



Vigilada Mineducación

UNIVERSIDAD DEL NORTE

**GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS Y APLICACIÓN DEL
MODELADO DINÁMICO DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA**

SHARON STEPHANIE OCHOA MEDINA
JUAN DANIEL RAMIREZ ORTIZ

ASESOR:
JUAN DIEGO PULGARIN RIVERA
COASESOR:
RAFAEL DE JESÚS CASTILLO SIERRA

21 DE MAYO DE 2019

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios todo poderoso por regalarnos salud, vida y entendimiento para culminar este proyecto.

Gracias a nuestros padres y familias por brindarnos todo el apoyo que necesitamos durante los momentos difíciles en el desarrollo del proyecto.

Gracias a nuestros asesores por compartir su conocimiento y experiencia con nosotros. Además, por brindarnos parte de su tiempo para ayudarnos en los problemas que tuvimos.

Gracias al ingeniero Daniel Turizo también por brindarnos su conocimiento durante el desarrollo del proyecto.

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 3 |
| 2. Objetivos | 3 |
| 2.1. Objetivo General | 3 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 3 |
| 3. Delimitaciones | 4 |
| 3.1. Alcances | 4 |
| 3.2. Limitaciones | 4 |
| 3.3. Entregables | 4 |
| 4. Estado del arte | 4 |
| 4.1. Transformada de Park | 4 |
| 4.2. Parámetros de la máquina sincrónica | 4 |
| 5. Descripción del proyecto | 5 |
| 5.1. Transformada de Park | 5 |
| 5.1.1. Diseño | 6 |
| 5.2. Parámetros de la máquina síncrona | 9 |
| 5.2.1. Resistencias shunt | 9 |
| 5.2.2. Montajes | 10 |
| 5.2.3. Amplificador de Potencia | 11 |
| 5.2.4. Cálculos | 12 |
| 6. Pruebas, resultados y análisis de resultados | 13 |
| 6.1. Transformada de Park | 13 |
| 6.2. Parámetros de la máquina síncrona | 16 |
| 7. Conclusiones y recomendaciones | 19 |

1. Introducción

La máquina sincrónica representa una parte importante para las redes eléctricas debido a su papel principal como generadora de la energía. Por ello, es necesario tener conocimientos avanzados acerca de sus comportamientos y sus componentes principales. Este proyecto pretende demostrar al estudiante la forma práctica de obtener los parámetros que caracterizan la máquina sincrónica. Además de ello, presentar una forma más sencilla de estudiar sistemas trifásicos utilizando la transformada de Park.

Para la práctica de laboratorio correspondiente a la obtención de los parámetros de la máquina, es importante resaltar que está basada en procedimientos normativos reales. Debido a esto, el estudiante estará capacitado para aplicar dicha norma en el ámbito laboral. Sin embargo, se deberá realizar una adaptación dependiendo del área de trabajo en el que se encuentre. Por otro lado, se debe recalcar que los parámetros obtenidos a partir de esta práctica de laboratorio se podrán utilizar para realizar estudios donde se deba tener un modelado de la máquina. Estos estudios podrían ser inclusive de tipo transitorios, como por ejemplo, corto circuitos. Esto se debe a que a partir de las inductancias obtenidas a partir de dicha prueba, es posible obtener las constantes transitorias y/o subtransitorias con el cuál se modelan los comportamientos dinámicos de la máquina.

Por otra parte, para la práctica de laboratorio correspondiente a la aplicación de la transformada de Park, el estudiante podrá interpretar el comportamiento de circuitos trifásicos balanceados haciendo uso de la transformada $dq0$. Este último corresponde a la representación de señales trifásicas variables en el tiempo, de forma constante. Esta representación se realiza a través de la descomposición de las fases; obteniendo de esta forma componentes en el eje directo, en el eje de cuadratura y en el eje 0.

En este proyecto se presentará la forma en la que se desarrolló el diseño de prácticas de laboratorio donde el estudiante tuviera la oportunidad de afianzar sus conocimientos teóricos de la asignatura Máquinas Eléctricas II. De esta manera, se presentarán los pasos que se deberán realizar en cuanto a las prácticas de laboratorio y para cada una se especificará la componente teórica que se afianzará en cada una.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar una guía de prácticas para el análisis y aplicación de los modelos dinámicos de la máquina sincrónica.

2.2. Objetivos Específicos

- Definir la cantidad y tipo de prácticas adecuadas para aplicar los conceptos estudiados en el curso de Máquinas Eléctricas II.
- Diseñar las guías de procedimiento para las prácticas definidas.
- Implementar y validar las prácticas diseñadas.

3. Delimitaciones

3.1. Alcances

Se desarrollarán dos guías de laboratorio para la aplicación de los siguientes temas:

- Modelado de la máquina sincrónica para análisis de estado transitorio.
- Transformada dq0.

El proyecto incluye las guías de procedimientos y su respectiva validación en el laboratorio de la Universidad del Norte.

3.2. Limitaciones

Las prácticas serán diseñadas con los equipos disponibles en los laboratorios de la Universidad del Norte.

3.3. Entregables

- Informe Final.
- Poster.
- Video.
- Presentación de la Sustentación.
- Libro de prácticas.

4. Estado del arte

4.1. Transformada de Park

La transformada de Park se utiliza en diversas áreas de estudio dentro de las cuales se pueden encontrar entre las aplicaciones más importantes: el control de un motor [1], la identificación de armónicos [2] y pasar de tener señales variantes en el tiempo a señales invariantes [3]. En este proyecto se realizará el desarrollo de la práctica de laboratorio donde se aplique la transformación de tensiones trifásicas para el análisis de circuitos de tipo RLC.

En [4] se presenta el diseño de un dispositivo electrónico que realiza la medición de potencia activa y reactivas de un circuito trifásico usando la transformada dq0. A pesar de plantear esta transformación con dispositivos electrónicos, el documento presenta la teoría en la cual se basan para realizar estos cálculos.

4.2. Parámetros de la máquina sincrónica

Para esta practica de laboratorio, se tomó el tema del cálculo de los parámetros de la máquina sincrónica basándose en el libro guía del curso [5]. De acuerdo a las investigaciones, se tiene que se han diseñado diversas pruebas para obtener dichos parámetros y estas son presentadas a continuación.

Como primer método planteado, se tiene la prueba mejorada de cortocircuito presentada en [6]. Sin embargo, este no permite hallar los parámetros del eje q de la máquina, inclusive la expone

a un impacto severo que la podría dañar. Otra práctica propuesta por el libro es la prueba de decremento planteada en [7]. A pesar de que esta permite obtener los parámetros del eje q de la máquina, esta presenta un método que es imposible de realizar. Este método se basa en operar la máquina en condiciones insaturadas, lo cual es imposible de lograr, complicando el análisis y la prueba. Finalmente, el libro propone una prueba basada en la respuesta en frecuencia de la máquina. Está planteada principalmente en la norma [8], la cual muestra la forma de realizarla. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la norma está diseñada para plantas generadoras industriales de gran escala. Por ello, se debe realizar el diseño de las guías, adaptando dicha norma a las máquinas disponibles en los laboratorios de la universidad.

Es importante destacar que ya se han realizado diversas pruebas desarrolladas en generadores grandes, obteniendo resultados satisfactorios. En [9] se presenta la teoría y los cálculos aplicados para obtener los valores de los parámetros de la máquina. Adicionalmente, se tienen en cuenta algunas consideraciones tales como la no linealidad del hierro, es decir, su saturación. Por otro lado, se realizan algunas recomendaciones para obtener pruebas más confiables y precisas. Y por último, se plantea realizar la obtención de los parámetros de un generador industrial de 555 MW, donde se presentan además los circuitos equivalentes para esta máquina.

Adicionalmente, en [10] se realiza la validación de los parámetros de un turbo generador, realizando pruebas de respuesta en frecuencia on-line. Esta prueba on-line parte de los parámetros obtenidos a partir de la prueba SSFR (StandStill Frequency Response), ya que entrega valores bastante buenos que pueden ser usados como valores iniciales. Cabe resaltar que la prueba on-line parte de estos parámetros y luego de ello realiza un ajuste de los parámetros mediante un método iterativo que aproximará mucho más dichos valores al modelo real de la máquina. Esta tesis presenta los resultados obtenidos de esta prueba realizada a dos generadores (Lambton y Nanticoke), para los cuales se presentan sus respuesta en frecuencia y además los valores de los parámetros obtenidos luego de realizar dicho ajuste.

5. Descripción del proyecto

Para el desarrollo del proyecto, primero, se tuvo en cuenta los temas tratados en el curso y se realizó la identificación de los más difíciles de entender. Luego de esto, se definió la forma de aplicación de estos temas, considerando que su nivel de complejidad no sea muy elevado; completando así el objetivo específico #1.

Para el diseño de las guías de laboratorio se realizará un análisis separado de cada una, del mismo modo en la sección 6.

5.1. Transformada de Park

En esta guía se planteó una forma sencilla en la cual el estudiante pudiera realizar el análisis aplicativo de la transformada de Park(dq0). Para ello, se estableció la comparación de mediciones de tensión, corriente y potencia realizadas en ejes abc y dq0. Esto, con el fin de mostrar al estudiante que la transformada dq0 permite realizar los cálculos de una forma más sencilla y arrojará los mismos resultados.

Para la guía de Park se pide al estudiante realizar un montaje donde conecte la fuente del laboratorio a una carga trifásica y que a partir de ella mida las corrientes y las tensiones de este circuito. Este circuito en primera instancia se deberá simular en el software Simulink. Esto para que el estudiante pueda tener control sobre los valores de tensión de la alimentación, la corriente que circulará por el circuito y además los valores de la carga. Principalmente, se le exige al estudiante realizar un circuito en el que la corriente de este fuera de por lo menos 1A, debido a que el sensor

que se usará para las mediciones no tiene mucha precisión para corrientes bajas. Luego, en el laboratorio se le especifica al estudiante que estas mediciones se deberán realizar respetando los límites establecidos por la tarjeta de adquisición, debido a que este dispositivo fija un límite de $20V_p$. Luego de realizar el montaje se deberán tomar los valores de corriente y tensión para finalmente aplicarle la transformada dq0. Teniendo estos valores de corriente y tensión en ejes dq0, se pide calcular entonces la potencia consumida por la carga, que simplemente sería la multiplicación de la tensión y la corriente. Estos cálculos sencillos se pueden realizar de esta forma debido a que los datos medidos, al ser transformados pasarán de ser señales sinusoidales a ser valores constantes. Con los valores constantes se podrá asumir estos valores medidos como si correspondieran a un circuito DC, facilitando los cálculos.

Por otro lado, con estas mediciones se esperará realizar un código MATLAB que realice los mismos cálculos que realizan los bloques de Simulink. Es decir, calcular la potencia del circuito con las tensiones y corrientes en el marco de referencia dq0.

5.1.1. Diseño

- **Cargas:** Para las cargas, el estudiante deberá hacer la elección de la carga que conectará. Esta carga debe cumplir las especificaciones que exigen el laboratorio, es decir, que estos valores estén disponibles en los módulos del laboratorio. Además, que el consumo de potencia de la carga sea considerablemente elevado, por lo cual queda a criterio del aprendiz la forma de conexión de la carga (Delta o Estrella) y sus valores de impedancia. Con ello, observar el comportamiento de las potencias cuando se calculan con valores en ejes dq0.
- **Dispositivo de medición:** Para la medición de las tensiones y corrientes se decidió hacer uso de la tarjeta de adquisición debido a la alta precisión que se maneja. Adicionalmente, se obtienen directamente los datos requeridos en el software MATLAB facilitando de este modo los cálculos. Por otro lado, para la medición de tensión se decidió realizar utilizando un divisor de tensión para controlar la tensión que estará recibiendo la tarjeta de adquisición de datos, de esta forma no se violarán los límites de tensión establecidos por el fabricante. Para la medición de corriente se probaron dos métodos diferentes:
 - Utilizar una resistencia shunt y medir la diferencia de potencial en ella con la tarjeta de adquisición.
 - Utilizar un sensor de corriente que utiliza efecto hall para arrojar señales de tensión proporcionales a esta corriente. Este sensor corresponde al módulo ACS712-05B que se observa en la figura 1. Este módulo maneja niveles de corriente entre 0 y 5A. Sin embargo, para las mediciones se recomienda usar niveles por encima de 1A para tener mayor precisión. Para usar este módulo se debe realizar una calibración que permitirá tener medidas mucho más exactas.

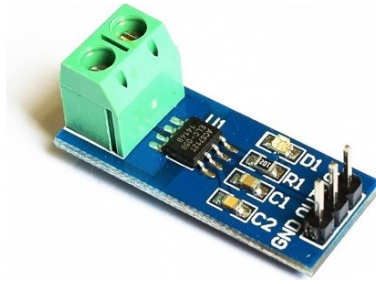


Figura 1: Sensor de corriente

Estudiando los diferentes casos, se recomendó usar el sensor de corriente para tener mucha más precisión. Además de ello, para realizar las mediciones con la DAQ se deberán realizar más divisores de tensión que harán que la diferencia de potencial en la resistencia shunt sea tan baja que no se aprecie con facilidad. Por otro lado, estas tensiones tan pequeñas insertaría demasiado ruido a la señal que se desea medir.

- **Cálculos:** Para el cálculo de la potencia a partir de la transformada de Park, se basó en el capítulo 3 del libro Kundur [5]; el cual presenta las siguientes ecuaciones:

$$P_t = e_d i_d + e_q i_q \quad (1)$$

$$Q_t = e_q i_d - e_d i_q \quad (2)$$

P_t : Potencia activa.

Q_t : Potencia reactiva.

e_d : Tensión en eje directo.

e_q : Tensión en eje de cuadratura.

i_d : Corriente en eje directo.

i_q : Corriente en eje de cuadratura.

Esta ecuación permite realizar el cálculo de la potencia activa y reactiva de una forma sencilla utilizando los valores de tensión y corriente que obtendrá el estudiante durante el laboratorio.

Luego de realizar la simulación y las mediciones el estudiante deberá comparar la potencia que le entrega el método de los dos vatímetros, con la simulación y finalmente los cálculos realizados con la transformada de Park. Estas potencias no deberán sobrepasar un margen de error de $\pm 10\%$.

Para el diseño del circuito a estudiar, se realizó la simulación que se observa en la figura 2, en la cual se tiene una fuente trifásica alimentando una carga en delta. Esta carga es de tipo RL, donde además se tuvo en cuenta los valores disponibles en los laboratorios de la universidad.

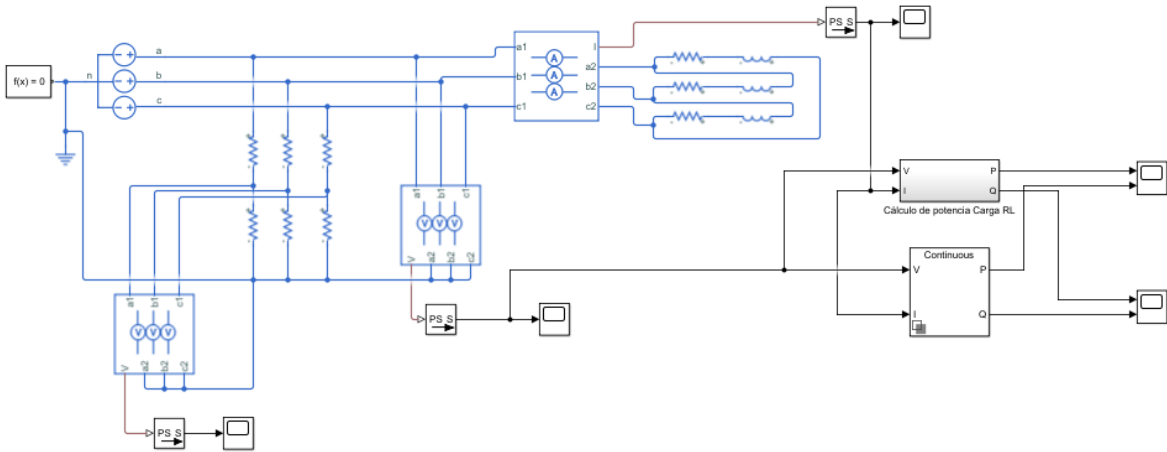


Figura 2: Simulación guía transformada de Park.

El bloque que realiza el cálculo de potencia para cada carga, se puede observar en la Figura 3, este cálculo se realiza de acuerdo con las Ecuaciones (1) y (2).

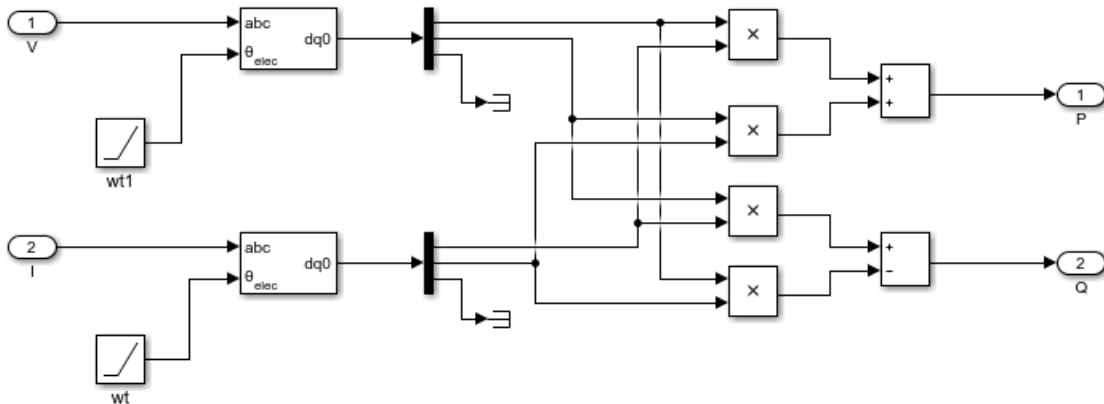


Figura 3: Bloque para cálculo de potencia

Principalmente, esta simulación permite conocer el valor de tensión que estará recibiendo la DAQ a través del divisor de tensión. Adicionalmente, se puede controlar los valores de la carga para obtener un valor aproximado de la corriente que estará pasando por el circuito. A partir de esta simulación, se tiene que la tensión en el divisor será la que se muestra en la Figura 4. En esta se observa que los niveles de tensión vistos por la tarjeta de adquisición no serán muy grandes y respetarán los límites entregados por el fabricante. Además, los niveles de corriente que se manejarán son mostrados en la Figura 5, los cuales presentan niveles de corriente por encima de 1A y que no sobrepasa el los niveles permitidos por el sensor.

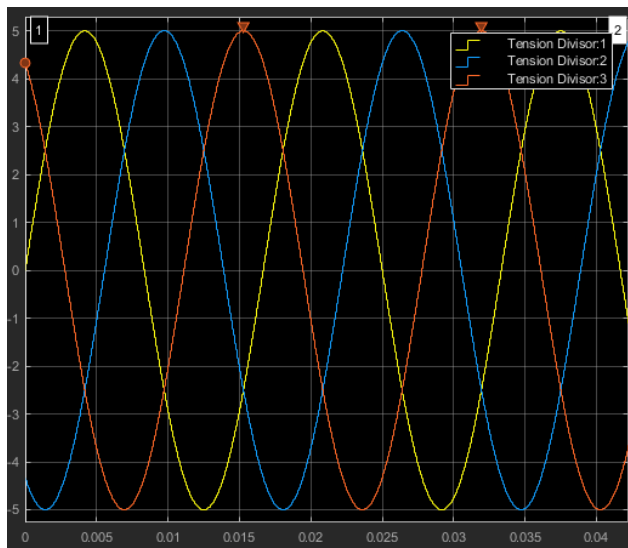


Figura 4: Tensión en el divisor

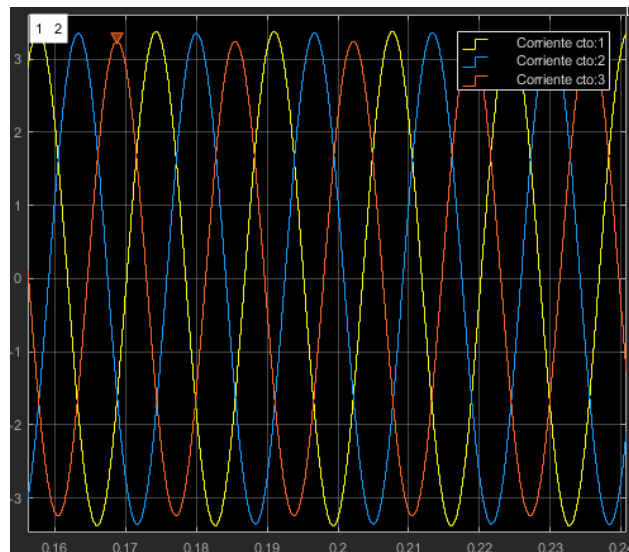


Figura 5: Corriente del circuito

Por otro lado se tiene que para el montaje a realizar en el laboratorio se usará una carga correspondiente a aproximadamente 40Ω y $0.47H$ conectada en delta. De este modo, se tendrá una potencia de $231W$ y $958 Var$, teniendo así un consumo máximo.

5.2. Parámetros de la máquina síncrona

Para esta práctica de laboratorio se realizó una adaptación y modificación de la norma IEEE 115A [8]. Esta, establece una prueba real realizada a generadores industriales de gran capacidad con el fin de obtener los parámetros que los representan. Esta prueba se basa en una respuesta en frecuencia de la máquina con su rotor estático. Esta prueba se eligió debido a que entrega un modelo aproximado bastante bueno de los parámetros en ejes d y q de la máquina. Además porque considerando las otras pruebas presentadas por el libro [5], esta corresponde a la única prueba que no necesita gran esfuerzo por parte de la máquina o que no es imposible de realizar.

Principalmente, se estableció realizar las mediciones de tensiones haciendo uso de una tarjeta de adquisición debido al límite de frecuencias que maneja el osciloscopio. Adicionalmente, se estableció el límite de frecuencias a $0.01Hz$ debido a que este es el nivel mínimo que podría entregar el generador de señales disponible en la universidad. Finalmente, para la amplificación y acoplamiento de la señal se realizó el montaje de un amplificador que se acomodara a las necesidades establecidas por la guía.

5.2.1. Resistencias shunt

Para la elección de las resistencias de medición, se tuvo en cuenta el valor de los devanados de la máquina. Ya que estas resistencias son considerablemente bajas, se utilizaron resistencias de potencia. Inicialmente, la resistencia del campo de armadura calculada con la prueba en DC es de aproximadamente $5,17\Omega$ y para no sobrepasar el 10% de este valor, se decidió utilizar una resistencia de $0,1\Omega$. Por otro lado, para la resistencia de medición en el devanado de campo se fijó un valor de 1Ω respetando el 10% de la resistencia de campo de 347Ω .

5.2.2. Montajes

De acuerdo con la norma IEEE 115A [8], se realizó la interpretación de los montajes que se deben realizar para obtener las mediciones necesarias. En las Figuras 6 y 7, se observan los montajes que deberá realizar el estudiante en el laboratorio para el posicionamiento del rotor de la máquina. Este posicionamiento se deberá hacer previo a las mediciones.

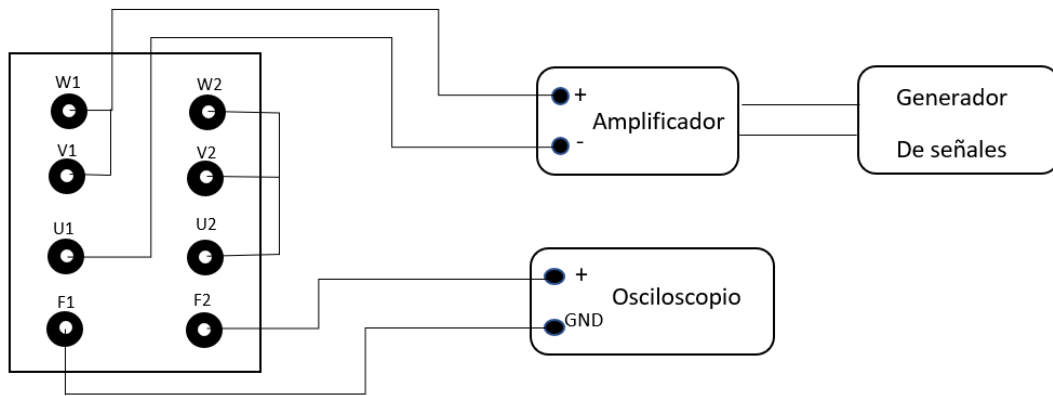


Figura 6: Montaje para alineamiento del eje d

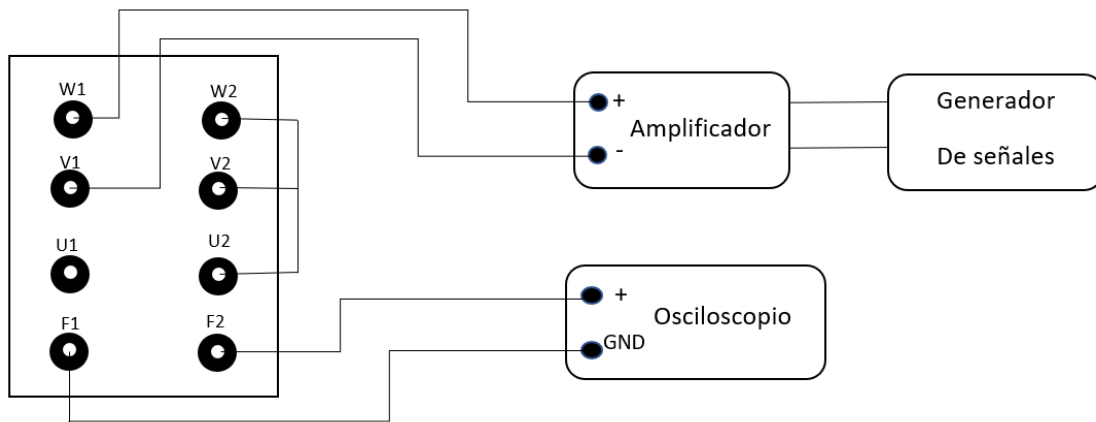


Figura 7: Montaje para alineamiento del eje q

Luego de haber realizado el posicionamiento del rotor, ya sea en eje d o eje q, el estudiante deberá realizar el montaje de la Figura 8 y así obtener los datos necesarios para calcular los valores de inductancia de los devanados. Midiendo tensiones y corrientes, deberá realizar un código MATLAB que posteriormente desarrolle los cálculos que se especifican en la sección 5.2.4.

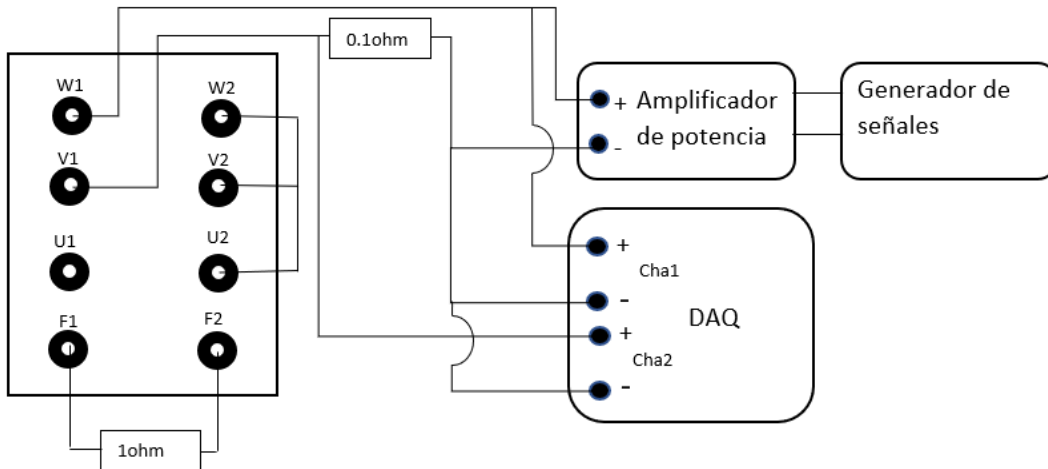


Figura 8: Montaje para mediciones

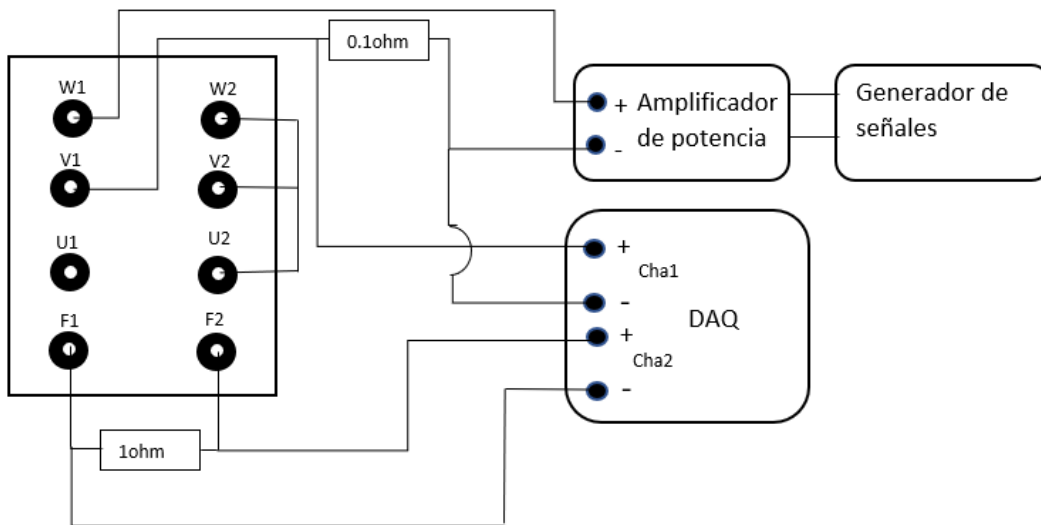


Figura 9: Montaje para hallar el valor de la inductancia de dispersión

Estas imágenes representan de una forma más pedagógica y práctica los montajes que se deben realizar. Adicionalmente, se adaptan a el tablero que se encuentra en la universidad, facilitando su interpretación.

5.2.3. Amplificador de Potencia

Para el acoplamiento del generador de señales con el generador síncrono, se tomó un diseño que se ajustara a las necesidades y condiciones del laboratorio. Este diseño no será tratado a profundidad debido a que no es pertinente su explicación.

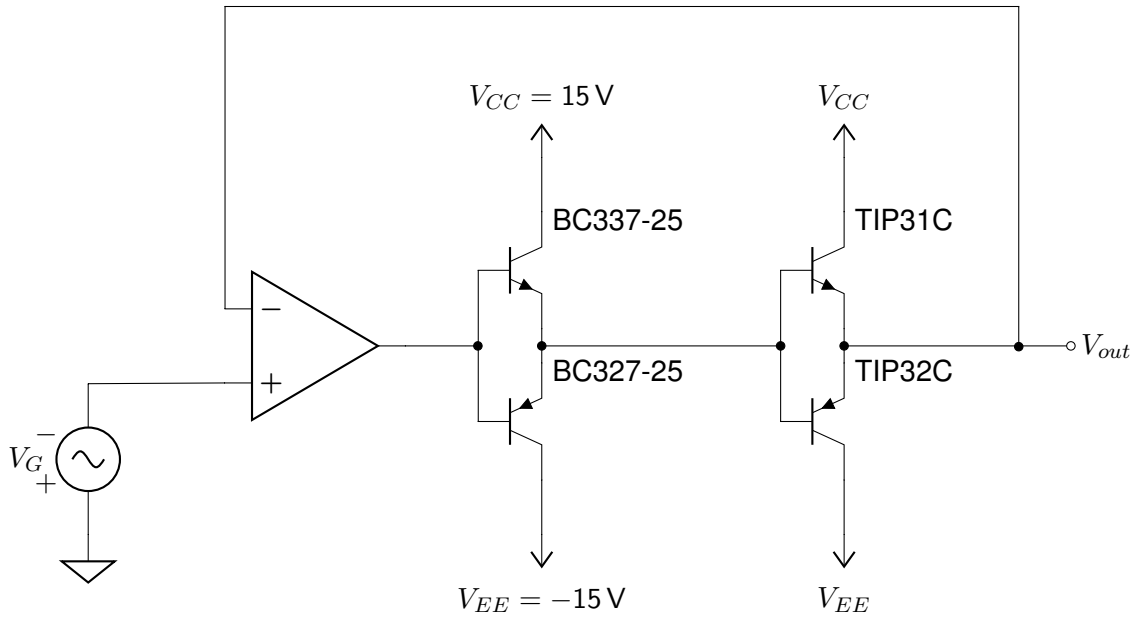


Figura 10: Circuito Amplificador de Potencia.

5.2.4. Cálculos

Durante esta prueba se obtienen los valores de la tensión en la armadura $v_{arm}(s)$ y la corriente de armadura $i_{arm}(s)$, ambas en función de la frecuencia. A partir de esto se puede obtener la impedancia de armadura así:

$$Z_{armd}(s) = \frac{v_{arm}(s)}{i_{arm}(s)} \quad (3)$$

A partir de estos valores de impedancia en función de la frecuencia se pueden obtener los valores para las inductancias del eje directo de la máquina haciendo uso de la ecuación

$$Z_d(s) = \frac{1}{2} Z_{arm}(s) \quad (4)$$

$$L_d(s) = \frac{Z_d(s) - R_a}{s} \quad (5)$$

Donde R_a corresponde a la resistencia de armadura obtenida a partir de la función de transferencia de la Ecuación (4) en las frecuencias bajas. A partir de estos valores se podrá graficar los valores de inductancia para cada frecuencia. Se sabe que:

$$L_{ad} = L_d(0) - L_\ell \quad (6)$$

Donde $L_d(0)$ corresponde al valor de inductancia a bajas frecuencias y L_ℓ al valor de inductancias de fuga que generalmente son entregadas por el fabricante de la máquina. Sin embargo, se debe hallar de forma experimental debido a que no se tiene conocimiento de ella. Para su cálculo se usa la siguiente ecuación:

$$G(s) = \frac{\sqrt{3} i_{fd}(s)}{2 i_{arm}(s)} \quad (7)$$

A partir de esta ecuación, se deben tomar los valores de $G(s)$ a las más bajas frecuencias, con la cual se tendrá G_0 . Con este valor, se podrá calcular la inductancia L_{ad} .

$$G_0 = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} \quad (8)$$

Realizado esto, realice el ajuste de los datos obtenidos en la prueba a la ecuación de la curva dada por:

$$L_d(s) = \frac{L_d(0)(1 + sT_d^0)(1 + sT_d^{00})}{(1 + sT_{d0}^0)(1 + sT_{d0}^{00})} \quad (9)$$

A partir de esta ecuación, usted podrá obtener los valores de las constantes de tiempo transitorias y subtransitorias de la máquina. Con estas constantes de tiempo y utilizando la ecuación 4.41 del libro guía, podrá obtener los valores de la inductancia del devanado amortiguador y su respectiva resistencia (L_{1d} y R_{1d}), por último la inductancia de los devanados de campo (L_{fd}).

6. Pruebas, resultados y análisis de resultados

Para demostrar el perfecto funcionamiento de las guías de laboratorio, se realizó el desarrollo de las mismas.

6.1. Transformada de Park

Antes de realizar el montaje en el laboratorio, se realizó la calibración de los sensores de corriente, para evitar mediciones erróneas. Luego de esto, se realizó el montaje del circuito en el laboratorio, siguiendo las especificaciones establecidas en la simulación. En la figura 11 se observa el montaje realizado en el laboratorio donde se pueden ubicar la carga conectada, para la cual se realizó la medición de potencia activa y reactiva con los vatímetros. Además de ello, en la Figura 12 se observa el divisor de tensión conectado a la DAQ y los sensores de corriente que se usaron para las mediciones en el laboratorio.



Figura 11: Montaje para mediciones de la guía transformada de park

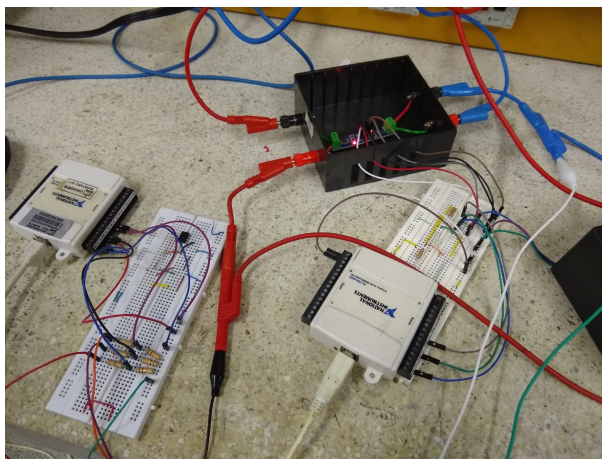


Figura 12: Mediciones

A partir de estas mediciones se encontró primeramente que las tensiones de fase no son de secuencia abc, sino que esta corresponde a una secuencia acb, por lo cuál se debió realizar una inversión de fase.

Cabe resaltar que las tensiones y corrientes no presentan el desfase que deberían tener [11], en comparación con la carga conectada al circuito. Este corrimiento en la fase está dado por las tarjetas de adquisición. Esto se produce ya que al realizar las mediciones con diferentes tarjetas, las señales son enviadas con un retardo en el orden de los milisegundos. A partir de este desfase, se deberá realizar un corrimiento en el tiempo de modo que se pueda obtener el valor real de desfase entre tensión y corriente. Por otro lado, para pasar las tensiones del divisor de tensión a las tensiones reales, se debe aplicar un factor que viene dado principalmente por las resistencias del mismo. Sin embargo, al manejar conductores con una sección transversal muy pequeña, se introduce un error de resistencia que cambia considerablemente las mediciones. Por esto, se debe calcular este factor a partir de las tensiones que se sabe que se tendrán vistas en la simulación previamente. A pesar que este factor de corrección no cambia mucho, al ser calculado con los valores teóricos que con el estimado a partir de la tensión, los cambios en las tensiones de fase son notables.

Teniendo las tensiones de fase y las corrientes, se deberá realizar el cálculo de la tensiones y corriente en ejes dq0 a partir de la transformada de Park. Para este caso, se utiliza la matriz de transformada de potencia invariante, vista en la ecuación 10, con el fin de hallar también la potencia reactiva del circuito.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Estas tensiones y corrientes se muestran en las Figuras 13 y 14, respectivamente. Según las gráficas mostradas, se observa que el comportamiento de ambas mediciones pasan de un marco de referencia sinusoidal a uno que es aproximadamente constante. Sin embargo, existen pequeñas variaciones en estas mediciones debido a las componentes armónicas que introduce la red e inclusive la tarjeta de adquisición. Además, por estas variaciones en las tensiones y corrientes en dq0 se afectará la potencia instantánea. Por tal razón, para realizar el cálculo de la potencia total, se utilizará el promedio de esta potencia instantánea.

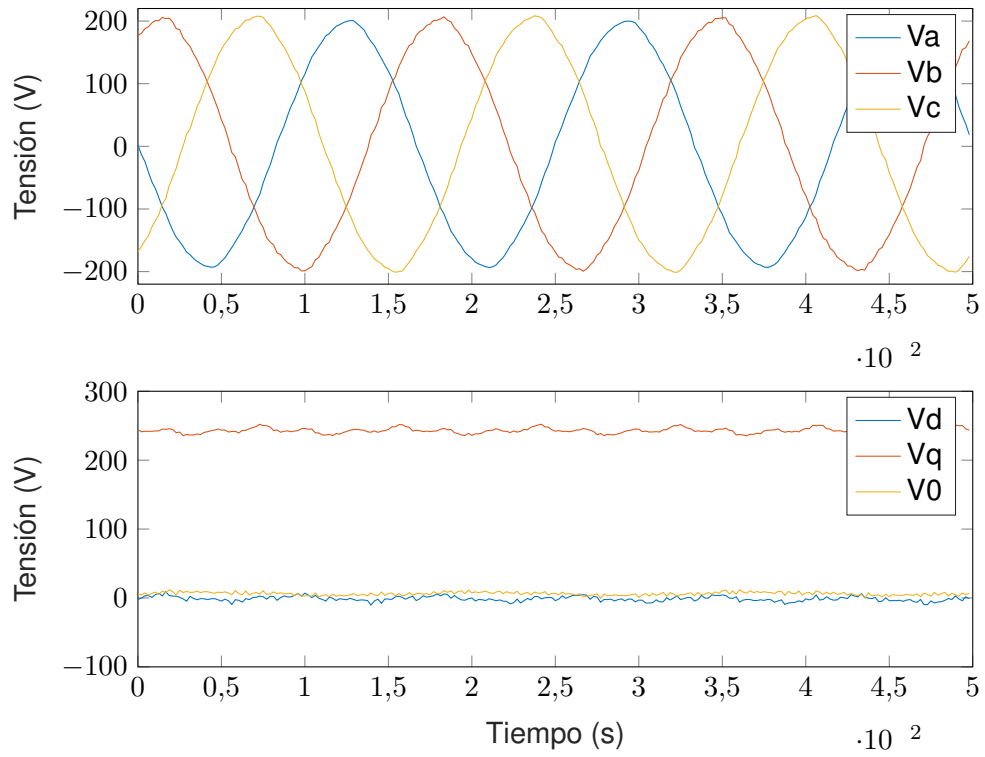


Figura 13: Tensiones en abc y dq0

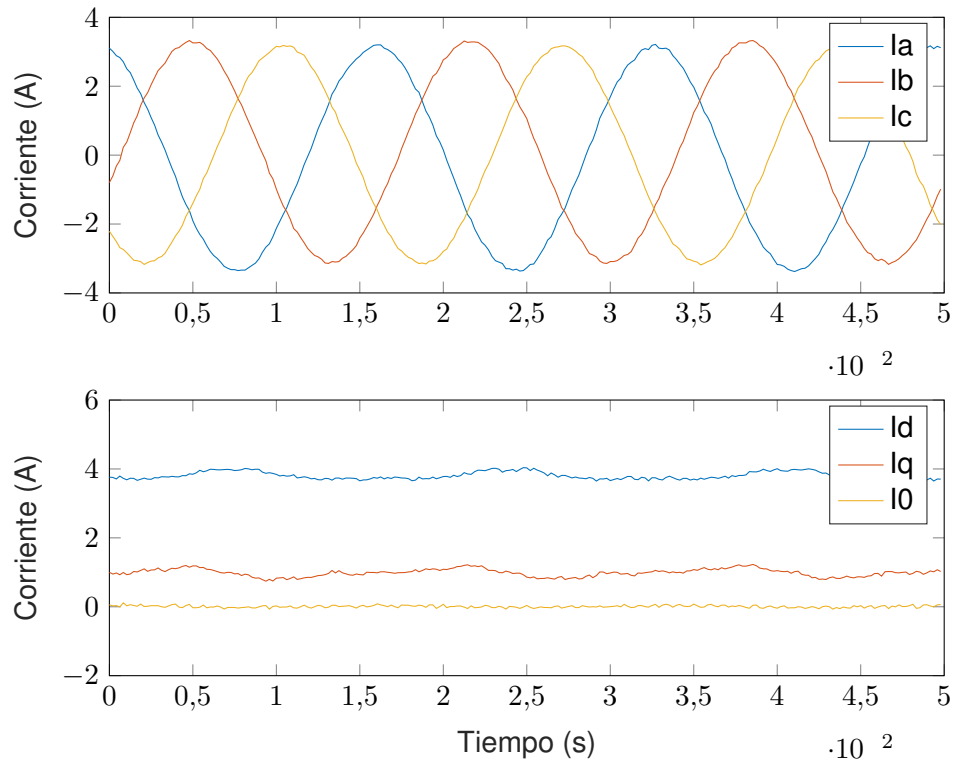


Figura 14: Corrientes en abc y dq0

Finalmente, a partir de los cálculos de corrientes y tensiones, las correcciones y calibraciones aplicadas; se obtuvo los resultados esperados. Como se observa en la tabla 1, el error entre el cálculo de la potencia medida a partir de la transformada de Park y la simulada, se encuentra por debajo del 5 %.

Tabla 1: Potencias calculadas con el método convencional y usando la transformada de Park

| | Potencias medidas | | |
|----------------|-------------------|----------|--------|
| | Convencional | dq0 | Error |
| P (W) | 235,6536 | 235,6038 | 0,02 % |
| Q (Var) | 979,6823 | 924,6 | 5,62 % |

6.2. Parámetros de la máquina síncrona

Para esta guía se realizó un montaje como el que se muestra en la Figura 15, donde se realizaron las diferentes mediciones de tensión para obtener los parámetros de la máquina. En la imagen se observa cada uno de los elementos necesarios para el desarrollo de la practica, como el amplificador, generador de señales y las resistencias shunt.

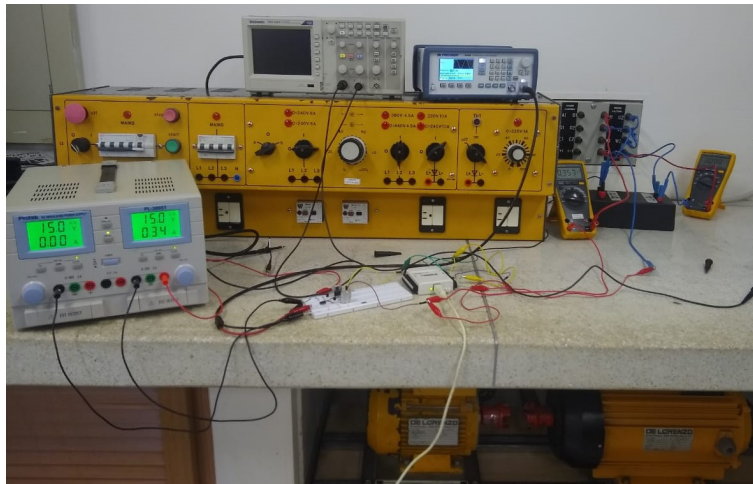


Figura 15: Montaje realizado en el laboratorio para obtención de parámetros

Luego de haber realizado todos los montajes especificados en la sección 5.2.2, y posterior a esto se desarrolló un código MATLAB que realizará el cálculo de los parámetros de la máquina. Principalmente, el código deberá realizar la conversión de las tensiones medidas en la resistencia shunt a valores de corriente utilizando la ley de ohm. Principalmente, para el cálculo de la fase, se utilizó un código que está basado en los planteamientos establecidos en [11] y [12]. Este código realiza el procesamiento de las señales de tensión y corriente, y calcula el desfase basándose en la transformada de Fourier. Con los datos de la magnitud y la fase de tensiones y corrientes medidas, se realizó el cálculo de la impedancia de armadura con la Ecuación (3). Luego de calcular esto, se procede a realizar el cálculo de la inductancia obteniendo los resultados mostrados en la Figura 16 y del mismo modo para el eje de cuadratura 17. Cabe resaltar, que para estos datos obtenidos, se realizó un ajuste, con el fin de obtener la función de transferencia aproximada de la máquina. Así mismo, la forma de la respuesta en frecuencia que representa la inductancia del eje

directo, corresponden a una forma de onda similar a la del eje de cuadratura; inclusive a la que se muestra en la norma IEEE-115A [8].

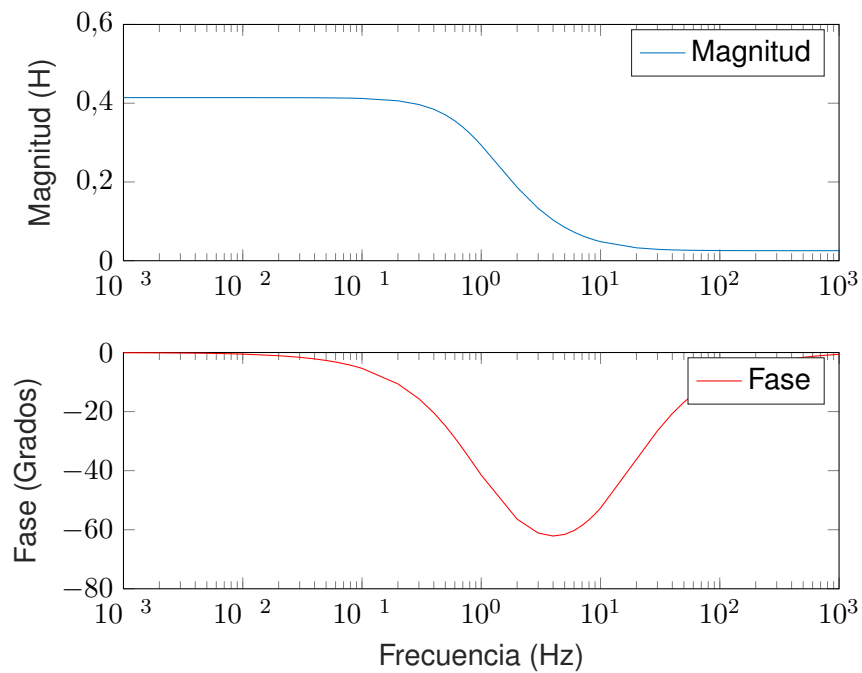


Figura 16: Inductancia Eje-q

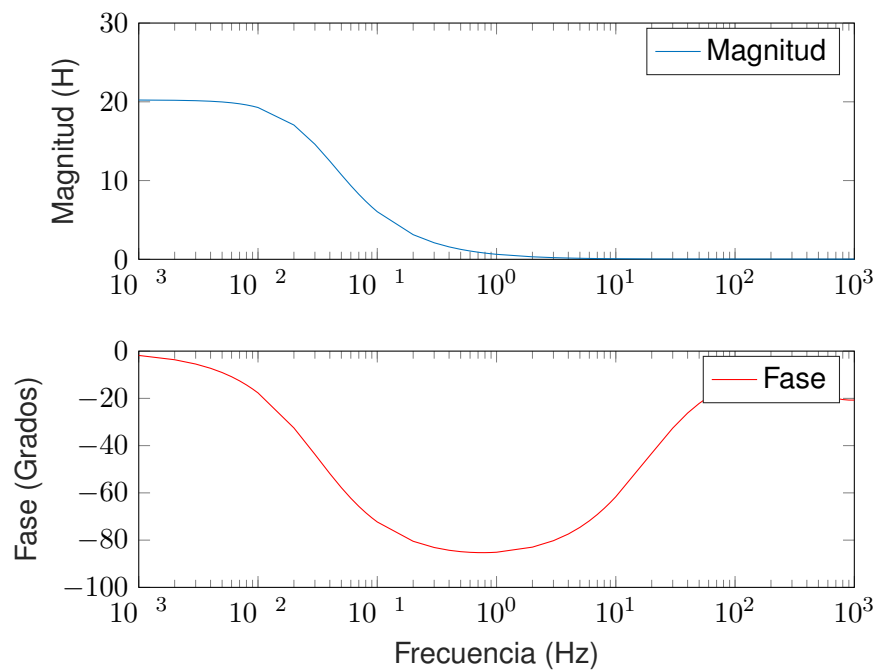


Figura 17: Inductancia Eje-d

Por otro lado, haciendo uso de las ecuaciones presentadas en el capítulo 4 del libro guía [5],

se realizaron los cálculos de las inductancias y las constantes de tipo transitorio y subtransitorio. Por consiguiente, para el eje de directo y de cuadratura, se tienen los resultados mostrados en las Tablas 2 y 3, los cuales corresponden a las inductancias de los circuitos de la Figura 18 y 19 respectivamente.

Tabla 2: Parámetros en el eje directo

| Parámetros de la máquina eje d | | | | | |
|--------------------------------|---------|----------------|----------|-------------------|----------|
| Td0' (s) | 4,97929 | Lad (H) | 0,30836 | Lad (p.u.) | 0,08973 |
| Td' (s) | 0,00800 | Lfd (H) | -0,00105 | Lfd (p.u.) | -0,00030 |
| Td0''(s) | 0,00020 | L1d (H) | 0,00556 | L1d (p.u.) | 0,00162 |
| Td''(s) | 0,00000 | L1d (H) | 0,37054 | L1d (p.u.) | 0,10782 |
| Ld' (H) | 0,03386 | Rfd (Ω) | 1,47554 | Rfd (p.u.) | 0,01124 |
| Ld''(H) | 0,00000 | R1d (Ω) | 0,00091 | R1d (p.u.) | 0,00001 |
| | | Ld (H) | 21,0885 | Ld (p.u.) | 6,136243 |
| | | LI (H) | 20,7801 | LI (p.u.) | 6,046517 |

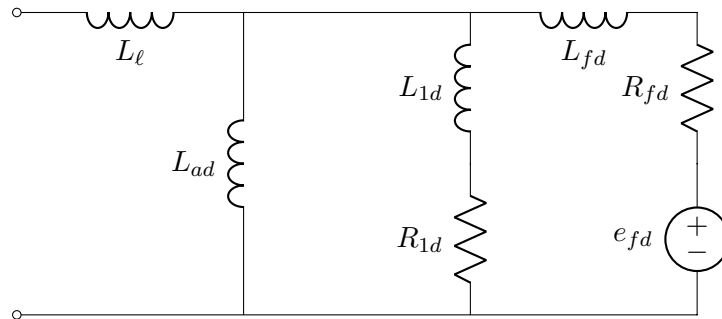


Figura 18: Circuito equivalente para el eje directo.

Tabla 3: Parámetros en el eje de cuadratura

| Parámetros de la máquina eje q | | | | | |
|--------------------------------|----------|----------------|-----------|-------------------|---------|
| Tq0' (s) | 0,41946 | Laq (H) | 0,41643 | Laq (p.u.) | 0,12117 |
| Tq' (s) | 0,00109 | | | | |
| Tq0''(s) | -0,00148 | L1q (H) | 0,01359 | L1q (p.u.) | 0,00395 |
| Tq''(s) | -0,01792 | | | | |
| Lq' (s) | 0,00109 | R1q (Ω) | 351,03314 | R1q (p.u.) | 2,67408 |
| Lq''(s) | 0,01316 | | | | |

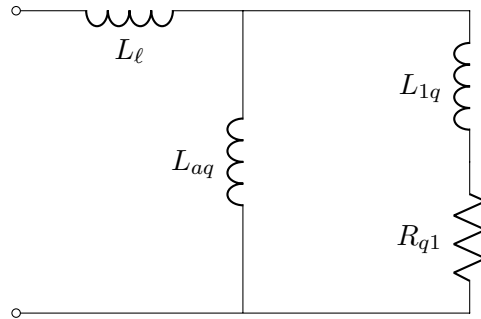


Figura 19: Circuito equivalente para el eje de cuadratura.

7. Conclusiones y recomendaciones

Con el desarrollo de este proyecto, se abre paso a que los estudiantes que cursen la asignatura Máquinas Eléctricas II puedan tener una comprensión más clara y profunda sobre el funcionamiento de temas básicos tratados aquí. De esta forma, además, es posible seguir con el desarrollo de este libro con temas que aún no sean tratados y que se consideren pertinentes para el desenvolvimiento de la asignatura.

Con respecto a la práctica de laboratorio correspondiente a parámetros, no se puede realizar una validación de estas constantes. Esto se debe al hecho de que se desconocen los parámetros reales de la máquina. Esto último, no se realiza debido a que no se encuentra en los objetivos del presente proyecto. Por otro lado, se debe considerar que se necesita realizar un análisis avanzado sobre el comportamiento de la máquina a frecuencias bajas. Adicionalmente, se necesita realizar un estudio profundo sobre los dispositivos de medición que permitan obtener resultados más confiables.

Con esto, se debe tener en cuenta además que para ambas prácticas de laboratorio, se presentaron problemas correspondientes a las mediciones realizadas. Principalmente, por los dispositivos disponibles en la universidad, las componentes armónicas en las mediciones y por último el desbalance de los sistemas. Por ello, se recomienda tener sumo cuidado con todos estos factores externos que pueden introducir grandes errores en los resultados.

Por otro lado, en relación con la guía correspondiente a la transformada de Park, se recomienda utilizar un instrumento de adquisición de datos con mayor número de entradas analógicas. Esto con el fin de que no haya ningún desfase entre las señales de tensión y corriente que puedan introducir errores. Adicionalmente, que este mismo contenga una resolución lo suficientemente alta para realizar el procesamiento de la señal con mayor facilidad.

Finalmente, a pesar de las correcciones que se debieron realizar, ya sea por la inexactitud del dispositivo de medición o incluso por el ruido o componentes armónicas del circuito, se observa que los errores en los resultados obtenidos no son muy grandes dando certeza los resultados.

Referencias

- [1] Jukka Kaukonen et al. Salient pole synchronous machine modelling in an industrial direct torque controlled drive application. 1999.
- [2] SA Soliman, ME El-Hawary, and AH Mantaway. Park's transformation application for power system harmonics identification and measurements. *Electric Power Components and Systems*, 31(8):777–789, 2003.
- [3] Francisco M Gonzalez-Longatt. Entendiendo la transformación de park. *Caracas, Venezuela: Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional*, 2004.
- [4] Ali Tahri—Azeddine Draou. Design of a simple measuring technique of the instantaneous power in three phase system. *Journal of Electrical Engineering*, 56(7-8):221–224, 2005.
- [5] Prabha Kundur, Neal J Balu, and Mark G Lauby. *Power System Stability and Control*, volume 7. McGraw-Hill New York, 1994.
- [6] Y Takeda and B Adkins. Determination of synchronous-machine parameters allowing for unequal mutual inductances. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, volume 121, pages 1501–1504. IET, 1974.
- [7] FP De Mello and JR Ribeiro. Derivation of synchronous machine parameters from tests. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 96(4):1211–1218, 1977.
- [8] IEEE Standard Procedures for Obtaining Synchronous Machine Parameters by Standstill Frequency Response Testing (Supplement to ANSI/IEEE Std 115-1983, IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines). *IEEE Std 115A-1987*, pages 1–28, 1987.
- [9] M. E. Coultres and W. Watson. Synchronous machine models by standstill frequency response tests. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100(4):1480–1489, April 1981.
- [10] P. L. Dandeno, P. Kundur, A. T. Poray, and H. m. Z. El-din. Adaptation and Validation of Turbogenerator Model Parameters Through On-Line Frequency Response Measurements. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100(4):1656–1664, April 1981.
- [11] Miloš Sedláček. Digital measurement of phase difference of If signals—a comparison of dsp algorithms. In *Proceedings of IMEKO XVII World Congress (CD)*, Dubrovnik, Croatia, pages 639–644, 2003.
- [12] Milos Sedlacek and Michal Krumpholc. Digital measurement of phase difference—a comparative study of dsp algorithms. *Metrology and Measurement Systems*, 12(4):427–448, 2005.