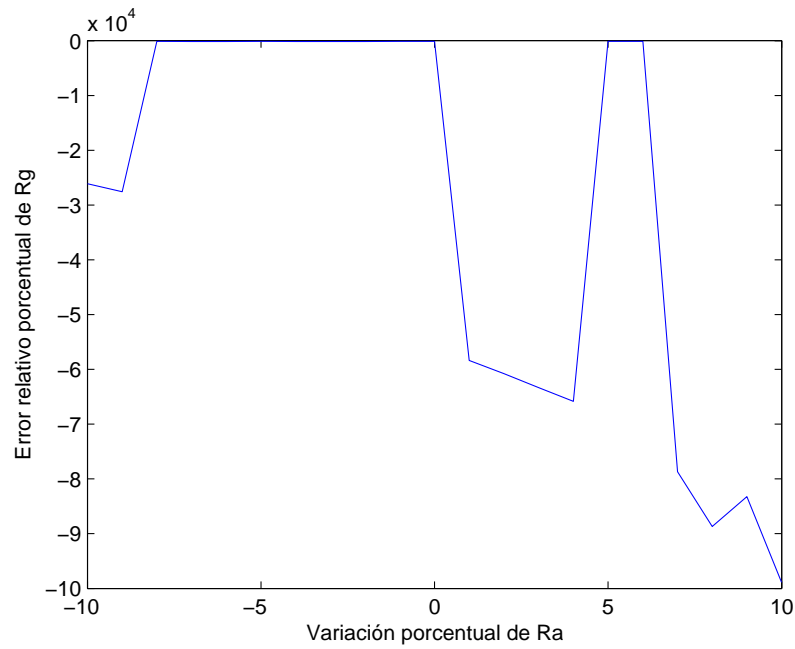


Figura 5.33: Error relativo de  $R_g$  al variar  $R_a$ .

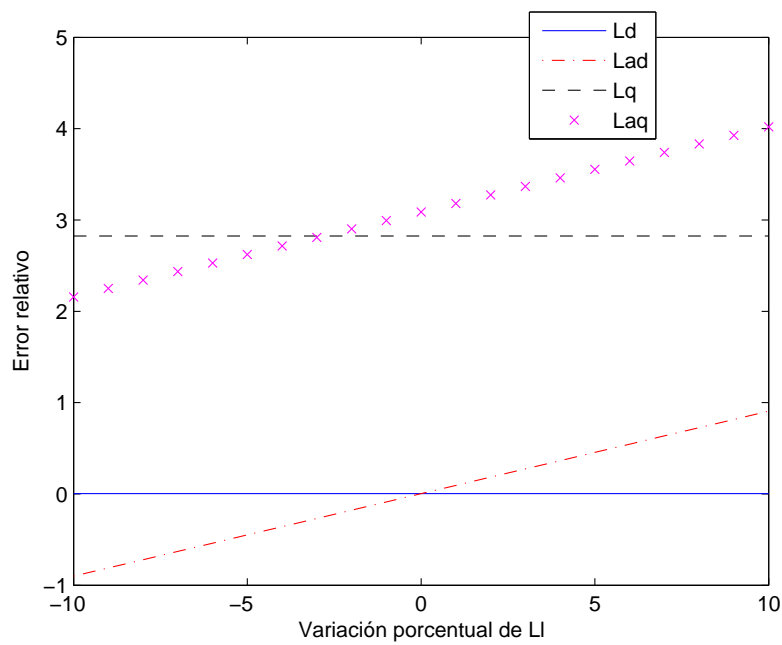


Figura 5.34: Error relativo de  $L_d, L_{ad}, L_q$  y  $L_{aq}$  al variar  $L_l$ .

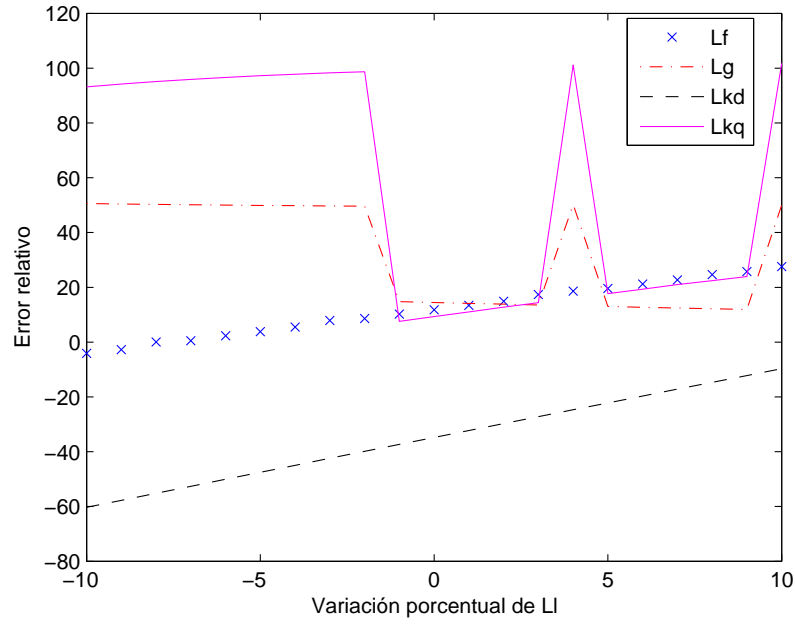


Figura 5.35: Error relativo de  $L_f$ ,  $L_g$ ,  $L_{kd}$  y  $L_{kq}$  al variar  $L_l$ .

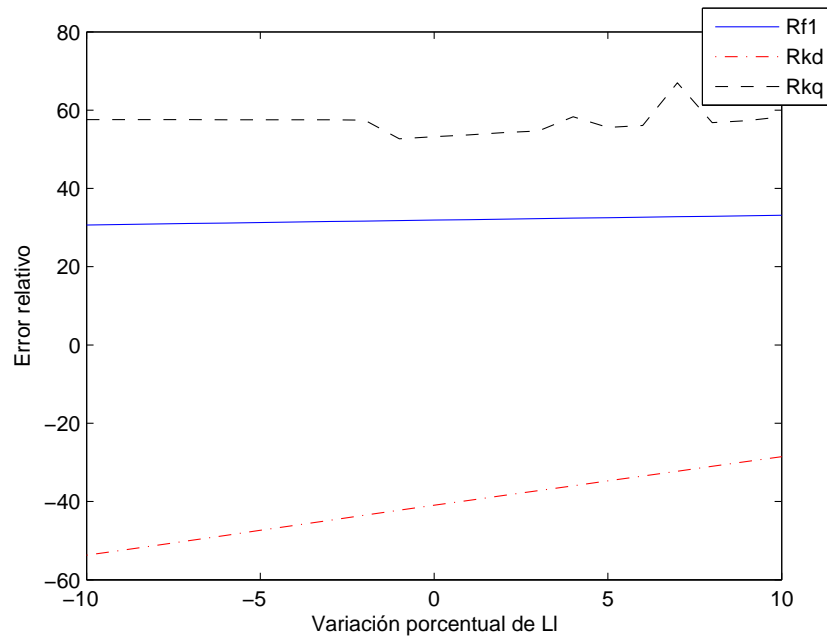
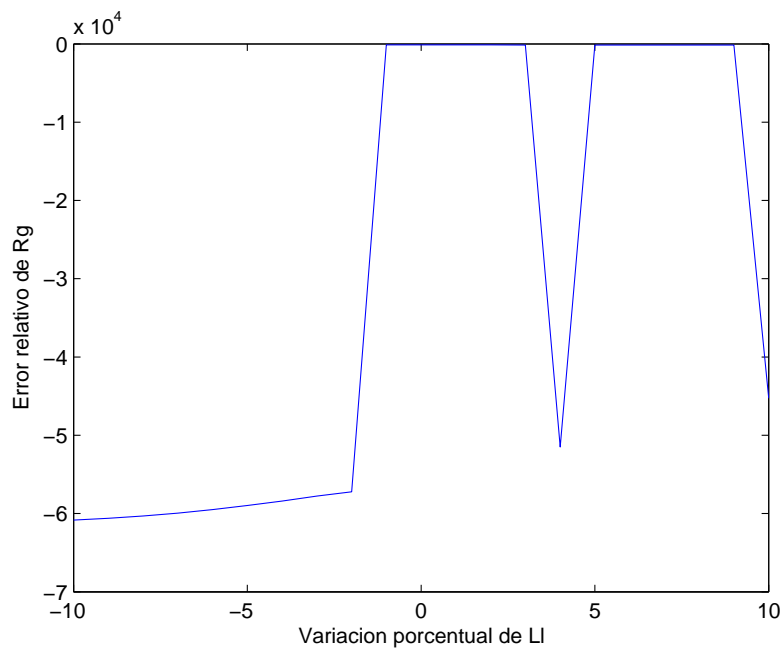
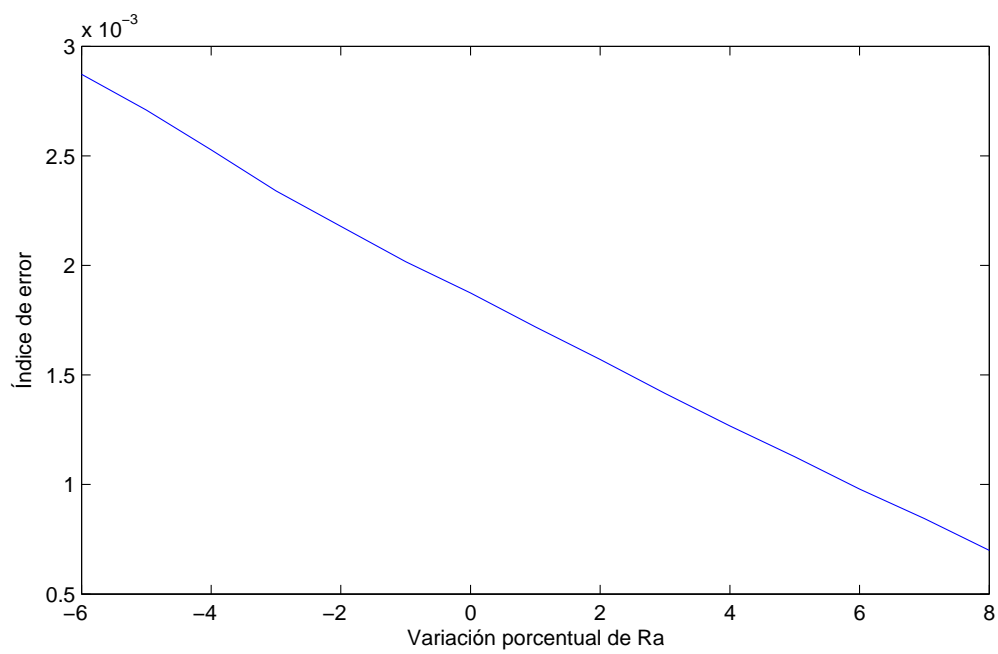


Figura 5.36: Error relativo de  $R_f$ ,  $R_{kd}$  y  $R_{kq}$  al variar  $L_l$ .

Figura 5.37: Error relativo de  $R_g$  al variar  $L_l$ .Figura 5.38: Índice de error de  $I_d$  al variar  $R_a$ .

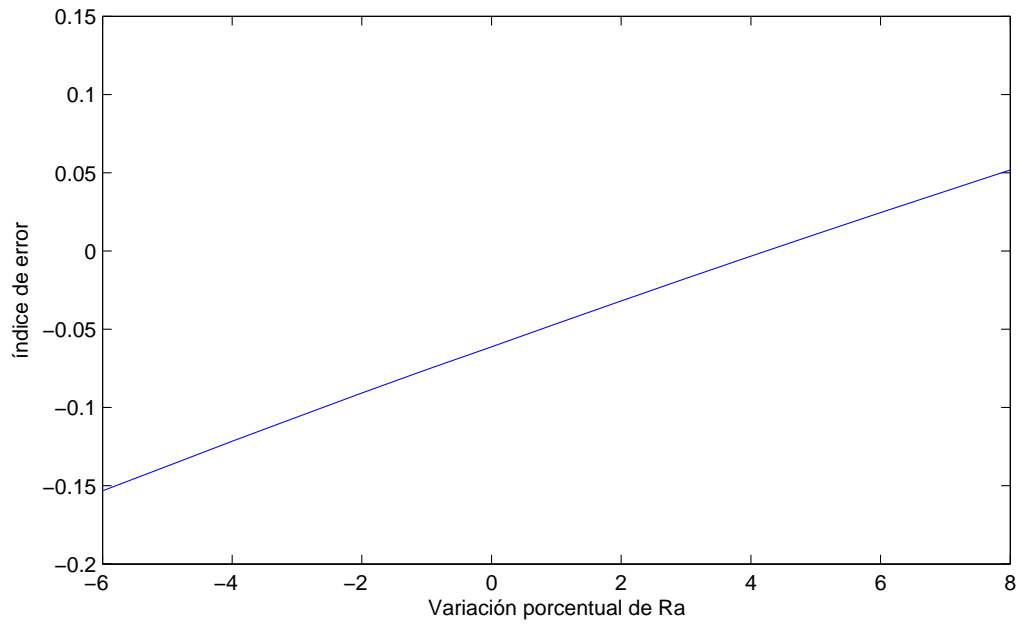


Figura 5.39: Índice de error de  $I_q$  al variar  $R_a$ .

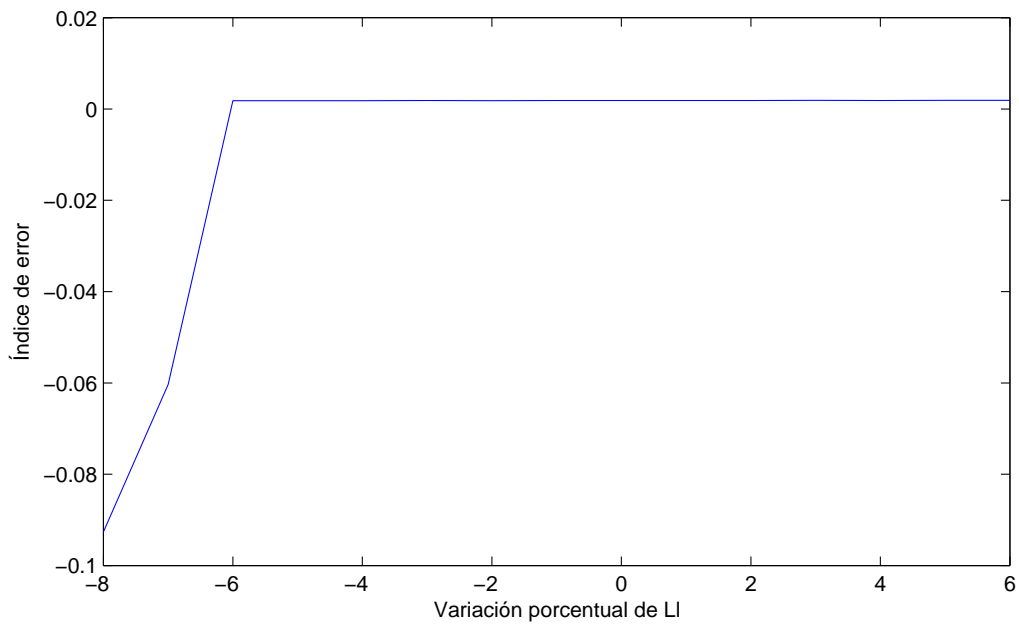


Figura 5.40: Índice de error de  $I_d$  al variar  $L_l$ .

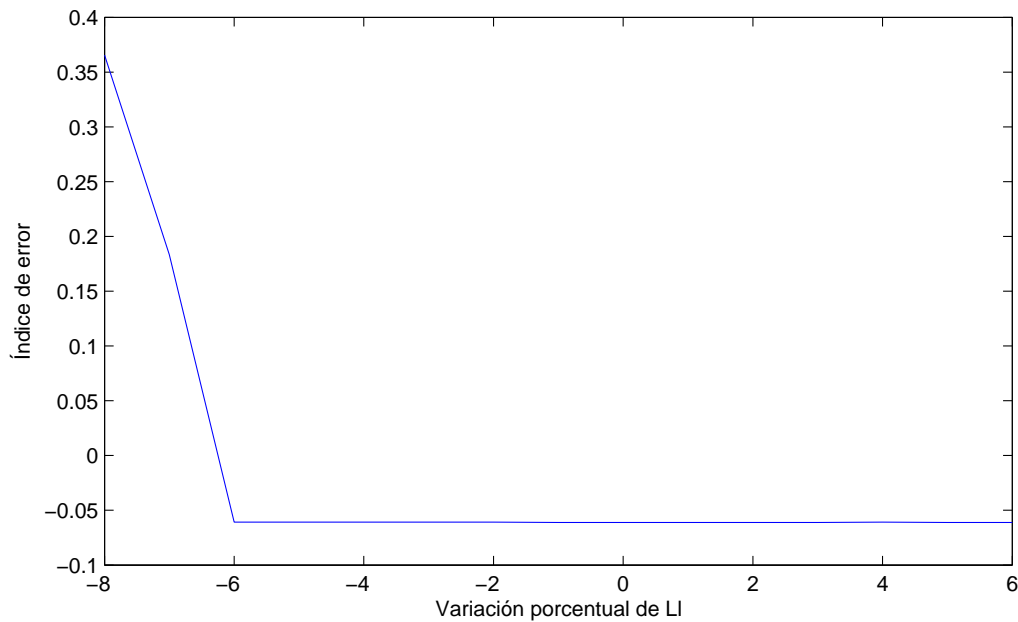


Figura 5.41: Índice de error de  $I_q$  al variar  $L_l$ .

no se conoce la temperatura exacta de los devanados internos de la máquina en el punto de operación deseado. Por tanto, existe un error en el dato de entrada de la resistencia  $R_a$ .

Es por esto que se presenta un método alternativo, práctico y exacto para estimar el valor de la resistencia de armadura a partir de dos puntos de operación diferentes del sistema en estado estable. Las ecuaciones 5.2 y 5.3 satisfacen dos puntos de operación de la máquina en estado estable. A partir de estas dos ecuaciones se determina fácilmente el valor de  $R_a$  y  $L_q$ . El proceso es muy sencillo y es una excelente forma de eliminar muchas incertidumbres en las estimaciones.

$$w_{r1}I_{q1}(Lq) = V_{d1} + R_a I_{d1} \quad (5.2)$$

$$w_{r2}I_{q2}(Lq) = V_{d2} + R_a I_{d2} \quad (5.3)$$

Este método es fácil de implementar y práctico. Además, si se cuenta con un buen adquisidor de datos no existirá un error lo suficientemente alto para influir en el proceso de estimación.

## 5.6. Influencia del ruido en el proceso de estimación

Las señales de ruido están frecuentemente mezcladas en las señales eléctricas adquiridas, estas señales se generan bajo diferentes factores como problemas en el sistema de puesta a tierra de la máquina o la suma de armónicos de alta frecuencia inducidos en los devanados. En esta sección se pretende conocer la influencia de las señales de ruido en la metodología implementada. Para esto se tomaron las señales producto de la simulación del modelo de la máquina presentada en las secciones anteriores y se les adicionó una señal de ruido. En la primera parte de esta sección se analiza la influencia del ruido blanco y la segunda parte se dedica a conocer la influencia del ruido coloreado en la metodología.

### 5.6.1. Influencia del ruido blanco

La definición y características del ruido blanco se presentan en los apéndices. El ruido blanco se adiciona a las señales de corriente y tensión antes de realizar la estimación. En las figuras 5.42, 5.43 y 5.44 se presentan las corrientes mezcladas con el ruido blanco. La amplitud del ruido blanco utilizado está limitado por la variación de la corriente de campo. La parte transitoria de esta señal tiene una amplitud muy pequeña, si se utiliza una amplitud de ruido mayor a la amplitud de la oscilación transitoria de la señal se perderá la información contenida en la señal, y es imposible obtener una estimación aproximada de los parámetros. Como se puede ver en las figuras 5.42 y 5.43, la señal de ruido presente en la corriente de eje directo y la corriente de eje de cuadratura no es percibida con facilidad, debido a que la oscilación transitoria de estas corrientes son muchos mayores a la amplitud de la oscilación de la corriente de campo. En la tabla 5.3 se presentan los parámetros estimados con la metodología utilizando diferentes amplitudes de ruido. En estas tablas es posible ver como los resultados de la estimación se hacen menos aproximados a medida que la amplitud de la señal de ruido aumenta. Los parámetros que se afectan en mayor medida son los parámetros de los devanados de amortiguamiento, debido a que sus estimaciones se realizan en las etapas finales de la metodología<sup>5</sup>.

Para evitar el aumento incontrolado del ruido al derivar las señales, se implementó

---

<sup>5</sup> La metodología requiere extrapolar y derivar las señales, esto hace que el ruido afecte en gran medida los procesos finales de la estimación.

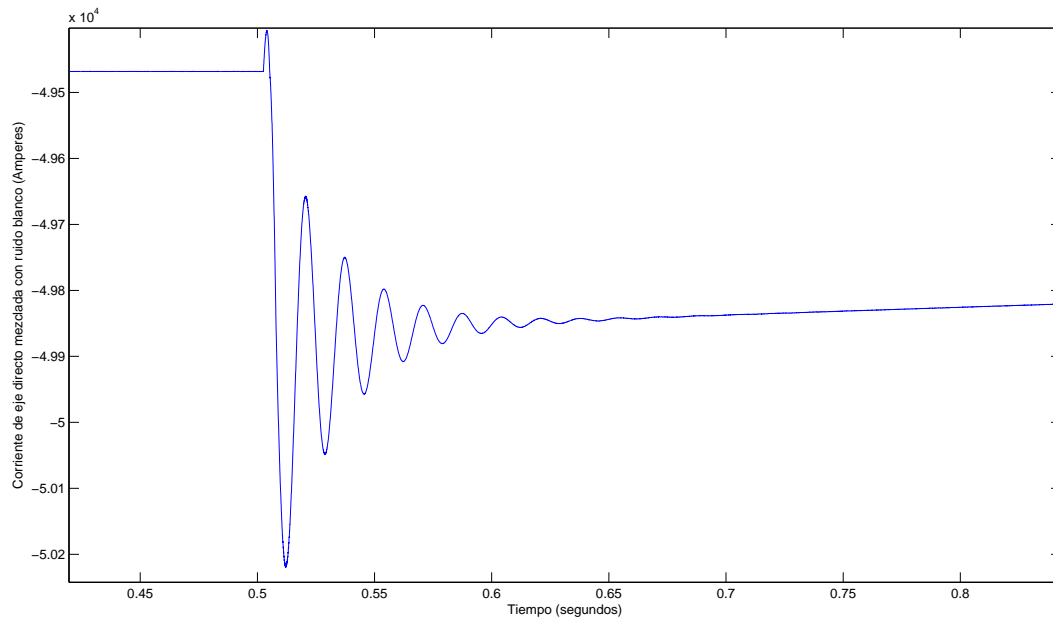


Figura 5.42: Corriente de eje directo mezclada con ruido blanco.

un sistema de derivación a modo de filtro presentado en los apéndices. Con base en los parámetros estimados para las diferentes amplitudes de ruido blanco, se determinó la variación porcentual de estos, los cuales se presentan en la tabla 5.4.

### 5.6.2. Influencia del ruido coloreado

De igual forma que en el caso anterior, el ruido coloreado se mezcla con las señales de corriente y tensión. Las características básicas de este tipo de ruido se presentan en los apéndices. En las figuras 5.45, 5.46 y 5.47 se presentan las corrientes de eje directo, eje de cuadratura y corriente de campo respectivamente. La amplitud del ruido utilizada en esta prueba está limitada por la oscilación transitoria de la corriente de campo, debido a la misma razón que en el caso anterior. El ruido coloreado es uniforme y presenta una serie de picos periódicos, la cual difiere bastante del ruido blanco. Al comparar las señales de las figuras 5.45, 5.46 y 5.47 con las señales de las figuras 5.42, 5.43 y 5.44, se concluye que el ruido blanco afecta más las señales de corriente y tensión que el ruido coloreado.

En la tabla 5.5 se presentan los resultados de la estimación para diferentes amplitudes

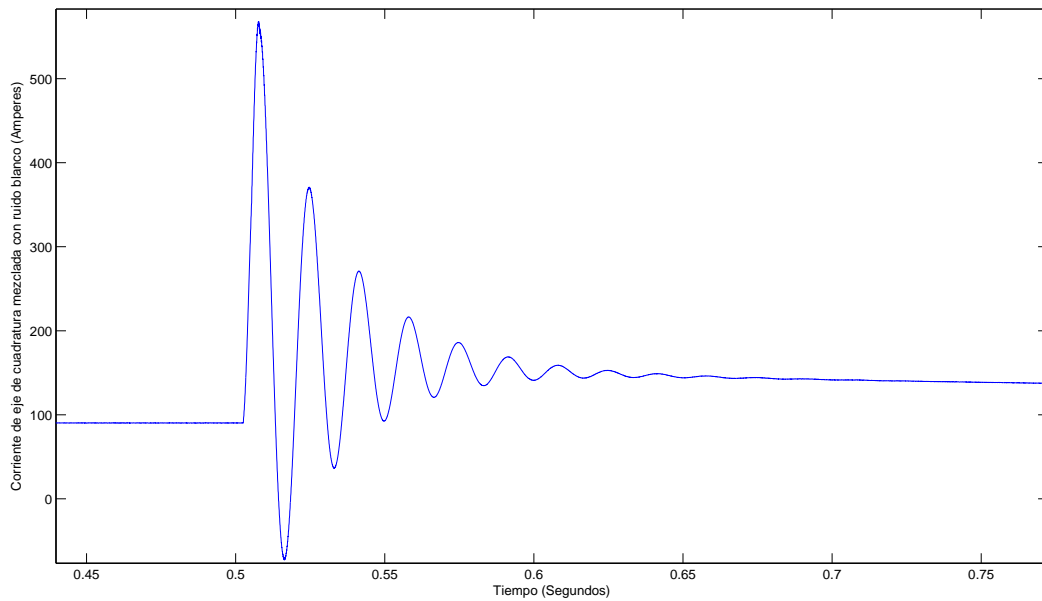


Figura 5.43: Corriente de eje de cuadratura mezclada con ruido blanco.

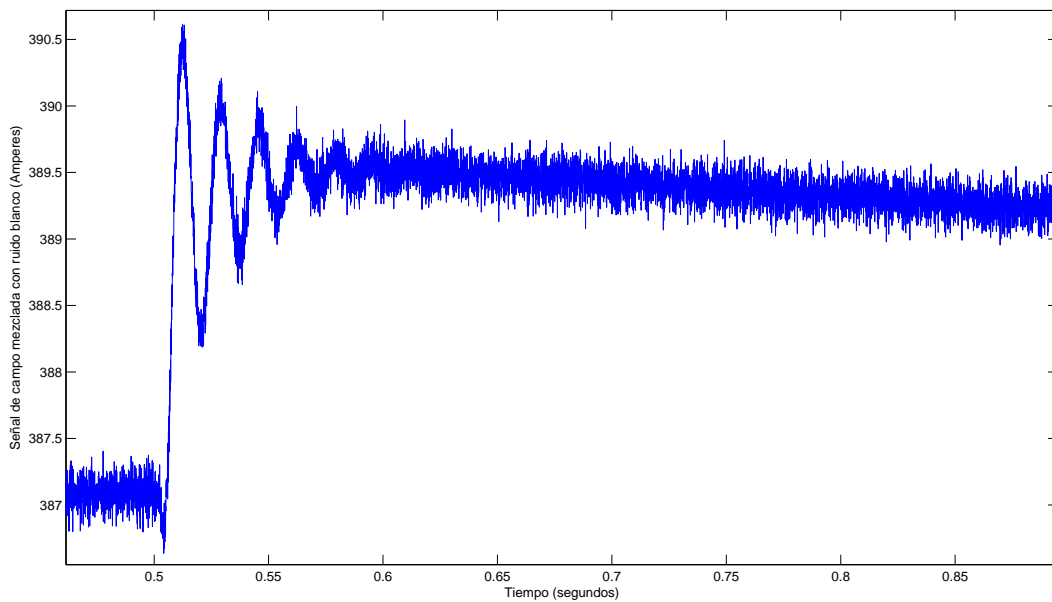


Figura 5.44: Corriente de campo mezclada con ruido blanco.

Cuadro 5.3: Parámetros estimados bajo diferentes niveles de ruido blanco.

Amplitud	$L_d$	$L_q$	$L_{od}$	$L_{oq}$	$L_f$	$L_g$	$L_{kd}$	$L_{kq}$	$R_f$	$R_{kd}$	$R_g$	$R_{kq}$
0,00	1,8100	1,7118	1,6600	1,5618	0,1411	0,6405	0,2063	0,1169	0,0004	0,0425	0,0147	0,0113
0,01	1,8090	1,7106	1,6599	1,5606	0,1519	0,6702	0,1829	0,1251	0,0004	0,0380	0,0138	0,0122
0,02	1,8090	1,7106	1,6599	1,5606	0,1539	0,6431	0,1657	0,1333	0,0004	0,0379	0,0128	0,0094
0,03	1,8090	1,7106	1,6599	1,5606	0,1521	0,0	0,1437	0,0	0,0004	0,0392	0,0	0,0
0,04	1,8090	1,7105	1,6599	1,5605	0,1523	0,0188	0,1286	0,0032	0,0004	0,0393	0,4397	0,0110
0,05	1,8090	1,7093	1,6599	1,5593	0,1527	0,0415	0,1152	0,0205	0,0004	0,0401	1,2430	0,0107
0,06	1,8090	1,7097	1,6599	1,5597	0,1494	0,1743	0,1018	0,1074	0,0004	0,0396	3,8046	0,0107
0,07	1,8090	1,7104	1,6599	1,5604	0,1496	0,6889	0,0914	0,1630	0,0004	0,0402	0,0123	0,0099
0,08	1,8090	1,7096	1,6599	1,5596	0,1485	0,1633	0,0791	0,1437	0,0004	0,0405	4,3739	0,0100
0,09	1,8090	1,7093	1,6599	1,5593	0,1477	0,0690	0,0660	0,0329	0,0004	0,0406	2,9000	0,0104
0,10	1,8090	1,7095	1,6599	1,5595	0,1502	0,1547	0,0556	0,0871	0,0004	0,0394	5,7392	0,0103

Cuadro 5.4: Error relativo de los parámetros estimados bajo diferentes niveles de ruido blanco.

Amplitud	$L_d$	$L_g$	$L_{ad}$	$L_{ag}$	$L_f$	$L_g$	$L_{kd}$	$L_{kg}$	$R_f$	$R_{kd}$	$R_g$	$R_{kg}$
0,01	-0,0028	-0,0749	-0,0031	-0,0821	7,7145	4,6282	-11,3531	6,9560	-0,0068	-10,5501	-6,1511	7,3105
0,02	-0,0029	-0,0742	-0,0032	-0,0813	9,0843	0,3963	-19,7150	13,9840	-0,0061	-10,7714	-13,2980	16,9890
0,03	-0,0030	-0,0751	-0,0033	-0,0823	7,8144	-	-30,3363	-	-0,0024	-7,6148	-	-
0,04	-0,0031	-0,0797	-0,0033	-0,0873	7,9871	-97,0685	-37,6922	-97,2637	-0,0023	-7,4558	2889,70	-3,3558
0,05	-0,0031	-0,1464	-0,0034	-0,1605	8,2286	-93,5238	-44,1839	-82,5077	-0,0007	-5,5909	8351,20	-5,7848
0,06	-0,0032	-0,1238	-0,0034	-0,1357	5,9196	-72,787	-50,6732	-8,1344	-0,0033	-6,6377	257670,0	-5,8414
0,07	-0,0032	-0,0838	-0,0035	-0,0919	6,0503	-7,5471	-55,7048	-39,4315	-0,0020	-5,2588	16,1739	-13,0421
0,08	-0,0032	-0,1320	-0,0035	-0,1446	5,2563	-74,5075	-61,6535	-22,9457	-0,0054	-4,6645	29638,0	-11,8058
0,09	-0,0033	-0,1454	-0,0036	-0,1593	4,7176	-89,2267	-68,0243	-71,8737	-0,0007	-4,4889	196170,0	-8,6332
0,10	-0,0033	-0,1357	-0,0036	-0,1487	6,4747	-75,8552	-73,0489	-25,5155	0,0054	-7,3091	38920,0	-9,5892

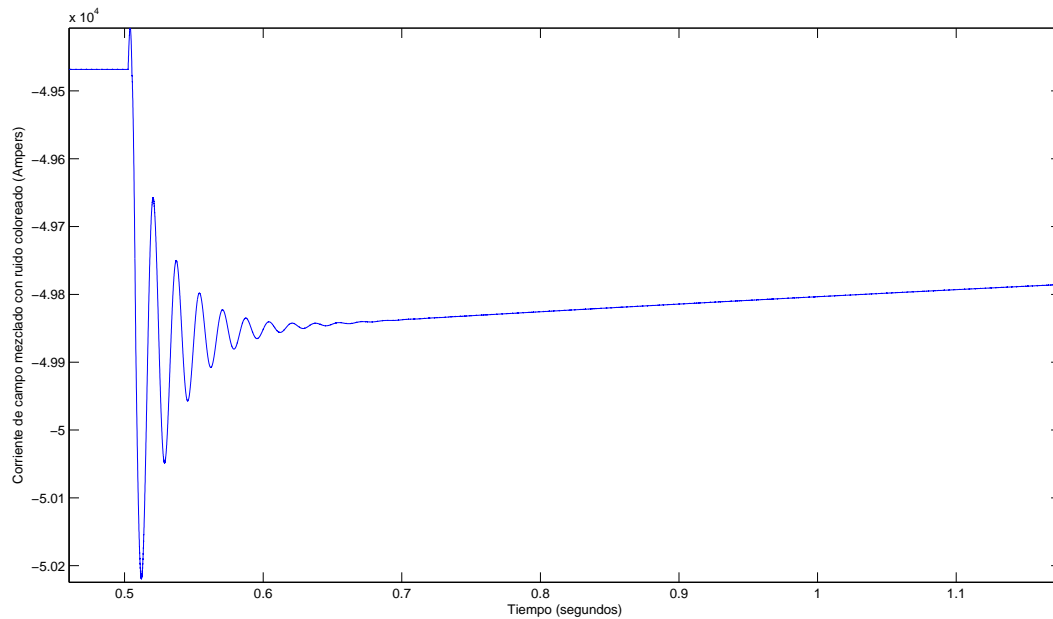


Figura 5.45: Corriente de eje directo mezclado con ruido coloreado.

de ruido coloreado. A medida que la amplitud de la señal de ruido aumenta los resultados se hacen menos aproximados. Por tanto, el problema de la influencia de ruido en los resultados de la metodología se da también para el caso de ruido coloreado<sup>6</sup>. Sin embargo, el nivel de influencia del ruido coloreado en los resultados es menor. A diferencia con la prueba anterior, en esta prueba se utilizaron señales de ruido con el doble de la amplitud que las utilizadas para el caso del ruido blanco. A pesar de haber duplicado la amplitud, con este tipo de ruido se obtiene una menor distorsión de los resultados de la estimación. Para un mejor análisis en la tabla 5.6 se presentan los errores relativos porcentuales de los valores estimados con el ruido coloreado con respecto a los parámetros estimados sin ruido.

<sup>6</sup>La influencia de ruido se da para todos los tipo de ruido

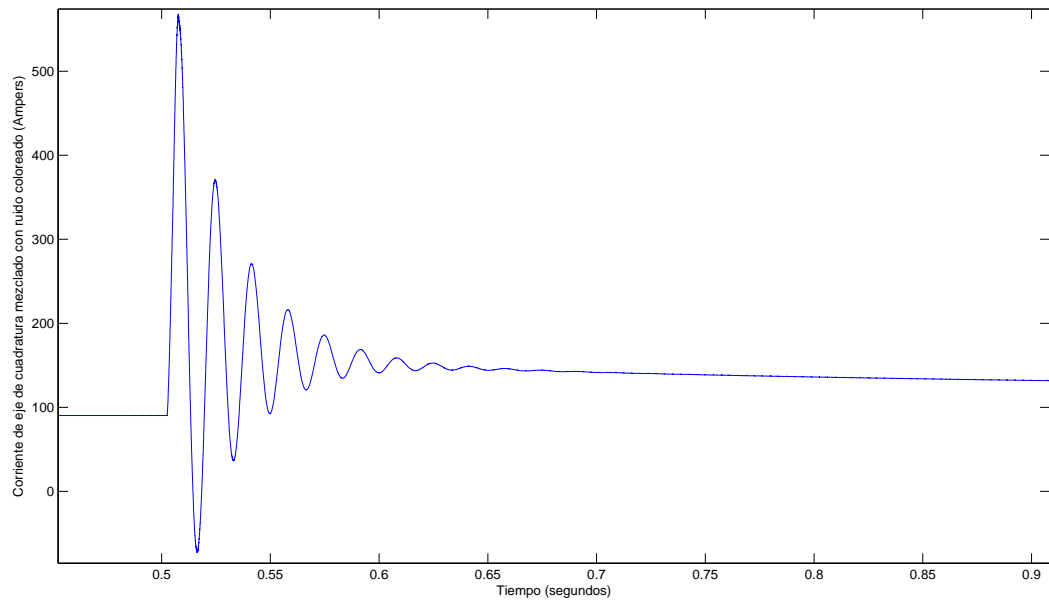


Figura 5.46: Corriente de eje de cuadratura mezclado con ruido coloreado.

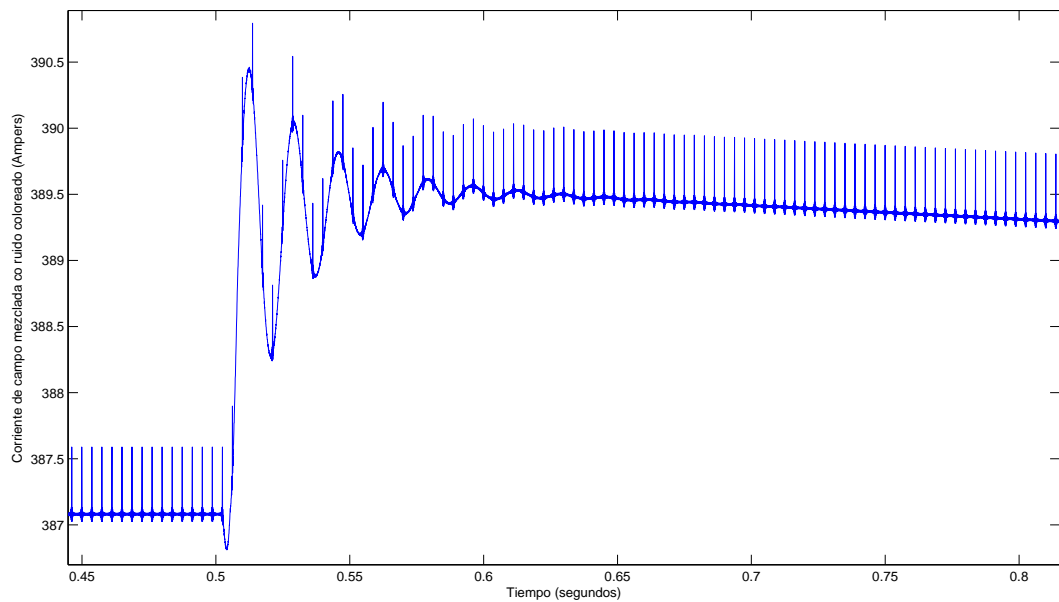


Figura 5.47: Corriente de campo mezclado con ruido coloreado.

Cuadro 5.5: Parámetros estimados bajo diferentes niveles de ruido coloreado.

Amplitud	$L_d$	$L_q$	$L_{od}$	$L_{oq}$	$L_f$	$L_g$	$L_{kd}$	$L_{kq}$	$R_f$	$R_{kd}$	$R_g$	$R_{kq}$
0,0	1,8100	1,7118	1,6600	1,5618	0,1411	0,6405	0,2063	0,1169	0,0004	0,0425	0,0147	0,0113
0,02	1,8099	1,7103	1,6599	1,5603	0,1303	0,6422	0,2344	0,1152	0,0041	0,0506	0,0147	0,0113
0,04	1,8099	1,7103	1,6599	1,5603	0,1490	0,6417	0,2564	0,1158	0,0041	0,0675	0,0146	0,0114
0,06	1,8099	1,7103	1,6599	1,5603	0,1665	0,6411	0,2883	0,1164	0,0041	0,0895	0,0144	0,0115
0,08	1,8099	1,7103	1,6599	1,5603	0,1890	0,6405	0,3433	0,1169	0,0041	0,1196	0,0143	0,0116
0,10	1,8099	1,7103	1,6599	1,5603	0,2144	0,6399	0,4106	0,1176	0,0041	0,1578	0,0141	0,0117
0,12	1,8099	1,7102	1,6599	1,5602	0,2403	0,6395	0,4992	0,1179	0,0041	0,2086	0,0140	0,0119
0,14	1,8099	1,7080	1,6599	1,5580	0,2799	0,6421	0,5976	0,1153	0,0041	0,2684	0,0141	0,0117
0,16	1,8099	1,7076	1,6599	1,5576	0,3165	0,6420	0,7208	0,1154	0,0041	0,3571	0,0140	0,0118
0,18	1,8099	1,7073	1,6599	1,5573	0,3640	0,6418	0,8588	0,1157	0,0041	0,4639	0,0138	0,0120
0,20	1,8099	1,7072	1,6599	1,5572	0,4167	0,6413	1,0128	0,1161	0,0041	0,5931	0,0136	0,0122

Cuadro 5.6: Error relativo de los parámetros estimados bajo diferentes niveles de ruido coloreado.

Amplitud	$L_d$	$L_q$	$L_{ad}$	$L_{aq}$	$L_f$	$L_g$	$L_{kd}$	$L_{kq}$	$R_f$	$R_{kd}$	$R_g$	$R_{kq}$
0,02	-0,0031	-0,0876	-0,0034	-0,0960	-7,6787	0,2687	13,6204	-1,4381	2,7737	19,2000	0,0797	0,1795
0,03	-0,0031	-0,0865	-0,0034	-0,0963	5,6258	0,1822	24,2898	-0,9641	2,2384	58,9000	-0,7524	0,9242
0,06	-0,0036	-0,0866	-0,0039	-0,0954	18,0255	0,0897	39,7550	-0,4572	2,1957	110,6000	-1,7121	1,8198
0,08	-0,0038	-0,0867	-0,0041	-0,0956	33,9255	0,0013	66,4098	0,0270	2,2411	181,4000	-2,8067	2,8807
0,10	-0,0037	-0,0865	-0,0040	-0,0948	51,9216	-0,0956	99,0159	0,5578	2,2685	271,2000	-3,8067	3,8525
0,12	-0,0040	-0,0958	-0,0043	-0,1049	70,2868	-0,1529	141,9729	0,8719	2,2689	390,8000	-4,8868	4,9326
0,14	-0,0040	-0,2245	-0,0044	-0,2461	98,3755	0,2497	189,6575	-1,3338	2,3176	531,4000	-4,1497	3,9437
0,16	-0,0042	-0,2475	-0,0045	-0,2713	124,2828	0,2413	249,3823	-1,2879	2,2652	740,3000	-5,0407	4,8115
0,18	-0,0043	-0,2623	-0,0046	-0,2875	157,9906	0,2001	316,2973	-1,0622	2,2705	991,5000	-6,1850	5,9865
0,20	-0,0044	-0,2701	-0,0048	-0,2960	195,3243	0,1305	350,2431	-0,6810	2,3100	1295,6000	-7,7163	7,6451

## 5.7. Análisis del sistema de prefiltrado de las señales

Como se concluyó anteriormente, el nivel de ruido afecta los resultados de la estimación<sup>7</sup>. Por esto, es necesario reducir lo mejor posible el nivel de ruido mezclado en las señales eléctricas de entrada. Para esto se diseñó un estimador Kalman a modo de filtro de ruido, la estructura del filtro se presenta en los apéndices. En esta sección se presenta una aplicación de filtrado de ruido blanco en las corrientes de eje directo y eje de cuadratura mediante este método implementado.

Las señales que se presentan en las figuras 5.48 y 5.50 se presentan la corriente de eje directo y eje de cuadratura respectivamente, las cuales fueron mezcladas con ruido blanco. El ruido blanco tiene una amplitud de 50, 0, un valor que permite verificar la efectividad del filtro de ruido sin perder información de las señales. Como se mencionó anteriormente, cuando la oscilación tiene una amplitud menor a la amplitud de la señal de ruido, es probable que se pierda información necesaria para realizar la estimación de los parámetros. Estas señales cuentan con oscilaciones de amplitudes del orden de  $10^3$ , lo que asegura la información de la máquina. La estimación de las señales se presenta en 5.49 y 5.51 para los ejes directo y de cuadratura respectivamente. El valor de covarianza de ruido es 0, 2 y el valor de la covarianza de ruido de medición es 0, 001. Al comparar las señales con ruido y las filtradas se nota que la reducción del error es alta. Sin embargo, estos filtros recursivos no eliminan totalmente el error. Con el filtro Kalman el error es reducido hasta niveles donde su influencia en los resultados es baja. Por tanto, el uso de este tipo de prefiltrado es indispensable para las señales de entrada cuando se va a estimar.

## 5.8. Comparación de resultados de la metodología y un método convencional

Se realizó un análisis de las posibles pruebas, para estimar los parámetros del modelo de segundo orden, que podrían realizarse en el sitio de operación de la máquina sin necesidad de movilizarse a un laboratorio y sin la necesidad de requerir fuentes variadoras de frecuencia. Por tanto, dentro del grupo de los métodos convencionales

---

<sup>7</sup>A medida que aumenta la amplitud de la señal de ruido, mezcladas en las señales de entrada, los resultados de la metodología son menos aproximados.

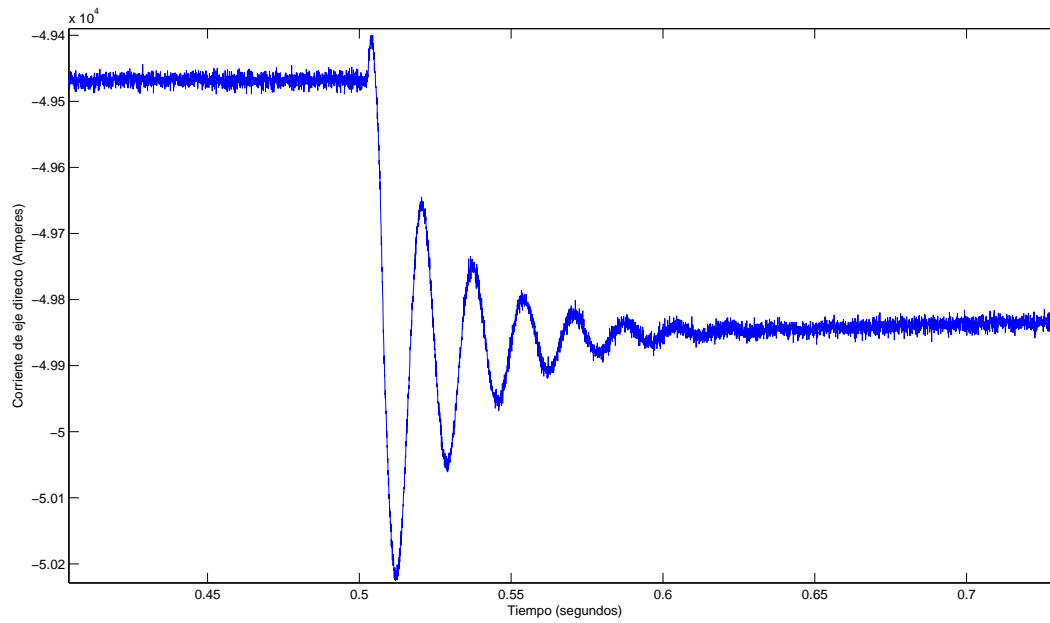


Figura 5.48: Corriente de eje directo mezclada con ruido blanco.

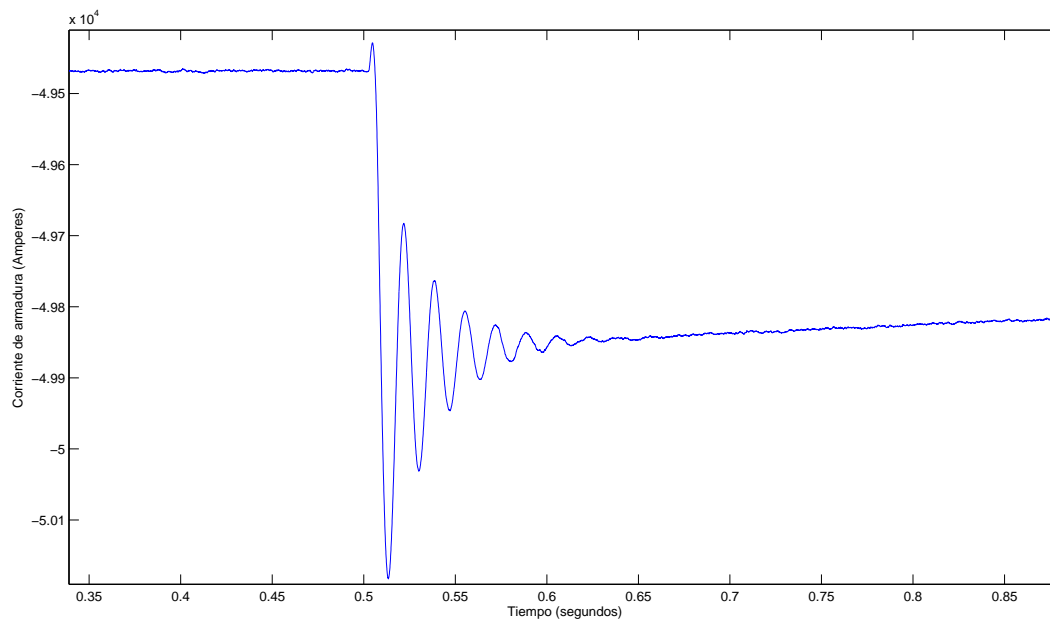


Figura 5.49: Corriente de eje directo filtrada mediante el filtrado Kalman.

## 5.8 Comparación de resultados de la metodología y un método convencional 105

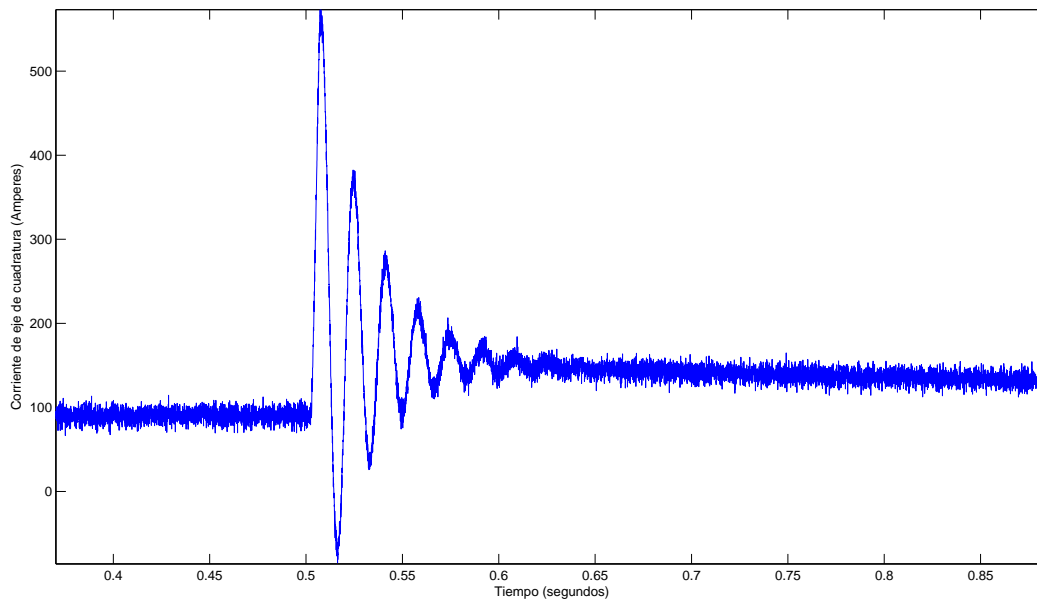


Figura 5.50: Corriente de eje de cuadratura mezclada con ruido blanco.

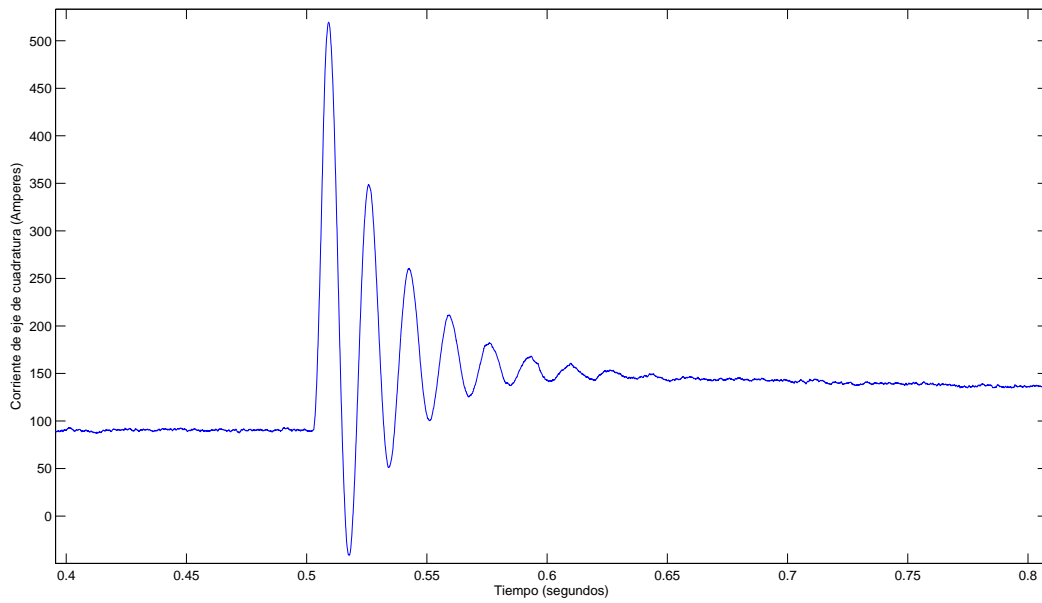


Figura 5.51: Corriente de eje de cuadratura mezclada con ruido blanco.

Cuadro 5.7: Datos nominales de la máquina.

Parámetro	valor
$X_d$	1,81
$X_q$	1,76
$X_d'$	0,30
$X_q'$	0,65
$X_d''$	0,23
$X_q''$	0,25
$T_{d0}'$	2,00
$T_{q0}'$	1,00
$T_{d0}''$	0,03
$T_{q0}''$	0,07

se seleccionó la prueba de cortocircuito repentino y la prueba de salida de carga “Load Rejection Test”<sup>8</sup>. Debido a que la prueba de corto circuito repentino puede traer consecuencias nocivas para la máquina se seleccionó la prueba de salida de carga.

Para realizar la prueba de salida de carga mediante simulaciones, se requieren tiempos de simulación grandes, estos largos tiempos aumentan el burden de procesamiento y dificulta el proceso de plantificación. Además, como este ejemplo comparativo es solo un experimento de tipo académico, se decide no complicar el proceso y utilizar datos de máquinas que no requieran tiempos de asimilación tan altos. Por tanto, los datos de la máquina utilizados en el caso tipo se modifican, principalmente el valor de la constante de tiempo transitoria. La potencia y tensión nominal utilizados son similares a los datos de la maquina del caso tipo. Los parámetros del modelo de la máquina síncrona se presentan en la tabla 5.7<sup>9</sup>.

### 5.8.1. Determinación de los parámetros de eje directo

Para realizar la prueba se conectó la máquina síncrona a una barra infinita, generando carga de tipo reactiva. Al cabo de 0,25 segundos se desconetó la máquina del sistema, continuando con un valor constante de tensión en el devanado de campo. La magnitud de tensión en terminales del generador se presenta en la figura 5.52, en

<sup>8</sup>La forma de como realizar estas pruebas se describe en el estado del arte de la investigación.

<sup>9</sup>Existen diferentes formas de representar el modelo matemático de la máquina síncrona, en la tabla 5.7 se presenta el modelo a partir de las contantes de tiempo y reactancias transitorias, subtransitorias y estacionarias.

## 5.8 Comparación de resultados de la metodología y un método convencional 107

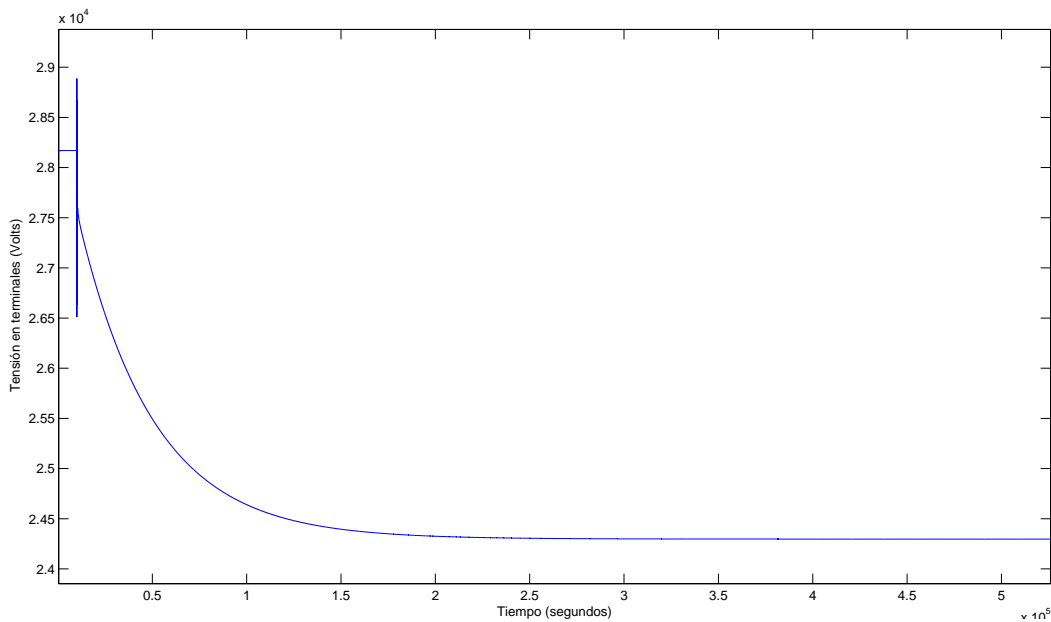


Figura 5.52: Tensión en terminales durante la salida de la máquina del sistema generando solo potencia reactiva.

esta figura se ve claramente como la magnitud de la tensión decae muy rápidamente en los primeros segundos, luego decae más lentamente y llega a un valor constante de  $24,5kV$ .

La parte de la señal de tensión de la figura 5.52 que se encuentra después de la desconexión, está compuesta por dos señales exponenciales y una componente de continua. Una de las dos señales exponenciales se atenúa rápidamente con respecto al tiempo, esta es la respuesta natural subtransitoria de la máquina, mientras que la segunda señal tiene una duración más larga esta exponencial es definida como la respuesta transitoria de la máquina. Se realizó el ajuste de la señal de tensión y se obtuvo como resultado la señal exponencial subtransitoria y la señal exponencial transitoria, las señales se presentan en las figuras 5.53 y 5.54 respectivamente.

Para calcular las constantes de tiempo, se determina el instante en el que cada señal exponencial tiene un valor igual a  $0,368h$ , donde  $h$  es el valor de la señal en  $t = 0$ . Las reactancias subtransitoria, transitoria y estacionaria se definen en las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3. Para determinar las reactancias es necesario conocer el valor de la corriente y tensión antes de desconectar la máquina del sistema, con base en estos datos se determinan las constantes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$ ; las cuales se definen como se muestra en la figura 2.2.

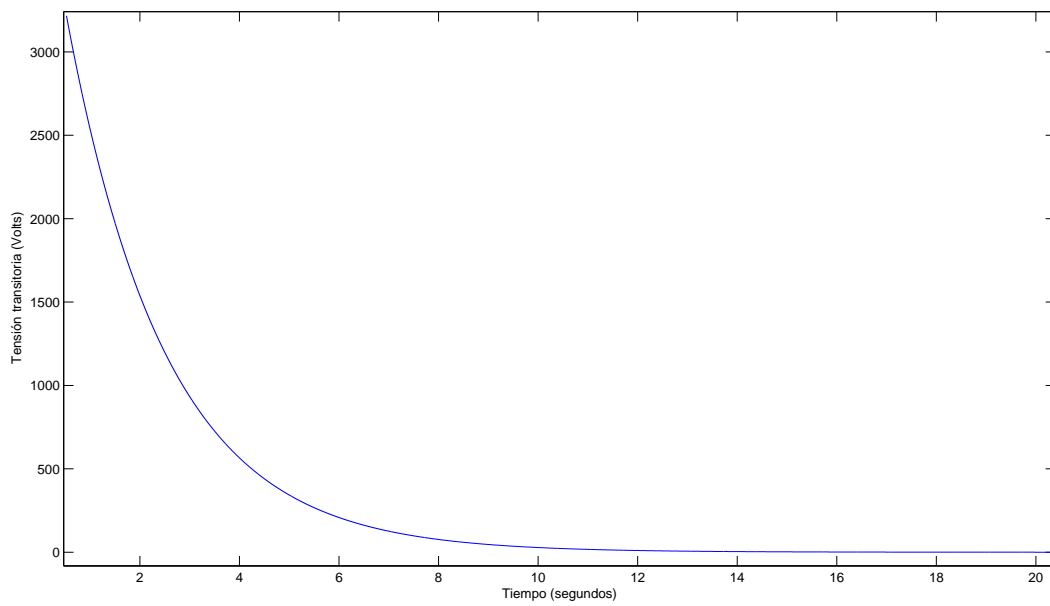


Figura 5.53: Señal de tensión exponencial transitoria.

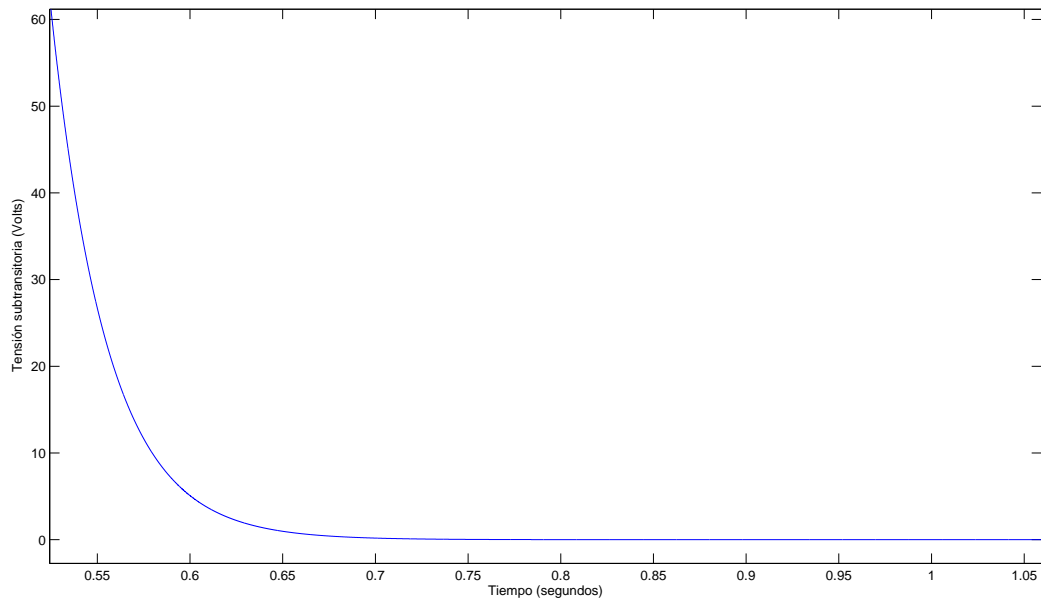


Figura 5.54: Parte subtransitoria de la señal de tensión.

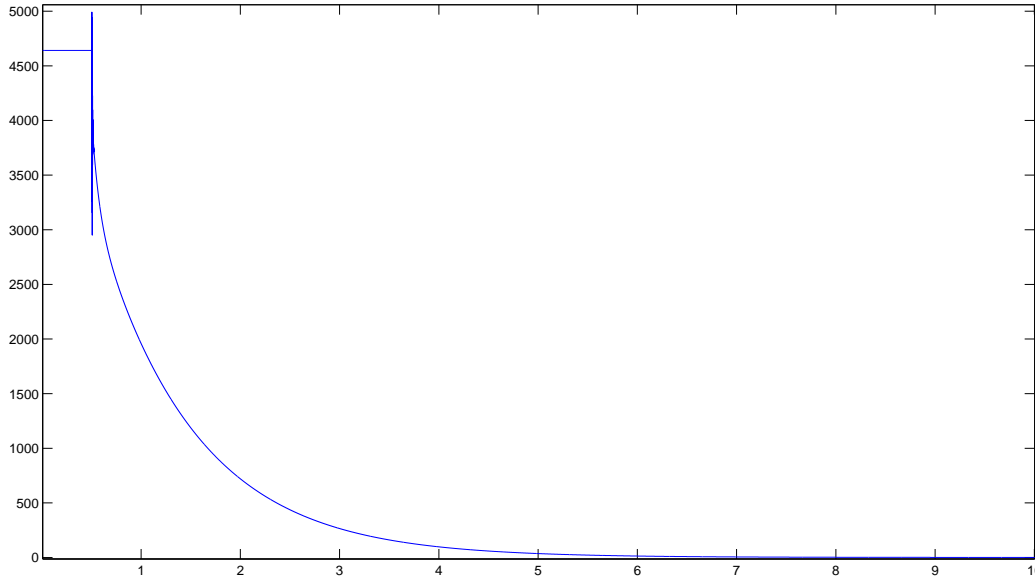


Figura 5.55: Tensión de eje de cuadratura durante la salida de la máquina del sistema.

### 5.8.2. Determinación de los parámetros del eje de cuadratura

Para determinar las constantes del eje de cuadratura se utilizó un valor de carga activo y reactivo. En la figura 5.55 se presenta la señal de tensión del eje de cuadratura cuando la máquina se desconecta del sistema.

Se realizó el ajuste de la señal de tensión del eje de cuadratura y se identificó la parte subtransitoria y transitoria de esta. Las dos señales exponenciales se presentan en las figuras 5.56 y 5.57. Las constantes y reactancias se determinan de forma similar al caso de los datos del eje directo<sup>10</sup>.

### 5.8.3. Comparación de los resultados

En la tabla 5.8 se presentan los resultados de los parámetros utilizando la metodología diseñada e implementada y el método de “Load rejection test” y los datos originales presentados en la tabla 5.7. Los resultados ubicados en estimación A, son los resultados del método “Load rejection test” y los resultados de la columna estimación B,

<sup>10</sup>Para determinar las reactancias se utiliza las constantes y el valor de la corriente antes de la desconexión en el eje de cuadratura.

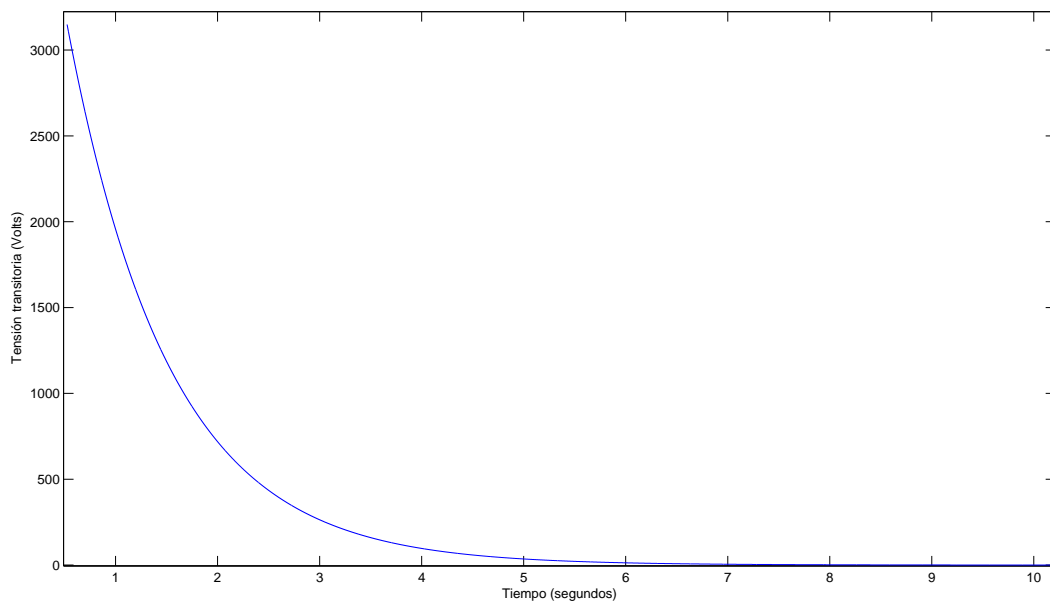


Figura 5.56: Parte subtransitoria de la señal de tensión en el eje de cuadratura.

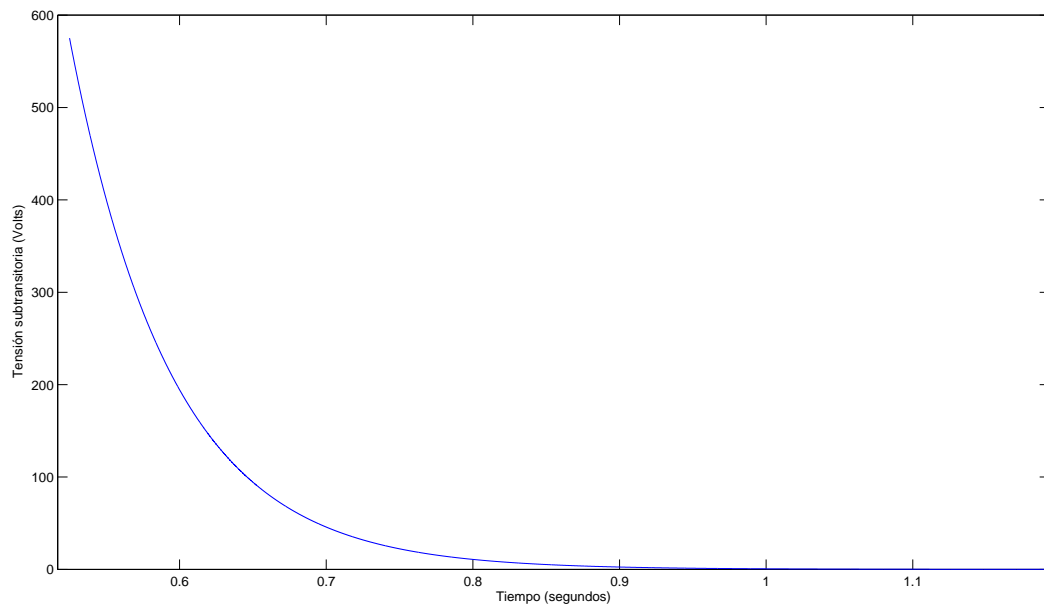


Figura 5.57: Parte transitoria de la señal de tensión en el eje de cuadratura.

## 5.8 Comparación de resultados de la metodología y un método convencional 111

Cuadro 5.8: Comparación entre los parámetros originales y los parámetros estimados

Parámetro	Original	Estimación A	Estimación B
$X_d$	1, 81	1, 8098	1, 8100
$X_q$	1, 76	1, 7584	1, 6663
$X_d'$	0, 30	0, 3061	0, 2827
$X_q'$	0, 65	0, 5647	0, 4399
$X_d''$	0, 23	0, 2775	0, 2335
$X_q''$	0, 25	0, 3467	0, 2636
$T_{d0}'$	2, 00	2, 0000	2, 8600
$T_{q0}'$	1, 00	0, 9982	0, 9051
$T_{d0}''$	0, 03	0, 0302	0, 0243
$T_{q0}''$	0, 07	0, 0692	0, 0760

son los resultados de la metodología propuesta. Al comparar los resultados es fácil argumentar que los resultados del método "Load rejection test" son mas exactos que los resultados de la metodología propuesta. En las constantes de tiempo se presenta el mayor error de la metodología propuesta, en el caso de las reactancias los valores son ambos muy aproximados. El error de los resultados de la metodología propuesta es aceptable y los valores son muy válidos para usarlos en cualquier proceso de análisis.

Al comparar los resultados, es necesario comparar las características operacionales de cada método. Ambos requieren la adquisición de las señales eléctricas y de velocidad angular del rotor de forma simultanea, no requieren pruebas que puedan comprometer el buen funcionamiento de la maquina y pueden realizarse en el sitio de operación de la máquina. Sin embargo, la metodología propuesta es independiente del tipo de controladores y no requiere una tensión de excitación constante. En resumen, cuando se cuenta con las condiciones necesarias para desarrollar la prueba "Load rejection test" es otra excelente opción para estimar los parámetros de la máquina síncrona.



# Capítulo 6

## Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

### 6.1. Conclusiones

El trabajo de investigación documentado en este libro presenta una metodología para estimar los parámetros de la máquina síncrona a partir de las señales de tensión y corrientes en terminales de la armadura y campo de la misma bajo una perturbación. La perturbación a partir de la cual se diseñó la metodología es el cambio de potencia generada por la máquina.

Los parámetros de los devanados de amortiguamiento del eje directo y de cuadratura, son los resultados con la menor aproximación en el proceso de estimación. La metodología realiza un proceso de extrapolación lineal de los flujos magnéticos de la máquina y; deriva las señales de corriente medidas y estimadas. Estos procesos inducen errores en los resultados y son la parte crítica en la metodología en cuestión de aproximación.

La metodología no tiene ninguna restricción en cuanto al nivel de tensión o nivel potencia de la máquina. Además, se adaptó la metodología para incluir el modelo de orden tres, por lo que se restringe el orden del modelo a tres. Una restricción importante de la metodología es que no puede ser implementada para estimación en tiempo real, debido que el tiempo de procesamiento puede durar hasta 20 minutos. Sin embargo, este tipo de metodologías puede utilizarse para controles adaptativos con rangos de actualización del modelo del orden de horas.

Después de comparar la metodología propuesta con la prueba "Load rejection test" se ve como la metodología es menos aproximada que la otra prueba en cuanto a las constantes de tiempo, los valores de las reactancias estimadas de cada método son ambas muy aproximadas a los datos originales. Sin embargo, la metodología propuesta cuenta con características que aventajan, por ejemplo, es independiente de la actuación de los controles de la máquina y no requiere un valor constante de tensión en los devanados de excitación. Además, la prueba "Load rejection test" no puede ser utilizada para realizar estimaciones de manera automática.

Debido a que la metodología propuesta utiliza la señales eléctricas de campo y velocidad angular del rotor de forma simultánea con las señales del estator, la estimación es independiente de la actuación de las características de los controles. No se requieren condiciones especiales de actuación de la máquina, lo anterior se puede verificar en [Martinez u. a. 2007], donde se realizó una buena estimación para una máquina síncrona con sus sistemas de control activos.

A partir de las pruebas realizadas al caso tipo variando el cambio de potencia generada para producir la perturbación, se concluyó que: los resultados varían notablemente a medida que varía el nivel de cambio de potencia, existe un nivel mínimo de cambio de potencia para poder obtener una convergencia en la estimación y; existe un nivel máximo de cambio de potencia para poder obtener una convergencia en la estimación. La metodología utiliza métodos matemáticos de ajuste de modelos a partir de señales de entrada y salida, pero para ciertos tipos de perturbación los ajustes no son buenos y el error aumenta considerablemente. El nivel mínimo de cambio de potencia es importante debido a que este valor debe permitir que la respuesta de la máquina contenga toda la información transitoria y subtransitoria. El nivel máximo de cambio de potencia se utiliza ya que valores grandes crean oscilaciones propias del sistema completo, perturbaciones no lineales en el sistema, lo que hace que la información del sistema se mezcle con la información de la máquina y no sea posible realizar una buena estimación.

Se realizó pruebas para estudiar y determinar la sensibilidad de la metodología respecto a los valores de entrada  $R_a$  y  $L_l$ . Los resultados obtenidos del estudio presentan una gran variación en los parámetros de los devanados de amortiguamiento, los demás parámetros presentaron variaciones pequeñas. Se realizó una variación de cada valor hasta 10 %, pero solo las estimaciones obtenidas para las variaciones de hasta 5 % fueron simulables en ATP. Por tanto, los datos de entrada  $R_a$  y  $L_l$  so-

lo pueden tener presiciones alrededor del 5% y estimaciones obtenidas mediante datos mayores a esta restricción pueden no tener convergencia al simular el modelo de la máquina.

Se estudió la influencia del nivel de ruido blanco y coloreado mezclado con las señales eléctricas de forma independiente, estos estudios se realizaron sin ningún tipo de prefiltrado, solo se utilizó los filtros implementados dentro del proceso de estimación. A partir de este estudio se vio como al aumentar el nivel de ruido el error porcentual de los parametros aumenta. El crecimiento del error porcentual en los parámetros de los devanados de amortiguamiento es mucho mayor que el crecimiento del error porcentualgan del resto de los parámetros del modelo. Además, al comparar los resultados obtenido con los dos tipos de ruido, se obtiene que el ruido blanco genera mayor error en los parámetros, el nivel de influencia del ruido blanco es casi cuatro veces mayor que para el caso que en el coloreado.

Con el fin de reducir el error que induce los diferentes tipos de ruido mezclados en las señales eléctricas, se implementó un filtro Kalman. El filtro Kalman permite reducir los niveles de ruido, pero no elimina completamente las señales de ruido. Por tanto, fue necesario implementar otra serie de filtros dentro de la metodología que ayudan a reducir el error en los resultados. En conclusión, la herramienta software permite estimar los parámetros de la maquina síncrona bajo niveles de ruido en las señales eléctricas.

La influencia del nivel de ruido mezclado en las señales depende en ciertas ocasiones de la parte transitoria de cada señal. Si la amplitud de esta oscilación es pequeña en comparación con la amplitud del ruido puede afectar en grandes proporciones, los resultados de la estimación. Sin embargo, si la amplitud de la oscilación es mucho mayor que el nivel de ruido, la influencia en los resultados es menor. Por tanto, cuando se cuenta con niveles de ruido altos una forma práctica de reducir esta influencia en las estimaciones es producir oscilaciones de gran amplitud.

Existen dos formas para validar los resultados estimados. La primera es determinar la diferencia porcentual entre los valores estimados y los originales. La segunda es determinar mediante un índice, la diferencia entre las señales originales con las que se realizó la estimación y las señales obtenidas de simular el modelo matemático con los parámetros estimados. La primera forma de validación solo puede ser utilizada cuando se tiene almenos un conocimiento general de los parámetros del modelo. La segunda forma puede utilizarse facilmente para pruebas en maquinas simuladas en

ATP, pero es complejo utilizar este método de validación en máquinas que operen en la red eléctrica, ya que es necesario tener en cuenta que el modelo matemático completo a simular debe aproximarse lo mejor posible al sistema real. Estas formas de validación son importantes utilizarlas, debido a que los métodos matemáticos intentan ajustar los valores de los parámetros a las señales de la máquina.

Para finalizar las conclusiones se menciona que con base en la investigación realizada el autor adquirió experiencia y conocimiento relacionado con el análisis, modelado y operación de las máquinas eléctricas rotativas; una gran formación académica investigativa en cuanto al desarrollo de proyectos en el área de la Ingeniería Eléctrica. Además, este trabajo es la base y el inicio para muchas investigaciones relacionadas con las maquina eléctricas en cuanto a la Universidad Industrial de Santander.

## 6.2. Recomendaciones

Para realizar el proceso de estimación, la metodología requiere señales de la máquina que incluyan el estado estable inicial, el estado transitorio al realizar la perturbación y la operación estable de la máquina. Si no se incluye todo el estado transitorio de la máquina hasta que se estabiliza, se producen errores en la estimación de los flujos magnéticos y por tanto, errores en la estimación.

Los valores de entrada  $R_a$  y  $L_l$  deben tener una incertidumbre muy baja, por esto, se recomienda utilizar los valores de diseño suministrado por el fabricante. En caso de no contar con estos valores es necesario realizar medidas muy exactas, realizar la corrección por temperatura. Además, definir un rango de incertidumbre y a partir de este generar un grupo de valores de entrada. Se toma cada grupo de valores y se realiza la estimación. Al final se toman los resultados con mayor moda y dentro de rangos reales.

Cuando se realizan perturbaciones, a partir de grandes cambios de carga, es posible que se produzcan oscilaciones de gran duración como resultado de una inestabilidad transitoria o inestabilidad de pequeña señal del sistema. Estas oscilaciones se mezclan con la respuesta natural de la máquina y no permite realizar una buen proceso de estimación. Por tanto, es necesario determinar un limite máximo de la cantidad de cambio de carga, el cual tiene que ver con estas respectivas oscilaciones del sistema.

Como se mencionó anteriormente en las conclusiones, los niveles de ruido influyen directamente en los errores de estimación, por esto, es recomendable acondicionar el sitio para que al realizar las mediciones eléctricas los niveles de ruido sean minimizados.

En caso de contar con señales mezcladas con niveles alto de ruido, es recomendable acondicionar el sistema para que al realizar perturbaciones, las señales eléctricas de corriente y tensión cuenten con oscilaciones cuyas amplitudes sean mucho mayores que los niveles de ruido, para esto es necesario realizar un estudio previo de los niveles de ruido que se mezclan con las señales de la máquina.

### 6.3. Trabajos futuros

Como trabajos futuros se propone:

Esta metodología es una base para realizar estudios de identificación de fallas o anomalías en las máquinas síncronas para el desarrollo de mantenimientos predictivos, preventivos o el planeamiento de mantenimientos correctivos. Se implementaría una metodología similar que estime los parámetros de la máquina en su operación normal, cuando la máquina presente alguna anomalía o se produzca indicios de fallas, los parámetros varían con respecto a los parámetros estimados previamente. Es necesario realizar un estudio de la forma como las fallas afectan los valores de los parámetros de la máquina, para poder clasificar las distintas fallas que se pueden ocurrir.

A partir de este tipo de metodologías de estimación es posible la implementación de controladores adaptativos, los cuales permitirán controlar la operación de la máquina de manera óptima frente a los cambios que se presentan en la máquina debido al envejecimiento o cambios debidos a los mantenimientos correctivos. Además, mediante la metodología es posible conocer el modelo matemático de una determinada máquina y poder implementar un control predictivo. Estos tipos de controles forman parte de las técnicas avanzadas de control y constituyen los temas de investigación actuales.

La teoría básica de esta investigación puede utilizarse para realizar metodologías de estimación de parámetros en máquinas eléctricas como el motor de inducción y la máquina de corriente continua.

Finalmente el trabajo futuro más cercano es la perfección de esta metodología con el fin de hacer el proceso más efectivo, práctico y rápido.

# Bibliografía

- [Anderson u. Fouad 1977] ANDERSON, P. M. ; FOUAD, A. A.: *Power System Control and Stability*. 1st. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977
- [Bergen 1986] BERGEN, A. R.: *Power Systems Analysis*. New York : Prentice Hall, 1986
- [Blondel 1904] BLONDEL, A.: The Salient Pole Synchronous Machine. In: *Trans. International Electric Congress 1 (1904)*, April, S. 635
- [Bonneville 1994] BONNEVILLE: *BPA EMTP Theory Book*. 1st. Bonneville Power Administration, 1994
- [Castellanos u. Shinakov 2007] CASTELLANOS, G. ; SHINAKOV, Y. S.: *Análisis de aleatoriedad en señales y sistemas*. 1st. Centro de Publicaciones UN Manizales, 2007
- [Chan u. a. 2001] CHAN, K. H. ; ACHA, E. ; MADRIGAL, M. ; PARLE, J. A.: The use of direct Time-Phase Domain Synchronous Generator Model in Standard EMTP-Type Industrial Packages. In: *IEEE Eng. Rev.* - (2001), June, S. 63–65
- [Chapra u. Canale 1996] CHAPRA, S. C. ; CANALE, R. P.: *Métodos Numéricos para Ingenieros*. 2da. McGraw-Hill, 1996
- [Coultes u. Watson 1981] COULTES, M. E. ; WATSON, W.: Synchronous Machine Models by Standstill Frequency Response Tests. In: *IEEE Trans. PAS-100 (1981)*, April, S. 1480–1489
- [Cui u. a. 2004] CUI, Y. ; DOMMEL, W. ; XU, W.: A Comparative Study of two Synchronous Machine Modeling Techniques for EMTP simulation. In: *IEEE Energy Conversion* vol 19 (2004), June, S. 462–463

- [Dandeno u. a. 1981a] DANDENO, P. L. ; KUNDUR, P. ; PORARY, A. T. ; E.COULTES, M.: Adaptation and Validation of Turbogenerator Model Parameters through On-line Frequency Response Measurements. In: *IEEE Trans. PAS-100* (1981), April, S. 1656–1664
- [Dandeno u. Porary 1981] DANDENO, P. L. ; PORARY, A. T.: Developed of Detailed Turbogenerator Equivalent Circuits from Standstill Frequency Response Measurements. In: *IEEE Trans. PAS-100* (1981), April, S. 1646–1643
- [Dandeno u. a. 1981b] DANDENO, P.L. ; KUNDUR, P. ; PORARY, A. T. ; COULTES, M.E.: Validation of Turbogenerator Stability Models by Comparisons with Power System Test. In: *IEEE Trans. PAS-100* (1981), April, S. 1637–1643
- [Gualdrón 2004] GUALDRÓN, Cesar D.: *Técnicas de Procesamiento de Señales para la Monitorización de la calidad de la energía Eléctrica*. 1st. Tesis Universidad Industrial de Santander, 2004
- [Hayes 1996] HAYES, Monson H.: *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. 1st. John Wiley and sons, Inc, 1996
- [IEEE 2002a] IEEE, P. S. E.: IEEE std 1110-2002:Guide for synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses. In: *IEEE Standar Third* (2002), September, S. 1
- [IEEE 2002b] IEEE, P. S. E.: IEEE std 115-1995:Test Procedures for Synchronous Machines. In: *IEEE Standar Third* (2002), September, S. 190
- [Karayaka u. a. 1998] KARAYAKA, H. B. ; KEYHANI, A. ; AGRAWAL, B. ; SELIN, D. ; HEYDT, G. T.: Identification of Armature Circuit and Field Winding Parameters of Large Utility Generators. In: *IEEE Trans.* (1998), January
- [Karayaka u. a. 1999] KARAYAKA, H. B. ; KEYHANI, A. ; AGRAWAL, B. ; SELIN, D. ; HEYDT, G. T.: Identification of Armature Circuit and Field Winding Parameters of Large Utility Generators. In: *Trans. Energy conversion IEEE* 14 (1999), December, S. 901–908
- [Karayaka u. a. 2000] KARAYAKA, H. B. ; KEYHANI, A. ; AGRAWAL, B. ; SELIN, D. ; HEYDT, G. T.: Identification of Armature, Field, and Saturated Parameters of Large

- Steam Turbine-Generator from Operating Data. In: *Trans. Energy conversion IEEE* 15 (2000), June, S. 181–187
- [Keyhani u. Dayal 1989a] KEYHANI, A. ; DAYAL, G.: The Effects of Noise on Frequency-Domain Parameter Estimation of Synchronous Machine Models. In: *IEEE Trans.* 4 (1989), December, S. 600–607
- [Keyhani u. Dayal 1989b] KEYHANI, A. ; DAYAL, G.: Maximum likelihood Estimation of Solid-Rotor Synchronous Machine Parameters from SSFR Test Data. In: *IEEE Trans.* 4 (1989), December, S. 551–558
- [Kiriakides u. a. 2004] KIRIAKIDES, E. ; HEYDT, G. T. ; VITTAL, V.: On-line Estimation of Synchronous Generator Parameters Using a Damper current Observer and a Graphic User Interface. In: *IEEE Energy Conversion* vol 19 (2004), September, S. 499–507
- [Kundur 1994] KUNDUR, Prabha: *Power system stability and control*. 1st. McGraw-Hill, 1994
- [Lewis 1958] LEWIS, W. A.: A Basic Analysis of Synchronous Machine-Part I. In: *AIEE Trans.* 77 (1958), December, S. 436–456
- [Linköpings 2006] LINKÖPINGS, Universitet: Staff at Automatic Control. In: *Lennart Ljung* [en línea] (2006), september, S. <http://www.control.isy.liu.se/ljung/sysid/>
- [Ljung 1999] LJUNG, Lennart: *System Identification- Theory For the User*. 2nd. PTR Prentice Hall, 1999
- [Marti u. Louie 1997] MARTI, J. R. ; LOUIE, K. W.: A Phase-Domain Synchronous Generator Model Including Saturation Effects. In: *IEEE Power system* vol 12 (1997), February, S. 222–229
- [Martinez u. a. 2007] MARTINEZ, D. F. ; VILLAMIZAR, L. ; VARGAS, H.: Metodología para la Estimación de Parámetros de la Máquina Síncrona. In: *SICEL PAS-100* (2007), Noviembre, S.–
- [de Mello u. Hannett 1981] MELLO, F.P. de ; HANNETT, L. N.: Validation of Synchronous Machine Models and Determination of Model Parameters from Test. In: *IEEE Trans.* PAS-100 (1981), February, S. 662–672

- [de Mello u. Ribeiro 1977] MELLO, F.P. de ; RIBEIRO, J.R.: Derivation of Synchronous Machine Parameters from Test. In: *IEE Trans. PAS-96* (1977), July / August, S. 1211–1218
- [Park 1929] PARK, R. H.: Two-Reaction Theory of Synchronous machines, Part I. In: *AIEE Trans.* 48 (1929), April, S. 716
- [Park 1933] PARK, R. H.: Two-Reaction Theory of Synchronous machines, Part II. In: *AIEE Trans.* 52 (1933), April, S. 352
- [Perez u. a. 2004] PEREZ, C. F. ; VAZQUEZ, F. J. ; VEGAS, J. M.: *Ecuaciones Diferenciales y en Diferencias*. 1st. Thomson Ltd., 2004
- [Shackshaft u. Porary 1976] SHACKSHAFT, G. ; PORARY, A.T.: New Approach to the Determination of Synchronous Machine Parameters from Test. In: *IEE Proc.* 121 (1976), November, S. 1385–1392
- [Shackshaft u. Porary 1977] SHACKSHAFT, G. ; PORARY, A.T.: Implementation of New Approach to Determination of Synchronous Machine Parameters from Test. In: *IEE Proc.* 124 (1977), December, S. 1170–1178
- [Stranneby 2001] STRANNEBY, Dag: *Digital Signal Processing*. 1st. Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 2001
- [The MathWorks 1994] THE MATHWORKS, Inc: MatLab. In: *MathWorks* [en línea] (1994-2005), september, S. <http://www.mathworks.com>
- [Valladolid 2006] VALLADOLID, U.: PRODUCTOS Y DESARROLLOS PROPIOS, HIDDEN: Identificación de Sistemas. In: *Facultad de ciencias* [en línea] (2006), octubre, S. <http://www.isa.cie.uva.es/php/productos.php>
- [Vas 1993] VAS, P.: *Parameter estimation, condition, monitoring and diagnosis of electrical machines*. 1st. Oxford, 1993
- [Wang u. a. 2007] WANG, L. ; JATSKEVICH, J. ; DOMMEL, H. W.: Re-examination of Synchronous Machine Modeling Techniques for Electromagnetic Transient Simulations. In: *IEEE Power system* vol 22 (2007), August, S. 1221–1230

---

[Zhao u. Xu 1995] ZHAO, Zhengming ; XU, Longia: A Dinamic On-line Parameter Identification and Full-Scale Experimental Verification for Large Synchronous Machines. In: *IEEE Trans.* 10 (1995), September, S. 392–398



# Apéndice A

## Análisis de dos métodos de extrapolación

En este capítulo se presenta una descripción, pruebas y análisis de dos métodos de extrapolación lineal, el método clásico de la regla trapezoidal y el método Runge-Kuta [Chapra u. Canale 1996]. El objeto de este estudio es presentar el problema de un sistema discreto con un polo en la región unitaria. Primero se describen las ecuaciones diferenciales del sistema y el problema que se presenta al implementar las ecuaciones en diferencia a partir del método de la regla trapezoidal. Después se presenta unas pruebas para comparar el método de la regla trapezoidal y el método de Runge-Kuta. Al final se presenta una descripción del método Runge-Kuta.

### A.1. Sistema en ecuaciones en diferencias mediante la regla trapezoidal

En (A.1) y (A.2) se presentan las ecuaciones diferenciales del sistema analizado. Estas ecuaciones diferenciales describen la dinámica de los flujos magnéticos de ambos ejes. Estos ejes interactúan entre ellos, por lo que este es un sistema bidimensional y por tanto, las respuestas deben ser resueltas de forma simultánea. Al aplicar la regla trapezoidal al sistema, se forman dos ecuaciones en diferencias (A.3) y (A.4)<sup>1</sup>. Estas

---

<sup>1</sup>Las señales con el símbolo de vigudilla en la parte superior, representan el promedio del valor presente y el pasado.

ecuaciones se representan como una función de transferencia de múltiples entradas y una salida en transformada  $Z$ , (A.5) y (A.6). Cada función de transferencia que relaciona alguna de las entradas y la salida contiene un polo de magnitud unitaria. Esto presenta inestabilidad en la ecuación ante altas frecuencias, creando oscilaciones en la respuesta con una tendencia creciente infinita[Perez u. a. 2004].

$$\frac{d\phi_d}{dt} = w_s\phi_q + V_d + R_a i_d \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{d\phi_q}{dt} = -w_s\phi_d + V_q + R_a i_q \quad (\text{A.2})$$

$$\phi_d[n] - \phi_d[n-1] = \frac{1}{2}\tilde{w}_s \{\phi_q[n] + \phi_q[n-1]\} \Delta t + \tilde{V}_d + R_a \tilde{i}_d \quad (\text{A.3})$$

$$\phi_q[n] - \phi_q[n-1] = -\frac{1}{2}\tilde{w}_s \{\phi_d[n] + \phi_d[n-1]\} \Delta t + \tilde{V}_q + R_a \tilde{i}_q \quad (\text{A.4})$$

$$\phi_d(Z) = \frac{\frac{1}{2}w_s(Z)\phi_q(Z) \{1 + Z^{-1}\}^2 \Delta t + \{V_d(Z) + R_a i_d(Z)\} \{1 + Z^{-1}\}}{\{1 - Z^{-1}\}} \quad (\text{A.5})$$

$$\phi_q(Z) = \frac{-\frac{1}{2}w_s(Z)\phi_d(Z) \{1 + Z^{-1}\}^2 \Delta t + \{V_q(Z) + R_a i_q(Z)\} \{1 + Z^{-1}\}}{\{1 - Z^{-1}\}} \quad (\text{A.6})$$

## A.2. Comparación de las respuestas del sistema para los dos métodos de solución

En la figura A.1 se presenta la respuesta real y la estimada del flujo magnético de la máquina síncrona, la estimada se determinó mediante las ecuaciones en diferencias mostradas en (A.5) y (A.6). Como se puede ver, a la respuesta se encuentra adherida una señal oscilatoria de alta frecuencia y con una tendencia creciente. En la figura A.2 se presenta el mismo caso, pero la respuesta estimada es resuelta por el método de extrapolación Runge-Kuta. La respuesta estimada del sistema presenta adherida una señal oscilatoria de alta frecuencia. Sin embargo, esta señal de alta frecuencia se mantiene constante y en valores muy menores con respecto a la señal del sistema.

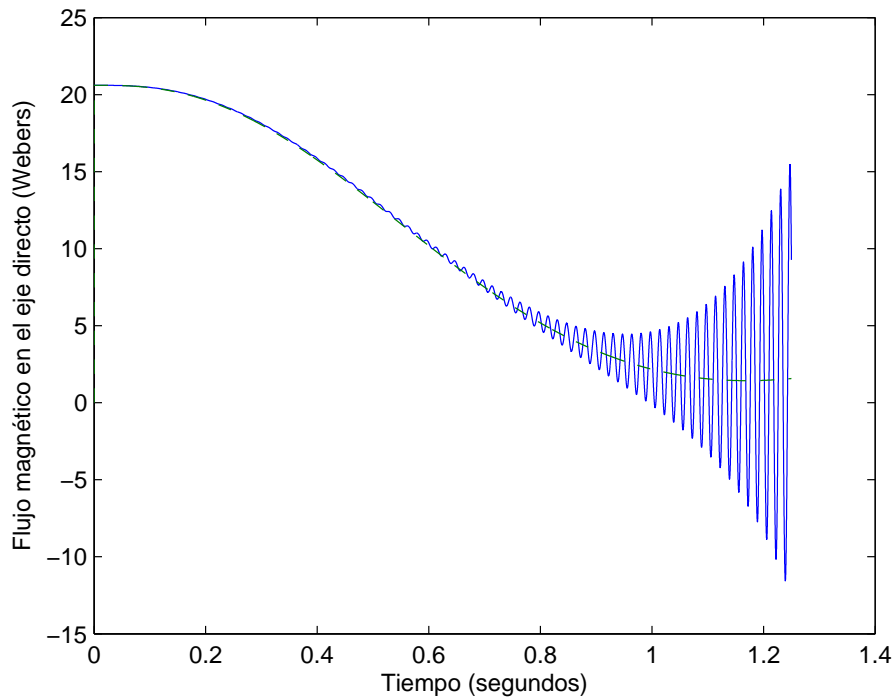


Figura A.1: Respuesta del sistema mediante el método de la regla trapezoidal.

Al ampliar el tiempo de asimilación, la respuesta del método de la regla trapezoidal tiene a valores alrededor de  $10^{27}$ .

### A.3. Descripción del método Runge-Kuta

Los diferentes métodos de extrapolación lineal se diferencian básicamente en la forma en la que determinan las derivas de las señales. Lo que se intenta hacer es eliminar o mover el polo de la región unitaria y esto se logra modificando el método de diferenciación. El valor futuro descrito en (A.7), se determina mediante el cálculo de las constantes que se presentan en (A.8), (A.9), (A.10) y (A.11). Este método se comparó con otros métodos, seleccionando este método por no ser complejo, pero con una buena aproximación.

Los métodos de extrapolación son muy sensibles al punto inicial, es por esto que se requiere una buena aproximación. Para lograr superar este problema se ideó iniciar

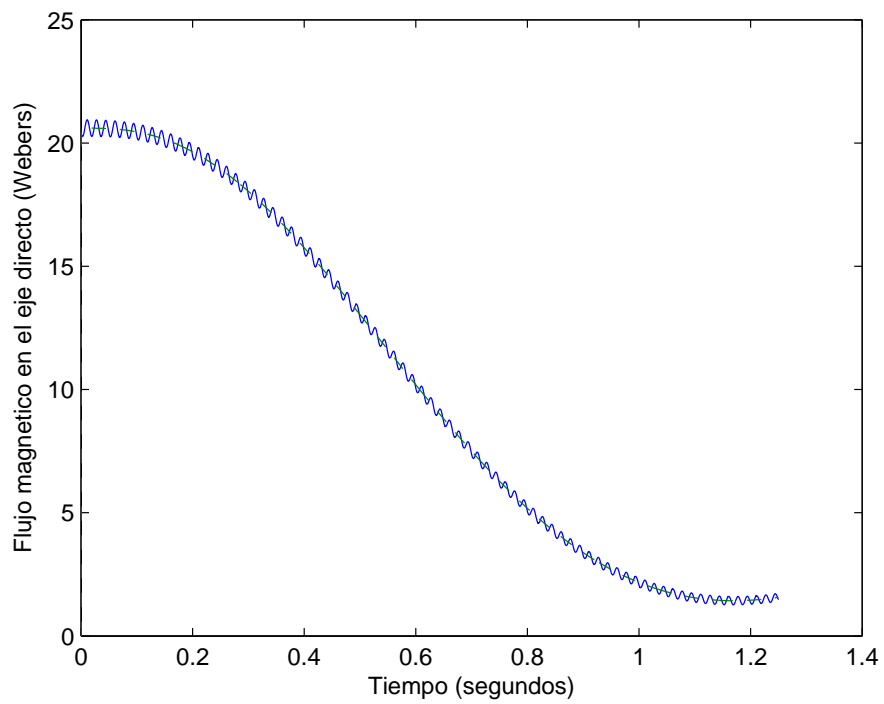


Figura A.2: Respuesta del sistema mediante el método Runge-Kuta

el proceso cuando el sistema se encuentra en condiciones estables<sup>2</sup>. Otro problema muy importante es la no linealidad que se presenta al momento de la conmutación de la carga. Es decir, cuando el sistema eléctrico tiene una variación de carga, se produce una oscilación no propia de las ecuaciones diferenciales lineales que se tienen para describir el sistema, esto hace que la respuesta estimada se inestabilice [Bonneville 1994]. La única solución encontrada fue invertir la señal, iniciar el proceso de extrapolación por el final de la señal. Así, se estima la parte transitoria requerida y se omite la parte antes de la conmutación, la cual no es requerida. Por estas dos razones las señales eléctricas deben ser adquiridas hasta que la máquina se estabilice totalmente y el algoritmo se encarga automáticamente de realizar las inversiones de las señales.

$$\phi d[n] = \phi d[n - 1] + \frac{(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)}{6} \quad (\text{A.7})$$

$$k_1 = \phi'_d[n] \Delta t = f(\phi_d[n]) \Delta t \quad (\text{A.8})$$

$$k_2 = f\left(\phi[n] + \frac{k_1}{2}\right) \Delta t \quad (\text{A.9})$$

$$k_3 = f\left(\phi_d[n] + \frac{k_2}{2}\right) \Delta t \quad (\text{A.10})$$

$$k_4 = f\left(\phi[n] + \frac{k_3}{2}\right) \Delta t \quad (\text{A.11})$$

En las figuras A.3 y A.4 se presentan los flujos magnéticos del eje directo y del eje de cuadratura respectivamente. En las figuras se ve claramente como los flujos oscilan ante la perturbación y luego tienden al estado estable. Además, se aprecia la buena exactitud de la estimación realizada con el método Runge-Kuta. En la primera parte de las señales, antes de la perturbación, se nota una oscilación por parte de la señal estimada. Esto es debido a la no linealidad que representan las señales al producirse la conmutación. Como se mencionó anteriormente, la oscilación se presenta antes de la perturbación, debido a que la señal se ha estimado desde el final.

---

<sup>2</sup>Cuando el sistema se encuentra en estado estable las derivadas con respecto al tiempo son cero.

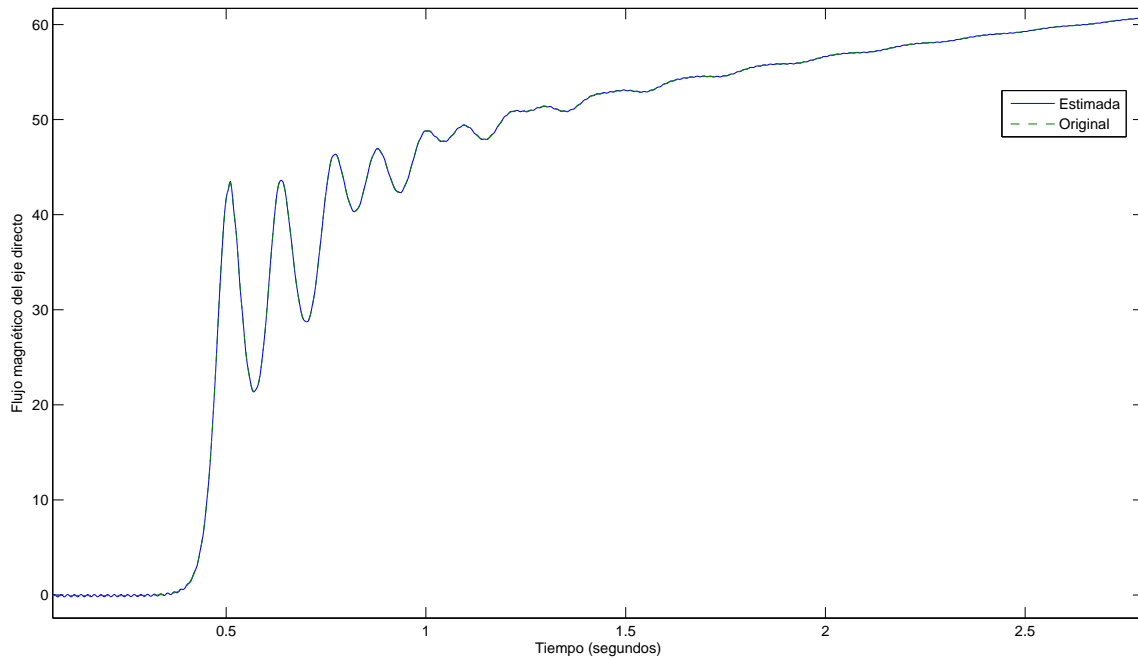


Figura A.3: Comparación de los flujos magnéticos mediante el método Runge-Kuta.

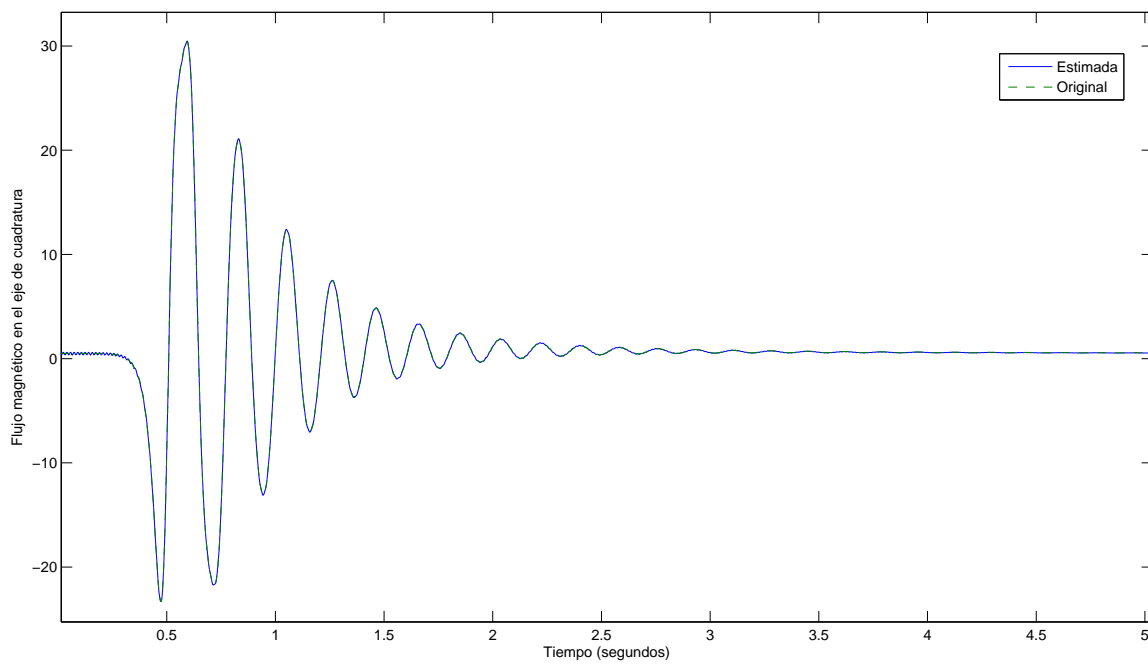


Figura A.4: Comparación de los flujos magnéticos mediante el método Runge-Kuta.

# Apéndice B

## Análisis del método para estimar $R_g$ ,

$$L_g, R_{kq}, L_{kq}$$

En este apéndice se pretende mostrar por qué se utiliza el método específico en la metodología y no la solución analítica de las ecuaciones de la función de transferencia de los devanados de amortiguamiento del eje de cuadratura.

### B.1. Descripción del método analítico

Tomando la función de transferencia que representa el sistema de devanados de amortiguamiento del eje de cuadratura, en (B.1), se definen las constantes (B.2), (B.3), (B.4), (B.5) y (B.6).

$$\frac{I_{sum}(s)}{V_{aq}(s)} = \frac{(L_g + L_{kq})s + (R_g + R_{kq})}{(L_g L_{kq})s^2 + (R_g L_{kq} + R_{kq} L_g)s + R_g R_{kq}} \quad (\text{B.1})$$

$$a = L_g L_{kq} \quad (\text{B.2})$$

$$b = L_g + L_{kq} \quad (\text{B.3})$$

$$c = R_g R_{kq} \quad (\text{B.4})$$

$$d = R_g + R_{kq} \quad (\text{B.5})$$

$$e = R_g L_{kq} + R_{kq} L_g \quad (\text{B.6})$$

Tomando las constantes de (??), (B.4) y (B.6) se relacionan para crear la ecuación (B.7):

$$\frac{R_g a}{L_g} + \frac{L_g c}{R_g} = e \quad (\text{B.7})$$

La ecuación (B.7) se replantea como un trinomio en (B.8). Este trinomio tiene dos soluciones, cada solución define una relación entre  $R_g$  y  $L_g$  y entre  $R_{kq}$  y  $L_{kq}$  respectivamente en (B.9) y (B.10).

$$\left(\frac{R_g}{L_g}\right) a^2 - \left(\frac{R_g}{L_g}\right) e + c = 0 \quad (\text{B.8})$$

$$f = \left(\frac{R_g}{L_g}\right) = \frac{e - \sqrt{e^2 - 4ac}}{2a} \quad (\text{B.9})$$

$$g = \left(\frac{R_{kq}}{L_{kq}}\right) = \frac{e + \sqrt{e^2 - 4ac}}{2a} \quad (\text{B.10})$$

A partir de (??), (B.4), (B.9) y (B.10) se plantean las soluciones de los parámetros .

$$L_g = \frac{(d - fb)}{g - f} \quad (\text{B.11})$$

$$R_g = g \frac{(d - gb)}{f - g} \quad (\text{B.12})$$

$$L_{kq} = \frac{(d - gb)}{f - g} \quad (\text{B.13})$$

$$R_{kq} = f \frac{(d - fb)}{g - f} \quad (\text{B.14})$$

## B.2. Resultados de comparación de los métodos

Para analizar el método analítico descrito anteriormente, se presentan los resultados de pruebas realizadas en ATP a un sistema de dos ramales  $RL$  serie conectados en paralelo. En las tablas B.1 hasta B.5 se presentan los datos originales de cada ramal y los respectivos resultados del método analítico y el método específico<sup>1</sup>. Los resultados del método analítico están sobre los ordenes de los miles de *Henrys* y millones de *Ohms*, los resultados del método específico son muy próximo a los valores originales. Al revisar los primeros resultados del método analítico, es común definir una constante para ajustar los parámetros del método analítico. Es decir, si se multiplican los resultados del método analítico por  $10^6$  los resultados se aproximan muy bien a los resultados originales. Sin embargo, esta constante es variante, no es posible definir una constante para cualquier tipo de ramal, por ejemplo, la relación mencionada anteriormente no se cumple para los resultados de la prueba presentada en la tabla B.5. Por tanto, el método analítico no es confiable y se descarta como parte de la metodología.

Cuadro B.1: Resultados de la prueba con  $R_g = 2,00, L_g = 0,001, R_{kq} = 1,00, L_{kq} = 0,001$ .

	$R_g$	$L_g$	$R_{kq}$	$L_{kq}$
Original	2,0000	0,0010	1,0000	0,0010
Analítico	2,1968	0,0011	0,9711	$9,549 \times 10^{-4}$
Específico	$1,9769 \times 10^6$	$1,0521 \times 10^3$	$1,0648 \times 10^6$	$9,5384 \times 10^2$

<sup>1</sup>El método específico es el método práctico diseñado para la metodología

Cuadro B.2: Resultados de la prueba con  $R_g = 1,00, L_g = 0,001, R_{kq} = 2,00, L_{kq} = 0,001$ .

	$R_g$	$L_g$	$R_{kq}$	$L_{kq}$
Original	1,0000	0,0010	2,0000	0,0010
Analítico	0,9711	$9,549 \times 10^{-4}$	2,1968	0,0011
Específico	$1,0648 \times 10^6$	$9,53848 \times 10^2$	$1,9769 \times 10^6$	$1,0521 \times 10^3$

Cuadro B.3: Resultados de la prueba con  $R_g = 20,00, L_g = 0,001, R_{kq} = 10,00, L_{kq} = 0,001$ .

	$R_g$	$L_g$	$R_{kq}$	$L_{kq}$
Original	20,00	0,0010	10,0000	0,0010
Analítico	37,7544	$6,3441 \times 10^{-3}$	8,0963	0,0024
Específico	$1,9691 \times 10^7$	$1,0258 \times 10^3$	$1,0648 \times 10^6$	$9,7320 \times 10^2$

Cuadro B.4: Resultados de la prueba con  $R_g = 20,00, L_g = 0,0001, R_{kq} = 10,00, L_{kq} = 0,0002$ .

	$R_g$	$L_g$	$R_{kq}$	$L_{kq}$
Original	20,0000	0,0001	10,0000	0,0002
Analítico	2,1968	0,00011	0,9711	$9,5490 \times 10^{-4}$
Específico	$1,9769 \times 10^7$	$1,0521 \times 10^3$	$1,0648 \times 10^7$	$9,5384 \times 10^2$

Cuadro B.5: Resultados de la prueba con  $R_g = 0,10, L_g = 0,002, R_{kq} = 0,20, L_{kq} = 0,002$ .

	$R_g$	$L_g$	$R_{kq}$	$L_{kq}$
Original	0,1000	0,002	0,2000	0,002
Analítico	0,1247	0,002	0,5056	0,0064
Específico	$4,9974 \times 10^4$	$5,0030 \times 10^2$	$2,5025 \times 10^4$	$4,9968 \times 10^2$

# Apéndice C

## Estudio de señales de ruido

### C.1. Ruido aditivo

La clasificación del ruido esta basado en agrupar todas las formas de ruido en tres clases principales: aditivo, multiplicativo e interferencia. La clase de ruido de interés es el ruido aditivo. El ruido aditivo es todo aquel ruido creado por radiación electromagnética de la tierra, radiación de la atmósfera, radiación cósmica que llega a los sistemas de adquisición. El ruido aditivo se encuentra sobre todos los rangos de frecuencia y actúa de forma continua sobre las señales de entrada[Stranneby 2001].

### C.2. Cuantificación del ruido en las señales de entrada

El ruido aditivo en las señales se modela como se presenta en (C.1), donde  $s$  es la señal sin ningún tipo de contaminación por ruido,  $v$  es el grupo de números aleatorios con media cero y varianza unitaria,  $a$  es la amplitud de la variable aleatoria. La señal de ruido es el producto de el grupo de números aleatorios y la amplitud  $a$ . La ecuación (C.2) presenta la relación entre la señal libre de ruido y la señal de ruido, el valor es adimensional. La potencia de la señal  $s$  se presenta en la ecuación (C.3), este valor se da en watts. De igual forma en (C.4) se presenta la potencia de la señal de ruido.

$$sn(k) = s(k) + \alpha v(k) \tag{C.1}$$

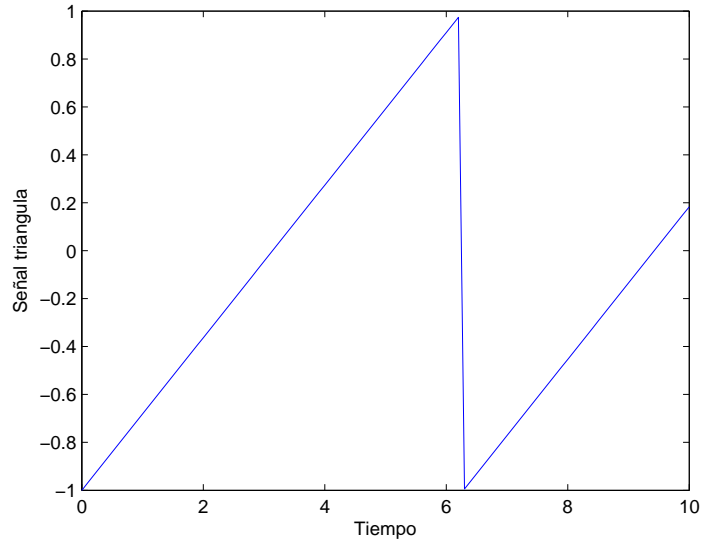


Figura C.1: Señal triangular unitaria sin contaminación de ruido.

$$SNR = \left[ \frac{\sum_{k=1}^N s^2(k)}{\sum_{k=1}^N (\alpha\nu(k))^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.2)$$

$$SP = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N s^2(k) \quad (C.3)$$

$$NP = \sum_{k=1}^N (\alpha\nu(k))^2 \quad (C.4)$$

En la figura C.1 se presenta una señal triangular sin contaminación de ruido, en las figuras C.2, C.3, C.4, C.5, C.6 y C.7 se presentan la señal triangular contaminada con distintos niveles de ruido. El nivel de ruido contenido en la señal triangular se mide por medio del SNR, en la tabla C.1 se presenta la comparación entre el SNR y la potencia de la señal de ruido.

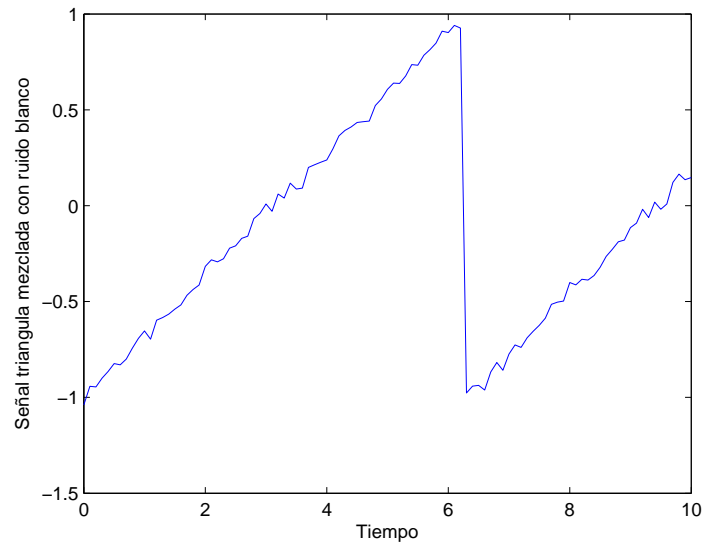


Figura C.2: Señal contaminada con un SNR =500 de ruido blanco.

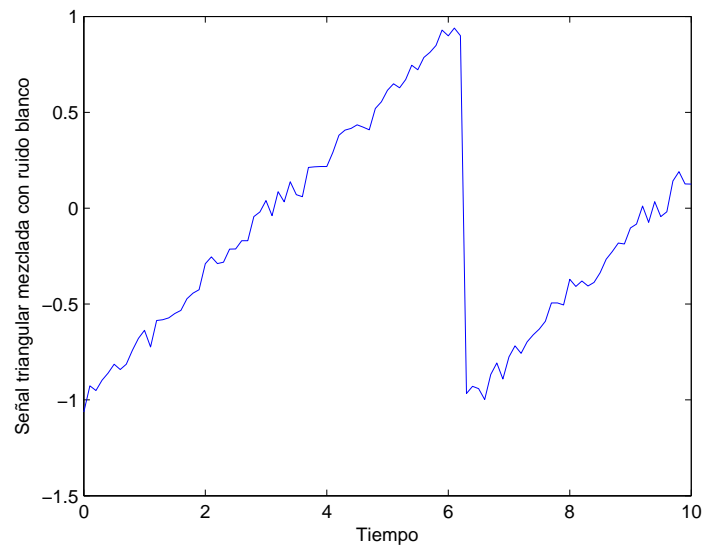


Figura C.3: Señal contaminada con un SNR =200 de ruido blanco.

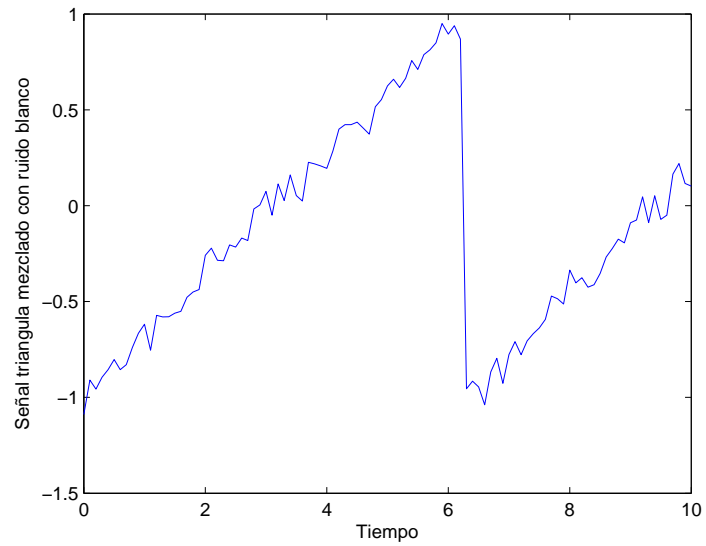


Figura C.4: Señal contaminada con un SNR =100 de ruido blanco.

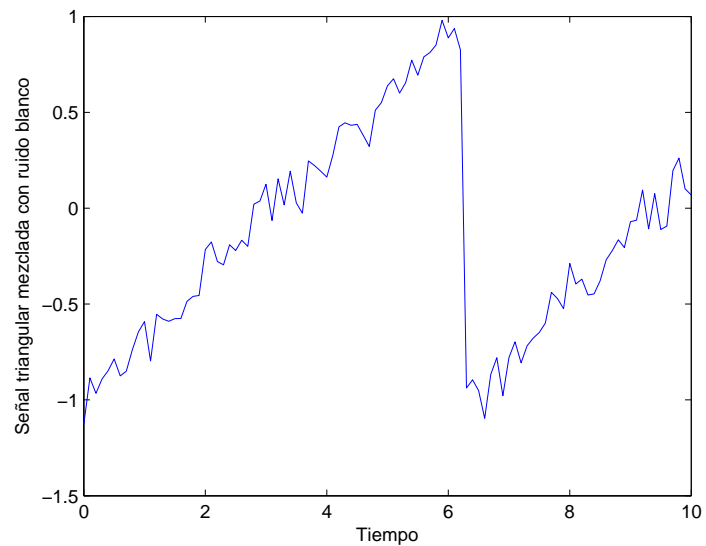


Figura C.5: Señal contaminada con un SNR =50 de ruido blanco.

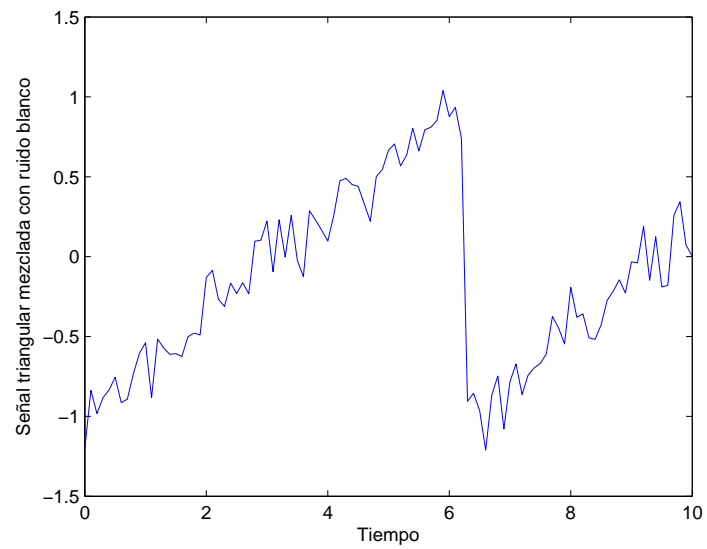


Figura C.6: Señal contaminada con un SNR =20 de ruido blanco.

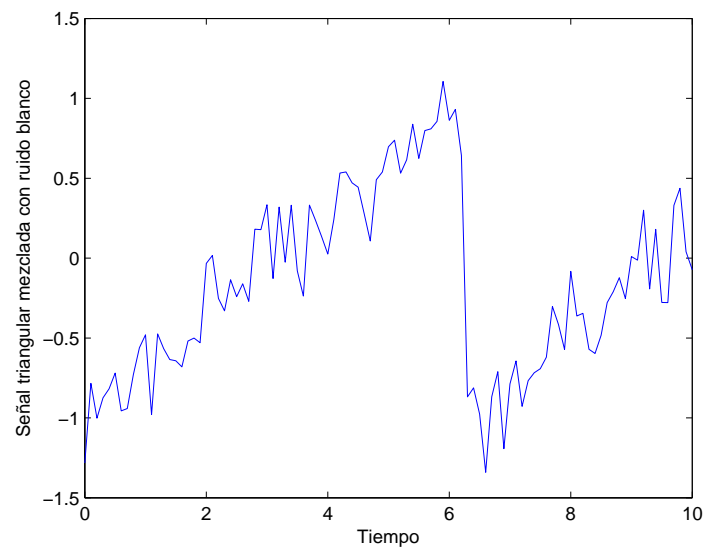


Figura C.7: Señal contaminada con un SNR =10 de ruido blanco.

Cuadro C.1: Comparación entre el SNR y el NP.

SNR	NP
500	0,0006
200	0,0016
100	0,0032
50	0,0063
20	0,0158
10	0,0317

### C.3. Análisis de señales de ruido

#### C.3.1. El ruido blanco

El ruido blanco o ruido Gaussiano presenta una densidad de potencia uniforme sobre todo el espectro de frecuencia [Hayes 1996]. Una señal simple que cumple con las características deseadas de ruido blanco es la generación de valores aleatorios en un intervalo de tiempo. Esta señal se multiplica por una amplitud para manipular la potencia de esta señal. En la figura C.8 se presenta una señal de ruido blanco y en la figura C.9 se presenta la densidad espectral de potencia de dicha señal. La densidad espectral es teóricamente una línea recta, en esta figura se ve que el valor oscila de forma aleatoria alrededor de una media definida por la amplitud de la señal de ruido<sup>1</sup>.

#### C.3.2. Ruido compuesto por funciones cosenoidales

Este tipo de ruido es la suma de cosenos de frecuencias de diferentes tipos, cada función tiene una amplitud unitaria para poder analizar el espectro de densidad de potencia. Por tanto, la señal de ruido tiene puntos máximos de hasta seis unidades. Este ruido es periódico con un pico máximo de valor igual a seis. La figura C.10 presenta la señal de ruido en el tiempo, la ecuación que genera esta señal se presenta en (C.5). La figura C.11 presenta el espectro de la densidad de potencia de la señal de ruido estudiada. Esta señal es la suma de picos en los valores de frecuencia definidos en cada función cosenoidal.

<sup>1</sup>La densidad espectral de potencia es la transformada de Fourier de la secuencia de autocorrelación [Hayes 1996]. El método utilizado para estimar la densidad espectral de potencia es el periodograma. Este método está implementado como una función más de MatLab.

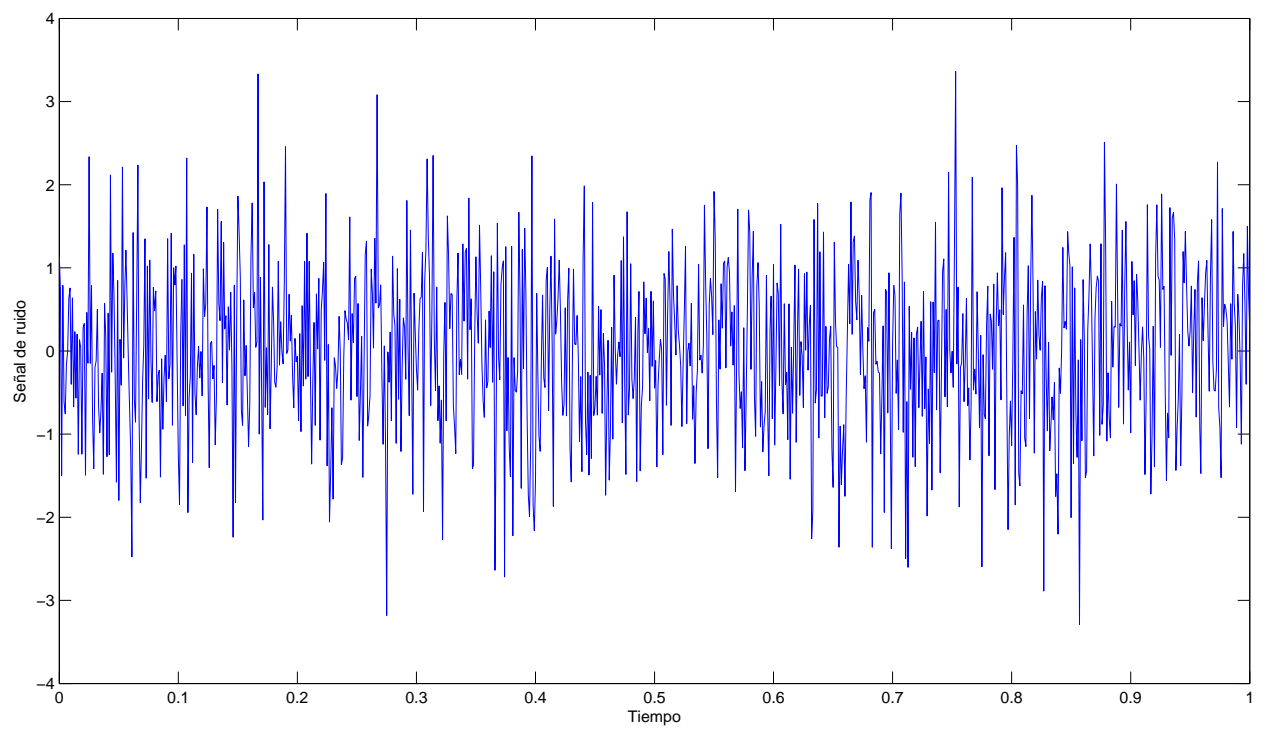


Figura C.8: Señal de ruido blanco generada a través del tiempo.

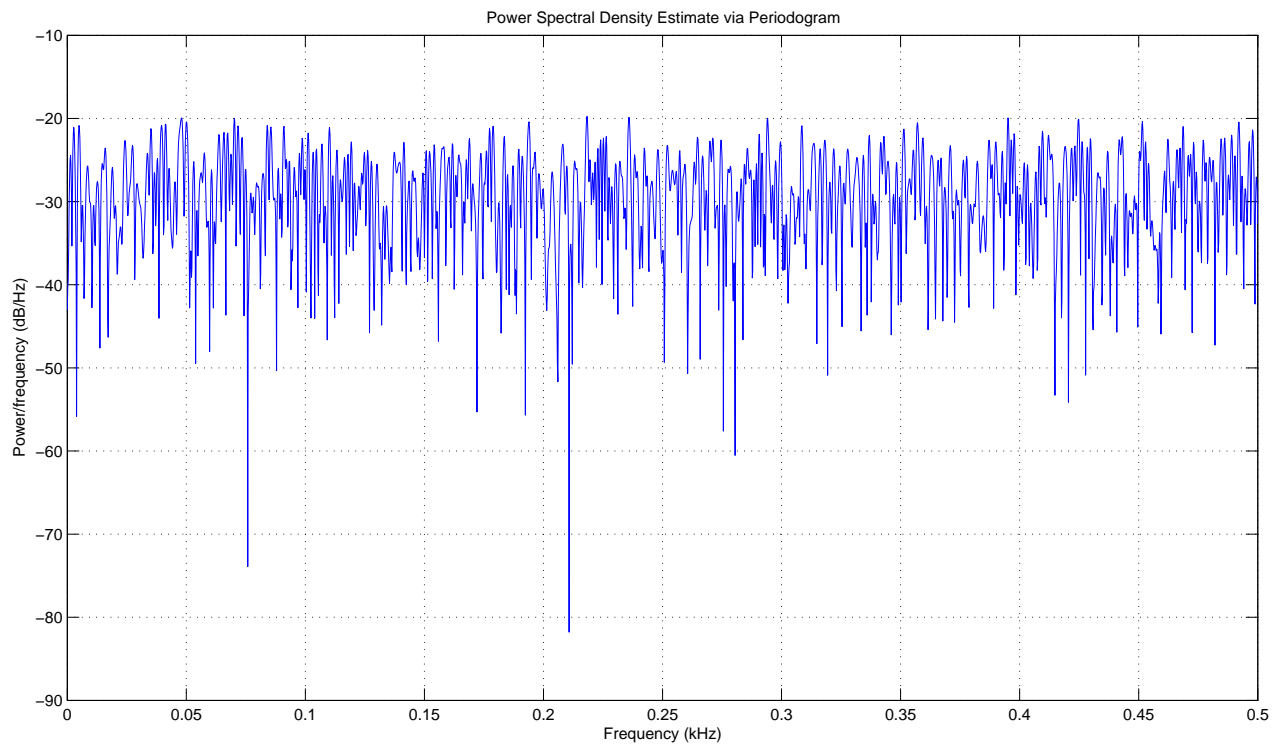


Figura C.9: Espectro de densidad de potencia de frecuencia de una señal de ruido blanco.

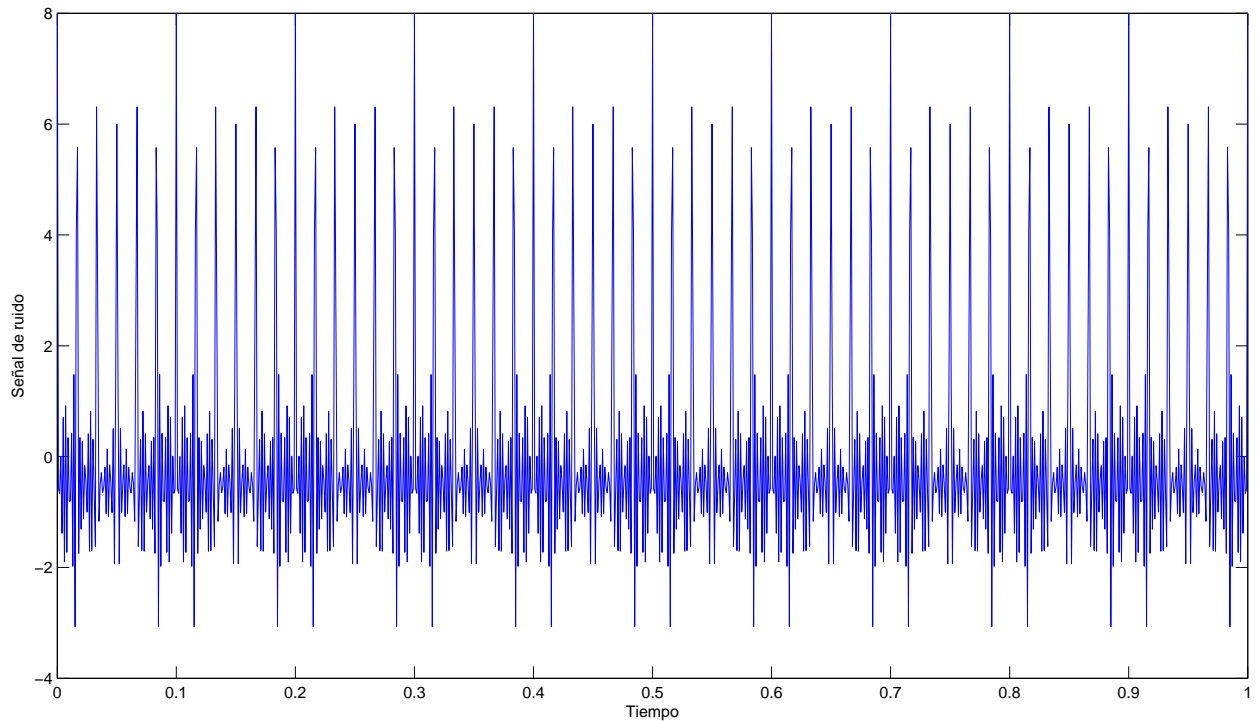


Figura C.10: Señal de ruido cosenoidal generado a través del tiempo.

$$SN = \cos(2\pi 60t) + \cos(2\pi 120t) + \cos(2\pi 180t) + \cos(2\pi 240t) + \cos(2\pi 300t) + \cos(2\pi 360t) \quad (C.5)$$

### C.3.3. Ruido compuesto por funciones senoidales

Este tipo de ruido es la suma de senos de frecuencias de diferentes tipos, cada función tiene una amplitud unitaria para poder analizar el espectro de densidad de potencia. Por tanto, la señal de ruido tiene puntos máximos de hasta 6 unidades. Esta señal, a diferencia de la anterior tiene dos puntos máximos periódicos en vez de uno. La figura C.12 presenta la señal de ruido en el tiempo, la ecuación que genera esta señal se presenta en (C.6). La figura C.13 presenta el espectro de la densidad de potencia de la señal de ruido estudiada. Esta señal cuenta con picos en los valores de frecuencia definidos en cada función al igual que la señal cosenoidal. Sin embargo, este espectro presenta unos pico de dirección contraria altos.

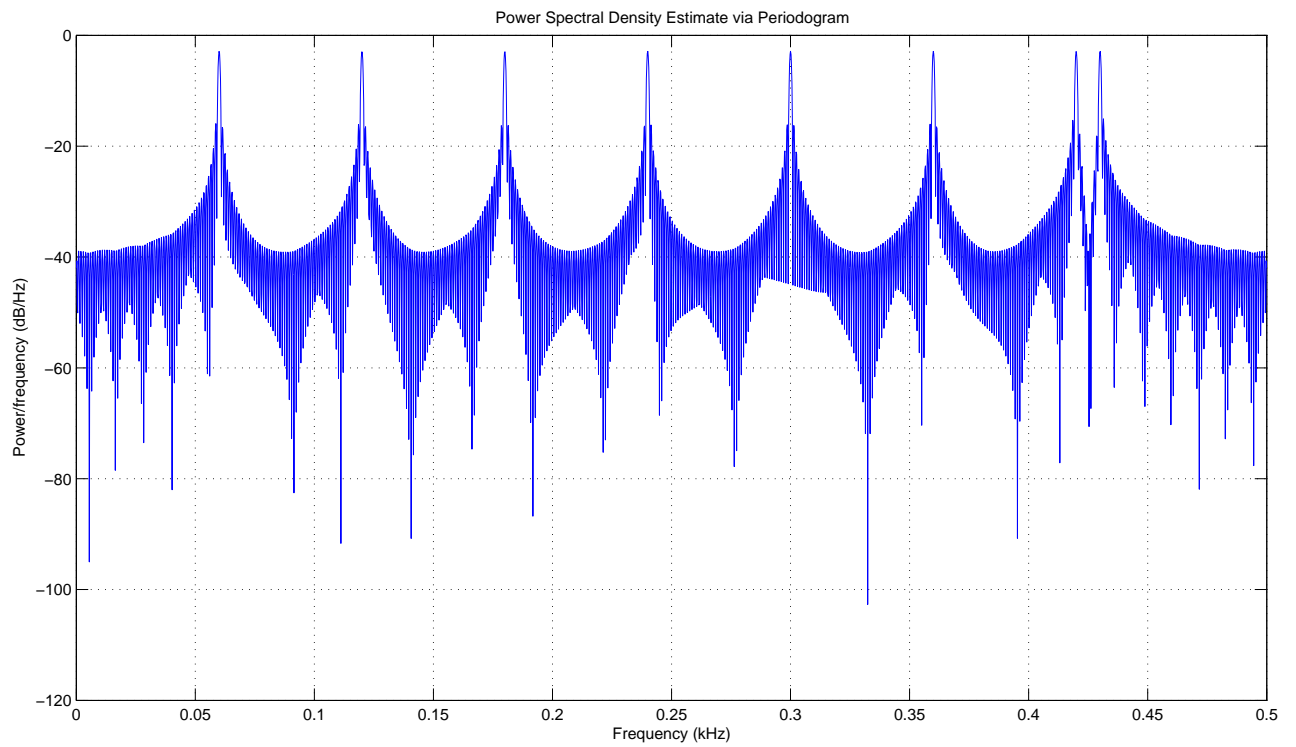


Figura C.11: Espectro de densidad de potencia de frecuencia de una señal de ruido cosenoidal.

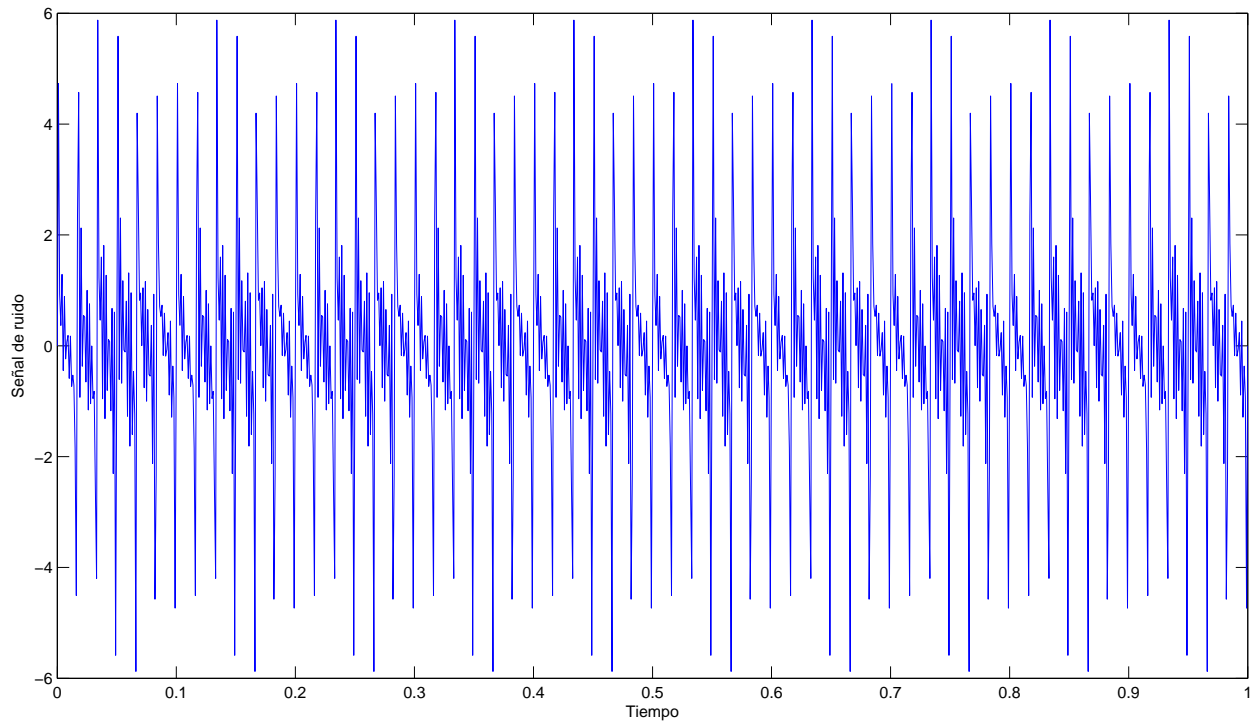


Figura C.12: Señal de ruido senoidal generado a través del tiempo.

$$SN = \text{sen}(2\pi 60t) + \text{sen}(2\pi 120t) + \text{sen}(2\pi 180t) + \text{sen}(2\pi 240t) + \text{sen}(2\pi 300t) + \text{sen}(2\pi 360t) \quad (\text{C.6})$$

### C.3.4. Ruido coseno con fase de valor aleatorio

Este tipo de ruido es la suma de un coseno de frecuencia definida con una fase de valor aleatorio a través del tiempo, la señal de coseno tiene una amplitud unitaria. La señal de ruido oscila aleatoriamente entre uno y menos uno. La figura C.14 presenta la señal de ruido en el tiempo, la ecuación que genera esta señal se presenta en C.7. La figura C.15 presenta el espectro de la densidad de potencia de la señal de ruido estudiada, la cual es similar a la señal de ruido blanco con un pico máximo.

$$SN = \cos(2\pi 60t + \phi) \quad (\text{C.7})$$

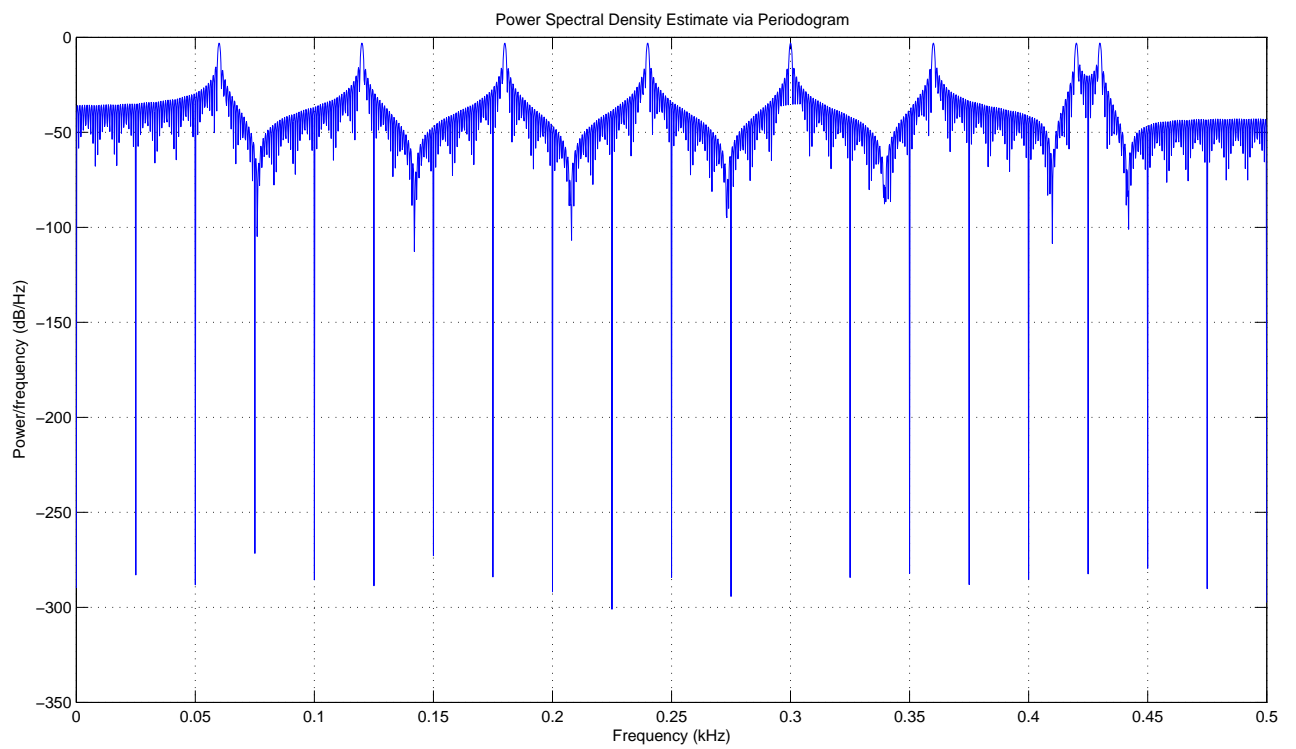


Figura C.13: Espectro de densidad de potencia de frecuencia de una señal de ruido senoidal.

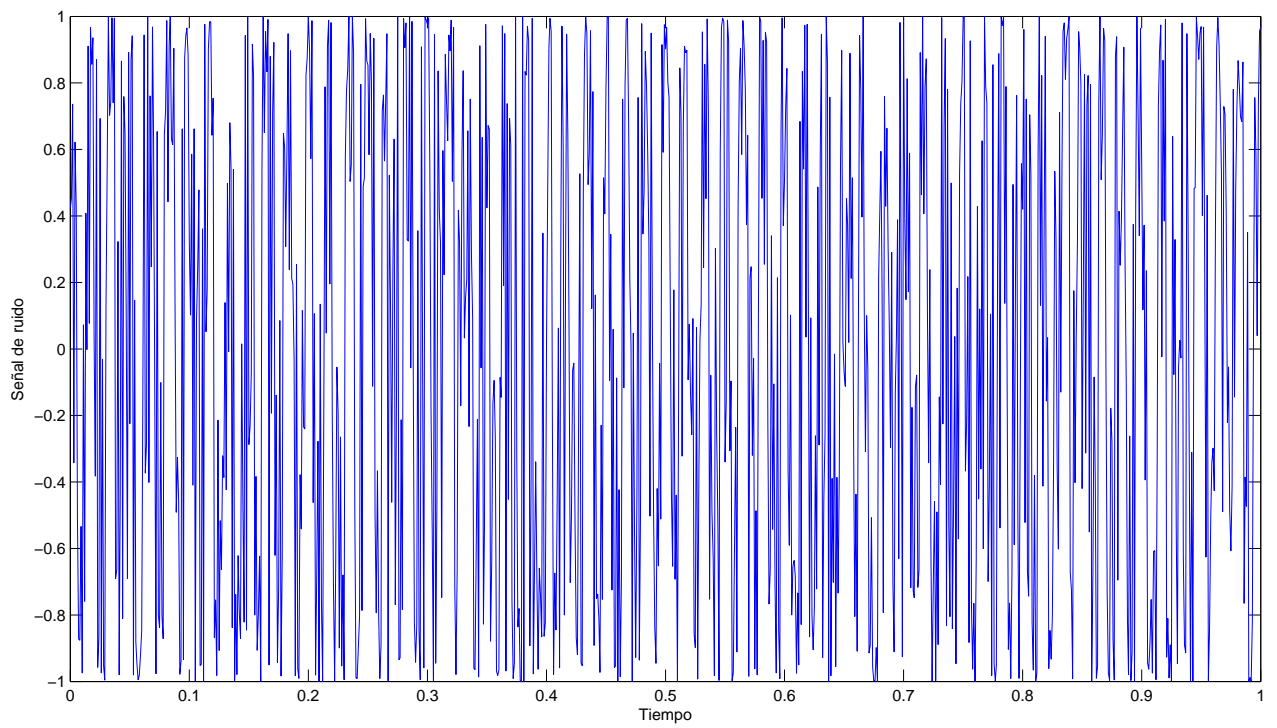


Figura C.14: Señal de ruido coseno con fase aleatoria generado a través del tiempo.

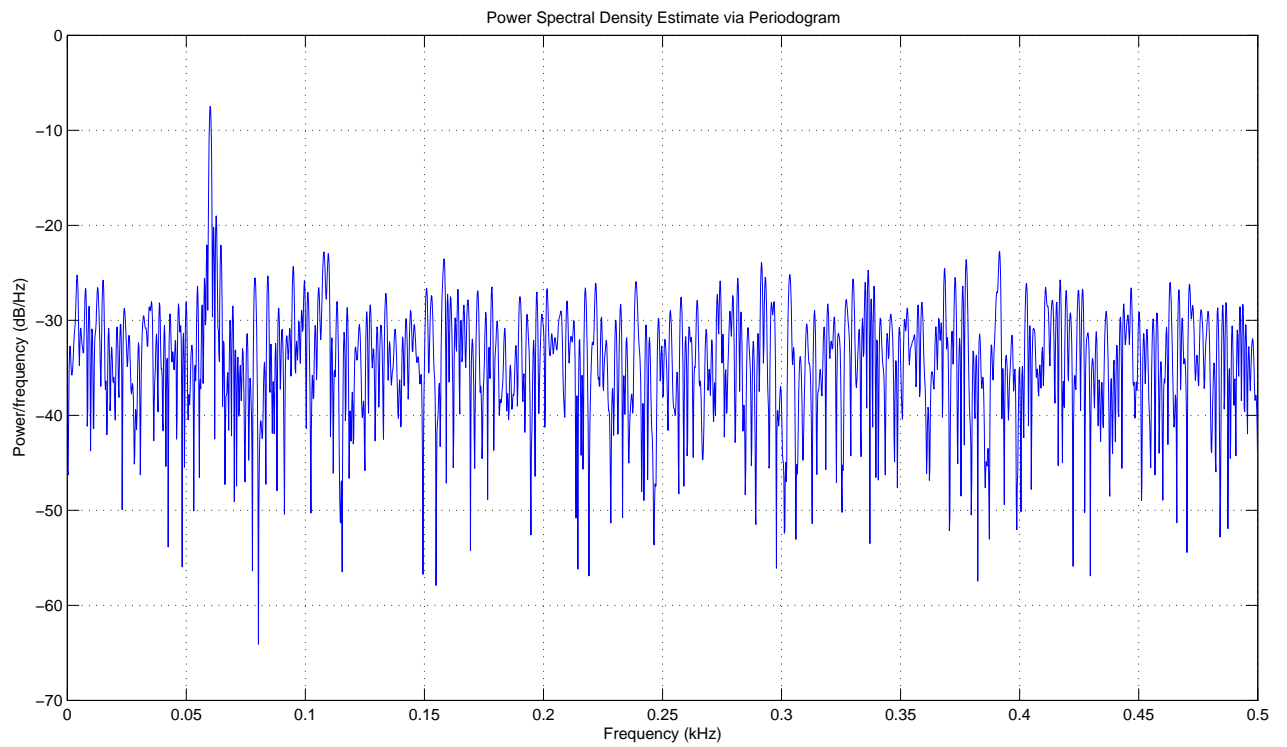


Figura C.15: Espectro de densidad de potencia de frecuencia de una señal de ruido coseno con fase aleatoria.

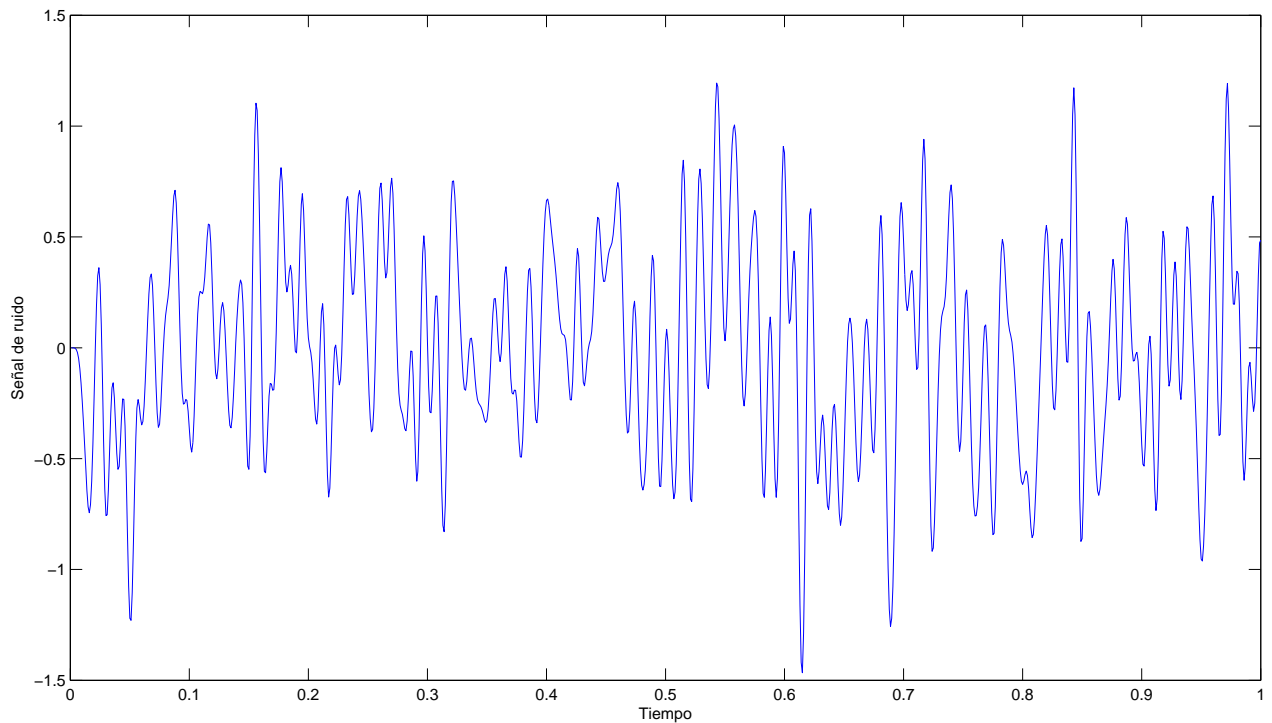


Figura C.16: Señal de ruido rojo a través del tiempo.

### C.3.5. Ruido rojo

Al tomar el ruido blanco y usarlo como entrada de diferentes filtros se producen los ruidos coloreados. El ruido rojo se produce con un filtro pasa bajas, lo que hace que el espectro de la señal tenga una similitud al mismo filtro pasa bajas. En la figura C.16 se presenta la señal de ruido creado a partir de la señal de ruido blanco presentado en C.8 y de un filtro pasa baja con una frecuencia de corte igual a  $100\text{Hz}$ . En la figura C.17 se presenta el espectro de la densidad de potencia de la señal de ruido, el valor de la potencia se atenúa después de la frecuencia de corte.

### C.3.6. Ruido rosado

Este tipo de ruido tiene un espectro de densidad de potencia que decrece  $3\text{dB}$  por cada octava conforme aumenta el valor de frecuencia, es decir proporcional al  $\frac{1}{f}$ . La señal de ruido rosado es producida integrando la señal de ruido blanco presentado en C.8. En la figura C.18 y C.19 se presentan la señal de ruido rosado en el tiempo y

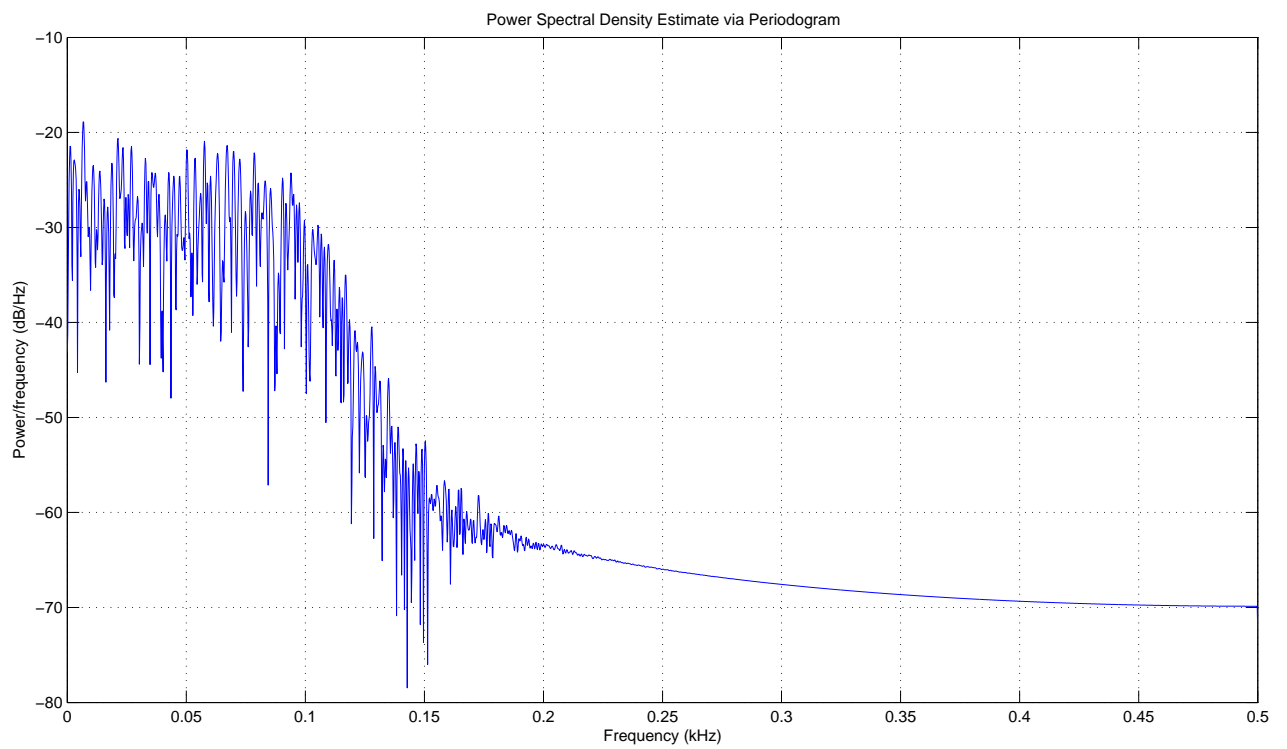


Figura C.17: Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido rojo.

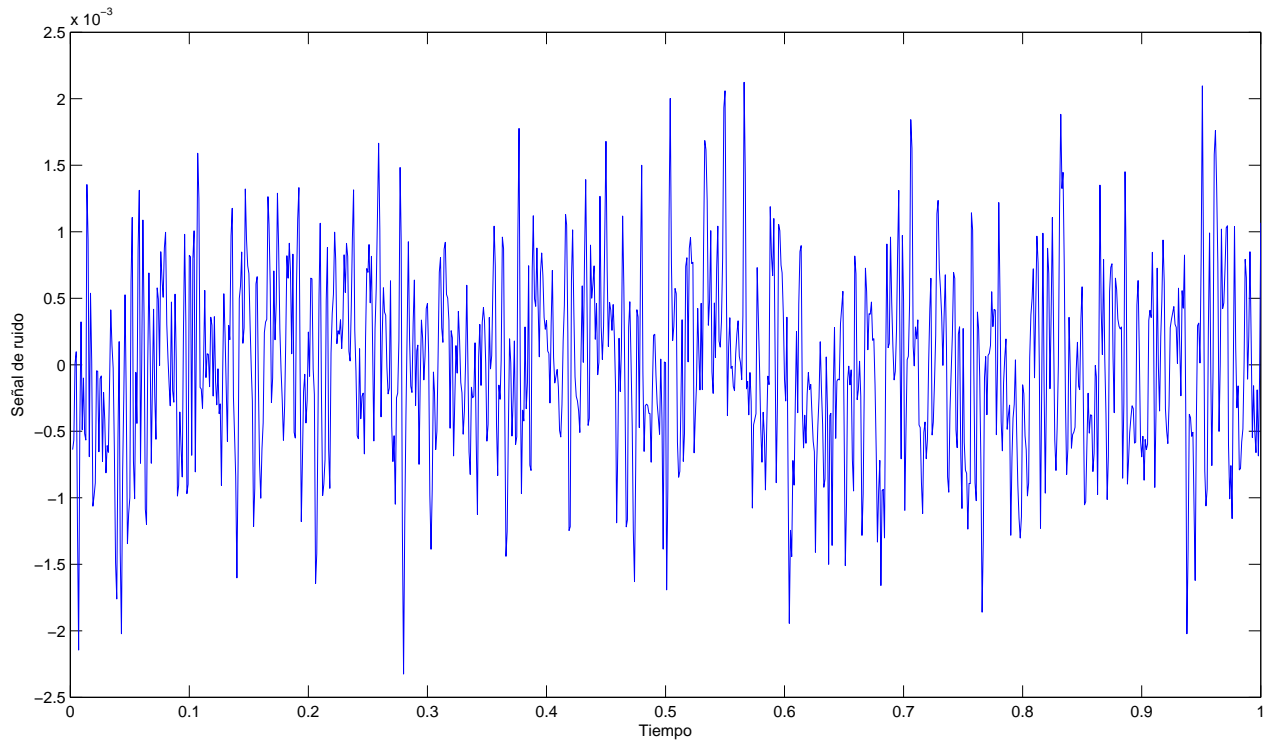


Figura C.18: Señal de ruido rosado a través del tiempo.

el espectro de densidad de potencia respectivamente.

### C.3.7. Ruido marron

Esta señal de ruido se caracteriza por tener un espectro de densidad de potencia que decae  $6dB$  por octava al aumentar la frecuencia, es decir la densidad es proporcional a  $\frac{1}{f^2}$ . La figura C.20 y C.21 se presentan la señal de ruido marron y su espectro de densidad de potencia respectivamente. El adjetivo de marron a este tipo de ruido no tiene que ver con el espectro, si no en honor al científico Robert Brown.

### C.3.8. Ruido azul

La señal de ruido azul se define como una señal cuyo espectro de densidad de potencia se encuentra solo en la banda de las altas frecuencias. Sin embargo, la señal estandar de ruido azul es la señal cuyo espectro incrementa  $3dB$  por octava a medida que se aumenta la frecuencia, es decir el espectro es proporcional a  $f$ . En la

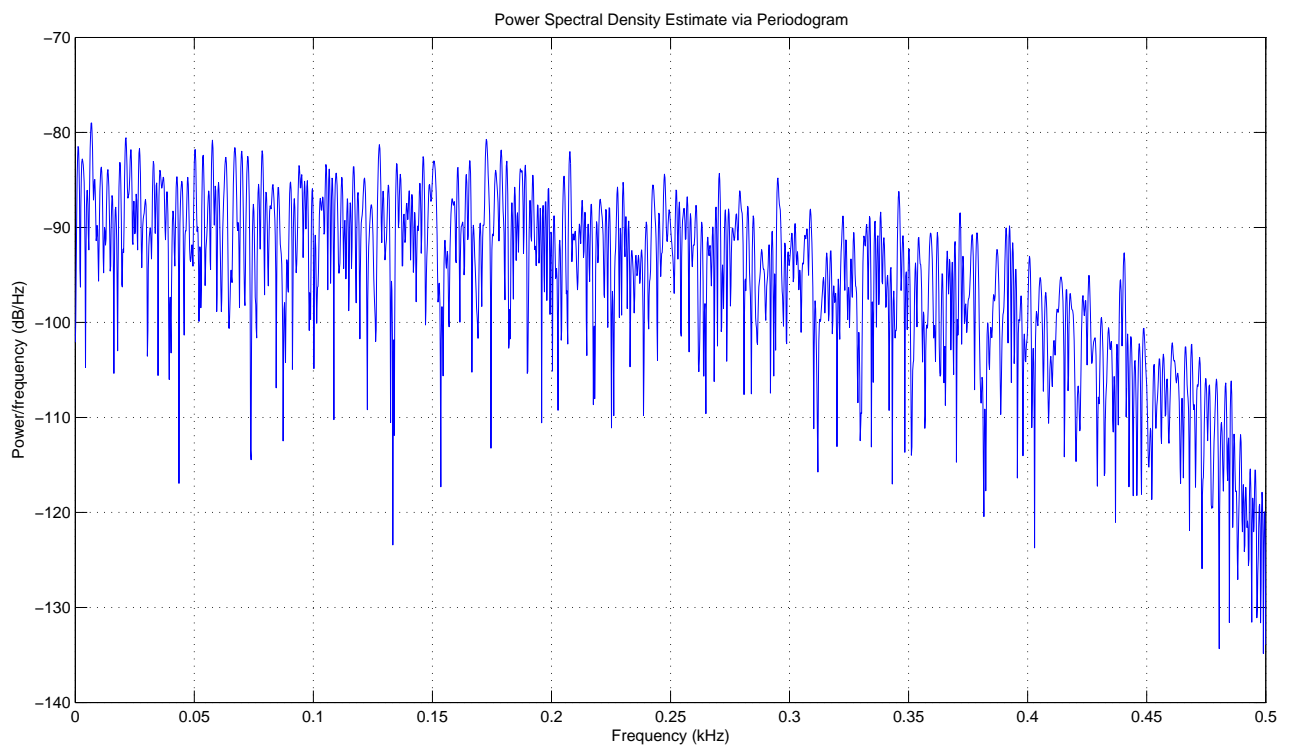


Figura C.19: Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido rosado.

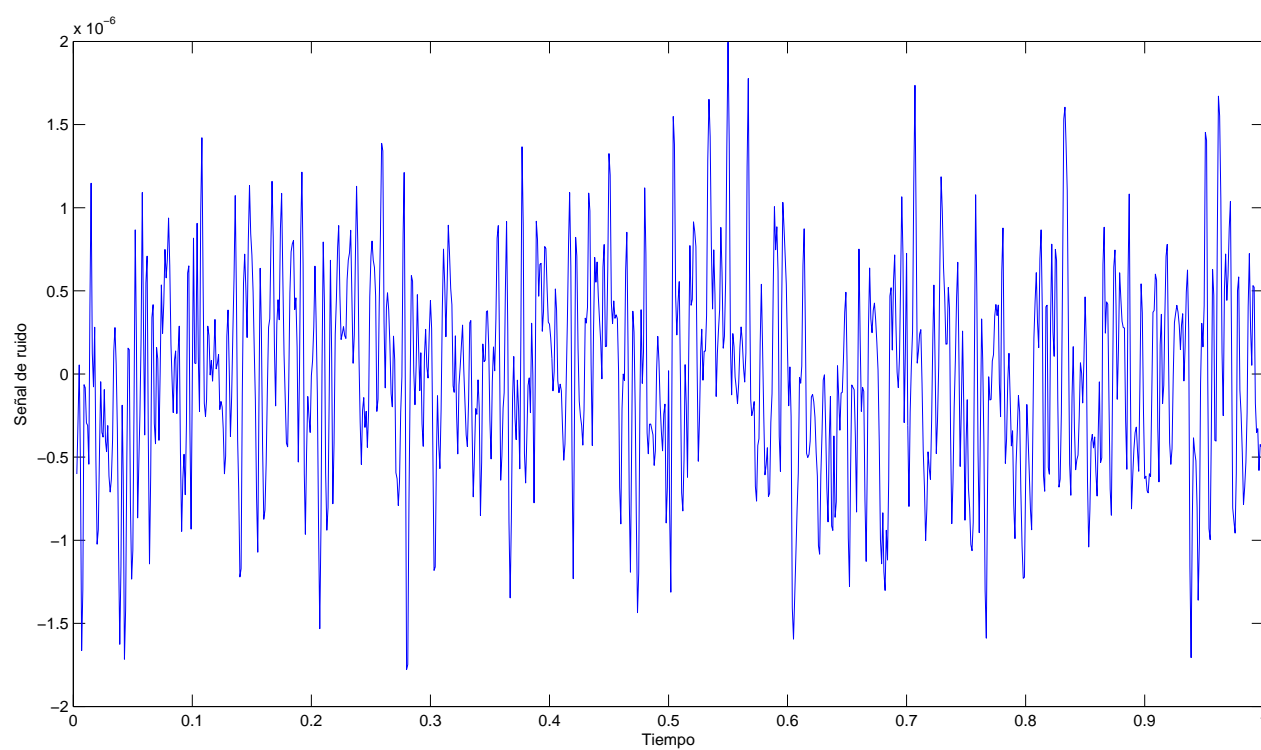


Figura C.20: Señal de ruido marrón estándar a través del tiempo.

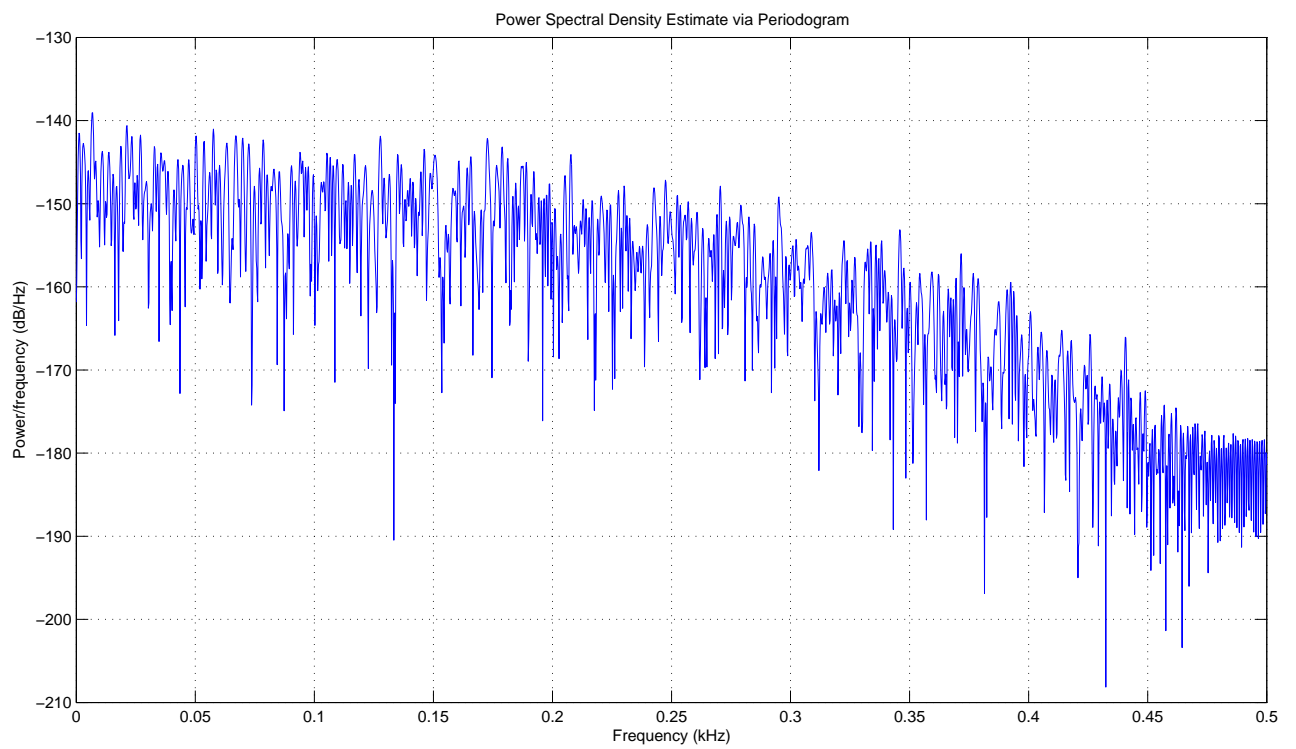


Figura C.21: Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido marrón.

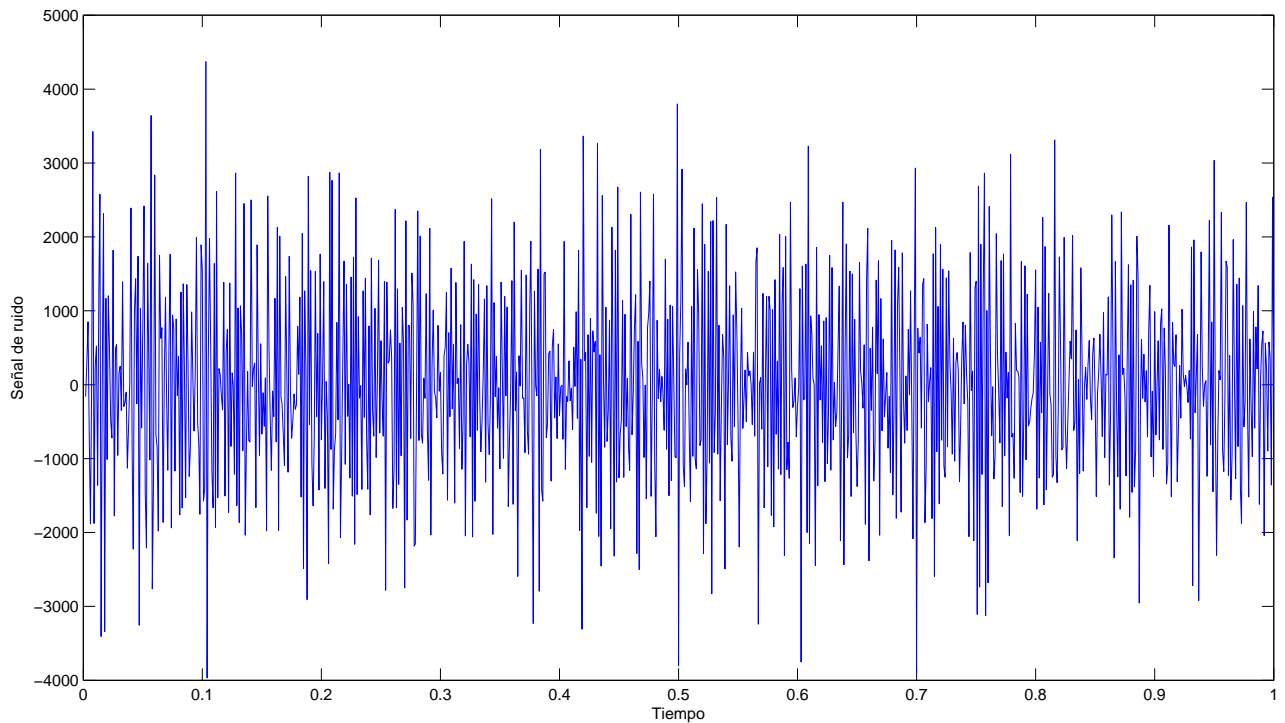


Figura C.22: Señal de ruido azul estandar a través del tiempo.

figura C.22 se presenta una señal de ruido azul estandar, el espectro de densidad de potencia se presenta en C.23. Para poder observar la proporción de la señal de densidad con respecto a  $f$ , es necesario realizar la grafica de la señal con una abcisa semilogaritmica. Esta señal se creó al diferenciar la señal de ruido presentada en C.8. De forma anexa se presentan las señales de ruido azul opcional y su respectivo espectro de densidad de potencia respectivamente en C.24 y C.25. Esta señal de ruido está creado a partir de la señal de ruido presentada en C.8 y un filtro pasa alta con un valor de frecuencia de corte igual a  $300\text{Hz}$ .

### C.3.9. Ruido violeta o purpura

Este tipo de ruido está caracterizado por tener un espectro de densidad de potencia que aumenta  $6\text{dB}$  por cada octava al aumentar la frecuencia, es decir es proporcional a  $f^2$ . Esta señal se crea mediante la doble diferenciación de la señal de ruido blanco presentado en C.8. Como se mencionó cuando se presentó la señal de ruido azul, para poder ver la pendiente de proporción es necesario llevar la señal a una abcisa

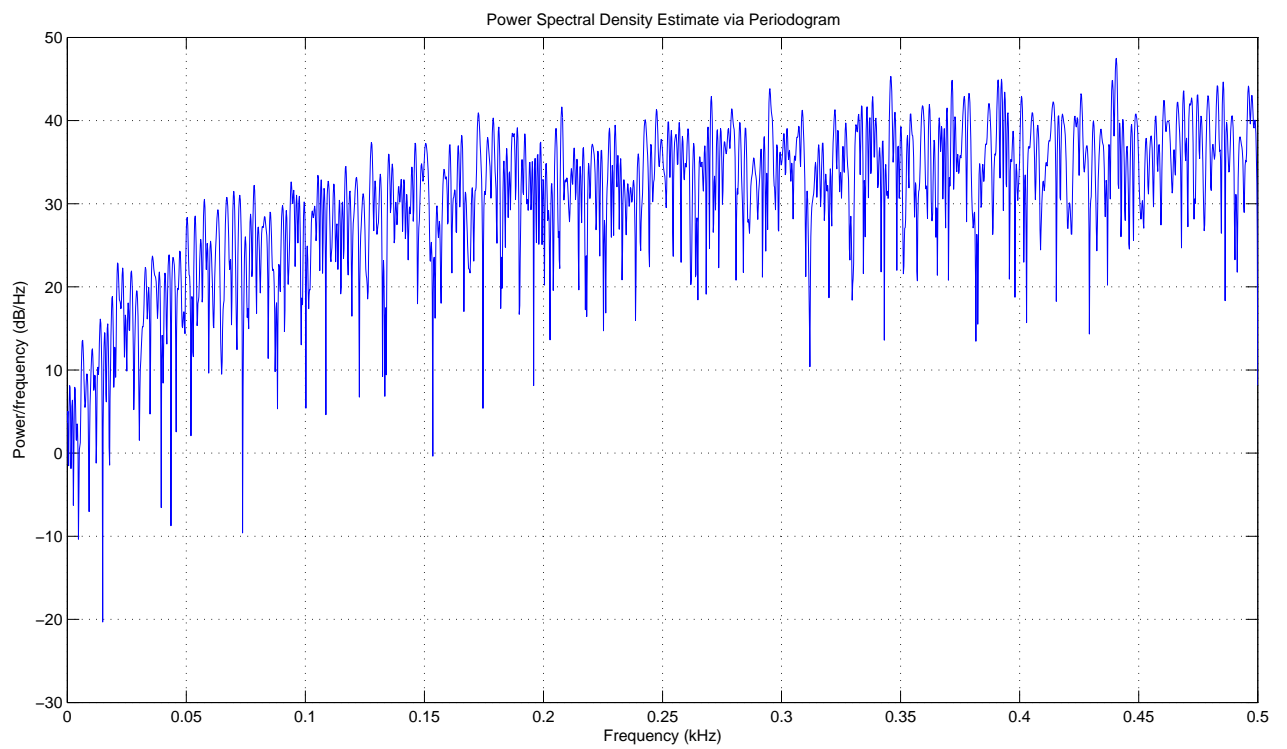


Figura C.23: Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido azul estandar.

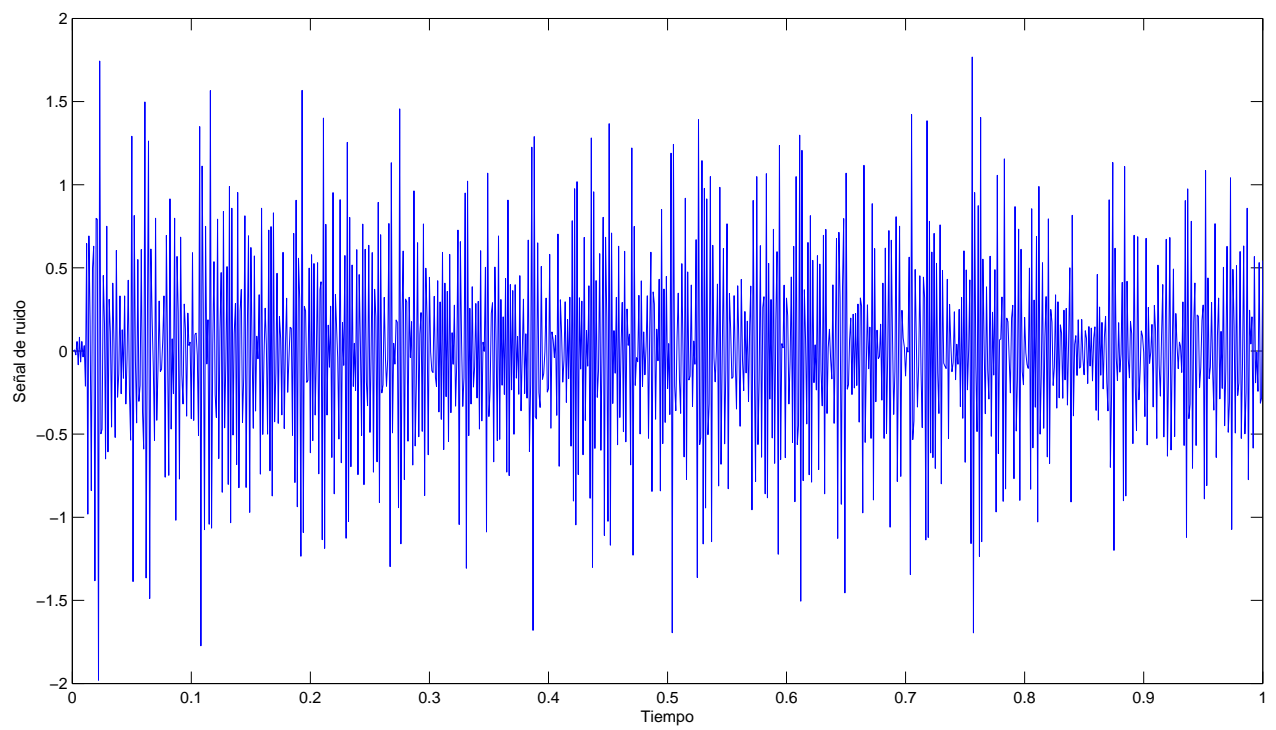


Figura C.24: Señal de ruido azul opcional estándar a través del tiempo.

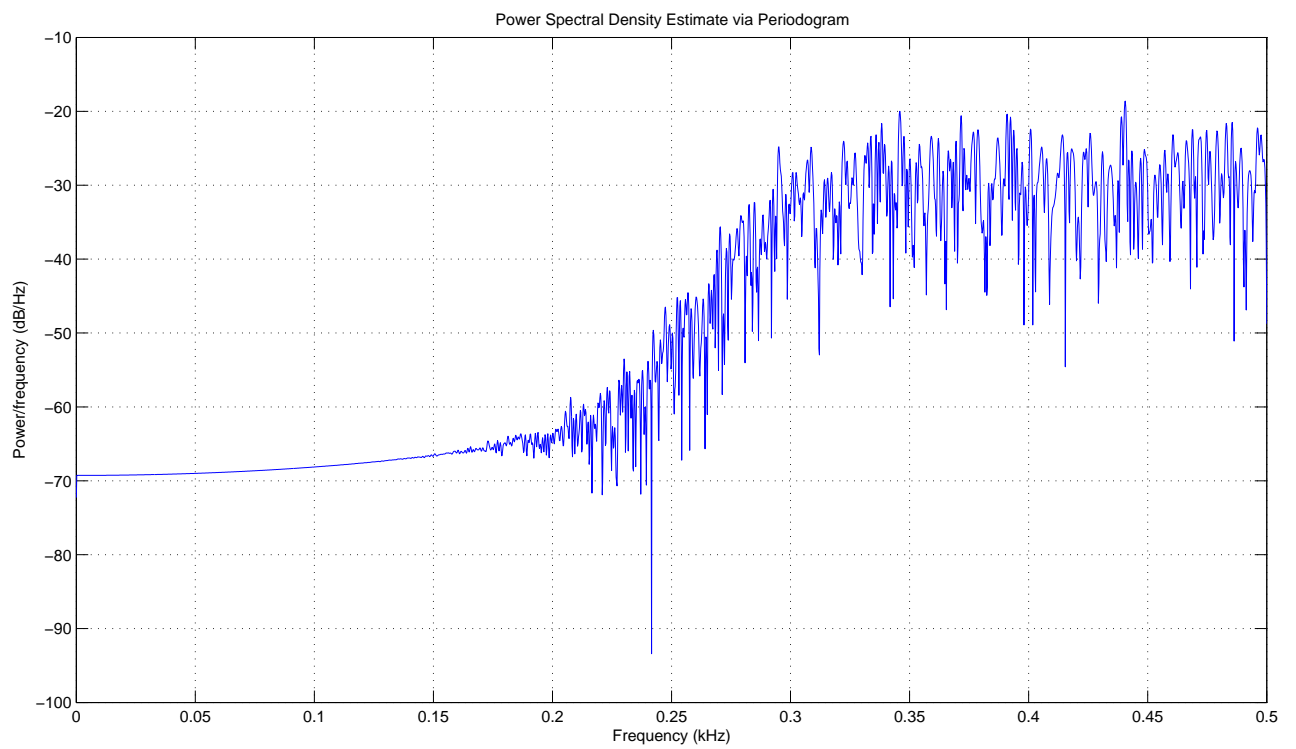


Figura C.25: Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido azul opcional.

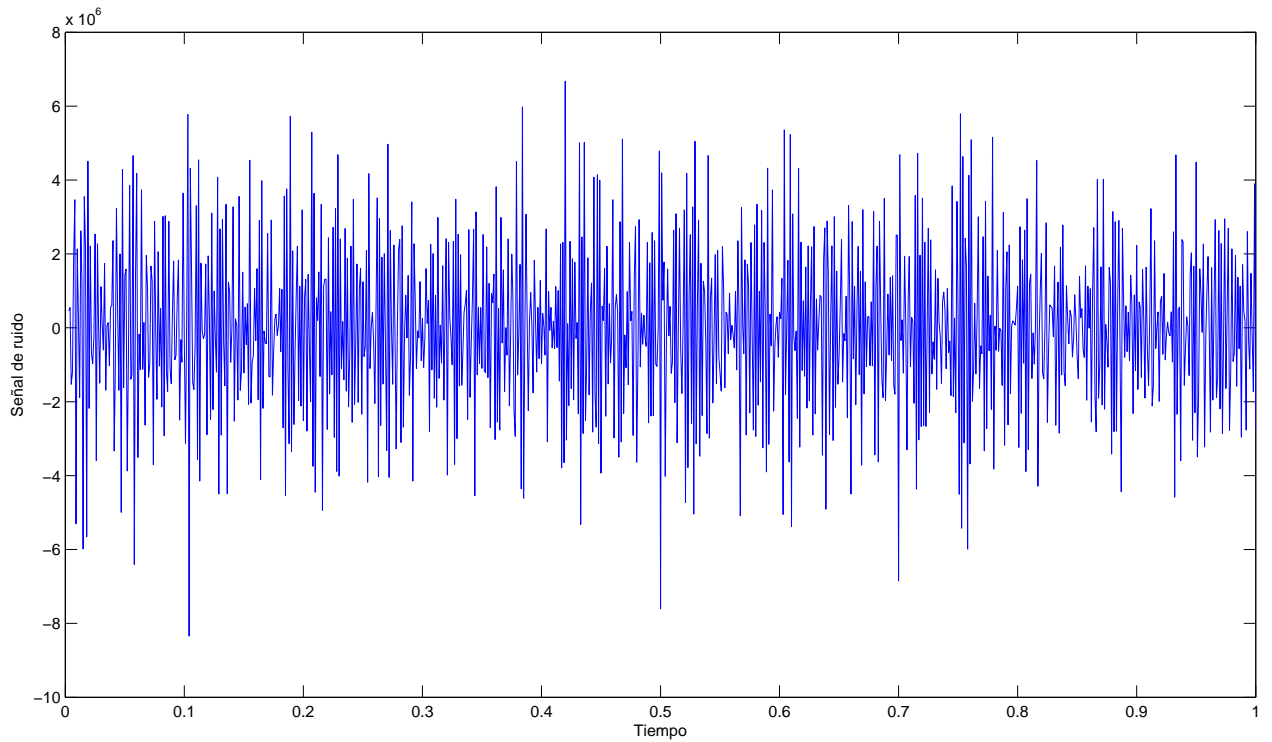


Figura C.26: Señal de ruido violeta estándar a través del tiempo.

semilogarítmica. Las figuras C.26 y C.27 presentan la señal de ruido violeta y su respectivo espectro de densidad de potencia.

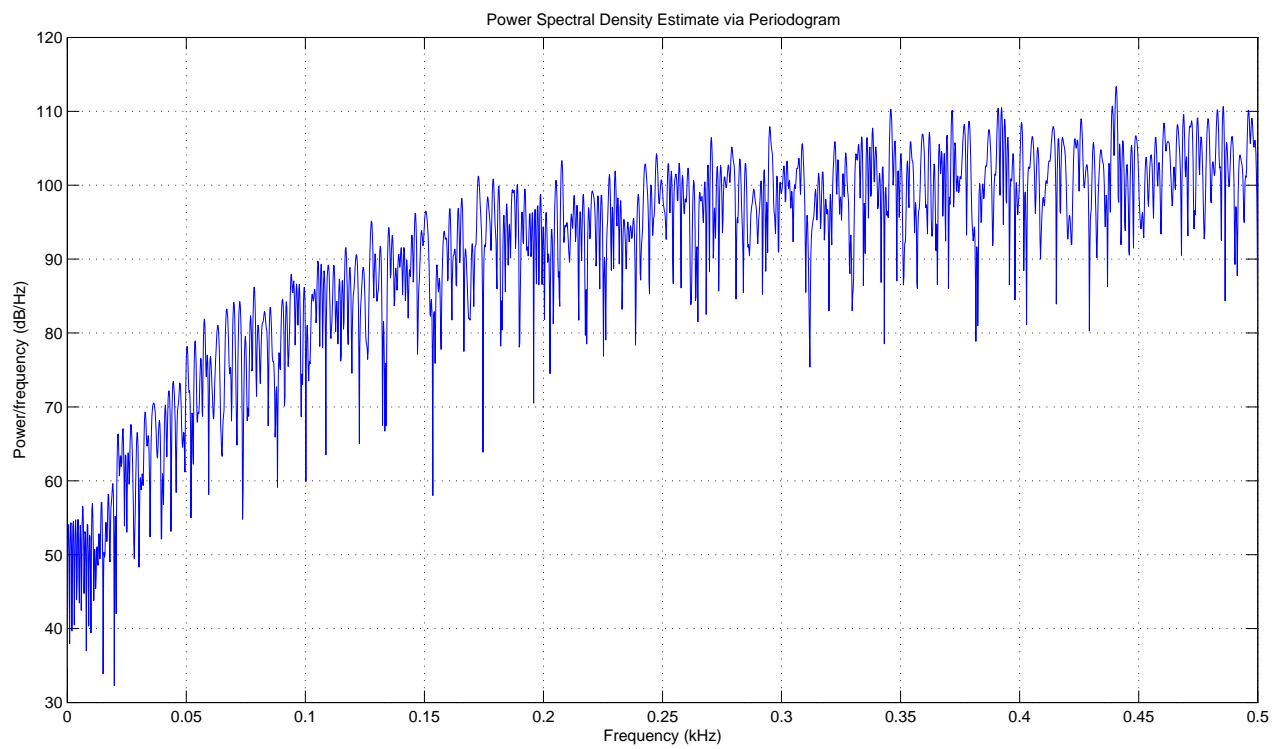


Figura C.27: Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido violeta.

# Apéndice D

## Prefiltrado de las señales de entrada

### D.1. Descripción del filtro Kalman

Con el fin de reducir el ruido en las señales de entrada se utiliza el filtro Kalman. En este apéndice se presenta una descripción de la estructura del filtro Kalman. Debido a los excelentes resultados obtenidos en [Gualdrón 2004] y su sencilla implementación se decidió utilizar este tipo de algoritmo. El filtro Kalman es un filtro discreto lineal, es también un filtro óptimo, debido a que su base matemática es la estimación recursiva de mínimos cuadrados. El filtro cuenta con un modelo matemático del sistema, mediante el cual se estiman las señales de salida a partir de las señales de entrada y reduciendo el error cuadrático entre las señales de salida estimadas y las medidas. El filtro predice los estados del sistema mediante los valores previos de los estados, el error pasado de la señales de salida medidas y la ganancia de Kalman<sup>1</sup>. Esta ganancia se calcula de forma iterativa, mediante el valor de covarianza de la señal de error de la estimación corregida. Para realizar este proceso es necesario conocer también la covarianza del ruido medido a la salida y la señal de salida. El algoritmo supone una correlación nula entre el ruido de la señal de entrada y el de la señal de salida<sup>2</sup>. En la figura D.1 se presenta el proceso de filtrado, el cual se realiza simultáneamente con el sistema. En [Castellanos u. Shinakov 2007] y [Stranneby 2001] se describe el filtro Kalman, a partir de la estimación recursiva

---

<sup>1</sup>Cuando el estimador Kalman es utilizado como filtro la entrada y la salida del sistema son necesariamente los mismos.

<sup>2</sup>La suposición de correlaciones nulas entre las señales solo es utilizada para el algoritmo simplificado, existen algoritmos generalizados donde dicha suposición no se utiliza [Stranneby (2001)].

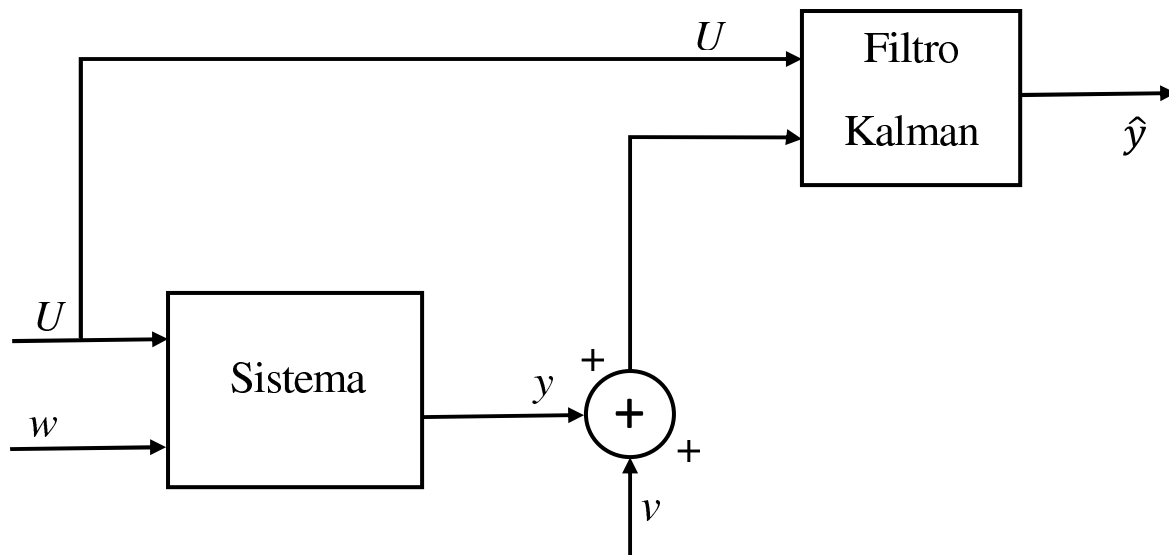


Figura D.1: Diagrama funcional del filtro Kalman.

de mínimos cuadrados para presentar el algoritmo generalizado del filtro con gran rigor matemático.

## D.2. Modelo de estimación de las señales

Comúnmente se utiliza un modelo del sistema para filtrar las señales de salida. Sin embargo, para este propósito aún no se cuenta con un modelo definido de la máquina y es necesario filtrar la señales de entrada y salida del sistema. Por tanto, el modelo se basa en la tendencia de la señales eléctricas, las cuales a pesar de tener variaciones rápidas, tienen una tendencia local definida<sup>3</sup>. El modelo utilizado para realizar el filtrado de la señal, está basado en una regresión simple de la señal, la cual se presenta en (D.1). Se implementaron diferentes modelos para la estimación de la señal. Sin embargo, los resultados obtenidos fueron similares, por esto se selecciono un modelo simple confiable. Los resultados obtenidos con este tipo de filtrado son excelentes para el caso de ruido blanco, En el capítulo de pruebas se presentan

<sup>3</sup>Las señales de ruido cambian aleatoriamente entre muestra y muestra; no existe una tendencia local entre muestras.

resultados de filtrados realizados. El algoritmo secuencial de proceso del filtrado se presenta en la figura D.2, este diagrama esta basado en el diagrama presentado en [Gualdrón, 2004], con base en estas ecuaciones se presenta el diagrama de flujo del algoritmo en la figura D.2.

$$x(k+1) = x(k) + dt \left( \frac{x(k) - x(k-1)}{2} + \frac{x(k) - x(k-2)}{2} \right) \quad (\text{D.1})$$

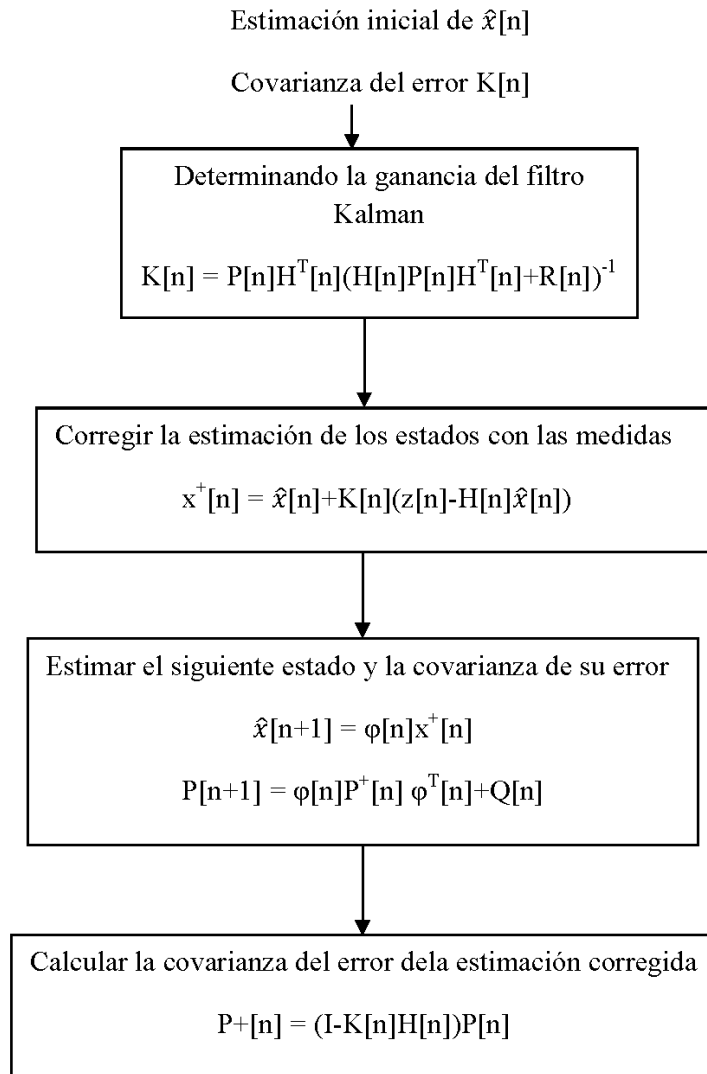


Figura D.2: Diagrama de flujo del algoritmo.

# Apéndice E

## Manual de usuario

### E.1. Introducción

La herramienta computacional EGM (Estimación Gráfica de Máquinas), es una aplicación desarrollada en MATLAB. Esta herramienta cuenta con una interfaz gráfica de usuario que permite la estimación de los parámetros de máquinas síncronas a partir de datos de operación normal y de vacío. El modelo que se utiliza para la estimación es el modelo representado en componente  $dq0$ , de orden dos y tres. Esta herramienta integra una metodología de estimación de parámetros de la máquina síncrona en una interfaz gráfica que permite un uso ameno y confiable, facilitando la interacción usuario - software. La estimación hecha por EGM utiliza la ToolBox "Ident" de Matlab, como herramienta base para determinar los parámetros del modelo de trabajo.

### E.2. Instalación

#### E.2.1. Requerimientos

Los requerimientos mínimos de Hardware para utilizar esta herramienta son:

- Procesador Pentium III, Athlon 2000 o superiores.
- MicrosoftWindows XP, Mac OS, Linux (Ubuntu), o versiones siguientes.

- Memoria RAM de 128 MB
- Tarjeta gráfica de 16 Bits
- 500 MB de espacio en disco duro.

### E.2.2. Procedimiento de instalación

Aunque la herramienta es autónoma en su funcionamiento, es necesario la instalación de componentes básicos de MatLab, sin que el usuario adquiera alguna licencia. La instalación se ejecuta en el orden presentado a continuación:

- MCRInstaller.exe

Esto es un asistente llamado MatLabComponenteRuntime para la instalación de la plataforma a utilizar por la herramienta, que lo irá guiando en el proceso de instalación, preguntando por la ubicación de carpetas y preferencias del usuario, tales como íconos de acceso directo y demás.

- EGM.exe

Instalará los requerimientos propios de la herramienta, así como los archivos de datos e imágenes. La instalación y extracción de los archivos se realizará en la carpeta donde se ubique este ejecutable. Es necesario que los archivos bases de la herramienta no sean movidos a otra ubicación para el correcto funcionamiento de esta.

### E.3. Ejecución

Para iniciar con la herramienta, se ejecuta EGM.exe. La primera ejecución copiará los archivos necesarios para su uso, como fue descrito anteriormente, en adelante se ejecutarán solo las funciones de estimación. Cada vez que se realice una estimación, la herramienta guardará una copia de los archivos originales en su carpeta de trabajo. Con la ejecución de EGM.exe aparecerá la ventana que se presenta en la figura E.1. Esta figura se divide en tres partes: A (Datos de entrada), B (Botones de comandos), C (Barra de direcciones).

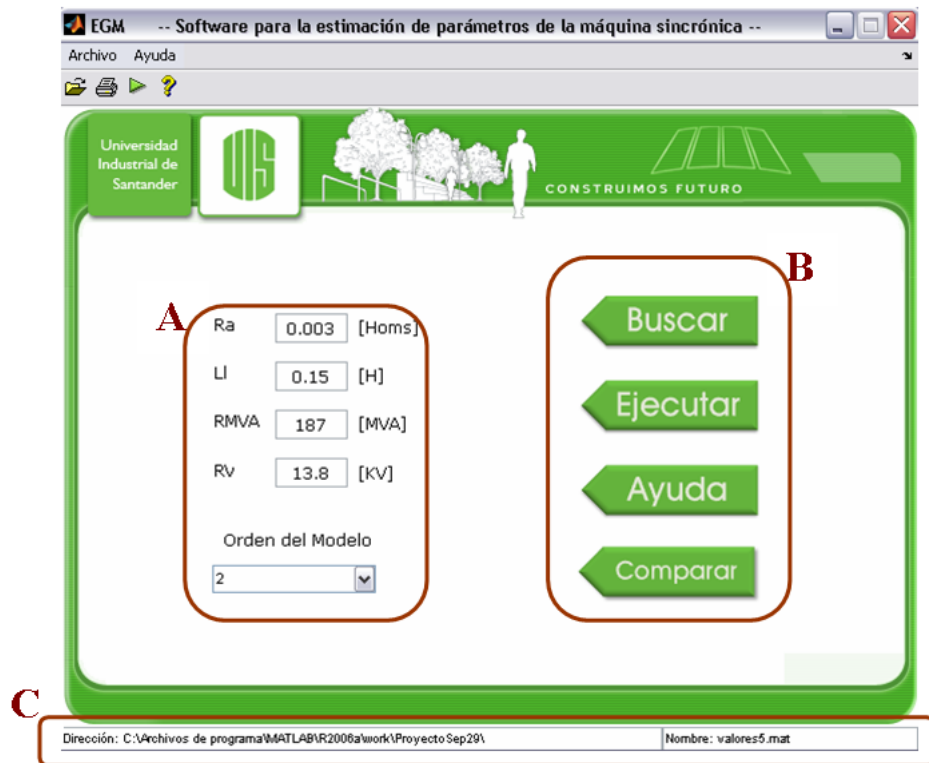


Figura E.1: Ventana principal de la herramienta EGM.

## A (Datos de entrada)

- Escritos

En estas casillas se incluye el valor de: Ra: resistencia de armadura del devanado del Estator, en ohms. Ll: inductancia propia del devanado del Rotor, en henrys. RMVA: valor de la potencia nominal de la máquina, en MVA. RV: valor nominal de la tensión de operación de la máquina, en kilovolts.

- Seleccionado

En esta casilla se define el orden del modelo, los valores utilizado son 2 para utilizar el modelo de segundo orden ò 3 para el modelo de tercer orden.

## B (Botones de comando)



Abre una nueva ventana, en donde se escogerán los archivos de trabajo.



Inicia la ejecución de la estimación de parámetros.



Accede a este manual de usuario en un formato idóneo para tal fin.



Permite al usuario comparar las señales de diferentes archivos \*.ATP.

## C (Barra de direcciones)

En esta área se encuentra la dirección y nombre del archivo de trabajo actual. Si se cierra la herramienta, esta reconocerá el último archivo con el que se trabajó. Si por alguna razón no existiera este último archivo, la herramienta tomara los valores por defecto.

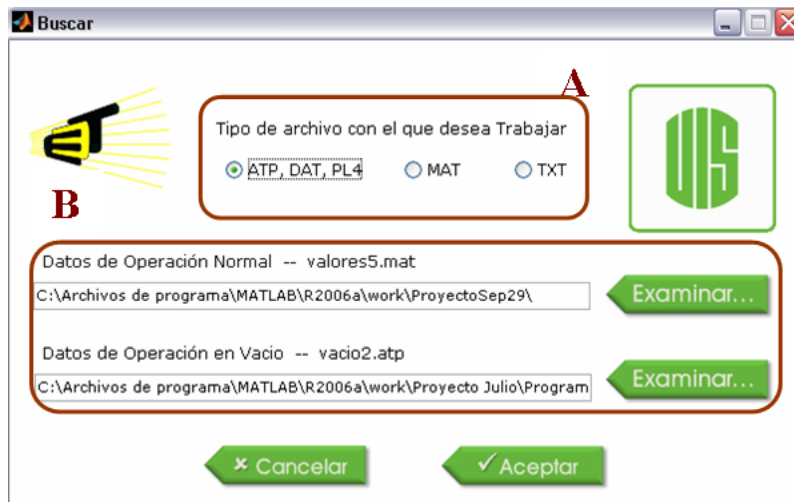


Figura E.2: Ventana parámetros.

## E.4. Buscar

Al dar clic en “Buscar”, se desplegará una ventana como la que se muestra en la figura E.2. En esta ventana se seleccionan los archivos que contienen la información de la operación de la máquina en vacío, operación transitoria y estado estable. A partir de este conjunto de valores se estimaran los parámetros.

Dependiendo del tipo de archivo que se seleccione, se habilitará o deshabilitará el botón inferior y su respectiva barra de direcciones. Si se elige formatos \*.ATP, \*.DAT, \*.PL4 se habilitaran los dos botones. Si elige archivos con extensión \*.MAT o \*.TXT solo se tendrá habilitado el botón superior, ya que los datos de operación en vacío se suponenen incluidos en los datos seleccionados.

Una vez se selecciona el tipo de archivo, es necesario dar clic en “Examinar” para abrir la ventana presentada en la figura E.3. Para seleccionar el o los archivos de trabajo, se ejecuta abrir, luego se da clic en aceptar para tomar esta información o cancelar si se quiere seguir trabajando con los archivos actuales.

## E.5. Ejecutar

Al dar clic en el boton ejecutar se despliega la ventana presentada en la figura E.4. Esta ventana permite que el usuario pueda visualizar las señales de operación de la

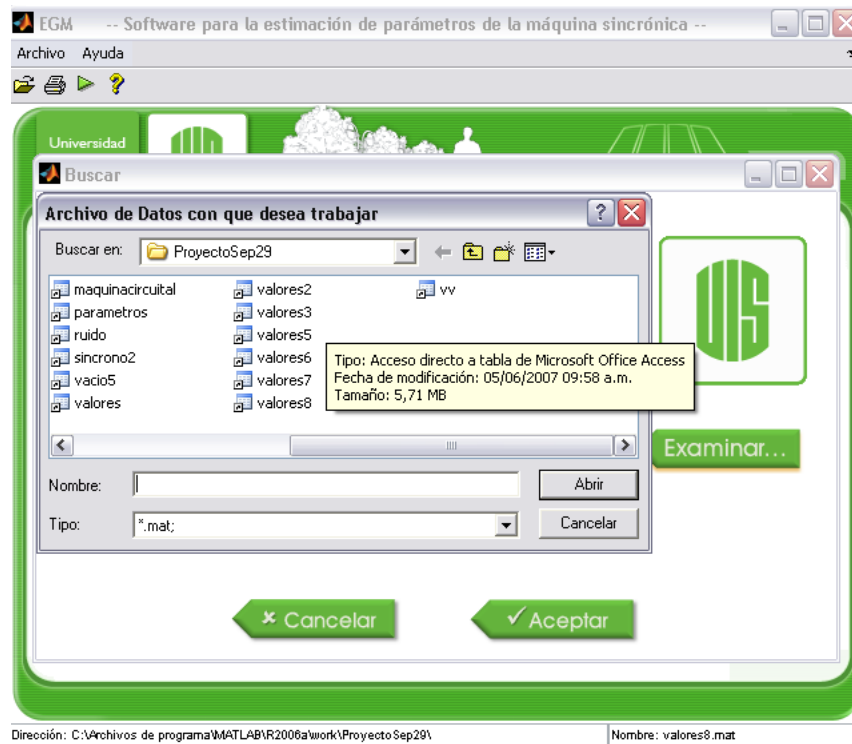


Figura E.3: Ventana de selección de los archivos de trabajo.

máquina. Estas señales han sido leídas directamente de un archivo (si se seleccionó un archivo \*.MAT o \*.TXT) o calculadas con la ayuda del ATP ( si se seleccionó un archivo \*.ATP o \*.DAT). La figura E.4 se dividió en tres áreas de forma similar a las secciones anteriores.

## Área A

En esta área se presentan las señales eléctricas a utilizar para realizar la estimación. El usuario selecciona el intervalo de trabajo de la herramienta y puede realizarse un aumento en la resolución de la gráfica. La selección del intervalo de operación se realiza sosteniendo clic derecho del mouse y desplazándose sobre la ventana. El intervalo de operación se indica con una sombra sobre la imagen. Una vez liberado el clic derecho, la herramienta automáticamente reconoce que el área sombreada es el intervalo deseado por el usuario.

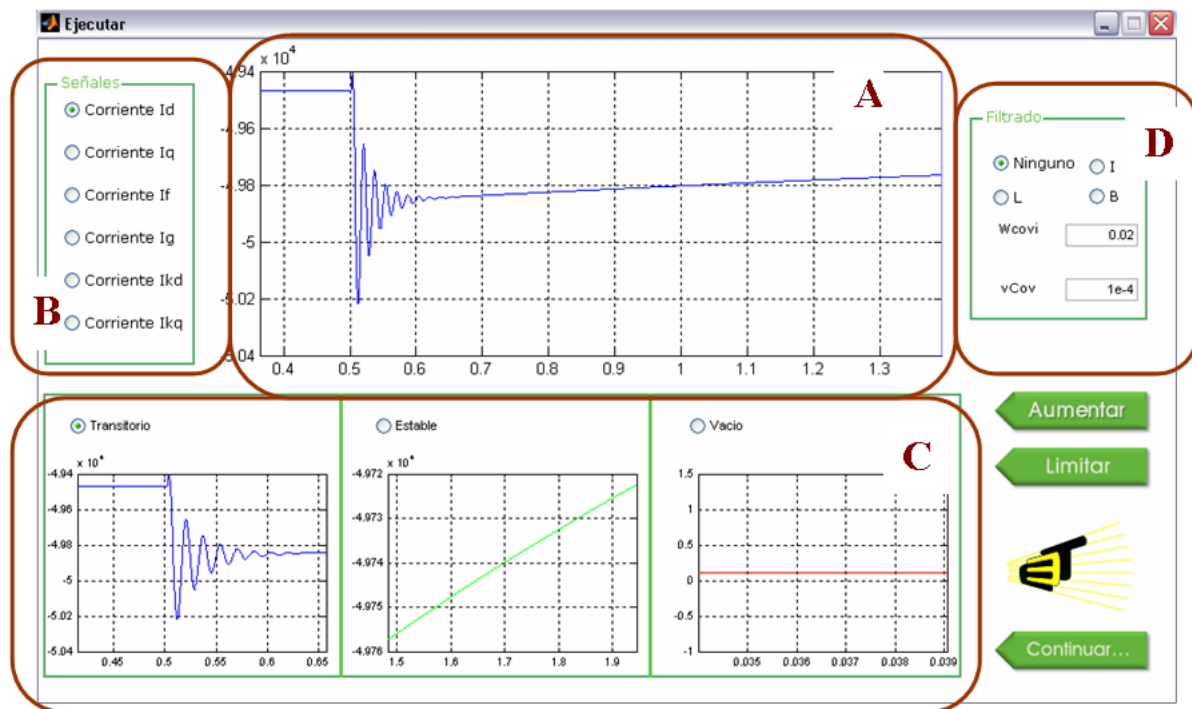


Figura E.4: Ventana Ejecutar.

## Área B

Mediante esta área se selecciona la señal a presentar en el área A. En esta ventana es posible seleccionar solo una de las opciones. Esta selección se realiza dando clic sobre el botón circular a la izquierda del nombre de cada señal en el área B. Se presentan las señales de corriente de eje directo  $I_d$ , corriente de eje de cuadratura  $I_q$ , corriente de campo  $I_f$  y las corrientes de los devanados de amortiguamiento  $I_g$ ,  $I_{kd}$ ,  $I_{kq}$ . Esta opción permite analizar todas las señales de corriente.

## Área C

Debido a que la herramienta requiere de una distinción entre operación transitoria, operación estable y operación en vacío. Se implementó esta metodología amigable con el usuario para escoger los intervalos que servirán como límites de trabajo para la herramienta. El procedimiento de selección consiste en dar clic sobre los botones circulares "Transitorio", "Estable" ó "Vacío" en el área C. De acuerdo a esta selección la sombra en el área A cambiará a azul si la selección es la parte transitoria de la

señal, verde si la selección es la parte estable y roja si se seleccionó la parte vacío de la señal. Si la selección es transitorio o estable, el área B estará disponible para explorar las señales de operación. Por el contrario, si la selección es vacío además de cambiar la sombra en el área A a rojo, el área B quedará inhabilitada. Esto es debido a que en vacío solo se cuenta con una única señal de corriente.

Una vez se selecciona alguna opción, se mueve el mouse hasta el área A, allí el cursor cambiará de la flecha convencional a unas barras paralelas con flechas saliendo de ellas. Además, aparece una línea vertical que indicará el inicio del intervalo de la selección. Después de hacer clic derecho sostenido y se desplace el cursor sobre el área A, esta línea que acompaña al cursor se convertirá en una área de selección. Una vez se libere el botón derecho del mouse, la herramienta automáticamente reconocerá que el área sombreada es el intervalo deseado por el usuario y este intervalo será dibujado en los ejes coordenados respectivos a la selección.

## Área C

Es el área destinada para permitir al usuario filtrar ruido existente en las señales, estos filtros son independientes de cada una de las señales. Esta área será muy útil cuando se utilicen datos provenientes de una adquisición de datos de máquinas reales, por el ruido que se presenta en estas mediciones.

## Botones



Para una mejor visualización del ruido que generalmente es de alta frecuencia y pequeña amplitud se cuenta con este botón para aumentar la resolución de la imagen mostrada. El usuario puede comprobar la selección de esta opción si pasa el cursor sobre el área A. y este cambie a una lupa con un signo “+” dentro de ella. El intervalo a ampliar será escogido de igual forma que para limitar la señal.



Este botón permite cambiar nuevamente de cursor de lupa a barras paralelas, para que después de hacer el aumento deseado en la resolución, se pueda limitar nuevamente los intervalos de trabajo de la herramienta.

Datos Calculados		Datos		Errores	
Ra	0.003	Ra	0.003	Ra	0
LI	0.15	LI	0.15	LI	0
Ld	0.9257	Ld	1	Ld	-8.02636
Lq	0.574946	Lq	0.62	Lq	-7.83621
Ld'	0.234533	Ld'	0.28	Ld'	-19.3862
Lq'	0.445804	Lq'	0.45	Lq'	-0.941221
Ld''	0.204048	Ld''	0.22	Ld''	-7.81777
Lq''	0.442329	Lq''	0.29	Lq''	34.4379
Tdo'	8.26598	Tdo'	5.7	Tdo'	31.0427
Tqo'	0.169866	Tqo'	1	Tqo'	-488.699
Td0''	0.0612068	Td0''	0.09	Td0''	-47.0425
Tqo''	0.000304032	Tqo''	0.09	Tqo''	-29502.1

Figura E.5: Ventana de resultados.

Después de estar satisfecho con los intervalos escogidos, el usuario puede seguir con el proceso de estimación dando clic en este botón.

## E.6. Resultados

Esta ventana aparecerá después de que se de clic sobre el botón “Continuar...” de la ventana “Ejecutar”. Esta acción ejecutará internamente la función metest que ya con la información recopilada hasta este momento puede iniciar con el proceso de la estimación de los parámetros. Una vez terminado la estimación, automáticamente la herramienta mostrará la una ventana presentada en la figura E.5.

Entonces se tienen los siguientes botones:

Permite buscar un archivo \*.ATP, para poder comparar con los datos estimados. Se lee el archivo y posiciona adecuadamente los datos.

Calcula los errores en porcentaje de los parámetros estimados con

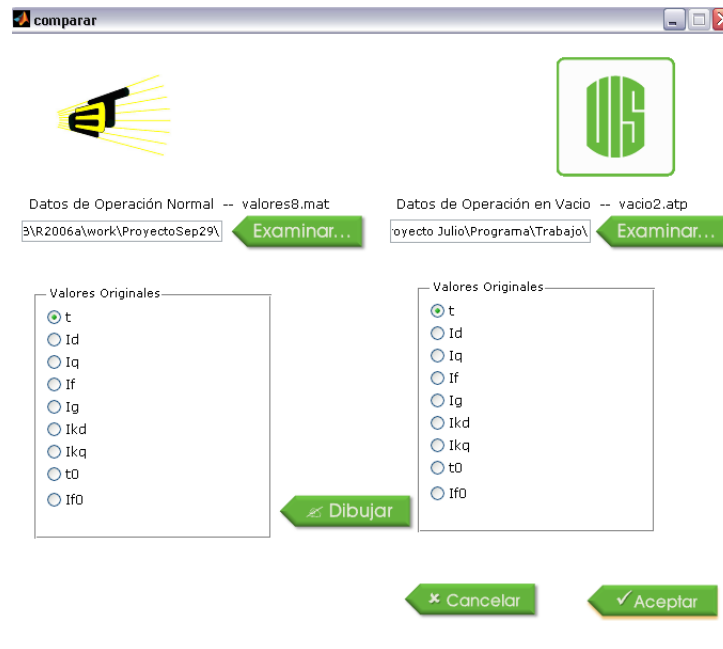


Figura E.6: Ventana de comparación de los datos estimados y los datos originales.

los cargados del archivo \*.ATP, anteriormente seleccionado.



Una vez comparados los datos, si se quiere guardar los parámetros estimados, este botón permite almacenar un archivo \*.ATP, con los valores estimados para la máquina síncrona.



Este botón permite exportar las tres columnas de la ventana resultados a un archivo de formato \*.xls. Esto se realiza con el objetivo de recopilar datos y crear una bases de datos de las simulaciones.

## E.7. Comparar

La ventana “Comparar” se presenta en la figura E.6, está diseñada para que el usuario pueda comparar de forma práctica, sencilla y amena las señales de trabajo con las señales obtenidas con los parámetros ya calculados.

El procedimiento para realizar la comparación es el siguiente:

1. Se escogen los archivos a comparar de cualquier extensión como son \*.ATP, \*.PL4,

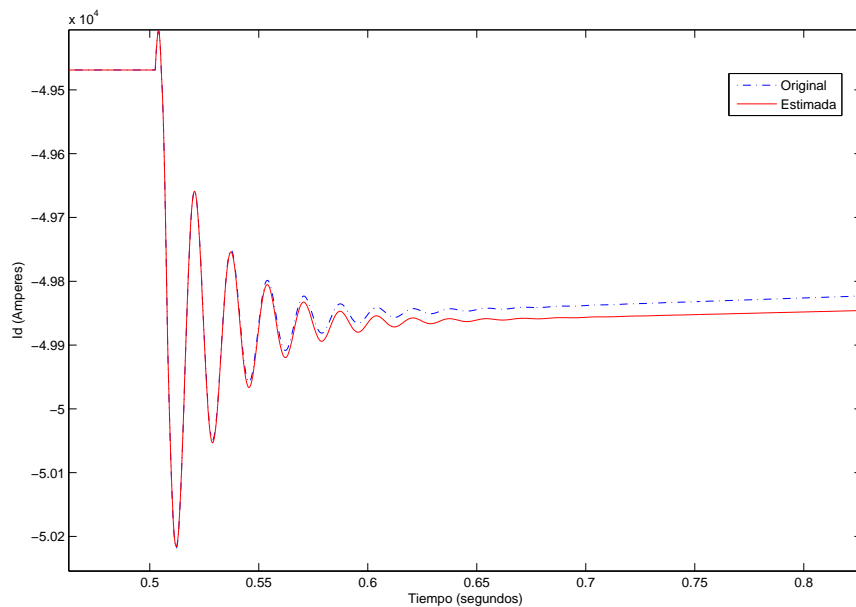


Figura E.7: Resultado de la comparación de la señal de eje directo.

\*.MAT, \*.DAT, \*.TXT, en ambos botones.

2. Se seleccionan la corriente de la parte izquierda que se quiera comparar con la corriente de la parte derecha.

3. Se da clic en dibujar, y aparecerá una imagen como se muestra en la figura E.7.

Los botones cancelar y aceptar cierran la ventana, pero únicamente si se da clic en aceptar, se guardará un registro de las direcciones de los archivos utilizados para los dibujos.



# Apéndice F

## Descripción del equipo EGM

### F.1. Introducción

Con el fin de presentar evidencia del trabajo realizado para implementar el sistema de estimación de parámetros completo, en la parte se describen las partes del equipo EGM y se presentan figuras del equipo de adquisición completo y por partes. La otra parte esta dedicada a describir las características del equipo como parte del sistema de estimación.

### F.2. Descripción del equipo

El equipo EGM es un sistema de adquisición de señales eléctricas y velocidad que permite conocer todos los datos de entrada de salida y entrada de una máquina síncrona en estado estable y transitorio de forma simultánea. El equipo esta compuesto por un sistema general de adquisición de datos, un sistema transductor de señales de tensión, un sistema transductor de señales de corriente y un sistema transductor de la velocidad de giro del rotor de la máquina. En las siguientes subsecciones se presentan cada parte del equipo EGM antes mencionado.

### F.2.1. Tarjeta de adquisición de datos

El sistema general de adquisición de datos esta compuesto por una tarjeta de adquisición de señales analogas, las tarjeta muestrea una velocidad máxima de 20kHz las ocho señales analogas de forma simultánea convirtiendolas en datos digitales los cuales son ingresados a un PC a esta misma tasa de velocidad. La tarjeta permite muestrear un número total de 16 señales analogas, sin embargo la velocidad de muestreo disminuye debido al sistema de multiplexado serie. La tarjeta cuenta con un puerto serie al cual se conecta via alámbrica los dispositivos transductores. La tarjeta solo recibe señales de tensión en rangos bipolares o monopolares de  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 5$  y  $\pm 10$ ; definidos en la configuración de la tarjeta.

La compra de la tarjeta de adquisición incluia un software que permite configurar-la, controlar los tiempos de adquisición y la conversión de los datos adquiridos a formatos convenientes como: \*.MAT, \*.DAT y \*.TXT. Para el caso especial del sistema de estimación de parámetros EGM el formato de conversión por defecto es \*.MAT que un formato de MatLab. En la figura F.1 se presenta el sistema de colección de las señales analogas, cada señal se conecta a un puerto definido. La figura F.2 presenta el cable de transmisión de las señales analogas a la tarjeta de adquisición de datos. En la figura F.3 se presenta la tarjeta de adquisición de datos, esta tarjeta ingresa al computador como una tarjeta pci comun y se conecta al equipo por un conector paralelo.

### F.2.2. Sistema transductor de señales de tensión

El sistema transductor de señales de tension esta compuesto por un cuatro pinzas que miden tensiones de hasta 400V de corriente directa y alterna, y por medio de un grupo de transformadores de tensión de medida son convertidos a valores de 5V con un ancho de banda de hasta 200kHz. El grupo de transformadores permiten tambien un aislamiento electrico entre el sistema de adquisición y el punto medido. Debido al caracteristico ancho de banda de los transformadores de tensión es posible poder tomas las señales transitorias de tensión sin filtrar ninguna caraterística de la máquina. La figura F.4 presenta el sistema transductor de señales de tensión, los transformadores de tensión, de color azul, estan antes de los conectores BNC a los cuales se ajustan las puntas de medida.

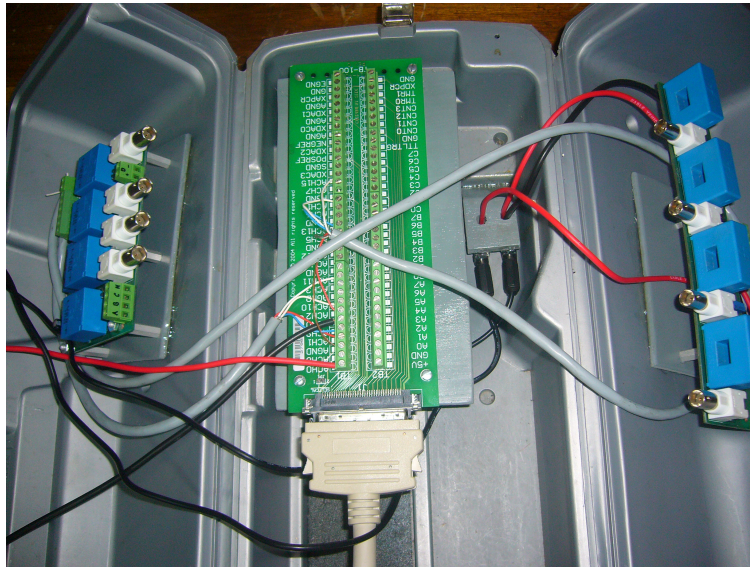


Figura F.1: Sistema de colección de las señales analógicas eléctricas.

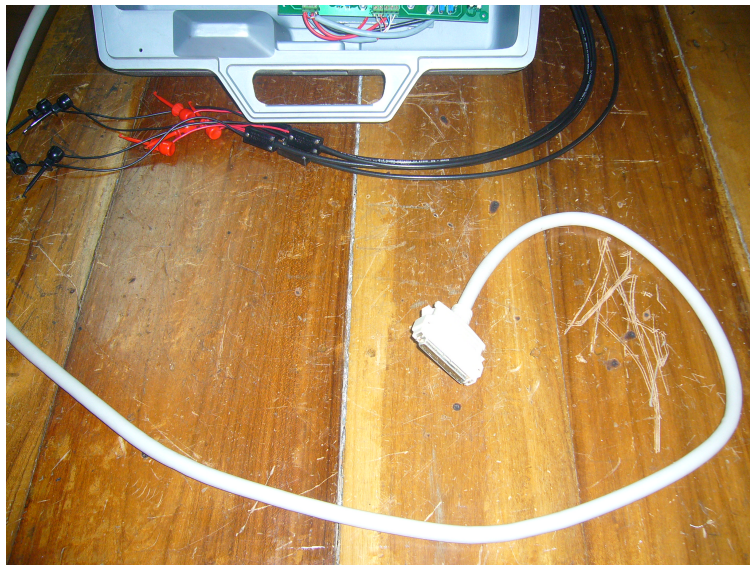


Figura F.2: Sistema de transmisión de señales analógicas eléctricas.



Figura F.3: Tarjea de adquisición de datos.

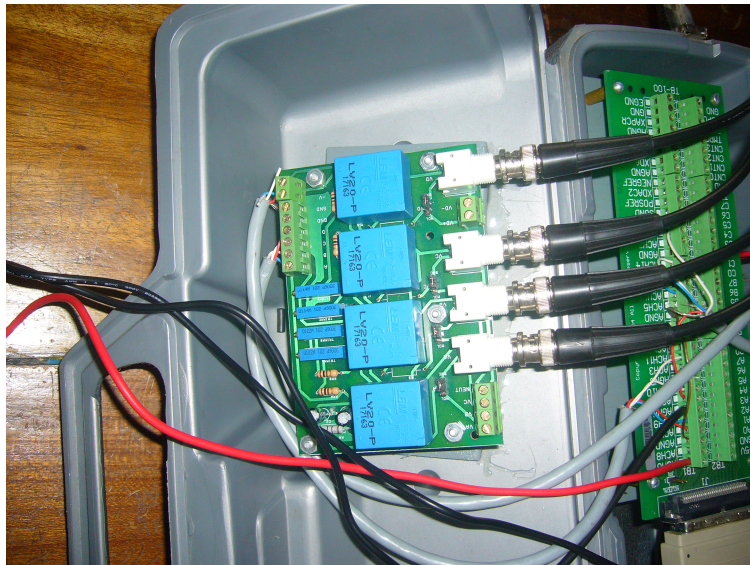


Figura F.4: Sistema de transductor de señales de tensión.

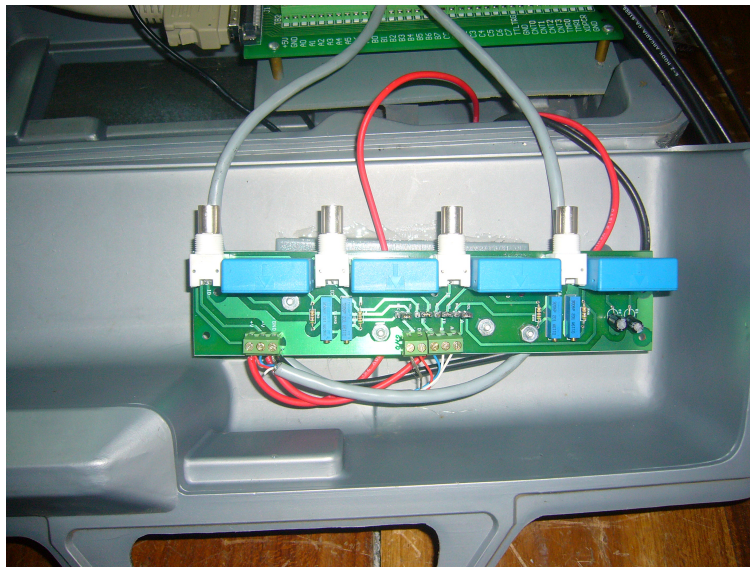


Figura F.5: Sistema de transductor de señales de corriente.

### F.2.3. Sistema transductor de señales de corriente

El sistema transductor de señales de corriente está compuesto por cuatro pinzas que miden valores de corriente de hasta 50A de corriente directa y alterna, y por medio de un grupo de transformadores de corriente de medida son convertidos a valores de 5V con un ancho de banda de hasta 200kHz. El amplio ancho de banda permite tomar las corrientes transitorias de la máquina y conocer las características de la máquina. La figura F.5 presenta el sistema transductor de señales de corriente, las pinzas, de color azul, están fijadas al equipo, por lo que el cable eléctrico pasa a través de la pinza fija.

### F.2.4. Sistema transductor de velocidad angular

Este sistema transductor está compuesto por un sensor óptico que sensa el número de revoluciones por minuto de un punto reflectivo en el eje del rotor, el sensor envía una señal de pulsos eléctricos al tacómetro el cual sensa la frecuencia de la señal de pulsos y la convierte a una señal analoga de tensión máxima de 5V para una velocidad límite de 7000 rev/min. La señal analoga de tensión es tomada por la tarjeta de adquisición y mediante el software se realiza la conversión inversa de la señal de tensión a un valor de velocidad. El tacómetro permite mediante un display, presen-



Figura F.6: Sistema transductor de velocidad angular.

tar la velocidad en el tablero del equipo. En la figura F.6 se presenta el tacómetro del transductor de velocidad, del tacómetro se transporta la señal de tensión al sistema de colección de señales analógicas.

### F.3. Características del equipo EGM

El equipo cuenta con cuatro pinzas de tensiones y cuatro de corriente lo que permite tomar de forma simultánea las señales en el estator y rotor de la máquina a una velocidad de muestreo de 20kHz. La posibilidad de medir la velocidad de forma simultánea con el equipo nos permite conocer las variaciones electrodinámicas de forma detallada. Este equipo se implementó de forma portátil, con el fin de poder transportarse a sitios de operación de la máquinas de generación.

El equipo es muy compacto y muy comodo de transportar, la figura F.7, F.8 y F.9 presentan una escala real del tamaño del equipo. La figura F.7 presenta de un costado tal que es posible medir el largo del equipo. La figura F.8 presenta una vista superior que logra visualizar el valor en escala real del ancho del equipo y la figura F.9 presenta el equipo de un costado opuesto que permite conocer la altitud del equipo EGM.

El equipo al utilizarse ocupa un area amplia de 2m2 para la operacion, debido a



Figura F.7: Medida del largo del equipo EGM.



Figura F.8: Medida del ancho del equipo EGM.



Figura F.9: Medida del alto del equipo EGM.

los dispositivos del tacómetro y de alimentación. Sin embargo, todos los elementos ocupan un espacio reducido como se contrasta en las figuras F.10 y F.11. El equipo utiliza alimentación en continua de  $-15V$  y  $15V$ , para esto se adquirió dos adaptadores de tensión como se presenta en la figura F.12.

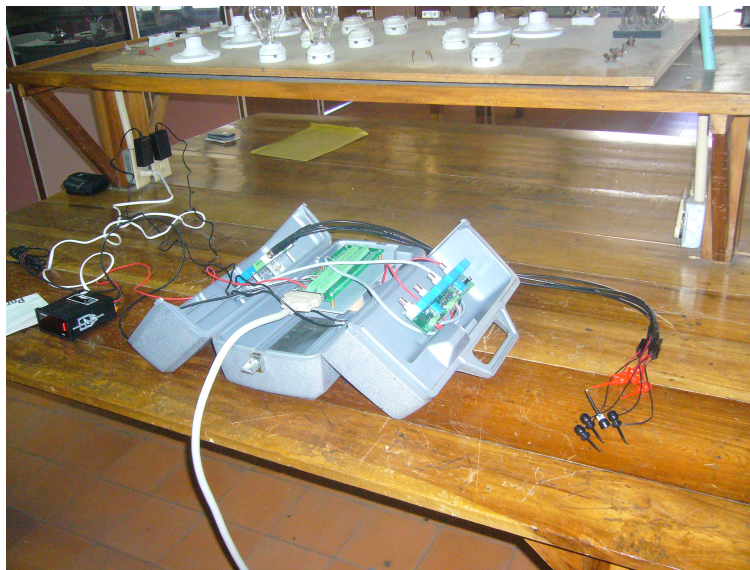


Figura F.10: Equipo de medida EGM desplegado.

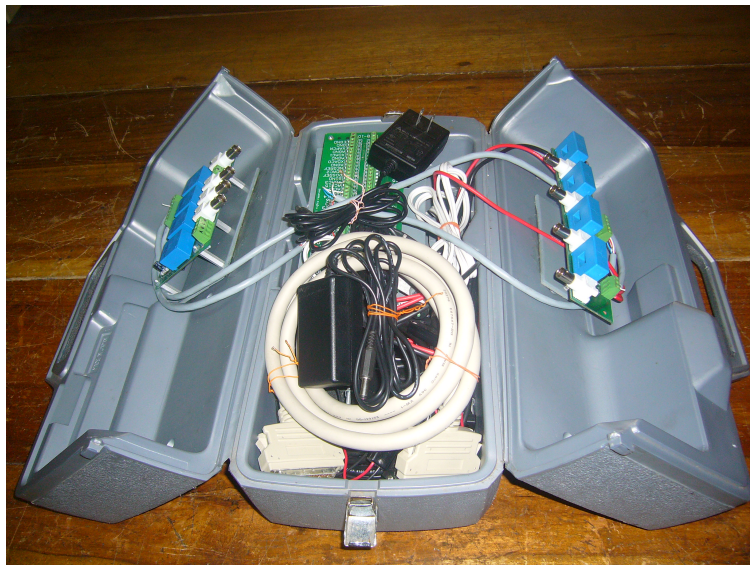


Figura F.11: Equipo de medida EGM organizado y preparado para ser transportado.

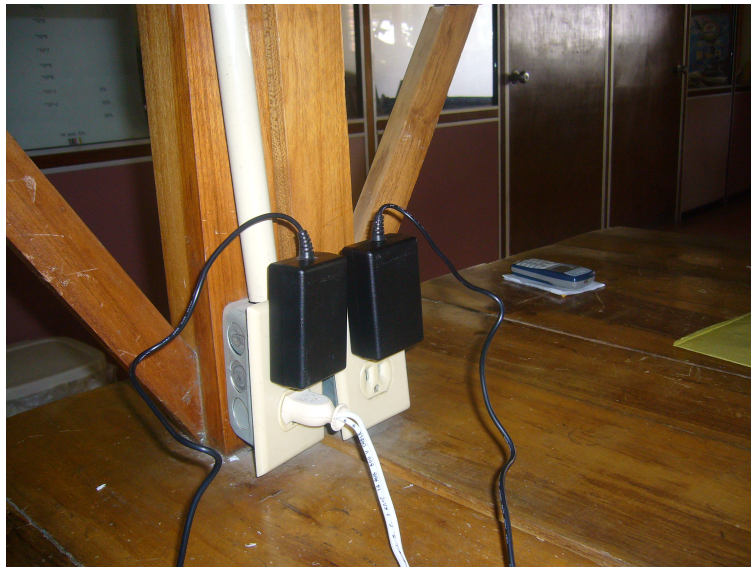


Figura F.12: Sistema de alimentación del equipo EGM.

# Apéndice G

## Estimación de una máquina del laboratorio

### G.1. Introducción

En este capítulo se describe el proceso realizado a una máquina del laboratorio para estimar sus parámetros, el proceso inicia con la estimación de la curva de la prueba de vacío de la máquina y la estimación de la curva de la prueba de corto, luego se presenta la transformación de las señales eléctricas y los resultados finales de la estimación. La máquina de estudio tiene una potencia de 10kW y una tensión de línea de 220V, en el laboratorio se acondicionó un motor de corriente continua para aplicar el torque primomotor al generador sincrónico y mediante un sistema de rectificación se le aplica una tensión continua al devanado de campo sin ningún tipo de control. Se le aplicó diferentes valores de carga eléctrica en los terminales de la máquina, generando diferentes valores de corriente. El sistema de adquisición se conectó a la máquina y a un computador con el fin de realizar la adquisición de datos en tiempo real.

## **G.2. Pruebas preliminares**

### **G.2.1. Calibración y patronamiento del equipo**

Con el fin de poder conocer los valores exactos de tensión y corriente medidas, se realizó una adaptación de los instrumentos de medida. Las pinzas de tensión se ajustaron para que para una tensión fase neutro de 179,629V arrojará una tensión de 5V. Las pinzas de corrientes se ajustaron para que a un de 50A arrojará 5V. El instrumento de medida de velocidad angular se ajustó para una velocidad de 7000 rev/min arrojará 5V. Sin embargo, este ajuste se realiza de forma manual y es posible que existan problemas de exactitud al tener las señales de forma digital.

Para poder ajustar las señales al valor exacto se realizó un ajuste dentro del software, por medio del patronamiento de las señales. El patronamiento se basó en ajustar una carga resistiva monofásica, medir la tensión y corriente con todas las pinzas al tiempo y tomar por medio de instrumentos confiables los valores reales de tensión y corriente. A partir de los datos tomados con los instrumentos de laboratorio y los valores obtenidos por el software del sistema se determinó la relación de ajuste para cada pinza de corriente y tensión.

### **G.2.2. Prueba de vacío**

Para esta prueba se le aplicó a la máquina un torque constante, de tal forma que girara a velocidad constante, se inició la prueba tomando el valor de la tensión en terminales con corriente de campo nula. Luego se aumentó la corriente de campo de forma gradual, en cada variación se tomó el valor de la corriente y tensión. El proceso finalizó al llegar a la tensión nominal en terminales, en la figura G.1 se presenta la curva de tensión versus corriente de campo, producto de esta prueba.

### **G.2.3. Prueba de corto**

Para esta prueba se cortocircuitaron los terminales de la máquina y se aplicó una corriente de campo de forma gradual, de forma simultánea se tomaron los valores de corriente de armadura y la corriente de campo. La figura G.2 presenta las medidas de esta prueba y un ajuste lineal realizado a la respectiva característica de cortocircuito.

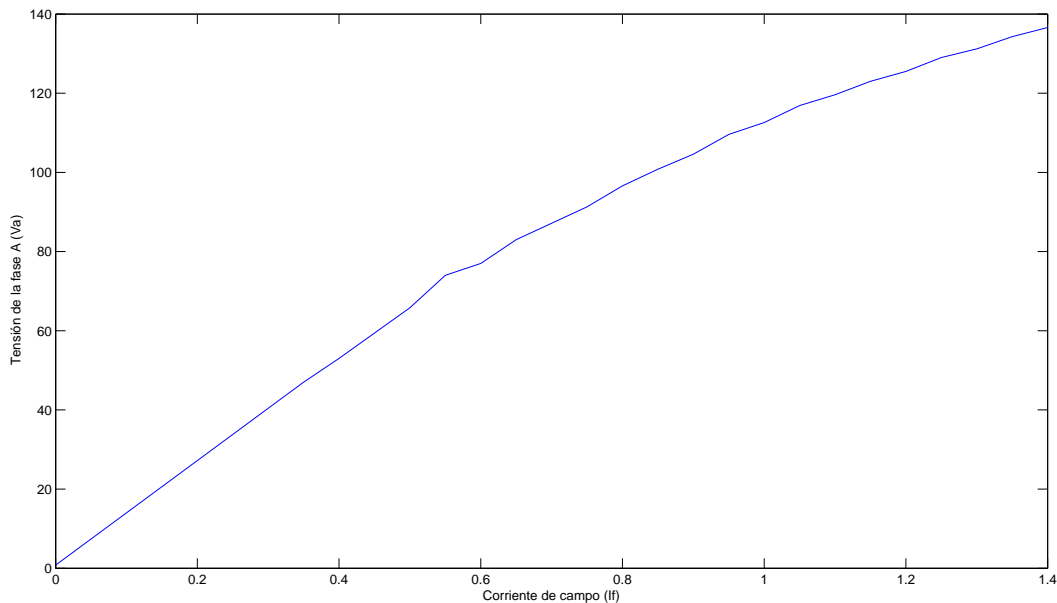


Figura G.1: Relación tensión en terminales y corriente de campo de la prueba de vacío.

Una vez se cuenta con la curva característica, se determina la relación entre la tensión en terminales y la corriente de armadura mediante la coincidencia de la corriente de campo. Esta relación permite determinar la impedancia del devanado de armadura y con base en la resistencia de armadura se determina la inductancia de dispersión.

#### G.2.4. Resistencia de armadura e inductancia de dispersión

Le medida de la resistencia de armadura se realizó mediante un ohmetro con una buena precisión y exactitud, se tomó el valor de resistencia de cada devanado tres veces y se determinó el valor promedio, el cual será el utilizado para realizar los cálculos de estimación. En la tabla G.1 se presentan los resultados de la prueba, el resultado de la inductancia de dispersión se presenta en la ecuación G.1, en la cual se utilizó la relación de los datos de las pruebas anteriores.

$$L_t = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_a^2} = \frac{\left(\sqrt{(9,6899)^2 - (0,1452)^2}\right)}{377} = 0,0257 \quad (\text{G.1})$$

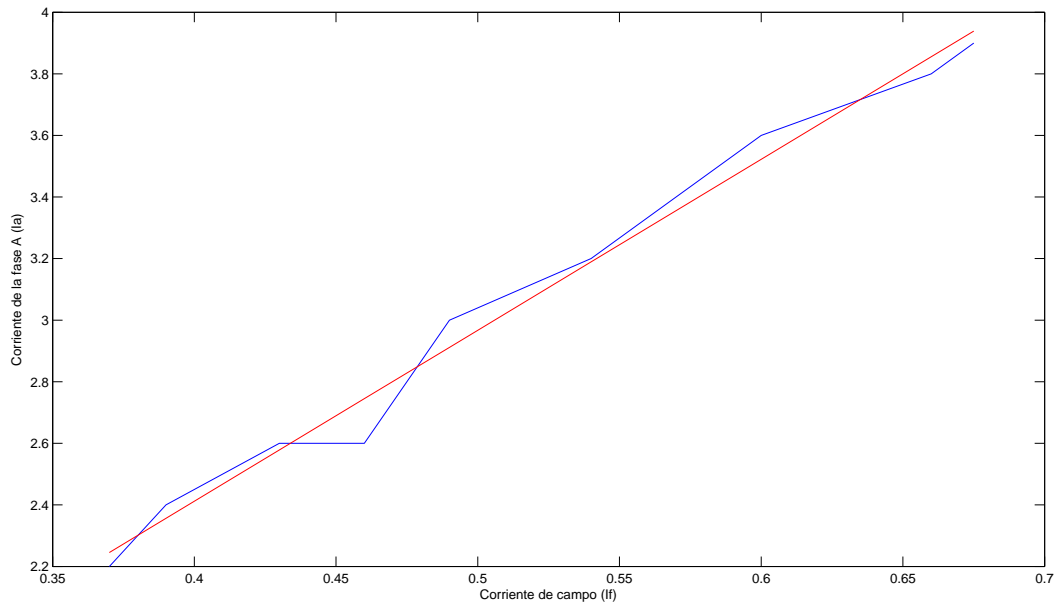


Figura G.2: Relación de la corriente de armadura y la corriente producto de la prueba de corto.

	1	2	3	Prom
A	0,14	0,142	0,141	0,1410
B	0,147	0,145	0,144	0,1453
C	0,15	0,149	0,149	0,1493

Cuadro G.1: Valores de resistencia de armadura.

	Est 8	Est 7	Est 6	Est 5	Est 4	Est 3	Est 2	Est 1
$L_d$	0,031	0,0327	0,0364	0,0611	0,0458	0,061	0,0459	0,0608
$L_q$	0,0717	0,0712	0,0841	0,1388	0,1051	0,139	0,1051	0,1397
$L_{ad}$	0,0297	0,0314	0,0351	0,0598	0,0445	0,0597	0,0447	0,0595
$L_{aq}$	0,0704	0,0699	0,0828	0,1375	0,1038	0,1377	0,1038	0,1384
$L_f$	2,0016	0,4492	0,0750	0,997	0,8200	1,0302	2,2590	4,1735
$L_{kd}$	0,0103	0,0025	0,0059	0,0203	0,009	0,0022	0,0545	0,0067
$L_g$	0,1371	2,2394	1,55E2	1,2492	2,2457	2,2458	0,2236	2,2458
$L_{kq}$	0,0343	0,0066	0,0378	0,1193	$3,00x10^{-4}$	$1,378x10^{-4}$	0,1954	$1,5573x10^{-5}$
$R_f$	0,8564	0,2633	0,074	0,2318	0,3749	0,1959	1,4146	2,611
$R_{kd}$	0,1109	0,5666	0,293	1,3947	0,1068	0,2998	635,3653	7,5475
$R_g$	51,7329	608,4595	$1,43x10^3$	204,32	$2,36x10^4$	207,678	140,4761	$1,76x10^4$
$R_{kq}$	40,6218	0,5666	$1,41x10^3$	188,6043	0,070	163,0807	79,1698	$1,80x10^4$

Cuadro G.2: Parámetros del modelo de la máquina síncrona de segundo orden.

### G.3. Estimación de los parámetros

Se adquirieron señales de tensión, corriente y velocidad; mientras se realizaban cambios en la cantidad de potencia generada mediante switcheo trifásico. Con base en los datos de las pruebas obtenidas y las señales almacenadas de los cambios de carga se realiza el proceso de estimación de las señales. En las tablas G.2 y G.3 se presentan los resultados del proceso de estimación para diferentes variaciones de carga representados en dos modelos distintos de la máquina, los numerales impares son salidas de carga, mientras que los pares son entradas de carga. Cada grupo de parámetros forman un modelo matemático no lineal que se ajusta a la operación estable y transitoria de la máquina en estudio. Es por esto que existe una variación entre los valores de algunos parámetros estimados para diferentes casos.

### G.4. Validación de los modelos

Con el fin de confirmar la efectividad de cada modelo estimado, se implementó el sistema eléctrico del laboratorio en ATP y se utilizó los parámetros de cada modelo para comparar las señales obtenidas del laboratorio y las obtenidas de la simulación de cada modelo. En las siguientes figuras se comparan las señales eléctricas de cada modelo. En las figuras G.3 y G.4 se presentan las corrientes de eje directo y de

	Est. 8	Est. 7	Est. 6	Est. 5	Est. 4	Est. 3	Est. 2	Est. 1
Xd	2,4026	2,5575	2,8230	4,762	3,5511	4,7576	3,5676	4,7353
Xd'	2,3804	2,5365	2,7247	4,7136	3,4697	4,6929	3,5593	4,7215
Xd''	2,2533	2,3474	2,5855	4,2052	3,1955	4,043	3,3712	4,0749
Xq	5,5605	5,5698	6,5158	10,8186	8,1475	10,8335	8,1576	10,883
Xq'	2,2022	2,3859	2,8224	4,5179	2,6955	4,5841	3,2781	3,3204
Xq''	2,0955	2,1413	2,4304	3,9703	2,5954	3,3405	3,1372	3,3203
Td0'	2,7212	1,8948	1,6587	4,6198	2,7939	5,7743	1,229	1,6300
Td0''	0,3082	0,0547	0,0937	0,0544	0,3921	0,1888	$1,5421 \times 10^{-4}$	0,0086
Tq0'	0,0066	0,0063	0,1088	0,0082	1,4774	0,0123	0,0061	1,6938
Tq0''	0,0012	0,0015	$8,4858 \times 10^{-5}$	0,0011	$9,4705 \times 10^{-4}$	$7,4235 \times 10^{-4}$	0,0013	1,6938

Cuadro G.3: Parámetros del modelo de la máquina en constantes de tiempo.

cuadratura respectivamente para el modelo numero 2, en la figura G.5 se presentan las corrientes en la fase A, B y C para este mismo modelo. De igual forma, se presentan las figuras G.6, G.7 y G.8 para el modelo 3; las figuras G.9,G.10 y G.11 para el modelo 4, las figuras G.12, G.13 y G.14 para el modelo 5; las figuras G.15, G.16 y G.17 para el modelo 6; las figuras G.18, G.19 y G.20 para el modelo 7 y; las figuras G.21, G.22 y G.23 para el modelo 8. El modelo 1 no fue posible simular debido a la tolerancia definida en el ATP, ya que el nivel de carga que se utilizó para la realizar la perturbación no es suficiente para estimar el modelo.

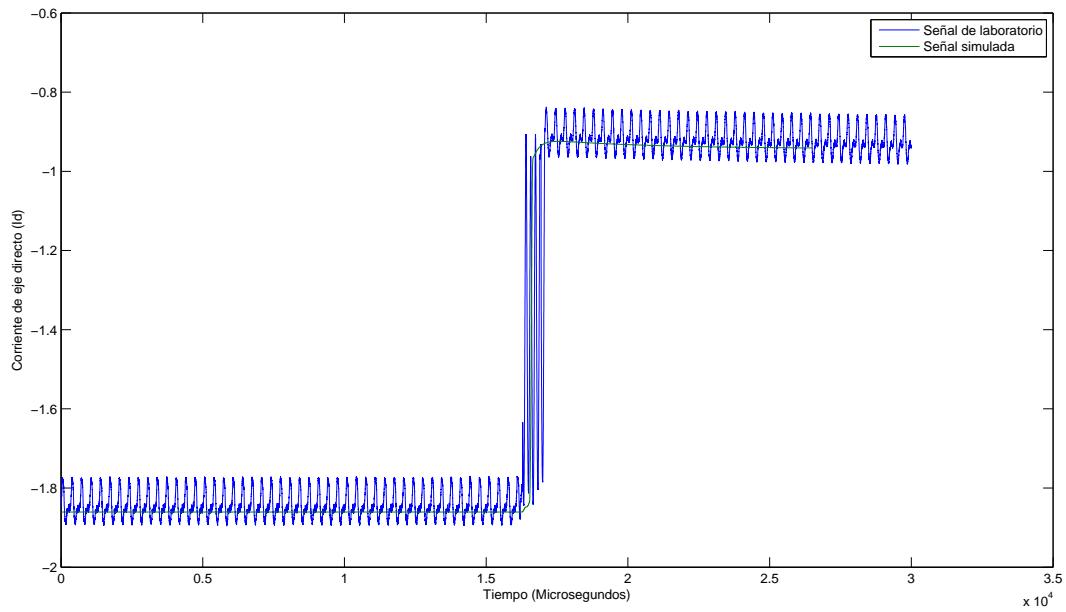


Figura G.3: Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 2.

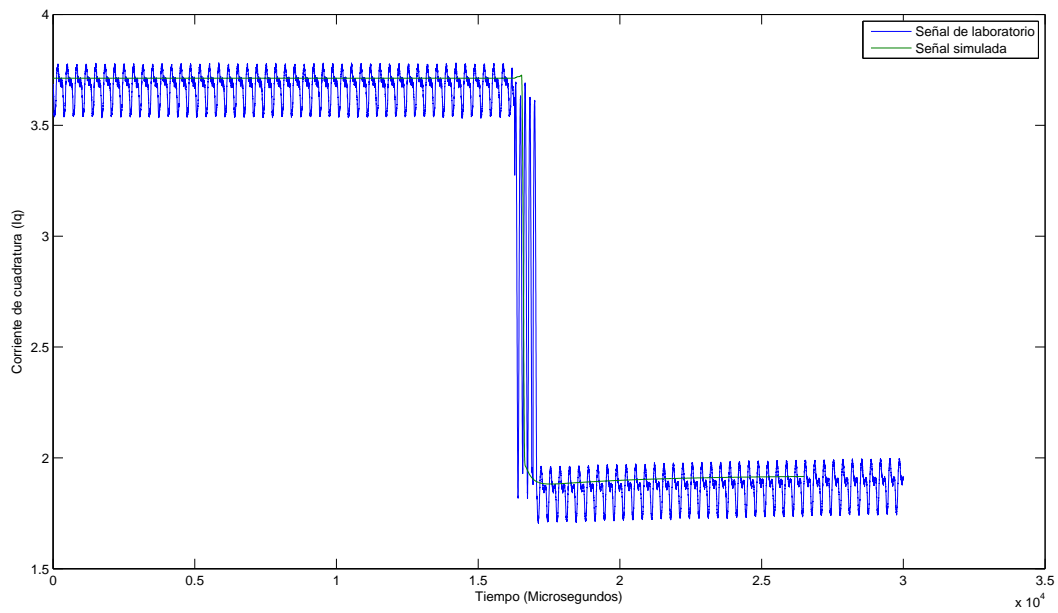
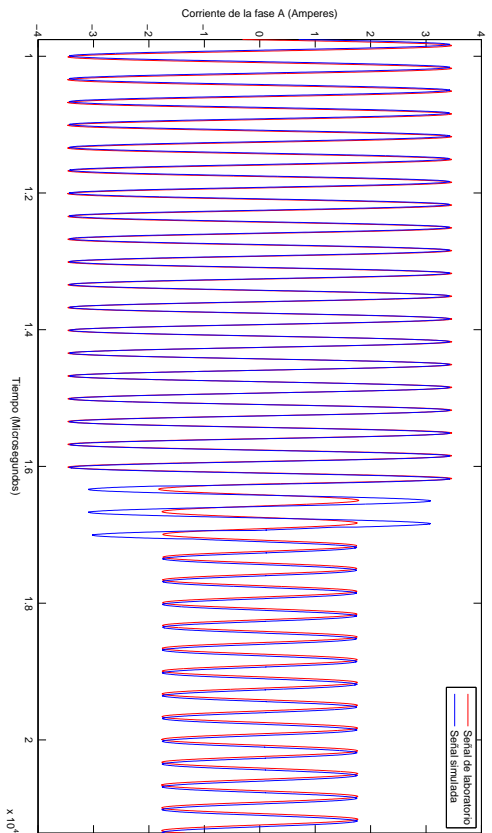
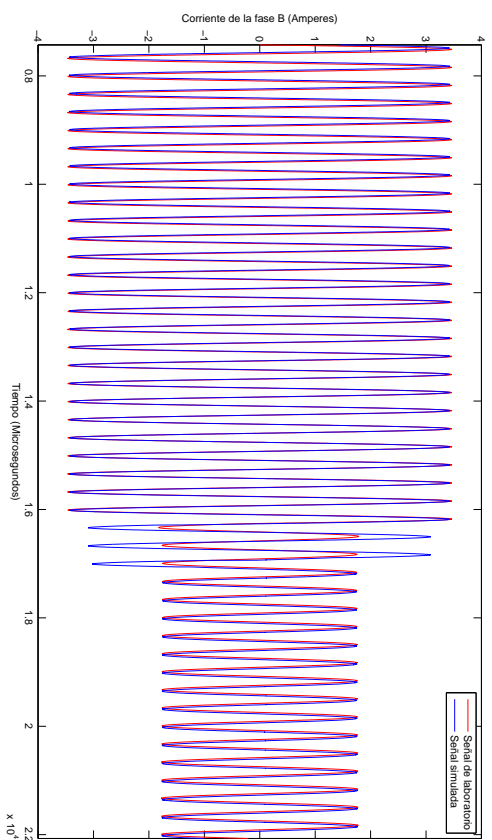


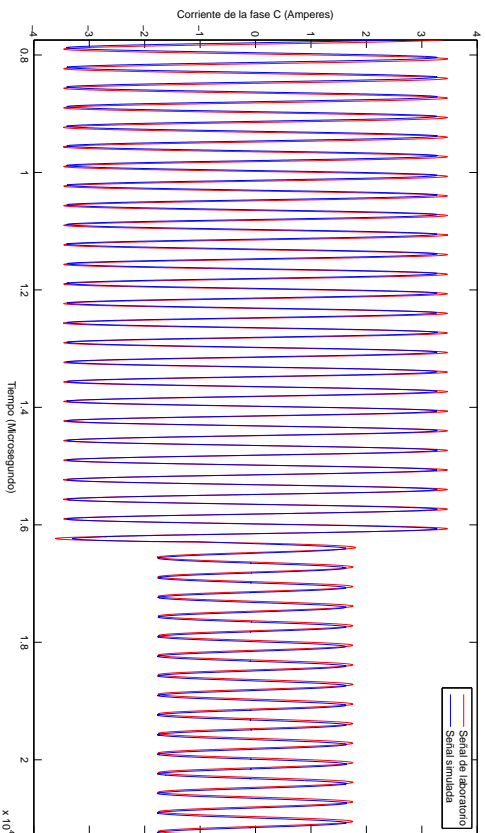
Figura G.4: Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 2.



(a) Comparación de las corrientes de la fase A



(b) Comparación de las corrientes de la fase B



(c) Comparación de las corrientes de la fase C

Figura G.5: Comparación de las corrientes de fase para el modelo 2.

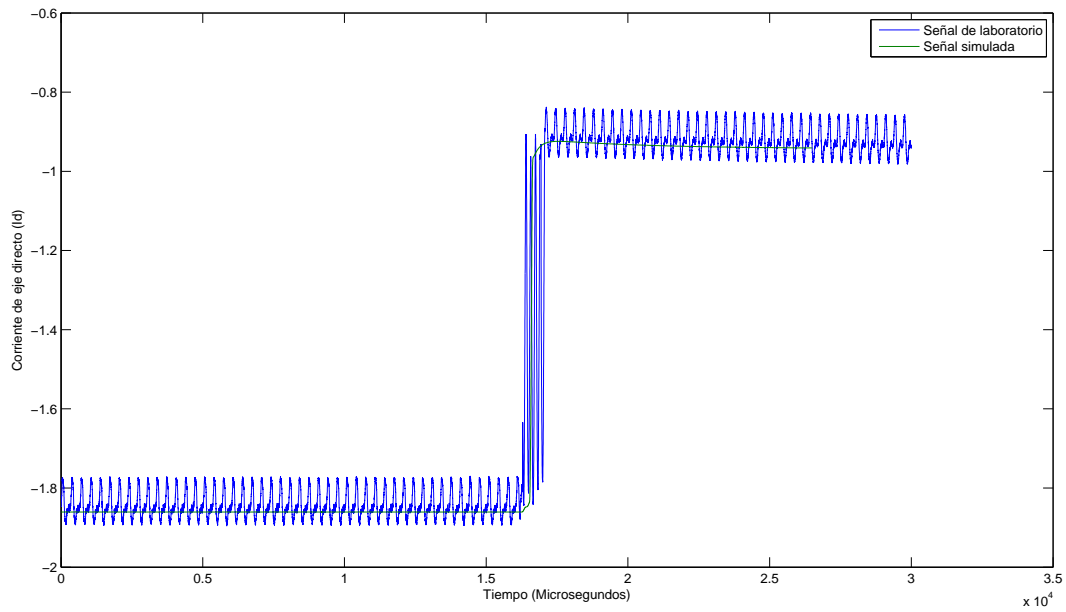


Figura G.6: Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 3.

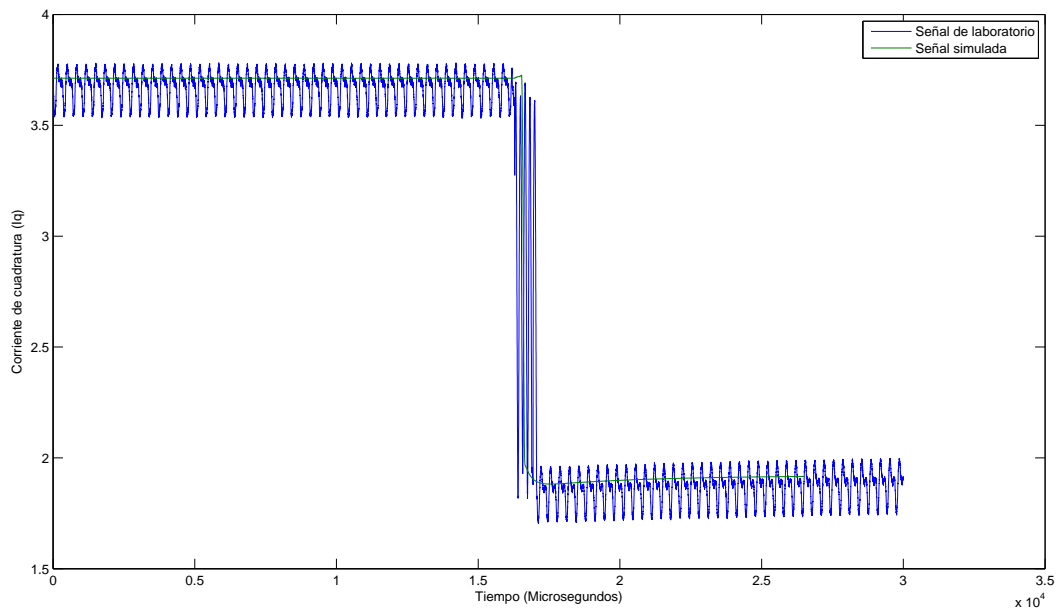
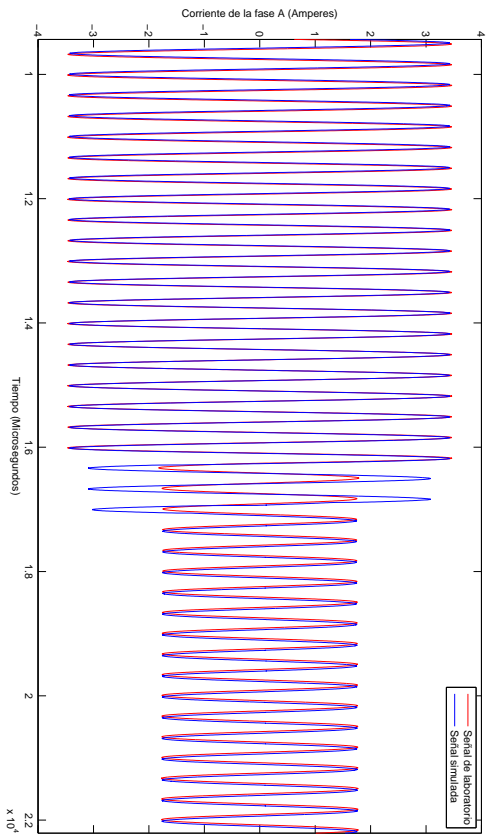
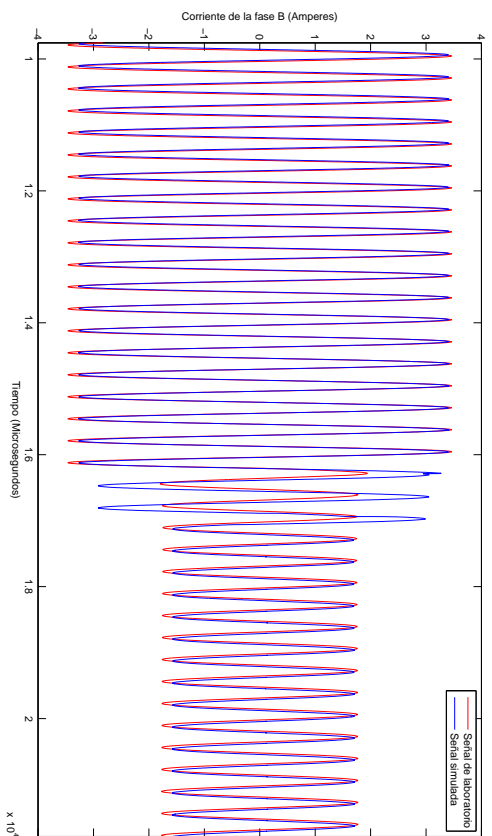


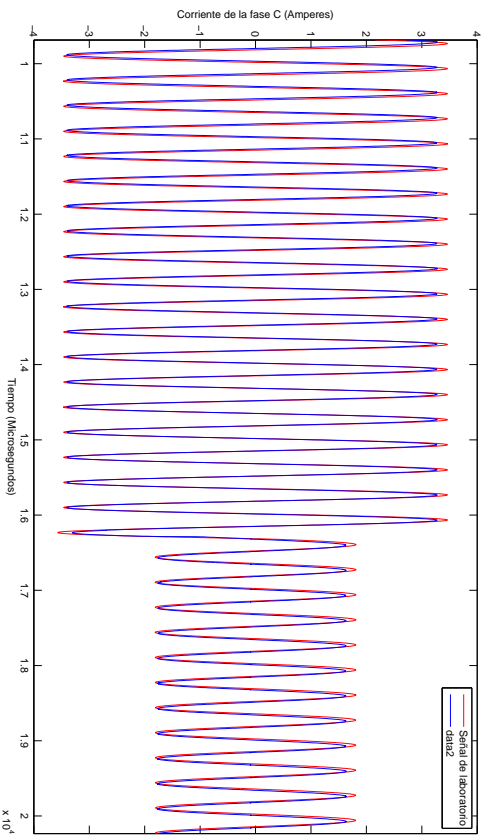
Figura G.7: Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 3.



(a) Comparación de las corrientes de la fase A



(b) Comparación de las corrientes de la fase B



(c) Comparación de las corrientes de la fase C

Figura G.8: Comparación de las corrientes de fase para el modelo 3.

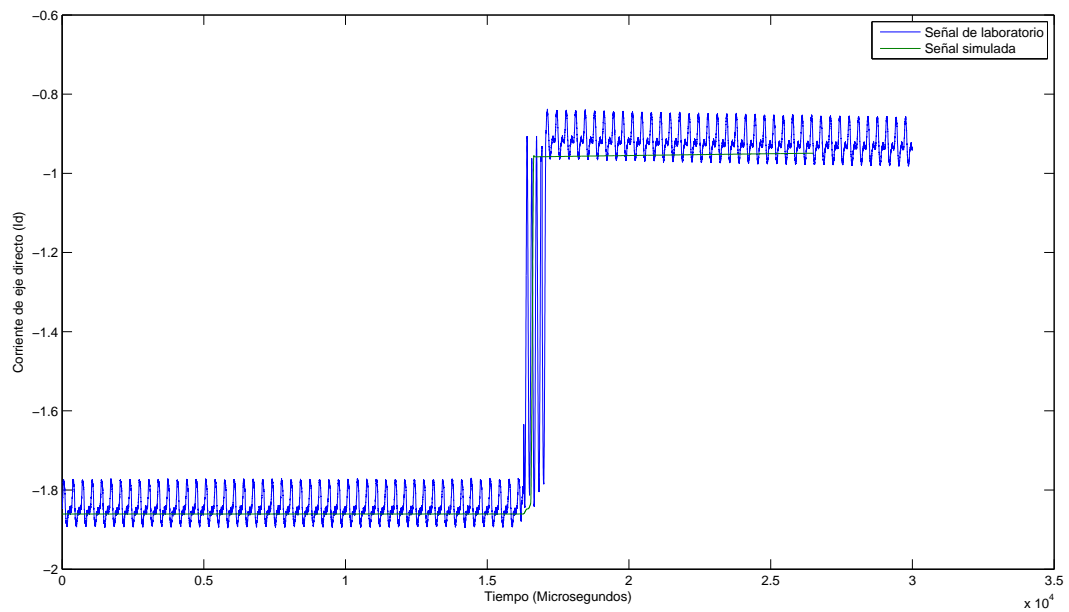


Figura G.9: Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 4.

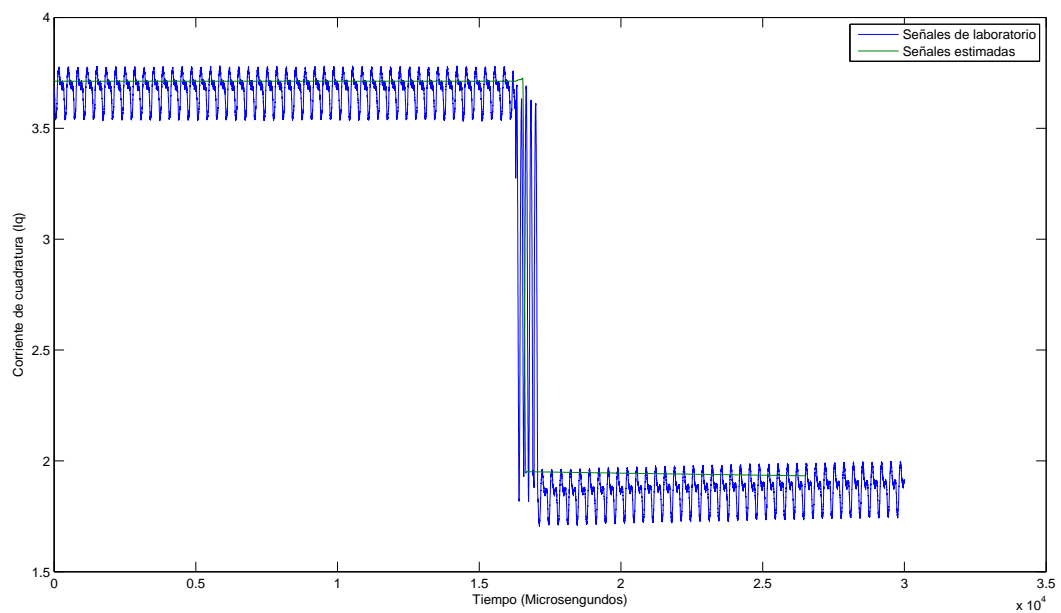
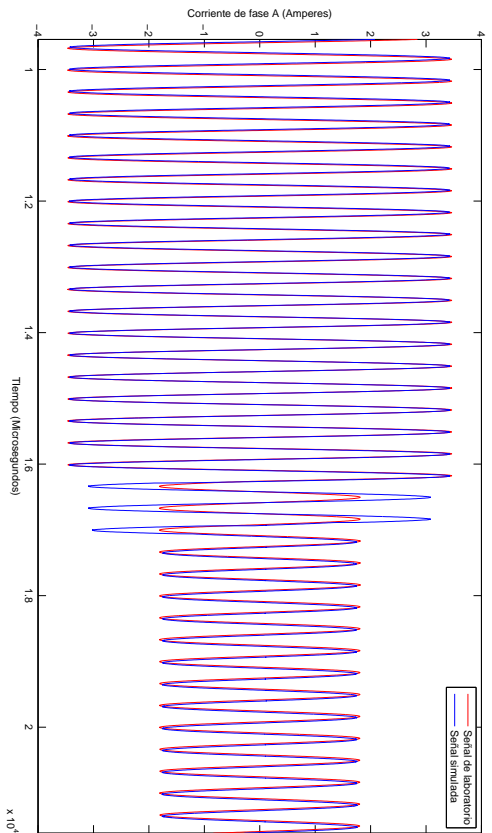
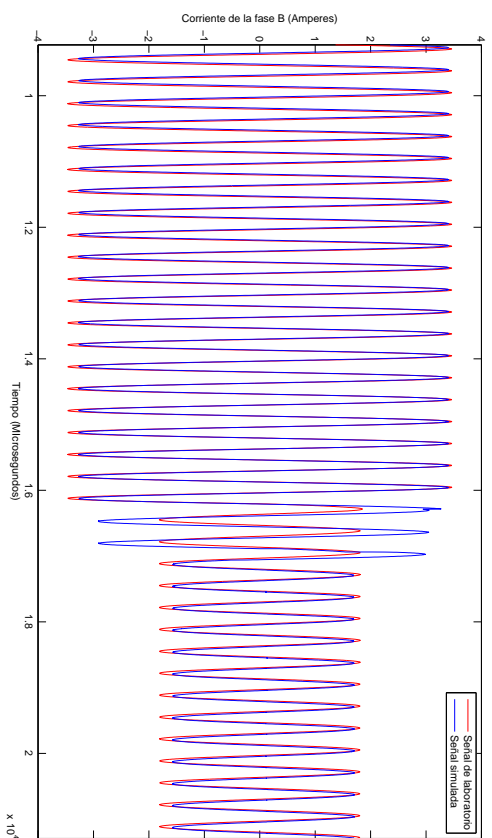


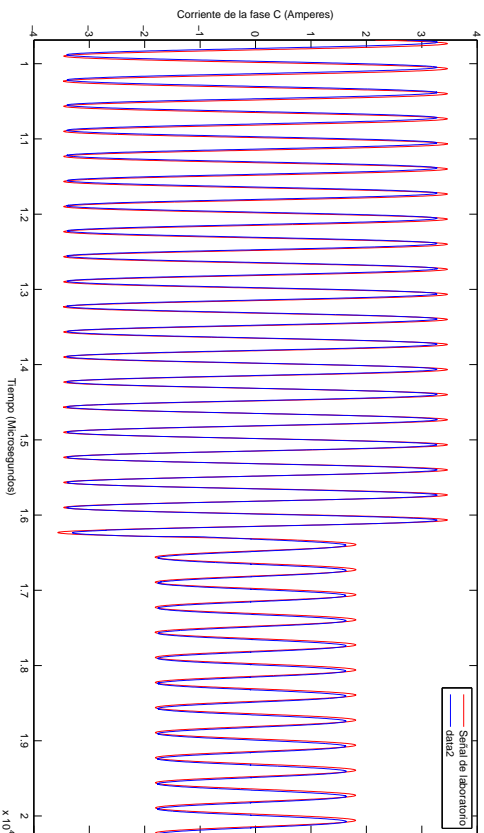
Figura G.10: Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 4.



(a) Comparación de las corrientes de la fase A



(b) Comparación de las corrientes de la fase B



(c) Comparación de las corrientes de la fase C

Figura G.11: Comparación de las corrientes de fase para el modelo 4.

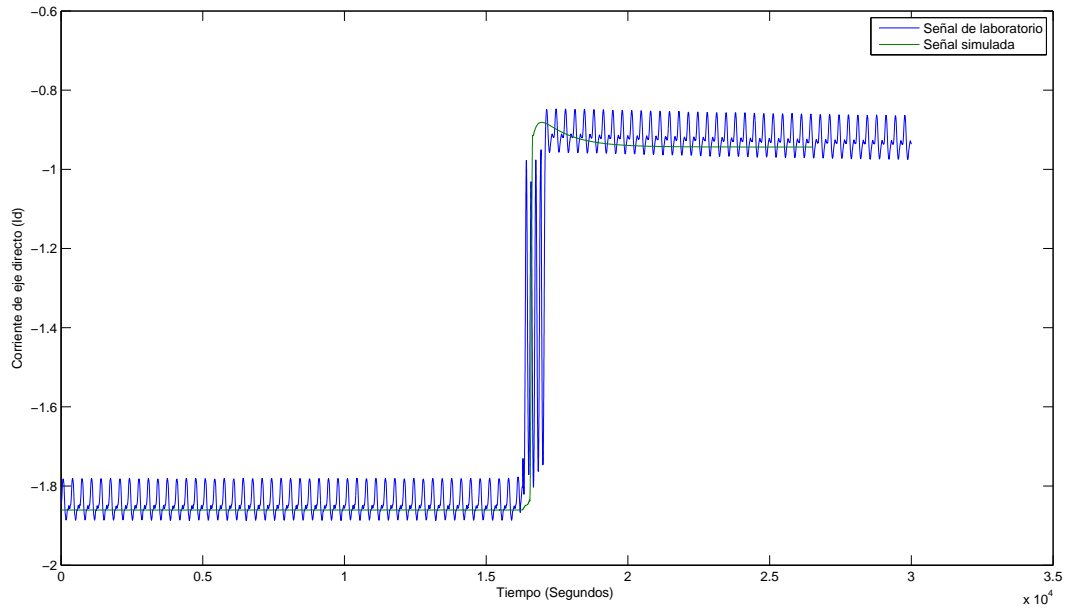


Figura G.12: Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 5.

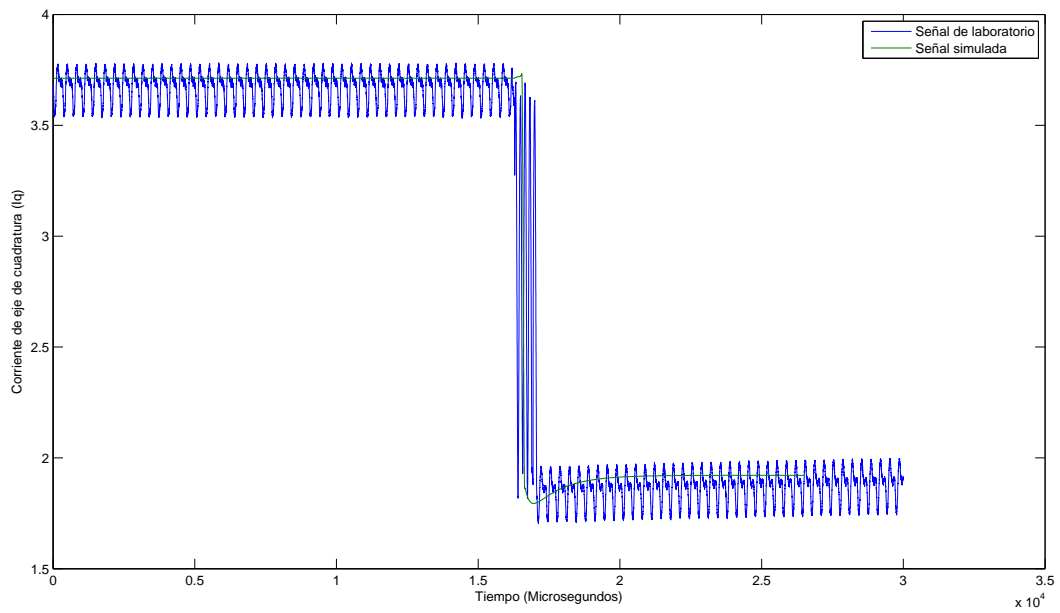
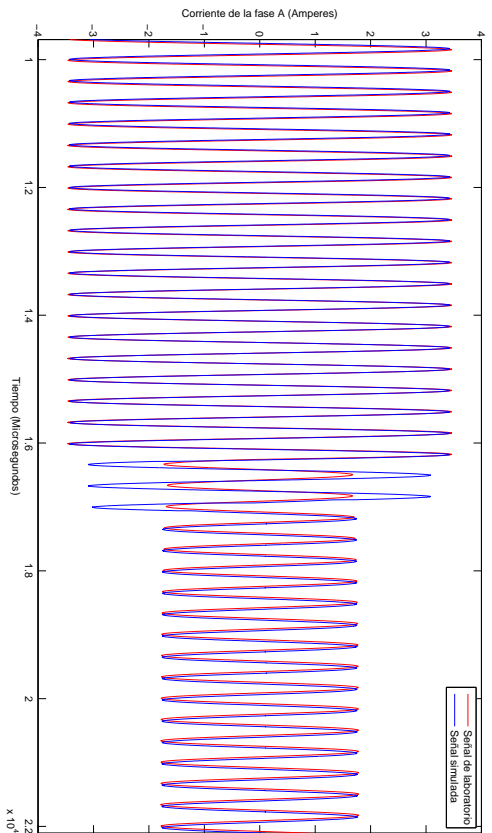
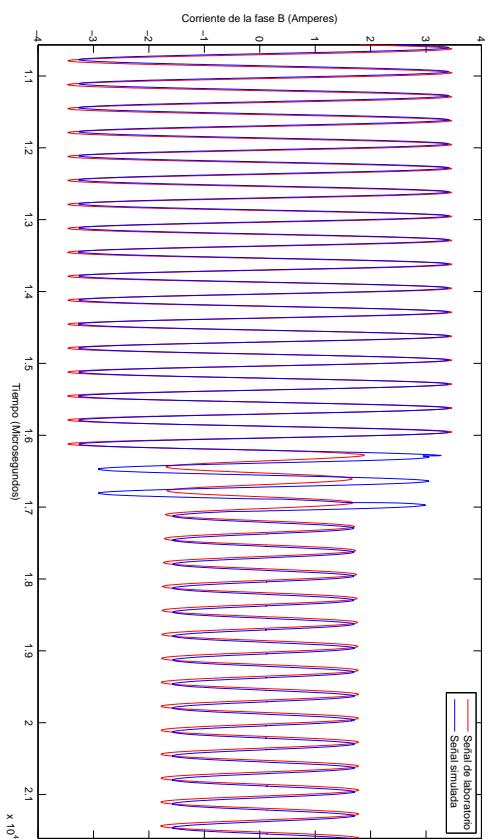


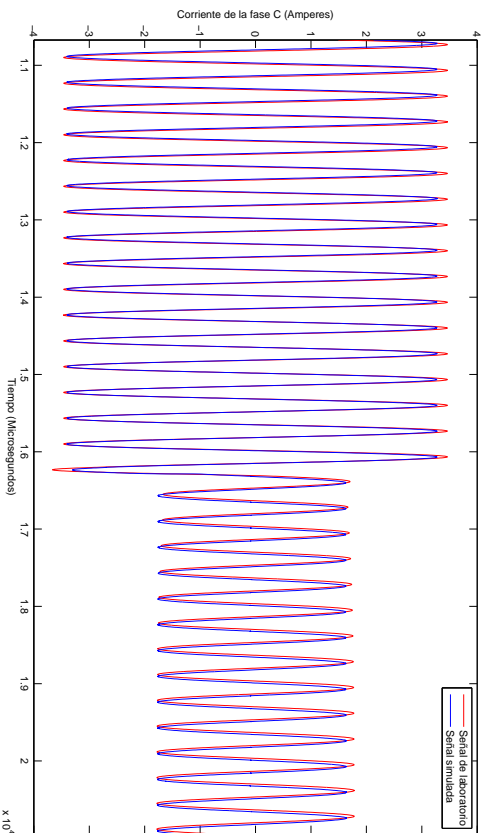
Figura G.13: Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 5.



(a) Comparación de las corrientes de la fase A



(b) Comparación de las corrientes de la fase B



(c) Comparación de las corrientes de la fase C

Figura G.14: Comparación de las corrientes de fase para el modelo 5.

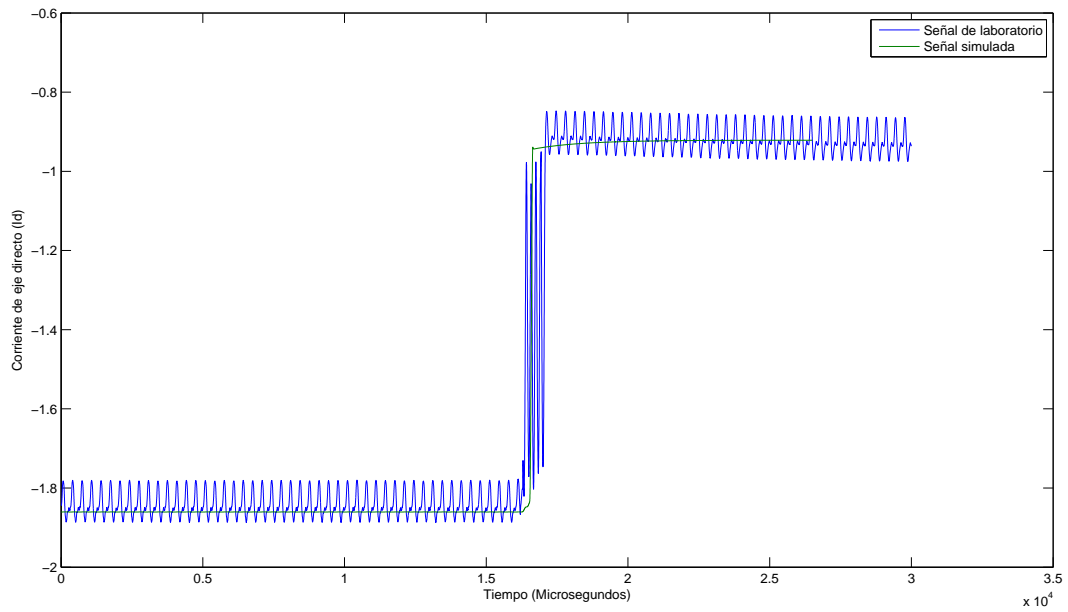


Figura G.15: Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 6.

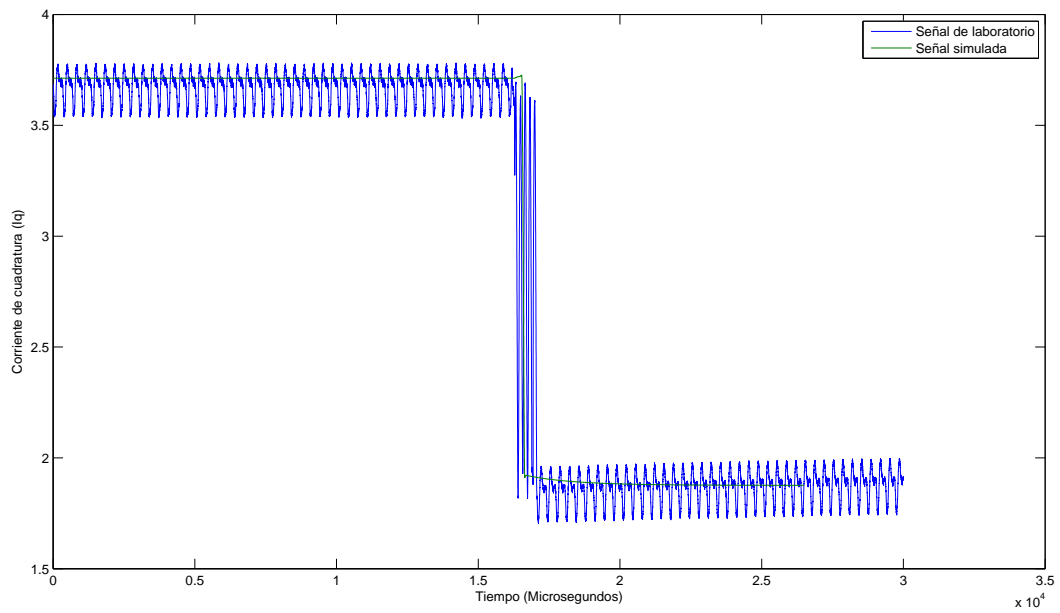
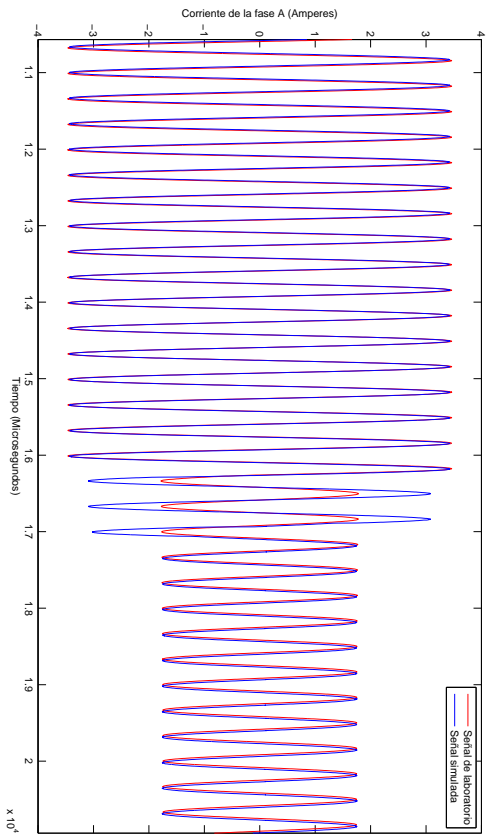
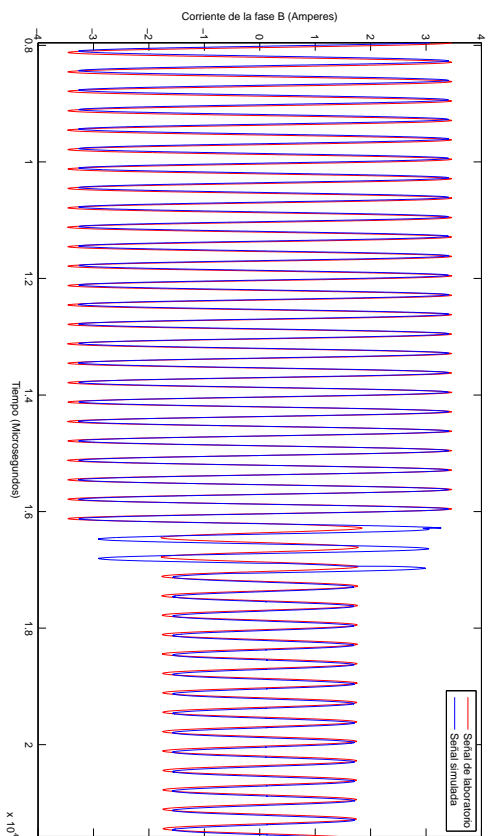


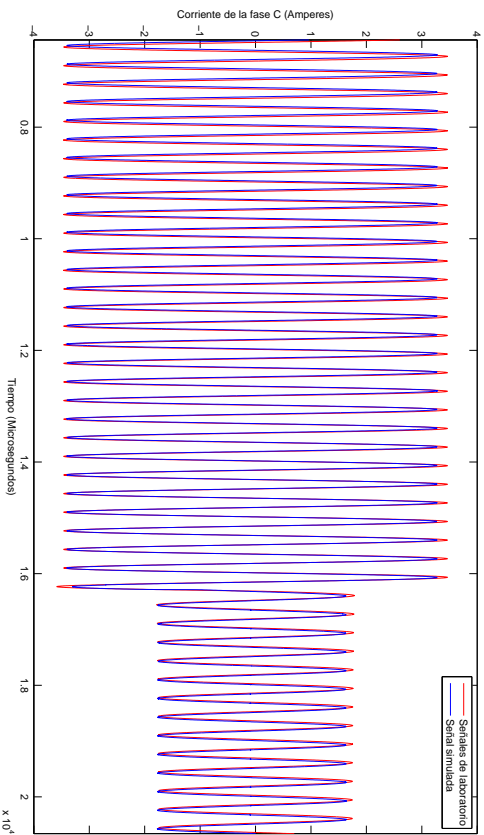
Figura G.16: Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 6.



(a) Comparación de las corrientes de la fase A



(b) Comparación de las corrientes de la fase B



(c) Comparación de las corrientes de la fase C

Figura G.17: Comparación de las corrientes de fase para el modelo 6.

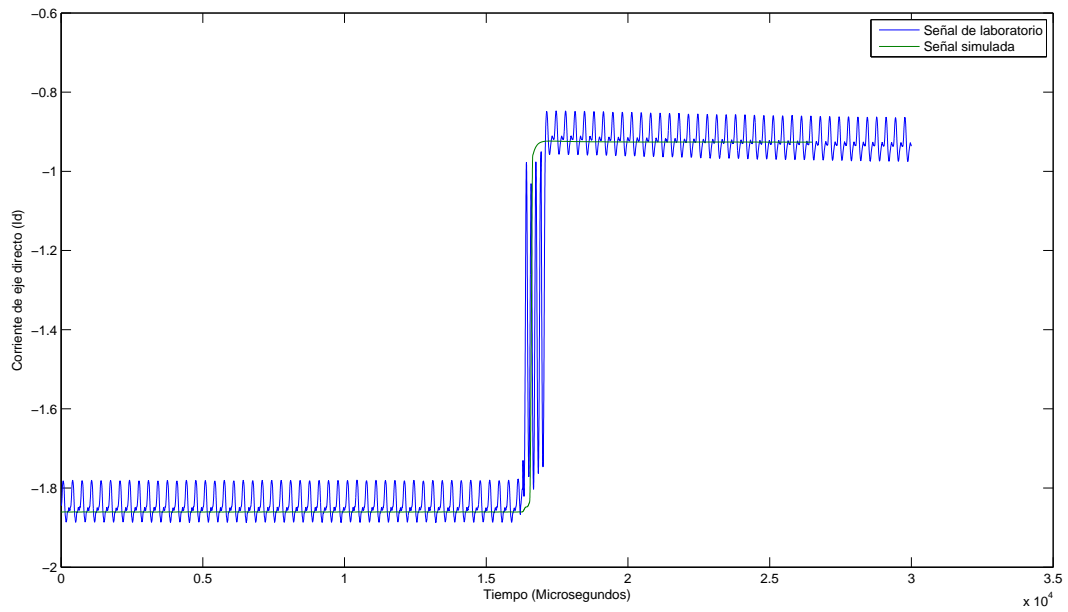


Figura G.18: Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 7.

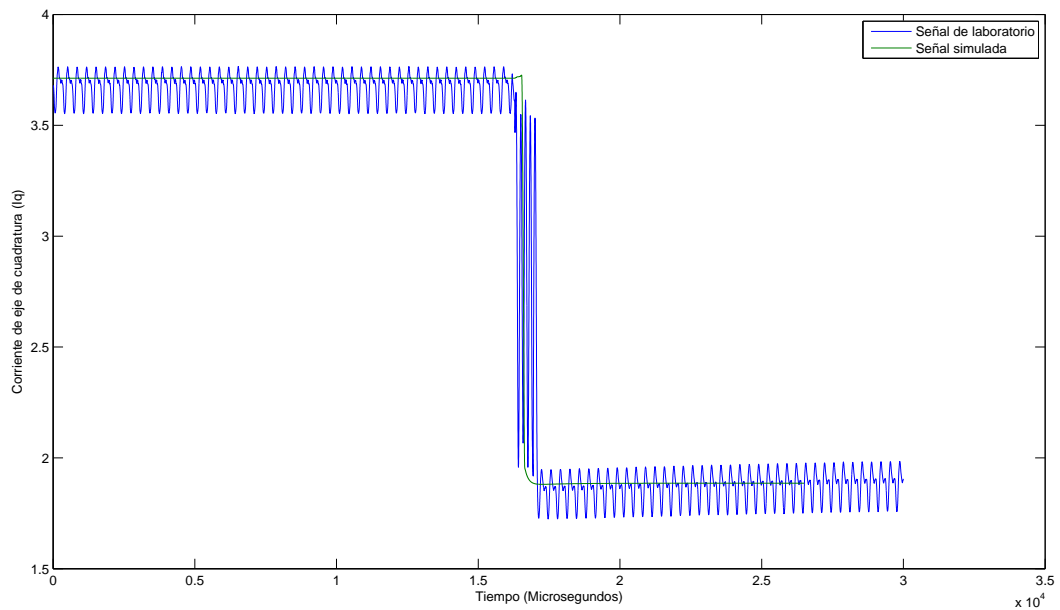
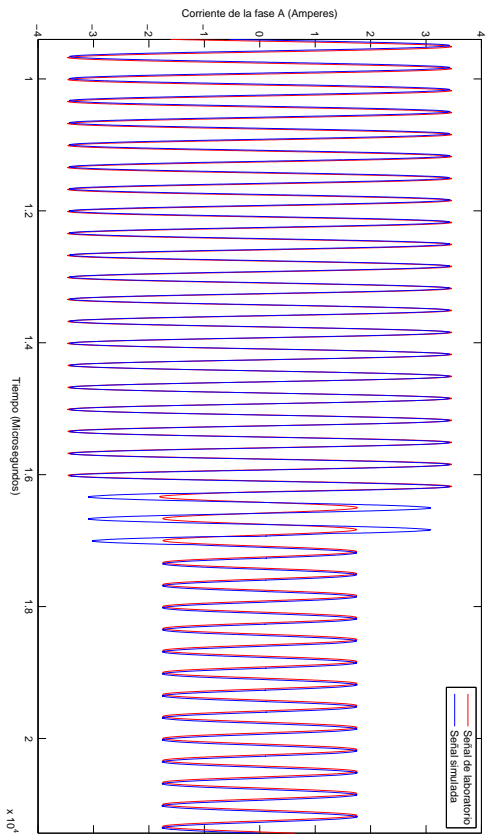
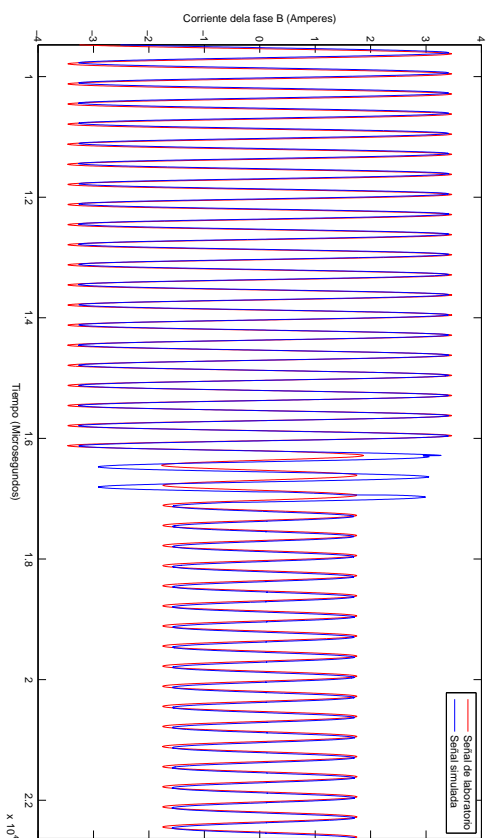


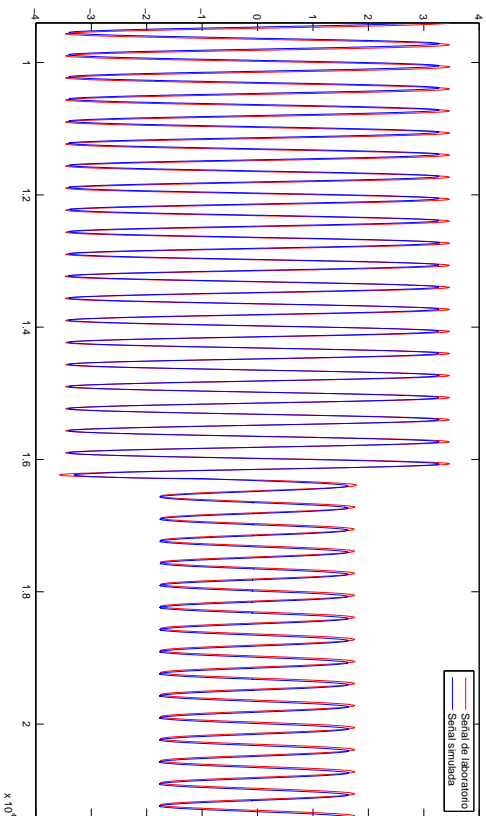
Figura G.19: Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 7.



(a) Comparación de las corrientes de la fase A



(b) Comparación de las corrientes de la fase B



(c) Comparación de las corrientes de la fase C

Figura G.20: Comparación de las corrientes de fases para el modelo 7.

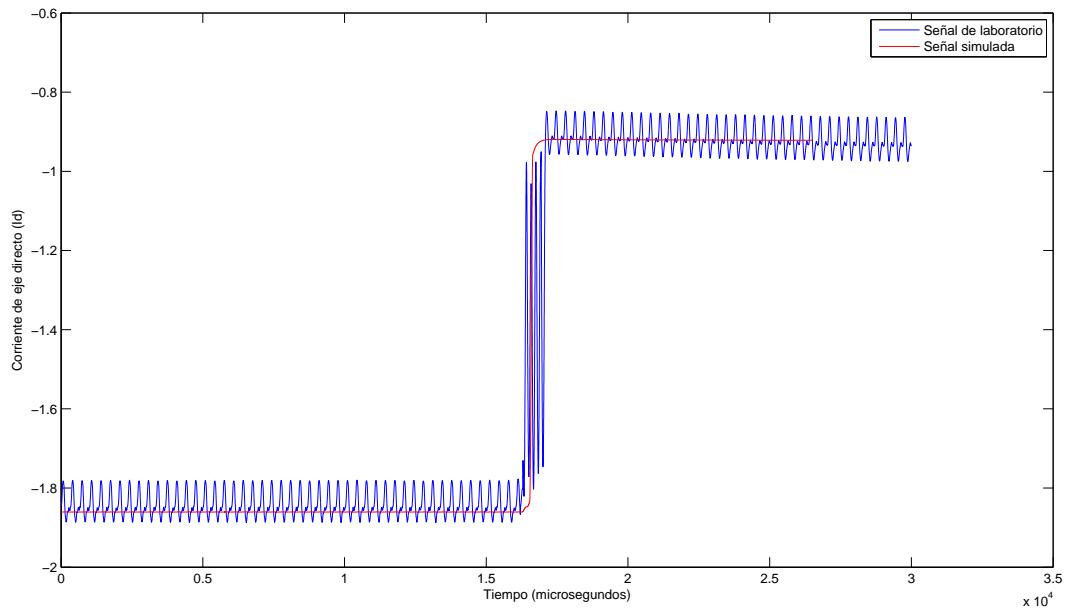


Figura G.21: Comparación de las corrientes del eje directo para el modelo 8.

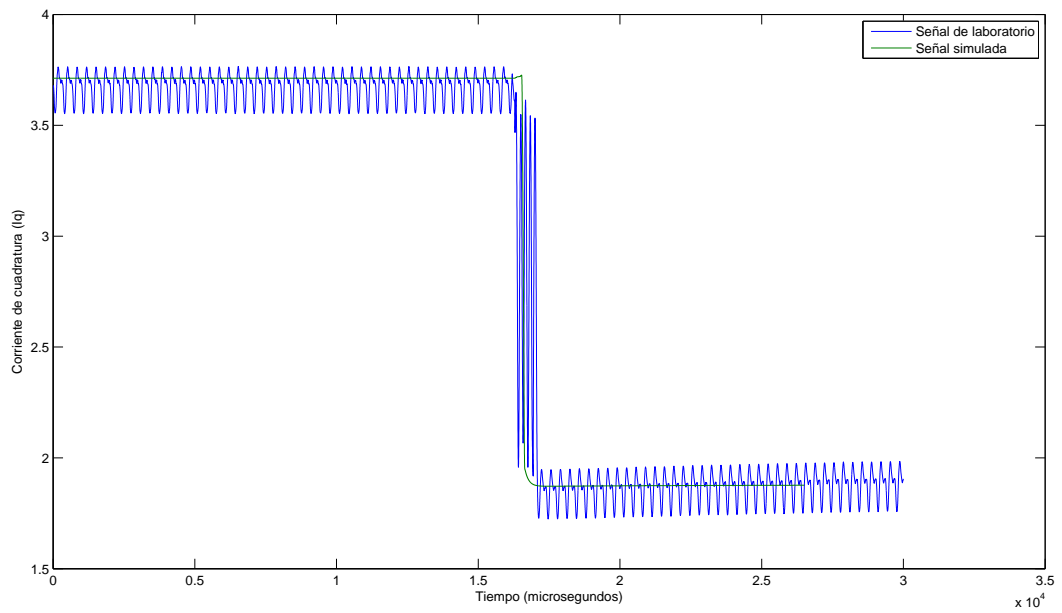
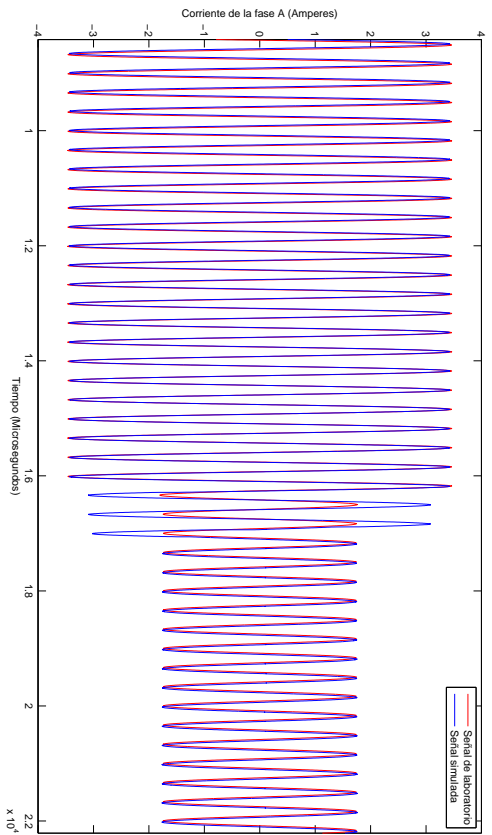
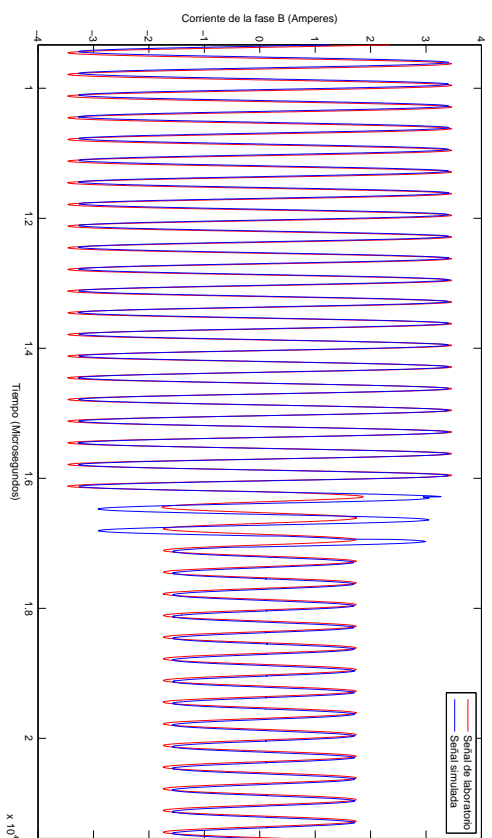


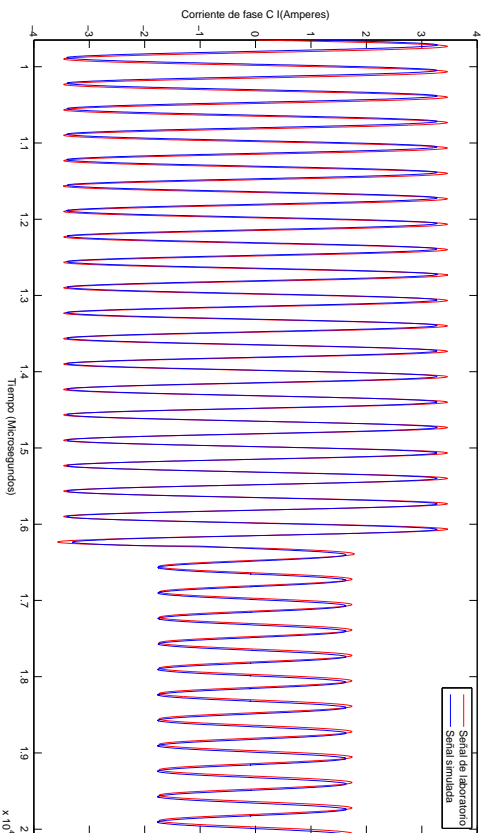
Figura G.22: Comparación de las corrientes del eje de cuadratura para el modelo 8.



(a) Comparación de las corrientes de la fase A



(b) Comparación de las corrientes de la fase B



(c) Comparación de las corrientes de la fase C

Figura G.23: Comparación de las corrientes de fase para el modelo 8.