

**HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA ESTIMACIÓN DE
PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA MEDIANTE EL
MÉTODO DE ERRORES DE PREDICCIÓN**

DIEGO FERNANDO MARTÍNEZ AYALA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2007

**HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA ESTIMACIÓN DE
PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA MEDIANTE EL
MÉTODO DE ERRORES DE PREDICCIÓN**

DIEGO FERNANDO MARTÍNEZ AYALA
Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Codirector
LIBARDO VILLAMIZAR MONTES
Ingeniero Electricista

Director
HERMANN RAÚL VARGAS TORRES
Doctor Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2007

*A José Vicente, Elizabeth, Juan Carlos y Juliana, por ser mi motivación
y apoyo mas grande.*

*A mis maestros, que han sabido guiarme y acompañarme en este
camino*

Y

A Eddy por su apoyo incondicional en la conclusión de esta meta.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por que este logro ha sido alcanzado gracias su esfuerzo y entrega.

Al Dr. Hermann Raúl Vargas, director del proyecto, y a Libardo Villamizar, por su orientación y acompañamiento en este proceso.

Al GISEL por abrirme sus puertas y brindarme su importante apoyo. Especialmente a Ronald, Germán y Álvaro por sus aportes precisos y certeros.

RESUMEN

1. TÍTULO: HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA MEDIANTE EL MÉTODO DE ERRORES DE PREDICCIÓN.*
2. AUTOR: DIEGO FERNANDO MARTÍNEZ AYALA **
3. PALABRAS CLAVES: MÁQUINA SINCRÓNICA
ESTIMACIÓN PARÁMETROS
MÉTODO DE ERRORES DE PREDICCIÓN
MODELO dq0
INTERFAZ GRÁFICA
MATLAB

4. CONTENIDO

El objetivo de esta tesis, fue implementar una herramienta software que estimara parámetros de la máquina sincrónica, para conocer de forma ajustada a la realidad el comportamiento de esta en diversos escenarios, y de este modo contar con la información necesaria para dar continuidad a los estudios de estabilidad a pequeña y gran perturbación realizados por el grupo de investigación GISEL.

Pretende acercar al lector a la teoría de la máquina sincrónica describiendo matemáticamente su comportamiento, mostrando un modelo generalizado, y luego particularizándolo, revelando de este modo los parámetros que son estimados por la herramienta. Se explica detalladamente cómo es el proceso para obtener estos parámetros, a través de ecuaciones que describen el comportamiento de la máquina, así como las funciones implementadas en MATLAB.

Se presentan los estudios y análisis realizados para validar y evaluar el desempeño de la herramienta, ante la variación de varios de los parámetros que influyen en el ciclo de trabajo de esta. Se muestran entonces los rangos de variación de carga que afectan a la máquina para poder realizar una óptima estimación de sus parámetros. También se presenta la sensibilidad de la herramienta ante variaciones de los parámetros de entrada, y el desempeño ante cambios en la frecuencia de muestreo de las señales medidas en la máquina. Finalmente se presenta una teoría de la representación en por unidad de los parámetros de la máquina y se analizan los métodos de extrapolación lineal utilizados durante el desarrollo e implementación de la herramienta.

* Trabajo de Grado, trabajo de investigación GISEL

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica electrónica y de telecomunicaciones. Director: Hermann Raúl Vargas Torres.

ABSTRACT

1. TITLE: SOFTWARE FOR PARAMETER ESTIMATION OF SYNCRHONOUS MACHINE THROUGH PREDICTOR ERROR METHOD.*
2. AUTOR: DIEGO FERNANDO MARTÍNEZ AYALA **
3. PALABRAS CLAVES: SYNCHRONOUS MACHINE
PARAMETER ESTIMATION
PREDICTOR ERROR METHOD
MODEL dq0
GRAPHICAL USER INTERFAZ
MATLAB

4. CONTENT

The objective of this thesis was to implement a software for parameter estimation of the synchronous machine, for knowing its performance fit to reality, thus have the needed information to give continuity to studies implemented by the research group GISEL in the field of small and a large disturbance stability.

It aims to bring the reader closer to the theory of synchronous machine, describing mathematically its behavior, showing a generalized model, then made it particular, thus revealing the parameters estimated by the tool. It explains in detail how is the process to obtain these parameters, through equations that describe the behavior of the synchronous machine, as well as the functions implemented in MATLAB.

This thesis presents several studies and analysis made to the software, in order to validate and assess the performance of the tool, through the variation of several parameters that influence the work process. Then it shows the ranges of load variation that machine needs for the parameter estimation. After that, it shows the sensitivity of the tool before changes of the input parameters and reveals the performance to changes in the frequency signals sampling taken from the machine. Finally, it presents a theory of per unit representation in each of the parameters of the machine and examines the linear extrapolation methods used during the development and implementation of the tool.

* Degree thesis, GISEL's researching.

** Physics and Mechanics Engineering's Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications' Department. Director: Hermann Raúl Vargas Torres.

Índice general

1. Introducción	12
1.1. Planteamiento del problema	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo general	13
1.2.2. Objetivos específicos	13
1.3. Antecedentes	14
1.4. Organización del libro	16
2. Descripción matemática de la máquina sincrónica	18
2.1. Introducción	18
2.2. Descripción de la máquina sincrónica	18
2.2.1. Descripción matemática de la máquina.	19
2.3. Representación circuital de la máquina sincrónica en componentes $dq0$	22
2.4. Comparación entre el modelo $dq0$ y el modelo en el dominio de las fases	25
2.5. Ecuaciones de movimiento	26
3. Estimación de parámetros	27
3.1. Introducción	27
3.2. El método de errores de predicción	27
3.2.1. Modelo general del sistema	27

ÍNDICE GENERAL	4
3.2.2. Modelo ARMAX	29
3.2.3. Función objetivo	29
3.2.4. Método numérico Errores de Predicción PEM (Predictor Error Method)	29
3.3. Método de mínimos cuadrados	30
3.3.1. El modelo general del sistema	31
3.3.2. Estimación del modelo en espacio de estados mediante la técnica de mínimos cuadrados	32
4. Representación del modelo de la Máquina Síncronica	34
4.1. Circuito de la Máquina Síncronica generalizado	34
4.1.1. Modelo de variables de estado	34
5. Metodología para la estimación de parámetros de la máquina síncronica	38
5.1. Introducción	38
5.2. Cálculo de los parámetros en el eje directo	39
5.2.1. Cálculo de aL_{ad} a partir a de la prueba de vacío	40
5.2.2. Cálculo de L_d, L_q y a mediante señales de operación de estado estable de la máquina	40
5.2.3. Estimación de los flujos magnéticos Ψ_d y Ψ_q	42
5.2.4. Estimación de la corriente de amortiguamiento i_{kd}	42
5.2.5. Cálculo de los parámetros L_f y R_f	43
5.2.6. Cálculo de los parámetros L_{kd} y R_{kd}	43
5.3. Cálculo de los parámetros en el eje de cuadratura	44
5.3.1. Cálculo de la inductancia L_{aq}	44
5.3.2. Estimación de las corrientes I_{kq} e I_g	44
5.3.3. Estimación de V_{aq}	45
5.3.4. Cálculo de los parámetros L_g, L_{kq}, R_g y R_{kq}	45

6. Implementación de la metodología propuesta	47
6.1. Introducción	47
6.2. Criterios de selección	47
6.2.1. Modelo	47
6.2.2. Método de estimación	48
6.2.3. Herramienta matemática	48
6.3. Funciones	48
6.3.1. Función <i>pem</i>	50
6.3.2. Función <i>oe</i>	51
6.3.3. Función <i>metest</i>	52
6.3.4. Función <i>vacio</i>	54
6.3.5. Función <i>estab</i>	55
6.3.6. Función <i>predicflujos</i>	55
6.3.7. Función <i>corrienteD</i>	56
6.3.8. Función <i>paracampo</i>	56
6.3.9. Función <i>paraamor</i>	56
6.3.10. Función <i>corrsum</i>	57
6.3.11. Función <i>dfme</i>	57
6.3.12. Función <i>pu</i>	57
6.3.13. Función <i>derivar</i>	58
6.4. Interfaz	58
6.4.1. Justificación	58
6.4.2. Descripción	58
6.4.3. Funciones y programas	60

ÍNDICE GENERAL	6
<hr/>	
7. Pruebas y resultados	64
7.1. Introducción	64
7.2. Estudio de caso tipo	64
7.2.1. Análisis de los resultados de la estimación	65
7.2.2. Índice de error de las señales en el tiempo	66
7.3. Estudio de la perturbación del sistema	70
7.3.1. Descripción de la prueba	71
7.3.2. Análisis de los resultados	71
7.4. Análisis de sensibilidad de la metodología respecto a Ra y Ll	75
7.4.1. Análisis matemático de la influencia de Ra y Ll	76
7.4.2. Descripción del proceso de análisis	76
7.5. Análisis de la metodología con respecto a la frecuencia de muestreo de las señales	85
8. Conclusiones	92
8.1. Conclusiones	92
A. Representación en por unidad	97
A.1. Bases utilizadas en el estator	97
A.2. Bases utilizadas en el rotor	97
B. Análisis de los métodos de extrapolación (Runge-Kutta y regla trapezoidal)	99
B.1. Sistema en ecuaciones en diferencias mediante la regla trapezoidal	99
B.2. Comparación de las respuestas del sistema para los dos métodos de solución	100
B.3. Descripción del método Runge-Kutta	102

C. Manual del usuario	105
C.1. Introducción	105
C.2. Instalación	105
C.2.1. Requerimientos	105
C.2.2. Procedimiento de Instalación	106
C.3. Ejecución	106
C.4. Buscar	108
C.5. Ejecutar	110
C.6. Resultados	113
C.7. Comparar	115

Índice de figuras

2.1. Corte transversal de máquina síncrona	19
2.2. Representación en inductancias de la máquina síncrona	20
2.3. Variación de la permeancia con la rotación de la máquina	21
2.4. Circuito eléctrico que representa el eje directo del modelo de la máquina síncrona.	23
2.5. Circuito eléctrico que representa el eje en cuadratura del modelo de la máquina síncrona.	23
5.1. Circuito eléctrico que representa el eje directo del modelo de la máquina síncrona.	39
5.2. Circuito eléctrico que representa el eje en cuadratura del modelo de la máquina síncrona.	40
6.1. Esquema general de distribución y relación de las funciones.	49
6.2. Ciclo de desarrollo de la herramienta.	60
6.3. Esquema de secuencia de funciones gráficas	62
7.1. Diagrama unifilar del sistema utilizado.	65
7.2. Comparación de corrientes de eje directo I_d	67
7.3. Comparación de corrientes de eje en cuadratura I_q	68
7.4. Comparación de corrientes de campo I_f	68
7.5. Comparación de corrientes I_g	69

7.6. Comparación de corrientes de amortiguamiento I_{kd}	69
7.7. Comparación de corrientes de amortiguamiento I_{kq}	70
7.8. Error relativo de L_d y L_{ad} al variar el nivel de perturbación.	72
7.9. Error relativo de L_q y L_{aq} al variar el nivel de perturbación	73
7.10. Error relativo de R_f y L_f al variar el nivel de perturbación	73
7.11. Error relativo de R_g y L_g al variar el nivel de perturbación	74
7.12. Error relativo de R_{kd} y L_{kd} al variar el nivel de perturbación	74
7.13. Error relativo de R_{kq} y L_{kq} al variar el nivel de perturbación	75
7.14. Error relativo de L_d y L_{ad} al variar R_a	79
7.15. Error relativo de L_q , L_{aq} , L_f , L_g , L_{kd} y L_{kq} al variar R_a	79
7.16. Error relativo de R_f , R_{kd} y R_{kq} al variar R_a	80
7.17. Error relativo de R_g al variar R_a	80
7.18. Error relativo de L_d , L_{ad} , L_q y L_{aq} al variar L_l	81
7.19. Error relativo de L_f , L_g , L_{kd} y L_{kq} al variar L_l	81
7.20. Error relativo de R_f , R_{kd} y R_{kq} al variar L_l	82
7.21. Error relativo de R_g al variar L_l	82
7.22. Índice de error de I_d al variar R_a	83
7.23. Índice de error de I_q al variar R_a	83
7.24. Índice de error de I_d al variar L_l	84
7.25. Índice de error de I_q al variar L_l	84
7.26. Valor de L_{ad} para cada valor de frecuencia de muestreo	85
7.27. Valor de L_{aq} para cada valor de frecuencia de muestreo	86
7.28. Valor de L_d para cada valor de frecuencia de muestreo	86
7.29. Valor de L_f para cada valor de frecuencia de muestreo	87
7.30. Valor de L_g para cada valor de frecuencia de muestreo	87
7.31. Valor de L_{kd} para cada valor de frecuencia de muestreo	88
7.32. Valor de L_{kq} para cada valor de frecuencia de muestreo	88

7.33. Valor de L_q para cada valor de frecuencia de muestreo	89
7.34. Valor de R_f para cada valor de frecuencia de muestreo	89
7.35. Valor de R_g para cada valor de frecuencia de muestreo	90
7.36. Valor de R_{kd} para cada valor de frecuencia de muestreo	90
7.37. Valor de L_{kq} para cada valor de frecuencia de muestreo	91
B.1. Respuesta del sistema mediante el método de la regla trapezoidal.	101
B.2. Respuesta del sistema mediante el método Runge-Kutta	102
B.3. Comparación de los flujos magnéticos mediante el método Runge-Kutta.	104
B.4. Comparación de los flujos magnéticos mediante el método Runge-Kutta.	104
C.1. Ventana principal de la herramienta EGM	107
C.2. Ventana buscar	109
C.3. En esta ventana se seleccionan los archivo de trabajo	110
C.4. A. Área para mostrar, aumentar, limitar la señal mostrada, B. Selección de la señal que se mostrará, C. Filtrado de la señal escogida, D. Presentación de los intervalos escogidos para la estimación.	111
C.5. Esta ventana permite ver los parámetros estimados y compararlos con los originales.	114
C.6. Esta ventana permite ver los parámetros estimados y compararlos con los originales.	115
C.7. Comparación de señales, dada por la ventana Comparar.	116

Índice de cuadros

6.1. Descripción del vector de señales medidas Entradas	53
6.2. Descripción del vector de salidas P	54
7.1. Comparación de parámetros reales y estimados	66
7.2. Índices de error	67

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo de grado es parte de un conjunto de investigaciones y aplicaciones realizadas por el Grupo de Investigación de Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), en el área de estabilidad y control de sistemas eléctricos de potencia. De la misma manera apoya al estudio y comprensión de las características de la máquina sincrónica a partir de modelos que representen los estados transitorios y subtransitorios, dada la gran influencia que tienen estos dispositivos en los fenómenos de estabilidad de los sistemas eléctricos.

Así mismo se presenta la implementación de una metodología en MATLAB, para la estimación de parámetros de la máquina sincrónica a partir de medidas tomadas de la máquina, antes y durante su operación. La herramienta cuenta con una interfaz de usuario que permite la visualización de las señales y resultados. También, permite interactuar con ATP para realizar pruebas, estudios y organizar datos de parámetros estimados.

El modelo utilizado cumple con los requerimientos para los estudios transitorios que se desean tener en cuenta, como son los estudios de estabilidad de pequeña y gran perturbación.

1.1. Planteamiento del problema

Los estudios de estabilidad de sistemas de potencia requieren modelos y parámetros adecuados de sus componentes. La máquina sincrónica es uno de los elementos

de mayor relevancia para la caracterización transitoria de los sistemas de potencia, dado que la mayor cantidad de energía se produce con máquinas de este tipo. Para el caso colombiano se realizan tales estudios empleando valores típicos que no aseguran valores cercanos a la realidad. Por otra parte los métodos convencionales de estimación se realizan mediante modelos de la máquina que no contienen la información necesaria para estudios transitorios. Aunque existen pruebas que permiten obtener los modelos requeridos para los estudios de estabilidad, realizarlas requiere contar con laboratorios especializados, lo que implica grandes gastos por transporte y salida de servicio de la máquina. Por tanto, es necesario recurrir a metodologías económicas y prácticas que permitan la estimación de los parámetros de los modelos utilizados en los estudios de estabilidad.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Implementar una herramienta software en MATLAB que permita estimar parámetros de la máquina sincrónica mediante el modelo de espacio de estados, empleando el método PEM (Predictor Error Method).

1.2.2. Objetivos específicos

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

- Recolectar información, analizar e implementar el método de solución PEM para estimar los parámetros de la máquina sincrónica en MATLAB.
- Elaborar un puente de comunicación entre ATP y la herramienta desarrollada en MATLAB para obtener datos de simulación y así validar las estimaciones realizadas.
- Crear una base de datos de pruebas compuesta por simulaciones y resultados.
- Cuantificar y analizar el desempeño de la herramienta comparando entradas y salidas de ATP, con las entradas y salidas de la herramienta.

- Diseñar y elaborar una interfaz gráfica que permita una utilización agradable, sencilla e intuitiva de la herramienta, así como la visualización y comparación de los resultados.
- Realizar un manual de usuario que permita emplear la herramienta elaborada.

1.3. Antecedentes

El modelado de la máquina sincrónica es un reto desde la década de 1920, iniciando en 1923 con André Blondel y su método para analizar el fenómeno oscilatorio de los alternadores. En 1933 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 la década de 1950 se inicia la revolución tecnológica con los computadores analógicos, pero solo hasta 1956 se diseñó el primer paquete computacional para el estudio de estabilidad, en el cual se implementaron los primeros modelos matemáticos de la máquina sincrónica para la simulación de sistemas de potencia.

Los esfuerzos e intereses de la industria relacionados con la estabilidad de sistemas a nivel transitorio comienzan en la década de 1960. Esto impulsó el desarrollo de nuevos métodos numéricos para la solución de ecuaciones integro-diferenciales, y los avances tecnológicos permitieron la incursión de los primeros modelos de la máquina sincrónica a nivel transitorio y subtransitorios despreciando ciertos detalles.

El primer método que permitió determinar los parámetros del modelo completo de la máquina en ambos ejes d y q es la prueba de decremento investigada entre los años 1977 y 1980 por “ G. Shackshaft, A. T. Porary, F. P. de Mello, L. N. Hannett y J. R. Robeiro [de Mello u. Ribeiro (1977)], [Shackshaft u. Porary (1977)], [de Mello u. Hannett (1981)] . La prueba utiliza el mismo concepto de la prueba de corto circuito. A partir de la medición de la respuesta en el tiempo, de una perturbación se identifican las características de la máquina. En esta prueba se dispone la máquina de tal forma que la corriente en el eje de cuadratura sea cero; en esta condición la unidad se desconecta repentinamente y a partir de los datos de tensión en los terminales y la tensión de campo se determinan los parámetros del circuito. La prueba se repite cambiando las condiciones de la máquina de tal forma que la corriente de eje directo sea cero. La prueba de decremento es difícil y costosa de realizar. Para

muchas máquinas es difícil o imposible alcanzar condiciones de no saturación, lo cual desafortunadamente complica la prueba y el análisis de resultados.

En 1980 en el centro de investigación "*Ontario Hydro Research, Canadá*" se realizaron análisis a partir de la aplicación del método "*Standstill frequency-response (SSFR)*" para determinar los parámetros en un generador de 555 MVA [Coultes u. Watson, 1981]. Este centro también desarrolló una forma de estimar los parámetros a partir del ajuste de las curvas de respuesta en frecuencia [Dandeno u. Porary, 1981]. Estos aportes fueron validados [Dandeno u. a., 1973], [Dandeno u. a., 1981a] y presentados en la IEEE en 1981. Además, mediante estos métodos se comparó un modelo de la MS teniendo en cuenta tres y dos circuitos de amortiguamiento en el eje q y d respectivamente, con otro modelo menos aproximado que cuenta con dos y un circuito de amortiguamiento en sus respectivos ejes q y d . Los resultados de esta investigación fueron satisfactorios, tanto así que la última revisión del estándar IEEE 115-1995 [IEEE, 2002] menciona las conclusiones y recomendaciones realizadas por este centro, y se incluyó el método de ajuste de la curva de respuesta en frecuencia.

Desde 1987 los investigadores de la universidad de Tsinghua en China han buscado 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 relaciona con la forma apropiada para definir las señales de entrada. Debido a que existe un grupo de señales que al ser manipuladas pueden perturbar dramáticamente el sistema y hacer que la operación normal del generador falle, también hay otras señales a partir de las cuales no es posible obtener todas las características internas del generador. El segundo problema consiste en seleccionar el modelo adecuado para una estimación efectiva. Y el problema final tiene que ver con verificar la cercanía de los parámetros estimados con los reales en un sistema de gran escala.

Actualmente existen paquetes informáticos para análisis de flujos de potencia y estabilidad que incluyen opciones para la identificación de parámetros como es el caso del DIGSILENT, sin embargo, solo realizan la implementación de metodologías convencionales. Mathworks ha diseñado la "Toolbox" IDENT, que permite estimar los parámetros de modelos en general a partir de señales de entradas y salidas del un sistema en el dominio de la frecuencia o del tiempo. Esta "Toolbox" solo ha sido tratada como un paquete matemático y no existen registros de estimaciones realizadas a máquinas eléctricas.

1.4. Organización del libro

El presente libro consta de ocho capítulos y tres apéndices

Capítulo 2

Está dedicado a la descripción matemática de la máquina sincrónica. Se exponen ecuaciones eléctricas y mecánicas así como una representación circuital de la máquina sincrónica en componentes $dq0$.

Capítulo 3

Se exponen los modelos y métodos analizados para el planteamiento de la metodología propuesta. También se muestra la representación y estimación del modelo en espacio de estados de la máquina empleando la técnica de mínimos cuadrados y finalmente se expone el ajuste de modelos utilizando datos en el dominio de la frecuencia.

Capítulo 4

En este capítulo se presenta el modelo circuital de la máquina sincrónica, y se ajustan los modelos no lineales utilizando datos en el dominio de la frecuencia. Se presenta luego el modelado en tiempo continuo y la estimación en el dominio de la frecuencia.

Capítulo 5

Se describe la metodología a implementar para estimar los parámetros de la máquina sincrónica. Primero se desarrolla para el cálculo de parámetros de eje directo y después para el eje en cuadratura.

Capítulo 6

Se presentan en este capítulo los criterios de selección del modelo de la máquina sincrónica, métodos de resolución y herramientas utilizadas para el desarrollo e im-

plementación de la metodología. Se describen una a una las funciones utilizadas e implementadas.

Capítulo 7

Se dedica este capítulo a la presentación de las pruebas realizadas a la herramienta, las cuales se presentan a continuación:

- Estudio de caso tipo.
- Estudio de la perturbación del sistema.
- Análisis de sensibilidad con respecto a R_a y L_I .
- Análisis con respecto a la frecuencia de muestreo de las señales.

Capítulo 2

Descripción matemática de la máquina sincrónica

2.1. Introducción

En este capítulo se presentan los modelos matemáticos que describen el comportamiento de la máquina sincrónica, la representación circuital de la máquina en componentes $dq0$ y finalmente se plantea una comparación entre el modelo $dq0$ y el modelo en el dominio de las fases.

2.2. Descripción de la máquina sincrónica

En la figura 2.2.1 se muestra la sección transversal de la máquina sincrónica (MS), la cual está compuesta por dos elementos esenciales: La armadura o estator y el campo o excitación. El campo se energiza con corriente continua para producir un flujo magnético y 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 uniformemente distribuidos (tres grupos de devanados A , B y C) sobre los cuales se induce tensión eléctrica. Los devanados de la armadura se instalan de forma uniforme, con una separación de 120 grados eléctricos, para que pueda producirse una rotación uniforme del campo magnético y un balance entre las tres tensiones de fase.

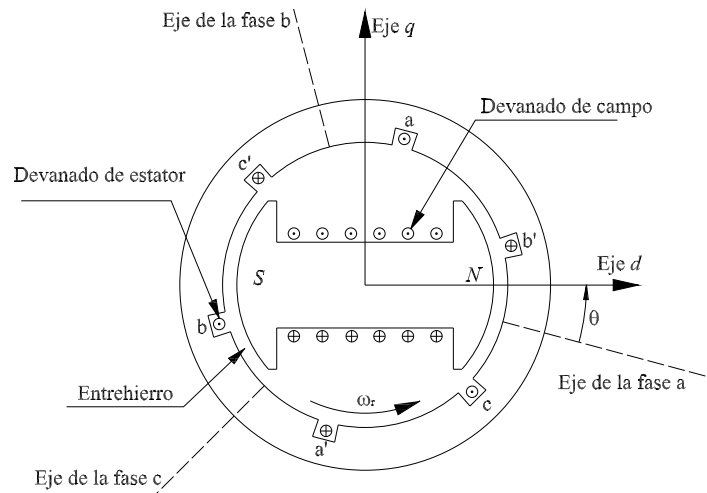


Figura 2.1: Corte transversal de máquina síncrona

La velocidad de sincronismo de la máquina se determina a partir del número de polos y la frecuencia eléctrica de la red. La relación que define la velocidad de sincronismo del rotor se presenta en la ecuación (2.1).

$$n = \frac{120}{p_f} f \quad (2.1)$$

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

2.2.1. Descripción matemática de la máquina.

La figura 2.2.1 representa la ubicación espacial de los devanados de la máquina síncrona omitiendo las inductancias mutuas entre rotor y estator. El estator está compuesto por tres inductancias y cada una representa el devanado por fase, en el que se induce una tensión e , la cual al conectar una carga, una corriente circulará hacia la misma. El rotor está compuesto por el devanado de campo y los devanados del amortiguamiento. El devanado de campo está alineado con el eje *d* y los devanados de amortiguamiento se ubican en ambos ejes de forma independiente. El número de

devanados de amortiguamiento depende de la complejidad de los efectos de las respuestas transitorias y subtransitorias y, en muchas ocasiones del grado de precisión de los resultados deseados. θ se define como el ángulo entre el eje d y el eje de la fase A .

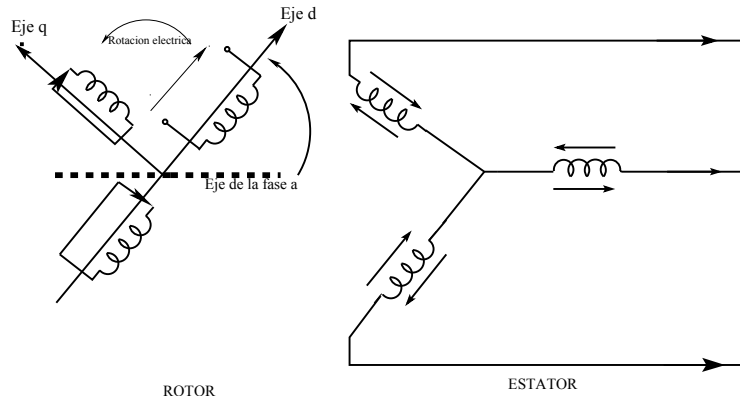


Figura 2.2: Representación en inductancias de la máquina síncrona

Al variar la posición del rotor, cada una de las inductancias propias y mutuas cambian de magnitud por lo que se incrementa la complejidad del sistema de ecuaciones característico de la máquina síncrona. Las variaciones de las inductancias son causadas por la variación de la permeancia del flujo magnético resultante. La permeancia depende en gran parte de la longitud del entrehierro, esta no es uniforme en todos los puntos debido a que el rotor no es totalmente liso. El caso mas notorio es una máquina con rotor de polos salientes como la que se presenta en la figura 2.3, 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. Las ecuaciones (2.2) y (2.3) representan la operación de la máquina en la fase A .

$$e_a = \frac{d\psi}{dt} - R_a i_a = p\psi - R_a i_a \tag{2.2}$$

$$\psi_a = -L_{aa}i_a - L_{ab}i_b - L_{ac}i_c + L_{afd}i_{fd} + L_{akd}i_{kd} + L_{akq}i_{kq} \tag{2.3}$$

donde:

i_a, i_b e i_c son la corrientes de cada fase.

L_{aa} , L_{ab} y L_{ac} corresponden a las inductancias 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 dijo anteriormente el modelo presentado en las ecuaciones (2.2) y (2.3) representan la operación de la máquina en la fase A, si este modelo se repite para las fases B y C, y se agrupan matricialmente, se obtiene el modelo de fases de la máquina síncrona.

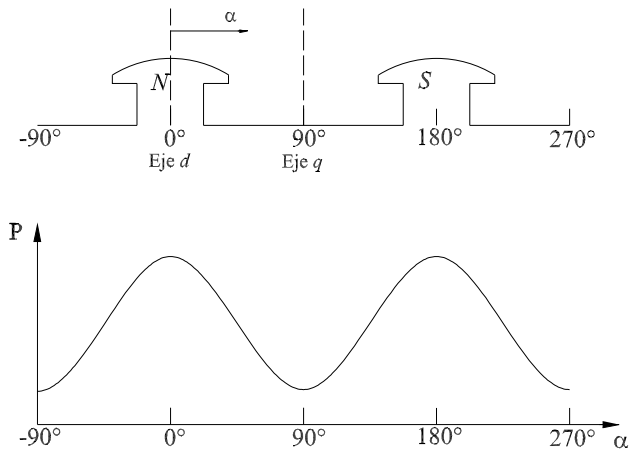


Figura 2.3: Variación de la permeancia con la rotación de la máquina

En las ecuaciones (2.2) y (2.3) las inductancias varían con respecto a la posición del rotor. Por tanto, para disminuir la complejidad del sistema de ecuaciones, se hace necesario simplificar el problema a partir de un modelo equivalente en el que la matriz característica del sistema sea constante.

2.3. Representación circuital de la máquina sincrónica en componentes $dq0$

Los circuitos de las figuras 2.4 y 2.5 representan la máquina sincrónica en las componentes $dq0$. La transformación del modelo permite simplificar los cálculos matemáticos. Las inductancias del modelo en estas componentes son valores constantes.

La matriz de transformación de componentes en el tiempo a componentes de Park se presenta en la ecuación (2.4)¹.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

El modelo de la MS está compuesto por dos circuitos, cada circuito 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 entre dos polos, en la parte de menor flujo de campo. Las ecuaciones (2.5) a (2.11) representan las tensiones inducidas en el estator de la máquina sincrónica².

¹Estas 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 empleados por las componentes de Park $k_q = k_d = \frac{2}{3}$.

²Las ecuaciones (2.5), (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), (2.10) y (2.11) están dadas en por unidad. En el apéndice A se resumen las bases de cada variable.

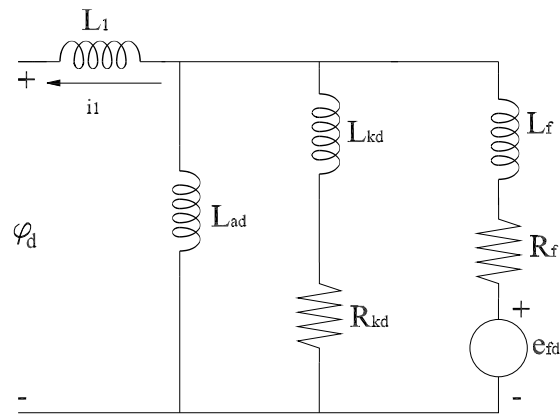


Figura 2.4: Circuito eléctrico que representa el eje directo del modelo de la máquina síncrona.

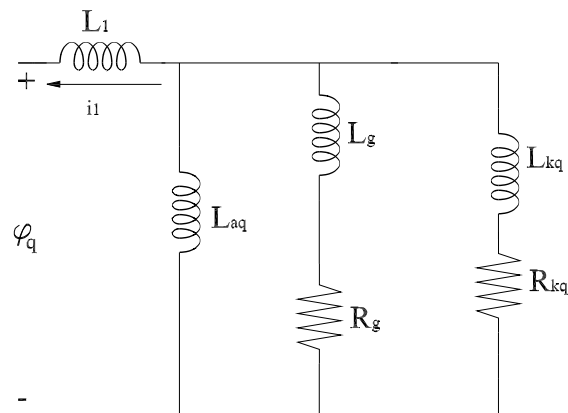


Figura 2.5: Circuito eléctrico que representa el eje en cuadratura del modelo de la máquina síncrona.

$$e_d = p\psi_d - \psi_q p\theta - R_a i_d \tag{2.5}$$

$$e_q = p\psi_q - \psi_d p\theta - R_a i_d \tag{2.6}$$

$$e_0 = p\psi_0 - R_a i_0 \quad (2.7)$$

Donde:

θ se define como el ángulo entre el eje directo y la fase A.

ψ_d es el flujo de corriente que fluye por el devanado del eje directo.

ψ_q es el flujo de corriente que fluye por el devanado del eje en cuadratura.

p es el operador derivador.

Las ecuaciones (2.8), (2.9) y (2.10) están definidas en función de los flujos ligados, los cuales se representan mediante las corrientes en los devanados de la máquina y los parámetros inductivos.

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd} \quad (2.8)$$

$$\psi_q = -L_q i_q + L_{akq} i_{kq} \quad (2.9)$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0 \quad (2.10)$$

La potencia instantánea total de salida en el estator se define en la ecuación (2.11).

$$P_t = e_d i_d + e_q i_q + e_0 i_0 \quad (2.11)$$

En un sistema balanceado $e_0 = i_0 = 0$, la ecuación (2.11) se simplifica reemplazando las ecuaciones (2.8), (2.9) y (2.10).

$$P_t = (i_d \psi_d - i_q \psi_q) \omega_r + (i_d p \psi_d + i_q p \psi_q + 2i_0 p \psi_0) - (i_d^2 + i_q^2 + 2i_0^2) R_a \quad (2.12)$$

La ecuación (2.12) se desagregó en tres términos: la diferencia de la variación de la energía magnética en la armadura, la potencia transferida a través del entrehierro y las pérdidas debido a la resistencia de la armadura. El torque eléctrico se obtiene dividiendo la potencia transferida a través del entrehierro en la velocidad angular del rotor.

$$T_e = (\psi_d i_d - \psi_q i_q) \frac{p_f}{2} \quad (2.13)$$

2.4. 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, debido a que el modelo en el dominio fases requiere mayor complejidad numérica. Las señales, respuesta del modelo $dq0$ son transformadas al dominio de las fases. Sin embargo, este proceso se compensa con la simplicidad matemática que se obtiene 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 más 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 en la industria [Y. Cui u. Xu (2004)], [E. Kyriakides u. Vittal (2004)]. Dentro de estas pruebas se validó el modelo a utilizar en condiciones balanceadas y desbalanceadas.

A pesar de las diferentes validaciones realizadas al modelo, se han llevado a cabo diferentes comentarios acerca del funcionamiento óptimo del modelo. Por ejemplo, recientemente se publicó un artículo donde se mencionó que las simulaciones realizadas con el modelo $dq0$ al realizar fallas monofásicas no son válidas [K. H. Chan u. Parle (2001)]. Estas conclusiones fueron analizadas y refutadas mediante una serie de pruebas presentadas por [L. Wang (2007)], en este artículo se comprobó la validez del modelo y se advierte que las simulaciones presentadas en [K. H. Chan u. Parle (2001)] son erróneas.

Otra discusión presentada 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.

2.5. Ecuaciones de movimiento

Las ecuaciones de importancia en el análisis de estabilidad en sistemas de potencia son las rotacionales, las cuales describen el efecto de desbalance entre el torque electromagnético y el torque mecánico. La diferencia entre estos se define como el torque acelerante como lo muestran las ecuaciones (2.14) y (2.15).

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.14)$$

donde:

T_a torque acelerante [$N \cdot m$].

T_m torque mecánico [$N \cdot m$].

T_e torque electromagnético [$N \cdot m$].

La aceleración se define como:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (2.15)$$

donde:

J el momento de inercia del generador y turbina combinados, [$kg \cdot m^2$].

ω_m velocidad angular del rotor [$rad \text{ mec/s}$].

t tiempo [s].

Las ecuaciones anteriores se pueden determinar en términos de la constante de inercia en por unidad H , definido como la energía cinética adquirida en watts-segundos a velocidad nominal dividido por la potencia aparente base.

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\omega_{0m}^2}{VA_{base}} \quad (2.16)$$

Capítulo 3

Estimación de parámetros

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan los métodos y modelos estudiados, para la estimación de parámetros. En primer lugar se muestra el método de errores de predicción (PEM) y los modelos empleados para expresarlo, así como el desarrollo matemático que lo describe. Finalmente se describe el método de mínimos cuadrados, sus representaciones y su desarrollo matemático.

3.2. El método de errores de predicción

En esta sección se describe el método de errores de predicción mostrado en [Zazo (1996)]. Primero se presenta el método PEM con un modelo general, luego se ejemplifica expresándolo mediante el modelo ARMAX, después se obtiene la función objetivo y finalmente se presenta el método numérico que minimiza esta función.

3.2.1. Modelo general del sistema

Se tiene un sistema como el descrito en la ecuación (3.1)

$$y_k = g_o \left(\theta^0 : u^k, \left(\xi^0 \right)^k \right) \quad (3.1)$$

donde θ^0 es un vector de parámetros reales y g_o es en general una función no lineal. Se supondrá que el sistema es invariante; g_o no depende de k , y ξ^v agrupa las perturbaciones o entradas no medidas.

En la ecuación (3.2) se presenta el modelo que se propone para este sistema.

$$y_k = g\left(\theta : u^k, \xi^k\right) \quad (3.2)$$

donde θ es el vector de parámetros que se requieren estimar. El modelo de predicción a utilizar es el que se muestra en la ecuación (3.3).

$$\hat{y}_k = \hat{g}\left(\theta : u^k, \xi^k\right) \quad (3.3)$$

donde $\hat{y}_k(\theta)$ es la salida predicha en $t = kT$ a partir de $z^{k-1} = \{y^{k-1}, u^{k-1}\}$.

y teniendo en cuenta que el vector de entradas y salidas z^{k-1} es como se define en la ecuación (3.4)

$$z^{k-1} = \{u(1), y(1), \dots, u(N), y(N)\} \quad \text{para } 1 \leq t \leq N \quad (3.4)$$

El error de predicción en $t = kT$ se muestra en la ecuación (3.5).

$$\varepsilon_k(\theta) = y_k - \hat{y}_k(\theta) = y_k - \hat{g}\left(\theta; z^{k-1}\right) \quad (3.5)$$

Por lo tanto, la forma general del modelo será la descrita en la ecuación (3.6).

$$y_k = \hat{y}_k(\theta) + \varepsilon_k(\theta) = \hat{g}\left(\theta; z^{k-1}\right) + \varepsilon_k(\theta) \quad (3.6)$$

3.2.2. Modelo ARMAX

Se utiliza el modelo ARMAX ($Ay = Bu + Ce$) para representar el sistema. En la ecuación (3.7) se muestra el modelo particularizado,

$$\hat{y}_k(\theta) = \frac{B(q, \theta)}{C(q, \theta)} u_k + \left(1 - \frac{A(q, \theta)}{C(q, \theta)}\right) y_k \quad (3.7)$$

y en la ecuación (3.8) se indica el error de predicción, que es una función no lineal en los parámetros. Los errores de predicción se obtienen en este caso mediante el filtrado (lineal) de las salidas y entradas medidas.

$$\varepsilon_k(\theta) = y_k - \hat{y}_k(\theta) = -\frac{B(q, \theta)}{C(q, \theta)} u_k + \frac{A(q, \theta)}{C(q, \theta)} y_k \quad (3.8)$$

3.2.3. Función objetivo

La meta es minimizar la función objetivo que contiene los errores de predicción. Si se tienen k puntos medidos, se define $v_k(\theta)$ mediante la ecuación (3.9),

$$v_k(\theta) \equiv \frac{1}{2} \sum_{l=1}^k l_l(\theta, \varepsilon_l(\theta)) \quad (3.9)$$

donde $l_l(\theta, \varepsilon_l(\theta))$ mide el error de predicción. Generalmente l_l se define por la ecuación (3.10), lo que implica un problema de mínimos cuadrados no lineales, descrito en la ecuación (3.11).

$$l_l(\theta, \varepsilon_l(\theta)) = l(\varepsilon(\theta)) = \varepsilon_l(\theta)^2 \quad (3.10)$$

$$v_k(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^k \varepsilon_l(\theta)^2 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^k \left(y_l - \hat{g}(\theta; z^{l-1}) \right)^2 \quad (3.11)$$

3.2.4. Método numérico Errores de Predicción PEM (Predictor Error Method)

Teniendo ya el modelo y la función objetivo, el método PEM minimizará la función objetivo $v_k(\theta)$. Debido a que $v_k(\theta)$ no es una función lineal en θ , la minimización

no se realiza derivando con respecto a θ e igualando a cero. Se emplean métodos iterativos, en los cuales se cuenta con un estimador $\theta^{(i)}$, y este se puede mejorar como se muestra en la ecuación (3.12).

$$\theta^{(i+1)} = \theta^{(i)} + \mu^i d^i \quad (3.12)$$

donde d^i es una dirección descendiente de la función objetivo y μ^i es un escalar que se elige para que $v_k(\theta^{i+1}) < v_k(\theta^i)$.

Las variantes de la iteración anterior son el método del gradiente y el método de Newton mostrados en las ecuaciones (3.13) y (3.14) respectivamente.

$$d^i = -v'_k(\theta^i) \quad (3.13)$$

$$d^i = -v''_k(\theta^i)^{-1} v'_k(\theta^i) \quad (3.14)$$

siendo $v''_k(\theta^i)$ la matriz de segundas derivadas en los parámetros de la función objetivo.

Si en este método se inicia con $\mu^i = 1$, que corresponde a un mínimo en d de la aproximación cuadrática, se obtiene la ecuación (3.15), que se define como el método de Newton.

$$v_k(\theta^i + d) = v_k(\theta^i) + d^T v'_k(\theta^i) + \frac{1}{2} d^T v''_k(\theta^i) d \quad (3.15)$$

3.3. Método de mínimos cuadrados

En primera instancia se presenta el método con un modelo general, luego se ejemplifica expresándolo mediante el modelo ARX, después se obtiene la función objetivo y finalmente se presenta el método numérico que minimiza esta función.

3.3.1. El modelo general del sistema

Una forma sencilla de relacionar las entradas y salidas de un sistema es la representación de las ecuaciones lineales en diferencias como se muestra en la ecuación (3.16).

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_ny(t-n) = b_1u(t-1) + \dots + b_mu(t-m) \quad (3.16)$$

La ecuación (3.16) se presenta en tiempo discreto, debido a que los datos tomados son muestreados. Una manera de obtener el valor presente de la salida es a partir de los valores pasados del sistema, como se muestra en la ecuación (3.17).

$$y(t) = -a_1y(t-1) - \dots - a_ny(t-n) + b_1u(t-1) + \dots + b_mu(t-m) \quad (3.17)$$

La ecuación (3.18) muestra en forma compacta la ecuación (3.17).

$$y(t) = \varphi^T(t) \theta \quad (3.18)$$

donde:

$$\theta = [a_1 \dots a_n \ b_1 \dots b_m]^T \quad (3.19)$$

Al conocer solo ciertas entradas y salidas, agrupadas en Z^N como se muestra en la ecuación (3.20), es necesario encontrar el valor de los parámetros contenidos en θ .

$$Z^N = \{u(1), y(1), \dots, u(N), y(N)\} \quad \text{para } 1 \leq t \leq N \quad (3.20)$$

Para hallar θ , se ajustan los valores de la ecuación (3.18) con los de la ecuación (3.16) y de esta manera se obtiene la ecuación (3.21).

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y(t) - y^*(t | \theta))^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y(t) - \varphi^T(t) \theta)^2 \quad (3.21)$$

Se define $\widehat{\theta}_N$ en la ecuación (3.22) como:

$$\widehat{\theta}_N = \arg \left\{ \min_{\theta} \left[V_N(\theta, Z^N) \right] \right\} \quad (3.22)$$

Siendo θ los valores que minimizan la función V_N . Teniendo en cuenta que V_N es cuadrática con respecto a θ , el mínimo de esta función se determina al derivar e igualar a cero, como se indica en la ecuación (3.23).

$$0 = \frac{d}{d\theta} V_N(\theta, Z^N) = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)(y(t) - \varphi^T(t) \theta) \quad (3.23)$$

y se obtiene la ecuación (3.24).

$$\widehat{\theta}_N = \left[\sum_{t=1}^N \varphi(t) \varphi^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \varphi(t) y(t) \quad (3.24)$$

Una vez se define $\varphi(t)$, la solución se determina fácilmente mediante métodos de solución multivariable.

3.3.2. Estimación del modelo en espacio de estados mediante la técnica de mínimos cuadrados

Un sistema lineal se puede representar por medio del sistema mostrado en la ecuación (3.25).

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + v(t) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Donde $w(t)$ y $v(t)$ son señales de ruido¹ y A, B, C y D las matrices características del sistema.

Si se quieren estimar valores de las matrices A, B, C y D que logren una buena descripción del comportamiento entrada - salida del sistema, sin tener un conocimiento previo del mismo, se debe tener en cuenta que existe un número infinito de estas matrices.

¹La señal de ruido se define como una señal estocástica con varianza uno y media cero (Ruido Blanco)

Ahora, si se asume que los datos de entrada $u(t)$ y salida $y(t)$ se conocen al igual que el vector de estados $x(t)$, entonces el modelo presentado en la ecuación (3.25) se puede solucionar utilizando una regresión lineal. La ecuación (3.26) representa esta regresión.

$$Y(t) = \begin{bmatrix} x(t+1) \\ y(t) \end{bmatrix}, \Theta = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \Psi(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}, E(t) = \begin{bmatrix} w(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$Y(t) = \Theta\Psi(t) + E(t) \quad (3.27)$$

De esta forma, todos los elementos de Θ pueden ser estimados utilizando el método de mínimos cuadrados. La matriz de covarianza $E(t)$ se estima a partir de la suma de los errores. El objetivo es ahora encontrar el vector de estados $x(t)$.

Este vector de estados se halla utilizando una ToolBox de MATLAB, que emplea la teoría estadística.

Capítulo 4

Representación del modelo de la Máquina Síncrona

4.1. Circuito de la Máquina Síncrona generalizado

Los circuitos de la máquina síncrona varían según el número de devanados de amortiguamiento que se les incluyan. Por cada devanado de amortiguamiento se aumenta el orden de la función de transferencia. Esto dificulta la determinación de la solución, pero brinda mayor exactitud en los resultados [Dandeno u. a., 1981b].

Los parámetros del circuito se representan por medio del vector $\theta \in \mathbb{R}^q$ con dimensión $q = 3n_d + 2n_q + 5$, donde n_d y n_q son el número de circuitos de los devanados de amortiguamiento en el eje d y q respectivamente. Es recomendable que el orden de los circuitos del eje d y q sea igual.

Este modelo supone constante la velocidad del rotor, es por esta característica que el modelo generalizado que se presenta es lineal.

4.1.1. Modelo de variables de estado

Se define el vector corriente como la variable de estado con dimensión $n = n_d + n_q + 3$, las tensiones como el vector de datos de entrada y dimensión $m = 3$. Los datos observables o datos de salida son las corrientes medibles. Son estas corrientes:

- Corrientes del eje directo

- Corrientes del eje en cuadratura.
- La corriente de campo

Entonces, el número de variables medibles es tres y se muestran en las tres primeras posiciones del vector de la ecuación (4.1).

$$i = \begin{bmatrix} i_d & i_f & i_q & i_{D1} & \dots & i_{Dnd} & i_{Q1} & \dots & i_{Qnq} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Ahora el vector de entradas se define por la ecuación (4.2).

$$v = \begin{bmatrix} v_d & v_f & 0 & \dots & 0 & v_q & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

El sistema se muestra en la ecuación (4.3)

$$\frac{di}{dt} = Ai + Bv \quad y = Ci \quad (4.3)$$

Las matrices A , B y C de la ecuación (4.3) están en función del vector θ . A continuación se definen las matrices X , B , C , R y G .

$$X = \begin{bmatrix} X_d & Z_{nd+2, nq+1} \\ Z_{nd+1, nq+2} & X_q \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$B = \omega_n X^{-1} \quad A = -B(R + \omega_m G) \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Z_{1, n-3} \\ 0 & 1 & 0 & Z_{1, n-3} \\ 0 & Z_{1, n+2} & 1 & Z_{1, n-nd-3} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$R = \text{diag}[r_a, r_f, r_{D1}, \dots, r_{Dnd}, r_a, r_{Q1}, \dots, r_{Qnq}]$$

$$G = \begin{bmatrix} Z_{1, nd+2} & -G_q \\ Z_{nd+1, nd+2} & Z_{nd+1, nq+1} \\ G_d & Z_{1, nq+1} \\ Z_{nq, nd+2} & Z_{nq, nq+1} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Con X_d y X_q definidas en las ecuaciones (4.7) y (4.8), la matriz Z_{ij} esta llena de ceros y tiene dimensión ij .

$$X_d = \begin{bmatrix} x_{dd} & x_{df} & x_{dD1} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{dDnd} \\ x_{fd} & x_{ff} & x_{fD1} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{fDnd} \\ x_{D1d} & x_{D1f} & x_{DD1} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{DD1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{Dnnd} & x_{Dndf} & x_{DndD1} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{DndDnd} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$X_q = \begin{bmatrix} x_{qq} & x_{qQ1} & x_{qQ2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{dQnq} \\ x_{Q1q} & x_{Q1Q1} & x_{Q1Q2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{Q1Qnq} \\ x_{Q2q} & x_{Q2Q1} & x_{Q2Q2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{Q2Qnq} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{Qnqq} & x_{QnqQ1} & x_{QnqQ2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{QnqQnq} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

donde:

$$x_{dd} = x_{md} + x_a = x_d$$

$$x_{ff} = x_f + x_{md} + \sum_{i=1}^{nd} x_{kfi}$$

$$x_{DiDi} = x_{Di} + x_{md} + \sum_{i=1}^{nd} x_{kfi} \quad \text{con } i = 1, \dots, nd$$

$$x_{df} = x_{fd} = x_{md}$$

$$x_{dDi} = x_{Did} = x_{md} \quad \text{con } i = 1, \dots, nd$$

$$x_{fDi} = x_{Dif} = x_{DiDi} - x_{Di} \quad \text{con } i = 1, \dots, nd$$

$$x_{DkDi} = x_{DkDi} = x_{DiDi} - x_{Di} \quad \text{con } k, i = 1, \dots, nd$$

$$x_{qq} = x_{mq} + x_a = x_q$$

$$x_{QiQi} = x_{Qi} + x_{mq} \quad \text{con } i = 1, \dots, nq$$

$$x_{qQi} = x_{Qiq} = x_{mq} \quad \text{con } i = 1, \dots, nq$$

$$x_{QkQi} = x_{QiQk} = x_{mq} \quad \text{con } k, i = 1, \dots, nq$$

Con las matrices G_d y G_q definidas en las ecuaciones (4.9) y (4.10).

$$G_d = \begin{bmatrix} x_{dd} & x_{df} & x_{dD1} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{dDnd} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$G_q = \begin{bmatrix} x_{qq} & x_{qQ1} & x_{qQ2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{qQnq} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Debido a que no es posible obtener todas las señales eléctricas del modelo generalizado, se requiere modificar dicho modelo por uno que solo contemple las señales conocidas. Este desarrollo se presentará en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Metodología para la estimación de parámetros de la máquina sincrónica

5.1. Introducción

Este capítulo describe la metodología implementada, diseñada dentro de un proyecto de investigación de la Universidad Industrial de Santander. Con esta se consigue la estimación de los parámetros del modelo de la máquina presentado en el capítulo anterior, para ello es necesario contar con datos de operación de la máquina en vacío, estado estable y bajo perturbación.

Los algoritmos utilizados en la metodología son el PEM (Predictor Error Method) y el OE (Output Error)¹. Estos métodos realizan estimaciones de modelos lineales MIMO (Multiple Input Multiple Output). Sin embargo, no es recomendable aplicarlos directamente sobre el modelo de la máquina sincrónica, ya que dicho modelo no es lineal.

Al realizarse la estimación de los parámetros directamente, como se presentan en algunos tutoriales [Ljung, 1999], [Linköpings, 2006], 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. Además, en ocasiones tal estimación

¹Los métodos algorítmicos utilizados forman parte de la "ToolBox" de MATLAB de identificación de parámetros [Ljung, 1999]. Existe una toolbox de MATLAB libre realizada en la Universidad de Valladolid [Valladolid, 2006] cuya funciones son utilizadas para la estimación de parámetros a partir de los algoritmos matemáticos desarrollados por MathWorks [The MathWorks, 1994].

directa proporciona valores de parámetros negativos e imaginarios.

A continuación se presenta una descripción del proceso de estimación de parámetros en el eje directo, devanado de campo y devanado de amortiguamiento. En la sección tres se 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.

5.2. 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. Una característica interesante de esta metodología es que realiza un proceso de estimación ajustado a los fenómenos físicos de la máquina. Debido a lo anterior los parámetros estimados son valores aproximados coherentes. En la figura 5.1 y 5.2 se presentan los circuitos equivalentes del eje directo y de cuadratura respectivamente.

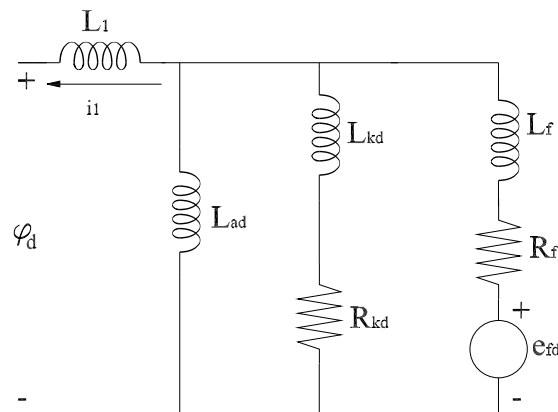


Figura 5.1: Circuito eléctrico que representa el eje directo del modelo de la máquina síncrona.

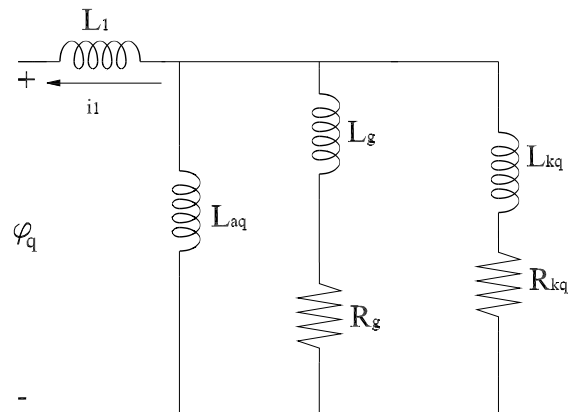


Figura 5.2: Circuito eléctrico que representa el eje en cuadratura del modelo de la máquina síncrona.

5.2.1. 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, Bergen (1986); Kundur (1994). 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 la ecuación (5.1).

$$V_q = \frac{2}{3} \omega_s (aL_{ad}) i_f \quad (5.1)$$

5.2.2. Cálculo de L_d , L_q y a mediante señales de operación de estado estable de la máquina

En las ecuaciones (5.2) y (5.3) se presentan las tensiones del eje d y q respectivamente. Se tiene en cuenta para ambos ejes, las corrientes, los flujos y las variaciones de estos con respecto al tiempo.

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 cero. Por tanto, las ecuaciones (5.2) y (5.3) se convierten en las ecuaciones (5.4) y (5.5).

$$V_d = -R_a i_d - \Psi_q \omega_s - p \Psi_d \quad (5.2)$$

$$V_q = -R_a i_q + \Psi_d \omega_s - p \Psi_q \quad (5.3)$$

donde p es el operador diferencial.

$$V_d = -R_a i_d - (L_q i_q) \omega_s \quad (5.4)$$

$$V_q = -R_a i_q + (L_d i_d + \frac{2}{3} a L_{ad} i_f^*) \omega_s \quad (5.5)$$

Reorganizando la ecuación (5.5) se tiene:

$$L_q = \frac{V_d + R_a i_d}{\omega_s i_q} \quad (5.6)$$

De la misma forma se toma la ecuación (5.6), obteniendo la ecuación (5.7).

$$L_d = \frac{V_q + R_a i_q - \frac{2}{3} \omega_s (a L_{ad}) i_f^*}{\omega_s i_d} \quad (5.7)$$

La relación de transformación entre el estator y el rotor se determina empleando la relación presentada en la ecuación (5.8) .

$$a = \frac{(M_{ad})}{(L_d - L_l)} \quad (5.8)$$

donde $M_{ad} \equiv a L_{ad}$.

5.2.3. Estimación de los flujos magnéticos Ψ_d y Ψ_q

Los flujos magnéticos se determinan mediante la extrapolación lineal, se toman los valores iniciales determinados mediante las ecuaciones (5.9) y (5.10).

$$\Psi_{q(t=0)} = \frac{-1}{\omega_s} (V_d + R_a I_d) |_{t=0} \quad (5.9)$$

$$\Psi_{d(t=0)} = \frac{-1}{\omega_s} (V_q + R_a I_q) |_{t=0} \quad (5.10)$$

Entonces las ecuaciones diferenciales a desarrollar se describen en las ecuaciones (5.11) y (5.12).

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = \omega_s \Psi_q + V_d + R_a i_d \quad (5.11)$$

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = -\omega_s \Psi_d + V_q + R_a i_q \quad (5.12)$$

Las ecuaciones (5.11) y (5.12) se resuelven de forma simultánea. Este sistema bidimensional no puede ser resuelto por medio del método de la regla trapezoidal, debido a que se presenta inestabilidad de las ecuaciones en diferencias, causada por un polo en el círculo unitario, lo que hace que la respuesta del sistema sea oscilatoria.

5.2.4. Estimación de la corriente de amortiguamiento i_{kd}

Una vez se determina el flujo magnético en el eje directo, la señal de corriente de amortiguamiento en este eje se halla mediante la ecuación (5.13).

$$i_{kd} = \frac{\Psi_d - L_d i_d}{\frac{2}{3} \omega_s (a L_{ad})} i_f^* \quad (5.13)$$

Donde i_f^* es la corriente de campo medida en terminales del devanado de campo.

5.2.5. Cálculo de los parámetros L_f y R_f

A partir de la ecuación (5.14) y los datos de tensión y corriente de campo referidos al lado del rotor se define la ecuación en diferencias presentada en la ecuación (5.15). La ecuación en diferencias se desarrolla a partir de la definición de la regla trapezoidal. 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.

$$V_f = -R_f i_f - L_{ad} i'_d - \frac{2}{3} a L_f i'_f - \frac{2}{3} a L_{ad} i'_{kd} \quad (5.14)$$

$$\left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} + \frac{R_f}{2} \right\} i_f(t) - \left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} - \frac{R_f}{2} \right\} i_f(t - \Delta t) = S_{ent}(t) \quad (5.15)$$

con: $S_{ent} = V_f + L_{ad} i'_d + \frac{2}{3} a L_{ad} i'_{kd}$ y definiendo las constantes en la ecuación (5.16).

$$a_1 = \left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} + \frac{R_f}{2} \right\} \quad y \quad a_2 = \left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} - \frac{R_f}{2} \right\} \quad (5.16)$$

Los valores de L_{kd} y R_{kd} se determinan mediante las ecuaciones (5.17) y (5.18):

$$L_f = 3 \frac{a_1 + a_2}{4a} \Delta t \quad (5.17)$$

$$R_f = a_1 - a_2 \quad (5.18)$$

5.2.6. Cálculo de los parámetros L_{kd} y R_{kd}

A partir de la ecuación (5.19) se determina la ecuación en diferencia descrita en (5.20). Mediante el método PEM se determinan las constantes L_{kd} y R_{kd} .

$$V_{kd} = 0 = -R_{kd} i_d - L_{ad} i'_d - \frac{2}{3} a L_f i'_f - \frac{2}{3} a L_{ad} i'_{kd} \quad (5.19)$$

$$\left\{ \frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} + \frac{R_{kd}}{2} \right\} i_{kd}(t) - \left\{ \frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} - \frac{R_{kd}}{2} \right\} i_{kd}(t - \Delta t) = S_{ent}(t) \quad (5.20)$$

Con: $S_{ent} = L_{ad}i'_d + \frac{2}{3}aL_{ad}i'_f$ y definiendo las constantes en la ecuación(5.21):

$$a_1 = \left\{ \frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} + \frac{R_{kd}}{2} \right\} \quad y \quad a_2 = \left\{ \frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} - \frac{R_{kd}}{2} \right\} \quad (5.21)$$

Los valores de L_{kd} y R_{kd} se determinan mediante las ecuaciones (5.22) y (5.23):

$$L_{kd} = 3\frac{a_1 + a_2}{4a}\Delta t \quad (5.22)$$

$$R_{kd} = a_1 - a_2 \quad (5.23)$$

5.3. Cálculo de los parámetros en el eje de cuadratura

Debido a que no se cuentan con las corrientes de los devanados de amortiguamiento es necesario implementar un proceso distinto al anterior para estimar los parámetros del eje en cuadratura.

5.3.1. Cálculo de la inductancia L_{aq}

El valor de la inductancia mutua se determina mediante la ecuación (5.24) y el valor de L_q .

$$L_{aq} = L_q - L_l \quad (5.24)$$

5.3.2. Estimación de las corrientes I_{kq} e 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 reorganiza la ecuación (5.25) para de este modo obtener la ecuación (5.26).

$$\Psi_q = L_q i_q + \frac{2}{3}aL_{ad}(i_g + i_{kq}) \quad (5.25)$$

$$i_{sum} = \frac{L_d i_d - \Psi_d}{\frac{2}{3} a L_{ad}} \quad (5.26)$$

5.3.3. 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 (5.27).

$$V_{aq} = -L_{aq} i'_q - \frac{2}{3} a L_{ad} (i_{sum}) \quad (5.27)$$

5.3.4. 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 la ecuación (5.28), que está compuesta por cinco términos. Para determinarlos, se utiliza el método OE en el dominio de la frecuencia y 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.

$$\frac{I_{sum}(s)}{V_{aq}(s)} = \frac{(L_g + L_{kq})s + (R_g + R_{kq})}{(L_g L_{kq})s^2 + (R_g L_{kq} + R_{kq} L_g)s + R_g R_{kq}} \quad (5.28)$$

El proceso de estimación inicia tomando las constantes $A = (L_g + L_{kq})$, $B = (R_g + R_{kq})$, $C = (L_g L_{kq})$ y $D = (R_g R_{kq})$, a partir de las cuales se obtienen infinitas soluciones, y así se determina un grupo de soluciones congruentes². Se toman las constantes de la función de transferencia y se determina la respuesta total del sistema a una entrada. La respuesta se almacena como la señal de corriente calculada I_{cal} . Luego se toma cada grupo de parámetros y se determina la corriente de cada ramal RL , después se suman las dos corrientes y el resultado se compara con la corrientes I_{cal} .

²Se definen como soluciones congruentes a las estimaciones de parámetros reales, positivos y cantidades físicas factibles (mH, Ohms, etc.).

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

Capítulo 6

Implementación de la metodología propuesta

6.1. Introducción

En este capítulo se presentan los criterios de selección del modelo de espacio de estados de la máquina, el método de estimación PEM, y la utilización de MATLAB como herramienta base para el desarrollo e implementación de la metodología. El objetivo es estimar de forma eficiente los parámetros de la máquina sincrónica bajo condiciones de carga. También se describen detalladamente cada una de las funciones utilizadas en la metodología, y las funciones utilizadas de la interfaz gráfica de usuario.

6.2. Criterios de selección

6.2.1. Modelo

El modelo no lineal de la máquina se representa de forma matricial, acercándose a la representación general de espacio de estados, debido a que permite conocer el comportamiento dinámico de esta, y obtener las características necesarias para los estudios de estabilidad. También es flexible en cuanto al orden de exactitud.

6.2.2. Método de estimación

La selección del método PEM se debe a que:

- Estima diversos modelos ARX, ARMAX, etc.
- Es un método robusto y eficiente.
- Realiza una estimación de ecuaciones en diferencias de orden n
- Separa el ruido y/o puede lograr estimar parámetros bajo señales con ruido,
- Es una herramienta versátil en cuanto a la representación de los sistemas.

La función de MATLAB "Output Error"(OE) se utilizó para realizar la estimación de los parámetros que componen la ecuación que describe el comportamiento del devanado de amortiguamiento del eje de cuadratura, debido a que esta estimación se realiza en el dominio de la frecuencia¹.

6.2.3. Herramienta matemática

Debido a que la solución de los sistemas que modelan la máquina sincrónica son complejos, con múltiples entradas y múltiples salidas, el manejo de MATLAB es idóneo para resolver estos problemas. También porque cuenta en la actualidad con un desarrollador de interfaces gráficas, para que el usuario tenga una interacción amena con la aplicación. Y mas importante aun, permite una interacción efectiva con ATP, esto es valioso debido a que es necesario realizar simulaciones de la máquina en estado transitorio, para la realización de las pruebas de la herramienta con ATP.

6.3. Funciones

¹Esta función permite realizar estimaciones a sistemas SISO (Single Input Single Output) en el dominio del tiempo y de frecuencia.

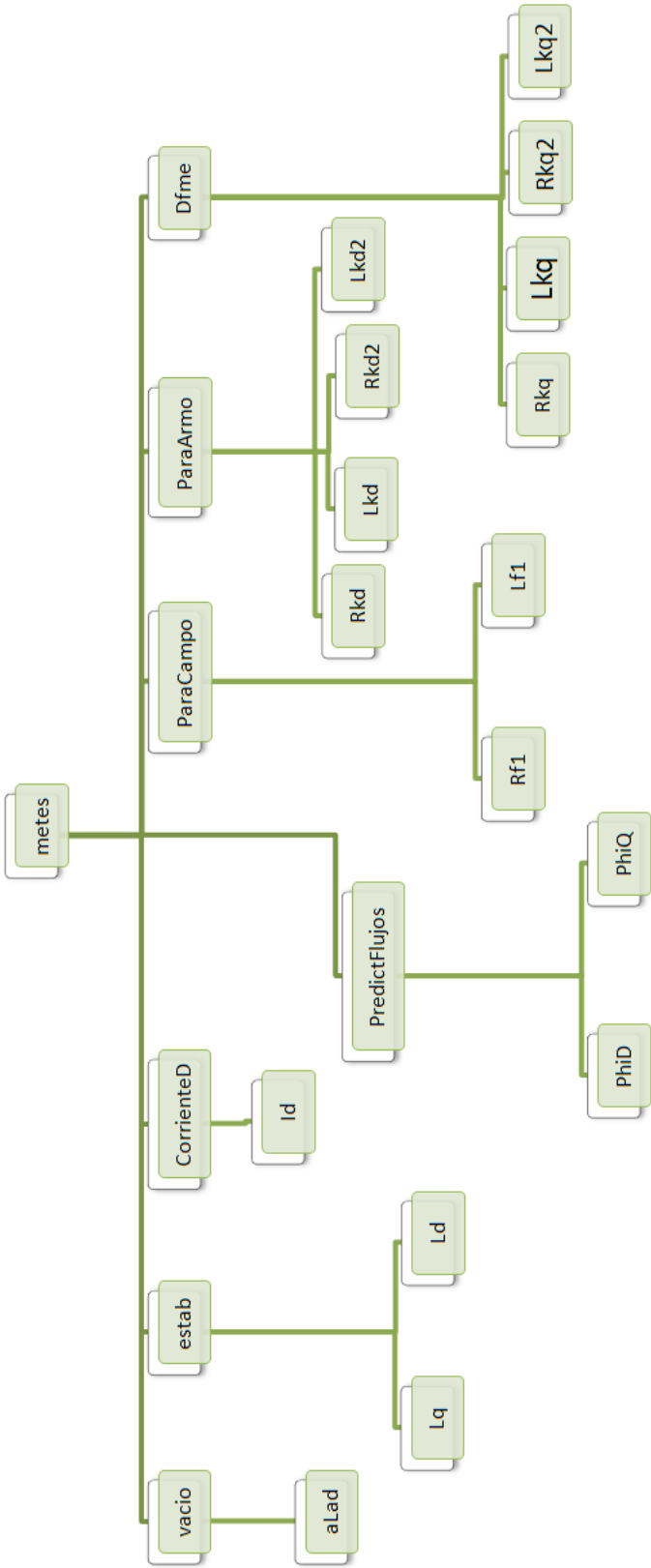


Figura 6.1: Esquema general de distribución y relación de las funciones.

Esta sección muestra de forma detallada las funciones utilizadas que plasman de forma automática la metodología propuesta.

La forma general de describir las entradas y salidas de las funciones es la siguiente:

[Salidas]=Función[Entradas]

Debido a que es el formato que maneja el lenguaje de programación de MATLAB.

6.3.1. Función *pem*

Esta es una función que pertenece a la "ToolBox" *Ident* de MATLAB, y es quién realiza la estimación de parámetros de modelos generales.

Sintaxis: [parámetros] = pem(señales,orden)

señales siempre es un objeto *iddata* que contiene las señales de entradas y salidas del sistema estudiado. Esta función soporta objetos *iddata* en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

Los objetos *iddata* se obtienen de la siguiente forma:

señales=iddata[Y, U, dt]

dónde Y es el vector de salidas, U es el vector de entradas y dt es el tiempo de muestreo de las señales. En este caso *iddata* es un objeto en el dominio del tiempo.

Ahora, la estimación del vector *parámetros* estará determinado no solo por la estimación sino por el vector *orden* que es definido por el usuario². De acuerdo al modelo mostrado en la ecuación (6.1).

$$\begin{aligned}x(t + Ts) &= Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \\y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t)\end{aligned}\tag{6.1}$$

Entonces *orden* determinará los parámetros a estimar de la siguiente forma:

Si se quieren estimar los parámetros A B y D $orden = [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$, queda entonces claro que *orden* siempre es vector [1x6], con unos en los parámetros que se quieran estimar y ceros en los que no se quieran estimar.

²En este caso, el usuario es el programador de la herramienta, y este orden se determina de acuerdo a los requerimientos de la metodología aquí implementada.

6.3.2. Función *oe*

Esta función pertenece a la "ToolBox" *Ident* de MATLAB, que realiza la estimación de parámetros del modelo OE .

Sintaxis: $[parámetros] = oe(señalesF,orden,'foc',[a b])$

señales siempre es un objeto *iddata* que contiene las señales de entradas y salidas del sistema estudiado. Esta función soporta objetos *iddata* en el dominio del tiempo y de la frecuencia. La palabra 'foc' es una propiedad de *oe*, que se utiliza para indicar el ancho de banda del objeto *señalesF*.

Los límites superiores e inferiores de 'foc' son a y b respectivamente.

Los objetos *iddata* se obtienen de la siguiente forma:

Sintaxis: $señales=iddata[Y,U,dt]$

dónde Y es el vector de salidas, U es el vector de entradas y dt es el tiempo de muestreo de las señales. En este caso *iddata* es un objeto en el dominio del tiempo. Para la metodología implementada, se realizan estimaciones en el dominio de la frecuencia, es por esto que se hace necesario un paso mas para la estimación en comparación con la función descrita en la sección 6.3.1,

Sintaxis: $señalesF=fft(señales)$

Ahora se determina el orden de acuerdo al modelo OE:

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + e(t) \quad (6.2)$$

donde

$$nb : B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1}$$

$$nf F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-nf+1}$$

Entonces *nb* y *nf* determinan el orden de los polinomios *B* y *F* respectivamente. De esta forma $orden = [nb \ nf]$

6.3.3. Función *metest*

En esta función se agrupan todas las demás funciones de la metodología, también determina el orden de la ejecución de estas realizando los pasos intermedios necesarios para poder entregar las entradas correspondientes a las demás funciones. Las entradas se describen en la tabla 6.1 y las salidas en la tabla 6.2

Sintaxis: P=metest(Entradas)

La función *metest* contiene las siguientes funciones: *vacio*, *estab*, *predicflujos*, *corriente*, *paracampo*, *paraamor*, *corrsum*, *dfme*. Además realiza operaciones básicas para adecuar los datos obtenidos de las funciones y estos sirvan como entradas a otras funciones. Es también la que realiza la comunicación directa con la interfaz gráfica, siendo los parámetros P la entrada a las funciones de la interfaz, para realizar las simulaciones y análisis de los datos.

Cuadro 6.1: Descripción del vector de señales medidas Entradas

Nombre [tipo de dato]	Descripción
Entradas[array]	
Entradas(1)	V_q
Entradas(2)	V_d
Entradas(3)	V_f
Entradas(4)	I_d
Entradas(5)	I_q
Entradas(6)	I_f
Entradas(7)	w_s
Entradas(8)	t
Entradas(9)	V_{qes}
Entradas(10)	V_{des}
Entradas(11)	I_{des}
Entradas(12)	I_{qes}
Entradas(13)	I_{fes}
Entradas(14)	w_{ses}
Entradas(15)	V_{q0}
Entradas(16)	I_{f0}
Entradas(17)	w_{s0}
Entradas(18)	Ra
Entradas(19)	Ll
Entradas(20)	$RMVA$
Entradas(21)	R_v
Entradas(22)	$order$

Cuadro 6.2: Descripción del vector de salidas P

Nombre [tipo de dato]	Descripción
P[array]	
P(1)	L_{dpu}
P(2)	L_{qpu}
P(3)	L_{adpu}
P(4)	L_{aqpu}
P(5)	L_{fpu}
P(6)	L_{gpu}
P(7)	L_{kdpu}
P(8)	L_{kqpu}
P(9)	L_{kd2pu}
P(10)	L_{kq2pu}
P(11)	R_{apu}
P(12)	R_{fpu}
P(13)	R_{kdpu}
P(14)	R_{kd2pu}
P(15)	R_{gpu}
P(16)	R_{kqpu}
P(17)	R_{kq2pu}

6.3.4. Función *vacío*

Apartir de los valores de tensión del eje en cuadratura V_{q0} y corriente de campo I_{f0} de la prueba en vacío se determina la inductancia mutua entre el eje directo y el debanado de campo, aL_{ad} . Con tal valor se inicia la estimación de los parámetros.

Sintaxis: [aLad]=vacío(V_{q0} , I_{f0} , ws_0 , dt)

Este parámetro se estima emplendo *pem*

Sintaxis: [parámetros] = pem(señales, orden)

donde *orden* para este caso es [0 1 0 0 0 0]

Esta función es llamada por *metest*.

6.3.5. Función *estab*

Partiendo del hecho que en estado estable las corrientes de amortiguamiento son cero, además, las variaciones de los flujos con respecto del tiempo son despreciables, se determinan las inductancias L_q y L_d a partir de las tensiones en los ejes d y q , frecuencia de la máquina, la inductancia aL_d y la resistencia R_a .

La interfaz de usuario se encarga de encontrar los intervalos apropiados que limiten las señales que son las entradas a esta función, ya que como se supuso antes, deben ser señales en estado estable.

Sintaxis: $[L_q, L_d] = \text{estab}(V_q, V_d, I_d, I_q, I_f, \omega_s, aL_d, R_a, dt)$

Estos parámetros se estiman independientemente empleando *pem*

Sintaxis: $[\text{parámetros1}] = \text{pem}(\text{señales1}, \text{orden})$

Sintaxis: $[\text{parámetros2}] = \text{pem}(\text{señales2}, \text{orden})$

donde $\text{orden} = [0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$ para cada estimación, la de L_q y la de L_d .

Aunque orden indica que se calculan tres parámetros, solo se utiliza el segundo que sería B en la ecuación (6.1). Con base en los resultados experimentales, se concluyó que es preferible utilizar $\text{orden} = [0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$. Debido, a la rapidez del proceso y que permite un mejor ajuste del modelo de ruido mezclado con las señales.

6.3.6. Función *predicflujos*

Esta función determina los flujos magnéticos Φ_{iq} y Φ_{id} , a partir de las tensiones y corrientes en cada eje, la resistencia R_a y la velocidad del rotor.

Sintaxis: $[\Phi_{id2}, \Phi_{iq2}] = \text{predicflujos}(R_a, V_d, I_d, V_q, I_q, \omega_s, dt, \Phi_{id}, \Phi_{iq})$

Este sistema bidimensional no puede ser resuelto por medio del método de la regla trapezoidal, debido a los problemas de inestabilidad numérica en su modelo discreto. En el apéndice B se presenta una comparación entre la estimación del método trapezoidal y el método Runge Kutta, junto con las respectivas representaciones matemáticas.

6.3.7. Función *corrienteD*

Esta función determina la corriente de amortiguamiento (ID) del eje d . La corriente se determina a partir de la corriente I_d , la tensión V_d y la corriente de campo I_f . Para determinar esta corriente se utilizó el método trapezoidal.

Sintaxis: $[ID]=\text{corrienteD}(Phid,I_d,I_f,L_d,L_{ad},a)$

Este vector de corriente será utilizado para los cálculos de los parámetros de los devanados de campo y de amortiguamiento.

6.3.8. Función *paracampo*

En esta función se determinan los parámetros de campo de la máquina a partir de los datos de corriente y tensión de campo, corriente de amortiguamiento y corriente total del eje d . También necesita de L_{ad} y a , para los cálculos respectivos. Utiliza una subfunción llamada "*derivar*" para el cálculo de las derivadas de las corrientes del eje directo y del devanado de amortiguamiento. Luego utiliza **pem** para la estimación final de los parámetros de campo.

Sintaxis: $[Rf1,Lf1]=\text{paracampo}(V_f,I_d,I_{kd},I_f,L_{ad},a,dt,t)$

Sintaxis: $[b1]=\text{derivar2}(y,t)$

Donde $b1$ es la derivada de y .

6.3.9. Función *paraamor*

Esta función determina los parámetros del devanado de amortiguamiento del eje d de la máquina. Con los datos de corriente de campo, corriente de amortiguamiento y corriente total del eje d y haciendo operaciones se encuentran valores apropiados para la estimación de los parámetros empleando **pem**.

Sintaxis: $[Rkd1,Lkd1,Rkd2,Lkd2]=\text{paraamor}(I_d,ID1,I_f,L_{ad},a,dt,t,ord)$

Sintaxis: $[parámetros] = pem(señales,orden)$

donde *orden* para este caso es $[1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0]$

Aunque se utilizó un modelo de segundo orden para el diseño de la metodología, sería posible utilizar un modelo de tercer orden de la máquina sincrónica.

6.3.10. Función *corrsum*

Esta función determina la suma de la corriente de los devanados de amortiguamiento del eje q , I_g e I_Q . Para determinar esta corriente se utilizó el método trapezoidal. Esta función dentro de su proceso utiliza la subfunción *derivar2* para el cálculo de las derivadas de las corrientes

Sintaxis: $[I_{sum}, V_{aq}] = \text{corrsum}(\Phi_{iq}, I_q, L_q, L_{aq}, dt, a)$

Sintaxis: $[b1] = \text{derivar2}(y, t)$

Esta prepara los datos de entrada a la función *dfme*.

6.3.11. Función *dfme*

Esta función determina los parámetros de los devanados de amortiguamiento del eje q , utiliza como datos de entrada $S_{sal} = I_g + I_Q$ y $S_{ent} = V_Q$, esta estimación se realiza en frecuencia. Esta función es iterativa y evalúa en cada ciclo una posible solución, lo que la hace una función lenta. La respuesta son los parámetros de amortiguamiento del sistema.

Mediante la función de transferencia obtenida con el método *oe*, se determina la respuesta a una señal de entrada de tensión V_Q . Tal resultado se compara con las señales obtenidas aplicando la misma entrada de tensión a cada grupo de parámetros estimados, como se muestra en la metodología. Esta comparación se realiza hallando la integral del error, y se escogen los parámetros reales y positivos que permitan el menor error.

Sintaxis: $[R_{kqf}, R_{gf}, L_{kqf}, L_{gf}, R_{kqf2}, L_{kqf2}] = \text{dfme}(S_{sal}, S_{ent}, dt, \text{ord}, a, L_{aq})$

Sintaxis: $[parámetros] = \text{oe}(señalesF, \text{orden}, 'foc', [a \ b])$

donde $\text{orden} = [2 \ 2]$, $a = 0$ y $b = 5000$

6.3.12. Función *pu*

Con esta función y tomando como valores bases los ingresados en la ventana principal de la herramienta se encuentran los valores por unidad de cada uno de los parámetros.

6.3.13. Función *derivar*

Esta función permite hallar la derivada de un vector, con la ventaja de filtrar ruido de alta frecuencia.

6.4. Interfaz

En términos generales, una interfaz es el punto, el área, o la superficie a lo largo de la cual dos cosas de naturaleza distinta convergen. Por extensión, se denomina interfaz a cualquier medio que permita la interconexión de dos procesos diferenciados con un único propósito común.³

6.4.1. Justificación

Esta metodología se complementa con una interfaz gráfica de usuario. Por las múltiples ventajas que la utilización de estas presenta, a saber:

- Flujo de información entre varias aplicaciones de la herramienta y el usuario. Se entiende la Interfaz como un puente de comunicación entre el usuario y el sistema (o usuario- diseñador) fácil de cruzar, debido a la baja complejidad del idioma en que se interactúa (gráficamente).
- Por las ventajas de tiempo, y confiabilidad que esta le brinda al usuario.
- Además esta forma de interacción Software-Usuario es la más amena e intuitiva, por lo que el entrenamiento para el manejo de la herramienta deja de ser un problema y facilita la interacción a casi cualquier persona. Esta interfaz se pensó para tener la menor cantidad de errores en la entrada de los datos, y la mayor cantidad de ayudas y guías visuales.

6.4.2. Descripción

La presente interfaz tiene como entradas:

³Tomado de wikipedia-interfaz

- Escritas
 - Ra
 - Ll
 - RMVA
 - RV
- Seleccionadas
 - Orden del modelo
 - Dirección o ubicación de los archivos bases
- Archivos de trabajo

y las salidas presentadas al usuario:

- Parámetros
- Gráficos comparativos

En la figura 6.4.2 se muestra el ciclo de trabajo de la Herramienta acoplando las funciones matemáticas con la interfaz de usuario.

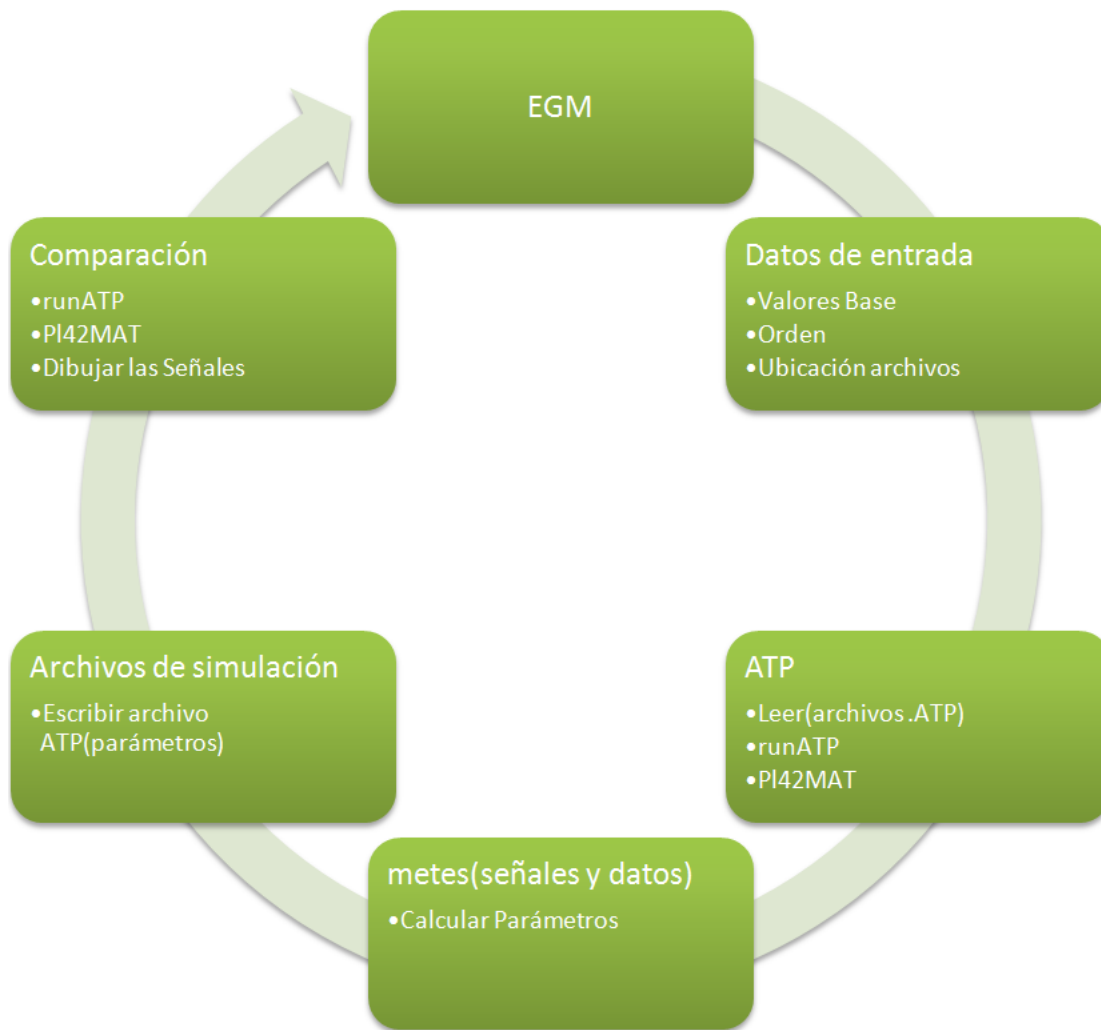


Figura 6.2: Ciclo de desarrollo de la herramienta.

6.4.3. Funciones y programas

Para el desarrollo de esta interfaz, se utilizó el GUIDE *graphical user interfaces* de MATLAB. En la figura 6.2 se muestra el ciclo de trabajo de la herramienta, y la figura 6.3 muestra las funciones gráficas implementadas y sus relaciones para obtener los parámetros.

Funciones gráficas o ventanas

- EGM: ventana principal de la aplicación, en donde se introducen los parámetros bases para la ejecución, también es la ventana desde donde se llaman las demás funciones gráficas.
- Buscar: esta ventana permite buscar y escoger los archivos de trabajo.
- Ejecutar: Una vez seleccionados los archivos con la opción anterior, se ejecutan los programas y secuencias necesarias para la obtención de las señales de simulación. Esta última adquisición permite una selección adecuada de intervalos de operación, así como un filtrado oportuno del ruido de las señales. De manera automática, la herramienta evoca la función principal de la metodología “metes”. Su correcta ejecución depende de la apropiada definición de cada uno de los parámetros definidos por el usuario.
- Resultados: utiliza como entrada los parámetros, permite la lectura de un archivo .ATP para la comparación con los datos calculados, guardar los parámetros de dos formas, la primera almacenando una copia del archivo .ATP base con los nuevos parámetros, y la segunda es exportando los parámetros y errores a un documento con formato excel *.XLS.
- Comparar: carga dos archivos .ATP, para realizar la comparación de sus respectivas señales, como caso particular se puede escoger el archivo .ATP base y compararlo con el archivo .ATP con los parámetros obtenidos por la herramienta, para observar el error y demás características comparativas que el usuario pueda considerar.

Funciones de comandos

- `corregir_res`: esta función corrige los valores dados por la estimación realizada en *metes* para poder escribir de forma correcta el archivo .ATP con los parámetros estimados.
- `kalman-l` `kalman-i`, `kalman-b`: estas funciones son filtros para las señales.

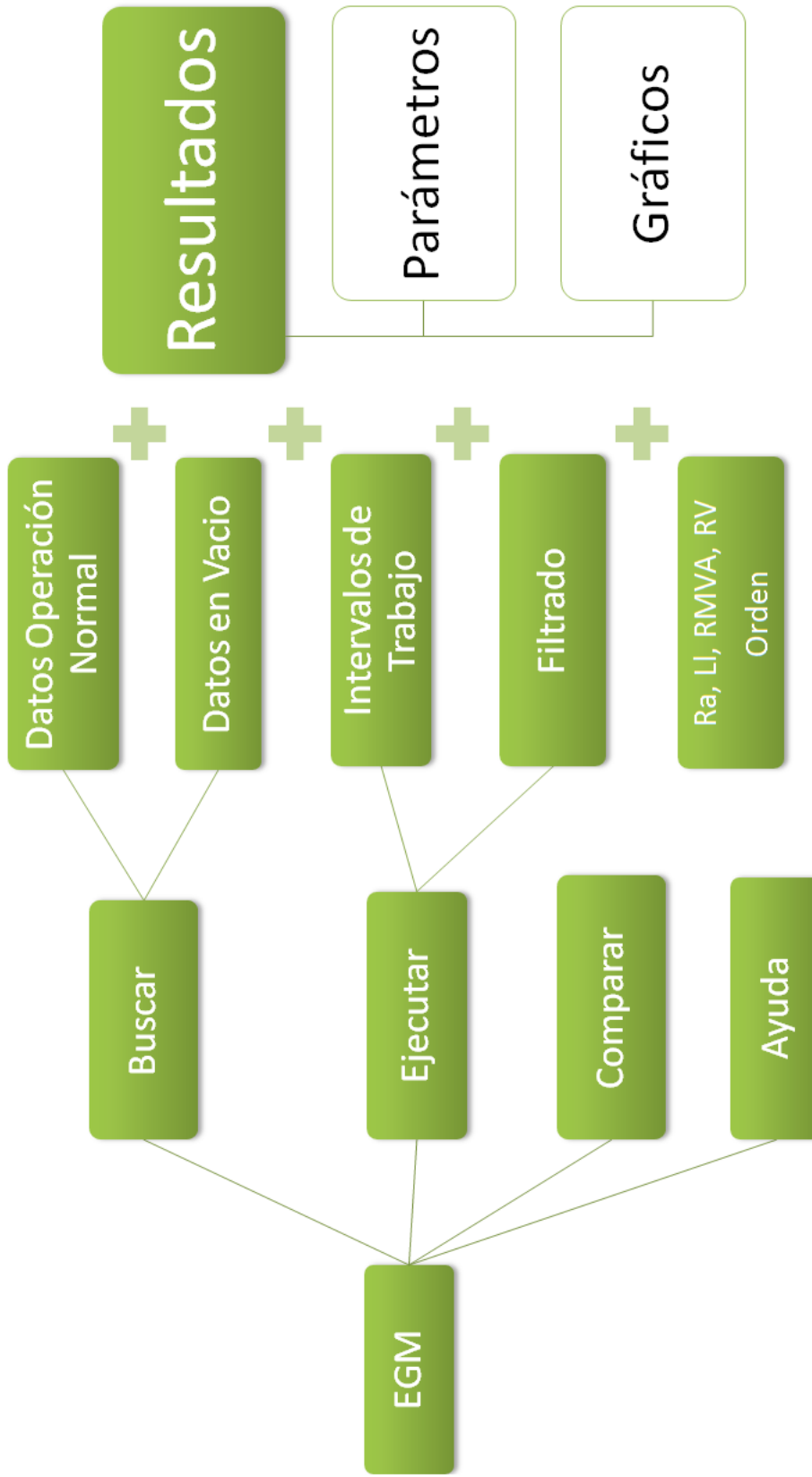


Figura 6.3: Esquema de secuencia de funciones gráficas

- `parámetrosIEEE`: convierte los parámetros en p.u. a parámetros normalizados por la IEEE.
- `l_y_e`: esta función lee y escribe los archivos `.ATP`

Programas externos:

- `runATP`: esta aplicación tiene como entrada un archivo con extensión `*.ATP`, este archivo debe tener un formato específico para que funcione `runATP`, la salida de este programa es un archivo con extensión `*.PL4`, que contiene las señales de simulaciones descritas en el archivo `*.ATP`.
- `pl42MAT`: esta aplicación externa tiene como entrada el archivo `*.PL4`, resultado de ejecutar `runATP`, `pl42MAT`, convierte este archivo a formato `MAT` de `MATLAB`, para poder tener acceso a estas simulaciones con `MATLAB` y por lo tanto con la herramienta desarrollada.

Y muchas otras funciones propias de la programación en `MATLAB`.

Capítulo 7

Pruebas y resultados

7.1. Introducción

En este capítulo se presentan algunas pruebas realizadas para verificar el desempeño de la herramienta implementada. Primero se hace un estudio que tiene en cuenta la caracterización de una máquina con un modelo aproximado a la realidad, obteniendo con esto unos resultados y sus respectivos análisis. Posteriormente se incluye la estimación de parámetros con las respectivas variaciones de carga analizando en cada caso los resultados de la simulación. Después, se estudia la sensibilidad de la herramienta ante las variaciones de los parámetros de entrada Ra y Ll , y se analizan los resultados. El estudio se finaliza con el análisis de sensibilidad a la frecuencia de muestreo de las señales de entrada.

7.2. Estudio de caso tipo

Esta primera prueba muestra el desempeño de la herramienta bajo condiciones cercanas a la realidad de una máquina conectada a un sistema eléctrico de potencia. Se tomó un ejemplo simulado en ATP para el análisis transitorio del sistema. El sistema que se muestra en la figura 7.1, está conformado por una máquina sincrónica con una potencia nominal de 1330 MVA y tensión de trabajo de 24 kV, se conecta a una barra infinita a través de un transformador con una relación de transformación 24/ 240 kV. El transformador se conecta a la barra infinita a través de una línea cor-

ta representada por dos bloques RL serie. Se instala una carga a la barra infinita, la cual se desconecta del sistema al cabo de 0,16s de iniciada la simulación de la barra. La máquina cuenta con un sistema de control automático de campo y de velocidad, incluyendo el modelo de la turbina y el modelo del sistema de excitación.

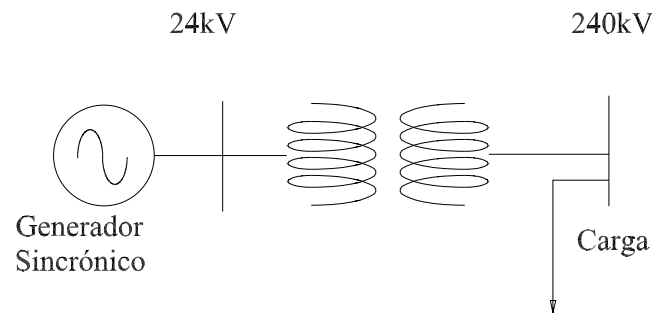


Figura 7.1: Diagrama unifilar del sistema utilizado.

7.2.1. Análisis de los resultados de la estimación

Como se observa en la tabla 7.1 los errores mas significativos se presentan en las resistencias e inductancias de los devanados de amortiguamiento del eje de cuadratura y el devanado de amortiguamiento del eje directo. Para entender tales desviaciones, es necesario recordar que dichos datos fueron estimados a partir de un proceso que incluye extrapolación lineal de los flujos magnético y de la derivación de las señales de corriente. Por lo que se presentan errores de cálculo, errores de aproximación y amplificación de señales de ruido.

Cuadro 7.1: Comparación de parámetros reales y estimados

Nombre	Valor Real (p.u.)	Valor Estimado(p.u.)	Error %
L_d	1,68807	1,68830	0,0136
L_q	1,62352	1,62310	0,0259
L_{ad}	1,44256	1,44280	0,0166
L_{aq}	1,37801	1,37760	0,0298
L_f	1,56809	1,54070	1,7467
L_{kd}	1,59300	1,48650	0,4354
L_g	1,70045	2,07100	21,7913
L_{kq}	1,48928	1,41700	4,8534
R_f	0,00110	0,00073	33,6364
R_{kd}	0,03501	0,03400	2,8849
R_g	0,00424	0,00380	10,3774
R_{kq}	0,15200	0,49650	226,6447

Ahora en las figuras 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 se presentan las comparaciones entre las señales originales utilizadas para realizar la estimación con las señales obtenidas mediante los parámetros estimados. Estas señales se realizaron con el mismo sistema tipo, solo se modificaron los valores de los parámetros de la máquina sincrónica. Los datos de las cargas, el nivel de tensión de la barra infinita y las características del transformador son las mismas. Al comparar las señales en el tiempo se observan características similares, la parte transitoria y subtransitorias tienen el mismo comportamiento, sin embargo, en estado estable existe un desbalance de 30 A que significa un error aproximado de 0.1 % 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 0,4[A] que indica un error de aproximadamente del 50 % y se presenta principalmente en el estado transitorio. En estado estable las señales de corriente de los devanados de amortiguamiento son cero y no existe diferencia.

7.2.2. 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. Este 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 (7.1) se define el índice de error:

$$IE = \frac{1}{(t_2 - t_1) I_{max}} \int abs(e(t)) dt \quad (7.1)$$

En la tabla 7.2 se presentan los índices de error de las señales de esta prueba.

Cuadro 7.2: Índices de error

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

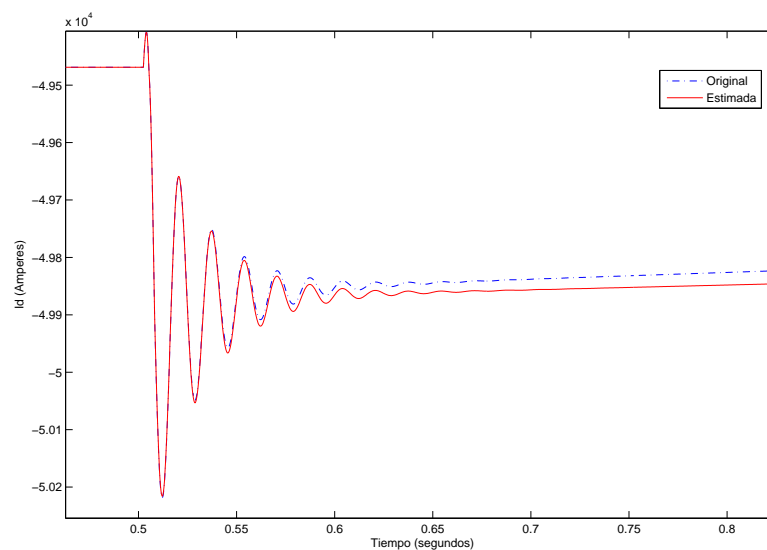
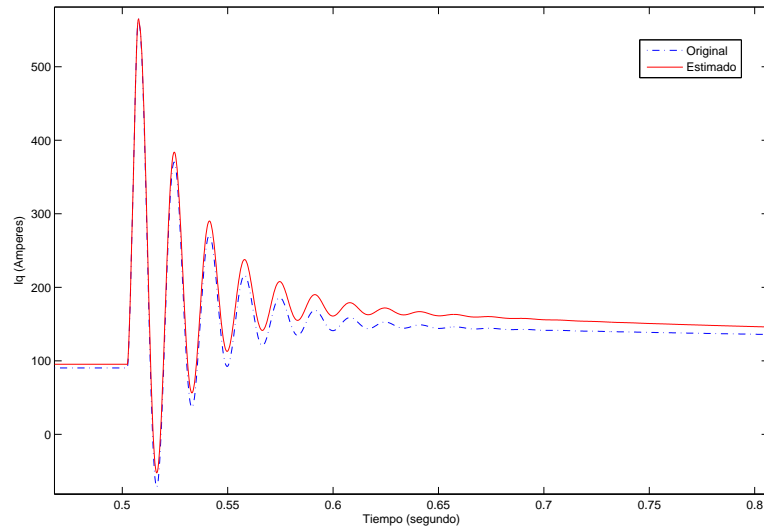
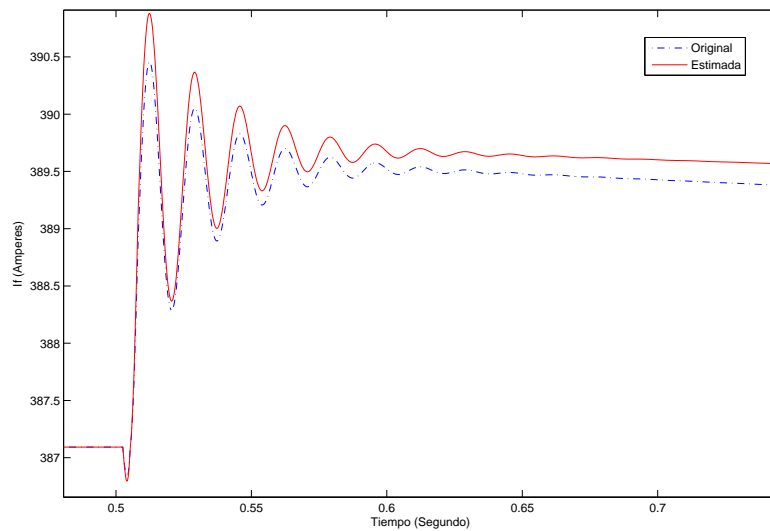
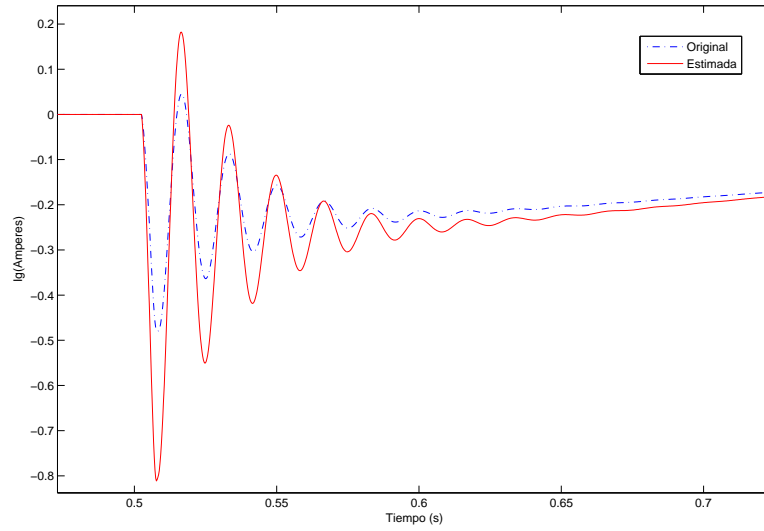
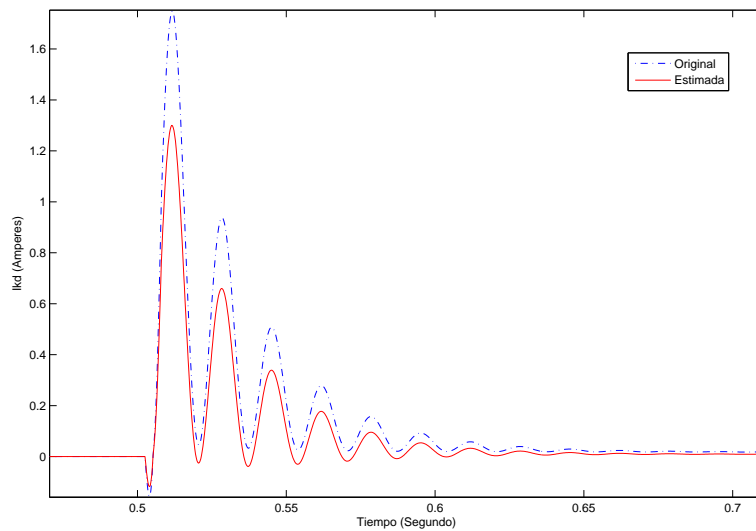


Figura 7.2: Comparación de corrientes de eje directo I_d

Figura 7.3: Comparación de corrientes de eje en cuadratura I_q Figura 7.4: Comparación de corrientes de campo I_f

Figura 7.5: Comparación de corrientes I_g Figura 7.6: Comparación de corrientes de amortiguamiento I_{kd}

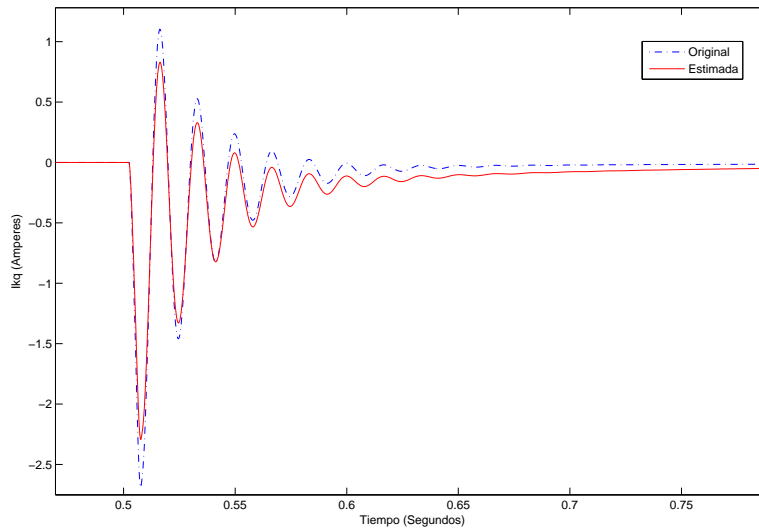


Figura 7.7: Comparación de corrientes de amortiguamiento I_{kq}

7.3. Estudio de la perturbación del sistema

La respuesta natural de la máquina síncrona se puede obtener de distintas formas, como son la variación de carga o una falla del sistema eléctrico. Las oscilaciones que componen la respuesta natural permiten determinar las características transitorias que describen un sistema, como son los parámetros del modelo de segundo orden.

Las variaciones de carga en el sistema eléctrico, producen cambios de tensión y corriente en la máquina síncrona. Ante estas variaciones eléctricas la dinámica electromecánica modifica el punto de operación de la máquina, pero produce además, oscilaciones transitorias de pocos segundos. Estas oscilaciones son la respuesta natural al escalón del sistema. Una falla en el sistema produce una perturbación del mismo tipo que la variación de carga, pero mas fuerte.

La metodología para estimar parámetros presentada en este documento utiliza la variación de carga como recurso para obtener la característica dinámica de la máquina. Existen discusiones acerca del valor de la carga que debe ser desconectado para obtener una buena estimación, incluso se menciona de la insuficiencia de este tipo de perturbaciones para producir oscilaciones lo suficientemente fuertes para lograr una buena estimación; se menciona entonces que es necesario utilizar fallas en el sistema para poder caracterizar de forma adecuada la máquina. Una razón sencilla para sustentar estas discusiones es el caso en el que las perturbaciones se realizan desconectando valores muy pequeños de carga. Para estos casos las oscilaciones no son muy fuertes y los métodos matemáticos de estimación no logran obtener resultados confiables.

Por lo anterior, en este capítulo 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 al sistema. Para este estudio se utiliza un valor mínimo de carga y un valor máximo de carga, debido a que se pretende lograr la convergencia de la metodología y evitar la inestabilidad del sistema.

7.3.1. Descripción de la prueba

Con el fin de llevar una secuencia en las pruebas, se utilizará el sistema descrito en la sección anterior. Como se mencionó, este sistema cuenta con una carga conectada a la barra infinita, la cual al desconectarse del sistema produce las oscilaciones en máquina. En estas pruebas la carga se variará sistemáticamente realizando una simulación para cada nivel de carga que se desconecta del sistema. A partir de cada simulación se estiman todos los parámetros de la máquina. La carga que se desconecta es puramente resistiva, los valores van desde 10MW hasta 100MW, teniendo en cuenta que la máquina es de 555MVA, la carga se varía desde un 2 % hasta un 20 %. Se estima que estas variaciones son significativas en la dinámica de la máquina y que permite realizar el proceso de estimación sin llevar a la inestabilidad el sistema eléctrico.

7.3.2. Análisis de los resultados

En las figuras 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 y 7.13 se presentan los errores relativos porcentuales de los parámetros estimados con respecto a los datos originales de la má-

quina. Estos resultados sirven como prueba para enunciar que solo es necesario que un porcentaje de carga salga del sistema para obtener una perturbación que nos permita estimar los parámetros, teniendo en cuenta un límite máximo de carga para que el sistema no se inestabilice.

Al analizar las figuras se puede observar que no se presenta una disminución considerable de los errores a medida que se aumenta la carga que perturba el sistema. Además, se concluye que las variaciones de los errores en la estimación se presentan en los métodos matemáticos de ajuste de parámetros en el tiempo y en frecuencia. Respecto a lo anterior, no se encontró ningún patrón que pueda relacionar las variaciones de los errores con las señales de entrada para cada estimación.

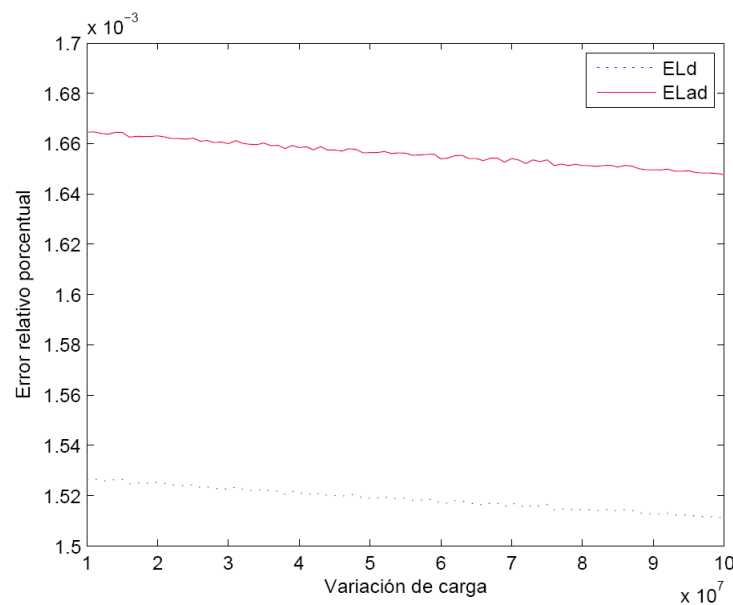


Figura 7.8: Error relativo de Ld y Lad al variar el nivel de perturbación.

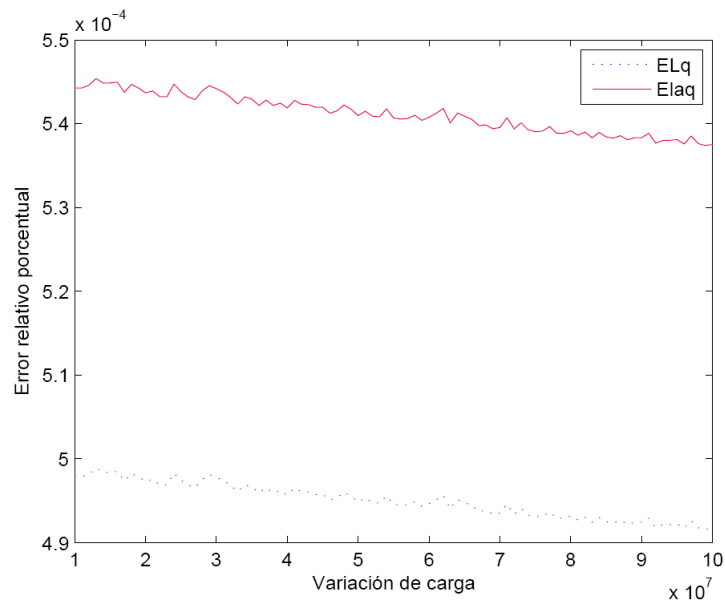


Figura 7.9: Error relativo de L_q y L_{aq} al variar el nivel de perturbación

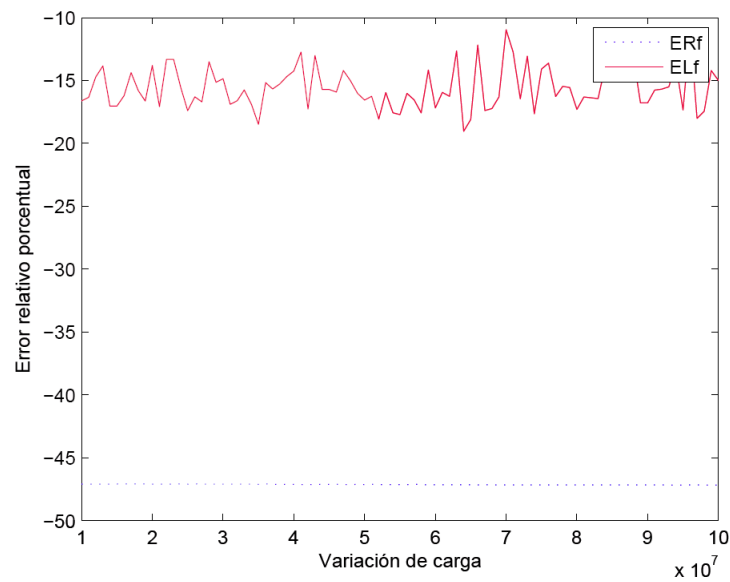


Figura 7.10: Error relativo de R_f y L_f al variar el nivel de perturbación

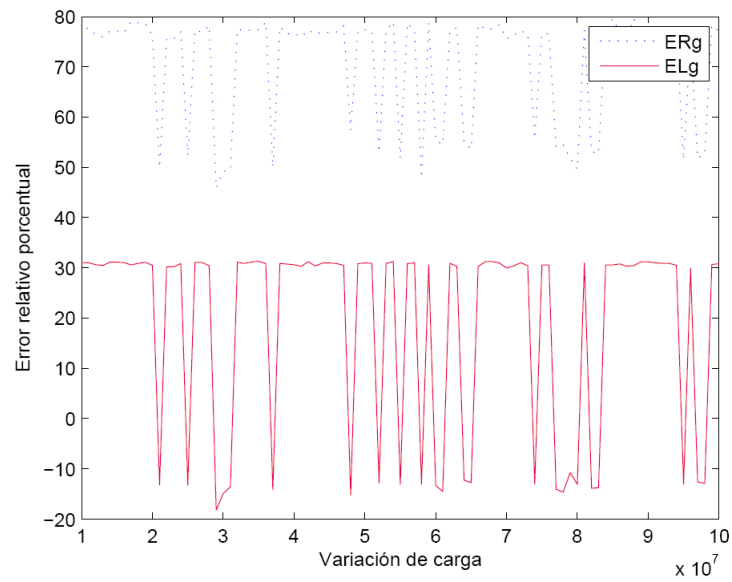


Figura 7.11: Error relativo de R_g y L_g al variar el nivel de perturbación

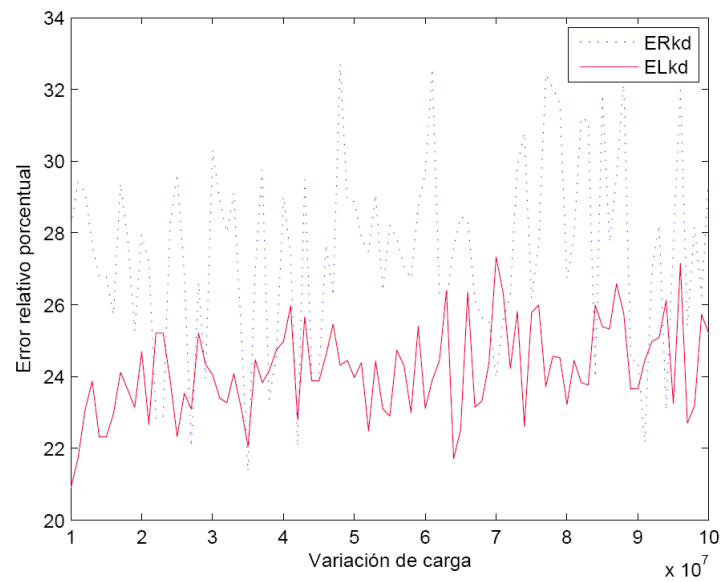


Figura 7.12: Error relativo de R_{kd} y L_{kd} al variar el nivel de perturbación

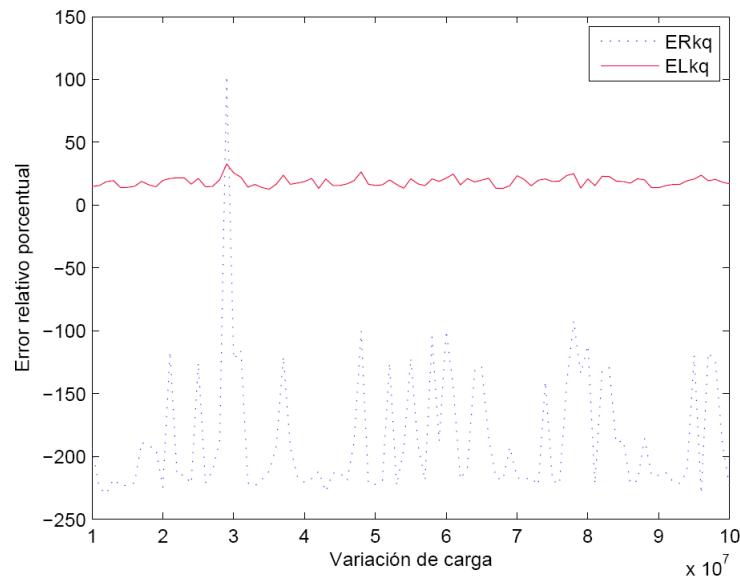


Figura 7.13: Error relativo de Rkq y Lkq al variar el nivel de perturbación

7.4. Análisis de sensibilidad de la metodología respecto a Ra y Ll

La metodología implementada y por tanto la herramienta requieren variables de entrada para estimar los parámetros de la máquina síncrona, así como datos tomados directamente de la operación normal de la máquina. Estos datos son: la potencia, la tensión y los valores de Ra y Ll. Estos últimos datos influyen en el proceso de estimación y son factores importantes en el resultado final. Sin embargo. 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.

Los análisis de sensibilidad permiten determinar las debilidades de las metodologías y modificarlas con el fin de mejorar el proceso y conocer su rango de operación. 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 [de Mello u. Hannett (1981)], [Ljung (1999)], [Linköpings (2006)]. En esta

sección se presenta un análisis de sensibilidad realizado a la metodología implementada respecto a los valores de entrada Ra y Ll.

7.4.1. Análisis matemático de la influencia de Ra y Ll

Para determinar las inductancias de los ejes directo y de cuadratura, L_d y L_q respectivamente, se utilizan las relaciones de estado estable, estas requieren del valor de R_a . Por tanto, la influencia de estos parámetros es directa con respecto al valor de R_a . Por otro lado, mediante la prueba de vacío se determina el producto aL_{ad} . Sin embargo, no es posible determinar los valores de a y L_{ad} por separado 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 realizando una extrapolación lineal del sistema. El valor de R_a dentro de las ecuaciones en diferencias puede influenciar mucho la respuesta final del sistema.

A partir de estas señales de flujo se determinan las corrientes en los devanados de amortiguamiento, las cuales son utilizadas 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. No existe una forma analítica de precisar el grado y la forma de influencia de este dato en los parámetros. Para el caso de L_l , este valor se utiliza para determinar L_d , L_{ad} , L_q y L_{aq} como se había mencionado. Estos datos se utilizan para determinar 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} .

7.4.2. Descripción del proceso de análisis

Para analizar la influencia que los parámetros R_a y L_l tienen sobre el proceso de estimación de la herramienta, se utiliza el sistema descrito en las secciones anteriores. Se simula el sistema, se adquieren las señales de tensión y corriente. El proceso de estimación se realiza variando de forma gradual R_a y L_l . Para cada combinación de valores se estiman los parámetros y se determinan los errores de la estimación realizando dos procesos, el primero es la estimación directa de los errores relativos de los parámetros, y el segundo 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 calculó la integral de la resta entre las corrientes originales y las corrientes obtenidas mediante los parámetros estimados.

Análisis de resultados al variar R_a

En las figuras 7.14 y 7.15 se presentan los errores relativos porcentuales entre los valores de las inductancias reales y los valores estimados variando R_a . En las figuras 7.16 y 7.17 se muestran los errores relativos entre los valores reales de las resistencias y los valores estimados. Las graficas muestran un comportamiento lineal de los parámetros L_d , L_{ad} , L_q , L_{aq} , L_f y L_{kd} al variar R_a , mientras que la variación del error en la estimación de L_g y L_{kq} tiene un comportamiento lineal a trazos al variar R_a . La variación de la resistencia R_{kd} tiene una tendencia lineal, con una pendiente negativa pequeña.

Análisis de resultados al variar L_l

Las figuras 7.18, 7.19, 7.20 y 7.21 muestran los errores que se presentan al variar el valor de L_l . De igual forma que al variar R_a el comportamiento de los errores L_d , L_{ad} , L_q , L_{aq} , L_f y L_{kd} varían de forma lineal con respecto a la variación de L_l , y los errores de L_g y L_{kq} tienen una variación lineal a trazos al variar el 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 de R_{kd} sigue una tendencia lineal, con una pendiente pequeña.

La influencia de R_a y L_l en el caso de R_f es pequeña ya que el valor del error se muestra prácticamente constante. Para el caso del valor de R_g , los resultados muestran todo lo contrario, este parámetro es sensible a las variaciones de estos datos de entrada. La variación de R_{kq} es pequeña pero no es lineal. Las variaciones de estos parámetros no mantiene ninguna simetría entre ellas. Las figuras que muestran las variaciones de R_g y L_g figuras 7.15 y 7.17 para variación de R_a y figuras 7.19 y 7.21 para variación de L_l , presentan una similitud entre estos parámetros. Para el caso de las variaciones de L_l , existe una relación de simetría con respecto a ambos ejes, algo parecido a un giro de 180° . Para el caso de la variación de R_a , la simetría solo ocurre con respecto a la abscisa o eje x de la figura.

Índices de error

Las figuras 7.22 y 7.23 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 7.24 y 7.25 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 de este con respecto al valor de 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 el error aumenta rápidamente de forma lineal. La pendiente del índice de I_d es contraria a la pendiente del índice de I_q .

Para calcular el índice de error se utilizaron variaciones de R_a y L_l desde -10% hasta 10%, obteniendo datos favorables para la mayoría de las estimaciones, pero con otro grupo de estimaciones, no se pudo simular nuevamente en ATP, ya que al utilizar los parámetros estimados para simular, no cumplieron con la tolerancia impuesta por ATP y no se pudo completar la simulación. Se evidencia entonces que 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 elevado. 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 tan grande. 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.

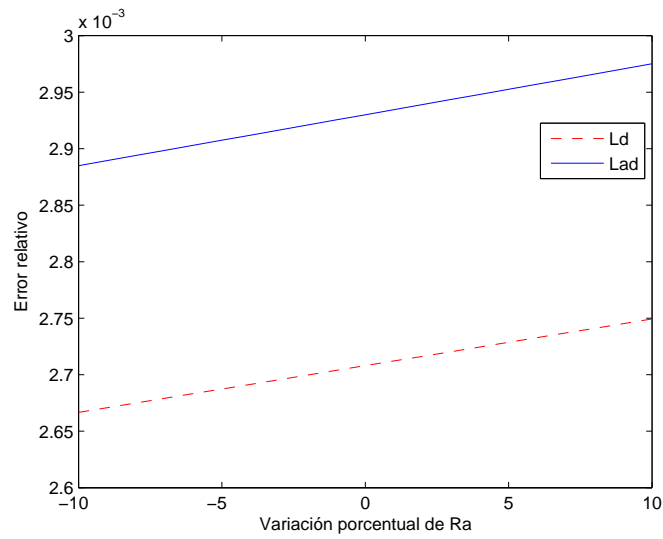


Figura 7.14: Error relativo de L_d y L_{ad} al variar R_a .

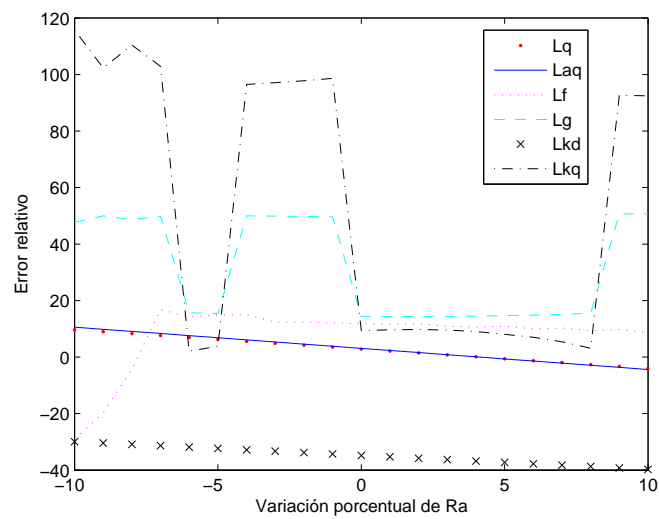
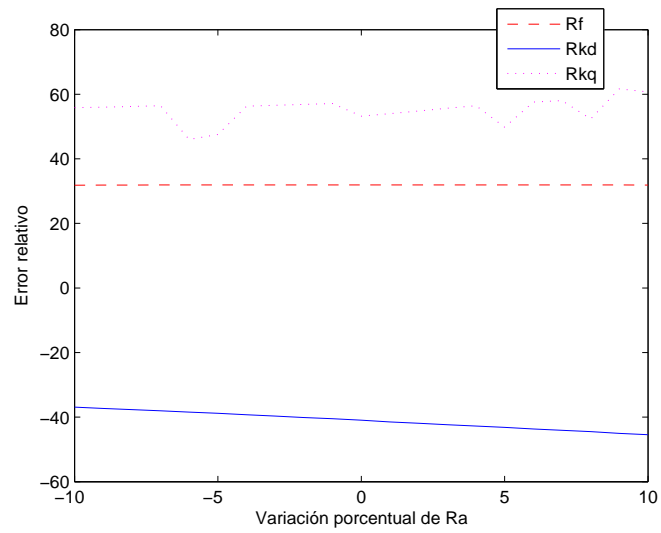
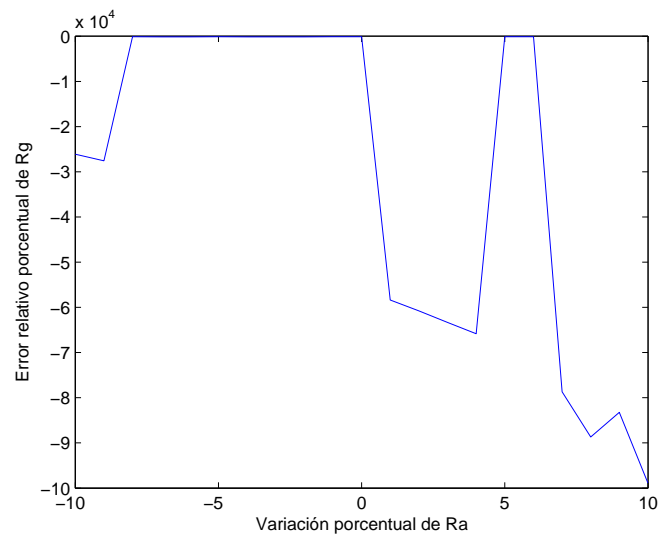


Figura 7.15: Error relativo de L_q , L_{aq} , L_f , L_g , L_{kd} y L_{kq} al variar R_a .

Figura 7.16: Error relativo de R_f , R_{kd} y R_{kq} al variar R_a .Figura 7.17: Error relativo de R_g al variar R_a .

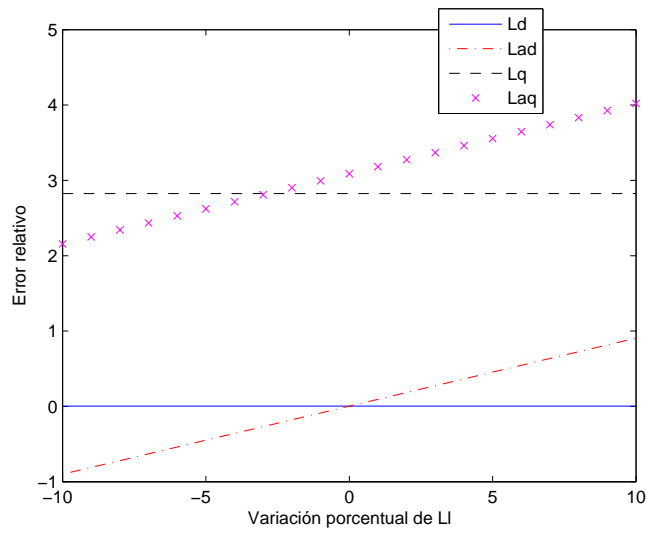


Figura 7.18: Error relativo de L_d , L_{ad} , L_q y L_{aq} al variar Ll.

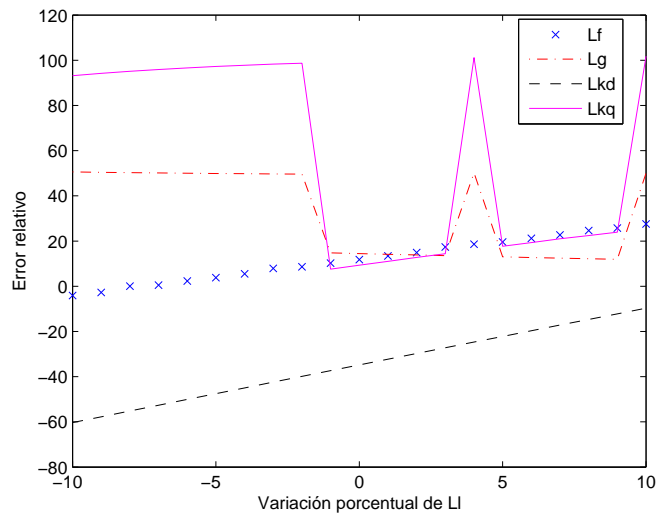


Figura 7.19: Error relativo de L_f , L_g , L_{kd} y L_{kq} al variar Ll.

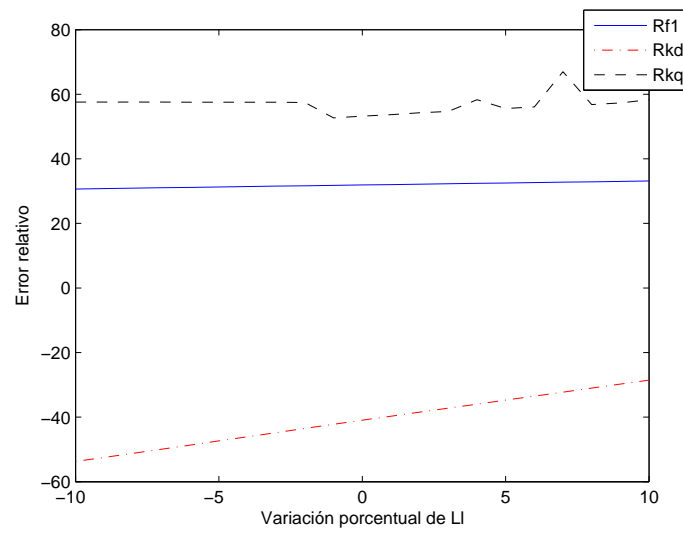


Figura 7.20: Error relativo de Rf , Rkd y Rkq al variar Ll .

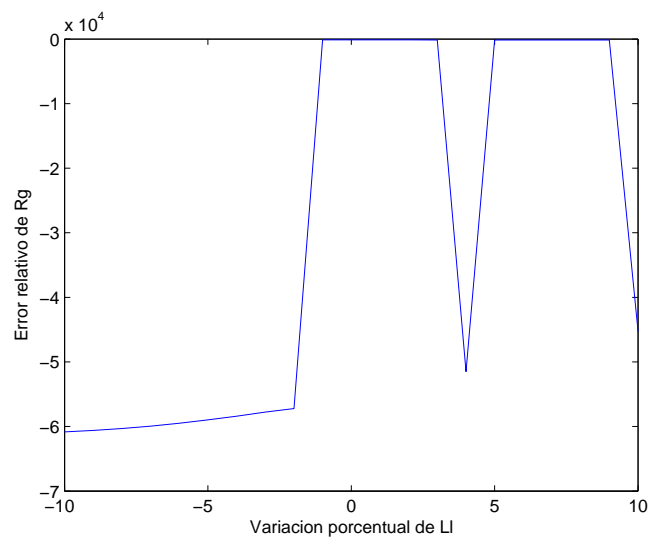
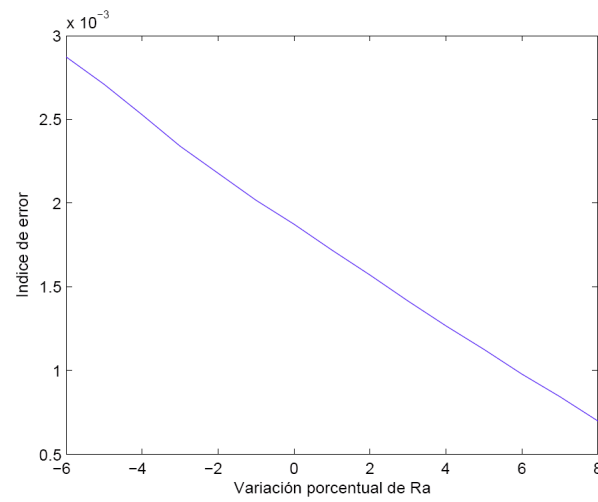
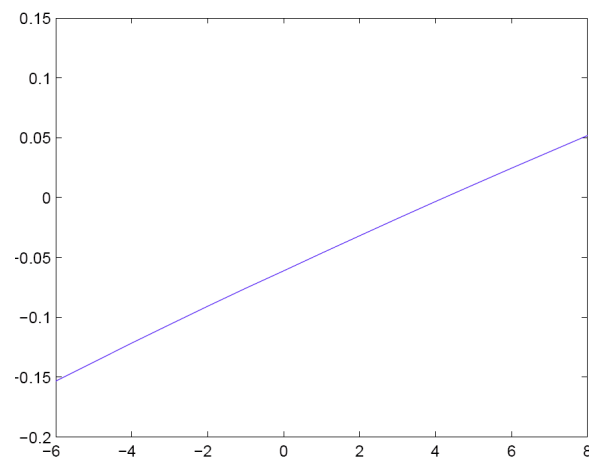
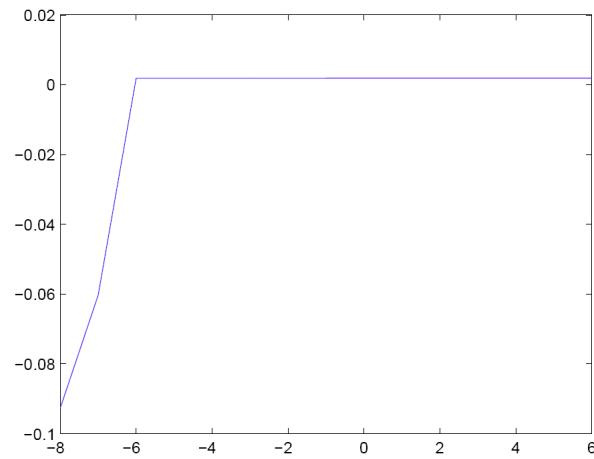
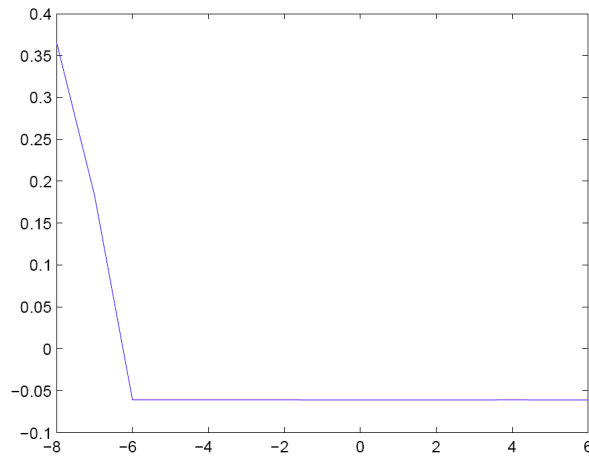


Figura 7.21: Error relativo de Rg al variar Ll .

Figura 7.22: Índice de error de I_d al variar R_a .Figura 7.23: Índice de error de I_q al variar R_a .

Figura 7.24: Índice de error de I_d al variar L_l .Figura 7.25: Índice de error de I_q al variar L_l .

7.5. Análisis de la metodología con respecto a la frecuencia de muestreo de las señales

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.¹ Con base en los resultados de cada simulación se realiza el proceso de estimación, utilizando las mismas condiciones. En las figuras 7.26 a 7.37 se presentan los resultados obtenidos, donde se muestran los parámetros estimados para cada simulación.

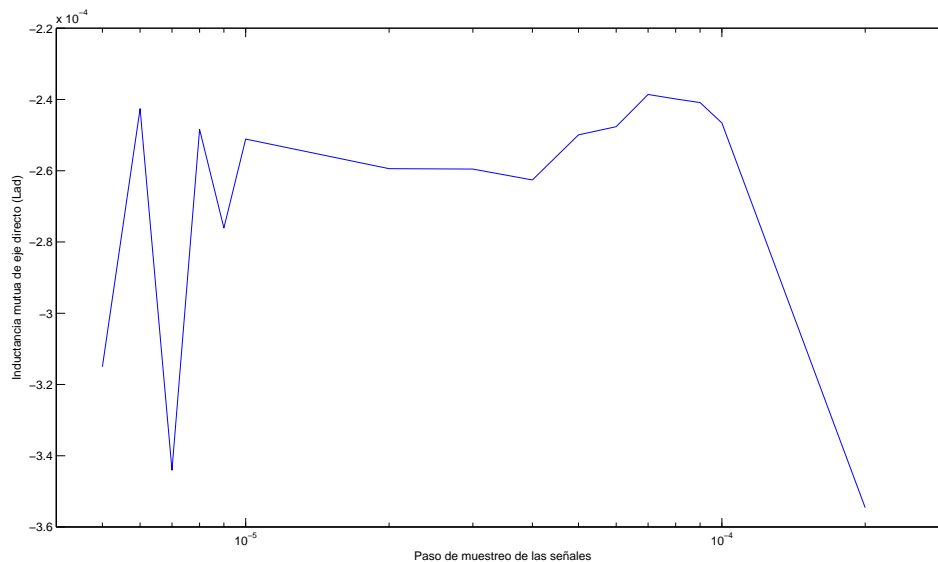


Figura 7.26: Valor de L_{ad} para cada valor de frecuencia de muestreo

¹El sistema tipo es descrito en las secciones anteriores.

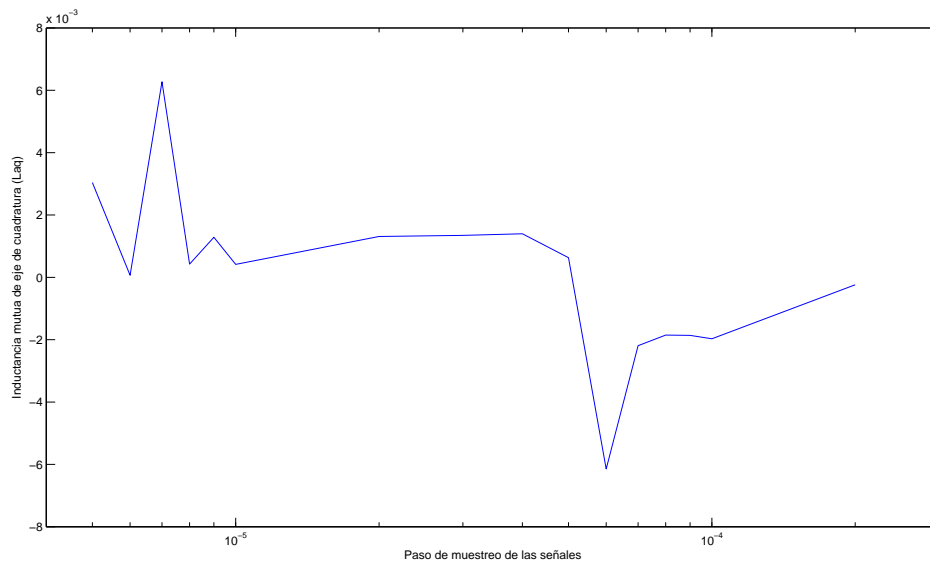


Figura 7.27: Valor de L_{aq} para cada valor de frecuencia de muestreo

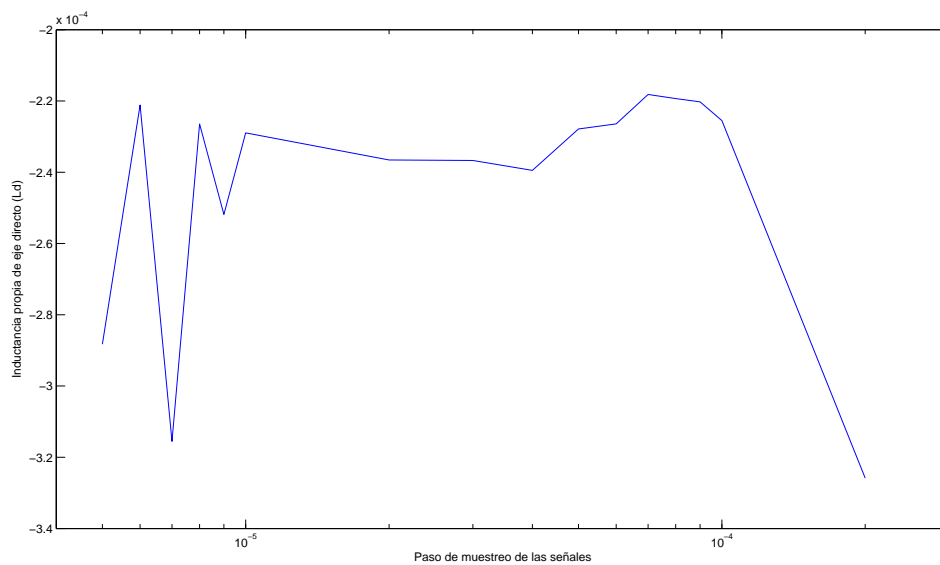


Figura 7.28: Valor de L_d para cada valor de frecuencia de muestreo

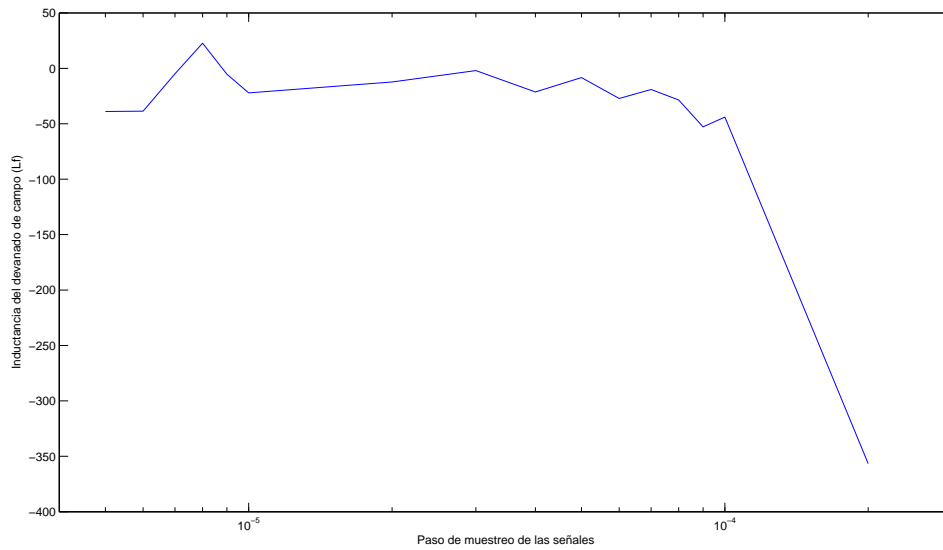


Figura 7.29: Valor de L_f para cada valor de frecuencia de muestreo

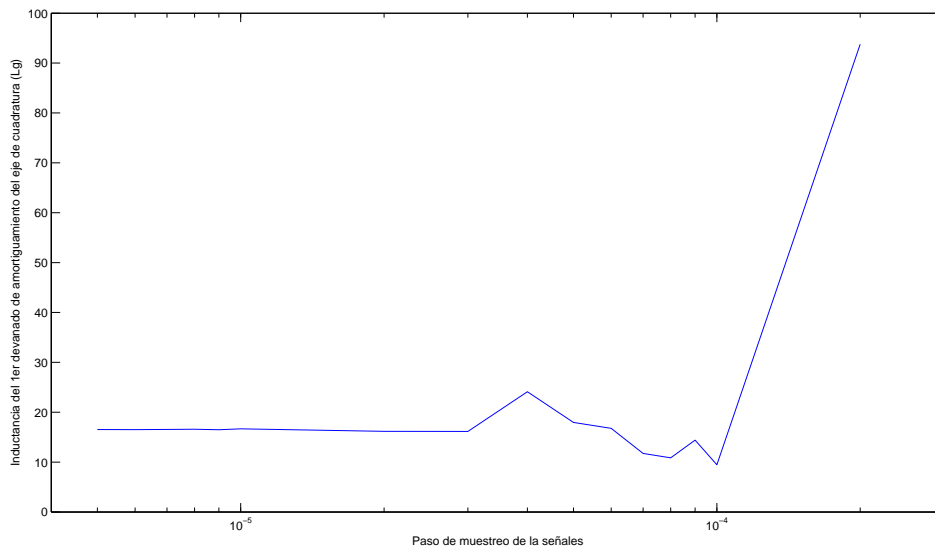


Figura 7.30: Valor de L_g para cada valor de frecuencia de muestreo

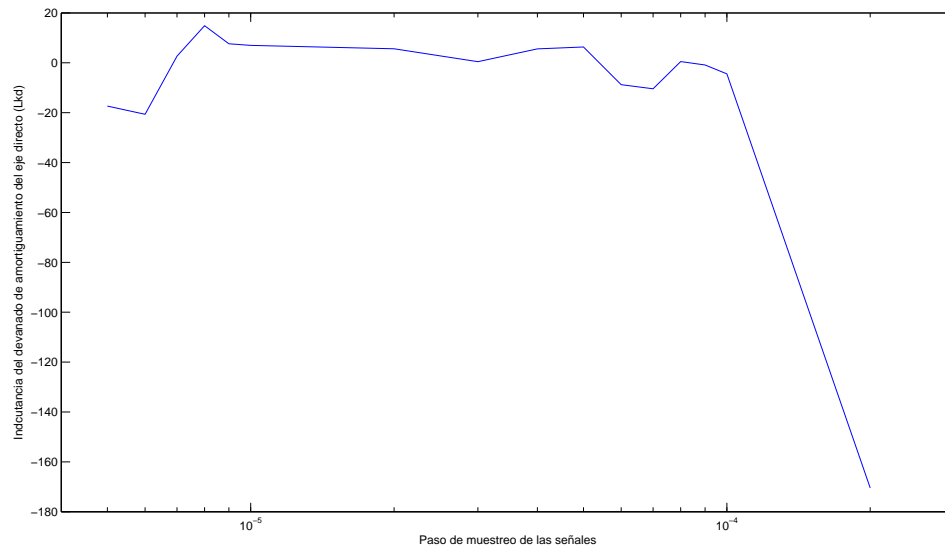


Figura 7.31: Valor de L_{kd} para cada valor de frecuencia de muestreo

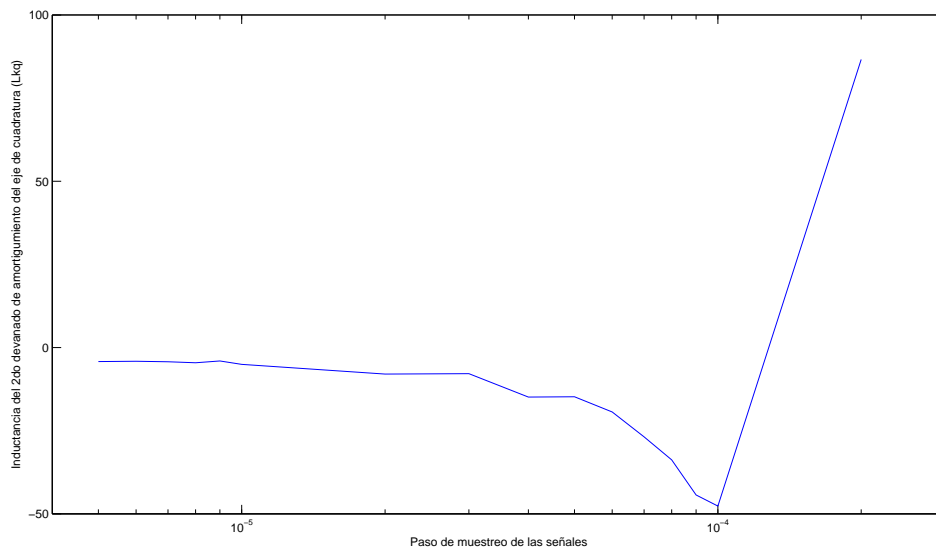


Figura 7.32: Valor de L_{kq} para cada valor de frecuencia de muestreo

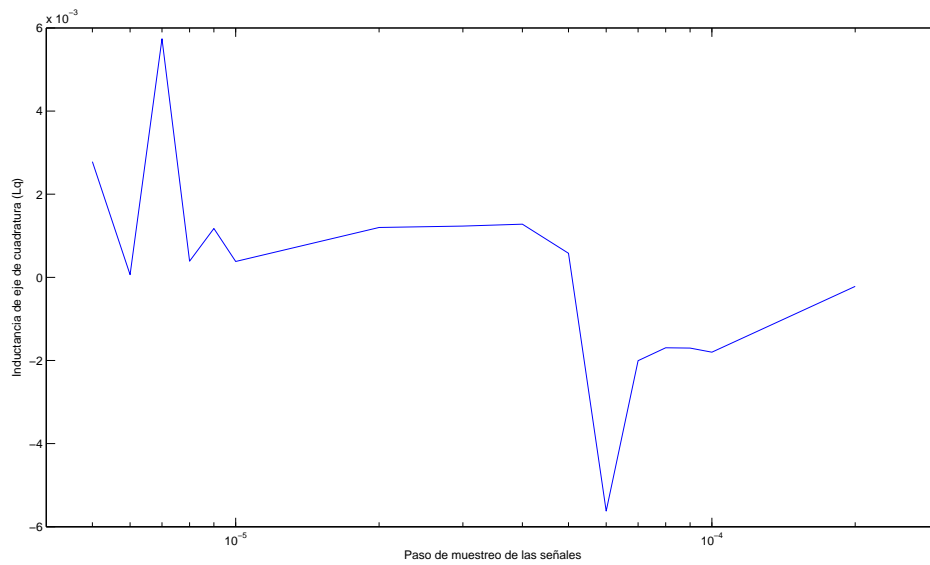


Figura 7.33: Valor de L_q para cada valor de frecuencia de muestreo

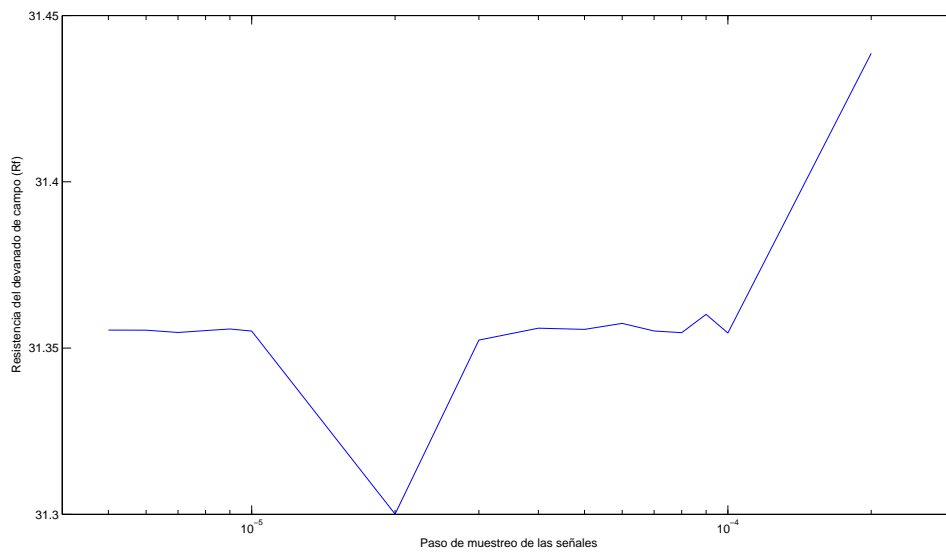


Figura 7.34: Valor de R_f para cada valor de frecuencia de muestreo

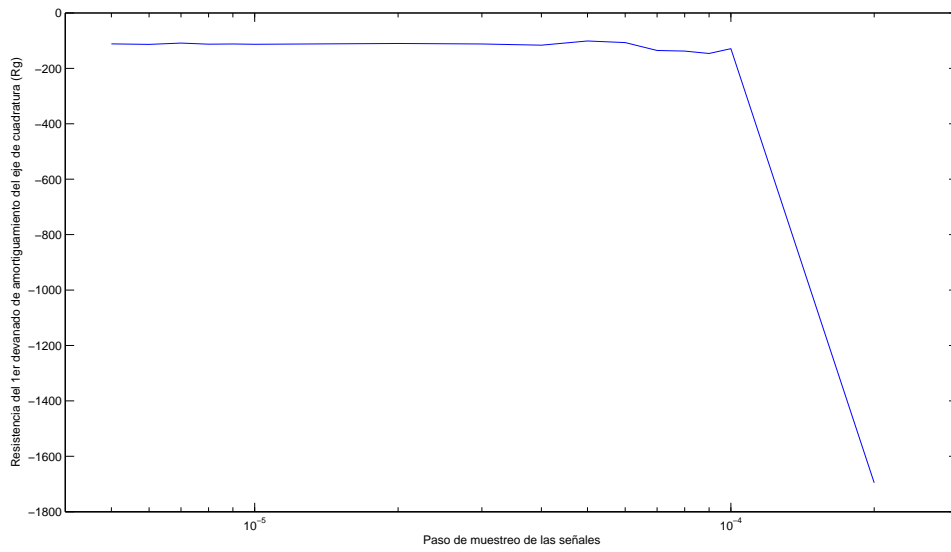


Figura 7.35: Valor de R_g para cada valor de frecuencia de muestreo

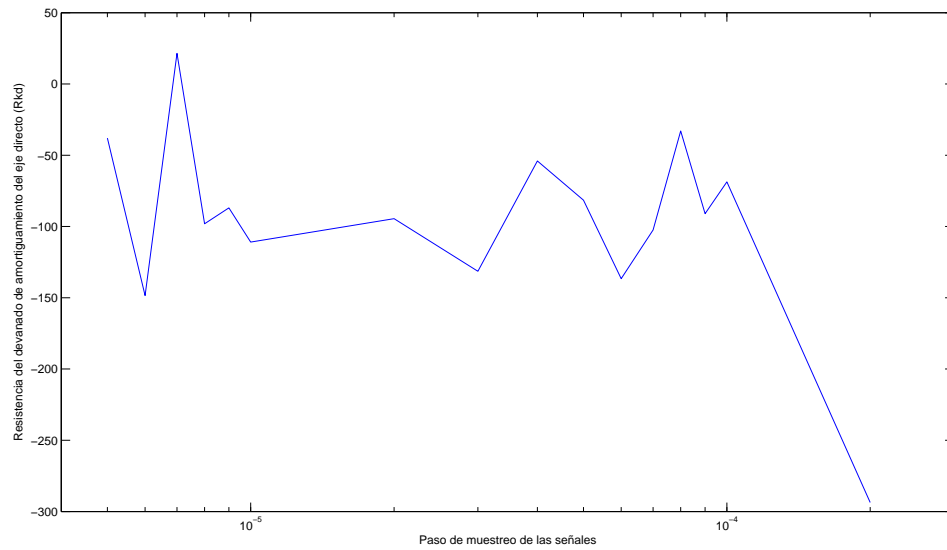


Figura 7.36: Valor de R_{kd} para cada valor de frecuencia de muestreo

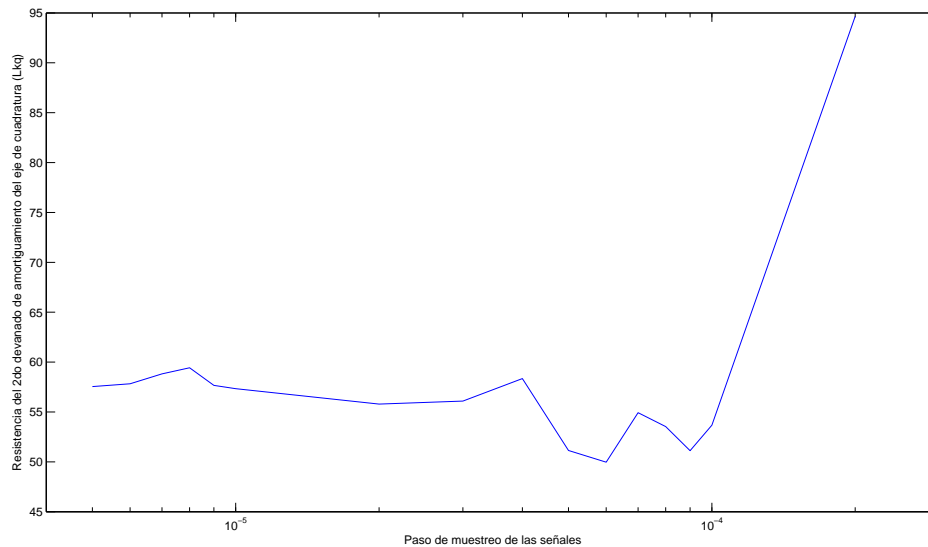


Figura 7.37: Valor de L_{kq} para cada valor de frecuencia de muestreo

Se puede inferir de las figuras 7.26 a 7.37 que el rango de trabajo de la herramienta para el cual el periodo de muestreo es óptimo termina aproximadamente en 5×10^{-5} [s], ya que con este periodo se muestra una variación pequeña en los valores estimados y una buena aproximación a los valores reales de todos los parámetros. Para todas las simulaciones realizadas con frecuencias de muestreo inferiores a 20[kHz] los errores correspondientes a los parámetros estimados empiezan a crecer, por lo tanto se hacen inadmisibles tales estimaciones. Para frecuencias de muestreo superiores a 100[kHz], los parámetros L_{ad} , L_{aq} , L_q y R_{kd} muestran un elevado cambio en sus valores estimados y aumentan demasiado el tiempo de estimación, este aumento se debe a que al elevar la frecuencia de muestreo se eleva la cantidad de datos con que tiene que trabajar la herramienta, consumiendo mas memoria del computador y ralentizando el proceso.

Capítulo 8

Conclusiones

8.1. Conclusiones

La herramienta mostró ser efectiva al lograr una estimación buena de los parámetros de la máquina sincrónica. Esto evidencia la viabilidad y continuidad de esta investigación. No obstante puede mejorarse la exactitud de la estimación si se perfecciona la metodología y se hacen ajustes en la herramienta para que sea mas eficiente

La exactitud y el tiempo de la estimación dependen del número de muestras o del tamaño del intervalo que el usuario especifique. Un intervalo muy pequeño producirá una estimación pobre en cuanto a exactitud, mientras que un intervalo muy grande, hará lento el proceso de estimación, sin mejorar esto la exactitud en los parámetros. Por lo tanto, la experiencia en la utilización de la herramienta así como el conocimiento del sistema con el que se está trabajando proporcionarán los elementos necesarios para una estimación óptima.

Se concluye de las pruebas del estudio de caso tipo que la estimación es adecuada para todos los parámetros del modelo de la máquina sincrónica, incluso para las inductancias de los devanados de amortiguamiento del eje de cuadratura y eje directo, que presentaron un error relativamente mayor a los demás parámetros.

Para lograr las características necesarias de la máquina sincrónica y de este modo obtener la correcta identificación de sus parámetros basta con una variación de carga desde 2 % hasta 20%; donde el límite inferior permite la convergencia de la estimación de los parámetros y el límite superior está dado para evitar la inestabilidad

del sistema de potencia.

El estudio de sensibilidad de la herramienta para sus datos de entrada R_a y L_l mostró que ante las variaciones de más o menos 10% de sus valores reales se obtiene una buena estimación de los parámetros. Los errores que presentan todos los parámetros, poseen un comportamiento lineal, a excepción de los parámetros del debanado de amortiguamiento del eje en cuadratura.

La variación en la frecuencia de muestreo de las señales de entrada a la herramienta, es otro factor importante en cuanto a la exactitud y precisión de la estimación. Se establece entonces un límite inferior para esta frecuencia igual a 20kHz, para así garantizar un error aceptable. Se recomienda un límite superior para el valor de muestras por segundo igual a 100kHz, por dos razones importantes: la primera es el tiempo que toma la herramienta en estimar los parámetros, y la segunda porque con incrementos pequeños en la frecuencia de muestreo se obtienen valores bastante dispersos en las estimaciones.

Se creó una amplia base de datos con todas las pruebas realizadas para probar el desempeño, capacidad y tiempo de simulación de la herramienta. A los modelos seleccionados para la base de datos se les aplicó la metodología y los parámetros obtenidos presentan un error aceptable determinado por la posibilidad de simular nuevamente su comportamiento en ATP.

Se afianza la comunicación ATP-MATLAB que el grupo de investigación GISEL ha venido desarrollando e implementando desde hace ya varios trabajos de grado. Lo que permitió automatización y confiabilidad en el proceso de validación de la herramienta.

Este trabajo de grado es una aplicación de los conocimientos adquiridos durante la carrera y es una muestra del interés del autor por evidenciar la sólida formación dada por la comunidad universitaria. Aportó al desarrollo del espíritu investigativo del autor, impulsándolo a aplicar la ingeniería.

Bibliografía

- [Bergen 1986] BERGEN, A. R.: *Power Systems Analysis*. New York : Prentice Hall, 1986
- [Bonneville 1994] BONNEVILLE: *BPA EMTP Theory Book*. 1st. Bonneville Power Administration, 1994
- [Chapra u. Canale 1996] CHAPRA, S. C. ; CANALE, R. P.: *Métodos Numéricos para Ingenieros*. 2da. McGraw-Hill, 1996
- [Coultres 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
- [Dandeno u. a. 1973] DANDENO, P. L. ; HAUTH, R. L. ; SCHULZ, R. P.: Effects of Synchronous Machine Modelling in Large Scale Stability Studies. In: *IEEE Trans PAS 92* (1973), March/ April, S. 574–582
- [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

- [E. Kyriakides u. Vittal 2004] E. KYRIAKIDES, G. T. H. ; VITTAL, V.: On-line estimation of synchronous generator parameters using a damper current observer and a graphic user interface. In: *IEEE Trans. Energy Convers* vol. 19, no. 3 (2004), S. 499–507
- [IEEE 2002] IEEE, P. S. E.: IEEE std 115-1995: Test Procedures for Synchronous Machines. In: *IEEE Standar Third* (2002), September, S. 190
- [K. H. Chan u. Parle 2001] K. H. CHAN, M. M. E. Acha A. E. Acha ; PARLE, J. A.: The use of direct time-phase domain synchronous generator model in standard EMTP-type industrial packages. In: *IEEE Power Eng. Rev* (2001), S. 63–65
- [Kundur 1994] KUNDUR, Prabha: *Power system stability and control*. 1st. McGraw-Hill, 1994
- [L. Wang 2007] L. WANG, H. W. D. J. Jatskevich J. J. Jatskevich: Re-examination of Synchronous Machine Modeling Techniques for Electromagnetic Transient Simulations. In: *IEEE Power system* 22 (2007), S. 1221–1230
- [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
- [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
- [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 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
- [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,HIDEN: Identificación de Sistemas. In: *Facultad de ciencias* [en línea] (2006), octubre, S. <http://www.isa.cie.uva.es/php/productos.php>
- [Y. Cui u. Xu 2004] Y. CUI, H. W. D. ; XU, W.: A comparative study of two synchronous machine modeling techniques for EMTP simulation. In: *IEEE Trans. Energy Convers* vol. 19, no. 2 (2004), S. 462–463
- [Zazo 1996] ZAZO, A.: *Introducción a la Estimación Secuencial de Parámetros*. UPCO, 1996

Apéndice A

Representación en por unidad

A.1. Bases utilizadas en el estator

$3\Psi VA_{base}$ = Potencia aparente de la máquina en volts-ampéres.

e_{sbase} = Valor de tensión fase-neutro de la máquina.

f_{base} = Frecuencia eléctrica del sistema, Hz.

$$i_{base} = \frac{3\Psi VA_{base}}{(3/2)e_{sbase}}, A$$

$$Z_{sbase} = \frac{e_{sbase}}{i_{sbase}}, \Omega$$

$$\omega_{base} = 2\pi f_{base}, rad. elec/s$$

$$\omega_{mbase} = \omega_{base} \frac{2}{p_f}, rad. mec/s$$

$$L_{base} = \frac{Z_{base}}{\omega_{base}}, H$$

$$\psi_{sbase} = L_{sbase} i_{sbase}, Wb-vuelta$$

A.2. Bases utilizadas en el rotor

$$i_{fdbase} = \frac{L_{ad}}{L_{fd}} i_{sbase}, A$$

$$i_{kdbase} = \frac{L_{ad}}{L_{akd}} i_{sbase}, A$$

$$i_{kqbase} = \frac{L_{aq}}{L_{akq}} i_{sbase}, A$$

$$e_{fdbase} = \frac{3\Psi VA_{base}}{i_{fdbase}}, V$$

$$Z_{fdbase} = \frac{3\Psi VA_{base}}{i_{fdbase}^2}, \Omega$$

$$Z_{kdbase} = \frac{3\Psi VA_{base}}{i_{kdbase}^2}, \Omega$$

$$Z_{kqbase} = \frac{3\Psi VA_{base}}{i_{kqbase}^2}, \Omega$$

$$L_{fdbase} = \frac{Z_{fdbase}}{\omega_{base}}, H$$

$$L_{kdbase} = \frac{Z_{kdbase}}{\omega_{base}}, H$$

$$L_{kqbase} = \frac{Z_{kqbase}}{\omega_{base}}, H$$

$$t_{base} = \frac{1}{\omega_{base}}, S$$

$$T_{base} = \frac{3\Psi VA_{base}}{\omega_{mbase}}, N-m$$

Apéndice B

Análisis de los métodos de extrapolación (Runge-Kutta y regla trapezoidal)

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-Kutta [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 diferencias 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-Kutta. Al final se presenta una descripción del método Runge-Kutta.

B.1. Sistema en ecuaciones en diferencias mediante la regla trapezoidal

En (B.1) y (B.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 se resuelven de forma simultánea. Al aplicar la regla

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

trapezoidal al sistema, se forman dos ecuaciones en diferencias (B.3) y (B.4)¹. Estas ecuaciones se representan como una función de transferencia de múltiples entradas y una salida en transformada Z , (B.5) y (B.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].

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = w_s\Psi_q + V_d + R_a i_d \quad (B.1)$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = -w_s\Psi_d + V_q + R_a i_q \quad (B.2)$$

$$\Psi_d[n] - \Psi_d[n-1] = \frac{1}{2}\tilde{w}_s \{ \Psi_q[n] + \Psi_q[n-1] \} \Delta t + \tilde{V}_d + R_a \tilde{i}_d \quad (B.3)$$

$$\Psi_q[n] - \Psi_q[n-1] = -\frac{1}{2}\tilde{w}_s \{ \Psi_d[n] + \Psi_d[n-1] \} \Delta t + \tilde{V}_q + R_a \tilde{i}_q \quad (B.4)$$

$$\Psi_d(Z) = \frac{\frac{1}{2}w_s(Z)\Psi_q(Z) \{1 + Z^{-1}\}^2 \Delta t + \{V_d(Z) + R_a i_d(Z)\} \{1 + Z^{-1}\}}{\{1 - Z^{-1}\}} \quad (B.5)$$

$$\Psi_q(Z) = \frac{-\frac{1}{2}w_s(Z)\Psi_d(Z) \{1 + Z^{-1}\}^2 \Delta t + \{V_q(Z) + R_a i_q(Z)\} \{1 + Z^{-1}\}}{\{1 - Z^{-1}\}} \quad (B.6)$$

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

En la figura B.1 se presenta la respuesta real y la estimada del flujo magnético de la máquina sincrónica, la estimada se determinó mediante las ecuaciones en diferencias mostradas en (B.5) y (B.6). Como se puede ver, a la respuesta se encuentra adherida

¹Las señales con el símbolo de vigüilla en la parte superior, representan el promedio del valor presente y el pasado.

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

una señal oscilatoria de alta frecuencia y con una tendencia creciente. En la figura B.2 se presenta el mismo caso, pero la respuesta estimada es resuelta por el método de extrapolación Runge-Kutta. 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. Al ampliar el tiempo de asimilación, la respuesta del método de la regla trapezoidal tiene a valores alrededor de 10^{27} .

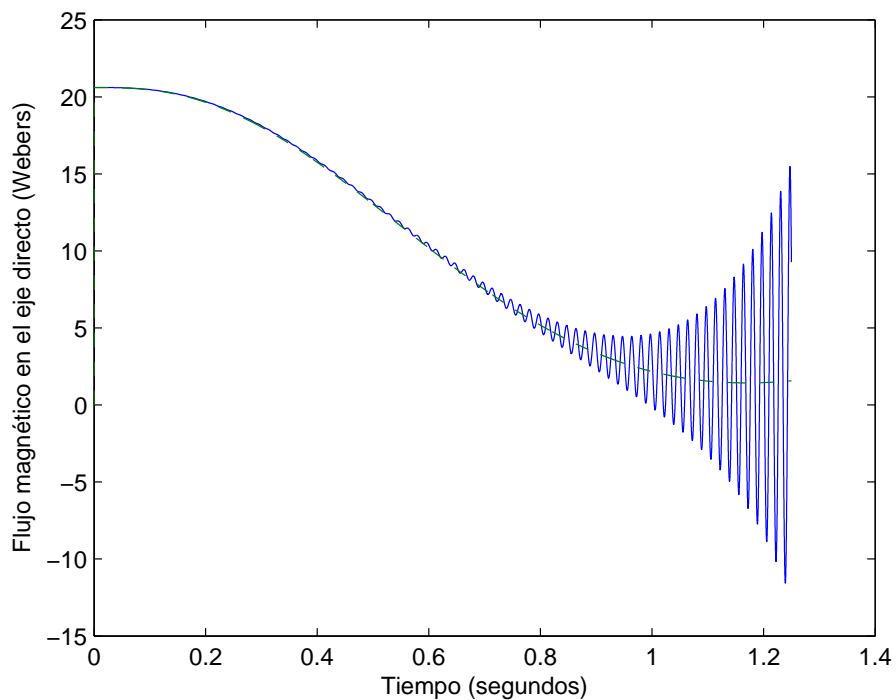


Figura B.1: Respuesta del sistema mediante el método de la regla trapezoidal.

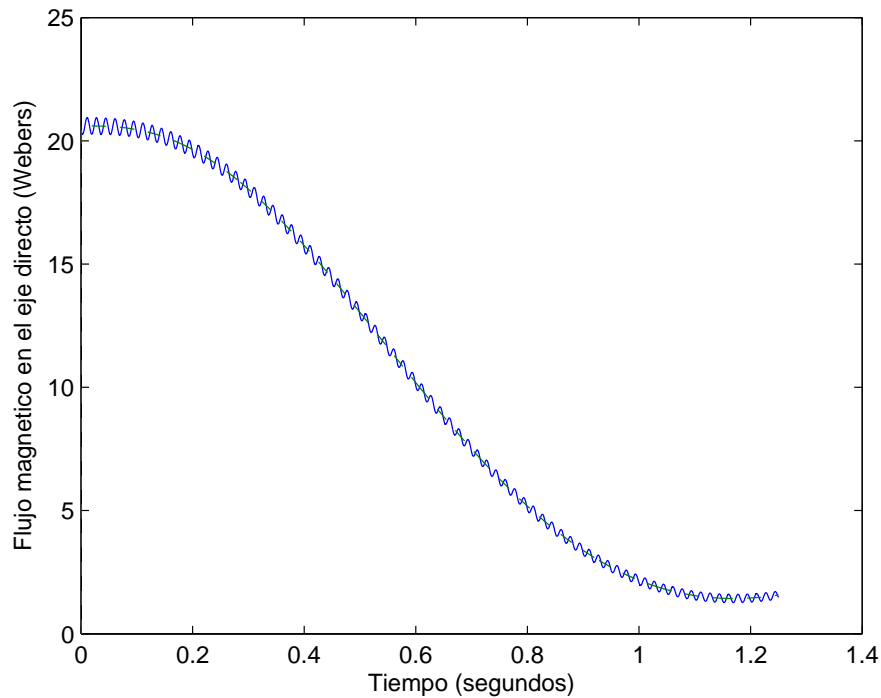


Figura B.2: Respuesta del sistema mediante el método Runge-Kutta

B.3. Descripción del método Runge-Kutta

Los diferentes métodos de extrapolación lineal se diferencian básicamente en la forma en la que determinan las derivadas 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 (B.7), se determina mediante el cálculo de las constantes que se presentan en (B.8), (B.9), (B.10) y (B.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 el proceso cuando el sistema se encuentra en condiciones estables². Otro problema muy importante es la no linealidad que se presenta al momento del switcheo de la carga. Es decir, cuando el sistema eléctrico tiene una variación de carga, se produce

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

una oscilación no propia de las ecuaciones diferenciales lineales que se tienen para describir el sistema, esto hace que la respuesta estimada se inestabilice [Bonnevillie 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 trasitoria requerida y se omite la parte antes del switcheo, 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.

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

$$k_1 = \Psi'_d[n] \Delta t = f(\Psi_d[n]) \Delta t \quad (\text{B.8})$$

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

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

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

En las figuras B.3 y B.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-Kutta. 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 el switcheo. Como se mencionó anteriormente, la oscilación se presenta antes de la perturbación, debido a que la señal se ha estimado desde el final.

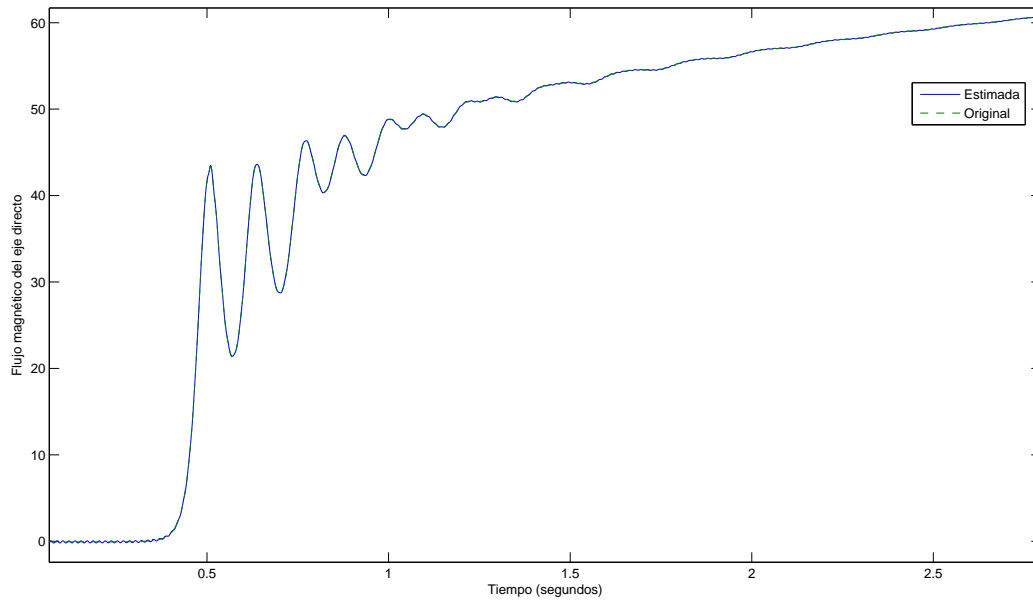


Figura B.3: Comparación de los flujos magnéticos mediante el método Runge-Kutta.

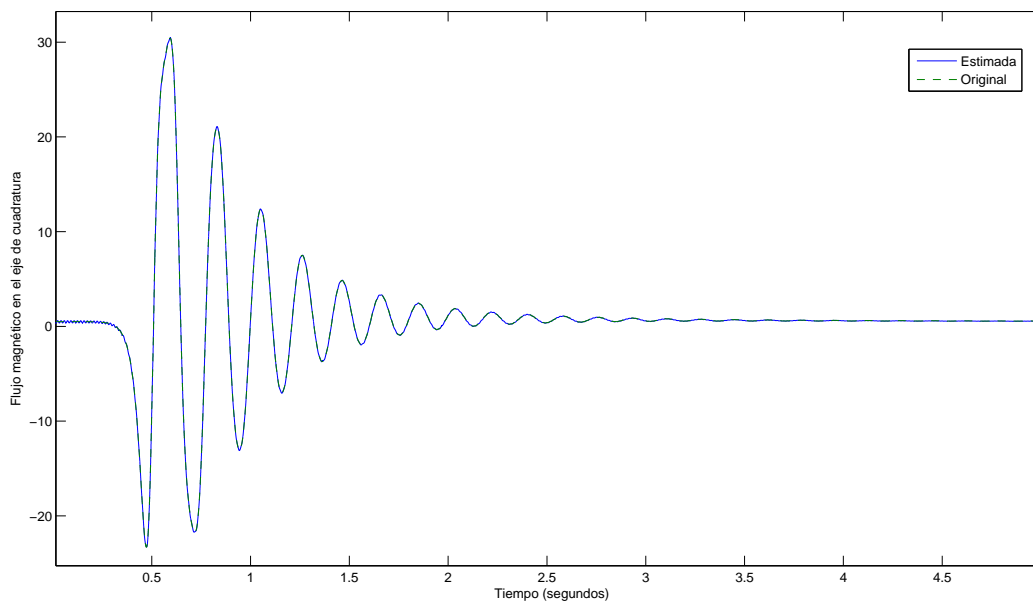


Figura B.4: Comparación de los flujos magnéticos mediante el método Runge-Kutta.

Apéndice C

Manual del usuario

C.1. Introducción

La herramienta computacional EGM (Estimación Gráfica de Máquinas), es una aplicación desarrollada en MATLAB, que mediante una interfaz de usuario, permite la estimación de parámetros de una máquina síncrona, a partir de datos de operación normal y de vacío. El modelo utilizado para la estimación es el modelo de segundo orden de la máquina representado en componente $dq0$, también se encuentra disponible la estimación de los parámetros mediante el modelo de tercer orden.

Esta herramienta integra una metodología de estimación de parámetros de la máquina síncrona en una interfaz gráfica que permite un manejo 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.

C.2. Instalación

C.2.1. Requerimientos

Los requerimientos mínimos de Hardware para utilizar esta herramienta son:

- Procesador Pentium III, Athlon 2000 o superiores.

- Microsoft Windows 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.

C.2.2. Procedimiento de Instalación

Aunque la herramienta es autónoma en su funcionamiento, es necesaria la instalación de componentes básicos de MATLAB, sin que el usuario adquiriera alguna licencia.

Es necesario ejecutar ó dar doble clic en los archivos en este orden específico:

1. MCRInstaller.exe

Este es un asistente llamado MATLABComponenteRuntime e instala la plataforma a utilizar por la herramienta, el asistente 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.

2. 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.

C.3. Ejecución

Para iniciar con la herramienta, se ejecuta EGM.exe. La primera ejecución copiará los archivos necesarios para su operación, como fue descrito anteriormente, y 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 un carpeta de trabajo creada con la primera ejecución de EGM.exe.

Con la ejecución de EGM.exe aparece la ventana que se presenta en la figura C.3:

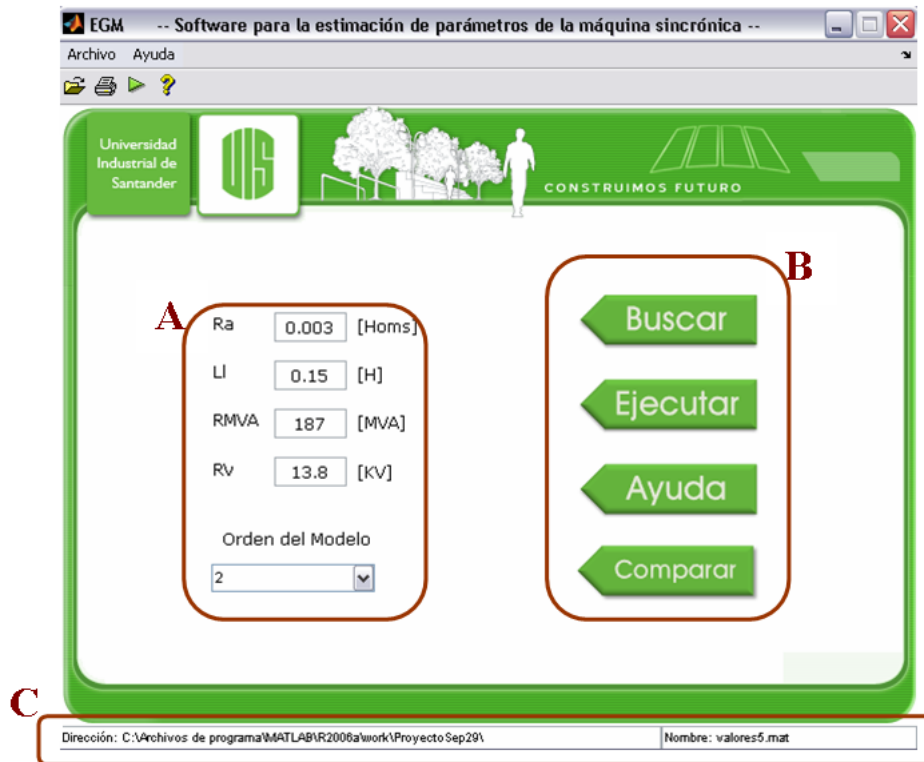


Figura C.1: Ventana principal de la herramienta EGM

En esta ventana se encuentran las áreas : A. Datos de entrada, B. Botones de comandos, C. Barra de direcciones

Área A: Datos de entrada

- **Escritos**

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 KV.

- **Seleccionado**

Orden del modelo Puede ser 2 para un modelo de segundo orden ò 3 para una estimación de tercer orden.

Área 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

Área C: Barra de direcciones

En esta área se encuentran 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 no existiera este último archivo, se tomarán los valores por defecto, que son "c:\\" y "*.txt".

C.4. Buscar

Al dar clic en Buscar se desplegará una ventana como la mostrada en la figura C.4. 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 estos conjuntos de valores se estimarán los parámetros.

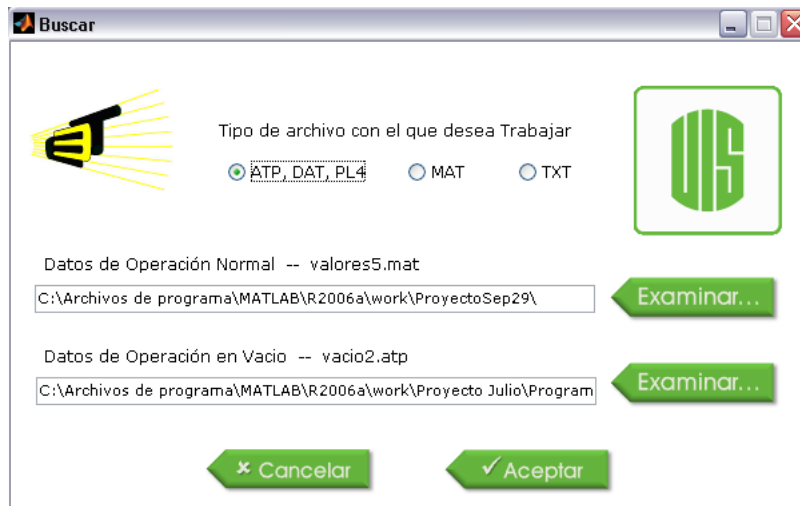


Figura C.2: Ventana buscar

Dependiendo del tipo de archivo que se seleccione se habilitará o deshabilitará, el botón inferior y su respectiva barra de direcciones. Si se elige ATP, DAT, PL4 se tendrán habilitados los dos botones, mientras que al elegir MAT o TXT solo se tendrá habilitado el botón superior, ya que los datos de operación en vacío están incluidos en los datos seleccionados.

Después de escoger el tipo de archivo es necesario dar clic en Examinar para que abra la ventana que aparece en la figura “Archivo con el que desea trabajar” C.4y poder escoger el o los archivos de trabajo, se da abrir, luego se da clic en aceptar para tomar esta información, o cancelar si se quiere seguir trabajando con los archivos actuales.

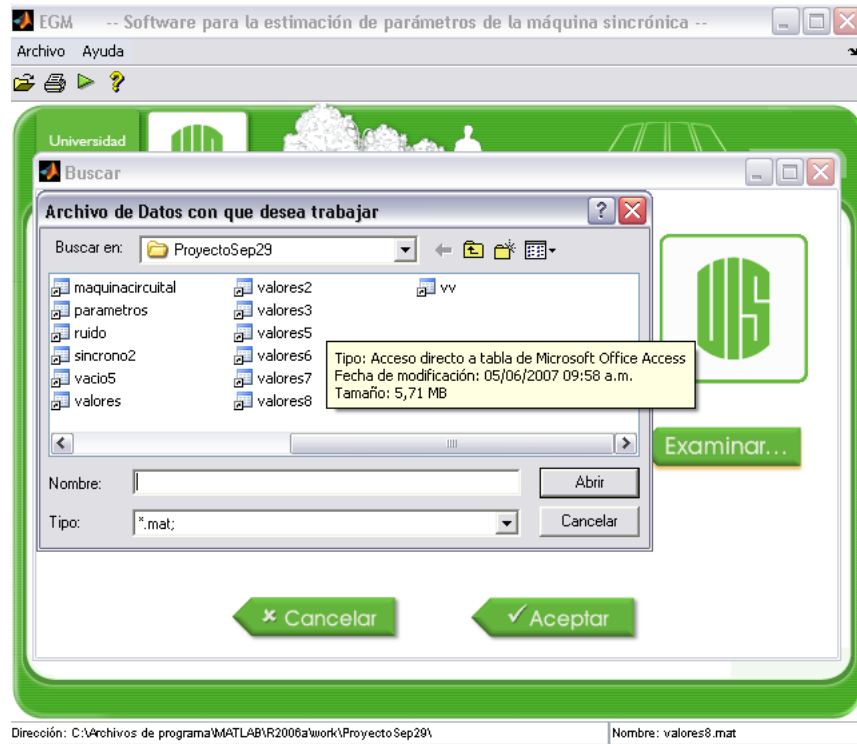


Figura C.3: En esta ventana se seleccionan los archivo de trabajo

C.5. Ejecutar

La figura C.4 muestra esta ventana, en ella se permite al usuario ver, las señales de operación de la máquina. Estas señales han sido leídas directamente de un archivo (si se escogió un archivo *.MAT o *.TXT) o calculadas con la ayuda de ATP (si se escogió un archivo *.ATP o *.DAT). La figura de esta ventana figura C.5 fue dividida en cuatro áreas con fines explicativos.

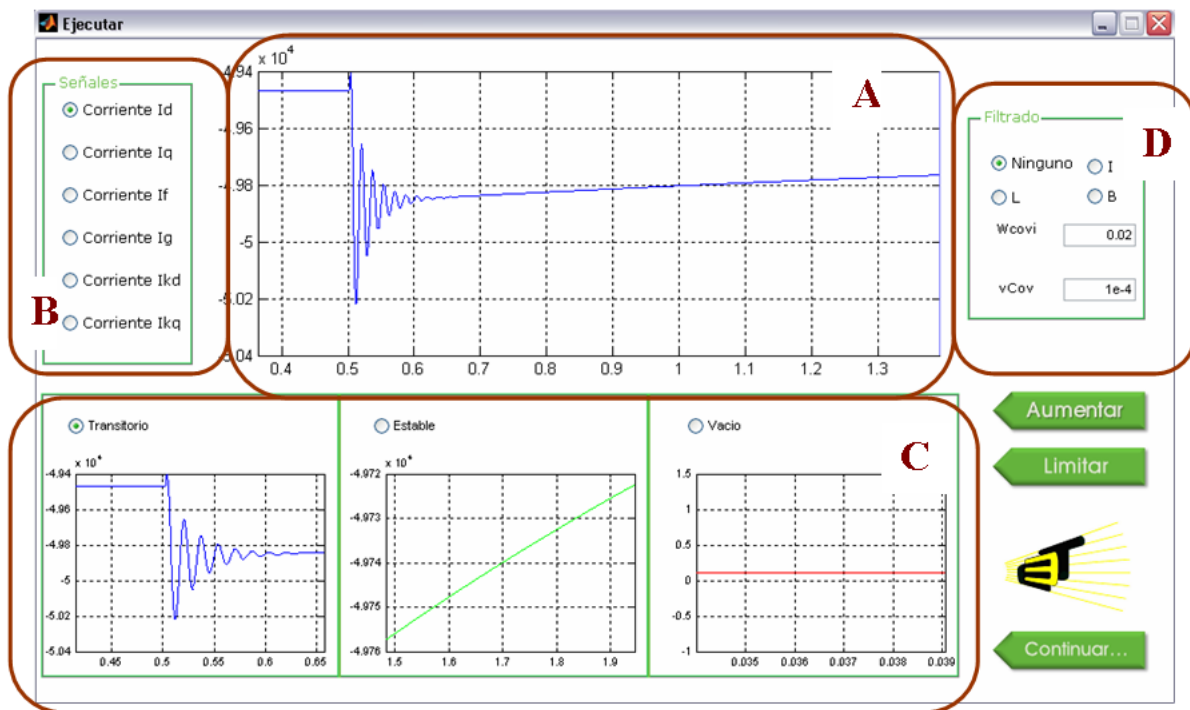


Figura C.4: A. Área para mostrar, aumentar, limitar la señal mostrada, B. Selección de la señal que se mostrará, C. Filtrado de la señal escogida, D. Presentación de los intervalos escogidos para la estimación.

Área A

Se muestran las señales, el usuario selecciona el intervalo de trabajo de la herramienta y se puede hacer un aumento en la resolución de la gráfica. La selección del intervalo de operación se realiza sosteniendo el botón derecho del *mouse* y desplazándose sobre la figura. El intervalo de operación se indica con una sombra sobre la imagen. Una vez liberado el botón derecho, la herramienta automáticamente reconoce que el área sombreada es el intervalo deseado por el usuario.

Área B

Las señales mostradas en A. dependen de la selección única de ellas. Esta selección se realiza dando clic sobre el botón circular a la izquierda del nombre de cada señal en el área B. Se muestran señales de corrientes de los ejes directo I_d y cuadratura I_q , también la 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. cambiara a Azul si la selección es Transitorio, verde si la selección es Estable y roja si es vacío.

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, ya que en operación en vacío, solo se cuenta con una única señal de corriente.

Una vez seleccionada una 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 de una línea vertical que indicara el inicio del intervalo de 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 liberado el botón derecho del *mouse* derecho, 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. Para un manejo visual coherente, las señales serán dibujadas con el color de la sombra, Azul si se dibuja el intervalo Transitorio, verde para Estable y rojo para vacío.

Área C

Es el área destinada para permitir al usuario filtrar ruido existente en las señales, estos tres filtros son independientes de cada una de las señales, Id, Iq. 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.



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

C.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 terminada la estimación, automáticamente la herramienta mostrará la ventana de resultados como la de la figura C.6

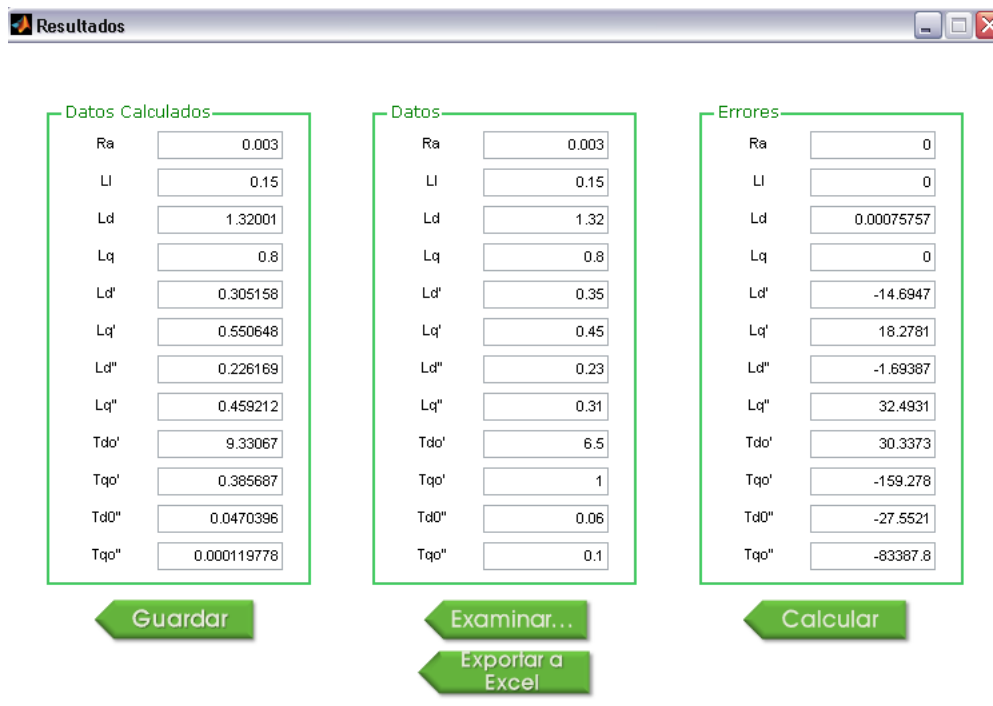


Figura C.5: Esta ventana permite ver los parámetros estimados y compararlos con los originales.

Entonces se tienen los siguientes botones:

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

Calcular Calcula los errores en porcentaje de los parámetros estimados con los cargados del archivo ATP, anteriormente seleccionado.

Guardar Una vez comparados los datos, y si se quiere guardar los parámetros estimados, este botón permite salvar un archivo ATP, con los valores estimados para la máquina sincrónica

Exportar a Excel Este botón permite exportar las tres columnas de la ventana resultados a un archivo excel *.XLS, esto se hace con el objetivo de realizar de forma práctica la recopilación de datos y la creación de bases de datos de simulaciones.

C.7. Comparar

Esta ventana es presentada en la figura C.7 y esta 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.

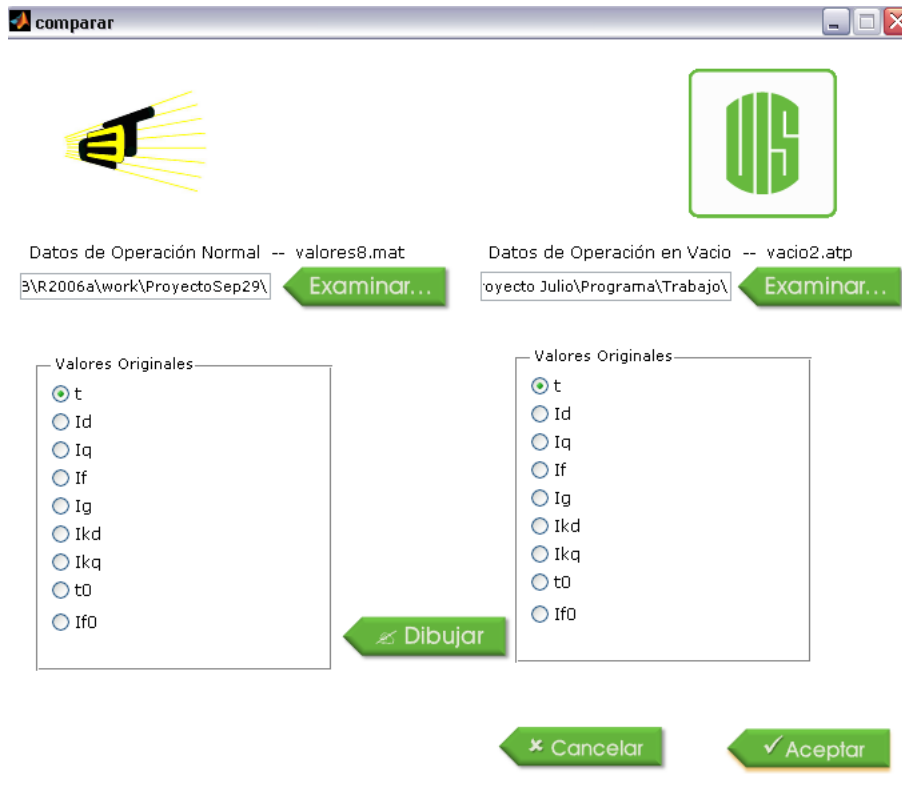


Figura C.6: Esta ventana permite ver los parámetros estimados y compararlos con los originales.

El procedimiento es el siguiente:

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

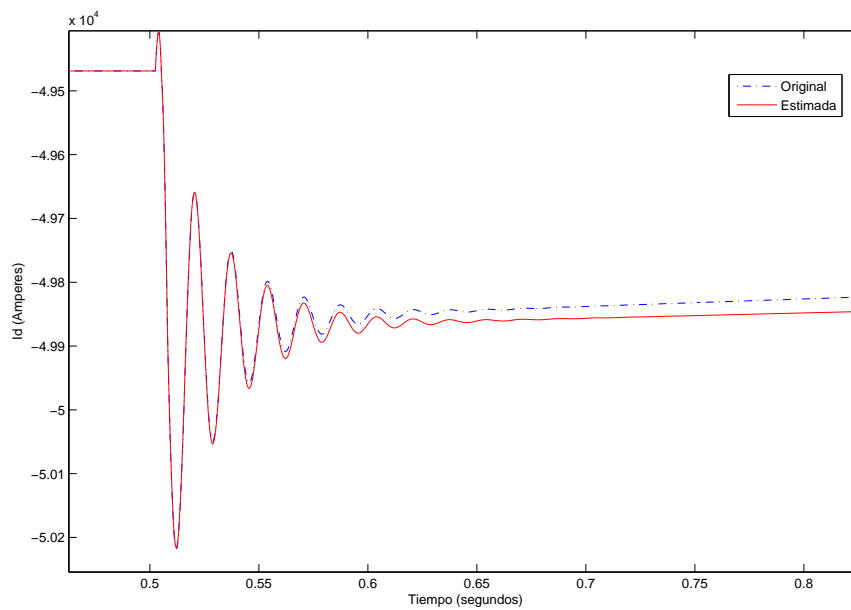


Figura C.7: Comparación de señales, dada por la ventana Comparar.