

Universidad
Autónoma
Metropolitana



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

Evaluación de técnicas de estimación de parámetros en línea para un generador síncrono

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
ELECTROMAGNÉTICA

Ing. Jorge Fernández Silva

Director de tesis:

Dr. Francisco Beltrán Carbajal

Adscripción: Departamento de Energía, UAM-A

Co-Director de tesis:

Dr. Irvin López García

Adscripción: Departamento de Energía, UAM-A

30 de septiembre del 2022

Contenido

Contenido	I
Agradecimientos	II
Motivación	III
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema y justificación	3
1.3. Objetivo general	5
1.4. Objetivos específicos	5
2. Modelo Matemático del SEP: Máquina Bus Infinito	6
2.1. Turbina mecánica	6
2.2. Modelo de tercer orden del GS	8
2.2.1. El generador síncrono	8
2.2.2. Modelo del subsistema mecánico del GS	8
2.2.3. Modelo del subsistema eléctrico del GS	12
2.2.4. Modelo matemático del GS en el marco dq0	13
2.2.5. Análisis en estado estacionario	18
2.3. Red eléctrica	20
2.4. Sistema en por unidad	21
3. Estimación de Parámetros en Línea	24
3.1. Técnicas de estimación de parámetros en línea	24
3.2. Técnica Uno	25
3.2.1. Estimación con límites transitorios garantizados	25
3.3. Implementación	25
3.4. Técnica Dos	29

3.4.1. Sistemas de identificación no líneal	29
3.5. Método de Gauss-Newton	31
3.6. Método de Levenberg-Marquardt	32
3.7. Implementación	34
3.8. Ecuaciones para mediciones de señales en línea	39
4. Desarrollo de La Plataforma Virtual	42
4.1. Metodología de la plataforma virtual	43
4.2. Arquitectura de la plataforma virtual	43
4.3. Interfaz gráfica de la plataforma virtual	51
4.4. Información para el usuario	51
5. Resultados	55
5.1. Simulación de la máquina bus infinito	55
5.2. Dinámica del generador síncrono	58
5.3. Voltaje en terminales del GS	61
5.4. Límites transitorios garantizados	62
5.5. Medición de señales en línea	63
5.5.1. Obtención de las señales en línea del generador síncrono	63
6. Conclusiones y Trabajo Futuro	67
7. Anexos	69
8. Referencias	92

Agradecimientos

Agradezco a todos los seres humanos que durante estos tiempos difíciles siguen presentes en mi vida. A pesar de las adversidades nos mantenemos unidos como el núcleo de un átomo, pero sobre todo, quiero agradecer infinitamente a las personas que me han permitido girar entorno a su núcleo, tal si yo fuera un electrón.

Gracias a todo esto, estoy completamente convencido que todos hemos aprendido cosas inimaginables en lo personal, lo académico y lo laboral. La voluntad, el esfuerzo y el sacrificio nos ha dado la oportunidad de fortalecer a la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco y a Conacyt. Estas dos grandes instituciones nos da la oportunidad de nuevos proyectos y nuevos sueños, todo esto gracias a la calidad de sus investigadores y profesionales que la integran.

Es tiempo de reflexionar, es tiempo de ser mejor profesionista, mejor padre o madre, mejor hijo o hija, es tiempo de ser; un mejor ser humano.

Motivación

En este trabajo se desarrolló una plataforma virtual. La plataforma virtual nos permite simular un generador síncrono de rotor sólido bajo el contexto de máquina bus infinito. El modelo programado del generador es el llamado modelo de orden reducido o también conocido como el modelo de tercer orden.

La plataforma virtual permite visualizar estudios de la máquina bus infinito bajo diferentes condiciones de operación, una de ellas es el cambio en la potencia mecánica, la cual se programó con una curva suave específicamente un polinomio de Bézier y representa una perturbación en un intervalo de tiempo de 3 segundos durante la operación del generador síncrono. Durante la perturbación la plataforma nos muestra gráficamente el comportamiento dinámico de la máquina bus infinito. En la dinámica observamos el comportamiento de la potencia activa, la potencia reactiva, el ángulo de carga y el voltaje en terminales.

Otra de las funciones en la plataforma virtual es la estimación de parámetros en línea del generador síncrono. Gracias al resultado en las simulaciones de la máquina bus infinito, se programaron dos técnicas de estimación de parámetros en línea, las cuales nos permiten estimar parámetros como: la reactancia de línea, reactancia del eje directo, reactancia del eje de cuadratura.

Es importante resaltar que la plataforma virtual tiene aplicaciones en la docencia para realizar estudios en un sistema eléctrico de potencia simulado bajo el concepto de máquina bus infinito y usando el modelo de tercer orden para representar la dinámica del generador síncrono. Sin embargo, también sería de gran impacto que se utilizara en empresas generadoras de energía, donde podría estar conectada a una computadora recibiendo y guardando las señales del generador síncrono, y ser usadas para estudios y análisis que presenta la generación de energía en el sistema eléctrico de potencia. Por todas las características antes mencionadas la plataforma virtual tiene un campo muy amplio de alto impacto en sectores públicos y privados.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La energía eléctrica es importante en el desarrollo de cualquier país. Sin embargo, ésta tiene que ser generada a través de otras fuentes de energías, por ejemplo, agua en movimiento, viento, olas, combustibles fósiles, energía nuclear, entre otras [1]. La energía eléctrica generada llega a los usuarios finales a través de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), por lo que la calidad del servicio va a depender de su confiabilidad. El SEP se compone de un sistema de generación, donde se encuentran las centrales eléctricas o Sistema de Generación Eléctrica (SGE), un sistema de transmisión, compuesto por transformadores y líneas de transmisión y por último, un sistema de distribución donde los usuarios industriales y residenciales se encuentran conectados [2]. Particularmente, el sistema de generación es importante, ya que se genera la energía eléctrica bajo condiciones específicas de frecuencia y magnitud de tensión. Dentro de este sistema, el elemento de mayor importancia en el proceso de conversión de energía es el generador eléctrico [3]. Por ello, saber su comportamiento en todo momento es de vital importancia para el correcto funcionamiento del SEP.

El tipo de generador eléctrico que opera en el sistema de generación del SEP está ligado al tipo de sistema de generación eléctrica que se está utilizando, la cual puede ser convencional o no convencional [4], [5]. En términos de esta clasificación, se puede ver que las centrales eléctricas convencionales son aquellas en donde su fuente de energía primaria es de origen fósil (petróleo, carbón), agua o nuclear. Las no convencionales son aquellas que utilizan como fuentes de energía primaria, las fuentes de energía llamadas limpias, por ejemplo, viento, irradiación solar y olas [1]. Entonces, la clasificación de centrales eléctricas convencionales y no convencionales también puede estar ligado a si se tiene o no control de la fuente primaria de energía. En México, la generación de energía eléctrica está solventada principalmente por centrales eléctricas que utilizan como fuente primaria los combustibles fósiles (aproximadamente un 75 %) y son conocidas como termoeléctricas y de ciclo combinado [6].

En estas centrales eléctricas el tipo de generador eléctrico utilizado es el Generador Síncrono (GS) de polos lisos [3]. Por lo tanto, asegurar una generación confiable de la energía eléctrica del SEP en nuestro país implica modelar, analizar y controlar en todo momento a esta máquina. Para poder analizar al GS lo más deseable es tener físicamente a la máquina. Desafortunadamente esta opción es prácticamente imposible porque estas máquinas cuestan una cantidad importante de dinero. Sin embargo, una herramienta muy utilizada para analizar, modelar y controlar al GS son los modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales. Estos modelos nos permiten realizar análisis del GS, tanto en estado estacionario, como en estado transitorio [3]. Actualmente existen los modelos llamados de orden superior [7] y el modelo de tercer orden [2] , [8].

Los modelos de orden superior son mejores para representar la dinámica propia de la máquina en términos de las ramas de amortiguamiento. En la cual se sabe que utilizar varias ramas de amortiguamiento logra una mejor representación de la dinámica propia de la máquina [7]. El modelo de tercer orden, el cual se obtiene a partir de un análisis transitorio, particularmente de un cortocircuito. Este modelo está representado por tres ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales en variables de estado. Estas tres ecuaciones dependen de entradas y parámetros que son de suma importancia en la dinámica del generador síncrono [3] , [9]. El modelo de tercer orden es ampliamente usado para analizar el comportamiento dinámico en distintos puntos de operación del generador síncrono, en consecuencia estos estudios tienen aplicaciones en control y además nos permite estimar los parámetros del generador síncrono. Por ello, en este trabajo, se evaluarán dos técnicas de estimación de parámetros en línea utilizando el modelo de tercer orden [10], [11].

Existen dos técnicas de estimación de parámetros: fuera de línea y en línea. Las técnicas fuera de línea, conocidas también como técnicas clásicas, requieren que la máquina esté desconectada de la red eléctrica. Entre ellas podemos mencionar la respuesta a la frecuencia en estado estacionario [12], prueba en vacío [13], prueba de factor de potencia cero [14], rechazo de carga [15], entre otras. Puesto que, el interés de este trabajo es analizar el comportamiento del GS para fines de control, sin que este se vea afectado durante su operación, es deseable que los parámetros se puedan conocer en línea, por consiguiente se utilizarán las técnicas de estimación de parámetros en línea. Entre ellas podemos mencionar las técnicas que utilizan redes

neuronales artificiales [16], filtros de Kalman [17], métodos de gradiente conjugado [18] y series de Hartley [19]. En trabajos recientes podemos encontrar aplicaciones de control robusto de generadores eléctricos aeronáuticos para aplicaciones de gestión de energía [20]. Otro trabajo es un método de estimación de parámetros en línea para accionamientos de motores de inducción [21]. Una aplicación desarrollada en *Matlab Simulink*[®] para modelado analítico del generador síncrono de imanes permanentes nos muestra una interfaz de usuario, como la que se desarrolló en esta tesis [22].

Finalmente, en este trabajo se desarrolló una plataforma virtual que presenta las simulaciones del generador síncrono, para esto se utilizó *Matlab Simulink*[®], donde se programó el modelo matemático de tercer orden con la finalidad de evaluar el desempeño de dos técnicas de estimación de parámetros en línea. El objetivo principal de la plataforma virtual es identificar las ventajas y desventajas de estas dos técnicas de estimación parámetros en línea en términos de su rapidez, sencillez y confiabilidad.

1.2. Planteamiento del problema y justificación

Se plantea utilizar el modelo matemático de tercer orden del GS, por ser uno de los más utilizados para el análisis, diseño y aplicaciones de control. Por ello, los trabajos de estimación de parámetros en línea para el GS se basan principalmente en este modelo.

El modelo de tercer orden, las técnicas de estimación de parámetros y las simulaciones del generador síncrono en conjunto permitió desarrollar una plataforma virtual que evalúa la rapidez, eficiencia y robustez de las técnicas de estimación de parámetros en línea. Esto permitirá conocer las ventajas y desventajas de cada una de ellas. Así mismo, la plataforma virtual se emplea como una herramienta que nos permitirá encontrar un método para evaluar cuál de estas técnicas tienen un mejor desempeño.

La plataforma virtual permitirá la evaluación de modelos analíticos o numéricos para analizar y resolver problemas de ingeniería electromagnética. Así mismo, se propone la plataforma como una herramienta para estimar los parámetros en línea del GS que podrán ser aplicados en el diseño de estrategias de control. Los puntos

antes mencionados están incluidos en los objetivos específicos del plan de estudio de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electromagnética.

1.3. Objetivo general

Diseñar y construir una plataforma virtual para evaluar el desempeño de técnicas de estimación de parámetros en línea del generador síncrono, para aplicaciones de control automático.

1.4. Objetivos específicos

1. Comprender el alcance y limitaciones del modelo matemático de tercer orden del turbogenerador, para síntesis de esquemas de control y de estimación de parámetros en línea.
2. Seleccionar dos técnicas de estimación de parámetros en línea del turbogenerador.
3. Desarrollar los programas de computadora de la plataforma virtual.
4. Evaluar las técnicas seleccionadas para la estimación de parámetros en línea del turbogenerador.

2. Modelo Matemático del SEP: Máquina Bus Infinito

2.1. Turbina mecánica

En el proceso de conversión de energía eléctrica en el SEP, la turbina mecánica es la encargada de convertir la energía cinética del agua y la energía térmica derivada de los combustibles fósiles, en energía mecánica. Las turbinas mecánicas más utilizadas en los SGE son la turbina hidráulica Pelton y la turbina de vapor de flujo axial, las cuales se muestran en las figuras 2.1 y 2.2 [3].

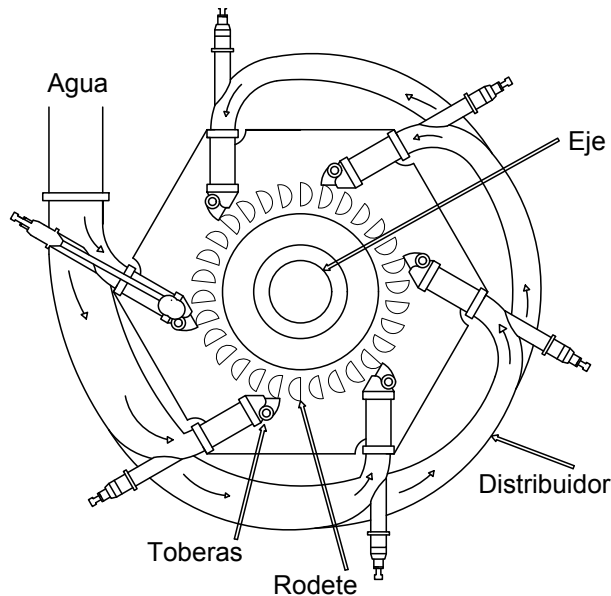


Figura 2.1: Turbina hidráulica Pelton.

La turbina hidráulica se clasifica en turbina de impulso y turbina de reacción [2]. El proceso de conversión de energía de esta turbina es aprovechar la fuerza del agua retenida por el dique de la presa. El agua almacenada en la presa por el cambio del cauce natural de los ríos representa energía potencial. El origen de esta energía es la energía cinética contenida en los ríos por el agua en movimiento. Al hacer fluir de manera controlada esta agua almacenada en la presa a través de las aspas de la turbina hidráulica, esta se transforma de energía potencial a energía mecánica con-

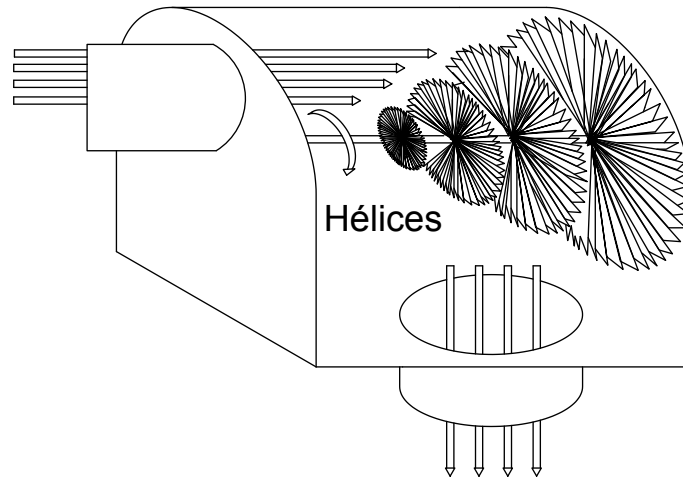


Figura 2.2: Turbina de vapor.

trolada por la presión del flujo de agua sobre las aspas de la turbina. Esta energía mecánica es la que se transforma en energía eléctrica gracias al GS y en consecuencia suministrada a la red eléctrica para su consumo.

El proceso de conversión de energía en la turbina de vapor es similar a la turbina hidráulica, con la diferencia en el origen de la energía primaria, que en este caso viene de la quema de fuentes de energía de origen fósil (petróleo y sus derivados), carbón o nuclear [1]. Estas fuentes de energía calorífica se encargan de transformar el agua de estado líquido a estado gaseoso para generar vapor de manera controlada, el cual es utilizado para transformar la energía calorífica de las fuentes primarias en energía mecánica a través de la turbina de vapor. Esta energía mecánica es la que se transforma en energía eléctrica a través del generador síncrono y es suministrada a la red eléctrica para su consumo, como en el caso de las centrales hidroeléctricas [2], [3].

En este trabajo, para fines del modelado matemático del SEP, es irrelevante si la potencia mecánica es suministrada por una turbina hidráulica o una turbina de vapor, ya que en el contexto de máquina bus infinito, la turbina mecánica se simula con una curva suave específicamente un polinomio de Bézier [8], [10], [11].

2.2. Modelo de tercer orden del GS

2.2.1. El generador síncrono

A nivel mundial, la energía eléctrica demandada por los usuarios hoy en día, es generada principalmente por un GS [23]. Estructuralmente, este sistema de conversión de energía mecánica a eléctrica está compuesto por dos partes fundamentales, la parte estacionaria llamada estator o armadura y una parte móvil llamada rotor. El estator se compone de ranuras longitudinales, en las que se aloja un devanado trifásico, y en donde también se aloja un devano de amortiguamiento. El rotor es la parte del generador que se monta sobre una flecha que rota dentro del estator. El devanado sobre el rotor, llamado devanado de campo, es alimentado por Corriente Directa (*CD*) [3], [24].

En la literatura especializada se puede ver que el rotor de los generadores síncronos son de dos tipos, uno es el llamado rotor de polos salientes y el segundo conocido como rotor de polos lisos o rotor cilíndrico [2], [3], [7]. La estructura del rotor de polos salientes se muestra en figura 2.3, donde se puede observar que está formada por un gran diámetro y longitud pequeña. Su característica principal es la baja velocidad a la que opera y principalmente se utilizan en centrales hidroeléctricas. La estructura del rotor de polos lisos o rotor cilíndrico se muestra en la figura 2.4. Se puede observar que está formada por un diámetro pequeño y una longitud larga, este rotor se caracteriza por operar a alta velocidad y principalmente son movidas por turbinas térmicas. Los generadores síncronos que tienen este tipo de rotor son también conocidos como turbogeneradores por su alta velocidad de operación. Por ejemplo, la velocidad de operación de un turbogenerador de cuatro polos y 60 Hz, que son los más comunes, es de 1800 rpm. También puede operar a una velocidad de 3600 rpm con la misma frecuencia para un devanado compuesto por dos polos [3].

2.2.2. Modelo del subsistema mecánico del GS

El modelo matemático de tercer orden del generador síncrono está compuesto por un sistema mecánico y un sistema eléctrico. Para analizar el sistema mecánico, se presenta la ecuación que describe la dinámica del sistema mecánico de la máquina sincrona. Esta ecuación es consecuencia de igualar el par neto con el par mecánico, el par eléctrico y el par debido al amortiguamiento que actúan sobre el sistema com-

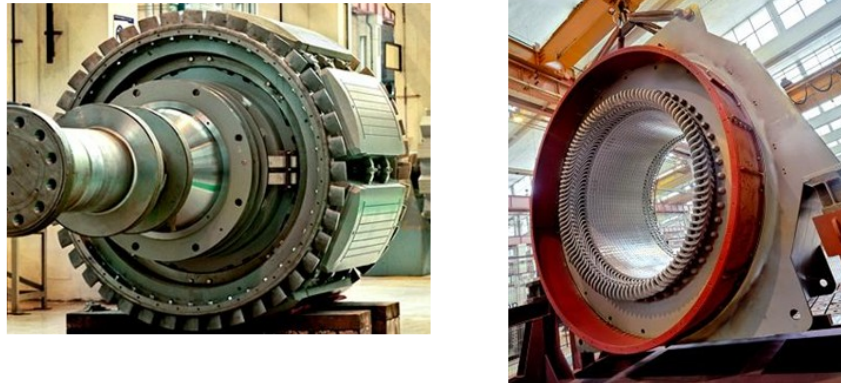


Figura 2.3: Rotor de polos saliente [25].

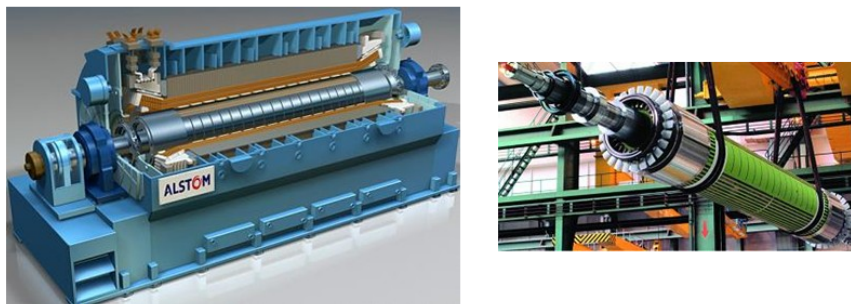


Figura 2.4: Rotor de polos lisos [25].

puesto por la turbina y el generador, por consiguiente tenemos:

$$T_a = T_m - T_e - T_D \quad (2.1)$$

donde T_a es el par neto o también conocido como par de inercia, T_m es el par mecánico, T_e es el par eléctrico y T_D es el par debido al amortiguamiento que varia linealmente con la desviación de la velocidad del rotor, por esta razón tenemos que $T_D = \frac{D}{\omega_s} \omega$ en rad/s. Además el par de inercia es igual al producto del momento de inercia J por la aceleración angular $\ddot{\theta}$, tal que:

$$T_a = J\ddot{\theta} \quad (2.2)$$

Por último sustituyendo la ecuación (2.2) en (2.1) obtenemos la ecuación que describe la dinámica del generador síncrono también conocida como ecuación de oscilación:

$$J\ddot{\theta} = T_m - T_e - \frac{D}{\omega_s}\dot{\omega} \quad (2.3)$$

donde ω es la desviación de la velocidad angular del rotor, ω_s es la velocidad síncrona, θ es la posición angular del rotor que es función del tiempo, de modo que es conveniente medir la posición y la velocidad angular del rotor con respecto a un eje de referencia que gire a la velocidad síncrona con respecto a un eje estacionario como se muestra en la figura 2.5.

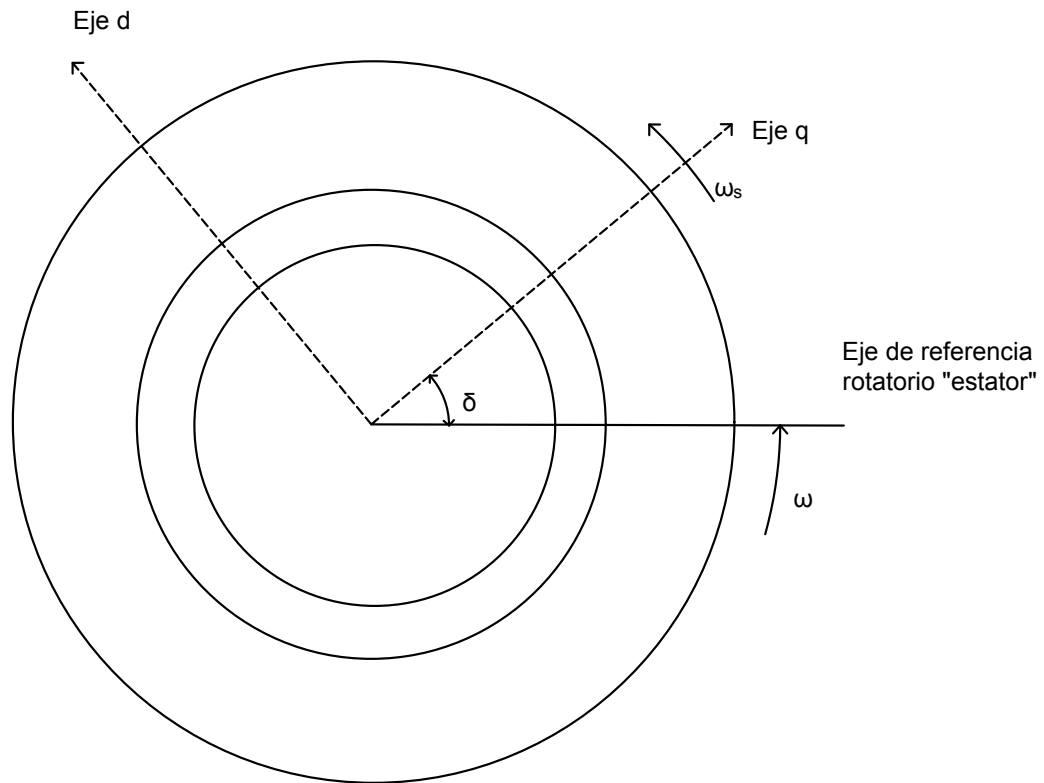


Figura 2.5: Ángulo de carga.

Entonces de la figura 2.5, teniendo en cuenta que ω_s es la velocidad síncrona y δ es el ángulo de carga, obtenemos:

$$\delta = \theta - \omega_s t \quad (2.4)$$

el resultado de derivar dos veces la ecuación (2.4) respecto al tiempo es:

$$\ddot{\delta} = \ddot{\theta} \quad (2.5)$$

en consecuencia sustituyendo (2.5) en (2.3), obtenemos la ecuación de oscilación en términos del ángulo de carga:

$$J\ddot{\delta} = T_m - T_e - \frac{D}{\omega_s}\omega \quad (2.6)$$

Además dado que la posición angular del rotor en radianes eléctricos con respecto a la velocidad síncrona es δ , mientras que ω_0 y δ_0 representan la posición inicial, de esta manera para el ángulo δ tenemos que:

$$\delta = \omega_s t - \omega_0 t - \delta_0 \quad (2.7)$$

así, derivando la ecuación (2.7) respecto al tiempo obtenemos:

$$\dot{\delta} = \omega_s - \omega_0 \quad (2.8)$$

Finalmente teniendo en cuenta que el modelo de tercer orden esta en términos de par, es conveniente multiplicar la ecuación (2.6) por la velocidad mecánica ω_m del rotor obteniendo como resultado:

$$J\omega_m\ddot{\delta} = \omega_m T_m - \omega_m T_e - \omega_m \frac{D}{\omega_s}\omega \quad (2.9)$$

es necesario resaltar que en muchos estudios de interés práctico las desviaciones de la velocidad mecánica ω_m con respecto a la velocidad síncrona ω_s son muy pequeñas, en consecuencia las variaciones también son muy pequeñas, por consiguiente la velocidad mecánica ω_m se puede remplazar por la velocidad síncrona del rotor ω_s [3], además $\omega_m T_m = P_m$ y $\omega_m T_e = P_e$, así pues obtenemos como resultado que:

$$J\omega_s\ddot{\delta} = P_m - P_e - D\omega \quad (2.10)$$

En estudios de estabilidad de máquinas síncronas, es necesario incluir la constante de inercia H . La constante de inercia H relaciona el momento de inercia J con la velocidad síncrona ω_s , y esta definida de la siguiente forma:

$$H = \frac{1}{2}J\omega_s^2 \quad (2.11)$$

de la ecuación (2.11) despejamos a $J\omega_s$ y sustituimos en la ecuación (2.10), para finalmente obtener la ecuación mecánica, tal que:

$$\frac{2H}{\omega_s} \ddot{\delta} = P_m - P_e - D\omega \quad (2.12)$$

En resumen de la ecuación (2.12) tenemos que δ es el ángulo de carga, ω es la desviación de la velocidad del rotor, ω_s es la velocidad síncrona, H es la constante de inercia, P_m es la potencia mecánica, P_e es la potencia eléctrica y D es el parámetro de factor de amortiguamiento.

2.2.3. Modelo del subsistema eléctrico del GS

A continuación analizaremos el sistema electromagnético. Tomando en cuenta que bajo la suposición de operación en condiciones balanceadas, de linealidad en el circuito magnético (no saturación), parámetros constantes (invariantes por calentamiento), fuerza magnetomotriz libre de armónicos y entrehierro constante (polos lisos), el modelo matemático del GS en el marco de referencia abc es el siguiente [24]:

$$v_a = \dot{\lambda}_a - R_a i_a \quad (2.13)$$

$$v_b = \dot{\lambda}_b - R_a i_b \quad (2.14)$$

$$v_c = \dot{\lambda}_c - R_a i_c \quad (2.15)$$

$$v_f = \dot{\lambda}_f + R_f i_f \quad (2.16)$$

donde v_a es el voltaje de la fase a , v_b es el voltaje de la fase b y v_c es el voltaje la fase c , así i_a es la corriente de la fase a , i_b es la corriente de la fase b , i_c es la corriente de la fase c y i_f es la corriente de campo, R_a es la resistencia de armadura, R_f es la resistencia de campo, por último $\dot{\lambda}_a$ es la derivada respecto al tiempo del encadenamiento de flujo de la fase a , $\dot{\lambda}_b$ es la derivada respecto al tiempo del encadenamiento de flujo de la fase b , $\dot{\lambda}_c$ es la derivada respecto al tiempo del encadenamiento de flujo de la fase c y $\dot{\lambda}_f$ es la derivada respecto al tiempo del encadenamiento de flujo de campo. Los encadenamientos de flujo en el marco abc están definidos de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \lambda_a = & -i_a(L_{aa0} + L_{al} + L_{g2}\cos 2\theta) - i_b\left(-\frac{1}{2}L_{aa0} + L_{g2}\cos\left(2\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right) \\ & - i_c\left(-\frac{1}{2}L_{aa0} + L_{g2}\cos\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right) + i_f L_{af} \cos\theta \end{aligned}$$

$$\lambda_b = -i_a \left(-\frac{1}{2} L_{aa0} + L_{g2} \cos(2\theta - \frac{\pi}{3}) \right) - i_b (L_{aa0} + L_{al} + L_{g2} \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3})) - i_c \left(-\frac{1}{2} L_{aa0} + L_{g2} \cos(2\theta) \right) + i_f L_{af} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$\lambda_c = -i_a \left(-\frac{1}{2} L_{aa0} + L_{g2} \cos(2\theta + \frac{\pi}{3}) \right) - i_b \left(-\frac{1}{2} L_{aa0} + L_{g2} \cos(2\theta) \right) - i_c (L_{aa0} + L_{al} + L_{g2} \cos(2\theta - \frac{\pi}{3})) + i_f L_{af} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})$$

$$\lambda_f = -i_a (L_{af} \cos \theta) - i_b L_{af} \cos(\theta - \frac{\pi}{3}) - i_c L_{af} \cos(\theta + \frac{\pi}{3}) + i_f L_{ff} \quad (2.17)$$

donde L_{aa0} representa la componente de la inductancia propia debido al flujo fundamental espacial del entrehierro, L_{al} es la componente debida a la dispersión de flujo de armadura, L_{af} es la inductancia mutua estator a rotor, L_{ff} es la inductancia propia del rotor, L_{g2} representa los efectos de la saliencia que varía con un ángulo doble 2θ [3].

2.2.4. Modelo matemático del GS en el marco dq0

Una herramienta muy utilizada para estudios de análisis transitorio del generador síncrono es la aplicación de una transformada. El modelo simplificado de tercer orden del generador síncrono, conviene trabajarlo utilizando la transformación $dq0$. Está transformada simplifica el análisis transitorio del generador síncrono. La transformación $dq0$ en su forma matricial se representa de la siguiente manera [3]:

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120) & -\sin(\theta + 120) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

y la transformada inversa $dq0$ se define de como:

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120) & -\sin(\theta - 120) & 1 \\ \cos(\theta + 120) & -\sin(\theta + 120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

la letra S indica la cantidad que se va a transformar, los subíndices d y q representan el eje directo y el eje de cuadratura respectivamente [3], [2]. Históricamente la

transformación es un gran aporte de André Blondel a veces esta técnica se llama; el método de Blondel de dos reacciones. Gran parte del desarrollo de la forma mostrada aquí la llevaron a cabo por R.E Doherty, C.A. Nickle, R.H Parck [7] y colaboradores [3].

Aplicando la matriz de transformación (2.18 - 2.19) al sistema electromagnético del modelo de tercer orden del generador síncrono en el marco de laboratorio abc , este puede verse en un marco de referencia $dq0$ arbitrario, donde lo más común es elegir un marco de rotación con respecto al rotor. Tomando en cuenta todo lo descrito anteriormente el modelo del generador síncrono en el marco $dq0$ es:

$$v_d = \dot{\lambda}_d - \omega\lambda_q - R_a i_d \quad (2.20)$$

$$v_q = \dot{\lambda}_q + \omega\lambda_d - R_a i_q \quad (2.21)$$

$$v_f = \dot{\lambda}_f + R_f i_f \quad (2.22)$$

donde v_d representa el voltaje del eje directo, v_q representa el voltaje del eje de cuadratura, v_f representa el voltaje de campo, $\dot{\lambda}_d, \dot{\lambda}_q, \dot{\lambda}_f$ representa la derivada respecto al tiempo del encadenamiento de flujo del eje directo, del eje de cuadratura y del encadenamiento de flujo de campo respectivamente, i_d, i_q, i_f es la corriente del eje directo, eje de cuadratura y la corriente de campo respectivamente, R_a es la resistencia de armadura, ω es la desviación de la velocidad del rotor. Los términos $\omega\lambda_q$ y $\omega\lambda_d$ son conocidos como voltajes por velocidad que es el resultado del marco de referencia $dq0$, que en el caso del GS, es la velocidad del rotor, este marco de referencia gira a una velocidad angular ω . En consecuencia los encadenamientos de flujo en el marco $dq0$ están definidos de la siguiente manera:

$$\lambda_d = -L_d i_d + L_{af} i_f \quad (2.23)$$

$$\lambda_q = -L_q i_q \quad (2.24)$$

$$\lambda_f = -L_{af} i_d + L_{ff} i_f \quad (2.25)$$

las cantidades L_d y L_q representan las inductancias síncronas en el eje directo y el eje de cuadratura [3]. Además, cabe mencionar que el sistema mecánico en el marco de laboratorio abc es el mismo, así tomando la ecuación de la sección anterior tenemos:

$$\frac{2H}{\omega_s} \ddot{\delta} = P_m - P_e - D\omega \quad (2.26)$$

En el siguiente análisis se omiten los efectos de amortiguamiento, con el objetivo de reducir el número de ecuaciones y así obtener el modelo simplificado del generador síncro. Tomando las ecuaciones (2.23)-(2.25) correspondiente a los encadenamientos de flujo y la ecuación (2.22) correspondiente a el voltaje del rotor, tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_d = -L_d \dot{i}_d + L_{af} \dot{i}_f \quad (2.27)$$

$$\lambda_q = -L_q \dot{i}_q \quad (2.28)$$

$$\lambda_f = -L_{af} \dot{i}_d + L_{ff} \dot{i}_f \quad (2.29)$$

$$v_f = \dot{\lambda}_f + R_f i_f \quad (2.30)$$

Las ecuaciones (2.27)-(2.30) nos permiten obtener el modelo matemático de tercer orden del generador síncro. Así pues, despejando $\dot{\lambda}_f$ de la ecuación (2.30):

$$\dot{\lambda}_f = v_f - R_f i_f \quad (2.31)$$

Antes de seguir con el análisis, es necesario definir las siguientes variables, que son consecuencia directa de las ecuaciones (2.27)-(2.31) [2], siendo así tenemos que:

- $E_i = L_{af} \dot{i}_f$ es el voltaje proporcional a \dot{i}_f .
- $E_f = \frac{L_{af}}{R_f} v_f$ es el voltaje proporcional a v_f .
- $E'_q = \frac{L_{af}}{L_{ff}} \lambda_f$ es el voltaje proporcional a λ_f .
- $L'_d = L_d - \frac{L_{af}^2}{L_{ff}}$ inductancia transitoria.

De manera que, en términos de las nuevas variables la ecuación (2.27) es:

$$\lambda_d = -L_d \dot{i}_d + E_i \quad (2.32)$$

para la ecuación (2.29) multiplicamos por L_{af}/L_{ff} , así obtenemos:

$$\frac{L_{af}}{L_{ff}} \lambda_f = -\frac{L_{af}^2}{L_{ff}} \dot{i}_d + i_f L_{af} \quad (2.33)$$

utilizando las variables definidas anteriormente, la ecuación (2.33) en términos de las nuevas variables es:

$$E'_q = -\frac{L_{af}^2}{L_{ff}} \dot{i}_d + E_i \quad (2.34)$$

De las variables definidas anteriormente, hacemos uso de la inductancia transitoria L'_d , esta ecuación puede escribirse de la siguiente forma:

$$\frac{L_{af}^2}{L_{ff}} = L_d - L'_d \quad (2.35)$$

finalmente sustituyendo en (2.35) en (2.34) obtenemos:

$$E'_q = E_i - (L_d - L'_d)i_d \quad (2.36)$$

De manera similar multiplicando la ecuación (2.31) por L_{af}/L_{ff} obtenemos:

$$\frac{L_{af}}{L_{ff}} \dot{\lambda}_f = v_f \frac{L_{af}}{L_{ff}} - R_f i_f \frac{L_{af}}{L_{ff}} \quad (2.37)$$

en términos de las nuevas variables la ecuación puede escribirse de la siguiente forma:

$$\dot{E}'_q = v_f \frac{L_{af}}{L_{ff}} - R_f i_f \frac{L_{af}}{L_{ff}} \quad (2.38)$$

si de la ecuación (2.38), multiplicamos el primer termino de la igual por $\frac{R_f}{R_f}$, acomodando términos y escribiendo la ecuación en términos de las nuevas variables obtenemos:

$$\dot{E}'_q = \frac{R_f}{L_{ff}} (E_f - E_i) \quad (2.39)$$

luego de la ecuación (2.36) despejamos a E_i , finalmente sustituimos en (2.39) para obtener:

$$\dot{E}'_q = \frac{R_f}{L_{ff}} (E_f - E'_q - (L_d - L'_d)i_d) \quad (2.40)$$

de la ecuación (2.40) el termino $R_f/L_{ff} = 1/T'_{d0}$, donde T'_{d0} es la constante de tiempo transitorio del eje directo en circuito abierto [3]. En consecuencia la ecuacion (2.40) puede escribirse en términos de reactancias y de la constante de tiempo transitorio de la siguiente forma:

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (E_f - E'_q - (X_d - X'_d)i_d) \quad (2.41)$$

este es el resultado final del análisis. Finalmente escribiendo las ecuaciones del mo-

delo de tercer orden del generador síncrono tenemos:

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad (2.42)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_s}{2H}(P_m - P_e - D\omega) \quad (2.43)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}}(E_f - E'_q - (X_d - X'_d)i_d) \quad (2.44)$$

las ecuaciones (2.42) a (2.44) representa el modelo matemático de tercer del generador síncrono de polos lisos. Donde E_f es el voltaje de campo, E_q es el voltaje interno del eje de cuadratura, X_d es la reactancia del eje directo, X'_d es la reactancia transitoria del eje directo, i_d es la corriente del eje directo.

Las ecuaciones (2.42) - (2.43) del modelo matemático de tercer orden del generador síncrono de polos lisos pueden escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= -\frac{\omega_s D}{2H}\omega - \frac{\omega_s}{2H}P_e + \frac{\omega_s}{2H}P_m \\ \dot{E}'_q &= \frac{X_d - X'_d}{T'_{d0}(X'_d + X_l)}\cos\delta - \frac{X_d + X_l}{T'_{d0}(X'_d + X_l)}E'_q + \frac{1}{T'_{d0}}\bar{E}_f + u \end{aligned} \quad (2.45)$$

donde δ es el ángulo de carga del rotor relativo al eje de referencia síncrono definido por la representación fasorial de la tensión infinita V_∞ , ω es la desviación de la velocidad del rotor, ω_s es la velocidad síncrona, H es la constante de inercia, P_m representa la potencia mecánica y P_e es la potencia eléctrica, T'_{d0} es la constante de tiempo transitorio del eje directo en circuito abierto, E_f es el voltaje de excitación, E_q es el voltaje interno del eje de cuadratura, X_d es la reactancia del eje directo, X'_d es la reactancia transitoria del eje directo, X_l es la reactancia de línea, i_d es la corriente del eje directo y u denota la señal de la entrada de control.

Los estados de equilibrio del generador síncrono correspondientes a la potencia eléctrica P_e y el voltaje de excitación \bar{E}_f para una entrada $u = 0$, se pueden expresar en términos del ángulo específico de carga $\bar{\delta}$ como:

$$\begin{aligned}
 \bar{\omega} &= 0 \\
 \bar{E}'_q &= \frac{X'_d + X_l}{\sin \bar{\delta}} \bar{P}_e \\
 \bar{E}'_f &= \frac{X_d - X_l}{\sin \bar{\delta}} \bar{P}_e - \frac{X_d + X'_d}{X'_d + X_l} \cos \bar{\delta} \\
 \bar{P}_m &= \bar{P}_e
 \end{aligned} \tag{2.46}$$

donde las cantidades con la barra $\bar{*}$ denotan los valores de las variables del sistema en un punto de equilibrio de operación del generador síncrono [10].

Una característica de este modelo es el estudio y análisis transitorios ante pequeñas perturbaciones durante la operación del generador síncrono bajo diferentes condiciones de operación. Algunas de estas perturbaciones son: desviación de la velocidad, desviación del ángulo de carga, cambio en la potencia mecánica, entre otras. Durante estas pequeñas perturbaciones el generador síncrono presenta oscilaciones con intervalos de tiempo muy cortos, en este intervalo de tiempo las oscilaciones se desvanecen y al pasar la perturbación la máquina se estabiliza en un punto con diferentes condiciones de operación. Durante todo este proceso uno de los estudios más importantes es la estimación de parámetros en línea del generador síncrono. La tabla 2.1 muestra las entradas y los parámetros del modelo (2.45) del generador síncrono:

2.2.5. Análisis en estado estacionario

Durante el proceso de generación de energía eléctrica lo más deseable es que el generador síncrono trabaje en estado estacionario de manera interrumpida. Este proceso inicia cuando el generador síncrono es conectado al sistema de la red eléctrica, donde el voltaje y la frecuencia en terminales de armadura son fijados por el sistema. Como consecuencia, la corriente de armadura produce un campo magnético en el entrehierro que gira a velocidad síncrona. Los campos producidos por el estator y el rotor del generador síncrono deben girar exactamente a la misma velocidad, cuya finalidad es producir un par electromagnético unidireccional estable.

Las características del generador síncrono en estado estacionario, se pueden describir por la ecuación par-ángulo, en términos de las ondas que interactúan, como

Simbolo	Descripción
D	parámetro de factor de amortiguamiento
H	parámetro constante de inercia
X_d	parámetro reactancia del eje directo
X'_d	parámetro reactancia transitoria del eje directo
T'_{d0}	parámetro constante de tiempo transitorio del eje directo
X_l	parámetro reactancia de línea
P_m	entrada de potencia mecánica
E_f	entrada de voltaje de campo
u	entrada de control

Tabla 2.1: Parámetros y entradas del modelo de tercer orden del GS

son la onda de flujo en el entrehierro y la onda de la fuerza magnetomotriz. Otra manera de analizar al generador síncrono es a través de un circuito equivalente que representa las características volt-ampere entre sus terminales como se muestra en la figura 2.6.

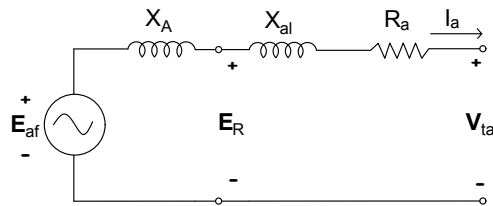


Figura 2.6: Circuito equivalente del generador síncrono.

Donde los términos X_A y X_{al} son las componentes de la reactancia síncrona X_s , $X_{al} = \omega L_{al}$ es la reactancia de dispersión de armadura, $X_A = \omega(\frac{3}{2}L_{aa0})$ es la reactancia que corresponde a la fundamental espacial del flujo de entrehierro producto de las tres corrientes de armadura y esta se define como la reactancia de la reacción de armadura. E_R es el voltaje interno generado por el flujo resultante de entrehierro,

E_{af} es el voltaje de excitación, V_{ta} es el voltaje en terminales, R_a y I_a son la resistencia y la corriente de armadura respectivamente [3].

Una de las principales características del generador síncrono es la capacidad de potencia máxima. La potencia máxima que puede desarrollar una máquina síncrona es determinada por el par máximo que se le puede aplicar a la máquina sin pérdida de sincronismo con el sistema externo conectado. La potencia de la máquina síncrona esta definida por la ecuación potencia-ángulo:

$$P = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta \quad (2.47)$$

donde X es la impedancia que separa los voltajes E_1 y E_2 y δ es el ángulo de fase por el que el voltaje E_1 adelanta al voltaje E_2 , este ángulo se le conoce como ángulo de potencia. La ecuación (2.47) es valida para cualquier voltaje E_1 y E_2 separados por una impedancia reactiva X .

2.3. Red eléctrica

En el SEP la energía eléctrica es suministrada de las estaciones generadoras a los consumidores, a través de la red eléctrica. Los componentes que integran la red eléctrica son: líneas de transmisión, transformadores y dispositivos de conmutación [2], [3].

La red eléctrica esta clasifica por tres sistemas, un sistema de transmisión, un sistema de subtransmisión, un sistema de distribución, estos se puede observarse en la figura 2.7. El sistema de transmisión interconecta las estaciones generadoras y los centros de carga. El voltaje de operación de este sistema es de 230 kV o superior. El sistema de subtransmisión transporta la energía eléctrica desde las subestaciones de transmisión a las subestaciones de distribución. En este sistema se abastecen de energía eléctrica las grandes industrias. Por último tenemos el sistema de distribución, es el encargado de abastecer de energía eléctrica a los clientes residenciales y comerciales a voltajes 120/240 V [2]. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) en México establece que la red de distribución en baja tensión opera en el rango de 240 volt y 220 volt que alimenta la carga de los usuarios de bajo consumo [26].

En este trabajo, la red eléctrica corresponde a la red de distribución señalada en el recuadro con línea punteada en color rojo de la figura 2.7. En la plataforma virtual

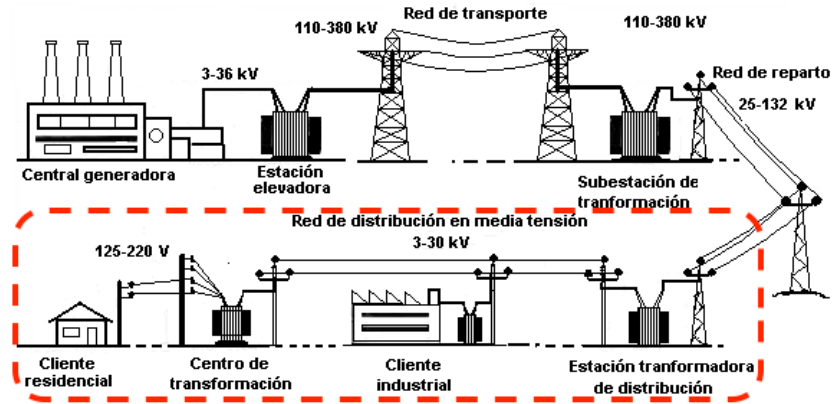


Figura 2.7: El Sistema Eléctrico de Potencia [27]

que se desarrolló en este trabajo para la evaluación de algoritmos de estimación de parámetros en línea del modelo matemático de tercer orden del generador síncrono, este sistema se va a simular por un barraje infinito. El concepto infinito en esta representación es una idealización del sistema en donde no varían ni el voltaje ni la frecuencia y significa que tiene una constante inercial tan importante que permite centrar el análisis en el generador síncrono [8], [10], [11].

2.4. Sistema en por unidad

En el SEP la central generadora, representa a todas las centrales de generación eléctrica. Estas generan energía eléctrica a diferentes voltajes y despachan potencia en el rango de megawatts (MW). Para normalizar la potencia, los ingenieros en sistemas eléctricos de potencia toman como referencia el valor más alto de una estación generadora de la red eléctrica y a partir de este valor miden el resto de las estaciones de generación. Esta normalización es lo que se conoce como sistema por unidad. Es conveniente emplear el sistema por unidad con el objetivo de normalizar las variables, simplificar y facilitar la comprensión de las características del sistema en el que se está trabajando. De manera general, el sistema por unidad está definida de la siguiente manera:

$$\text{cantidad en por unidad} = \frac{\text{cantidad real}}{\text{cantidad base}}$$

A continuación se definen algunas cantidades base para el estator (descritas por el subíndice s) [2].

- $3 - \text{fase } VA_{base}$, voltaje nominal de la máquina en VA.

- $v_{sbase} =$ tensión nominal de fase a neutro, V.
- $f_{base} =$ frecuencia nominal, Hz.
- $i_{sbase} =$ corriente nominal de línea, A.
- $Z_{sbase} = \frac{v_{sbase}}{i_{sbase}}$, ohms.
- $\omega_{base} = 2 \pi f_{base}$, radianes eléctricos/segundo.
- $\omega_{mbase} = \omega_{base} \frac{2}{p}$, radianes mecánicos/segundo.
- $L_{sbase} = \frac{Z_{sbase}}{\omega_{base}}$, henrys.
- $\lambda_{sbase} = L_{sbase} i_{sbase} = \frac{v_{sbase}}{\omega_{sbase}}$, weber vueltas.

Así desarrollando la ecuación de voltaje del estator en por unidad pu [2] [28]:

$$v_d = \dot{\lambda}_d - \omega \lambda_q - R_a i_d \quad (2.48)$$

por lo tanto, escribiendo la ecuación (2.48) de la siguiente forma:

$$v_d = p \lambda_d - \omega \lambda_q - R_a i_d \quad (2.49)$$

donde $p = \frac{d}{dt}$, dividiendo la ecuación (2.49) por $v_{sbase} = Z_{sbase} i_{sbase} = \omega_{base} \lambda_{sbase}$ (expresiones obtenidas de las cantidades base) obtenemos:

$$\frac{v_d}{v_{sbase}} = p \left(\frac{1}{\omega_{base}} \frac{\lambda_d}{\lambda_{sbase}} \right) - \frac{\lambda_q}{\lambda_{sbase}} \frac{\omega}{\omega_{base}} - \frac{R_a}{Z_{sbase}} \frac{i_d}{i_{sbase}} \quad (2.50)$$

el resultado en pu es:

$$v_{dpu} = \frac{1}{\omega_{base}} p \lambda_{dpu} - \lambda_{qpu} \omega_{pu} - R_{apu} i_{dpu} \quad (2.51)$$

luego definiendo:

$$p_{pu} = \frac{d}{dt} = \frac{1}{\omega_{base}} \frac{1}{dt} = \frac{1}{\omega_{base}} p$$

para finalmente obtener:

$$v_{dpu} = p_{pu}\lambda_{dpu} - \lambda_{qpu}\omega_{pu} - R_{apu}i_{dpu} \quad (2.52)$$

$$v_{dpu} = \dot{\lambda}_{dpu} - \lambda_{qpu}\omega_{pu} - R_{apu}i_{dpu} \quad (2.53)$$

En síntesis observamos que la ecuación original (2.49) y la ecuación (2.53) en pu no cambia son las mismas. De manera similar podemos obtener las dos ecuaciones restantes de voltaje del estator:

$$v_{qpu} = \dot{\lambda}_{qpu} + \lambda_{dpu}\omega_{pu} - R_{apu}i_{qpu} \quad (2.54)$$

$$v_{0pu} = \dot{\lambda}_{0pu} - R_{apu}i_{0pu} \quad (2.55)$$

Analizando la ecuación de potencia de salida en el marco de laboratorio de referencia $dq0$ tenemos:

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0) \quad (2.56)$$

así pues dividiendo la ecuación (2.56) por la cantidad base $VA = \frac{3}{2}v_{sbase}i_{sbase}$ la expresión en por unidad se escribe:

$$P_{pu} = v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0 \quad (2.57)$$

finalmente analizando la reactancia en por unidad tenemos que la frecuencia del estator es igual a la frecuencia base, la reactancia por unidad de un devanado es numéricamente igual a la inductancia por unidad. Para esto definimos:

$$X_d = 2\pi f L_d \quad (2.58)$$

dividiendo por $Z_{sbase} = 2\pi f_{base} L_{sbase}$, obtenemos :

$$\frac{X_d}{Z_{sbase}} = \frac{2\pi f}{2\pi f_{base}} \frac{L_d}{L_{sbase}} \quad (2.59)$$

si $f = f_{base}$, los valores por unidad de X_d y L_d son iguales. Por esta razón en el análisis de la máquina síncrona los símbolos asociados con reactancias se utilizan a menudo para denotar inductancias por unidad.

3. Estimación de Parámetros en Línea

3.1. Técnicas de estimación de parámetros en línea

Actualmente existe un gran variedad de trabajos relacionados con métodos y técnicas de estimación de parámetros en línea. Estas técnicas utilizan el modelo de tercer orden de la máquina síncrona [2], [8]. Los parámetros estimados con las diferentes técnicas que existen en la literatura nos permiten analizar, reproducir y controlar el comportamiento dinámico de la máquina síncrona. Las técnicas de estimación de parámetros utilizadas en este trabajo consideran que el modelo matemático del generador síncrono es conocido. El modelo matemático de tercer orden del GS está basado en ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) no lineales representadas en el espacio de estados. El modelo matemático de tercer orden es una herramienta ampliamente utilizada en el campo académico y la investigación. Nos facilita el estudio en estado estacionario y en estado transitorio del GS para fines de control. En este trabajo se analizó y programó el modelo antes mencionado con el objetivo de evaluar dos técnicas de estimación de parámetros en línea del GS.

Las técnicas de estimación de parámetros se clasifican en línea y fuera de línea. Las técnicas fuera de línea también conocidas como técnicas clásicas requieren que la máquina no este en funcionamiento. Entre ellas podemos mencionar prueba de corto circuito [3] que es una de las más conocidas para estimar parámetros del generador síncrono. Entre otras podemos mencionar: la respuesta a la frecuencia [12], prueba en vacío y prueba de potencia cero [17].

Las técnicas en línea nos permite analizar al GS sin alterar las condiciones de funcionamiento. Estas técnicas son de especial interés en este trabajo, asimismo representa mejor el comportamiento de operación del GS bajo diferentes condiciones de operación. Entre ellas podemos mencionar la técnica de redes neuronales artificiales [16], filtros de Kalman [17], métodos de gradiente conjugado [18], series de Hartley [19] y técnica de sensibilidad de trayectoria [29] .

3.2. Técnica Uno

3.2.1. Estimación con límites transitorios garantizados

El trabajo desarrollado en la técnica con límites transitorios garantizados resuelve el problema de identificación de parámetros, así como el equilibrio deseado durante la operación en aplicaciones de control de excitación para el generador síncrono. Esta técnica emplea el modelo matemático bajo el contexto de máquina bus infinito, que nos lleva al modelo simplificado de tercer orden del generador síncrono.

Esta técnica de identificación reside en un sistema de ecuaciones representadas en variables de estado. El sistema no lineal de novena dimensión proporciona una solución al problema de estimación de parámetros en línea. Para fines de estimación, la técnica no lineal considera a P_m como una constante, la tensión de campo se descompone en un término constante E_f y una señal u que representa la señal de control. El parámetro estimado en esta técnica es la reactancia de línea X_l . Se debe señalar que este parámetro es fundamental para el diseño en aplicaciones de control, ya que X_l cambia drásticamente su valor durante las fallas que presenta el generador síncrono al estar operando [30].

La reactancia de línea X_l tiene el enfoque de un cambio repentino inducido por una falla. Al presentarse una falla en la configuración de la red, no regresa a la condiciones de operación previo a la falla, por lo tanto, las condiciones de operación en equilibrio cambia a un nuevo estado de condiciones de operación desconocido correspondiente a un valor de X_l distinto.

3.3. Implementación

Bajo el contexto de máquina bus infinito, el estimador es válido bajo las siguientes condiciones:

1. El estado de operación de la máquina es conocido.
2. Todos los parámetros del sistema son conocidos, excepto la reactancia de línea X_l . Los límites superior X_l^M e inferior X_l^m son conocidos, $X_l^M \geq X_l \geq X_l^m$.
3. Existe al menos un punto de equilibrio conocido de la máquina.
4. El estimador de parámetros en línea es de la forma:

$$\dot{\xi} = m(\xi, x, u)$$

$$\hat{\theta} = h(\xi, x, u)$$

con $\xi \in \mathbb{R}^9$ representa las nueve ecuaciones diferenciales del estimador, $\hat{\theta} \in \mathbb{R}^3$ son las salidas del estimador, con condiciones iniciales $(x(0), \xi(0))$, donde:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \hat{\theta}(t) = \begin{pmatrix} X_l \\ x_{1\star} \\ x_{2\star} \end{pmatrix}$$

donde \star representa el punto de equilibrio para el valor de X_l y $\hat{\theta}_1 \in (X_l^M, X_l^m)$ para todo $t \geq 0$.

5. Las ecuaciones del identificador no lineal de novena dimensión son:

$$\tau \dot{\xi}_1 = -\xi_1 - a_1 x_3 \sin x_1$$

$$\tau \dot{\xi}_2 = -\xi_2 + a_3 \cos x_1 - a_4 x_3$$

$$\tau \dot{\xi}_3 = -\xi_3 + x_2$$

$$\tau \dot{\xi}_4 = -\xi_4 - b_2 x_2 + P$$

$$\tau \dot{\xi}_5 = -\xi_5 + \frac{\bar{E}_f}{T'_{d0}} - \frac{1}{T'_{d0}} x_3 + u$$

$$\tau \dot{\xi}_6 = -\xi_6 - \frac{1}{\tau} x_2$$

$$\tau \dot{\xi}_7 = -\xi_7 - \frac{1}{\tau} x_3$$

$$\dot{\xi}_8 = -\gamma_1 \left[\xi_1 \left(\xi_6 + \frac{1}{\tau} x_2 - \xi_4 - \xi_1 \xi_8 \right) + \xi_2 \left(\xi_7 + \frac{1}{\tau} x_3 - \xi_5 - \xi_2 \xi_8 \right) \right] ((\xi_8 - \eta^M)(\xi_8 - \eta^m))$$

$$\dot{\xi}_9 = -\gamma_2 \{ a^2(\xi_8) b^2(\xi_8) + \xi_9^2 [(\xi_9 - 1)2 - b^2(\xi_8)] \} (\xi_9 - 1) [1 + b(\xi_8) - \xi_9]$$

(3.1)

donde τ, γ_1, γ_2 son constantes de ajuste positivas [30].

6. El estimador tiene las siguientes salidas:

$$\begin{aligned}
\hat{\theta}_1 &= \frac{1}{\xi_8} - X'_d \\
\hat{\theta}_2 &= \arccos \left[\frac{1}{b(\xi_8)} (\xi_9 - 1) \right] \\
\hat{\theta}_3 &= \frac{P}{a_1 \xi_8} \frac{b(\xi_8)}{\sqrt{b^2(\xi_8) - (\xi_9 - 1)^2}}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

donde

$$a(\xi_8) = P \left[(X_d - X'_d) + \frac{1}{\xi_8} \right] \frac{2H}{w_0 V_\infty E_f}, \quad b(\xi_8) = \frac{X_d - X'_d}{E_f} V_\infty \xi_8 \tag{3.3}$$

de manera que las constantes son:

$$a_1 = \frac{w_0 V_\infty}{2H}, \quad a_3 = \frac{X_d - X'_d}{T'_{d0}} V_\infty, \quad a_4 = \frac{X_d - X'_d}{T'_{d0}} \tag{3.4}$$

así que las condiciones iniciales del estimador son:

$$\xi_1(0) \in \mathfrak{R}, i=1, \dots, 7, \quad \xi_8(0) \in [\eta^m, \eta^M], \quad \xi_9(0) \in [1, 1 + b(\xi_8(0))]$$

ademas los limites para η^m y η^M son:

$$\eta^M \triangleq \frac{1}{X'_d + X_l^m}, \quad \eta^m \triangleq \frac{1}{X'_d + X_l^M}$$

el diagrama de bloques 3.1, muestra la implementación de la técnica anteriormente descrita.

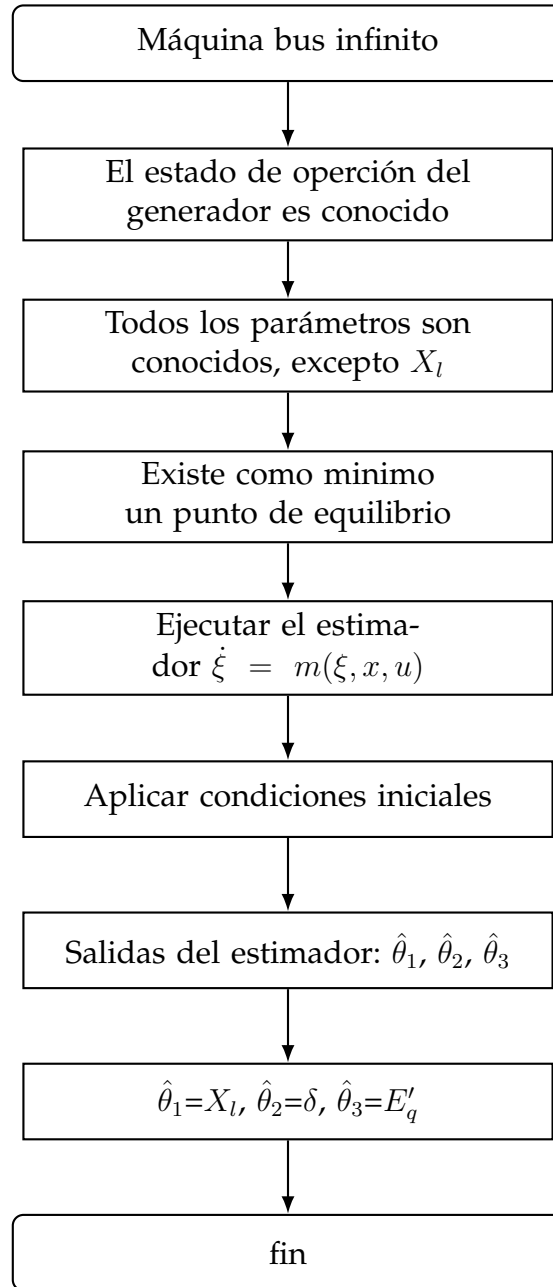


Figura 3.1: Diagrama de bloques de la técnica uno.

3.4. Técnica Dos

3.4.1. Sistemas de identificación no lineal

Los sistemas no lineales son muy importantes en todas las áreas del conocimiento. Se utilizan en el análisis de sistemas económicos, sistemas sociales y sistemas físicos, estos últimos son de especial interés en la ciencia e ingeniería [31]. El estudio de un modelo nos ayuda a entender mejor el comportamiento y funcionamiento de dichos sistemas. En ingeniería los modelos matemáticos se emplean para el diseño de nuevos procesos y análisis de los procesos existentes en diversas áreas del conocimiento.

Una de las herramientas más utilizadas para el estudio y el análisis en sistemas de identificación no lineal son: Los mínimos Cuadrados No Lineales (MCNL) [32]. En *Matlab Simulink*[®] existen funciones que trabajan con métodos de regresión no lineal. Todas las bibliotecas usadas por estas funciones utilizan un algoritmo iterativo en el que intenta encontrar los parámetros que minimicen las diferencias entre los datos observados y la respuesta de un modelo matemático. Para comprender a profundidad sobre estos sistemas expondremos el ejemplo de una función $f(x, \theta)$ [33].

Supongamos que tenemos una función que depende de una variable independiente x y un conjunto de parámetros θ como se muestra en la figura 3.2. Es decir $y = f(x, \theta)$, no olvidemos que esta función modela un resultado conocido \hat{y} .

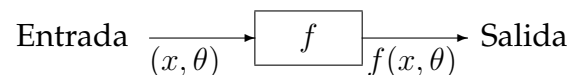


Figura 3.2: Representación de una función como una máquina.

El objetivo es encontrar un conjunto de parámetros θ que resulte en la y más cercana posible a \hat{y} . Una forma de medir que tan cerca estamos de \hat{y} es calcular la suma de los cuadrados de los residuos. Un residuo se define como la diferencia entre y y \hat{y} . Esto se puede expresar de la siguiente forma:

$$r_i = \hat{y}_i - y_i \quad (3.5)$$

el subíndice i es el número de datos analizados, entonces la suma de los cuadrados de los residuos se expresa de la siguiente forma:

$$S = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 = \sum_i r_i^2 \quad (3.6)$$

El conjunto de parámetros θ que minimiza la suma S entre el y calculado a partir de nuestro modelo matemático y los valores conocidos \hat{y} , son los mejores parámetros estimados de las N funciones del sistema.

Una forma de encontrar el valor mínimo de una función es calcular su derivada con respecto a una variable independiente. En este caso, queremos encontrar el valor de θ que minimice la función S . Esto puede escribirse como.

$$\frac{\partial S}{\partial \theta_j} = \frac{\partial}{\partial \theta_j} \sum_{i=1}^N r_i^2 \quad (3.7)$$

El subíndice j significa que la función puede depender de más de un parámetro respecto a la variable independiente x . En este caso, es necesario derivar parcialmente a la función con respecto a cada uno de los parámetros, como sabemos los valores críticos se obtiene igualando la derivada con cero. Entonces, la ecuación anterior se escribe como:

$$\frac{\partial S}{\partial \theta_j} = \frac{\partial}{\partial \theta_j} \sum_{i=1}^N [\hat{y}_i - f(x_i, \theta_j)]^2 = 0 \quad (3.8)$$

además para obtener un máximo o un mínimo de la función tenemos que derivar la ecuación (3.8), el resultado al derivar es.

$$2 \sum_{i=1}^N [\hat{y}_i - f(x_i, \theta_j)] \frac{\partial}{\partial \theta_j} f(x_i, \theta_j) = 0 \quad (3.9)$$

El resultado del cálculo anterior afecta a los términos de los i valores de x y a los términos de los j valores de θ . Estas derivadas se pueden expresar con un jacobiano con el símbolo \mathbf{J} , este representa una matriz que contiene todas las derivadas parciales de primer orden de una función con respecto a cada uno de los parámetros. El resultado al introducir el \mathbf{J} en nuestra ecuación es:

$$2\mathbf{J}^T [\hat{y}_i - f(x_i, \theta_j)] = 0 \quad (3.10)$$

A continuación se discuten dos métodos para resolver el desarrollo de las ecuaciones (3.8)-(3.12), con el objetivo de encontrar los parámetros que mejor se ajusten a la función $f(x, \theta)$. Un método para resolver la ecuación (3.8) es el gradiente descendente [32] que consta de un algoritmo de optimización empleado para encontrar mínimos locales de una función. Este método es ampliamente utilizado, pero puede ser bastante lento. Una alternativa es el método de Gauss-Newton [31], [33].

3.5. Método de Gauss-Newton

En este método, obtenemos una nueva combinación de parámetros de la siguiente forma:

$$\theta_{n+1} = \theta_n + h_{GN} \quad (3.11)$$

donde θ_n es un el parámetro inicial, θ_{n+1} es el incremento del parámetro inicial correspondientes a la pendiente aproximada y h_{GN} representa el tamaño de paso. La función $f(x, \theta)$ se aproxima usando la serie de Taylor de primer orden.

$$f(\theta_{n+1}) = f(\theta_n) + \frac{\partial f(\theta_n)}{\partial \theta_n} h_{GN} \quad (3.12)$$

aplicando el Jacobiano en la ecuación (3.12), podemos escribir la ecuación de la siguiente forma:

$$f(\theta_{n+1}) = f(\theta_n) + \mathbf{J}h_{GN} \quad (3.13)$$

ademas $f(x, \theta)$ se aproximo con la serie de Taylor $f(\theta_{n+1})$, en consecuencia $f(x, \theta) \approx f(\theta_{n+1})$. Así usando la ecuación (3.10) podemos escribir:

$$\mathbf{J}^T [\hat{y}_i - f(\theta_{n+1})] = 0 \quad (3.14)$$

usando la ecuación (3.13) y la ecuación (3.14), podemos llegar a la siguiente expresión:

$$\mathbf{J}^T [\hat{y}_i - f(\theta_n) - \mathbf{J}h_{GN}] = 0 \quad (3.15)$$

reorganizando términos el resultado es:

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} h_{GN} = \mathbf{J}^T [\hat{y}_i - f(\theta_n)] \quad (3.16)$$

finalmente despejamos el tamaño de paso llegamos a la siguiente ecuación:

$$h_{GN} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T [\hat{y}_i - f(\theta_n)] \quad (3.17)$$

En este método es necesario especificar una estimación inicial para los parámetros, así como un criterio de máxima iteraciones o un valor de tolerancia. Para propósitos de este trabajo el método de Gauss-Newton no es suficiente, pero es necesario para entender el método de Levenberg-Marquardt [31], [33].

3.6. Método de Levenberg-Marquardt

Este método se formuló inicialmente en 1944 por Kenneth Levenberg, EE.UU., 1919-1973, y se desarrolló por Donald W. Marquardt, EE.UU., 1929-1997 [31]. El método cambia entre el método de gradiente descendente y el método de Gauss-Newton dependiendo de qué tan cerca este de la solución. De la ecuación (3.17) tenemos que $f(\theta_n) = y_i$, así el método de Levenberg-Marquardt se expresa como:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) h_{LM} = \mathbf{J}^T [\hat{y}_i - y_i] \quad (3.18)$$

Donde \mathbf{I} es una matriz identidad y λ es un factor en cada iteración. Este factor es el que permite cambiar entre el método de Gauss-Newton y el método de gradiente descendente. Cuando λ tiene un valor pequeño, el método toma un paso de Gauss-Newton, y cuando λ tiene un valor grande, el método toma un paso de gradiente descendente. Gracias a la combinación de los dos métodos el algoritmo de Levenberg-Marquardt es más eficiente, también depende en gran medida de la selección de la estimación inicial, así como el factor de λ . A continuación se presenta el algoritmo del método de Levenberg-Marquardt [31], [34].

1. Definir un $\theta_0 \in \mathfrak{R}^n$; hacer $\lambda=0.01, k=1$ y $x_k \leftarrow \theta_0$
2. Calcular $h_{LM} = -(\mathbf{J}(x_k)^T \mathbf{J}(x_k) + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}(x_k)^T (\hat{y}(x_k) - f((x_k)))$
3. si $\|(\hat{y}(x_k) - f((x_k))) + h_{LM}\|^2 < \|(\hat{y}(x_k) - f((x_k)))\|^2$ entonces:
 - si $h_{LM} \leq \text{Tol}$, parar: problema resuelto
 - si $h_{LM} > \text{Tol}$, hacer: $\lambda \leftarrow \lambda/10, k \leftarrow k + 1, x_{k+1} \leftarrow x_k + h_{LM}$
 - y volver al paso 2.
 - de otro modo hacer:
 - $\lambda \leftarrow 10 \cdot \lambda$
 - volver al paso 2 sin tener que calcular $\mathbf{J}(x_k)$
 - fin

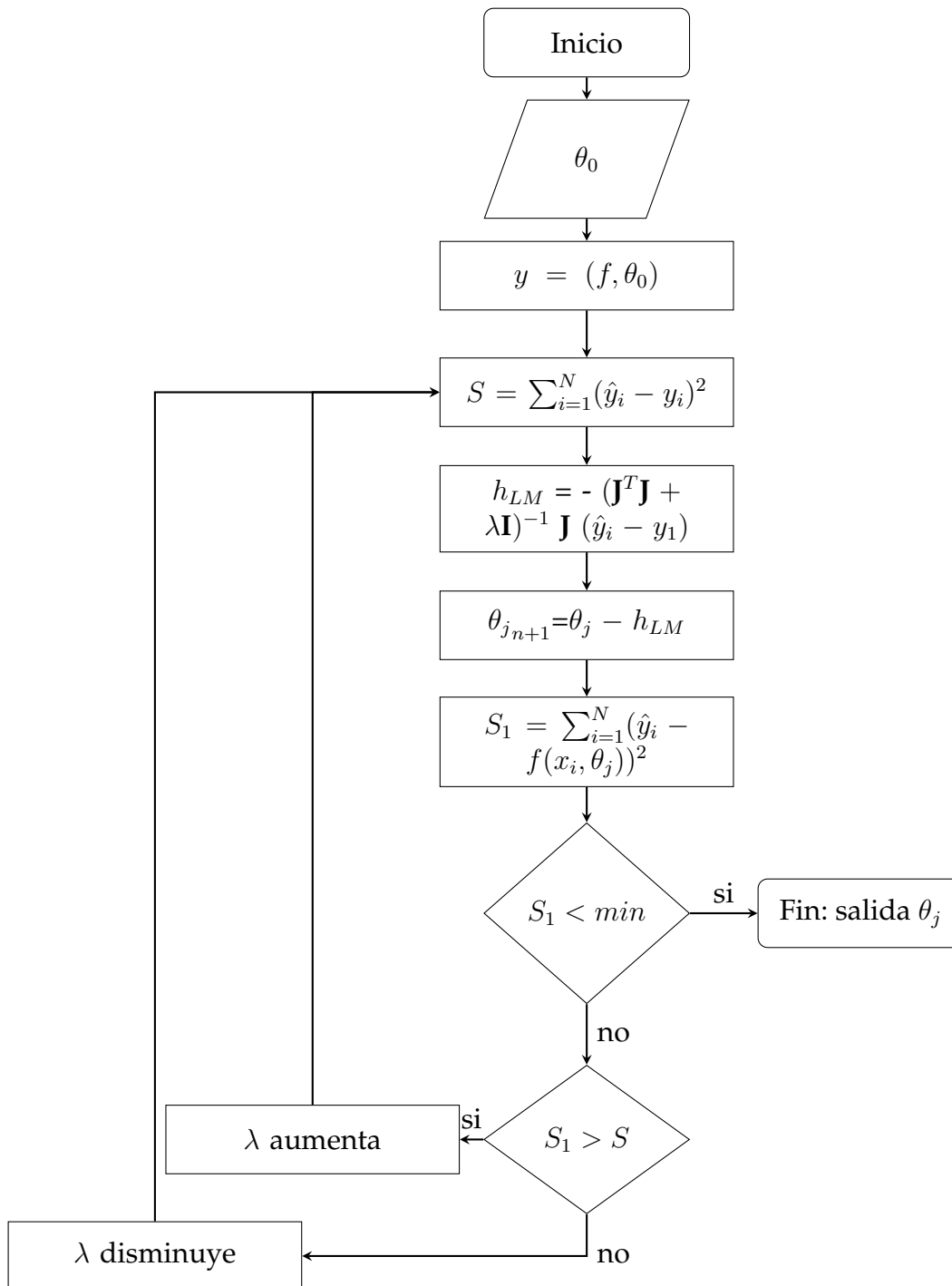


Figura 3.3: Algoritmo de Levenberg-Marquardt.

3.7. Implementación

El siguiente ejemplo describe la implementación de el método de Levenberg-Marquardt [31], con el objetivo de estimar los parámetros $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ de la siguiente función:

$$f(x) = \frac{\theta_1}{1 + \theta_2 e^{t\theta_3}} \quad (3.19)$$

del algoritmo Figura 3.3, necesitamos definir un valor inicial para cada parámetro $[\theta_0]$, además la Tabla (3.1) muestra 12 mediciones con su respectivo valor, con estas mediciones escribimos los residuales de la ecuación (3.19), así para este ejemplo tenemos 12 funciones residuales, una función por cada medición.

x_i	y_i
1	4.027701700
2	3.307261752
3	2.714265768
4	2.226634989
5	1.825962525
6	1.496953584
7	1.226933657
8	1.005422763
9	0.823771072
10	0.674849796
11	0.552790772
12	0.452768282

Tabla 3.1: Mediciones y valores para la función $f(x)$.

Entonces de la Tabla 3.1, escribimos las funciones para cada uno de los datos proporcionados, de este modo obtenemos:

$$f(1) = \theta_1/(1 + \theta_2 e^{\theta_3}) - 4,027701700$$

$$f(2) = \theta_1/(1 + \theta_2 e^{2\theta_3}) - 3,307261752$$

$$f(3) = \theta_1/(1 + \theta_2 e^{3\theta_3}) - 2,714265768$$

.

.

.

$$f(12) = \theta_1/(1 + \theta_2 e^{12\theta_3}) - 0,4527682822$$

las funciones residuales se utilizan para calcular S en el proceso dos, en el siguiente bloque necesitamos la matriz Jacobiana, teniendo en cuenta las 12 mediciones y los 3 parámetros obtenemos como resultado una matriz Jacobiana de 12 renglones por 3 columnas:

$$J = \begin{pmatrix} J_{1,\theta_1} & J_{1,\theta_2} & J_{1,\theta_3} \\ J_{2,\theta_1} & J_{2,\theta_2} & J_{2,\theta_3} \\ J_{3,\theta_1} & J_{3,\theta_2} & J_{3,\theta_3} \\ J_{4,\theta_1} & J_{4,\theta_2} & J_{4,\theta_3} \\ J_{5,\theta_1} & J_{5,\theta_2} & J_{5,\theta_3} \\ J_{6,\theta_1} & J_{6,\theta_2} & J_{6,\theta_3} \\ J_{7,\theta_1} & J_{7,\theta_2} & J_{7,\theta_3} \\ J_{8,\theta_1} & J_{8,\theta_2} & J_{8,\theta_3} \\ J_{9,\theta_1} & J_{9,\theta_2} & J_{9,\theta_3} \\ J_{10,\theta_1} & J_{10,\theta_2} & J_{10,\theta_3} \\ J_{11,\theta_1} & J_{11,\theta_2} & J_{11,\theta_3} \\ J_{12,\theta_1} & J_{12,\theta_2} & J_{12,\theta_3} \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

con la ecuación (3.20), se calcula h_{LM} en el proceso tres, este valor se resta a nuestros parámetros iniciales en el proceso cuatro. En el siguiente proceso calculamos S_1 con el nuevo valor obtenido de cada parámetro.

$$\begin{aligned}
J_{1,\theta_1} &= 1/(1 + \theta_2 e^{\theta_3}) \\
J_{1,\theta_2} &= -\theta_1 e^{\theta_3} / (1 + \theta_2 e^{\theta_3})^2 \\
J_{1,\theta_3} &= -\theta_1 \theta_2 e^{\theta_3} / (1 + \theta_2 e^{\theta_3})^2 \\
J_{2,\theta_1} &= 1/(1 + \theta_2 e^{2\theta_3}) \\
J_{2,\theta_2} &= -\theta_1 e^{2\theta_3} / (1 + \theta_2 e^{2\theta_3})^2 \\
J_{2,\theta_3} &= -2\theta_1 \theta_2 e^{2\theta_3} / (1 + \theta_2 e^{2\theta_3})^2 \\
&\cdot \\
&\cdot \\
&\cdot \\
J_{11,\theta_1} &= 1/(1 + \theta_2 e^{11\theta_3}) \\
J_{11,\theta_2} &= -\theta_1 e^{11\theta_3} / (1 + \theta_2 e^{11\theta_3})^2 \\
J_{11,\theta_3} &= -11\theta_1 \theta_2 e^{11\theta_3} / (1 + \theta_2 e^{11\theta_3})^2 \\
J_{12,\theta_1} &= 1/(1 + \theta_2 e^{12\theta_3}) \\
J_{12,\theta_2} &= -\theta_1 e^{12\theta_3} / (1 + \theta_2 e^{12\theta_3})^2 \\
J_{12,\theta_3} &= -12\theta_1 \theta_2 e^{12\theta_3} / (1 + \theta_2 e^{12\theta_3})^2
\end{aligned}$$

los siguientes bloques deciden que hacer con el valor de S_1 , las opciones son valores booleanos: si el valor de $S_1 < \min$ es verdadero el programa termina, entonces los valores de los parámetros estimados son los que mejor ajustan a la ecuación (3.19). Si la decisión es falsa el algoritmo pasa al siguiente bloque y compara $S_1 > S$: si la opción es verdadera el valor de λ incrementa y si la opción es falsa el valor de λ disminuye, en ambos casos el algoritmo regresa al proceso dos, por consiguiente el algoritmo realiza con ciclos iterativos hasta que se cumpla la condición $S_1 < \min$.

Finalmente la Tabla 3.2. muestra los resultados obtenidos de los parámetros $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ que mejor se ajustan a la función (3.19), la Tabla 3.3 muestra los valores verdaderos y el error relativo en la estimación.

Estimación de parámetros			
Iteración	θ_1	θ_2	θ_3
1	1.0018512563e+01	8.2416853769e-01	4.5740461134e-01
2	9.9846273473e+00	1.1672526082e+00	2.1364974060e-01
3	1.0044346172e+01	1.2434479565e+00	2.4405782213e-01
4	1.0582912721e+01	1.3324009629e+00	2.4858911981e-01
5	1.3608650133e+01	1.9350937846e+00	2.3066388674e-01
6	1.5236767310e+01	2.2639638217e+00	2.3027015623e-01
7	1.6389245259e+01	2.4947748183e+00	2.2827503620e-01
8	1.7305270487e+01	2.6793648156e+00	2.2659269003e-01
9	2.2483295973e+01	3.7270090281e+00	2.1689426068e-01
10	2.5293428395e+01	4.2978897139e+00	2.1647997915e-01
11	2.7293923894e+01	4.7030603971e+00	2.1528515613e-01
12	2.8883521640e+01	5.0255219789e+00	2.1433584421e-01
13	3.7759831655e+01	6.8281306278e+00	2.0901280430e-01
14	4.2599331935e+01	7.8122320669e+00	2.0871402082e-01
15	4.6041045570e+01	8.5114679038e+00	2.0801944218e-01
16	4.8767992645e+01	9.0657454544e+00	2.0748158618e-01
17	6.3566210919e+01	1.2074572146e+01	2.0457027637e-01
18	7.1687854200e+01	1.3726597670e+01	2.0435274336e-01
19	7.7432202627e+01	1.4894756370e+01	2.0395270755e-01
20	1.0289331258e+02	2.0073479992e+01	2.0205021417e-01
21	1.4756076694e+02	2.9159961843e+01	2.0064199623e-01
22	2.0003160440e+02	3.9834516262e+01	2.0015490908e-01
23	2.3804728352e+02	4.7568379105e+01	2.0002049292e-01
24	2.4931409184e+02	4.9860462003e+01	2.0000083880e-01
25	2.4999727088e+02	4.9999444812e+01	2.0000000581e-01
26	2.4999998340e+02	4.9999996630e+01	2.0000000009e-01
27	2.4999998421e+02	4.9999996795e+01	2.0000000009e-01

Tabla 3.2: Resultado de los parámetros con el método de Levenberg-Marquardt.

Valor y error relativo de los parámetros			
Parámetro	Valor real	Valor estimado	ϵ_r
θ_1	250	249.99998421	6.320000000e-6
θ_2	50	49.999996795	6.400000000e-6
θ_3	0.2	0.20000000009	5.000000000e-8

Tabla 3.3: Error relativo de los parámetros estimados.

Los resultados obtenidos de los parámetros estimados de la Tabla 3.2 son reemplazados en la ecuación (3.19), en consecuencia la ecuación es:

$$f(x) = \frac{249,99998421}{1 + 49,999996795e^{0,20000000009t}} \quad (3.21)$$

La Figura 3.4 muestra la gráfica de las mediciones de la Tabla 3.1 y de la gráfica de la ecuación (3.21), en la figura se observa el resultado de la estimación empleando el método y el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

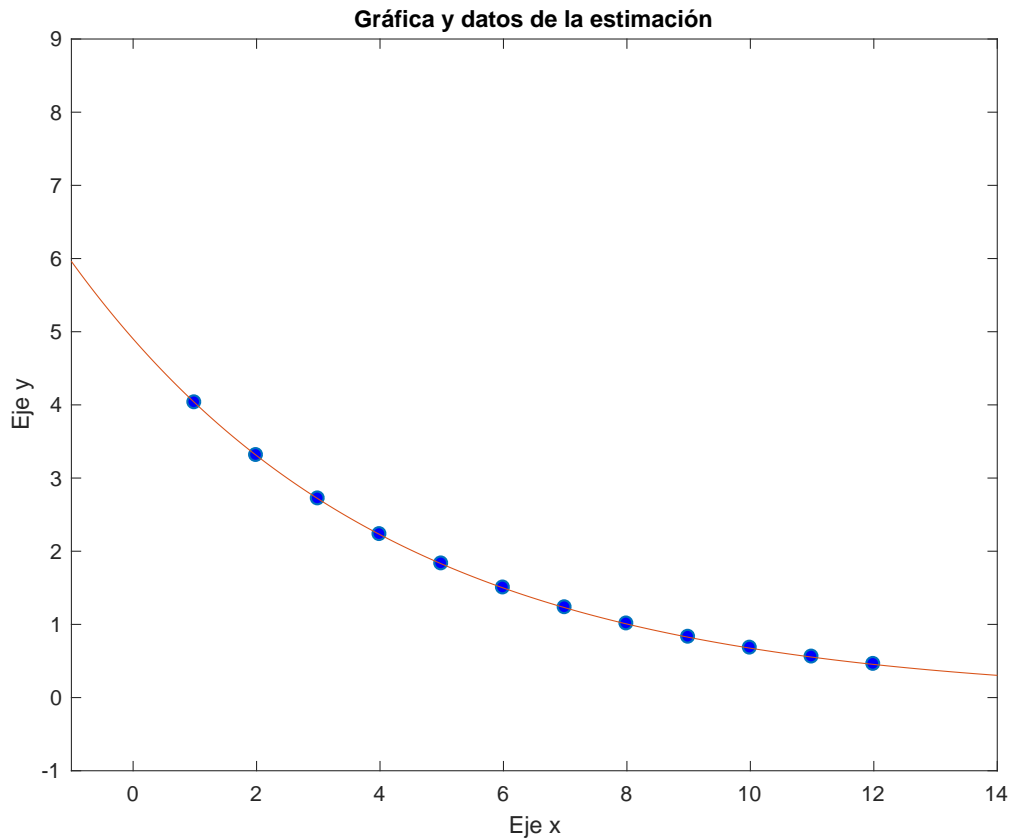


Figura 3.4: Gráfica de los resultados con el método de Levenberg-Marquardt.

3.8. Ecuaciones para mediciones de señales en línea

En esta técnica los parámetros del generador síncrono son estimados directamente de una estructura no lineal a partir de dos funciones [35]. La primer función es la potencia activa, la segunda función es voltaje en terminales. Las señales se obtienen de las respuestas en simulación con el modelo matemático de tercer orden del GS.

Escribiendo el modelo matemático de tercer orden descrito por las ecuaciones (2.42) - (2.44) tenemos:

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \omega - \omega_s \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega_s}{2H} P_m - P_e - D\omega \\ \dot{E}'_q &= \frac{1}{T'_{d0}} (E_f - E'_q - (X_d - X'_d)i_d)\end{aligned}\tag{3.22}$$

donde:

$$E'_q = \frac{X_{ad}}{X_f} w_0 \lambda_f, \quad X'_d = X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f}, \quad T'_{d0} = \frac{X_f}{R_f w_0}, \quad E_f = X_{ad} \frac{V_f}{R_f}$$

teniendo en cuenta que: la salida del par eléctrico, potencia activa, potencia reactiva, voltaje en terminales y la corriente están descritas de la siguiente forma:

$$T_e = \frac{V_d i_d + V_q i_q}{w} \cong \frac{V_d i_d + V_q i_q}{w_0}\tag{3.23}$$

$$\begin{aligned}P &= w_0 T_e = V_d i_d + V_q i_q \\ Q &= V_q i_q - V_d i_d \\ V_t &= \sqrt{V_q^2 + V_d^2} \\ I &= \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V_t}\end{aligned}\tag{3.24}$$

donde:

$$\begin{aligned}V_d &= V_t \sin \delta = V_\infty \sin \delta - X_l i_q \\ V_q &= V_t \cos \delta = V_\infty \cos \delta + X_l i_d\end{aligned}\tag{3.25}$$

o bien:

$$\begin{aligned}V_d &= X_q i_q - X_l i_q = (X_q - X_l) i_q \\ V_q &= -(X_d - X_l) i_d + X_{ad} i_f\end{aligned}\tag{3.26}$$

así pues las corrientes del eje directo y del eje de cuadratura son:

$$\begin{aligned}
 i_d &= I \sin(\delta + \Phi) \\
 i_q &= I \cos(\delta + \Phi) \\
 I^2 &= i_d^2 + i_q^2 \\
 i_d &= \frac{E'_q - V_q}{X'_d} = \frac{E'_q - V_t \cos \delta}{X'_d} \\
 i_q &= \frac{V_d}{X_q} = \frac{V_t \sin \delta}{X_d}
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

Las unidades de las ecuaciones (3.23)-(3.27) están representadas en por unidad *pu*, excepto la constante de tiempo. Esto nos permite obtener las ecuaciones de potencia activa y de voltaje en terminales, que se va utilizar para estimar los parámetros del generador síncrono. A continuación se discute el análisis para obtener las ecuaciones antes mencionadas.

Usando la potencia activa P , la potencia reactiva Q de las ecuaciones (3.25) y las ecuaciones (3.23), podemos resolver para i_d y i_q , así obtenemos:

$$\begin{aligned}
 i_d &= \frac{P \sin \delta + Q \cos \delta}{V_t} \\
 i_q &= \frac{P \cos \delta - Q \sin \delta}{V_t}
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

De las ecuaciones (3.26) V_d y V_q las sustituiremos en P , Q de las ecuaciones (3.24) para obtener:

$$P = V_d i_d + V_q i_q = i_d i_q (X_q - X_d) + i_f i_q X_{ad} \tag{3.29}$$

Así al sustituir los valores de i_d y i_q de la ecuación (3.28) en la ecuación (3.29) obtenemos la función de la potencia activa.

$$P = \frac{(P^2 - Q^2) \cos \delta \sin \delta + PQ(1 - 2 \sin^2 \delta)}{V_t^2} (X_q - X_d) + \frac{i_f (P \cos \delta - Q \sin \delta)}{V_t} X_{ad} \tag{3.30}$$

La ecuación (3.30) nos permite estimar los parámetros X_d , X_q , X_{ad} del generador síncrono. Una análisis similar nos permite obtener una ecuación para voltaje en terminales.

Usando V_t, I, Φ de las ecuaciones (3.24) y la ecuación (3.26), para obtener:

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2 = X_d^2 i_d^2 + X_q^2 i_q^2 + X_{ad}^2 i_f^2 - 2X_d X_{ad} i_f i_d \quad (3.31)$$

Finalmente utilizando i_d y i_q de la ecuación (3.28) y sustituyendo en la ecuación (3.31) obtenemos la función de voltaje en terminales:

$$\begin{aligned} V_t^2 = & X_d^2 \left(\frac{P \sin \delta + Q \cos \delta}{V_t} \right)^2 + X_q^2 \left(\frac{P \cos \delta - Q \sin \delta}{V_t} \right)^2 \\ & + X_{ad}^2 i_f^2 - 2X_d X_{ad} i_f \left(\frac{P \sin \delta + Q \cos \delta}{V_t} \right) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Todas las variables de las ecuaciones (3.30) y (3.32) son medibles, además el ángulo de carga δ y la corriente de campo I_f son conocidos. Estas funciones son utilizadas para estimar los parámetros en línea del GS aplicando el método y el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

4. Desarrollo de la plataforma virtual

El programa *Matlab Simulink*[®], por sus abreviaturas *MATrix LABborary*, es una herramienta de software matemático ampliamente usado en universidades y centros de investigación en todo el mundo. Este software proporciona un lenguaje de programación propio, el lenguaje .m permite al usuario el manejo y manipulación matricial, representación de datos y funciones, implementación de algoritmos, creación de interfaces de usuario con GUI y la comunicación con programas en otros lenguajes de programación, incluso permite la comunicación con otros dispositivos [36].

Matlab Simulink[®] incluye aplicaciones adicionales como *Simulink* para proyectos de simulación de una manera rápida y sencilla. GUIDE y App Designer nos permiten realizar interfaces de usuario. Las funcionalidades de *Matlab Simulink*[®] se pueden ampliar con herramientas de aplicaciones de bloques de *Simulink* y las toolboxes [37].

Cada herramienta mencionada, nos ofrece un modo de trabajo diferente, así como un conjunto de funcionalidades ligeramente distintas. La elección de la herramienta de trabajo está en función de los objetivos del proyecto y el entorno del trabajo al que esté acostumbrado el desarrollador.

El desarrollo de la plataforma virtual se realizó con la herramienta de Interfaz Gráfica de Usuario, del inglés Graphical User Interface (GUI) de *Matlab Simulink*[®], este programa informático nos permite el uso de imágenes y objetos gráficos para una mejor representación de la información al usuario. El objetivo principal de la interfaz gráfica consiste en facilitar un entorno visual sencillo y amigable que permita una comunicación amigable entre el ordenador y el usuario [38].

4.1. Metodología de la plataforma virtual

La metodología se logra gracias a los siguientes puntos, cada uno de estos puntos conforman una etapa importante en el desarrollo de la plataforma virtual.

- Conocimiento de las especificaciones técnicas del hardware y software del entorno *Matlab Simulink*[®].
- Definir el objetivo principal de la plataforma virtual.
- Desarrollar varios prototipos del diseño que satisfaga el objetivo principal de la plataforma virtual.
- Evaluar los prototipos desarrollados en el entorno gráfico.
- Implementar el diseño desarrollado en la interfaz.
- Comprobar el funcionamiento de la plataforma virtual.

El empleo de GUI nos permitió un desarrollo rápido de los prototipos diseñados en la plataforma virtual, las aplicaciones desarrolladas tienen herramientas de gráficos, facilitando el uso de los programas simulados. El uso del lenguaje gráfico nos permitió de una manera muy rápida y fácil evaluar el funcionamiento de varios prototipos en la representación de resultados. Cabe considerar, que el código de la interfaz gráfica se genera de una manera automática, en ocasiones se dificulta el funcionamiento que se quiere conseguir con las aplicaciones desarrolladas. Esto nos obligó a investigar a profundidad el buen funcionamiento de funciones, que nos permitió un buen desarrollo de la plataforma virtual.

Por último, es importante destacar que la interface de usuario es de uso constante en el ámbito de la informática y las telecomunicaciones. La herramienta GUI de *Matlab Simulink*[®] es un entorno que combina el uso de lenguaje y el uso del entorno gráfico para el desarrollo de proyectos en el campo de la ingeniería.

4.2. Arquitectura de la plataforma virtual

El diseño en la arquitectura de cada interfaz programada en la plataforma virtual es la codificación, distribución y la posición de cada uno de las figuras, así como

cada uno de sus componentes interactivos mostrados en la plataforma virtual al ejecutar el programa [39], [40]. La Figura 4.1, muestra el diagrama esquemático de la distribución de bloques para el GS en la plataforma virtual, la ventana consta de tres botones. El botón de opción múltiple nos permite elegir entre dos o más opciones para visualizar resultados del comportamiento del GS, el botón de ayuda o información muestra las ecuaciones programadas o muestra una breve explicación del botón de acción, el botón de ejecución o visualización ejecuta programas para simular los estados de operación GS, por último el área de visualización muestra los resultados de una manera cualitativa.

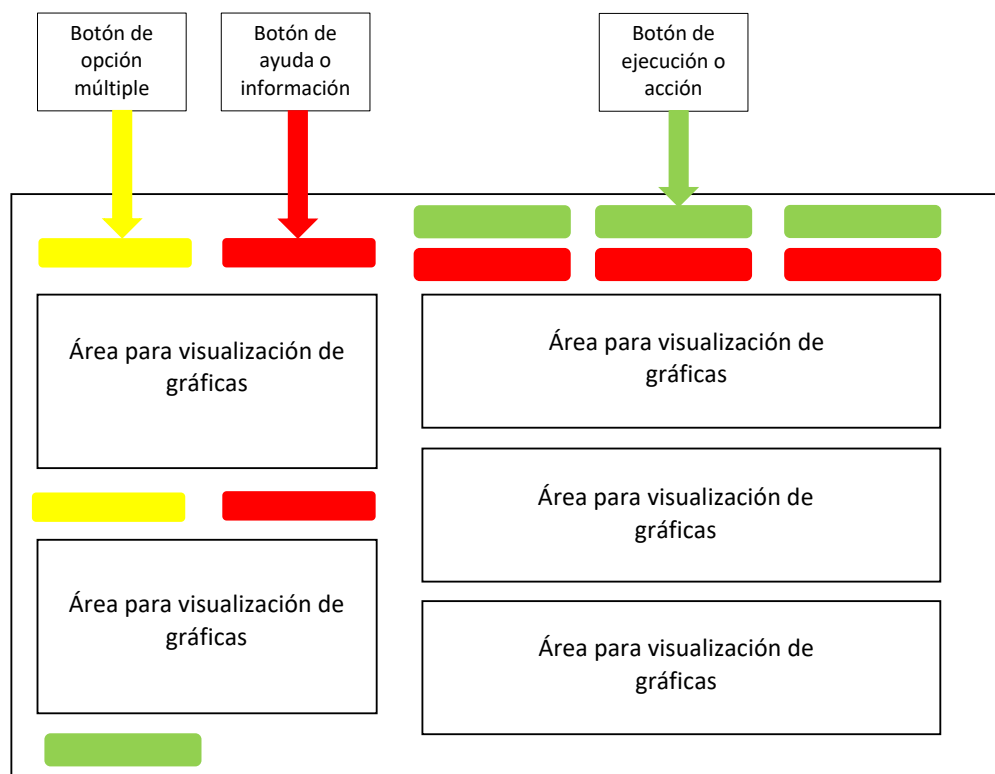


Figura 4.1: Arquitectura y distribución de la plataforma virtual del GS.

La Figura 4.2 muestra el diagrama esquemático de la distribución de bloques para las dos técnicas de estimación de parámetros de la plataforma virtual. La técnica uno consta de dos áreas de visualización gráfica, además se incluyen cuatro áreas para visualizar el resultado del parámetro X_l y el punto de equilibrio del GS. El diagrama esquemático para la técnica dos consta de tres áreas de visualización gráfica, donde se observan las gráficas de los tres parámetros estimados.

Completo el diagrama esquemático de la arquitectura de la plataforma virtual, se procedió a configurar cada uno de los archivos m . Se configuró cada función y cada uno de los algoritmos con los callbacks mediante el código generado por GUIDE.

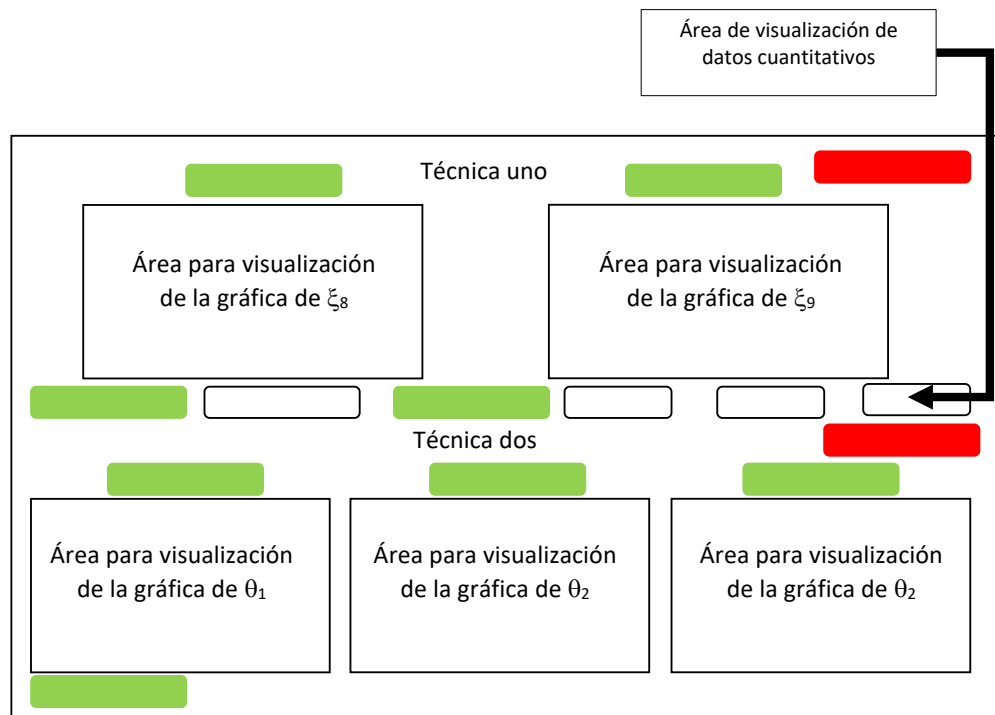
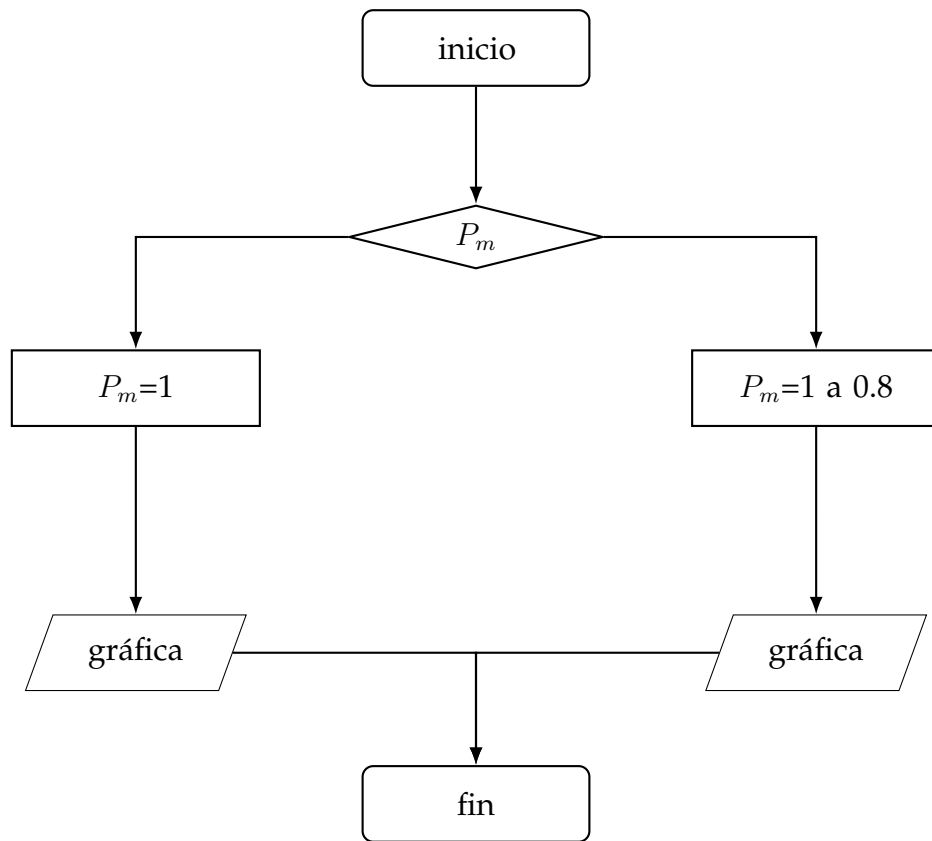


Figura 4.2: Arquitectura y distribución de las técnicas en la plataforma virtual.

En los diagramas de flujo Figura 4.3 - Figura 4.7, se observan las rutinas de los programas de la plataforma virtual, estos muestran las acciones de cada área asignada en los diagramas esquemáticos de la plataforma virtual.

Todos los programas son incluidos y distribuidos en cada uno de los diagramas esquemáticos, con el objetivo de tener una interface gráfica de la plataforma virtual y mostrar los resultados de una manera sencilla y rápida.

Figura 4.3: Diagrama de flujo de P_m

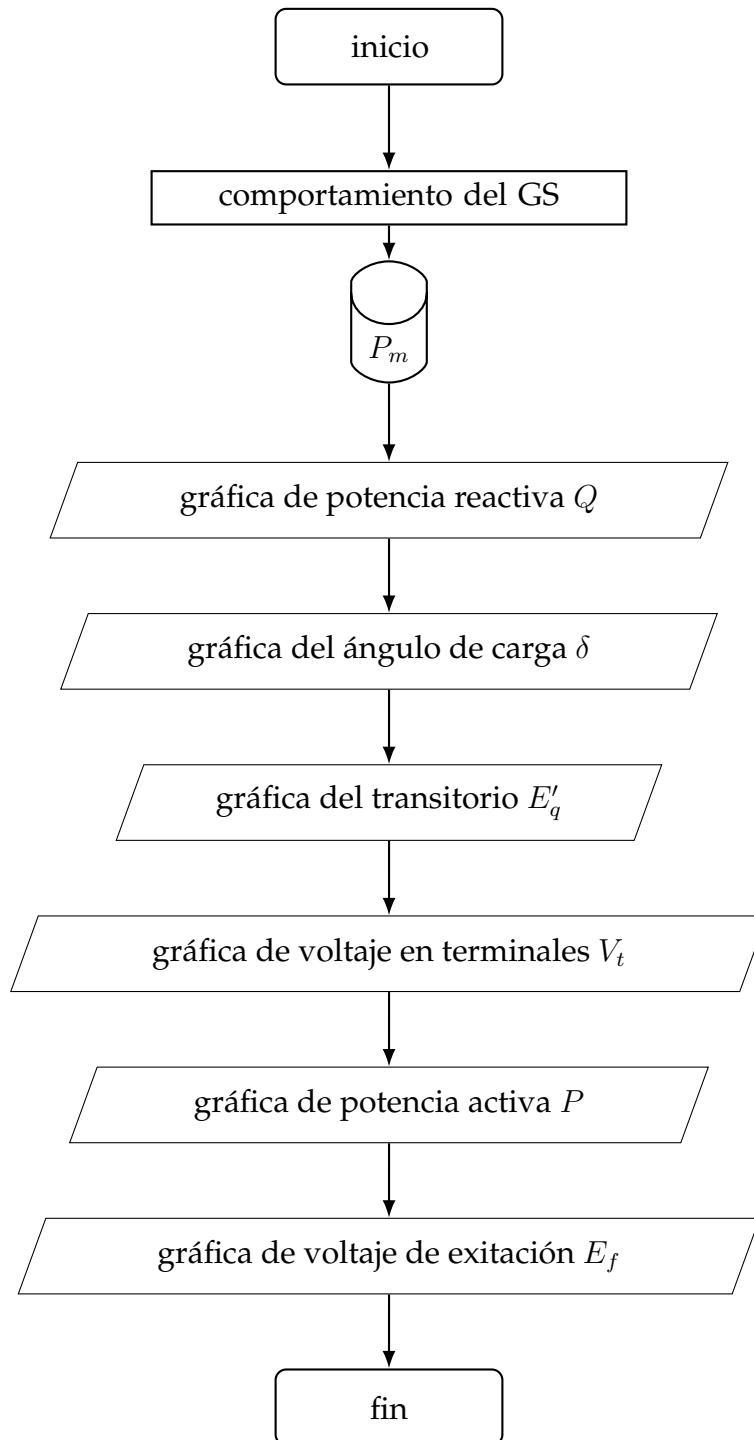


Figura 4.4: Diagrama de flujo del comportamiento del GS

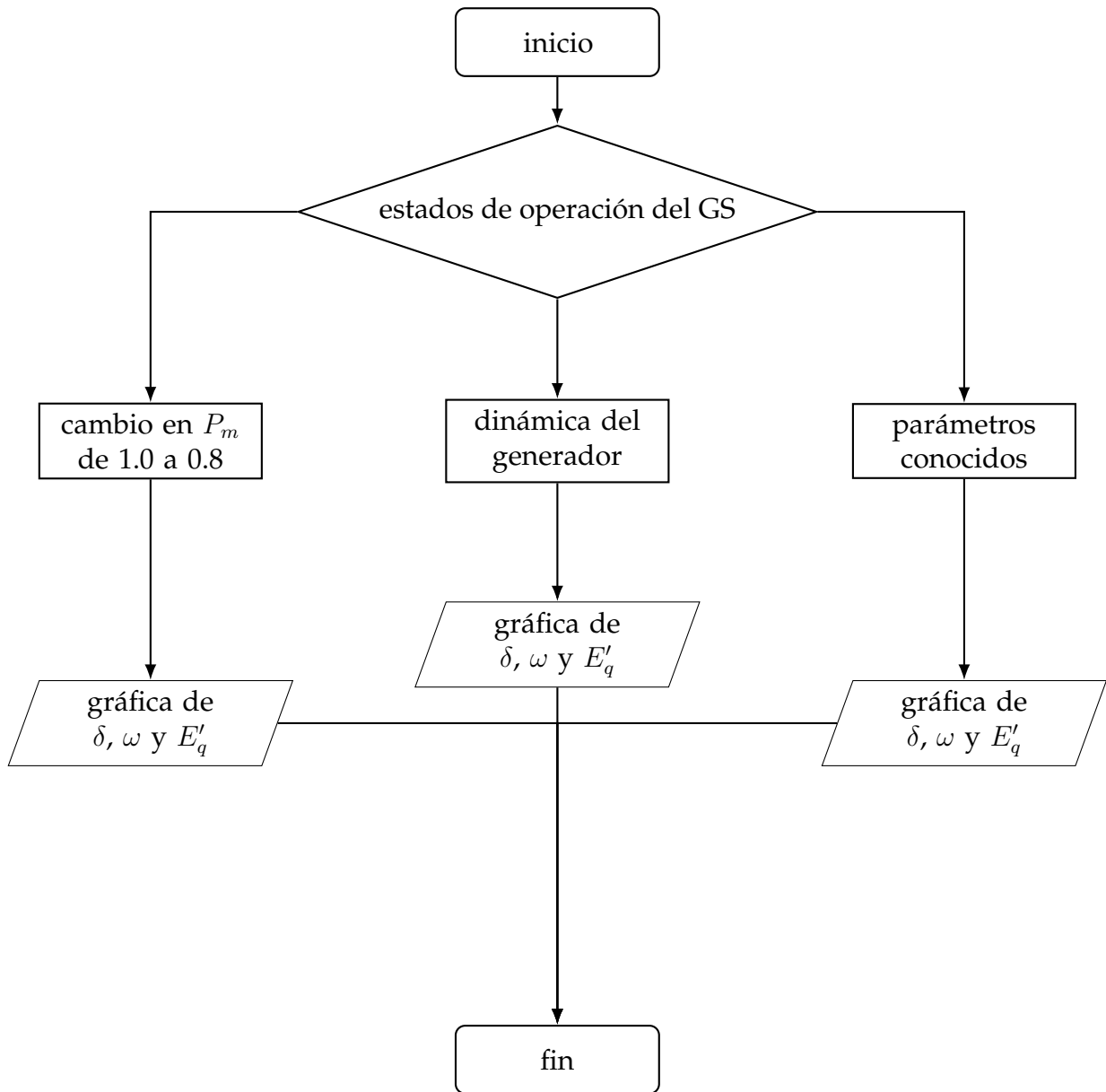


Figura 4.5: Diagrama de flujo de estados de operación GS

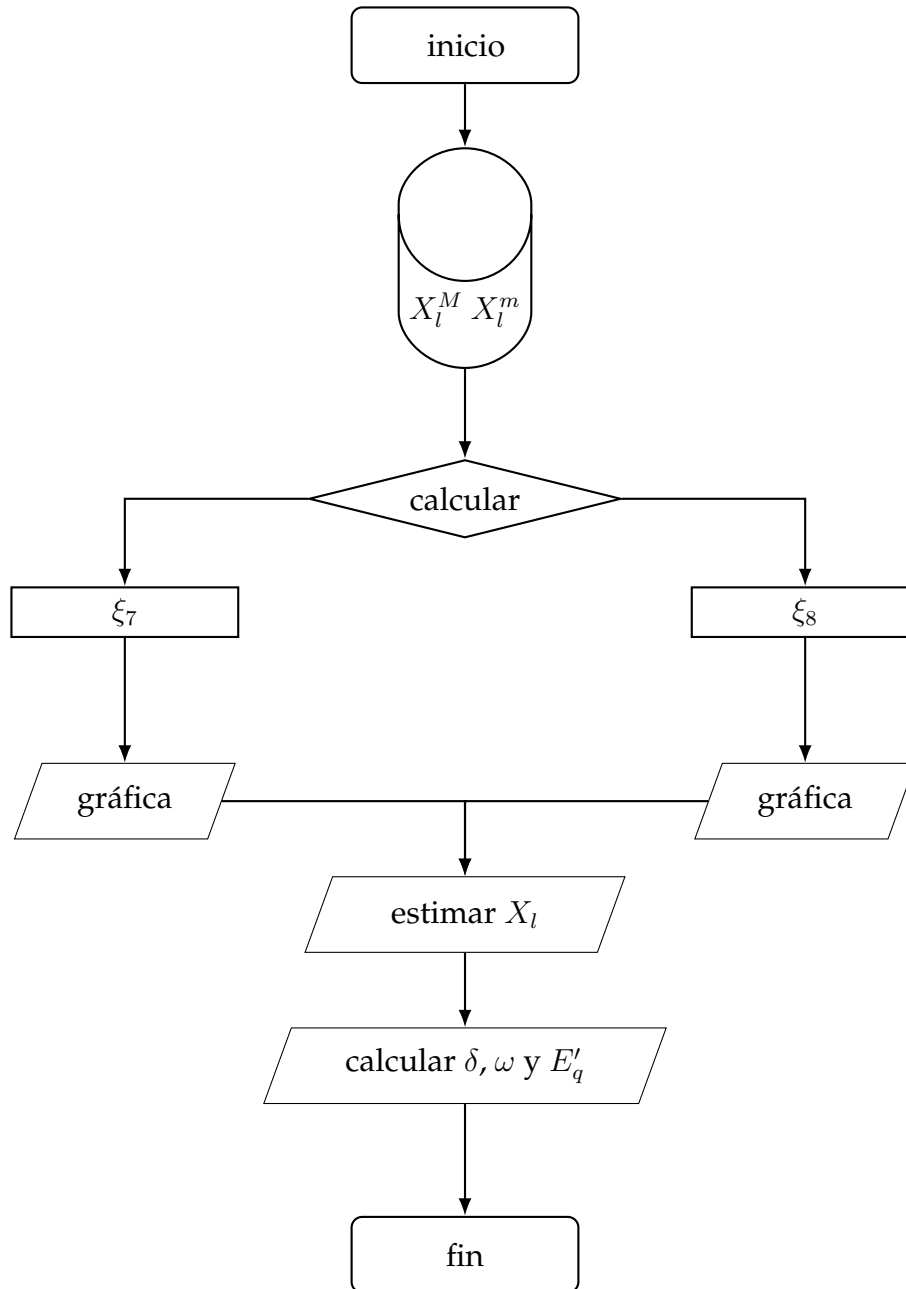


Figura 4.6: Diagrama de flujo de la técnica con límites transitorios garantizados

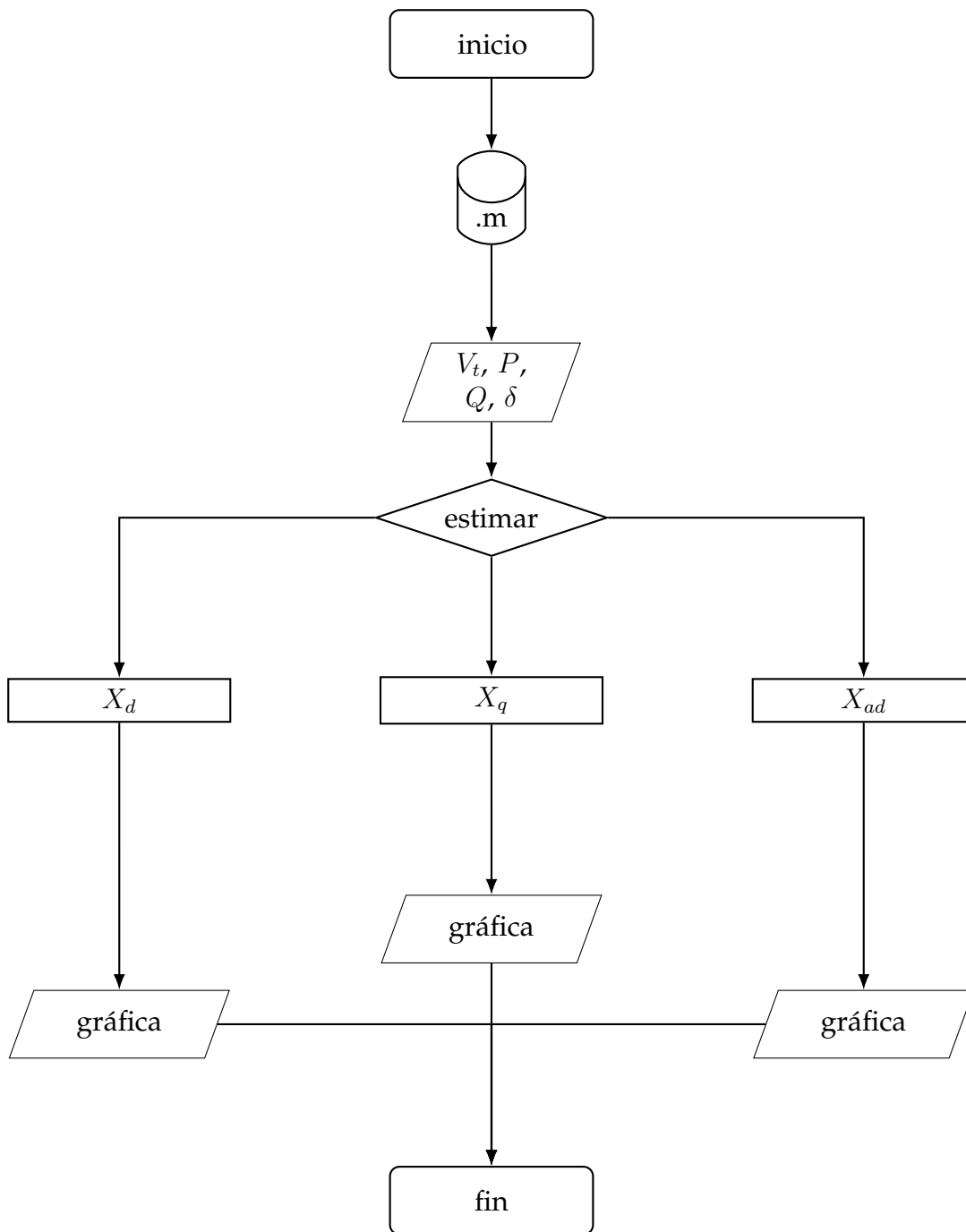


Figura 4.7: Diagrama de flujo de la técnica de señales en línea

4.3. Interfaz gráfica de la plataforma virtual

La interfaz gráfica de la plataforma virtual permite al usuario ver el estudio de la dinámica del generador síncrono y el análisis realizado bajo el contexto de máquina bus infinito, así como los parámetros estimados de cada una de las técnicas de estimación de parámetros en línea. Todos los resultados se muestran de una manera sencilla y rápida, sin la necesidad de tener un amplio conocimiento del modelo de tercer orden de polos lisos de la máquina síncrona.

4.4. Información para el usuario

El complemento del presente manuscrito consta de una carpeta que contiene los archivos necesarios para que cualquier usuario pueda ejecutar la plataforma virtual. Este archivo es capaz de correr en cualquier versión R2021a anterior o posterior de *Matlab Simulink*[®].

Dentro de la carpeta PlataformaMBI, se encuentra el archivo ejecutable con nombre; PlataformaVirtualMBI, al ejecutarlo podemos ver portada Figura 4.8 de la Plataforma Máquina Bus Infinito (PortadaMBI).

Una vez que el usuario accede a la pantalla principal de la interfaz, puede elegir continuar o si lo prefiere podrá salir de la interfaz.

Para poder ver los resultados del análisis del modelo de tercer orden del generador síncrono es necesario oprimir el botón continuar. En esta pantalla Figura 4.9 de la PlataformaMBI tenemos las siguientes opciones.

- Representación gráfica de la Potencia mecánica, el usuario podrá elegir la gráfica con $P_m = 1$ o el cambio de P_m de 1.0 a 0.8.
- Representación gráfica del comportamiento dinámico al cambiar P_m de 1.0 a 0.8 de Q , E_f , P_e , δ , E'_q y V_t .
- Representación gráfica de los estados de operación del modelo de tercer orden del generador síncrono; Parámetros constantes, dinámica y cambio en P_m de 1.0 a 0.8.

Podemos observar en la interfaz gráfica Figura 4.9 que para cada opción tenemos un botón de ayuda o de información para que el usuario tenga todo lo necesario para



Figura 4.8: Portada de la Plataforma Virtual

comprender la simulación del modelo de tercer orden del generador síncrono. Esta interfaz cuenta con un botón de técnicas que al presionarlo nos muestra la interfaz gráfica de las dos técnicas evaluadas en este trabajo.

En la figura 4.10 podemos ver las opciones de cada una de las técnicas de estimación de parámetros en línea programada para el modelo de tercer orden del generador síncrono. La interfaz cuenta con títulos de cada una de las técnicas y con un botón de ayuda sobre los resultados obtenidos. En esta interfaz gráfica de técnicas tenemos las siguientes opciones.

- Representación gráfica de ξ_8 y ξ_8 del identificador no lineal.
- Opción de para estimar la reactancia de línea del identificador no lineal.
- Opción para calcular el punto de equilibrio del modelo de tercer orden del generador síncrono correspondiente al valor de la reactancia de línea estimada.

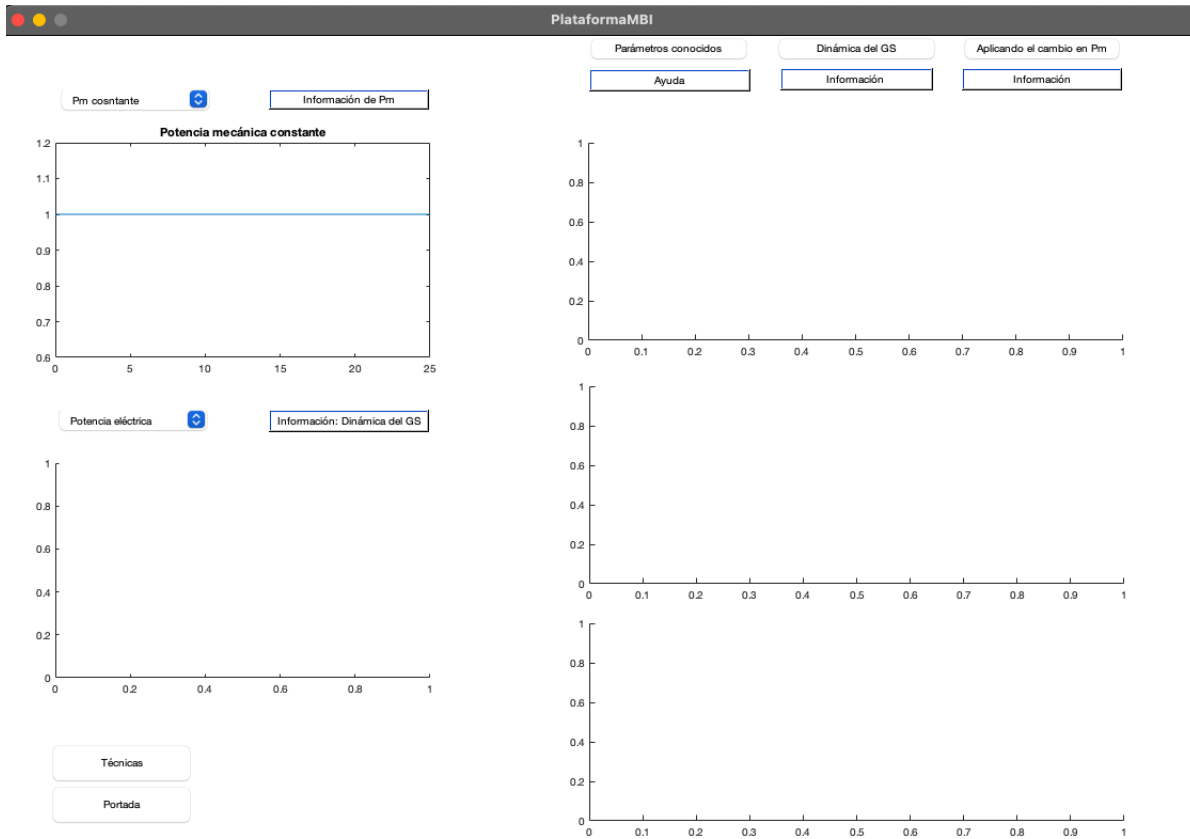


Figura 4.9: Interfaz de la PlataformaMBI

- Representación gráfica de los valores estimados de X_{dr} , X_q y X_{ad} para la técnica de datos experimentales en línea.

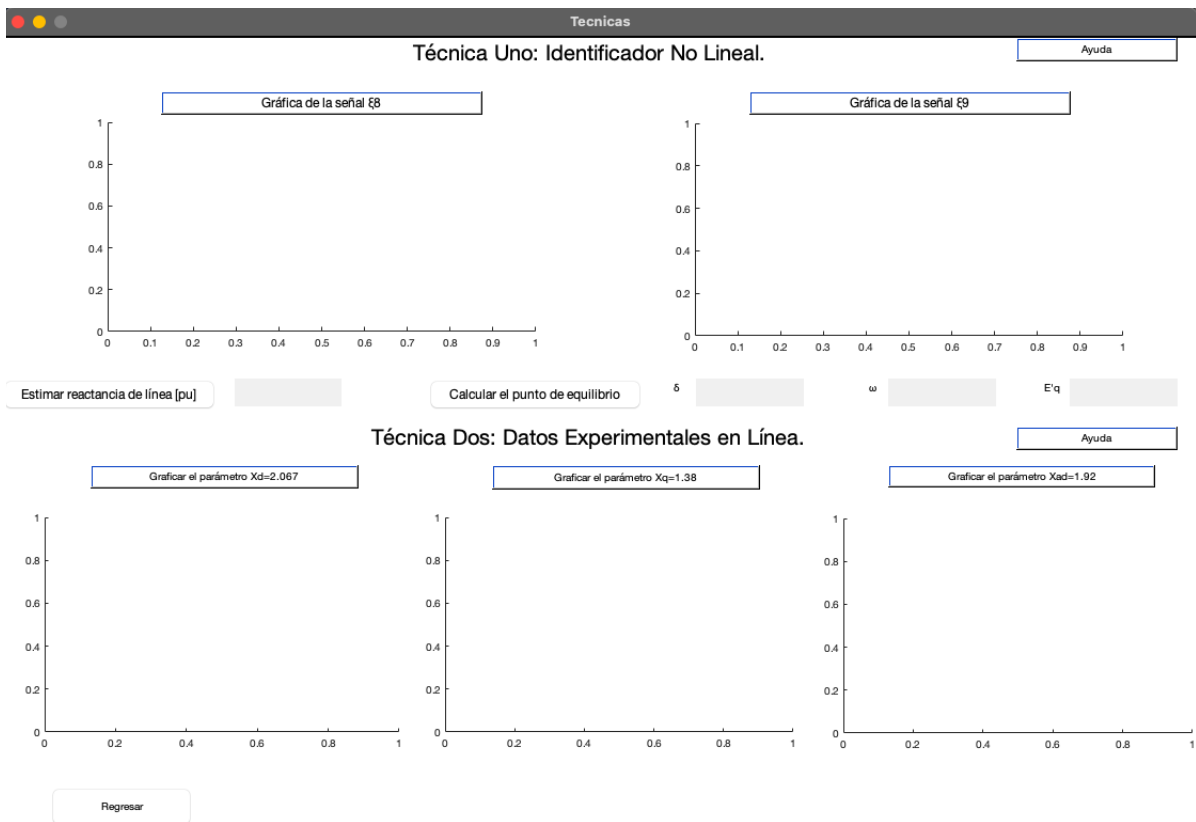


Figura 4.10: Interfaz de las técnicas de estimación de parámetros

5. Resultados

5.1. Simulación de la máquina bus infinito

Los resultados obtenidos del modelo de tercer orden del generador síncrono bajo el contexto de máquina bus infinito se exponen en el presente capítulo. El generador síncrono conectado a un bus infinito, también conocido con el nombre de barraje infinito consiste en representar al generador síncrono como una fuente de frecuencia y voltaje constante.

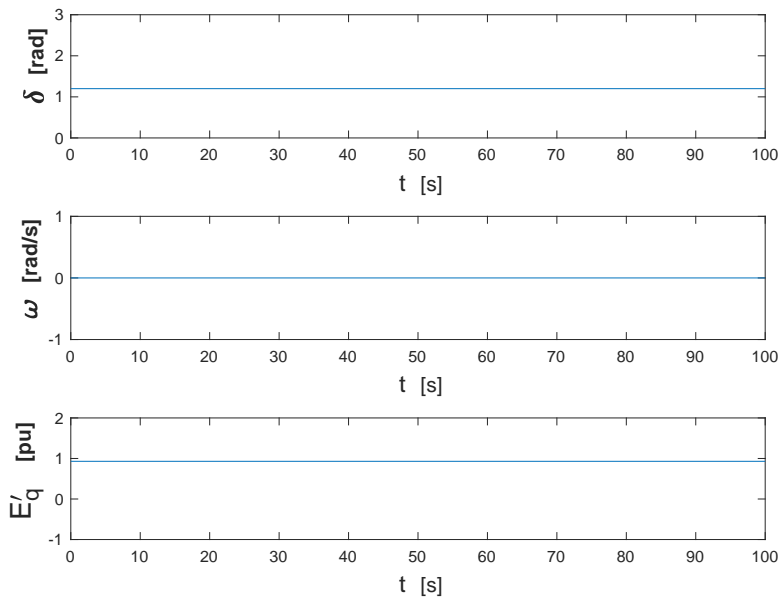


Figura 5.1: Simulación del GS en estado estacionario.

La simulación del generador síncrono con parámetros conocidos $D, H, X_d, X'_d, T'_{d0}, X_l$, con potencia mecánica igual a la potencia eléctrica $\bar{P}_m = \bar{P}_e$ con un valor igual a 1.0 en pu, una entrada de control igual a cero $u = 0$, el voltaje de excitación bajo estas condiciones de operación tiene un valor de $\bar{E}_f = 1,2994$ en pu.

El valor de las variables de estado en equilibrio $(\bar{\delta}, \bar{\omega}, \bar{E}'_q)$, que definen el estado en que se encuentra operando el generador síncrono se muestra en la figura 5.1. De las gráficas podemos observar que el generador síncrono está operando en estado estacionario con un punto de equilibrio igual a $\bar{\delta}=1.2, \bar{\omega}=0, \bar{E}'_q=0.93$.

Durante la operación en estado estacionario del generador síncrono, este es perturbado, aplicando un cambio en la potencia mecánica de 1.0 a 0.8 en pu. El cambio de potencia mecánica se muestra la figura 5.2. Esta gráfica nos representa un cambio suave definido por un polinomio de Bézier [10].

$$P_m = \begin{cases} \bar{P}_{m_1} & \text{for } 0 \leq t \leq T_1 \\ \bar{P}_{m_1} + (\bar{P}_{m_2} - \bar{P}_{m_1})\phi(t, T_1, T_2) & \text{for } T_1 \leq t \leq T_2 \\ \bar{P}_{m_2} & \text{for } t > T_2 \end{cases} \quad (5.1)$$

donde:

$$\phi(t, T_1, T_2) = \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right)^5 \left[r_1 - r_2 \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right) + r_3 \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right)^2 - \dots - r_6 \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right)^5 \right]$$

con $T_1=5$ s, $T_2=8$ s, $\phi(T_1, T_2, T_2) = 0$, $\phi(T_2, T_1, T_2) = 1$, $r_1=252$, $r_2=1050$, $r_3=18000$, $r_4 = 1575$, $r_5=700$ y $r_6=126$.

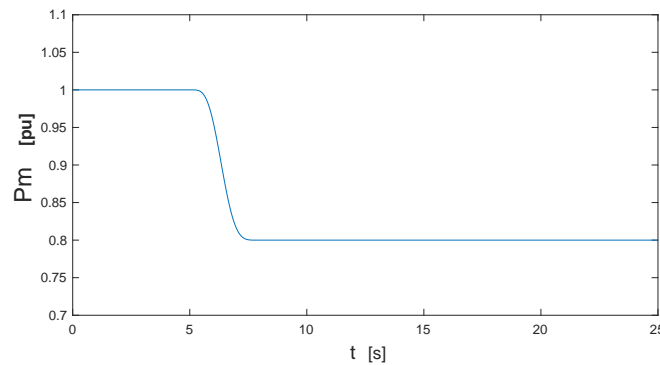


Figura 5.2: Cambio en la P_m en un intervalo de tiempo de 3 s.

El resultado al aplicar el cambio en la potencia mecánica del generador síncrono se observa en la figura 5.3. En las gráficas se observa que al aplicar el cambio en P_m , las tres variables de estado (δ , ω , E'_q) presentan oscilaciones.

La variable δ y E'_q después de las oscilaciones no regresan a su estado de operación original. Las condiciones de operación del generador síncrono son diferentes antes y después del cambio en P_m . Al aplicar el cambio en P_m el generador adquiere nuevas condiciones de operación para las variables δ y E'_q . En el caso de ω a pesar de las oscilaciones logra mantener su punto de equilibrio.

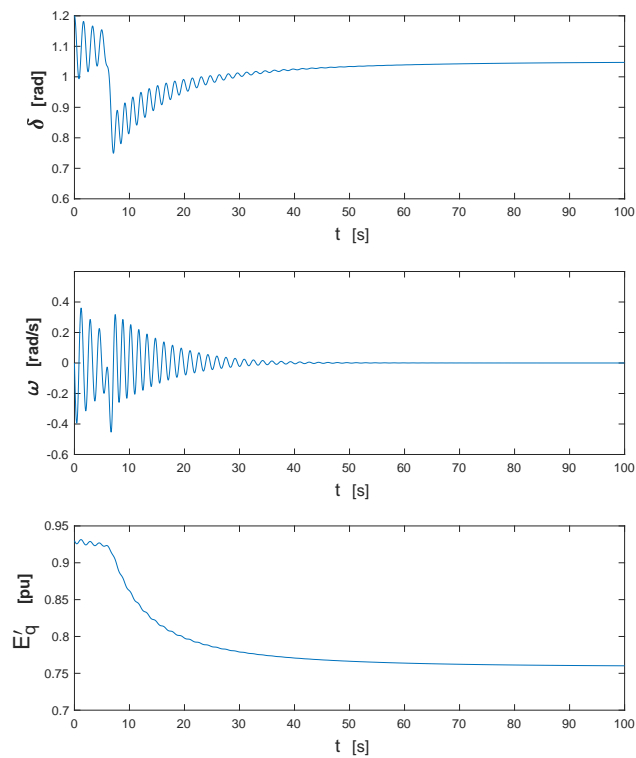


Figura 5.3: Simulación del GS aplicando el cambio en P_m .

Las gráficas de la figura 5.3 se obtuvieron modificando el programa del modelo de tercer orden. La potencia mecánica igual a uno se reemplazo por el cambio de la potencia mecánica definida por el polinomio de Bézier definida en la ecuación (5.1).

5.2. Dinámica del generador síncrono

Esta sección presenta los resultados de la simulación del comportamiento dinámico del voltaje de campo E_f , el transitorio del voltaje interno del eje de cuadratura E'_q , el voltaje en terminales V_t , la potencia eléctrica P_e , la potencia reactiva Q y el ángulo de carga δ [°]. El resultado de la simulación de la ecuación (5.2) para la potencia eléctrica P_e se muestra en la figura 5.4. Esta gráfica es igual a la figura 5.2 puesto que $P_m = P_e$.

$$P_e = \frac{V_\infty \bar{E}_q}{X'_d + X_l} \sin \bar{\delta} \quad (5.2)$$

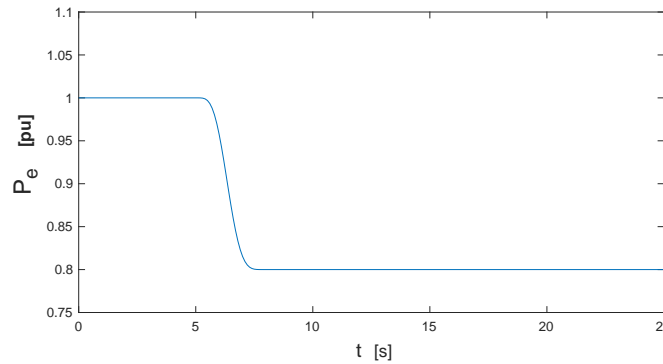


Figura 5.4: Comportamiento de la potencia eléctrica P_e .

En la figura 5.5 se observa el comportamiento de la potencia reactiva definida por la ecuación (5.3).

$$Q = \frac{V_\infty}{X'_d - X_l} \bar{E}_q \cos \bar{\delta} - \frac{V_\infty^2}{X'_d - X_l} \quad (5.3)$$

El comportamiento del voltaje de excitación definido por la ecuación (5.4) al aplicar el cambio en la potencia mecánica se muestra en la figura 5.6.

$$E_f = \frac{X_d + X_l}{\sin \bar{\delta}} P_e - \frac{X_d - X_l}{X'_d + X_l} \cos \bar{\delta} \quad (5.4)$$

En la figura 5.7 podemos observar el comportamiento del transitorio en el eje de cuadratura definida por la ecuación (5.5) bajo las condiciones de cambio en la potencia mecánica.

$$E'_q = \frac{X_d + X_l}{\sin \bar{\delta}} P_e \quad (5.5)$$

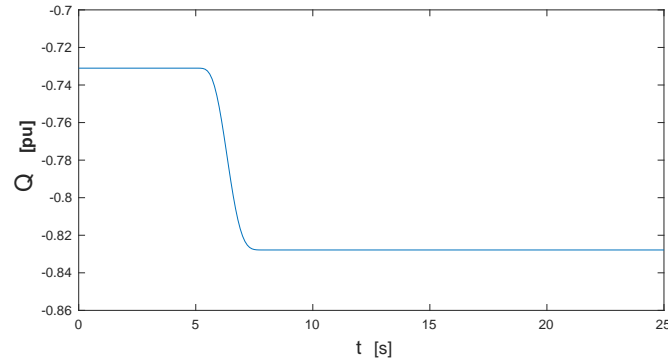


Figura 5.5: Comportamiento de la potencia reactiva.

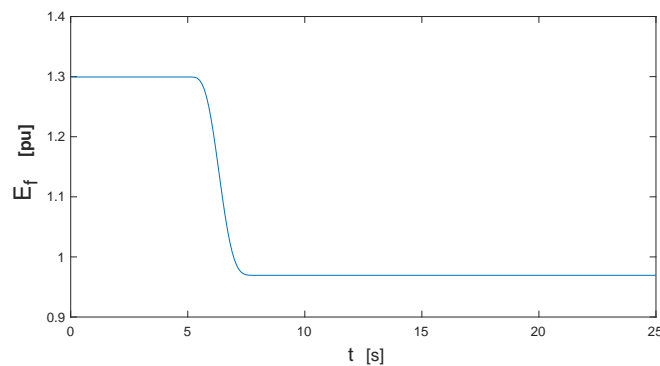


Figura 5.6: Comportamiento del voltaje de excitación.

La figura 5.8 se observa el comportamiento de voltaje en terminales definido por la ecuación (5.6) bajo las condiciones de cambio en la potencia mecánica.

$$V_t = \left(\frac{X_l^2 P_e^2}{V_\infty^2 \sin^2 \bar{\delta}} + \frac{X_d^2 V_\infty^2}{(X'_d + X_l)^2} + \frac{2X_l X_d}{X'_d + X_l} P_e \cot \bar{\delta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.6)$$

Finalmente la figura 5.9 podemos observar el comportamiento del ángulo definido por la ecuación (5.7).

$$\delta = \arccot \left(\frac{V_\infty}{X_l P_e} \left(-\frac{X_d V_\infty}{X'_d + X_l} + \left(V_t^2 - \frac{X_l^2 P_e^2}{V_\infty^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right) \quad (5.7)$$

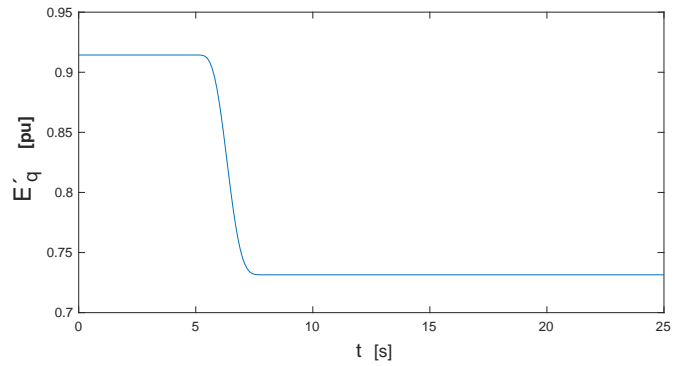


Figura 5.7: Comportamiento del transitorio en el eje de cuadratura.

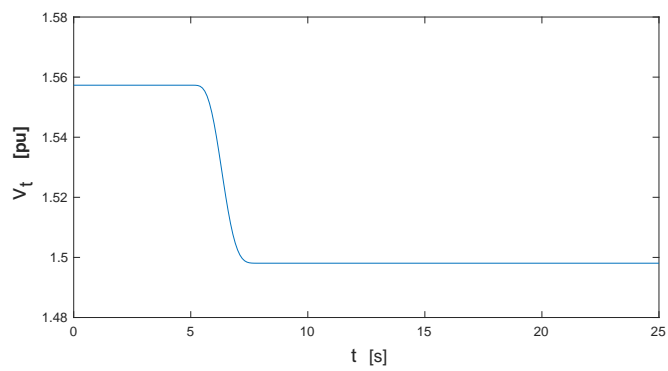


Figura 5.8: Comportamiento del voltaje en terminales.

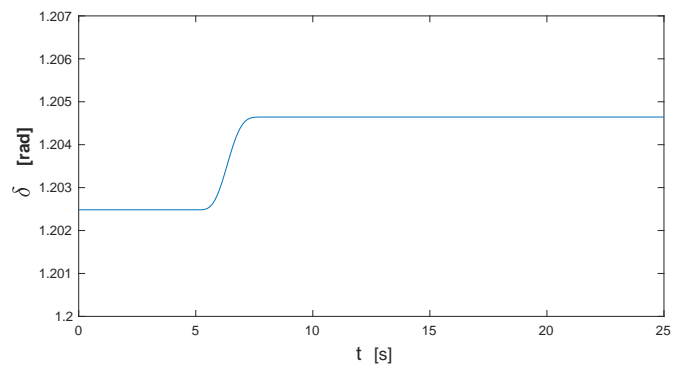


Figura 5.9: Comportamiento del ángulo de carga.

5.3. Voltaje en terminales del GS

Este análisis tiene como objetivo mantener el voltaje en terminales constante del GS. Para este análisis se expone un método gráfico tomando como referencia un diagrama fasorial que se muestra en la figura 5.10. En esta figura representamos en color negro la condición inicial de operación del GS con $P_m = 1$, los valores de cada una de las componentes del diagrama fasorial son $E_f = 1,2994$, $V_\infty = 1$, $\delta = 1,12$ y una resistencia nula. El objetivo es mantener el voltaje en terminales V_t constante al aplicar un cambio en la potencia mecánica durante la operación del GS.

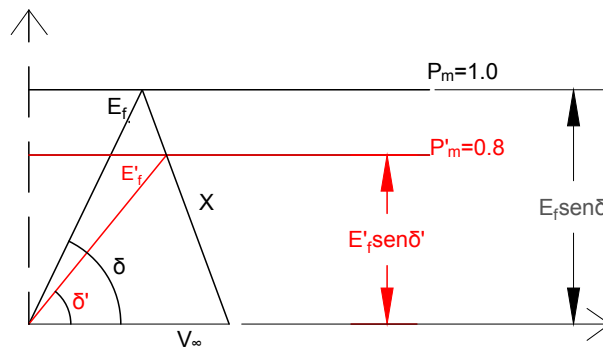


Figura 5.10: Diagrama fasorial del GS para mantener el V_t constante.

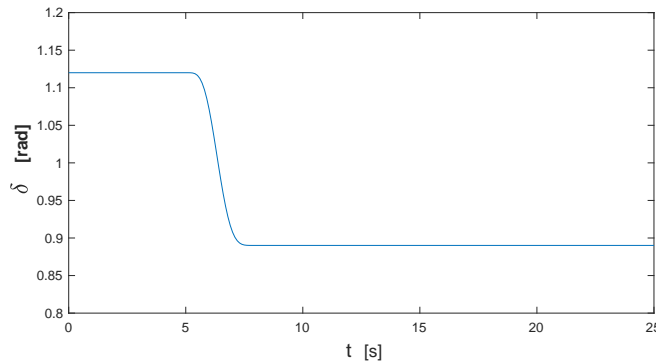


Figura 5.11: Cambio de $\delta = 1,12$ a $\delta = 0,890118$.

El diagrama fasorial en la figura 5.10 se realizó con ayuda del software *AutoCAD*[®]. Al aplicar el cambio en la potencia mecánica obtenemos la nueva condición de operación del GS en color rojo. Los valores para esta condición de operación son: $E_f = 1,0880$, $P_m = 0,8$, $\delta = 0,890118$. Gracias al software *AutoCAD*[®] y al método gráfico obtuvimos de manera directa el valor del ángulo δ' correspondiente al estado de operación en color rojo.

Al cambiar la P_m durante la operación del GS el ángulo cambia de 1.12 rad a 0.890118 rad como se muestra en la figura 5.11. Esta variación del ángulo tiene que ser modificada al programar la ecuación (5.6). En la figura 5.12 observamos el resultado de ajustar la variación del ángulo. El resultado es una muy buena aproximación para que el voltaje en terminales se mantenga lo más cercano posible a un valor constante.

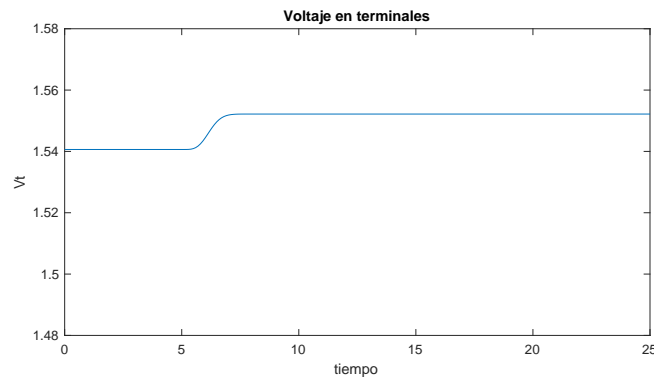


Figura 5.12: Comportamiento de V_t ajustando el ángulo.

5.4. Límites transitorios garantizados

Las gráficas (5.13) y (5.14) muestran los resultados al resolver las ecuaciones (3.1). Los valores obtenidos de las variables de estado ξ_8 y ξ_9 se utilizan para calcular el parámetro correspondiente a la reactancia de línea, cuyo valor es: $X_l = 0,414847 \text{ pu}$, este resultado se calculó con ayuda de las ecuaciones (3.2).

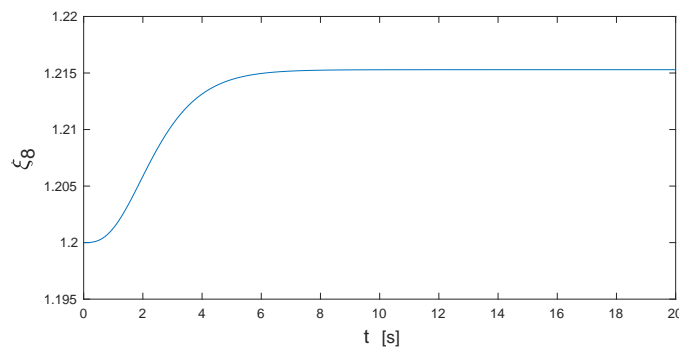


Figura 5.13: Gráfica de la variable de estado ξ_8 .

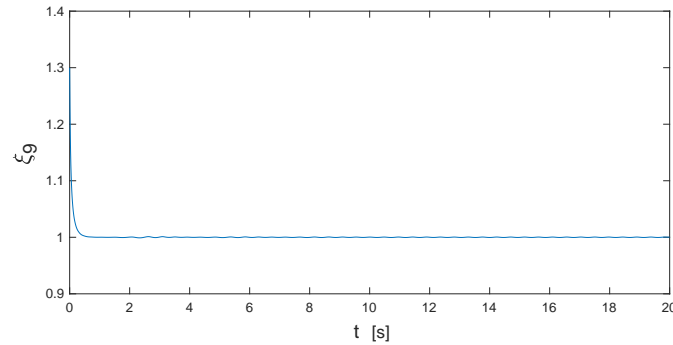


Figura 5.14: Gráfica de la variable de estado ξ_9 .

Finalmente se calcula el punto de equilibrio con el valor de $X_l = 0,414847$. El resultado obtenido para el punto de equilibrio es: $\delta = 1,57 \text{ pu}$, $\omega = 0$, $E'_q = 0,822904$.

5.5. Medición de señales en línea

5.5.1. Obtención de las señales en línea del generador síncrono

Para obtener información de las señales en línea del generador síncrono se utilizó la plataforma virtual desarrollada en *MATLAB*[®]. Al simular el generador síncrono de rotor sólido se obtuvo información de señales en línea de V_t , P_m , Q y δ . El comportamiento de estas señales durante la operación del generador síncrono de rotor sólido se muestran en las siguientes figuras.

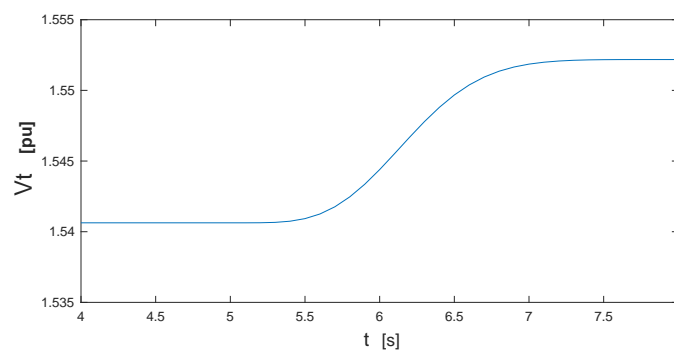
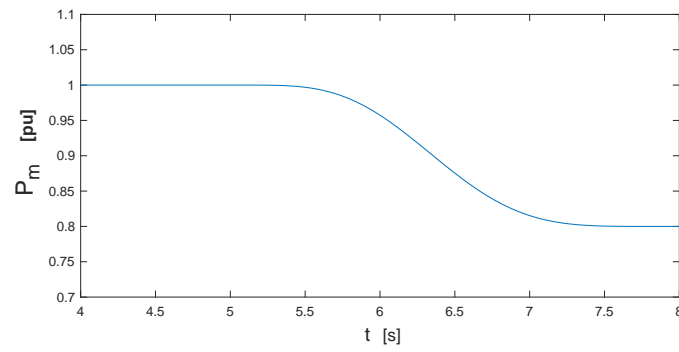
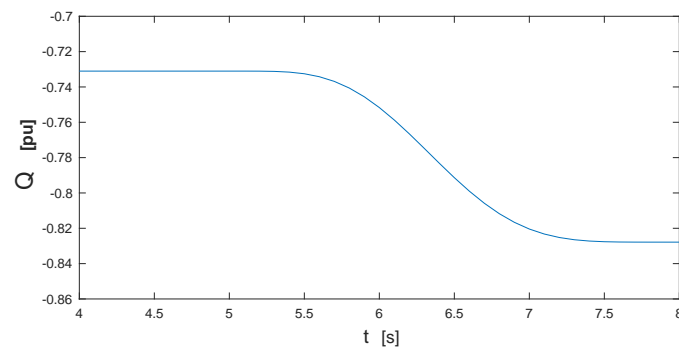
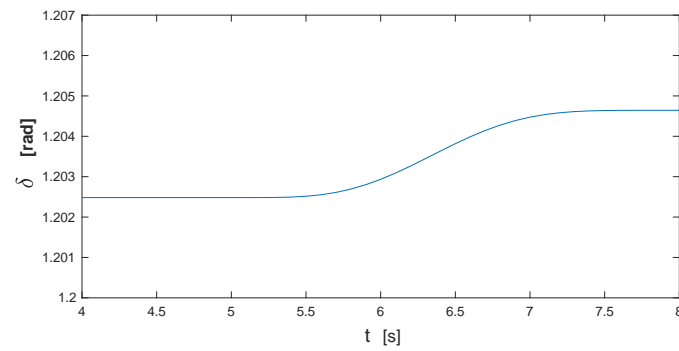


Figura 5.15: Gráfica de la señal para V_t .

Figura 5.16: Gráfica de la señal para P_m .Figura 5.17: Gráfica de la señal Q .Figura 5.18: Gráfica de de la señal δ .

El comportamiento de las señales V_t , P_m , Q y δ se remplazo en la ecuación (3.28) con $I_f=1.103 pu$. Con estos datos se empleó el Método De Levenberg-Marquardt descrito en la sección 3.5, para estimar los parámetros en línea del generador síncrono. El valor de los parámetros estimados con esta técnica son: $X_q=1.33 pu$, $X_d=2.018 pu$ y $X_{ad}=1.92 pu$. La tabla 5.1 muestra una comparación del valor de cada parámetro estimado.

Valor y error relativo de los parámetros			
Parámetro	Valor real	Valor estimado	ϵ_r
X_q	1.380	1.33	2.173913044
X_d	2.067	2.018	2.370585389
X_{ad}	1.92	1.92	0.000000000

Tabla 5.1: Error relativo de los parámetros estimados.

El mismo procedimiento se realizó con la ecuación (3.30), con el mismo método, el algoritmo emplea la Jacobiana por diferencias finitas, utilizando los mismos valores de las señales V_t , P_m , Q y δ . Los resultados obtenidos son: $X_d=2.067 pu$, $X_q=1.38 pu$ y $X_{ad}=1.92 pu$. Las siguientes gráficas muestran el resultado del método empleado con esta técnica y las gráficas de los parámetros estimados.

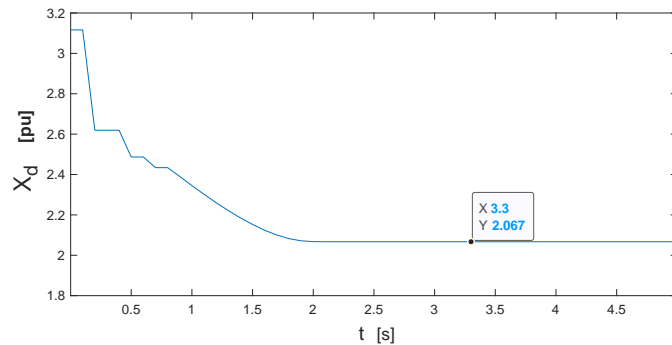
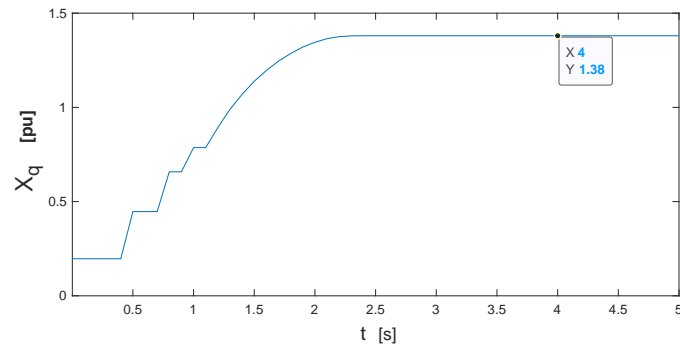
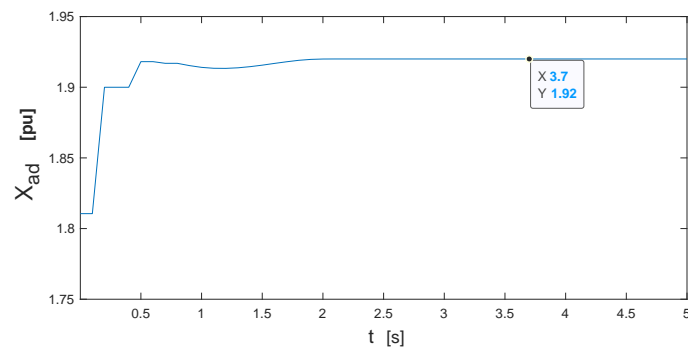


Figura 5.19: Gráfica del parámetro estimado X_d .

Figura 5.20: Gráfica del parámetro estimado X_q .Figura 5.21: Gráfica del parámetro estimado X_{ad} .

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

De acuerdo al desempeño obtenido en las simulaciones del modelo de tercer orden del Generador Síncrono de Polos Lisos (GSPL), los resultados de las dos técnicas de estimación de parámetros en línea evaluadas, bajo el contexto de máquina bus infinito, son satisfactorios. Los resultados en simulación del GSPL en distintos puntos de operación, se observó el comportamiento dinámico del generador.

La técnica de mediciones en línea mostró buena robustez al perturbar el valor de la potencia mecánica de 1 a 0.8. Al tomar los datos durante la perturbación y aplicar la técnica, los resultados son aceptables en términos de rapidez. Esta técnica aplica el método de Levenberg-Marquardt emplea la Jacobiana por diferencias finitas, muestra más flexibilidad respecto al rango de valores iniciales de los parámetros a estimar.

La técnica de estimación con límites transitorios garantizados es eficiente en estimar la reactancia de línea, pero tiene restricciones en cuanto a la robustez, ya que el valor del parámetro a estimar tiene que estar en un intervalo al valor real de dicho parámetro. Concluyendo en las dos técnicas se obtienen buenos resultados respecto al parámetro o parámetros estimados, a pesar de que el diseño es completamente diferente. Esto muestra que el modelo de tercer orden del generador síncrono de polos lisos es confiable y cumple con el objetivo de evaluar distintas técnicas de estimación de parámetros en línea.

La plataforma virtual se diseñó para mostrar los resultados de una manera rápida y sencilla. El usuario no tiene acceso a los archivos *.m*, solo verá los resultados reportados en el manuscrito. Como trabajo futuro, se pretende que la plataforma virtual máquina bus infinito tenga una versión más sofisticada y una interfaz interactiva con el usuario, actualmente se planea un diseño para que la plataforma este al alcance de todos en internet con un dominio para una página web, el lenguaje de programación sería Python. El objetivo es que el usuario pueda simular distintos puntos

de operación del generador síncrono. Los resultados obtenidos de la dinámica del generador síncrono se podrán observar de manera rápida y pueden ser guardados o exportados para realizar estudios del interés de cada usuario. La plataforma virtual está en condiciones para ser utilizada dentro del campo académico, pero también puede ser de gran utilidad para las empresas que utilicen al generador síncrono de polos lisos.

Por lo tanto se concluye que se alcanzó el objetivo planteado en este trabajo de tesis y que sin duda alguna la plataforma virtual desarrollada y presentada en este manuscrito podrá ser empleada en el futuro para la evaluación de técnicas de estimación paramétrica y control de generadores síncronos de polos lisos en un esquema de máquina bus infinito.

7. Anexos

Esta sección presenta los archivos *.m* programados en *Matlab*® incluye desde los primeros archivos hasta las técnica de estimación de parámetros en línea, finalmente se muestra el archivo *.m* de la plataforma virtual.

```
function [dZ]=trans(t,z)
dZ=zeros(2,1);
A=25;
B=10;
C=226;
Ft=900*exp(-t/5)*cos(3*t);
dZ(1)=z(2);
dZ(2)=(1/A)*Ft-(B/A)*z(2)-(C/A)*z(1);
end
```

Listing 7.1: Ejemplo de movimiento transitorio.

```
tspan=[0:0.01:20];
z0=[0;0];
[t,z]=ode23('trans',tspan,z0);
plot(t,z(:,1));
xlabel('t');
ylabel('x1(t)');
grid on
```

Listing 7.2: Simulación de movimiento transitorio.

```
function dZ=emtogrsrpmuno(t,z)
dZ=zeros(3,1);
deltab=1.12;
ws=120*pi;
Pm=1;
H=6.680;
D=0;
```

```

Xd=1.070;
dXd=0.408;
Xl=0.415;
dTd0=5.40;
Efb=((Xd+Xl)*Pm./sin(deltab) - (Xd-dXd)*cos(deltab)./(dXd+Xl))
dZ(1)=z(2);
dZ(2)=-((ws*D/2*H)*z(2))-(ws*(z(3)*sin(z(1))))/((2*H)*(dXd+Xl))
+(ws/(2*H))*Pm;
dZ(3)=((Xd-dXd)/(dTd0*(dXd+Xl)))*cos(z(1))-
(((Xd+Xl)/(dTd0*(dXd+Xl)))*z(3))+(Efb/dTd0);
end

```

Listing 7.3: Modelo del GS con potencia mecánica igual a uno.

```

tspan=[0:0.01:100];
z0=[1.1;0;0.91];
[t,z]=ode45('emtogrsrpmuno',tspan,z0);
plot(t,z(:,1));
xlabel ('\fontsize{15} t \fontsize{13} [s]');
ylabel ('\fontsize{18} \bf \delta \fontsize{13} [rad]');

```

Listing 7.4: Simulación del GS con potencia mecánica igual a uno para δ .

```

tspan=[0:0.01:100];
z0=[1.1;0;0.91];
[t,z]=ode45('emtogrsrpmuno',tspan,z0);
plot(t,z(:,2));
xlabel ('\fontsize{15} t \fontsize{13} [s]');
ylabel ('\fontsize{18} \bf \omega \fontsize{13} [rad/s]');

```

Listing 7.5: Simulación del GS con potencia mecánica igual a uno para ω .

```

tspan=[0:0.01:100];
z0=[1.1;0;0.91];
[t,z]=ode45('emtogrsrpmuno',tspan,z0);
plot(t,z(:,3));
xlabel ('\fontsize{15} t \fontsize{13} [s]');
ylabel ('\fontsize{18} E^{\prime}_{q} \bf \fontsize{13} [pu]');

```

Listing 7.6: Simulación del GS con potencia mecánica igual a uno para E'_q .

```

t=linspace(0,100,3000);
T1=5;

```

```

T2=8;
r1=252;
r2=1050;
r3=1800;
r4=1575;
r5=700;
r6=126;
f=((t-T1)/(T2-T1)).^5).*(r1-(r2.*((t-T1)/(T2-T1)))+
(r3*((t-T1)/(T2-T1)).^2)-(r4*((t-T1)/(T2-T1)).^3)+
(r5*((t-T1)/(T2-T1)).^4)-(r6*((t-T1)/(T2-T1)).^5));
pm=1;
pmb1=pm;
pmb2=0.8*pm;
y=pm.*(t<T1)+(pmb1+(pmb2-pmb1)*f).*((T1<=t)&(t<T2))+(pmb2).*(T2<=t);
plot(t,y,'-')
axis([0 25 .7 1.1])
xlabel ('\fontsize{15} t \fontsize{13} [s]');
ylabel ('\fontsize{18} Pm \bf \fontsize{13} [pu]');

```

Listing 7.7: Simulación del cambio en la potencia mecánica.

```

function dZ=emtogrsrucero(t,z)
dZ=zeros(3,1);
deltab=1.12;
ws=120*pi;
T1=5;
T2=8;
r1=252;
r2=1050;
r3=1800;
r4=1575;
r5=700;
r6=126;
f=((t-T1)/(T2-T1)).^5).*(r1-(r2.*((t-T1)/(T2-T1)))+
(r3*((t-T1)/(T2-T1)).^2)-(r4*((t-T1)/(T2-T1)).^3)+
(r5*((t-T1)/(T2-T1)).^4)-(r6*((t-T1)/(T2-T1)).^5));
pm=1;
pmb1=pm;
pmb2=0.8*pm;
y=pm.*(t<T1)+(pmb1+(pmb2-pmb1)*f).*((T1<=t)&(t<T2))+(pmb2).*(T2<=t);
Pm=y;
H=6.680;
D=0;
Xd=1.070;

```

```

dXd=0.408;
Xl=0.415;
dTd0=5.40;
Efb=((Xd+Xl)*Pm./sin(deltab) - (Xd-dXd)*cos(deltab)./(dXd+Xl));
dZ(1)=z(2);
dZ(2)=-((ws*D/2*H)*z(2))-(ws*(z(3)*sin(z(1))))/((2*H)*(dXd+Xl))
+(ws/(2*H))*Pm;
dZ(3)=((Xd-dXd)/(dTd0*(dXd+Xl)))*cos(z(1))-
(((Xd+Xl)/(dTd0*(dXd+Xl)))*z(3))+(Efb/dTd0);
end

```

Listing 7.8: Simulación del GS cambiando la potencia mecánica.

```

tspan=[0:0.01:100];
z0=[1.1;0;0.91];
[t,z]=ode45('emtogrsrpmuno',tspan,z0);
plot(t,z(:,1));
xlabel ('\fontsize{15} t \fontsize{13} [s]');
ylabel ('\fontsize{18} \bf \delta \fontsize{13} [rad]');

```

Listing 7.9: Simulación del GS cambiando la potencia mecánica para δ .

```

tspan=[0:0.01:100];
z0=[1.1;0;0.91];
[t,z]=ode45('emtogrsrpmuno',tspan,z0);
plot(t,z(:,2));
xlabel ('\fontsize{15} t \fontsize{13} [s]');
ylabel ('\fontsize{18} \bf \omega \fontsize{13} [rad/s]');

```

Listing 7.10: Simulación del GS cambiando la potencia mecánica para ω .

```

tspan=[0:0.01:100];
z0=[1.1;0;0.91];
[t,z]=ode45('emtogrsrpmuno',tspan,z0);
plot(t,z(:,3));
xlabel ('\fontsize{15} t \fontsize{13} [s]');
ylabel ('\fontsize{18} E^{\prime}_{q} \bf \fontsize{13} [pu]');

```

Listing 7.11: Simulación del GS cambiando la potencia mecánica para E'_q .

```

function varargout = PortadaMFI(varargin)

gui_Singleton = 1;

```

```

gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @PortadaMFI_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @PortadaMFI_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function PortadaMFI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

axes(handles.axes1);
background=imread('aLogoA2Digitales.jpg');
axis off;
imshow(background);

axes(handles.axes2);
background=imread('logo_CBI.jpg');
axis off;
imshow(background);

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = PortadaMFI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

%Bot\on Continuar
botok=uicontrol('Style','pushbutton',...
'Units','normalized', ...
'Position',[.04 .1 .12 .05], ...
'String','Continuar',...
'Callback','clear all; close all;clc; PlataformaMBI;');

```

```

%Bot\on cerrar
botok=uicontrol('Style','pushbutton',...
'Units','normalized', ...
'Position',[.04 .05 .12 .05], ...
'String','Salir',...
'Callback','clear all; close all;clc; close;');

```

```
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
function axes2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

Listing 7.12: Código fuente de la portada de la plataforma virtual.

```
function varargout = PlataformaMBI(varargin)
```

```
function PlataformaMBI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
```

```
t=linspace(0,100,3000);
```

```
T1=5;
```

```
T2=8;
```

```
r1=252;
```

```
r2=1050;
```

```
r3=1800;
```

```
r4=1575;
```

```
r5=700;
```

```
r6=126;
```

```
f = (((t-T1)/(T2-T1)).^5).*(r1-(r2.*((t-T1)/(T2-T1)))+
```

```
(r3*((t-T1)/(T2-T1)).^2)-(r4*((t-T1)/(T2-T1)).^3)+
```

```
(r5*((t-T1)/(T2-T1)).^4)-(r6*((t-T1)/(T2-T1)).^5));
```

```
pm=1;
```

```
pmb1=pm;
```

```
pmb2=1*pm;
```

```
y=pm.*(t<T1)+(pmb1+(pmb2-pmb1)*f).*((T1<=t)&(t<T2))+(pmb2).*(T2<=t);
```

```
plot(t,y,'-')
```

```
title('Potencia ámecnica constante')
```

```
axis([0 25 .6 1.2])
```

```
handles.output = hObject;
```

```
guidata(hObject, handles);
```

```
function varargout = PlataformaMBI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```

varargout{1} = handles.output;

function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes1)
fun =get(handles.popupmenu1, 'Value');
switch fun
    case 1
t=linspace(0,100,3000);
T1=5;
T2=8;
r1=252;
r2=1050;
r3=1800;
r4=1575;
r5=700;
r6=126;
f=((t-T1)/(T2-T1)).^5).*(r1-(r2.*((t-T1)/(T2-T1)))+
(r3*((t-T1)/(T2-T1)).^2)-(r4*((t-T1)/(T2-T1)).^3)+
(r5*((t-T1)/(T2-T1)).^4)-(r6*((t-T1)/(T2-T1)).^5));
pm=1;
pmb1=pm;
pmb2=1*pm;
y=pm.*(t<T1)+(pmb1+(pmb2-pmb1)*f).*((T1<=t)&(t<T2))+(pmb2).*(T2<=t);
plot(t,y,'-')
title('Potencia ámecnica constante')
axis([0 25 .6 1.2])
    case 2
t=linspace(0,100,3000);
T1=5;
T2=8;
r1=252;
r2=1050;
r3=1800;
r4=1575;
r5=700;
r6=126;
f=((t-T1)/(T2-T1)).^5).*(r1-(r2.*((t-T1)/(T2-T1)))+
(r3*((t-T1)/(T2-T1)).^2)-(r4*((t-T1)/(T2-T1)).^3)+
(r5*((t-T1)/(T2-T1)).^4)-(r6*((t-T1)/(T2-T1)).^5));
pm=1;

```



```
pmb1=pm;
pmb2=0.8*pm;
y=pm.*(t<T1)+(pmb1+(pmb2-pmb1)*f).*((T1<=t)&(t<T2))+(pmb2).*(T2<=t);
plot(t,y,'-')
title('Cambio en la potencia ámecnica')
axis([0 25 .6 1.2])
end
guidata(hObject, handles);
```

```
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes5)
pct1
axes(handles.axes6)
pct2
axes(handles.axes7)
pct3
```

```
function axes5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes5)
dgs1
axes(handles.axes6)
dgs2
axes(handles.axes7)
dgs3
```

```
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes5)
```

```

cambiopmgs1
axes(handles.axes6)
cambiopmgs2
axes(handles.axes7)
cambiopmgs3

function popupmenu3_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes8)
fun =get(handles.popupmenu3, 'Value');
switch fun
    case 1
        t=0:0.1:100;
        deltab=1.12;
        ws=120*pi;
        Pmb=0.8;
        H=6.680;
        D=0;
        Xd=1.070;
        T1=5;
        T2=8;
        r1=252;
        r2=1050;
        r3=1800;
        r4=1575;
        r5=700;
        r6=126;
        f = (((t-T1)/(T2-T1)).^5) .* (r1 - (r2 .* ((t-T1)/(T2-T1)))
        + (r3 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^2) - (r4 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^3)
        + (r5 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^4) - (r6 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^5));
        pe=1;
        peb1=pe;
        peb2=0.8*pe;
        y=pe .* (t<T1) + (peb1 + (peb2-peb1)*f) .* ((T1<=t)&(t<T2)) + (peb2) .* (T2<=t);
        Peb=y;
        dXd=0.408;
        Xl=0.415;
        dTd0=5.40;
        Eq=(dXd+Xl) .* Peb ./ sin(deltab);
        Pe=(Eq .* sin(deltab)) / (dXd+Xl);
        plot(t, Pe, '-');
        axis([0 25 0.6 1.2])
    case 2
        t=0:0.1:100;

```

```

deltab=1.12;
ws=120*pi;
Pmb=0.8;
H=6.680;
D=0;
Xd=1.070;
T1=5;
T2=8;
r1=252;
r2=1050;
r3=1800;
r4=1575;
r5=700;
r6=126;
f=((((t-T1)/(T2-T1)).^5).*(r1-(r2.*((t-T1)/(T2-T1))))+
(r3*((t-T1)/(T2-T1)).^2)-(r4*((t-T1)/(T2-T1)).^3)+
(r5*((t-T1)/(T2-T1)).^4)-(r6*((t-T1)/(T2-T1)).^5));
pe=1;
peb1=pe;
peb2=0.8*pe;
y=pe.*(t<T1)+(peb1+(peb2-peb1)*f).*((T1<=t)&(t<T2))+(peb2).*(T2<=t);
Peb=y;
dXd=0.408;
Xl=0.415;
Vt((((Peb).^2)*((Xl).^2))/(sin(deltab).^2)+((Xd).^2)/(dXd+Xl)^2
+(2*Xl*Xd*Peb.*cot(deltab)/(Xd)).^0.5
D=acot(((1)./(Xl.*Peb)).*(((Vt.^2-Xl.^2.*Peb.^2).^0.5)-((Xd)/(dXd+Xl))))
plot(t,D,'-');
axis([0 25 1.2 1.207])
    case 3
t=0:0.1:100;
deltab=1.12;
ws=120*pi;
Pmb=0.8;
H=6.680;
D=0;
Xd=1.070;
T1=5;
T2=8;
r1=252;
r2=1050;
r3=1800;
r4=1575;
r5=700;

```

```

r6=126;
f = (((t-T1)/(T2-T1)).^5) .* (r1 - (r2 .* ((t-T1)/(T2-T1))) +
(r3 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^2) - (r4 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^3) +
(r5 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^4) - (r6 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^5));
pe=1;
peb1=pe;
peb2=0.8*pe;
y=pe .* (t<T1) + (peb1 + (peb2-peb1)*f) .* ((T1<=t)&(t<T2)) + (peb2) .* (T2<=t);
Peb=y;
dXd=0.408;
Xl=0.415;
Eq = ((dXd+Xl)*Peb) ./ sin(deltab)
plot(t, Eq, '-');
axis([0 25 0.7 0.95])
    case 4
t=0:0.1:100;
deltab=1.12;
ws=120*pi;
Pmb=0.8;
H=6.680;
D=0;
Xd=1.070;
T1=5;
T2=8;
r1=252;
r2=1050;
r3=1800;
r4=1575;
r5=700;
r6=126;
f = (((t-T1)/(T2-T1)).^5) .* (r1 - (r2 .* ((t-T1)/(T2-T1))) +
(r3 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^2) - (r4 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^3) +
(r5 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^4) - (r6 .* ((t-T1)/(T2-T1)).^5));
pe=1;
peb1=pe;
peb2=0.8*pe;
y=pe .* (t<T1) + (peb1 + (peb2-peb1)*f) .* ((T1<=t)&(t<T2)) + (peb2) .* (T2<=t);
Peb=y;
dXd=0.408;
Xl=0.415;
dTd0=5.40;
Vt = (((Peb).^2) * (Xl).^2) / (sin(deltab).^2) + (Xd.^2 / (dXd+Xl).^2)
+ (2*Xl*Xd*Peb .* cot(deltab) / (dXd+Xl)).^0.5;
plot(t, Vt, '-');

```

```

axis([0 25 1.48 1.58])
    case 5
t=0:0.1:100;
deltab=1.12;
ws=120*pi;
Pmb=0.8;
H=6.680;
D=0;
Xd=1.070;
T1=5;
T2=8;
r1=252;
r2=1050;
r3=1800;
r4=1575;
r5=700;
r6=126;
f=((((t-T1)/(T2-T1)).^5).*(r1-(r2.*((t-T1)/(T2-T1)))+
(r3.*((t-T1)/(T2-T1)).^2)-(r4.*((t-T1)/(T2-T1)).^3)+
(r5.*((t-T1)/(T2-T1)).^4)-(r6.*((t-T1)/(T2-T1)).^5)));
pe=1;
peb1=pe;
peb2=0.8*pe;
y=pe.*(t<T1)+(peb1+(peb2-peb1)*f).*((T1<=t)&(t<T2))+(peb2).*(T2<=t);
Peb=y;
dXd=0.408;
Xl=0.415;
dTd0=5.40;
Eq=((dXd+Xl).*Peb)./(sin(deltab));
Pr=((Eq.*cos(deltab))/(dXd+Xl))-(1/(dXd+Xl))
plot(t,Pr,'-');
axis([0 25 -0.86 -0.7])
    case 6
t=0:0.1:100;
deltab=1.12;
ws=120*pi;
Pmb=0.8;
H=6.680;
D=0;
Xd=1.070;
T1=5;
T2=8;
r1=252;
r2=1050;

```

```

r3=1800;
r4=1575;
r5=700;
r6=126;
f=((t-T1)/(T2-T1)).^5).*(r1-(r2.*((t-T1)/(T2-T1)))+
(r3*((t-T1)/(T2-T1)).^2)-(r4*((t-T1)/(T2-T1)).^3)+
(r5*((t-T1)/(T2-T1)).^4)-(r6*((t-T1)/(T2-T1)).^5));
pe=1;
peb1=pe;
peb2=0.8*pe;
y=pe.*(t<T1)+(peb1+(peb2-peb1)*f).*((T1<=t)&(t<T2))+(peb2).*(T2<=t);
Peb=y;
dXd=0.408;
Xl=0.415;
dTd0=5.40;
Efb((((Xd+Xl)*Peb)./(sin(deltab))) - (((Xd-dXd)*cos(deltab))./(dXd+Xl))
plot(t,Efb,'-');
axis([0 25 0.9 1.4])
end
guidata(hObject, handles);

```

```

function popupmenu3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

%Bot\on Continuar

```

botok=uicontrol('Style','pushbutton',...
'Units','normalized',...
'Position',[.04 .1 .12 .05],...
'String','éTcnicas',...
'Callback','clear all; close all;clc; Tecnicas;');

```

%Bot\on Portada

```

botok=uicontrol('Style','pushbutton',...
'Units','normalized',...
'Position',[.04 .05 .12 .05],...
'String','Portada',...
'Callback','clear all; close all;clc; PortadaMBI;');

```

```

function axes8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

function axes7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function pushbutton16_Callback(hObject, eventdata, handles)
msgbox('Puedes seleccionar la ágrfica de Pm=1 o
la ágrfica de cambio en Pm de 1 a 0.8', 'PlataformaMBI')

function pushbutton17_Callback(hObject, eventdata, handles)
msgbox({'Puedes seleccionar la ágrfica de Pe, \delta, E'q, Vt, Q, Ef',
'aplicando el cambio en Pm de 1.0 a 0.8'}, 'PlataformaMBI')

function Ayuda_Callback(hObject, eventdata, handles)
helpdlg({'óSimulacin del GS en estado estacionario',
'y áparmetros conocidos', '\delta=1.12', 'ws=120*pi', 'Pm=Pe1',
'H=6.680', 'D=0', 'Xd=1.070', 'X'd=0.408', 'Xl=0.415', 'Td0=5.40'}, 'PlataformaMBI');

function pushbutton19_Callback(hObject, eventdata, handles)
msgbox({'Modelo simulado:', 'dZ(1)=z(2)', 'dZ(2)=
-((ws*D/2*H)*z(2))-(ws*(z(3)*sin(z(1))))/((2*H)*(dXd+Xl))+
(ws/(2*H))*Pm', 'dZ(3)=((Xd-dXd)/(dTd0*(dXd+Xl)))*cos(z(1))-
(((Xd+Xl)/(dTd0*(dXd+Xl)))*z(3))+ (Efb/dTd0)', 'con Pm=1'}, 'PlataformaMBI')

function pushbutton20_Callback(hObject, eventdata, handles)
msgbox({'Modelo simulado:', 'dZ(1)=z(2)', 'dZ(2)=
-((ws*D/2*H)*z(2))-(ws*(z(3)*sin(z(1))))/((2*H)*(dXd+Xl))+ (ws/(2*H))*Pm',
'dZ(3)=((Xd-dXd)/(dTd0*(dXd+Xl)))*cos(z(1))-(((Xd+Xl)/(dTd0*(dXd+Xl)))*z(3))
+(Efb/dTd0)', 'con Pm=1.0 a 0.8'}, 'PlataformaMBI')

```

Listing 7.13: Código fuente de la Plataforma Virtual

```

function varargout = Tecnicas(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Tecnicas_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Tecnicas_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);

```

```

if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Tecnicas_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = Tecnicas_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes1)
xi8

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes2)
xi9

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
dXd=0.408;
tspan=[0:0.01:20];
z0=[0;0;0;0;0;0;0;1.20;1.2];
[t,z]=ode45('estimadorortega',tspan,z0);
ti = 15
zii = interp1(t,z,ti,'linear');
ww=zii(1,8)
theta1=(1/ww)-dXd;
set(handles.text2,'String',theta1);

function text2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```



```

function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
deltab=1.12;
w0=120*pi;
dEqb=0.92;
omega=0;
H=6.680;
KD=0;
Xd=1.070;
dXd=0.408;
XEM=0.48;
XEm=0.4;
dTd0=5.40;
Efb=1.2994;
EB=1;
b1=34.29;
b2=0.0000;
b3=0.1490;
b4=0.3341;
P=28.22;
E=0.2405;
ww=1.2153;
w=1.0004;
b8=((Xd-dXd)/(Efb))*EB*ww
theta2=acos(((1)/(b8))*(w-1));
set(handles.text6, 'String', theta2);
theta=0;
set(handles.text7, 'String', theta);
a1=((120*pi*EB)/(2*H))
theta3=((P)/(a1*ww))*((b8)/(sqrt(b8.^2-(w-1).^2)))
set(handles.text8, 'String', theta3);

```

```
function text6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
function text7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
function text8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```

%Bot\on Regresar
botok=uicontrol('Style','pushbutton',...
'Units','normalized', ...
'Position',[.04 .05 .12 .05], ...

```

```

'String','Regresar',...
'Callback','clear all; close all;clc; PlataformaMBI;');

function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
msgbox({'Las ágrficas de \xi8 y \xi9 son nesarias para estimar XI',
'y el punto de equilibrio las ecuaciones son:',
'\theta1= 1/\xi8-X'1', '\theta1=arccos[(\xi9-1)/b(\xi8)]',
'P*b(\xi8)/a1*\xi8*sqrt(b^(\xi8)-(\xi9-1)^2)',
'Ver éTcnica Uno en Tesis'}, 'éTnicas' )

function axes3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes3)
Xd

function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes4)
t2Xq

function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes5)
t2Xad

function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
msgbox({'La óestimacin de áparmetros',
'se realizo con el éMtodo De Levenberg-Marquardt' }, ' éTnicas')

```

Listing 7.14: Código fuente de la plataforma técnicas de estimación.

```

function dZ=estimadorortega(t,z)
dZ=zeros(8,1);
deltab=1.12;
w0=120*pi;
dEqb=0.92;
omega=0;
H=6.680;
KD=0;

```

```

Xd=1.070;
dXd=0.408;
XEM=0.48;
XEm=0.4;
dTd0=5.40;
EB=1;
b2=((KD*w0)/(2*H));
P=28.22;
E=0.2405;
a1=(w0*EB)/(2*H)
a3=((Xd-dXd)/(dTd0))*EB;
a4=((Xd-dXd)/(dTd0));
nM=(1/(dXd+XEm));
nm=(1/(dXd+XEM));
g1=1;
g2=100;
tau=2;
w1=-0.63;
w2=120;
kv=0.1;
z8=1.21507;
u=-kv*z8*a1*(cos(1.138)-cos(1.12))-(((a3/a1)+kv)*w1*w2*(1.12-1.138))
-(w1*w2)-((a3*a1)*(w2)-(1/dTd0)-(a4*z8)+(kv*w2))*(0.92-0.907);
dZ(1)=((-z(1)-a1*dEqb*sin(deltab))/(tau))
dZ(2)=((-z(2)+a3*cos(deltab)-(a4*dEqb))/(tau))
dZ(3)=((-z(3)+omega))/(tau)
dZ(4)=((-z(4)-(b2*omega)+P))/(tau)
dZ(5)=((-z(5)+E-(dEqb/dTd0)+u))/(tau)
dZ(6)=((-z(6)-(omega/tau))/(tau))
dZ(7)=((-z(7)-(dEqb/tau))/(tau))
dZ(8)=(-g1*((z(1)*(z(6)+(omega/tau)-z(4)-z(1)*z(8)))+(z(2)*(z(7)+
(dEqb/tau)-z(5)-z(2)*z(8))))*((z(8)-nM)*(z(8)-nm))
a=0.509504+(0.769643/z(8))
b=0.509466*z(8)
dZ(9)=((-g2)*((a^2)*(b^2)+(((z(9))^2)*((z(9)-1)*2-b^2)))*((z(9)-1)*(1+b-z(9))))
end

```

Listing 7.15: Código Matlab Técnica Uno

```

function Levmar_parametros001
m=15;
n=3;
x=[1.35;2;1.6];
mu=0.01;

```

```

J=zeros(m,n);
j tj=zeros(n,n);
dnor=1;
f=fx(x);
tol=sqrt(eps)*norm(x,inf);
update=1;
while dnor>tol
if update==1
f=fx(x) ;
J=derf(x);
j tj=J' *J;
res=norm(f)^2;
end
a= j tj +mu*eye(n);
s=a \ (J' * f);
b=x-s;
f1=fx(b);
res1=norm(f1)^2;
if res1<res
x=b;
f=f1;
dnor=norm(s,inf)/norm(x,inf);
fprintf(' %15.10e %15.10e %15.10e\n',x);
mu=mu/10;
update=1;
else
mu=mu*10;
update=0;
end
end
end
function f=fx(x)
f = zeros(15,1);
f(1) = 0.2940310813*x(1)-0.2940310813*x(2)+0.7460439545*x(3)-1.230405041;
f(2) = 0.2991805985*x(1)-0.2991805985*x(2)+0.8036929466*x(3)-1.337553388;
f(3) = 0.2991807010*x(1)-0.2991807010*x(2)+0.803693842*x(3)-1.337555035;
f(4) = 0.2991807010*x(1)-0.2991807010*x(2)+0.8036938420*x(3)-1.337555035;
f(5) = 0.2991806959*x(1)-0.2991806959*x(2)+0.8036938392*x(3)-1.337555034;
f(6) = 0.2927209446*x(1)-0.2927209446*x(2)+0.8006007397*x(3)-1.336054132;
f(7) = 0.2460674086*x(1)-0.2460674086*x(2)+0.7776481838*x(3)-1.324036204;
f(8) = 0.2043599672*x(1)-0.2043599672*x(2)+0.7561190482*x(3)-1.311353276;
f(9) = 0.1981933287*x(1)-0.1981933287*x(2)+0.7528460407*x(3)-1.309305582;
f(10) = 0.1981262119*x(1)-0.1981262119*x(2)+0.7528102834*x(3)-1.309283037;
f(11) = 0.1981262119*x(1)-0.1981262119*x(2)+0.7528102834*x(3)-1.309283037;

```

```
f(12) = 0.1981262119*x(1)-0.1981262119*x(2)+0.7528102834*x(3)-1.309283037;  
f(13) = 0.1981262119*x(1)-0.1981262119*x(2)+0.7528102834*x(3)-1.309283037;  
f(14) = 0.1981262119*x(1)-0.1981262119*x(2)+0.7528102834*x(3)-1.309283037;  
f(15) = 0.1981262119*x(1)-0.1981262119*x(2)+0.752810283*x(3)-1.309283037;  
end
```

```
function J=derf(x)  
J(1,1) =0.2940310813;  
J(1,2) =-0.2940310813;  
J(1,3) =0.7460439545;  
J(2,1) =0.2991805985;  
J(2,2) =-0.2991805985;  
J(2,3) =0.8036929466;  
J(3,1) =0.2991807010;  
J(3,2) =-0.2991807010;  
J(3,3) =0.8036938420;  
J(4,1) =0.2991807010;  
J(4,2) =-0.2991807010;  
J(4,3) =0.8036938420;  
J(5,1) =0.2991806959;  
J(5,2) =-0.2991806959;  
J(5,3) =0.8036938392;  
J(6,1) =0.2927209446;  
J(6,2) =-0.2927209446;  
J(6,3) =0.8006007397;  
J(7,1) =0.2460674086;  
J(7,2) =-0.2460674086;  
J(7,3) =0.7776481838;  
J(8,1) =0.2043599672;  
J(8,2) =-0.2043599672;  
J(8,3) =0.7561190482;  
J(9,1) =0.1981933287;  
J(9,2) =-0.1981933287;  
J(9,3) =0.7528460407;  
J(10,1)=0.1981262119;  
J(10,2)=-0.1981262119;  
J(10,3)=0.752810283;  
J(11,1)=0.1981262119;  
J(11,2)=-0.1981262119;  
J(11,3)=0.7528102834;  
J(12,1)=0.1981262119;  
J(12,2)=-0.1981262119;  
J(12,3)=0.752810283;  
J(13,1)=0.1981262119;
```

```

J(13,2)=-0.1981262119;
J(13,3)=0.7528102834;
J(14,1)=0.1981262119;
J(14,2)=-0.1981262119;
J(14,3)=0.7528102834;
J(15,1)=0.1981262119;
J(15,2)=-0.1981262119;
J(15,3)=0.752810283;
end

```

Listing 7.16: Código Matlab técnica.

```

function [x, k]= LevenbergMARquardt_222
global h
eta1=sqrt(eps); eta2=eta1; x=[.9;.2;.3]; n=length(x); k=1; h=eta1;
f=fx(x); J=derf(x);
A=J' * J;
g=J' * f; ng=norm(g, inf);
F=(f' * f)/2;
mu=eta1 * max(diag(A));
nu=2; stop=0;
while ~stop
if ng<=eta2, stop=1;
else
p=(A+mu*eye(n)) \ -g; np=norm(p, inf);
nx=eta2 + norm(x, inf);
if np <= eta2 * nx, stop=2; end
end
if ~stop
xnew=x+p;
fn=fx(xnew); Jn=derf(xnew);
Fn=(fn' * fn)/2;
dL=(p' * (mu*p-g))/2; dF=F-Fn;
if dL>0 && dF>0
x=xnew; F=Fn; J=Jn; f=fn;
A=J' * J;
g=J' * f; ng=norm(g, inf);
mu=mu * max(1/3, 1-(2*dF/dL-1)^3);
nu=2;
else
mu=mu * nu; nu=2 * nu;
end
k=k+1;
dnor=norm(p, inf)/norm(x, inf);

```

```

fprintf(' %3.0f %12.5e %12.5e %12.5e %12.5e %12.5e\n',k,x,Fn,mu,dnor);
end
end
end
function f=fx(x)
f      = zeros(15,1);
f(1)   = sqrt(0.1889768807*(x(1))^2 + 0.4574859979*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.4610098649*x(1)*x(3)-2.827211981);
f(2)   = sqrt(0.1889768807*(x(1))^2 + 0.4574859979*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.4610098649*x(1)*x(3)-2.827211981);
f(3)   = sqrt(0.1685919740*(x(1))^2 + 0.5309214310*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.5897165130*x(1)*x(3)-2.925179326);
f(4)   = sqrt(0.1685919690*(x(1))^2 + 0.5309214276*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.5897165181*x(1)*x(3)-2.925179325);
f(5)   = sqrt(0.1062481248*(x(1))^2 + 0.4846777457*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.6613134457*x(1)*x(3)-2.913140343);
f(6)   = sqrt(0.0842682183*(x(1))^2 + 0.4658220698*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.6914836300*x(1)*x(3)-2.911409212);
f(7)   = sqrt(0.08426821832*(x(1))^2 + 0.4658220698*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.6914836300*x(1)*x(3)-2.911409212);
f(8)   = sqrt(0.08426821832*(x(1))^2 + 0.4658220698*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.6914836300*x(1)*x(3)-2.911409212);
f(9)   = sqrt(0.08426821832*(x(1))^2 + 0.4658220698*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.6914836300*x(1)*x(3)-2.911409212);
f(10)  = sqrt(0.08426821832*(x(1))^2 + 0.4658220698*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.691483630*x(1)*x(3)-2.911409212);
f(11)  = sqrt(0.08426821832*(x(1))^2 + 0.4658220698*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.6914836300*x(1)*x(3)-2.911409212);
f(12)  = sqrt(0.08426821832*(x(1))^2 + 0.4658220698*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.6914836300*x(1)*x(3)-2.911409212);
f(13)  = sqrt(0.08426821832*(x(1))^2 + 0.4658220698*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.6914836300*x(1)*x(3)-2.911409212);
f(14)  = sqrt(0.08426821832*(x(1))^2 + 0.4658220698*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.6914836300*x(1)*x(3)-2.911409212);
f(15)  = sqrt(0.08426821832*(x(1))^2 + 0.4658220698*(x(2))^2 +
1.216609*(x(3))^2 + 0.6914836300*x(1)*x(3)-2.911409212);
end
function J=derf(x)
global h
J      =zeros(15,3);
J(1:15,1)=(fx([x(1)+h;x(2);x(3)])-fx([x(1)-h;x(2);x(3)]))/2/h;
J(1:15,2)=(fx([x(1);x(2)+h;x(3)])-fx([x(1);x(2)-h;x(3)]))/2/h;
J(1:15,3)=(fx([x(1);x(2);x(3)+h])-fx([x(1);x(2);x(3)-h]))/2/h;

```

end

Listing 7.17: Código de la técnica dos con diferencias finitas.

8. Referencias

- [1] Julio A Valle-Pereña and Hermilio O Ortega-Navarro. Prospectiva de energías renovables. *Secretaría de Energía*, pages 1–156, 2012.
- [2] Prabha S Kundur, Neal J Balu, and Mark G Lauby. Power system dynamics and stability. *Power System Stability and Control*, 3, 2017.
- [3] AE Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, and D Umans&Stephen. Máquinas eléctricas, 2004.
- [4] Jorge Eduardo Hernández Miranda, Irvin López García, Eduardo Campero Littlewood, Francisco Beltrán Carbajal, and Victor Manuel Jiménez Mondragón. Elementos de los parques eólicos que deben ser controlados para su interconexión con redes eléctricas. *Pistas Educativas*, 39(128), 2018.
- [5] Irvin Lopez-Garcia, Cesar S Lopez-Monsalvo, Francisco Beltran-Carbajal, and Eduardo Campero-Littlewood. Alternative modes of operation for wind energy conversion systems and the generalised lambert w-function. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(13):3152–3157, 2018.
- [6] Leonardo de Jesús Ramos-Gutiérrez and Manuel Montenegro-Fragoso. La generación de energía eléctrica en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(4):197–211, 2012.
- [7] Paul C Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D Sudhoff, and Steven D Pekarek. *Analysis of electric machinery and drive systems*, volume 75. John Wiley & Sons, 2013.
- [8] Alexandre Sanfelice Bazanella. Métodos analíticos para a síntese de controladores em sistemas de potência. 1997.
- [9] MA Arjona, R Escarela-Perez, G Espinosa-Perez, and J Alvarez-Ramirez. Validity testing of third-order nonlinear models for synchronous generators. *Electric Power Systems Research*, 79(6):953–958, 2009.

-
- [10] Francisco Beltran-Carbajal, Antonio Favela-Contreras, Irvin Lopez-Garcia, Antonio Valderrabano-Gonzalez, Julio Cesar Rosas-Caro, and Victor Manuel Sanchez-Huerta. Output feedback dynamic tracking excitation control of synchronous generators. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(12):3041–3049, 2016.
- [11] I López-García, F Beltran-Carbajal, G Espinosa-Pérez, and R Escarela-Perez. Passivity-based power control of a doubly fed induction generator with unknown parameters. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 26(11):2402–2424, 2016.
- [12] Gustavo Trinidad Hernández. *Determinación de los parámetros de máquinas síncronas mediante la prueba de respuesta a la frecuencia con el rotor en reposo*. PhD thesis, IPN, 2010.
- [13] Bruno Rodríguez, Francisco A Retana, GM Lázaro, and OTI Asiaín. Parametrización en máquinas asíncronas trifásicas con rotor jaula de ardilla, mediante pruebas de laboratorio, 2016.
- [14] Sandra Milena Pérez Londoño, Ana María Pérez, and Yimy A Romero. Identificación de los parámetros de un modelo de tercer orden para una máquina síncrona utilizando mediciones en línea. *Scientia et Technica*, 3(35):67–71, 2007.
- [15] Juan Soto Saenz. Propuesta de criterios para programas de rechazo de carga en sistemas eléctricos de potencia. 2010.
- [16] Srinivas Pillutla and Ali Keyhani. Neural network based modeling of round rotor synchronous generator rotor body parameters from operating data. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(3):321–327, 1999.
- [17] Shen Shande, Zhu Shouzhen, and Han Bo. Identification of parameters of synchronous machine and excitation system by online test. In *1991 International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-91.*, pages 716–719. IET, 1991.
- [18] Jin-Cheng Wang, Hsiao-Dong Chiang, Chiang-Tsung Huang, Yung-Tien Chen, Chung-Liang Chang, and Chiew-Yann Chiou. On-line measurement-based model parameter estimation for synchronous generators: Solution algorithm and numerical studies. *IEEE transactions on energy conversion*, 9(2):337–343, 1994.

-
- [19] JJ Rico Melgoza, Gerald Thomas Heydt, Ali Keyhani, Baj L Agrawal, and Douglas Selin. Synchronous machine parameter estimation using the hartley series. *IEEE transactions on energy conversion*, 16(1):49–54, 2001.
- [20] Shuying Yang, Dawei Ding, Xi Li, Zhen Xie, Xing Zhang, and Liuchen Chang. A novel online parameter estimation method for indirect field oriented induction motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(4):1562–1573, 2017.
- [21] Andre Mrad, Ziad Noun, and Mohamad Arnaout. Simupmsam-an analytical modeling tool for permanent magnet synchronous and asynchronous machines. In *2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, pages 56–59. IEEE, 2018.
- [22] Jiménez Mondragón V.M. Lopez Garcia I. Campero Littlewood E. Olivares Garcia J.C. Escarela Perez R. Basurto Uribe E. Solis Correa H. De Urquijo Carmona J. Juarez Reyes. A. Juarez Nájera M González Montañez, F. J. Desarrollo de una plataforma virtual y su verificación experimental para el modelo, análisis y control de dispositivos electromagnéticos en001-18. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, 2018.
- [23] John J GRAINGER and William D STEVENSON JR. Análisis de sistemas de potencia. edit, 1995.
- [24] I López-García, G Espinosa-Pérez, and V Cárdenas. Control basado en pasividad para un sistema de generación eólico conectado a la red eléctrica.
- [25] Galindez G. Máquinas eléctricas ii. 2018.
- [26] José Francisco Pérez Morales, Alí; Cuevas Velázquez. Diseño de un sistema de suministro de energía eléctrica continuo. 2012.
- [27] Commons wiki P. Simplified scheme of the system of electrical power. 2006.
- [28] Irvin López García. *Estudio estructural y de sensibilidad paramétrica de circuitos equivalentes en dos ejes para un turbogenerador*. PhD thesis, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2005.
- [29] Hernán Mauricio Sánchez Jaramillo. Estimación de los parámetros del modelo matemático del generador sincrónico. *Escuela de Procesos y Energía*, 2015.

-
- [30] Martha Galaz, Romeo Ortega, and Alexandre Bazanella. On parameter estimation for excitation control of synchronous generators. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 18(5):443–455, 2004.
- [31] José Luis de la Fuente OConnor. Ingeniería de los algoritmos y métodos numéricos: Un acercamiento práctico y avanzado a la computación científica e ingenieril con matlab. *Editorial Círculo Rojo, El Ejido, Almería, España*, 2017.
- [32] Oliver Nelles. *Nonlinear system identification*, 2002.
- [33] Jose Pujol. The solution of nonlinear inverse problems and the levenberg-marquardt method. *Geophysics*, 72(4):W1–W16, 2007.
- [34] J Lewis et al. Problems, lecture notes in mathematics 2045, doi 10.1007/978-3-642-27145-8, © springer-verlag berlin heidelberg 2012. *Editors*, page 245, 2012.
- [35] E Ghahremani, M Karrari, and OP Malik. Synchronous generator third-order model parameter estimation using online experimental data. *IET generation, transmission & distribution*, 2(5):708–719, 2008.
- [36] Guillem Borrell i Nogueras et al. “matemáticas en ingeniería con matlab y octave”. *línea*. Available: <http://iimyoforja.rediris.es/tutorial/algebra.html>.
- [37] Guillermo Cid Espinosa. Programación de interfaz gráfica en app designer para el control vectorial de motores de imanes permanentes. 2018.
- [38] Ronald Lipsman and Jonathan M Rosenberg. *A Guide to MATLAB*. Cambridge University Press Textbooks, 2001.
- [39] Diego Samir Melo Solarte. Diseño de interfaces web amigables desde la perspectiva de la semiótica organizacional [web interfaces design from the perspective of the organizational semiotics]. *Ventana Informática*, (27), 2012.
- [40] June Jamrich Parsons and Dan I Oja. *Conceptos de computación: Nuevas perspectivas*. 2008.