

Estimación de parámetros del generador síncrono empleando herramientas de Matlab

Dayana Andrea Vera Gómez y Daniel Steven Rojas Mogollón

Trabajo de grado para optar por el título de Ingenieros Electricistas

Director

Dr. Hermann Raúl Vargas Torres

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Codirector

Diego Alfonso Jiménez Alvernia

Ingeniero Electricista

Universidad industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

A Dios por ser mi guía en este camino, por mostrarme su fidelidad y misericordia en cada momento, por darme la sabiduría para llegar hasta acá. A mi madre, Elena, por su amor, por apoyarme a cumplir mis sueños, por todo el esfuerzo y sacrificio. A mis hermanos Angie, Mayra y Juan, por ser mi mayor motivación e inspiración. A Carlos Fernando por apoyarme en cada momento de este proceso y ser parte fundamental de este logro.

Dayana Andrea Vera Gómez

A Dios, quien da sabiduría a los sabios y ciencia a los entendidos; quien da los tesoros escondidos y los secretos muy guardados. A mi madre; su esfuerzo, su ánimo y su trabajo me han mantenido a flote en medio de los insondables mares de la dificultad.

Daniel Steven Rojas Mogollón

### **Agradecimientos**

A Dios por permitirme cumplir cada uno de mis anhelos y ayudarme en los momentos difíciles, por mostrarme cada día su misericordia y fidelidad. A mis padres (Elena y Alexander) por tanto amor, por apoyarme en cada momento y por su constante sacrificio para poder obtener este logro. A mi tía (Elda) por ser mi segunda madre, por su amor y sus consejos. A mis hermanos Angie, Mayra y Juan, por ser mi inspiración y motivación. A mi familia en especial a mi Nono Antonio y mis tíos, Carlitos, Arley y Oscar, por su apoyo y su ayuda. A Carlos Fernando por su amor incondicional, por apoyarme cada día, por acompañarme en las subidas y bajadas de este proceso, por creer en mí. A mis amigas y amigos que estuvieron acompañándome y me ayudaron cuando más lo necesite. A mis docentes por ser inspiración, en especial al Dr. Gabriel Ordoñez, Ingeniero. Diego Alvernia e Ingeniero. Jairo Tapias A el Dr. Hermann Vargas por su guía y consejos en la elaboración de esta investigación. A cada una de las personas que me ayudaron y me acompañaron en este proceso.

Dayana Andrea Vera Gómez

Después de tantas batallas, al fin se ganó la guerra; este triunfo no hubiera sido posible sin la ayuda de verdaderos maestros, mi gratitud para el Dr. Gabriel Ordoñez Plata, quien vio que de mi proceso podían salir cosas buenas y al Dr. Johann Farith Petit Suarez, quien creyó en mi palabra. Mi gratitud para el Dr. Hermann Raúl Vargas Torres nuestro director de tesis, sus acertadas observaciones han sido fundamentales para la culminación de este trabajo.

Daniel Steven Rojas Mogollón

### Tabla de contenido

Introducción .....	12
1 Objetivos .....	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos .....	14
2 La máquina síncrona .....	15
2.1 Introducción .....	15
2.2 Modelo de la máquina síncrona .....	15
2.3 Representación circuital de la máquina en componentes dq0.....	17
2.4 Consideraciones de la máquina .....	20
2.5 Aspectos relevantes de la transformación dq0 .....	21
3 Metodología para la estimación de parámetros.....	23
3.1 Introducción .....	23
3.2 Cálculo de los parámetros en el eje directo.....	24
3.2.1 Cálculo de <b><math>aLad</math></b> a partir de la prueba de vacío .....	24
3.2.2 Cálculo de <b><math>Ld, Lq</math></b> y a mediante señales de operación de estado estable de la maquina.....	
25	
3.2.3 Estimación de los flujos magnéticos <b><math>\varphi d</math> y <math>\varphi q</math></b> .....	26
3.2.4 Estimación de la corriente de amortiguamiento <b><math>ikd</math></b> .....	27
3.2.5 Cálculo de los parámetros <b><math>Lf</math> y <math>Rf</math></b> .....	27
3.2.6 Cálculo de los parámetros <b><math>Lkd</math> y <math>Rkd</math></b> .....	28

ESTIMACIÓN PARÁMETROS DEL GENERADOR SINCRONO	5
3.3 Cálculo de los parámetros en el eje de cuadratura .....	28
3.3.1 Cálculo de la inductancia <b><i>Laq</i></b> .....	28
3.3.2 Estimación de las corrientes <b><i>Ikq e Ig</i></b> .....	29
3.3.3 Estimación de <b><i>Vaq</i></b> .....	29
3.3.4 Cálculo de los parámetros <b><i>Lg , Lkq , Rg y Rkq</i></b> .....	29
4 Proceso de medición .....	31
4.1 Detalle del grupo motor-generator .....	31
4.2 Detalle de las medidas.....	33
4.3 Detalle de los medidores .....	34
4.4 Procedimiento de las pruebas y toma de medidas:.....	37
5 Análisis de parámetros obtenidos .....	42
6 Comparación .....	52
7 Observaciones y conclusiones.....	55
Referencias.....	58

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Datos nominales del motor de corriente continua</i> .....	31
<b>Tabla 2</b> <i>Datos nominales del generador</i> .....	32
<b>Tabla 3</b> <i>Medidas</i> .....	34
<b>Tabla 4</b> <i>Datos obtenidos del tacómetro</i> .....	36
<b>Tabla 5</b> <i>Estimación de parámetros</i> .....	42
<b>Tabla 6</b> <i>Comparación de estimación de parámetros</i> .....	52

### Lista de figuras

<b>Figura 1</b>	<i>Modelo de la máquina síncrona</i> .....	16
<b>Figura 2</b>	<i>Circuito eléctrico que representa el eje directo de la máquina síncrona</i> .....	17
<b>Figura 3</b>	<i>Circuito eléctrico que representa el eje en cuadratura de la máquina síncrona</i> .....	18
<b>Figura 4</b>	<i>Representación de los devanados de la máquina en los ejes <math>d</math>, <math>q</math> y <math>0</math></i> .....	21
<b>Figura 5</b>	<i>Conexión del motor de corriente continua</i> .....	32
<b>Figura 6</b>	<i>Motor-generador del laboratorio de máquinas eléctricas</i> .....	33
<b>Figura 7</b>	<i>Multímetro Fluke del laboratorio de máquinas eléctricas</i> .....	34
<b>Figura 8</b>	<i>Analizador de redes Fluke 435-II</i> .....	35
<b>Figura 9</b>	<i>Corrección de velocidad del tacómetro</i> .....	36
<b>Figura 10</b>	<i>Tacómetro</i> .....	36
<b>Figura 11</b>	<i>Conexión a las fuentes de corriente continua y el osciloscopio con el shunt de corriente</i> .....	37
<b>Figura 12</b>	<i>Conexión de los CT'S y las máquinas</i> .....	38
<b>Figura 13</b>	<i>Reóstatos de campo tanto del motor como del generador</i> .....	39
<b>Figura 14</b>	<i>Bancos de carga</i> .....	40
<b>Figura 15</b>	<i>Entrada de carga resistiva en vacío tensión (en rojo claro) y corriente (color rojo oscuro) fase B</i> .....	40
<b>Figura 16</b>	<i>Entrada de carga resistiva en vacío corriente de campo del generador (color azul oscuro)</i> .....	41
<b>Figura 17</b>	<i>Corriente en el eje directo</i> .....	43
<b>Figura 18</b>	<i>Corriente del eje en cuadratura</i> .....	43

<b>Figura 19</b> <i>Tensión en la fase A</i> .....	44
<b>Figura 20</b> <i>Tensión de la fase B</i> .....	45
<b>Figura 21</b> <i>Tensión en la fase C</i> .....	45
<b>Figura 22</b> <i>Tensión en las fases</i> .....	46
<b>Figura 23</b> <i>Corriente de la fase A</i> .....	46
<b>Figura 24</b> <i>Corriente fase B</i> .....	47
<b>Figura 25</b> <i>Corriente fase C</i> .....	47
<b>Figura 26</b> <i>Corrientes de línea</i> .....	48
<b>Figura 27</b> <i>Corriente de campo</i> .....	48
<b>Figura 28</b> <i>Montaje de Simulink</i> .....	49
<b>Figura 29</b> <i>Tensiones de fase simuladas</i> .....	50
<b>Figura 30</b> <i>Corrientes de línea simuladas</i> .....	50
<b>Figura 31</b> <i>Corrientes en el eje directo y de cuadratura</i> .....	51

### **Glosario**

**Amortiguamiento:** el amortiguamiento es la pérdida de energía que se produce en un sistema mecánico en movimiento como consecuencia de efectos disipativos debidos al movimiento relativo entre sus componentes o a la deformación de estos.

**Armadura:** comúnmente llamada inducido, constituye uno de los componentes principales de los generadores de corriente (dinamos y alternadores) y de los motores eléctricos

**Campo magnético:** un campo magnético es la representación matemática del modo en que las fuerzas magnéticas se distribuyen en el espacio que circunda a una fuente magnética. Esta fuente puede ser un imán, una carga en movimiento o una corriente eléctrica (muchas cargas en movimiento).

**Devanados:** enrollamiento de alambre magneto sobre un núcleo, que usa inducción electromagnética para producir variaciones en una corriente. Generalmente consiste en varias vueltas de alambre distribuidas en una o más capas.

**Estator:** es la parte fija de una máquina rotativa y uno de los dos elementos fundamentales para la conversión electromecánica de potencia, siendo el rotor su contraparte móvil.

**Inductancia mutua:** Se llama inductancia mutua al efecto de producir una fem en una bobina, debido al cambio de corriente en otra bobina acoplada.

**Rotor:** el rotor es uno de los principales elementos de un motor eléctrico. Su papel es importantísimo y tenemos diferentes tipos de rotores según el tipo de motor.

**Reóstato:** Componente eléctrico para regular la intensidad de la corriente sin necesidad de abrir el circuito y que consiste en una resistencia eléctrica que puede variarse a voluntad.

## Resumen

**Título:** Estimación de parámetros del generador síncrono implementando herramientas de MATLAB<sup>1\*</sup>

**Autor:** Dayana Andrea Vera Gómez y Daniel Steven Rojas Mogollon

**Palabras Clave:** Máquina, síncrona, parámetros, Matlab, algoritmo, herramientas, mediciones

**Descripción:** En la actualidad más del 90% de la energía eléctrica producida en el mundo, se obtiene por medio de los generadores síncronos; por tanto, resulta de gran importancia para los diseñadores, proyectistas e ingenieros electricistas realizar buenas estimaciones sobre los parámetros del generador síncrono; esto, con el fin de predecir su comportamiento tanto en régimen permanente como dinámico, especialmente bajo perturbaciones en la carga las cuales tienen implicaciones en la estabilidad de los sistemas de potencia. La energía eléctrica que se obtiene debido a la transformación del trabajo mecánico por medio de un campo magnético rotativo alimenta a los hogares e industrias en todas partes; permitiendo además los innumerables usos que se le puede dar. En este trabajo de grado se estimarán los parámetros en régimen dinámico de la máquina síncrona trabajando como generador, mediante el procesado de los datos obtenidos de las medidas de corriente y tensión tanto de armadura como de campo y la velocidad mecánica

---

<sup>1\*</sup>Trabajo de Grado

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones

Director Dr. Hermann Raúl Vargas Torres Codirector Diego Alfonso Jiménez Alvernia

**Abstract**

**Title:** Synchronous generator parameter estimation implementing MATLAB tools.<sup>2\*</sup>

**Author(s):** Dayana Andrea Vera Gómez y Daniel Steven Rojas Mogollon

**Key Words:** Machine, synchronous, parameters, MATLAB, algorithm, tools, measurements

**Description:** At present, more than 90% of the electrical energy produced in the world is obtained by means of synchronous generators; therefore, it is of great importance for designers, planners, and electrical engineers to make good estimates on the parameters of the synchronous generator; this, in order to predict its behavior both in permanent and dynamic regime, especially under disturbances in the load which have implications in the stability of power systems. The electrical energy obtained due to the transformation of mechanical work by means of a rotating magnetic field feeds homes and industries everywhere; also allowing the innumerable uses that can be given to it. In this degree work, the parameters in dynamic regime of the synchronous machine working as a generator will be estimated by processing the data obtained from the current and voltage measurements of both armature and field and the mechanical speed.

---

<sup>2\*</sup> Degree Work

Faculty of Physical-Mechanical Engineering School of Electrical, electronics and telecommunications

Director Dr. Hermann Raúl Vargas Torres Codirector Diego Alfonso Jiménez Alvernia

## Introducción

La vida moderna está llena de avances en los campos de la electrotecnia, tales avances van desde el control automático por medio de servomotores pasando por todo tipo de artefactos domésticos que facilitan las labores diarias, hasta la gran maquinaria industrial y los vehículos eléctricos. De tal suerte resulta de gran importancia el generador síncrono, dado que su estudio se torna indispensable; asimismo, esta labor recae, nada menos que en una de las ramas de la ingeniería: la eléctrica. En efecto, dicha rama aprovecha las bases de las ciencias físicas y de las matemáticas para obtener modelos útiles que permitan explicar y predecir el funcionamiento de estas máquinas bajo todo tipo de regímenes tanto dinámicos, como permanentes, atendiendo siempre a la precisión y el alcance de cada modelo.

Por lo tanto, a través del presente trabajo de grado se aporta un modesto análisis y una verificación de los modelos propuestos para el generador síncrono.

Por otro lado, las máquinas eléctricas rotantes se pueden analizar al ser consideradas como transductores; es decir, transforman trabajo mecánico en electricidad y viceversa, en el caso particular del generador síncrono se trata como un transductor de doble excitación, porque consta de un devanado de armadura y de campo.

En otras palabras, este posee dos entradas de energía, una mecánica y otra eléctrica, además de su respectiva salida de energía eléctrica. De igual modo, cabe decir que la mayor dificultad del modelo surge cuando es necesario desacoplar las variables de frecuencia, potencia y tensión; para ello, se hace uso de ciertas transformaciones con lo cual no es necesario trabajar enteramente con variables temporales.

Igualmente, para establecer la estimación de parámetros es necesario tomar ciertas medidas: tensiones de fase, corrientes de línea, tensión y corriente de excitación y velocidad

mecánica, luego se usa el software Matlab para hacer el respectivo procesamiento de datos; de este modo, se obtienen los valores congruentes para el modelo en cuestión. Resta señalar, de todo lo aprendido durante el proceso, la formación en las áreas de circuitos eléctricos, métodos numéricos, programación y máquinas eléctricas son fundamentales para abordar los temas que se desean tratar en el presente trabajo de grado.

Entonces, los resultados obtenidos en la estimación de parámetros del generador síncrono al utilizar herramientas de Matlab permiten evaluar el rendimiento del generador y detectar posibles fallos o problemas en su funcionamiento; asimismo, ayudan a optimizar el desempeño del generador mediante el ajuste de los parámetros de control y el seguimiento de su rendimiento en tiempo real. Adicionalmente, es posible simular y analizar el comportamiento del generador en diferentes condiciones de operación y carga, lo que ayuda a diseñar sistemas de generación más eficientes y confiables.

## 1 Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Estimar los parámetros del generador síncrono empleando herramientas de Matlab.

### 1.2 Objetivos específicos

1. Revisar el estado de arte respecto al modelo DQ de la máquina síncrona.
2. Reconocer las herramientas de Matlab que permitan obtener un modelo DQ de la máquina síncrona.
3. Realizar las medidas de las variables eléctricas y mecánicas correspondientes para el modelo de la máquina síncrona.
4. Analizar los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas, empleando las herramientas de Matlab.
5. Obtener los parámetros del generador síncrono y comparar los resultados con el modelo presentado: Prototipo de herramienta software para la estimación de parámetros de la máquina síncrona bajo condiciones de carga.

## 2 La máquina síncrona

### 2.1 Introducción

Blondel (1904) introdujo un método para analizar el fenómeno oscilatorio de los alternadores, de tal modo que sentó las bases del modelo actual. Una década después, R.H. Park propuso los fundamentos que hoy se conocen como el análisis de la máquina síncrona en componentes  $dq0$  (Park, 1929, 1933). Dentro del modelo de la máquina, el circuito equivalente del eje directo incluye un devanado de campo, una inductancia de dispersión, inductancias mutuas e inductancias del devanado de amortiguamiento (Park, 1929, 1933).

Dicho esto, en este capítulo se procede a detallar la estructura física de la máquina síncrona, seguido de una exposición de sus aspectos matemáticos en relación con el tiempo y la transformación  $dq0$ .

### 2.2 Modelo de la máquina síncrona

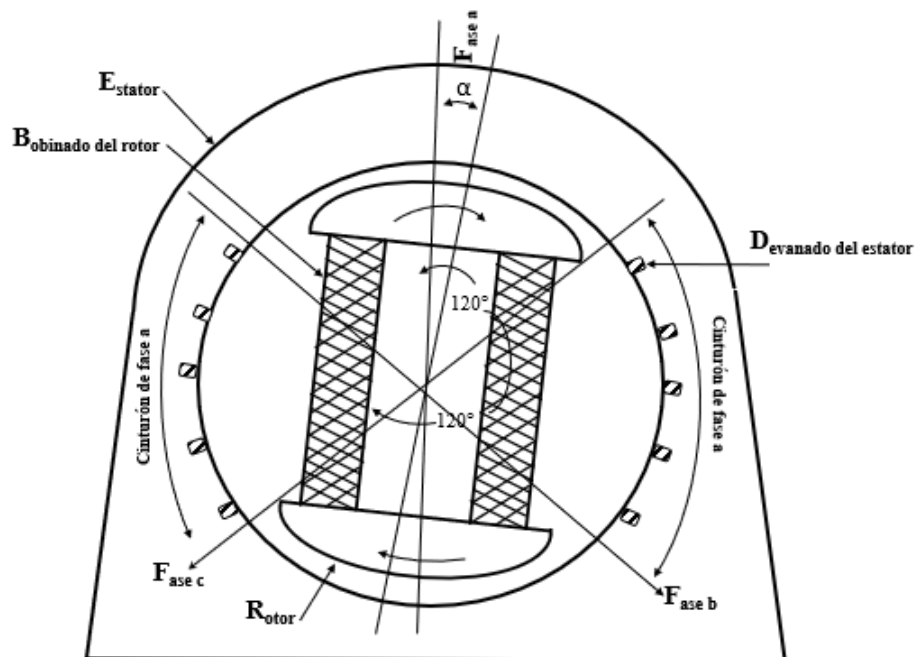
En la figura (1) se representa la sección transversal de una máquina síncrona, la cual consta de dos componentes esenciales: el estator y el rotor. En esa medida, el devanado del rotor, ubicado en el eje central, se alimenta con corriente continua con el fin de generar un flujo magnético constante y homogéneo. Por otro lado, el rotor está formado por una estructura de hierro laminado, sobre la cual se enrollan alambres de cobre. Cada enrollamiento genera un polo magnético individual.

De igual modo, la armadura se refiere a un conjunto de devanados dispuestos en tres grupos (A, B y C), sobre los cuales se genera una tensión eléctrica inducida. Esta tensión es superior a la aplicada al devanado del campo, lo que implica que estos grupos de devanados necesitan un nivel más elevado de aislamiento. Asimismo, estos devanados se encuentran en la

sección estacionaria de la máquina, puesto que operan con niveles de corriente superiores en comparación con los devanados restantes de la máquina. Por su parte, los devanados de la armadura se disponen de manera equidistante, con un ángulo de separación eléctrica de 120 grados. Por lo tanto, esta disposición asegura un equilibrio entre las tres tensiones de fase (Anderson y Fouad, 1977).

### Figura 1

*Modelo de la máquina síncrona*



La velocidad de sincronismo de la máquina se calcula mediante el número de polos y la frecuencia eléctrica de la red. Por otro lado, la fórmula que establece la velocidad de sincronismo del rotor se expuso en la siguiente ecuación [1]

$$n = \frac{120 f}{\#P} \quad (1)$$

donde: n es la velocidad a la que gira el rotor en revoluciones por minuto, f es la frecuencia de la red eléctrica, y #P indica el número de polos presentes en la máquina síncrona.

### 2.3 Representación circuital de la máquina en componentes dq0

Los circuitos de las figuras (2) y (3) representan la máquina sincrónica en los componentes dq0. La transformación del modelo posibilita simplificar los cálculos matemáticos. Asimismo, las inductancias del modelo en estas componentes son valores constantes.

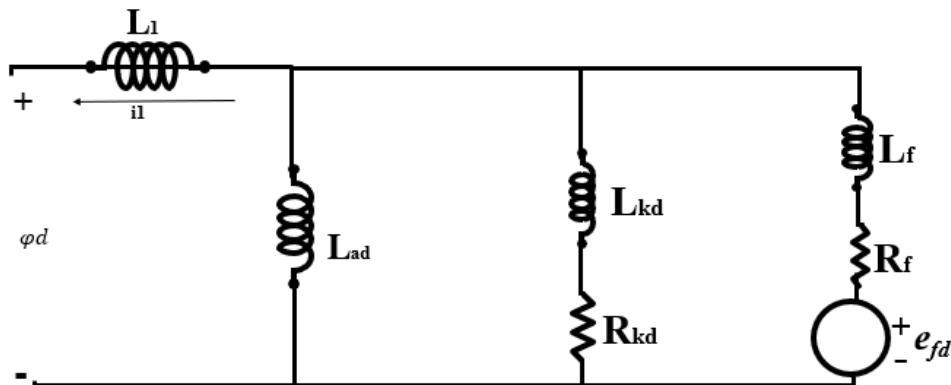
La matriz de transformación de componentes en el tiempo acerca de los componentes de Park se presenta en la ecuación (2).

$$\begin{bmatrix} id \\ iq \\ i0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} \quad (2)$$

Igualmente, el modelo de la máquina sincrónica está compuesto por dos circuitos, cada circuito representa un eje de la máquina, eje directo (d) y eje de cuadratura (q). El eje directo está alineado con el centro de los polos del rotor, el eje de cuadratura entre dos polos, en la parte de menor flujo de campo. En suma, las ecuaciones (3) a (5) representan las tensiones inducidas en el estator de la máquina sincrónica.

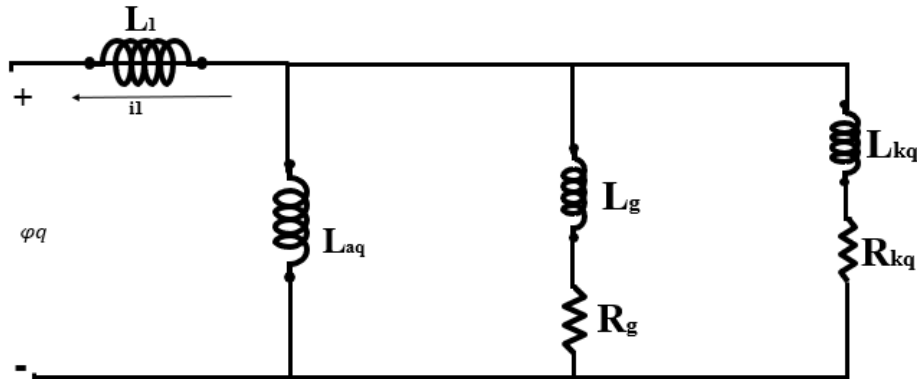
**Figura 2**

*Circuito eléctrico que representa el eje directo de la máquina sincrónica*



**Figura 3**

*Circuito eléctrico que representa el eje en cuadratura de la máquina síncrona*



$$e_d = P\varphi_d - \varphi_d P\theta - R_a i_d \quad (3)$$

$$e_q = P\varphi_q - \varphi_d P\theta - R_a i_d \quad (4)$$

$$e_0 = P\varphi_0 - R_a i_0 \quad (5)$$

Donde:

$\theta$  Se define como el ángulo entre el eje directo y la fase A.

$\varphi_d$  Es el flujo de corriente que fluye por el devanado del eje directo.

$\varphi_q$  Es el flujo de corriente que fluye por el devanado del eje en cuadratura.

P es el operador derivador.

Las ecuaciones (6), (7) y (8) están definidas en función de los flujos ligados, los cuales representan mediante las corrientes en los devanados de la máquina y los parámetros inductivos.

$$\varphi_d = -L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd} \quad (6)$$

$$\varphi_q = -L_q i_q + L_{akq} i_{kq} \quad (7)$$

$$\varphi_0 = -L_0 i_0 \quad (8)$$

La potencia instantánea total de salida en el estator se define en la ecuación (9)

$$P_t = e_d i_d + e_q i_q + e_0 i_0 \quad (9)$$

En un sistema balanceado  $e_0 = i_0 = 0$ , la ecuación (9) se simplifica al reemplazar las ecuaciones (6), (7), y (8).

$$P_t = (i_d \varphi_d - i_q \varphi_q) \omega_r + (i_d P \varphi_d + i_q P \varphi_q + 2i_0 P \varphi_0) - (i_d^2 + i_q^2 + 2i_0^2) R_a \quad (10)$$

Por ende, la ecuación (10) se desagregó en tres términos: la diferencia de la variación de la energía magnética en la armadura, la potencia transferida a través del entrehierro y las pérdidas debido a la resistencia de la armadura. De tal manera que el torque eléctrico se obtiene al dividir la potencia transferida a través del entrehierro en la velocidad angular del rotor.

$$T_e = (i_d \varphi_d - i_q \varphi_q) \frac{P_t}{\omega_r} \quad (11)$$

En relación con los campos magnéticos rotantes dentro de la máquina, el campo producido por la armadura siempre gira a la misma velocidad que el producido por el devanado de campo, aunque con un desfase entre ellos; este desfase depende de cómo trabaja la máquina. Por ejemplo, si es como generador, el campo del rotor adelanta al campo de armadura y el torque electromagnético actúa oponiéndose a la rotación; si es como motor, el campo del rotor atrasa el campo de armadura, con lo cual, el par electromagnético actúa en la dirección de rotación ayudando al movimiento. Por lo tanto, se podría decir que el torque electromagnético tiende siempre a alinear los campos rotantes. Por ejemplo, para el caso del generador, en vacío el ángulo entre el campo rotante mecánico (o del devanado de campo) y el campo rotante eléctrico (o del devanado de armadura) es cero.

En cuanto al dominio dq0, los ejes magnéticos se definen como paralelos al flujo magnético producido por las bobinas respectivas (corrientes convencionales) y positivas respecto al polo norte.

- El eje directo siempre es paralelo al eje magnético de uno de los polos del devanado de campo.
- El eje de cuadratura siempre va perpendicular al eje directo y positivo en sentido antihorario.

La posición relativa del rotor respecto al estator se mide por medio del ángulo  $\theta$  entre el eje directo y el eje magnético de la fase a, aunque el eje de cuadratura también puede estar atrasado respecto al eje directo.

## 2.4 Consideraciones de la máquina

Para el presente trabajo se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones y limitaciones del modelo de la máquina síncrona:

- Los devanados del estator están distribuidos senoidalmente a través del entrehierro a una distancia tal que haya buen acoplamiento magnético con el rotor.
- Las ranuras del estator no causan una variación apreciable en las inductancias del rotor.
- La histéresis magnética es despreciable.
- No se considera la saturación magnética.
- Se considera que las tensiones y corrientes son equilibradas.

El orden del modelo, el cual, en este caso, es determinado por el número de ramas R-L del circuito correspondiente a los devanados de amortiguamiento en cada eje. Comúnmente en las máquinas de polos salientes los análisis de estabilidad en sistemas de potencia no requieren más de dos o tres circuitos en cada eje, así que para el devanado de amortiguamiento se tratará como modelo de segundo orden.

- El subíndice  $k$  señala los circuitos y parámetros correspondientes a los devanados de amortiguamiento.
- Los devanados de amortiguamiento tienen representación tanto en el eje directo como en el eje en cuadratura.
- El devanado de campo solo tiene representación en el eje directo.

## 2.5 Aspectos relevantes de la transformación $dq0$

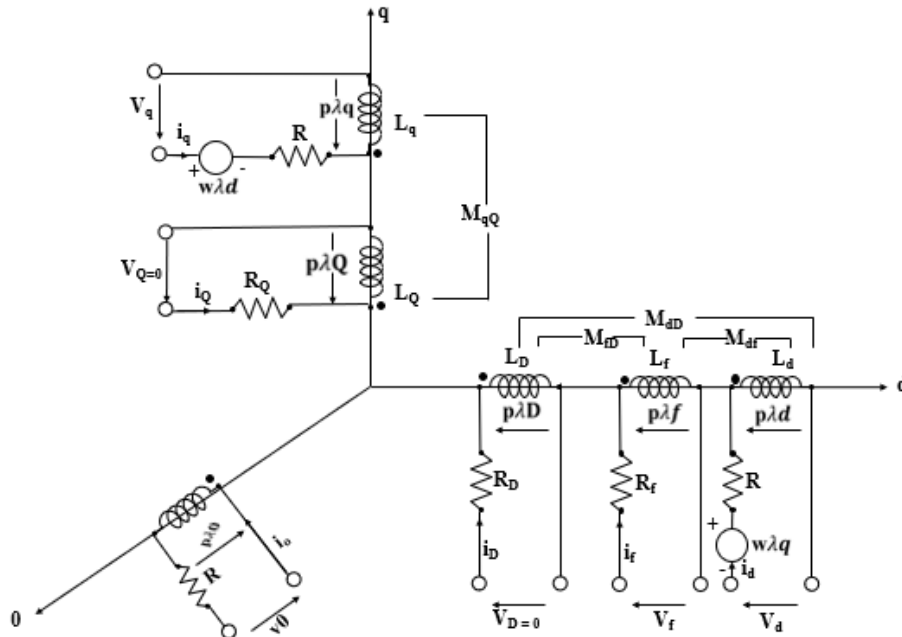
La transformada  $dq0$  puede verse como una forma de referir las cantidades del estator al lado del rotor, tal como se refieren los valores del lado secundario al lado primario de un transformador por medio de la relación de transformación. En esa medida, la transformación inversa puede verse como la forma de referir las cantidades del rotor al lado del estator.

Asimismo, el análisis de las ecuaciones de la máquina síncrona, en términos de las variables  $dq0$ , es considerablemente más sencillo que en términos de las cantidades en el dominio de las fases por las siguientes razones:

- Las ecuaciones del funcionamiento dinámico tienen inductancias constantes.
- Para condiciones balanceadas las cantidades de secuencia desaparecen.
- Para la operación en estado estable balanceado las cantidades del estator tiene valores constantes, para otros modos de operación estas varían con el tiempo.

### Figura 4

*Representación de los devanados de la máquina en los ejes  $d$ ,  $q$  y  $0$*



### 3 Metodología para la estimación de parámetros

#### 3.1 Introducción

Este capítulo describe la metodología implementada con el fin de obtener la estimación de los parámetros del modelo de la máquina; para ello, es necesario contar con datos de operación de la máquina en vacío, estado estable y bajo perturbación.

En esa medida, los algoritmos utilizados en la metodología son el PEM (Predictor Error Method) y el OE (Output Error). El primero realiza una estimación de ecuaciones en diferencias de orden  $n$ . Es un algoritmo complejo, pero robusto y rápido. La razón de utilizar este algoritmo en las ecuaciones de segundo orden es que, bajo ciertas condiciones, otros algoritmos no tienen convergencia en el proceso iterativo. Por otro lado, el algoritmo OE se utilizó para realizar la estimación de la ecuación en el devanado de amortiguamiento del eje de cuadratura, debido a que esta estimación se realiza en el dominio de la frecuencia. Por lo tanto, es posible utilizar los métodos en el modelo para realizar la estimación de los parámetros directamente, como se presentan algunos modelos en los tutoriales (Ljung, 1999; Gerdin, 2006). Sin embargo, la estimación obtenida normalmente no tiene un significado físico, solo es una solución matemática cuya respuesta final se ajusta a la respuesta del modelo real. De tal manera que una estimación directa no restringe valores de parámetros negativos, valores imaginarios o simplemente cantidades irreales.

Los modelos que se pretenden obtener mediante esta metodología serán utilizados para estudios de estabilidad transitoria y de pequeña señal. Para esto, es necesario contar con un modelo muy cercano al real, no un modelo matemático cuya respuesta final se ajusta a la respuesta deseada. Por tal motivo, la estimación debe ser lo más restringida posible, por ende,

hay que utilizar los fenómenos característicos de la máquina para obtener un modelo que satisfaga las ecuaciones y sea un modelo aceptado físicamente.

A continuación, se presenta una descripción del proceso de estimación de parámetros en el eje directo, devanado de campo y devanado de amortiguamiento; además, se presenta el método para estimar los parámetros en el eje de cuadratura, junto con los parámetros de los devanados de amortiguamiento. Finalmente, el cálculo de los parámetros se describe mediante la presentación de las ecuaciones dinámicas de la máquina.

### **3.2 Cálculo de los parámetros en el eje directo**

En esta sección se realiza la estimación de los parámetros del eje directo del modelo de segundo orden de la máquina sincrónica. Una característica interesante de esta metodología consiste en que realiza un proceso de estimación ajustado a los fenómenos físicos de la máquina. Debido a lo anterior, los parámetros estimados son valores aproximados coherentes. Por lo tanto, en la figura (2) y (3) se presentan los circuitos equivalentes del eje directo y de cuadratura, respectivamente.

#### **3.2.1 Cálculo de $aL_{ad}$ a partir de la prueba de vacío**

Durante la prueba de vacío, se encontró que las corrientes del estator de la máquina fueron cero. En efecto, esto implica que las corrientes de eje directo y de cuadratura son cero (Bergen, 1986; Kundur, 1994). Por lo tanto, la tensión en el eje directo es cero y la tensión en el eje de cuadratura depende solo de la corriente de campo y del valor de velocidad. A partir de este análisis, se determina el producto de la inductancia mutua  $L_{ad}$  y la relación de transformación  $a$ , como se presenta en la ecuación (12).

$$Vq = \frac{2}{3} W_s (aLad) * i_f * \quad (12)$$

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

### 3.2.2 Cálculo de $L_d, L_q$ y $a$ mediante señales de operación de estado estable de la maquina

En las ecuaciones (13) y (14) se presentan las tensiones del eje d y q respectivamente. Por lo tanto, se tiene en cuenta para ambos ejes las corrientes, los flujos y las variaciones de estos con respecto al tiempo.

En contraste, en estado estable las corrientes de amortiguamiento son cero y los flujos magnéticos son valores constantes (Bergen, 1986; Kundur, 1994). En ese sentido, las derivadas, con respecto al tiempo de los flujos magnéticos, fueron cero. Por tanto, las ecuaciones (13) y (14) se convierten en las ecuaciones (15) y (16).

$$Vd = -R_a i_d - \varphi_q W_s - P \varphi_d \quad (13)$$

$$Vq = -R_a i_q - \varphi_d W_s - P \varphi_q \quad (14)$$

Donde  $P$  es el operador diferencial.

$$Vd = -R_a i_d - (L_q i_q) W_s \quad (15)$$

$$Vq = -R_a i_d + (L_d i_d + \frac{2}{3} (aLad i_f *) W_s) \quad (16)$$

Al reorganizar la ecuación (15) se obtiene la ecuación (17):

$$Lq = \frac{V_d + R_a i_d}{W_s i_q} \quad (17)$$

De la misma forma, se toma la ecuación (16), obteniendo la ecuación (18)

$$Ld = \frac{V_q + R_a i_q - \frac{2}{3} W_s (aLad i_f *)}{W_s i_d} \quad (18)$$

La relación de transformación entre el estator y el rotor se determina al usar la relación:

$$a = \frac{aL_{ad}}{(L_d - L_l)} \quad (19)$$

donde  $M_{ad} = aL_{ad}$

### 3.2.3 Estimación de los flujos magnéticos $\varphi_d$ y $\varphi_q$

Los flujos magnéticos se determinan mediante la extrapolación lineal; por ende, se toman los valores iniciales determinados mediante las ecuaciones (20) y (21).

$$\varphi_{q(t=0)} = \frac{-1}{W_s} (V_d + R_a i_d) |_{t=0} \quad (20)$$

$$\varphi_{d(t=0)} = \frac{-1}{W_s} (V_q + R_a i_q) |_{t=0} \quad (21)$$

En ese sentido, las ecuaciones diferenciales a desarrollar se describen en las ecuaciones (22) y (23).

$$\frac{d\varphi_q}{dt} = W_s \varphi_q + V_d + R_a i_d \quad (22)$$

$$\frac{d\varphi_d}{dt} = W_s \varphi_d + V_q + R_a i_q \quad (23)$$

Asimismo, las ecuaciones (22) y (23) se resuelven de forma simultánea. Este sistema bidimensional no puede ser resuelto por medio del método de la regla trapezoidal, debido a que se presenta inestabilidad de las ecuaciones en diferencias, causada por un polo en el círculo unitario, lo que hace que la respuesta del sistema sea oscilatoria.

### 3.2.4 Estimación de la corriente de amortiguamiento $i_{kd}$

Una vez se determina el flujo magnético en el eje directo, la señal de corriente de amortiguamiento en este eje se halla mediante la ecuación (24).

$$i_{kd} = \frac{\varphi_d - L_d i_d}{\frac{2}{3} W_s (aL_{ad})} i_f^* \quad (24)$$

Donde  $i_f^*$  es la corriente de campo medida en terminales el devanado de campo

### 3.2.5 Cálculo de los parámetros $L_f$ y $R_f$

A partir de la ecuación (25) y los datos de tensión y corriente de campo referidos al lado del rotor se define la ecuación en diferencias presentada en la ecuación (26). Por otro lado, la ecuación en diferencias se desarrolla a partir de la definición de la regla trapezoidal. Como resultado, la ecuación obtenida es una ecuación en diferencias de segundo orden. A partir del método PEM, se obtienen los coeficientes que acompañan a la señal de corriente de la ecuación en diferencias.

$$V_f = -R_f i_f + L_{ad} i'_d - \frac{2}{3} (aL_f i'_f) - \frac{2}{3} (aL_{ad} i'_{kd}) \quad (25)$$

$$\left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} + \frac{R_f}{2} \right\} i_f(t) - \left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} - \frac{R_f}{2} \right\} i_f(t - \Delta t) = S_{ent}(t) \quad (26)$$

Con:  $S_{ent}(t) = V_f + L_{ad} i'_d + \frac{2}{3} (aL_{ad} i'_{kd})$  y al definir las constantes en la ecuación (27)

$$a_1 = \left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} + \frac{R_f}{2} \right\} \quad y \quad a_2 = \left\{ \frac{2aL_f}{3\Delta t} - \frac{R_f}{2} \right\} \quad (27)$$

Los valores de  $L_{kd}$  y  $R_{kd}$  se determinan mediante las ecuaciones (28) y (29):

$$L_f = 3 \frac{a_1 - a_2}{4a} \Delta t \quad (28)$$

$$R_f = a_1 - a_2 \quad (29)$$

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

A partir de la ecuación (30), se determina la ecuación en diferencia descrita en (31).

Mediante el método PEM se precisan las constantes  $L_{kd}$  y  $R_{kd}$ .

$$V_{kd} = 0 = -R_{kd}i_d + L_{ad}i'_d - \frac{2}{3}(aL_f i'_f) - \frac{2}{3}(aL_{ad}i'_f) \quad (30)$$

$$\left\{\frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} + \frac{R_{kd}}{2}\right\}i_{kd}(t) - \left\{\frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} - \frac{R_{kd}}{2}\right\}i_{kd}(t - \Delta t) = S_{ent}(t) \quad (31)$$

Con:  $S_{ent}(t) = L_{ad}i'_d + \frac{2}{3}(aL_{ad}i'_f)$  y definiendo las constantes en la ecuación (32)

$$a_1 = \left\{\frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} + \frac{R_{kd}}{2}\right\} \quad y \quad a_2 = \left\{\frac{2aL_{kd}}{3\Delta t} - \frac{R_{kd}}{2}\right\} \quad (32)$$

Los valores de  $L_{kd}$  y  $R_{kd}$  se determinan mediante las ecuaciones (33) y (34):

$$L_{kd} = 3 \frac{a_1 - a_2}{4a} \Delta t \quad (33)$$

$$R_{kd} = a_1 - a_2 \quad (34)$$

### 3.3 Cálculo de los parámetros en el eje de cuadratura

La estimación de los parámetros del eje de cuadratura es muy similar al proceso mencionado. Sin embargo, debido a que no se cuenta con las corrientes de los devanados de amortiguamiento es necesario implementar un proceso distinto al anterior para estimar los parámetros del eje en cuadratura.

#### 3.3.1 Cálculo de la inductancia $L_{aq}$

El valor de la inductancia mutua se estima mediante la ecuación (35) y el valor de  $L_q$ .

$$L_{aq} = L_q - L_l \quad (35)$$

### 3.3.2 Estimación de las corrientes $I_{kq}$ e $I_g$

No es posible determinar cada señal de corriente por separado. Por lo tanto, se determinan los parámetros a partir de la suma de las dos señales  $I_{sum}$ . De igual modo, para determinar la suma de las corrientes de los devanados de amortiguamiento se reorganiza la ecuación (36) para obtener de este modo la ecuación (37).

$$\varphi_q = L_q i_q + \frac{2}{3} a L_{ad} (i_g + i_{kq}) \quad (36)$$

$$i_{sum} = \frac{L_q i_d - \varphi_d}{\frac{2}{3} a L_{ad}} \quad (37)$$

### 3.3.3 Estimación de $V_{aq}$

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

$$V_{aq} = -L_{aq} i_q - \frac{2}{3} (a L_{ad}) (i_{sum}) \quad (38)$$

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

Tomando la señal  $V_{aq}$  y la señal de corriente  $i_{sum}$  se determina la función de transferencia presentada en la ecuación (39), compuesta por cinco términos. Para determinarlos, se utiliza el método OE en el dominio de la frecuencia y se obtiene una solución. No obstante, en muchas ocasiones estos valores no tienen un significado real. Por lo tanto, es necesario ajustar la metodología para obtener valores aproximados a los reales.

$$\frac{I_{sum}(s)}{V_{aqs}(s)} = \frac{(L_g + L_{kq})s + (R_g + R_{kq})}{(L_g L_{kq})s^2 + (R_g L_{kq} + R_{kq} L_g)s + R_g R_{kq}} \quad (39)$$

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

Por otra parte, el grupo de parámetros que produzca una mejor similitud con respecto a  $I_{cal}$  corresponde con los datos seleccionados. En esa medida, la mejor similitud se determina al calcular la integral de la señal de error cuadrático entre la suma de las corrientes estimadas y la corriente  $I_{cal}$ , para cada grupo de parámetros. En efecto, este proceso mezcla una estimación en frecuencia y la selección de los parámetros de mejor ajuste se realiza con las señales en el tiempo.

## 4 Proceso de medición

Las medidas se realizaron en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Industrial de Santander. Cabe anotar que allí se dispone de una interesante selección de maquinaria, entre la cual se encuentra un grupo motor-generador síncrono.

Para las pruebas, el conjunto motor-generador debe contar con un control preciso de la velocidad de rotación del eje, así como de la corriente de excitación del campo del generador. En efecto, lo primero se logra de la siguiente forma: se tiene un motor impulsor o primotor en corriente continua tipo derivación, esto se realiza con un motor de este tipo debido a la facilidad para el control de la velocidad de rotación, lo que requiere solo un reóstato en serie con el devanado de campo. Lo segundo se consigue mediante una fuente de corriente continua bien filtrada, cuya onda de tensión tenga muy bajo rizado para evitar deformación en la tensión del inducido; asimismo, la corriente de campo se controla de la misma forma, mediante otro reóstato.

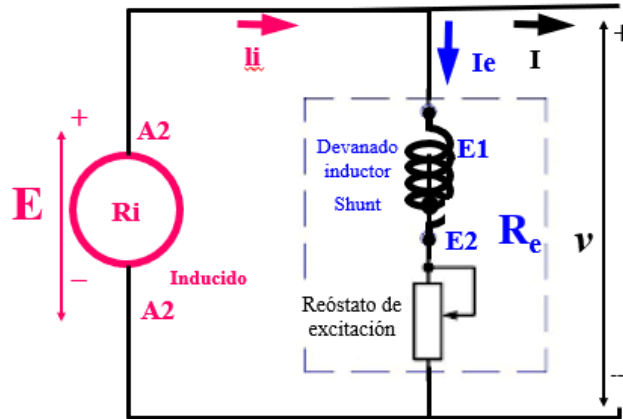
### 4.1 Detalle del grupo motor-generador

A continuación, se presentan las especificaciones y conexión del motor impulsor de corriente continua:

**Tabla 1**

*Datos nominales del motor de corriente continua*

Motor de corriente continua	
Tipo:	Derivación (Shunt)
Potencia nominal:	20 kW
Tensión nominal:	220 V
Corriente nominal:	70 A
Corriente nominal excitación:	2,5 A
Tensión nominal de excitación:	220 V
Velocidad nominal	1800 [rev/min]

**Figura 5***Conexión del motor de corriente continua*

Para la medición de las tensiones y corrientes del motor de corriente continua, se dispuso de medidores analógicos con el fin de revisar constantemente en medio de las pruebas que sus valores estuvieran dentro de los límites de placa. De igual forma, no se consideró necesario registrar estos valores por carecer de relevancia en los parámetros del generador.

Respecto al generador síncrono, la máquina en estudio, su campo ubicado en el rotor consta de cuatro polos, tipo salientes, posee devanado de amortiguamiento, su frecuencia de operación son 60 [Hz], gira a su respectiva velocidad de 1800 [rev/min]. Dicho esto, sus especificaciones y conexión son las siguientes:

**Tabla 2***Datos nominales del generador*

Generador síncrono	
Tipo:	Polos Salientes
Devanado de amortiguamiento	Si
Potencia nominal	12 [kW]
Tensión de línea nominal:	220 V
Tensión de excitación nominal:	110 V
Corriente de excitación nominal:	2.55 A
Velocidad nominal	1800 [rev/min]

Es necesario mantener constante la velocidad de rotación, debido a que cualquier variación de la velocidad provoca una variación proporcional de frecuencia en la tensión de salida. Como se mencionó, se hace manualmente por medio de un reóstato en serie con el devanado de campo.

En la siguiente figura se puede observar el motor-generator

### Figura 6

*Motor-generator del laboratorio de máquinas eléctricas*



## 4.2 Detalle de las medidas

El estudio en cuestión contempla la toma de nueve medidas, de las cuales ocho son variables eléctricas: tres tensiones de fase y tres corrientes de línea en corriente alterna provenientes del generador, así como la tensión y corriente de excitación en corriente de continua que alimenta el campo del generador; en cuanto a las variables mecánicas, se toma la velocidad de rotación del eje del conjunto. En la siguiente tabla se resume los parámetros de medida:

**Tabla 3***Medidas*

Magnitud	Unidad	Intervalo de medición	Cantidad de elementos	Tipo de medición y clase	Medidor
Tensiones de fase	Volts, AC,60 [Hz]	Nominal 127 Vac	3	Directa 0,5 A	Fluke 435-II, tres tensiones de fase, tres corrientes de línea
Corrientes de línea	Amperes, AC, 60, Hz	1~5 A,	3	Indirecta Por medio de CT's 1,0 A	
Tensión de campo	Volts, DC	Nominal 110 Vdc	1	Directa	Fluke 115, Osciloscopio
Corriente de campo	Ampres, DC	Nominal 2.5 Adc	1	Indirecta mediante CT's	Fluke 435-II, corriente de neutro
Velocidad del eje	RPM [rev/min]	Nominal 1800 [rev/min]	1	-	Tacómetro óptico

**4.3 Detalle de los medidores**

Multímetro Fluke 115: multímetro de uso general, con pantalla de 6000 cuentas y con frecuencia de actualización de 32 veces por segundo.

**Figura 7**

*Multímetro Fluke 115 del laboratorio de máquinas eléctricas*



Analizador de redes Fluke 435-II: es un instrumento muy sofisticado y con muchas funciones. En otras palabras, es el instrumento principal de todas las pruebas. Por lo tanto, se usa el modo de captura de transitorios, el cual permite capturar el instante de la perturbación automáticamente. Esto se hace mediante el ajuste de los *triggers* o “gatillos” de tensión y/o corriente según corresponda. Aunado a esto, tiene una tasa de muestreo de 200 mil muestras/s; además, posibilita registrar luego del evento una ventana de unos 120 ms. Igualmente, los datos se extraen del aparato por medio de una memoria SD y el software correspondiente de la marca, lo que permite observar las gráficas, así como su respectiva lista de valores y tiempos correspondientes.

### Figura 8

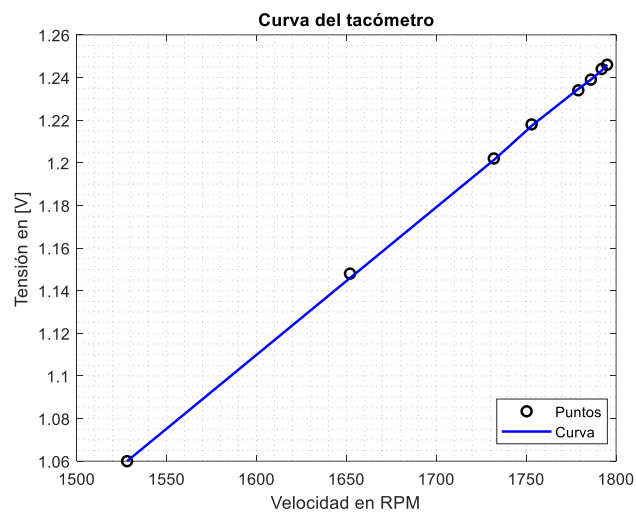
*Analizador de redes Fluke 435-II*



Tacómetro óptico: es un instrumento sencillo y fiable, dispone de un *display* de leds de siete segmentos de cuatro dígitos, además de una salida de tensión de 0-5 V, fue necesario llevar a cabo la calibración con varias velocidades y tensión de salida. Asimismo, esto se contrastó con un tacómetro digital del laboratorio. A continuación, se muestra la tabla de valores y la corrección con mínimos cuadrados correspondiente:

**Tabla 4***Datos obtenidos del tacómetro*

Referencia	Lecturas del tacómetro óptico en [rev/min]	
	Lectura	Tensión de salida V
1528	1528	1,060
1652	1655	1,148
1732	1733	1,202
1753,6	1754	1,218
1779	1778	1,234
1786,1	1786	1,239
1792	1793	1,244
1795,6	1795	1,246

**Figura 9***Corrección de velocidad del tacómetro***Figura 10**

Tacómetro

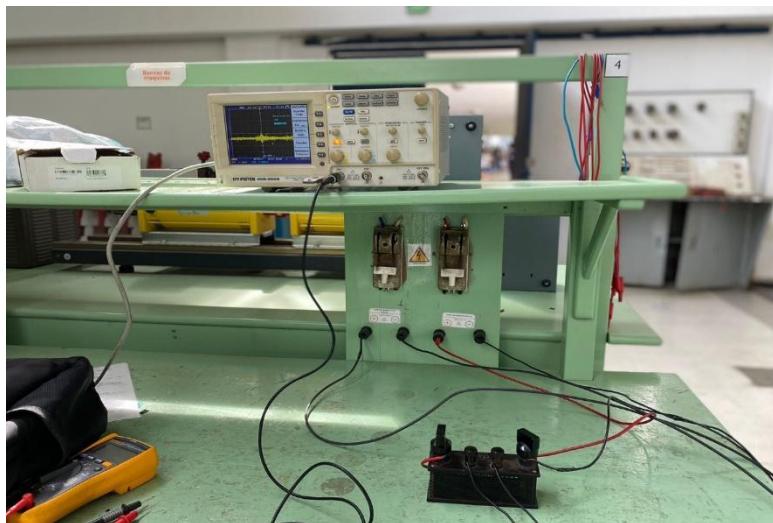


#### 4.4 Procedimiento de las pruebas y toma de medidas:

Se da inicio al hacer las conexiones tanto del motor, como del generador, en el caso del motor se conecta la armadura en serie con la resistencia de arranque a una de las fuentes de corriente continua. Acto seguido, mediante dos reóstatos en serie se conecta el campo del motor a esa misma fuente. En el caso del generador, se dispone los devanados de armadura en conexión estrella con neutro aislado; después, la carga se conforma por sendos bancos de resistencias inductores y capacitores conectados por medio de un interruptor manual para simular un transitorio de carga. En lo concerniente, al campo del generador este se conecta mediante dos reóstatos a la fuente de corriente continua filtrada.

#### Figura 11

*Conexión a las fuentes de corriente continua y el osciloscopio con el shunt de corriente*



En cuanto al analizador de redes, este se conecta de la siguiente forma: las tensiones de fase se toman en los bancos de carga, sin olvidar conectar el neutro de la carga con el neutro del generador, pero sin conectar a tierra física. Acto seguido, las corrientes de línea se toman mediante transformadores de corriente en cada una de las líneas, la especificación máxima de

corriente es de 5 [A] para cada uno; aún falta la corriente de campo del generador, aunque esta sea en corriente continua, se puede medir a través del transformador de corriente, debido a que interesa observar el transitorio. Luego, con buena respuesta en frecuencia del CT, es fácil ver la corriente inducida durante el cambio de carga apareciendo en el medidor como la corriente del neutro.

### Figura 12

*Conexión de los CT'S y las máquinas*



Después de realizar las conexiones de las máquinas y de los medidores, se procede a la puesta en marcha. Cabe recordar que se debe cuidar el arranque de la máquina al verificar que la corriente de campo se halle en su máximo y que la resistencia de arranque esté en su posición de mayor valor óhmico. Por ello, se procedió deslizando lentamente la resistencia de arranque para que el motor vaya tomando velocidad, cuando esté cerca de la velocidad nominal, en este caso de 1800 (rev/min), se cortocircuitó la resistencia de arranque con seguridad. Luego, se vigiló atentamente la lectura del tacómetro, mientras se ajustó la velocidad del motor por medio de su reóstato de campo. Cuando esto se haya conseguido, no se debe conectar la carga inmediatamente, dado que pueden considerarse las lecturas de la prueba de vacío.

Reóstatos de campo tanto del motor como del generador:

**Figura 13**

*Reóstatos de campo tanto del motor como del generador*



En esa medida, se procede a producir el escalón de carga en el generador. Asimismo, se hacen sucesivas pruebas pasando de vacío a un cierto valor de carga resistivo. Después, se realiza lo contrario, con carga se pasa a vacío; de esta forma, se toman los datos con diferentes combinaciones de carga. Por otro lado, la mayor ventaja del analizador de redes radica en definir correctamente los *triggers* en el modo transitorios del aparato, para que cuando se accione el interruptor de carga ya sea en entrada o salida de esta, el medidor pueda detectar la variación de corriente y tal como hace una cámara automática que dispara y toma una instantánea. De la misma forma lo hace el Fluke 435-II, al activarse el *trigger* toma la ventana de observación con sus datos respectivos. Cabe aclarar que, una vez logrado este paso con el uso y el ajuste correcto de los parámetros del medidor en el modo transitorios, resulta una tarea muy sencilla aplicar los escalones de carga y esperar el tiempo de establecimiento del generador para volver a repetir el proceso.

**Figura 14***Bancos de carga*

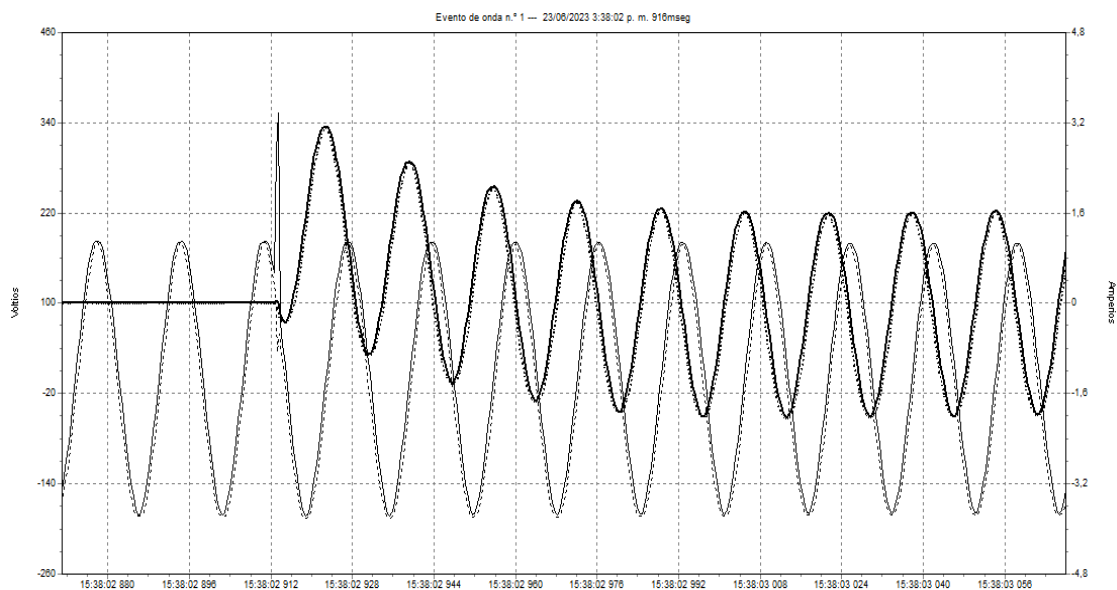
Las gráficas que se obtuvieron en el dominio del tiempo son las siguientes:

Entrada de carga resistiva en vacío tensión (negro claro) y corriente (color negro oscuro)

fase A

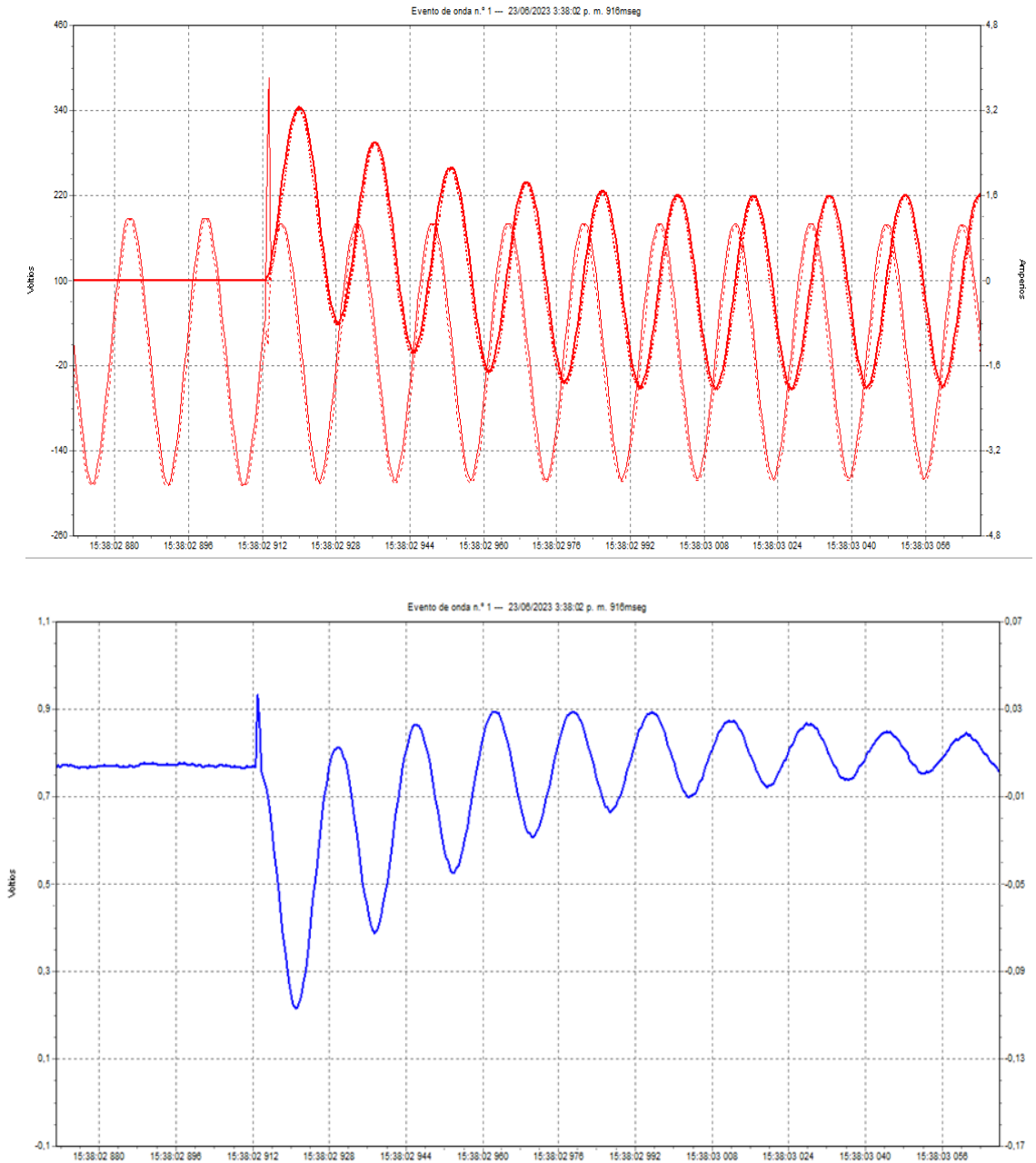
**Figura 15**

*Entrada de carga resistiva en vacío tensión (en rojo claro) y corriente (color rojo oscuro) fase B*



**Figura 16**

*Entrada de carga resistiva en vacío corriente de campo del generador (color azul oscuro)*



## 5 Análisis de parámetros obtenidos

Una vez realizadas las pruebas y al registrar los datos correspondientes a las medidas de tensiones de fase, corrientes de línea, tensión de campo, corriente de campo y velocidad, se procesaron los datos.

Por lo tanto, para trabajar con dichas medidas es útil que se presenten mejor tabuladas en valores que en gráficas; por ello, se debe obtener el software propietario Power Log 430-II para el medidor Fluke 435-II, el cual se descarga gratuitamente desde su sitio web. Esto, debido a que los archivos guardados por el instrumento vienen comprimidos en un formato especial con extensiones ADM e .IDX, las muestras por medio del software de la marca se extraen con la extensión .txt. Después, para facilitar la tabulación de los datos, ellos se convierten a una hoja de cálculo en Excel con extensión .xlsx; de esta forma, son recibidas como inputs del programa adjunto en Matlab para su posterior procesamiento y entrega de resultados. De los datos recabados, se tienen 2250 muestras, lo que abarca un total de 12 ciclos a 60 Hz cada gráfica.

A continuación, se presentan los parámetros hallados en el presente trabajo; la primera columna indica el parámetro, la segunda con entrada de carga y la tercera con salida de carga:

**Tabla 5**

*Estimación de parámetros*

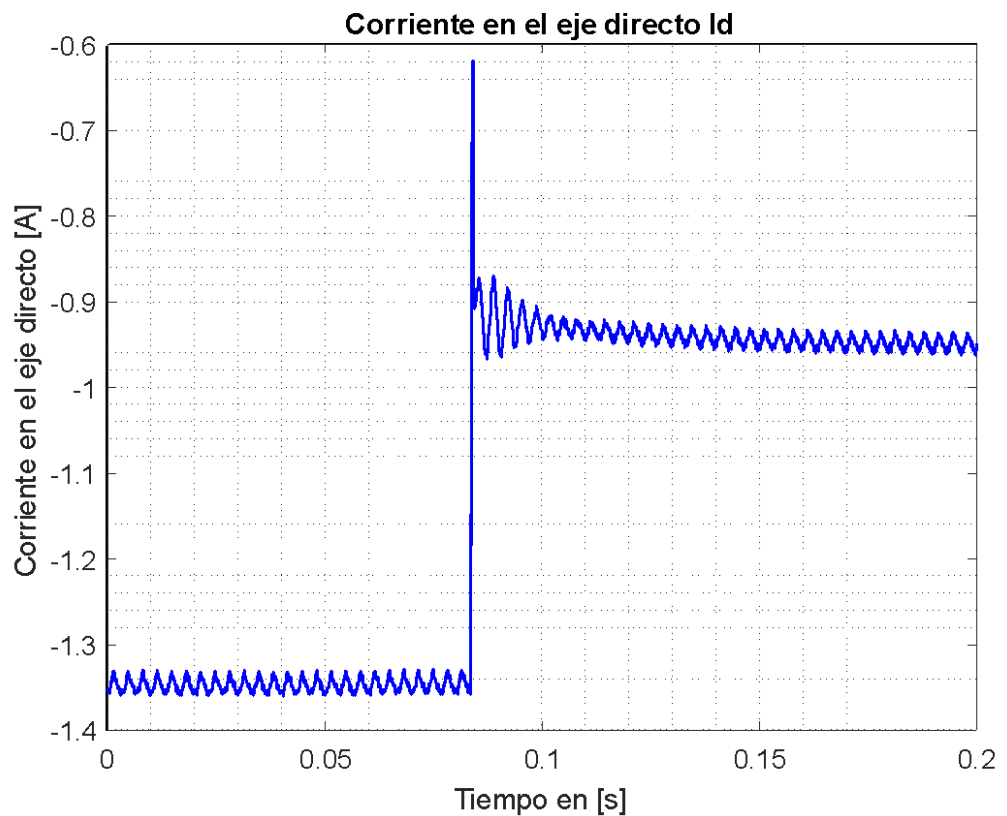
Parámetro	Entrada de Carga	Salida de carga
Ll	0,0230	0,0230
Rs	0,1415	0,1415
Ld	0,0247	0,0280
Lq	0,0681	0,0720
Lad	0,0247	0,0256
Laq	0,0613	0,0690
Lf	1,0592	1,0230
Lkd	0,0081	0,0120
Lg	2,0255	2,3761
Lkq	0,0073	0,0096

$R_f$	0,2701	0,0031
$R_{kd}$	0,0754	0,0842
$R_g$	241,733	538,241
$R_{kq}$	0,3546	0,3746

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a los principales parámetros estimados de la máquina en estudio, así como un generador síncrono de polos salientes.

**Figura 17**

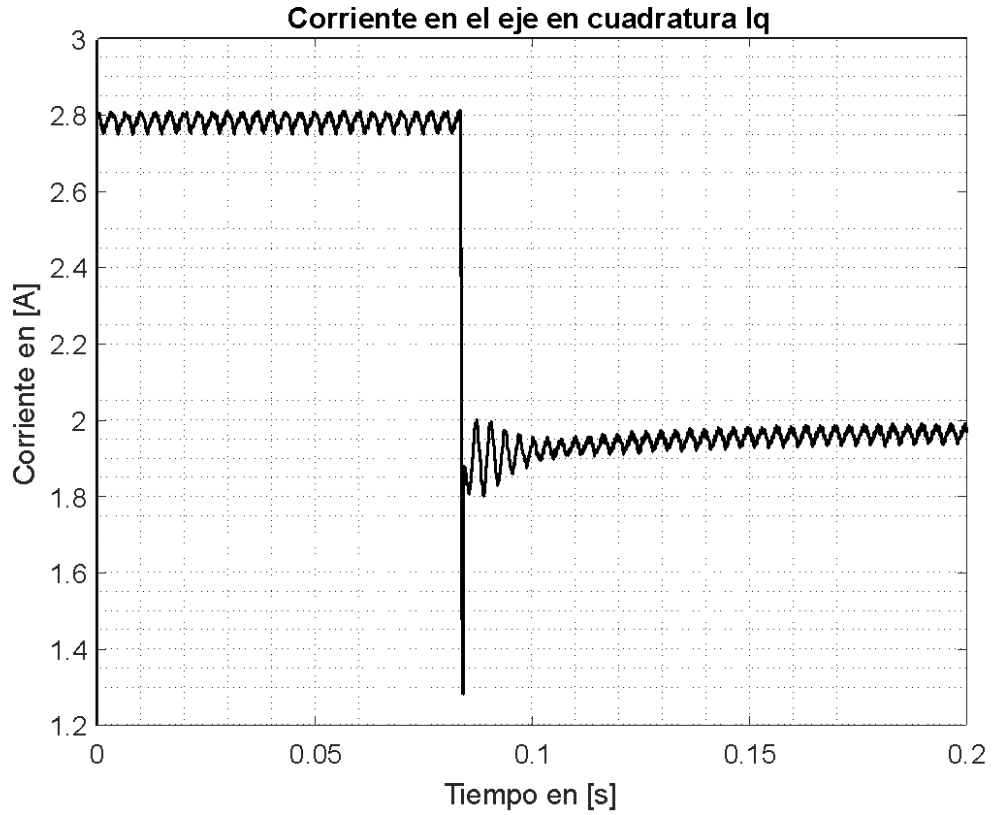
*Corriente en el eje directo*



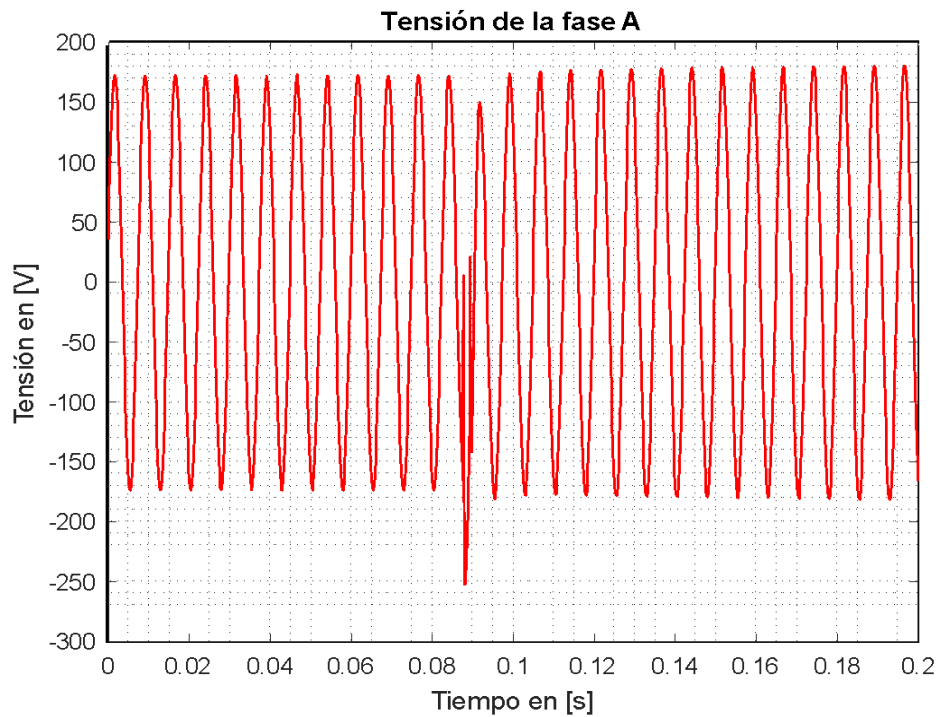
En la gráfica, el momento del transitorio ocurre cerca de los 0.8 segundos, el cual aumenta conforme al escalón de carga y tiende a estabilizarse en un nuevo valor.

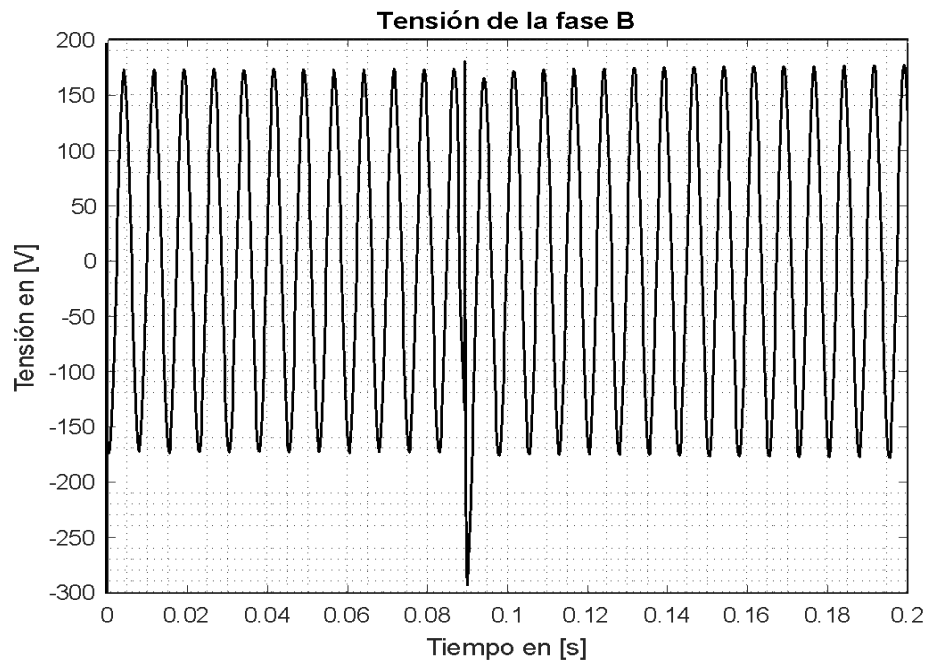
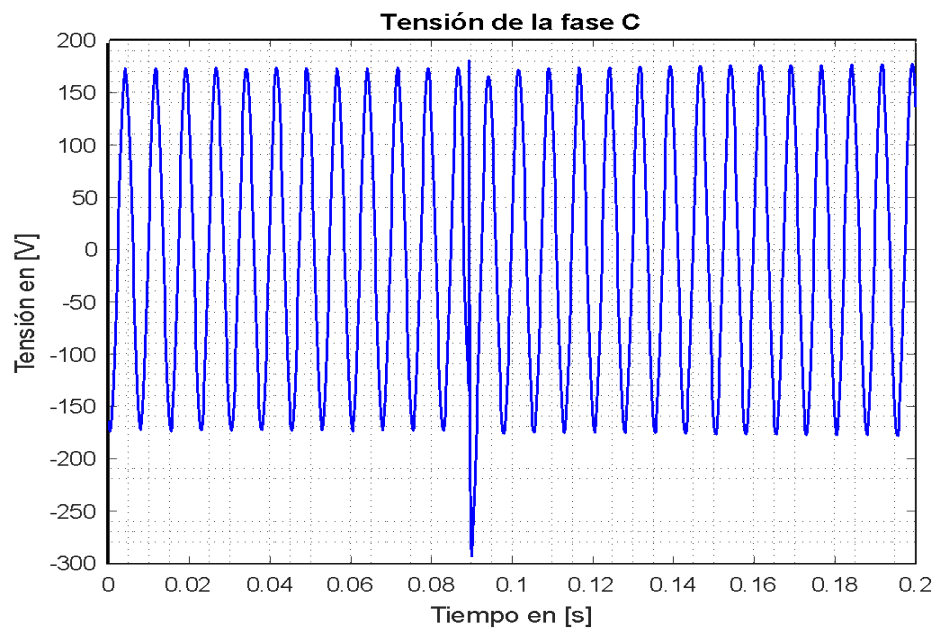
**Figura 18**

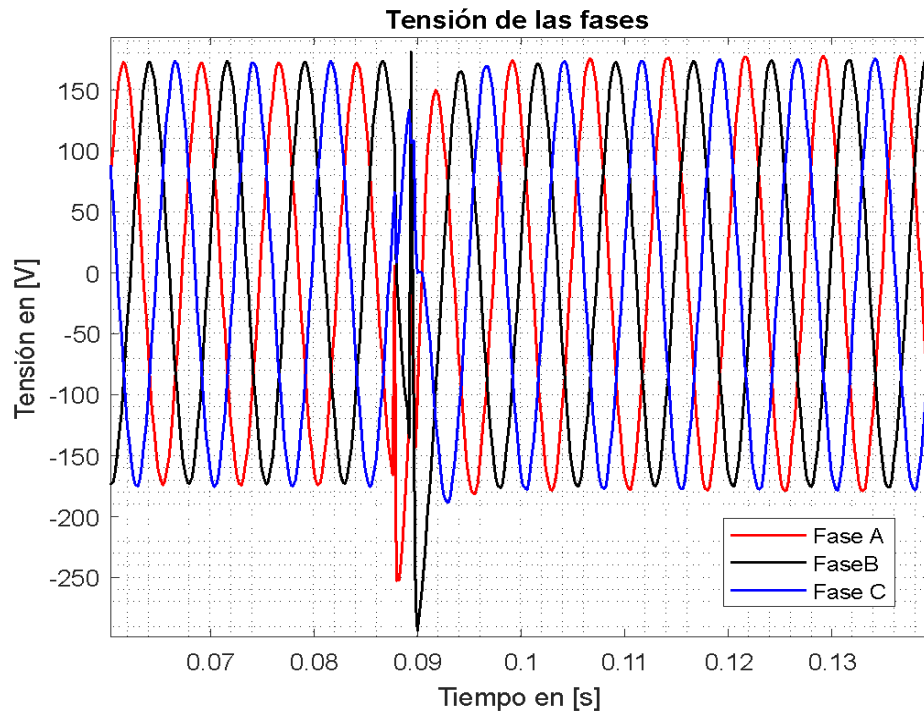
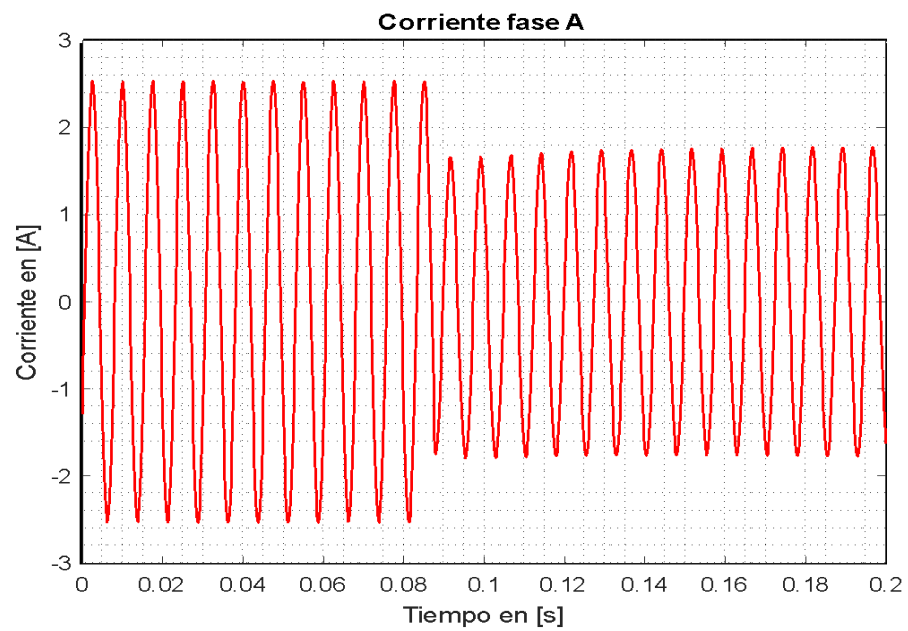
*Corriente del eje en cuadratura*

**Figura 19**

*Tensión en la fase A*

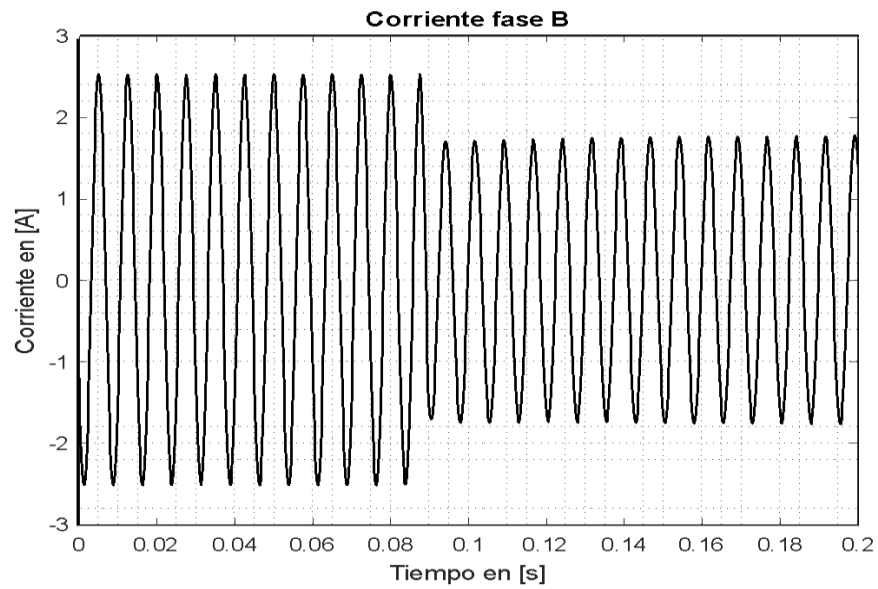
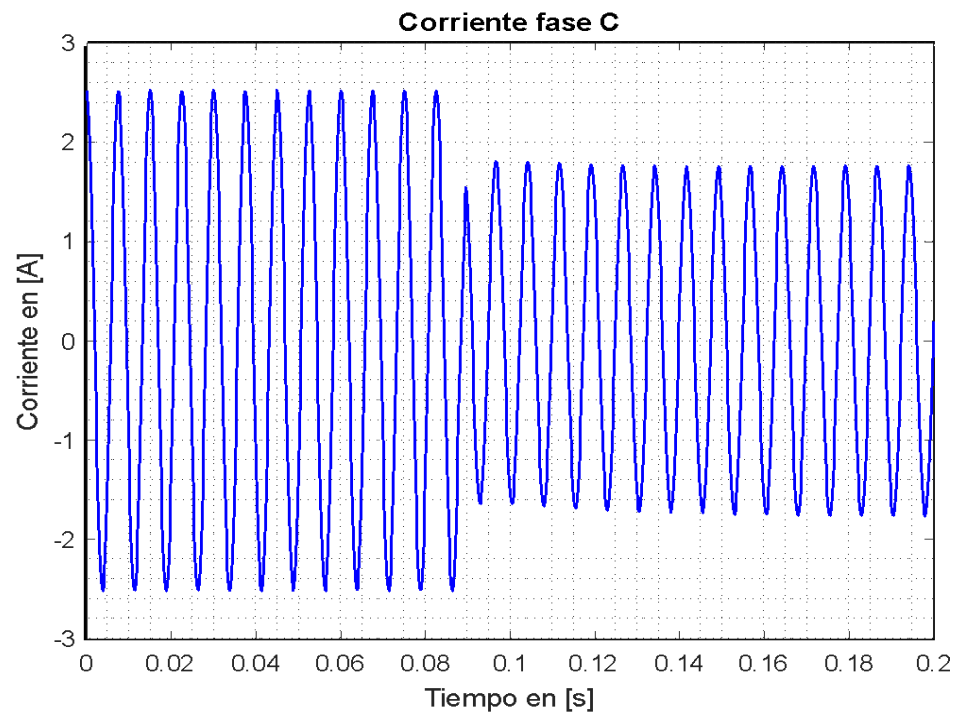


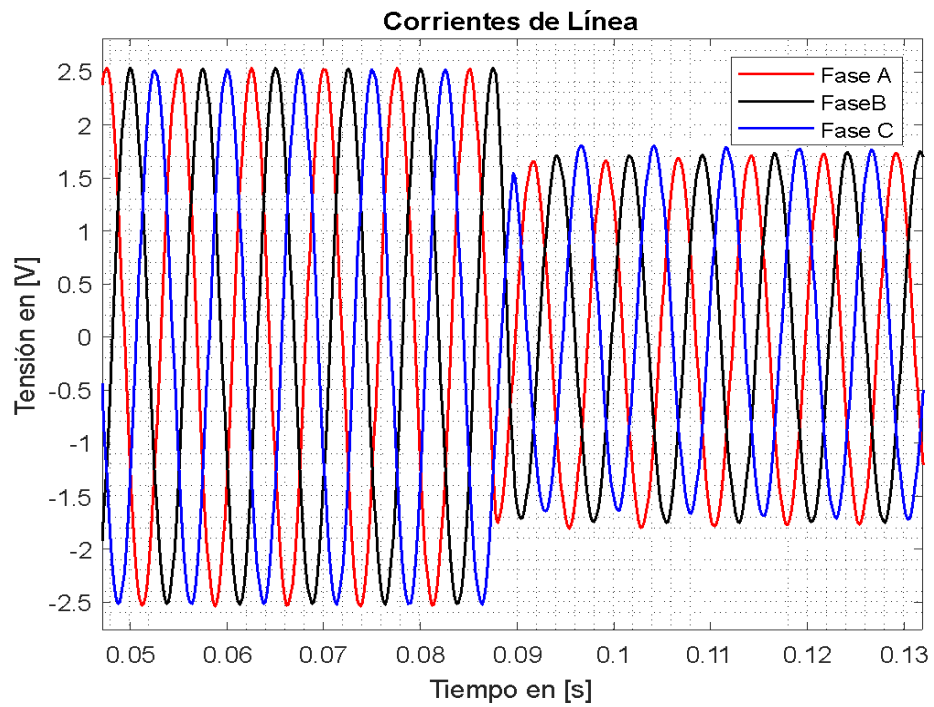
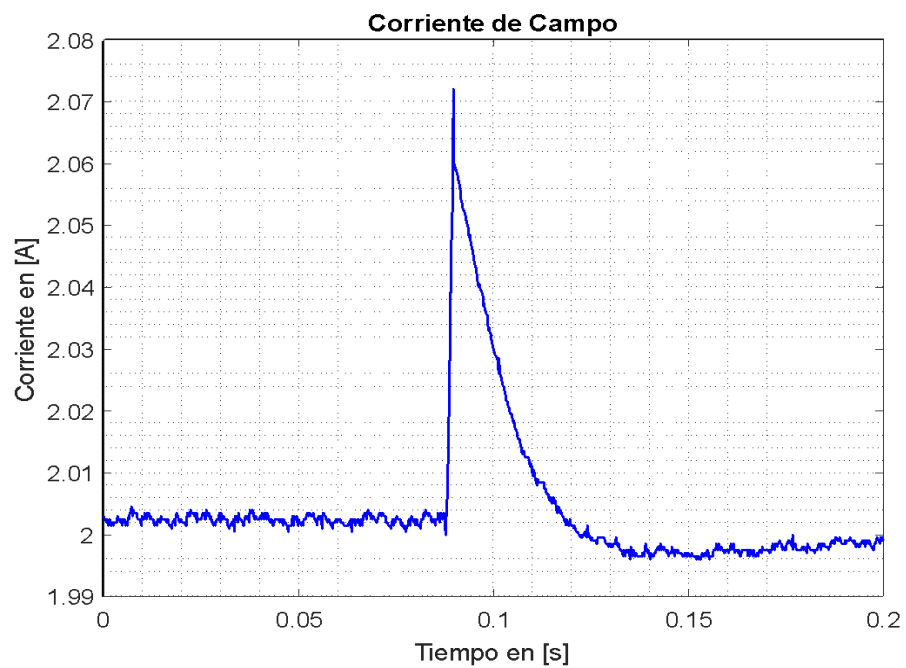
**Figura 20***Tensión de la fase B***Figura 21***Tensión en la fase C*

**Figura 22***Tensión en las fases***Figura 23***Corriente de la fase A*

**Figura 24**

Corriente fase B

**Figura 25***Corriente fase C*

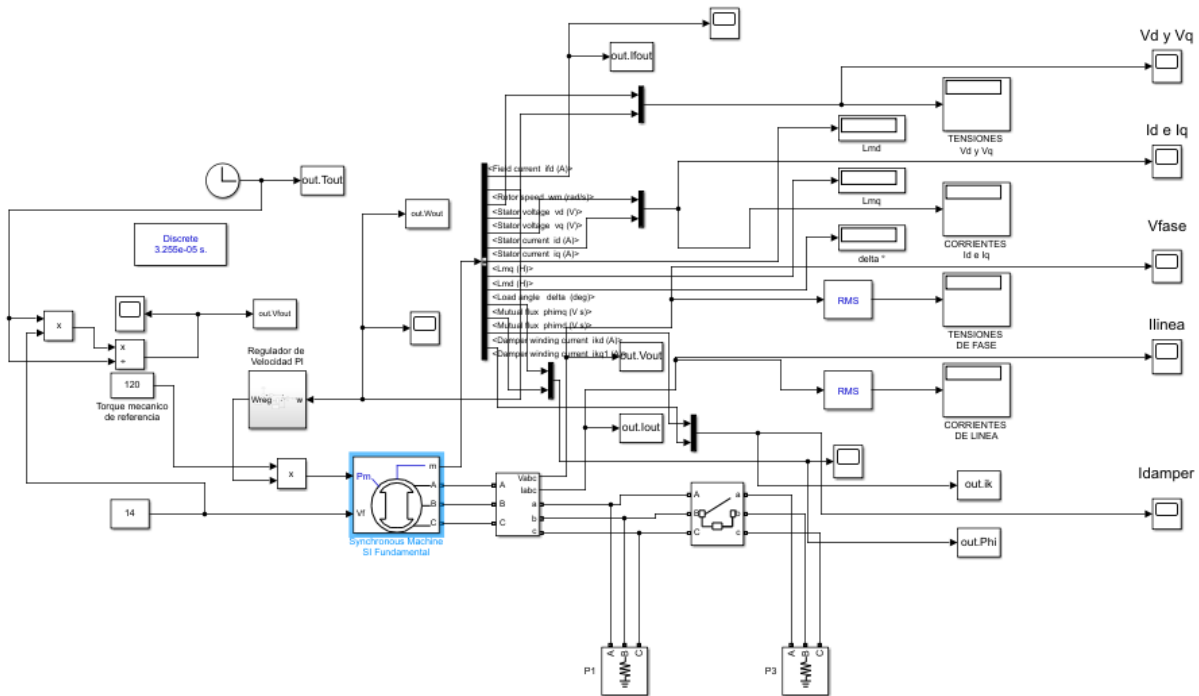
**Figura 26***Corrientes de línea***Figura 27***Corriente de campo*

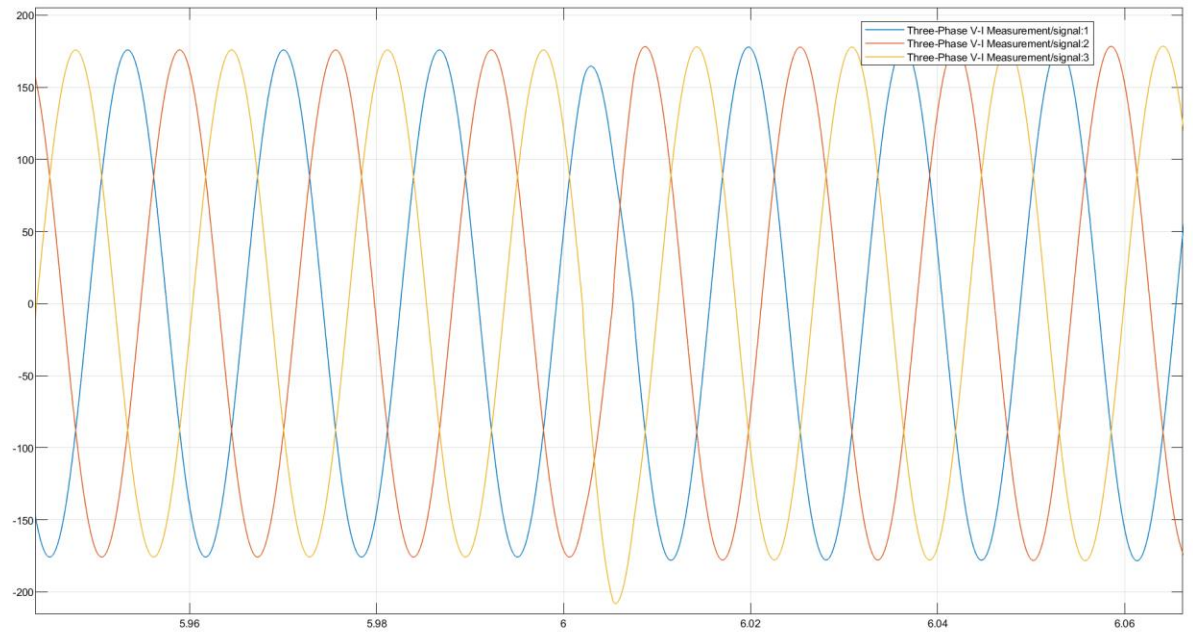
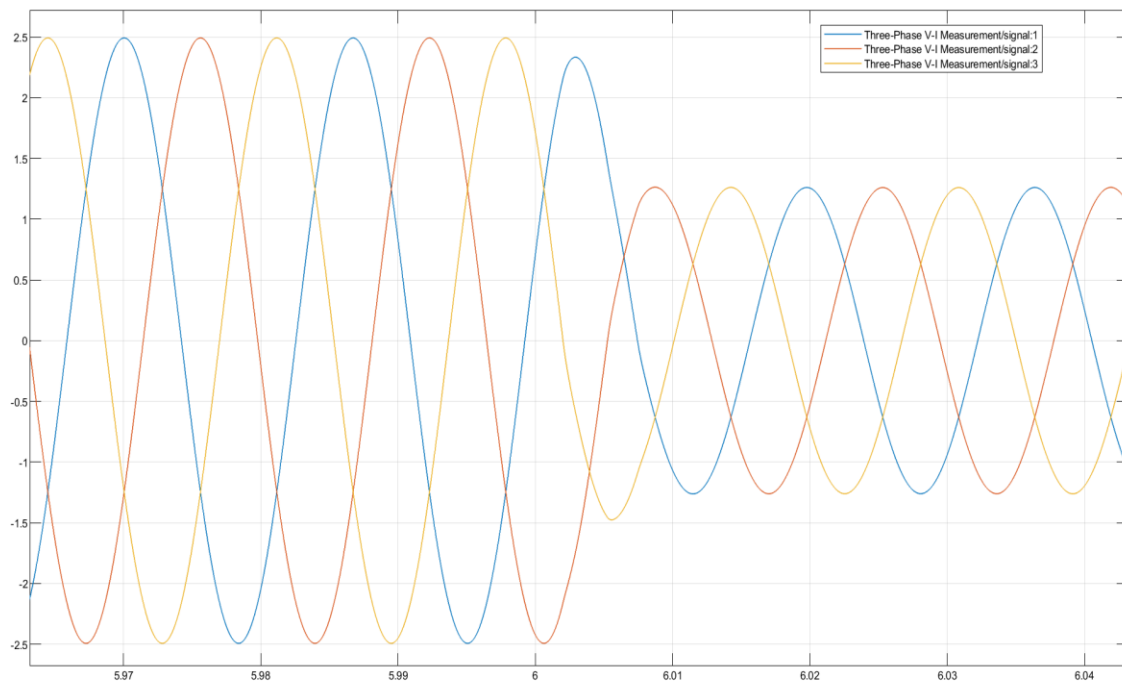
Hay un salto de corriente en la figura (27), el cual indica el transitorio ocurrido por la salida de carga; en efecto, esta es una corriente continua, dado que alimenta el campo del generador y permite que haya fuerza (fem) inducida; de igual manera, esta controla el flujo de potencia reactiva del generador.

Asimismo, el entorno de simulación de Matlab, Simulink posibilita acceder a modelos de generador síncrono de sexto orden que permiten realizar estudios avanzados. Para los fines de la presente investigación, se utilizó el bloque Synchronous Machine SI Fundamental, al que se le agregó un control de velocidad tipo PID y un control de excitación del campo tipo proporcional. Por ende, este bloque permite obtener directamente gráficas en el dominio d-q. Finalmente, se anexan las gráficas para los parámetros dados y el entorno de simulación.

## Figura 28

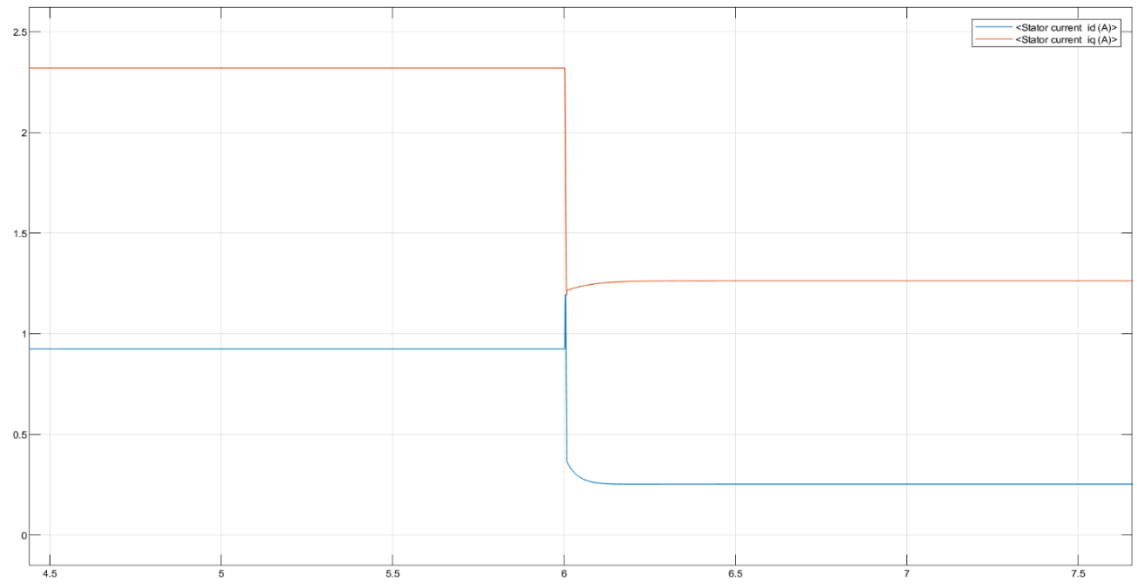
### Montaje de Simulink



**Figura 29***Tensiones de fase simuladas***Figura 30***Corrientes de línea simuladas*

**Figura 31**

*Corrientes en el eje directo y de cuadratura*



## 6 Comparación

A continuación, se realiza la comparación de la estimación de los parámetros de esta tesis y la tesis de maestría “Prototipo de herramienta software para la estimación de parámetros de la máquina síncrona bajo condiciones de carga”.

**Tabla 6**

*Comparación de estimación de parámetros*

Parámetro	Tesis actual, entrada de carga	Tesis actual salida de carga	Tesis previa entrada de carga	Tesis previa salida de carga
$L_d$	0,0247	0,0280	0,0364	0,0327
$L_q$	0,0681	0,0720	0,0841	0,0712
$L_{ad}$	0,0247	0,0256	0,0351	0,0314
$L_{aq}$	0,0613	0,0690	0,0828	0,0699
$L_f$	1,0592	1,0230	0,0750	0,4492
$L_{kd}$	0,0081	0,0120	0,0059	0,0025
$L_g$	2,0255	2,3761	1,5500	2,2394
$L_{kq}$	0,0073	0,0096	0,0378	0,0066
$R_f$	0,2701	0,0031	0,0740	0,2633
$R_{kd}$	0,0754	0,0842	0,2930	0,5666
$R_g$	241,733	538,241	1,43e3	608,4598
$R_{kq}$	0,3546	0,3746	1,43e3	0,5666

En la tabla (6) se comparan los valores de los parámetros estimados para la misma máquina con unas condiciones de carga similares. Con respecto a  $L_d$ , la inductancia propia del eje directo, la variación del valor actual en relación con el anterior es negativo. Por lo tanto, este valor depende bastante de la velocidad mecánica del eje; la rapidez con que se estabiliza la velocidad depende del método de regulación en este caso manual, lo cual puede inducir algunos errores, pero también depende de la inercia rotacional del rotor de la máquina. En esa medida, si dicha inercia es elevada resulta muy difícil lograr tiempos de establecimiento muy cortos.

En lo concerniente al parámetro  $L_q$ , que es la inductancia propia del eje en cuadratura, la variación del valor actual es negativo; este depende de la corriente del eje directo y de la

velocidad. Luego el parámetro más usado en los cálculos  $L_{ad}$ , que es la inductancia mutua entre la armadura y el campo del eje directo, resulta que su variación es negativa respecto al anterior. Este se puede calcular directamente de la prueba de vacío. Sobre el parámetro  $L_{aq}$ , la inductancia mutua entre la armadura y el campo del eje en cuadratura se encuentra que su variación es negativa en concordancia con el anterior. En cuanto al parámetro  $L_f$ , la inductancia propia del devanado de campo es bastante difícil de determinar, su variación es positiva respecto al anterior.

Por otro lado, se ha mencionado que las inductancias mutuas ya transformadas en los respectivos ejes directo y cuadratura se refieren siempre al devanado de armadura y al devanado de campo. En ese sentido, surge la siguiente pregunta: ¿la inductancia mutua entre armadura de campo y la inductancia mutua entre armadura amortiguamiento son iguales?

Esto depende del tipo de máquina y la disposición física de sus devanados. Por lo tanto, para la máquina en estudio sus polos son de tipo saliente; en esa medida, los devanados de amortiguamiento se disponen como barras embonadas en la periferia de las zapatas polares; lo cual hace que estén muy cerca de los devanados del inducido, más cerca que el devanado de campo. En consecuencia, para fines prácticos en este tipo de máquinas, las dos inductancias planteadas se consideran iguales; caso muy distinto ocurre con los turboalternadores que poseen rotor cilíndrico liso; igualmente, las barras de los devanados de amortiguamiento están más cerca de los devanados de campo que de los de armadura. Por lo tanto, para modelar este tipo de máquinas se plantean circuitos de órdenes superiores; es decir, ramas R-L adicionales en los devanados de amortiguamiento, debido a que con un modelo de segundo orden, como el que se planteó aquí con dos ramas en el circuito de amortiguamiento del eje directo, no resultó

satisfactorio su comportamiento en régimen transitorio, tales parámetros, además de su correspondiente análisis, escapan a los objetivos y actividades planteadas en el presente trabajo.

Por otro lado, los parámetros del devanado de amortiguamiento llevan el subíndice  $k$ , siendo en extremo difíciles de calcular con precisión, debido a que en este devanado no se tiene acceso físicamente, además va cortocircuitado. Lo cual es imposible medir su fem en vacío y también solo actúa en estado transitorio; por ejemplo, esto se observa en un salto de carga, así que su respuesta nunca es forzada y se extingue rápidamente actuando como un freno a las oscilaciones pendulares de la máquina ocurridas como se señaló: frente a un cambio brusco de carga, los valores para  $R_{kq}$  –que es la resistencia del devanado de amortiguamiento en el eje de cuadratura y  $L_{kq}$  que es la inductancia propia del devanado de amortiguamiento en el eje de cuadratura frente a diferentes ensayos de entrada y salida de carga– pueden saltar los diez órdenes de magnitud.

Se tiene después de un consistente trabajo de pruebas de laboratorio en la cuales se dispuso de las máquinas a trabajar bajo las condiciones de carga, tensión y velocidad dadas, las medidas tomadas de forma sencilla gracias al analizador de redes Fluke 435-II, el cual, mediante su función de transitorios, elige automáticamente la ventana de observación y el número de muestras asociado a la señal de entrada; en este caso, fue un gatillo en las corrientes de línea. Por lo tanto, el tratamiento de los datos obtenidos se da a raíz de las listas de valores en las hojas de cálculo y la inserción de estas en el programa desarrollado en Matlab para que tome estas listas, realicen sus operaciones, entregue unos valores y gráficas que se correspondan con los parámetros calculados previamente. En efecto, en la afinación de los resultados interviene favorablemente el filtro de Kalman, al trabajar esta vez como estimador lineal, de este modo se logra el comportamiento de las gráficas, muy cercano a las lecturas de las pruebas realizadas.

## 7 Observaciones y conclusiones

En este trabajo se muestra la estimación de los parámetros de un generador síncrono de polos salientes. Se halló que este proceso es posible mediante la teoría de las dos reacciones que considera como estático el campo en el devanado de armadura. En consecuencia, lo anterior posibilita representar las cantidades de este devanado como niveles de continua en régimen senoidal permanente. Para ello, la transformada de Park (1929, 1933) es fundamental para llevar las variables en el dominio de las fases al dominio d-q. Por otro lado, entre las muchas formas que hay para calcular y estimar los parámetros de esta máquina y al considerar la gran dificultad del modelo no lineal, los efectos del devanado de amortiguamiento, cuyas cantidades no se pueden medir directamente y la complejidad de la respuesta transitoria, se ha elegido el uso de las herramientas computacionales ofrecidas por el software Matlab, esta forma de procesar los datos y llegar a valores mediante las herramientas PEM (Prediction error minimization for refining linear and nonlinear models) y OE (Estimate output-error polynomial model using time-domain or frequency-domain data) ahorran grandes esfuerzos de cálculo y permite hallar unos valores coherentes mediante la selección y ajuste para los parámetros requeridos.

Al momento de realizar las pruebas de laboratorio, resulta muy provechoso respecto a la formación práctica de los investigadores, aprender sobre la marcha partiendo del cableado de máquinas e ir aplicando los conceptos previamente aprendidos en la resolución de problemas que se van presentando. Por ejemplo, cuando el cableado del motor se completó surgió el inconveniente de una fuente adicional de corriente continua para alimentarlo con el control de velocidad por medio de la tensión de armadura; en esa medida, se planteó un rectificador trifásico de onda completa y un autotransformador trifásico como Variac para un ajuste fino de la velocidad y, por consiguiente, evitar las resistencias de arranque al poder iniciar desde cero volts.

Por lo tanto, no fue viable en ese momento a causa de prescindir de los diodos rectificadores con la especificación de corriente y tensión necesarias. Finalmente, se optó por una configuración más ortodoxa, esto es, utilizar la fuente de alimentación disponible del laboratorio, colocar la respectiva resistencia de arranque y efectuar el control de velocidad por medio de un reóstato en serie con el devanado de campo.

Por otro lado, las diferencias de los valores en los parámetros actuales y la tesis previa se debe principalmente al siguiente factor: el error de medida y la incertidumbre asociada a los instrumentos. Actualmente, analizadores como el Fluke 435-II, usado en esta prueba entregan resultados fiables, con un alto índice de repetitividad, es decir, con cambio mínimo en múltiples mediciones, lo cual no exceptúa de ingresar al software de estimación datos espurios que pueden afectar un poco los cálculos correspondientes. En ese sentido, este tipo de datos no deseados puede aparecer en la forma de muestreo del equipo. Igualmente, muy poco se habla en el manual del equipo acerca de cómo elige la tasa de muestreo ante un transitorio, parece ser que mientras se seleccionen los *triggers* o gatillos de disparo en corriente y/o tensión; según sea el caso, el firmware del medidor interpreta qué tan rápida es la variación de la señal y elige automáticamente sin ningún criterio seleccionable por el usuario cuantas muestras va a tomar de la señal por segundo. En esa medida, por suerte el muestreo resultó coherente, dado que sucedió en intervalos regulares en los cuales se definió un tiempo específico entre muestra y muestra, si no fuese así sería muy difícil trabajar con esos datos; por ejemplo, para aplicar el algoritmo de la transformada rápida de Fourier sería necesario conocer el intervalo de tiempo entre muestra y muestra.

Actualmente, no se encuentra en el mercado un equipo para uso en laboratorio especializado en el muestreo de señales eléctricas, el cual le permita al usuario elegir el número

de muestras; por ende, si el muestreo es coherente o no, la ventana de observación que detecte los transitorios de forma automática y, en esa medida, disponga de múltiples canales de entrada. Además, que entregue las respectivas listas de valores con extensiones de software no propietario, puesto que, por lo general, los analizadores de redes se especializan en tomar datos de tensión y corriente durante largos periodos de tiempo, lo cual dificulta, en cierta medida, la adquisición de señales y eventos transitorios.

### Referencias

Anderson, P., & Fouad, A. (1977). *Power system control and stability*. Iowa State University Press.

Bergen, A. (1986). *Power Systems Analysis*. Prentice Hall.

Blondel, A. (1904). *Electrotechnique Appliquee VI: Cours Professe A L'Institut Electrotechnique De Nancy*. A Mauduit y Andre Blondel.

Gerdin, M. (2006). Identification and Estimation for Models Described by Differential-Algebraic Equations. *Linköping Studies in Science and Technology*(1046), 81-83. Obtenido de <https://scholar.google.com/scholar?q=M.%20Gerdin.%20Identification%20and%20Estimation%20for%20Models%20Described%20by%20Differential-Algebraic%20Equations.%20Link%C3%B6ping%20studies%20in%20science%20and%20technology.%20dissertations.%20no.%201046%2C%20Li>

Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. McGraw-Hill.

Ljung, L. (1999). *System Identification: Theory for the User* (2 ed.). Prentice Hall PTR.

Park, R. (1929). Two Reaction Theory of Synchronous Machines, Part I. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 48, 716-727. Obtenido de [https://www.academia.edu/44370153/POWER\\_SYSTEM\\_STABILITY\\_Volume\\_III\\_Synchronous\\_machines](https://www.academia.edu/44370153/POWER_SYSTEM_STABILITY_Volume_III_Synchronous_machines)

Park, R. (1933). Two Reaction Theory of Synchronous Machines, Part II. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 52, 352-355. Obtenido de <https://studylib.net/doc/18819275/here---electrodynamics>