



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y
REACTIVA DE UN GENERADOR SINCRÓNICO CONECTADO A LA
RED UTILIZANDO EL LABORATORIO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
POTENCIA**

Presentado por:

LENIN PATRICIO RODRÍGUEZ CUEVA
BRYAN ALEXIS SAAVEDRA CEVALLOS

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres, Walter Rodríguez y Vitalina Cueva por darme la vida, por su esfuerzo y confianza para cumplir una de mis metas. A mi hermano Cristhian por su compañía y apoyo moral en todo momento. A mis tíos, Francisco Calderón y Mariana Cueva, por su acogida como un hijo más en su hogar durante la realización de mis estudios superiores, por sus sanos consejos y apoyo incondicional para culminar mi carrera profesional.

Lenin Rodríguez Cueva

El presente proyecto se lo dedico a mi madre Amada Cevallos Orven, a mi padre Rubén Saavedra Valencia, por su sacrificio, amor y trabajo en todo el proceso de mi carrera universitaria gracias a ustedes he logrado conseguir uno de mis sueños. Son los mejores padres orgullo de ser su hijo. A mis hermanos Danny Saavedra Cevallos por estar siempre pendiente de mi brindando un apoyo incondicional y Rubén Saavedra Cevallos que a pesar de no estar entre nosotros siempre estarás en nuestros corazones.

Bryan Saavedra Cevallos

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por bendecirme y cuidarme en todo momento a lo largo de mi vida, fortaleciéndome en los momentos de debilidad y dificultad. A ESPOL por habernos formado profesionalmente, a los Profesores por sus consejos y conocimientos trasmítidos durante la carrera universitaria, a nuestro tutor MSc. Johnny Rengifo por guarnos en el proyecto y poderlo culminar de forma efectiva, al Ph.D. Síxifo Falcones por facilitarnos el Laboratorio de simulación en tiempo real, por su apoyo moral y profesional, al Ing. Francisco Torres por brindarnos su ayuda de forma desinteresada y a los Docentes de los diferentes laboratorios de la FIEC, por el préstamo de los equipos, necesarios para poder desarrollar e implementar el proyecto.

Lenin Rodríguez Cueva

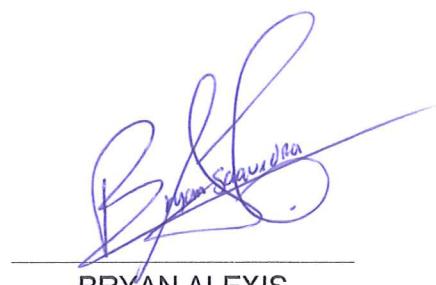
Bryan Saavedra Cevallos

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *LENIN PATRICIO RODRÍGUEZ CUEVA* y *BRYAN ALEXIS SAAVEDRA CEVALLOS*, damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

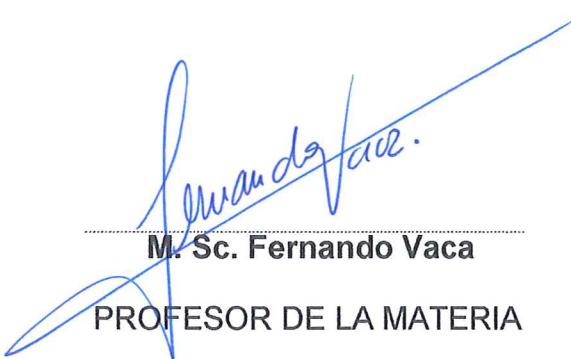


LENIN PATRICIO
RODRÍGUEZ CUEVA



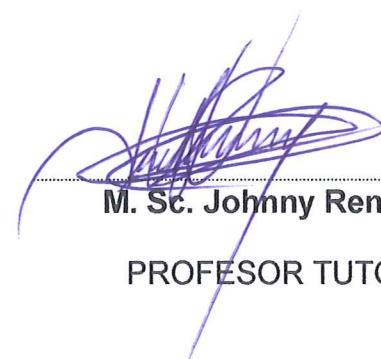
BRYAN ALEXIS
SAAVEDRA CEVALLOS

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



M. Sc. Fernando Vaca

PROFESOR DE LA MATERIA



M. Sc. Johnny Rengifo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este trabajo presenta la implementación de controles de potencia activa y reactiva de un generador sincrónico conectado a la red, utilizando el control “droop”. El control de potencia activa y frecuencia se aplicaron en una máquina de CC, mientras que el control de potencia reactiva y voltaje en terminales se desarrollaron en el generador sincrónico. Los parámetros de las máquinas fueron medidos experimentalmente utilizando métodos estandarizados. El sistema incluye una función de sincronización automática para conectar el generador a la red. La simulación se ejecutó en tiempo real aplicando la técnica “Software in the Loop” (SIL) utilizando la tecnología de OPAL-RT. El generador sincrónico proporciona potencia a la red con un error máximo de 1.77% en estado estacionario.

Palabras Clave: Potencia, droop, sincronización, OPAL-RT, SIL.

ABSTRACT

This project presents the implementation of a grid-connected synchronous generator active and reactive power regulation using the droop control. The active power and frequency control were applied in a dc machine, while the reactive power or terminal voltage developed to the synchronous generator. Machine parameters were measured experimentally using standardized methods. The system includes an automatic synchronization function to connect the generator to the grid. The simulation was executed in real time by applying the Software in the Loop (SIL) technique using the OPAL-RT technology. The synchronous generator provides power to the grid with a maximum steady state error of 1.77%.

Keywords: Power, droop, synchronization, OPAL-RT, SIL.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
CAPÍTULO 1	11
1. Introducción	11
1.1 Descripción del problema	12
1.2 Justificación del problema.....	12
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo General	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
CAPÍTULO 2	14
2. Marco teórico	14
2.1 Máquina sincrónica	14
2.1.1 Descripción básica de la máquina sincrónica.....	14
2.1.2 Ecuaciones de la máquina sincrónica en coordenadas primitivas.	15
2.1.3 Transformación de Coordenadas	16
2.1.4 Ecuaciones de la máquina sincrónica en coordenadas $dq0$	19
2.1.5 Condiciones para sincronizar con la Red Eléctrica	20
2.1.6 Límites de sincronización con la Red Eléctrica.	20

2.1.7	Potencia activa y reactiva que se desarrolla en la máquina sincrónica al estar conectada a una barra infinita.....	20
2.2	Máquina de corriente continua.....	21
2.2.1	Descripción básica de la máquina de corriente continua	21
2.2.2	Ecuaciones de voltaje y par de la máquina DC	22
2.2.3	Pérdidas de la máquina de corriente continua.	23
2.3	Controladores de Potencia Activa y Potencia Reactiva.	23
2.3.1	Control de Potencia activa y frecuencia.	24
2.3.2	Control de potencia reactiva y voltaje.....	26
2.4	Ajuste de Controladores PI mediante Toolbox FRtool.	29
2.5	Simulación en Tiempo Real	30
CAPÍTULO 3	32
3.	Metodología	32
3.1	Ensayos para determinar los parámetros de la máquina DC.....	32
3.1.1	Resistencia de armadura	33
3.1.2	Resistencia de campo	34
3.1.3	Inductancia de campo	34
3.1.4	Constante de tiempo de armadura	34
3.1.5	Constante de pérdidas de fricción	35
3.2	Parámetros de la máquina sincrónica.....	36
3.3	Prueba de saturación magnética de la máquina de corriente continua.....	37
3.4	Modelo matemático de la máquina de corriente continua.....	38
3.5	Control de velocidad	39
3.6	Control de voltaje.....	40
3.7	Implementación del control de potencia activa	41
3.8	Implementación del control de potencia reactiva	41

3.9	Simulación en Tiempo Real	41
3.10	Implementación del Scada.....	43
CAPÍTULO 4.....		44
4.	Resultados y Análisis	44
4.1	Parámetros de la Máquina de corriente continua obtenidos de los ensayos.44	
4.1.1	Resistencia de armadura	44
4.1.2	Resistencia de campo	45
4.1.3	Inductancia de campo	45
4.1.4	Constante de tiempo de armadura	45
4.1.5	Constante de pérdidas	46
4.1.6	Momento de Inercia.....	50
4.2	Curva de Saturación	50
4.3	Resultados de la simulación off-line.	52
4.3.1	Control de velocidad.....	52
4.3.2	Control de voltaje	53
4.3.3	Control de potencia activa	54
4.3.4	Control de potencia reactiva.....	54
4.4	Implementación del Scada.....	55
4.5	Resultados de la simulación en tiempo real.....	57
4.5.1	Prueba 1.....	57
4.5.2	Prueba 2.....	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		61
BIBLIOGRAFÍA		62

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
AVR	Automatic Voltage Regulator
SIL	Software in the Loop
HIL	Hardware in the Loop
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition.
DSP	Digital signal processing
SVCs	Static Var Compensators
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
CC	Corriente continua
DC	Direct current
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivador

SIMBOLOGÍA

f_{em}	Fuerza electromotriz
f	Frecuencia
p	Número de pares de polos.
RPM	Revoluciones por minuto
n	Velocidad en RPM
v	Voltaje en los terminales
r	Resistencia
λ	Enlace de flujo
L	Inductancia
B_m	Constante de pérdidas de fricción
τ	Constante de tiempo
θ	Posición angular
i	Corriente
d	Eje directo
q	Eje de cuadratura
J	Momento de Inercia
T	Torque
α	Aceleración angular
P	Potencia activa
Q	Potencia reactiva

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Transformación del eje coordenado “abc” al eje ortogonal “ α, β ”	16
Figura 2.2 Transformación de eje ortogonal “ α, β ” al eje giratorio “dq0”	17
Figura 2.3 Circuito equivalente de la máquina sincrónica conectada a una barra infinita.	
.....	20
Figura 2.4 Circuito equivalente de máquina de corriente continua.	22
Figura 2.5 Control PI de velocidad.....	24
Figura 2.6 Control droop para potencia activa	24
Figura 2.7 Diagrama simplificado del control droop.	25
Figura 2.8 Control droop para potencia activa	26
Figura 2.9 Control PI de voltaje de campo	27
Figura 2.10 Control droop para potencia activa	27
Figura 2.11 Diagrama simplificado del control “droop”	28
Figura 2.12 Control droop para potencia reactiva	28
Figura 2.13 Interfaz gráfica de FRtool en Matlab [12]	29
Figura 2.14 Opal-RT del Laboratorio de Simulación en tiempo real	31
Figura 3.1 Procedimiento para el desarrollo del proyecto.	32
Figura 3.2 Conexión para determinar la resistencia de armadura de la máquina corriente continua.	33
Figura 3.3 Prueba para determinar la constante de tiempo de armadura.....	34
Figura 3.4 Conexión para determinar la constante de perdidas por fricción.	35
Figura 3.5 Pérdidas en vacío en función de la tensión de alimentación [10]	36
Figura 3.6 Esquemático de conexión para determinar curva de vacío.	37
Figura 3.7 Diagrama de bloques que representa a la máquina DC	39
Figura 3.8 Sintonizador de PI	39
Figura 3.9 Implementación del controlador a través del diagrama de Nyquist [12]....	40
Figura 3.10 Respuesta del controlador ante un escalón.....	41
Figura 3.11 Subsistemas para la simulación en tiempo real.....	42
Figura 3.12 Bloque OpComm	42
Figura 4.1 Curva de Resistencia de armadura	45
Figura 4.2 Transitorio de corriente de armadura.....	46

Figura 4.3 Curva P_o vs V_a , para una velocidad de 1733 RPM.....	48
Figura 4.4 Curva P_o vs V_a , para una velocidad de 1600 RPM.....	48
Figura 4.5 Curva P_o vs V_a , para una velocidad de 1500 RPM	49
Figura 4.6 Curva para determinar la constante B_m	49
Figura 4.7 Valores de fábrica de la máquina de corriente continua [16]	50
Figura 4.8 Curva de vacío de la máquina de corriente continua.	52
Figura 4.9 Control de velocidad de la máquina DC.....	53
Figura 4.10 Control de voltaje de la máquina sincrónica	53
Figura 4.11 Control de Potencia Activa de la máquina síncrona.	54
Figura 4.12 Control de Potencia Reactiva de la máquina síncrona.	55
Figura 4.13 Scada para el control de potencia activa y reactiva del generador.....	56
Figura 4.14 Ingreso de valores para P y Q.	57
Figura 4.15 Potencia activa entregada a la red.....	58
Figura 4.16 Potencia reactiva suministrada a la red.	58
Figura 4.17 Valores de P y Q ingresados por el operador.	59
Figura 4.18 Potencia activa suministrada a la red.	60
Figura 4.19 Consumo de potencia reactiva.	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Parámetros de la máquina sincrónica [11].....	37
Tabla 4.1 Valores medidos en la prueba de saturación magnética.....	44
Tabla 4.2 Pérdidas en vacío y voltaje de armadura a una velocidad de 1733 RPM ..	47
Tabla 4.3 Pérdidas en vacío y voltaje de armadura a una velocidad de 1600 RPM. .	47
Tabla 4.4 Pérdidas en vacío y voltaje de armadura a una velocidad de 1500 RPM ..	47
Tabla 4.5 Corriente de campo y voltaje de armadura de la máquina DC en vacío	51

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En el Ecuador y en el resto del mundo las centrales de generación eléctrica utilizan comúnmente generadores sincrónicos para producir energía eléctrica, estos generadores se encuentran acoplados a una turbina, la misma que es alimentada mediante una fuente de energía primaria, que le permite realizar movimiento rotacional. Las fuentes de energía primaria pueden ser de tipo renovables o no renovables como los combustibles fósiles, su elección dependerá del tipo de central eléctrica que se esté operando. Las centrales de generación convencionales no almacenan energía, por lo que generan de acuerdo con lo que necesite la demanda en cada instante. Esta energía eléctrica debe llegar a cada uno de los consumidores cumpliendo con la frecuencia nominal del sistema (50 o 60 Hz) y otros estándares de la calidad de la energía. Para lograr esto las centrales eléctricas deben tener equipadas sus unidades generadoras con sistemas de control y protecciones eléctricas que le permitan asegurar un funcionamiento correcto al momento de contribuir con energía eléctrica a la red.

Los generadores eléctricos pueden operar conectados o aislados de la red. Si un generador se encuentra operando aislado de la red y tiene una carga en particular por alimentar, se necesita obligatoriamente de la implementación de un regulador automático de voltaje (AVR), el AVR permite recuperar la tensión nominal del generador ante el ingreso de cargas. Ahora si se trata de un generador conectado a la red implicaría la utilización de reguladores que controlen sus variables de salida, como son: voltaje, frecuencia, potencia activa y potencia reactiva. Para lograr esto se debe manipular las variables de entrada: par mecánico y excitación, sin embargo, un cambio en las variables de entrada repercute en un cambio simultáneo en las variables de salida, incluso en escenarios críticos se puede perder hasta el sincronismo con la red.

En este proyecto se ha trabajado con una máquina sincrónica TERCO MV1008-206 y una máquina de corriente continua TERCO MV1006-206, actuando como generador y primo-motor respectivamente, las mismas fueron sometidas a pruebas

experimentales para determinar sus parámetros y luego representarlas mediante modelos matemáticos en MATLAB/ SIMULINK.

El primo-motor fue alimentado en sus terminales mediante una fuente programable RS90, mientras que el campo del generador sincrónico fue energizado con un amplificador Omicron CMS 356.

Como elemento agregado a las simulaciones convencionales se ha hecho uso de la tecnología OPAL-RT que se encuentra disponible en el Laboratorio de simulación en tiempo real, de la ESPOL. Tecnología apropiada para el desarrollo de controladores con diseños complejos, dinámicos y que necesitan de cálculos paralelos. Esta plataforma cuenta con enfoques SIL, RCP, HIL, que permiten probar, validar y reducir el tiempo de desarrollo de controladores, dentro de un entorno seguro [1].

1.1 Descripción del problema

A futuro se desea implementar un Laboratorio de Micro-redes, para lo cual se está incentivando a realizar proyectos que involucren estrategias de control para micro-redes eléctricas. Actualmente se cuenta con un Laboratorio de Simulación en Tiempo Real, con tecnología OPAL-RT, donde se diseña y comprueba controladores, se ha implementado un control de voltaje a lazo cerrado de un generador sincrónico aislado, utilizando una linealización exacta a lazo cerrado del modelo no lineal de la máquina. Ahora para emular completamente una microturbina es necesario añadir los controles a lazo cerrado de potencia activa y reactiva al conectar el generador a una barra infinita. Además, se requiere programar la función de sincronización de los sistemas.

1.2 Justificación del problema

Realizar este proyecto integrador permite que estudiantes de pregrado, estudiantes de postgrado, investigadores y personal técnico de empresas ligadas a la generación de energía eléctrica, practiquen, desarrollos y validen controladores a través del uso del simulador en tiempo real de OPAL-RT. También pueden comparar sus controladores con los existentes en el Laboratorio de simulación en tiempo real, como son el AVR y los controladores de potencia activa y reactiva.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Implementar el control de potencia activa y reactiva de un generador sincrónico conectado a una red eléctrica, utilizando un esquema de SIL.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Simular off-line el control de potencia activa y reactiva en un generador sincrónico conectado a una barra infinita utilizando MATLAB/SIMULINK
2. Simular en tiempo real el control de potencia activa y reactiva en un generador sincrónico conectado a una barra infinita utilizando OPAL-RT
3. Simular la función de sincronización de la microturbina utilizando MATLAB/SIMULINK y el OPAL-RT
4. Desarrollar un SCADA en LabVIEW para el control del generador eléctrico en su conexión y operación con la red eléctrica

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Máquina sincrónica

La máquina sincrónica es una máquina eléctrica rotativa que puede operar como generador o como motor, se compone de una parte fija denominada estator y una parte móvil conocida como rotor. Las máquinas sincrónicas pueden tener rotor de tipo polos salientes o de tipo cilíndrico, el primer tipo de rotor se usa para máquinas que operan a bajas velocidades como en las centrales eléctricas mientras que el otro tipo se usa para máquinas que operan a grandes velocidades como turbinas a gas o de vapor [2].

2.1.1 Descripción básica de la máquina sincrónica

La máquina sincrónica posee un devanado de campo (excitación) y un devanado de armadura trifásico, que se ubican en el rotor y en el estator, respectivamente. Cuando la máquina sincrónica opera como generador sincrónico, es decir convierte energía mecánica en energía eléctrica, el devanado de campo es alimentado con corriente continua, produciéndose un campo magnético de magnitud constante, luego el rotor es impulsado desde su eje a través de un primomotor, haciendo que el campo magnético sea giratorio desde el punto de vista del estator, esto campo magnético giratorio induce una fuerza electromotriz en el devanado del estator, este devanado se encuentra repartido en tres grupos desfasados 120 ° eléctricos, logrando así obtener un voltaje trifásico en las terminales del generador.

El término sincrónico se debe a que la frecuencia de la corriente alterna esta sincronizada con la velocidad del rotor, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (2.1)$$

La máquina sincrónica también puede operar como motor sincrónico y se lo utiliza en las industrias que requieren de velocidad constante, incluso permite regular el factor de potencia, evitando así el uso de condensadores para reducir la potencia reactiva absorbida por la instalación [3].

2.1.2 Ecuaciones de la máquina sincrónica en coordenadas primitivas.

Aplicando la Ley de Faraday y considerando el circuito trifásico que se tiene en el devanado del estator, se obtienen las siguientes ecuaciones de voltaje para cada una de las fases, de acuerdo con [4]:

$$\begin{aligned} v_a &= R_e i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \\ v_b &= R_e i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \\ v_c &= R_e i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Donde:

$$\lambda = L i \quad (2.3)$$

Y L depende de θ .

Ahora si representamos las ecuaciones anteriores en forma matricial, tenemos:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & 0 & 0 \\ 0 & R_e & 0 \\ 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

En forma simplificada del sistema de ecuaciones se tiene:

$$[v] = [R][i] + \frac{d}{dt} ([L(\theta)][i]) \quad (2.5)$$

Aplicando la regla de la cadena, tenemos:

$$[v] = [R][i] + \frac{dL}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} [i] + L(\theta) \frac{d}{dt} [i] \quad (2.6)$$

Donde:

$$\frac{dL}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} [i] = fem \text{ Generación}$$

$$L(\theta) \frac{d}{dt} [i] = fem \text{ Transformación}$$

La ecuación (2.5) describe el comportamiento físico del devanado trifásico del estator.

Considerando el comportamiento dinámico del eje mecánico (rotor), se obtiene la siguiente ecuación:

$$T_m - T_e - T_D = T_a = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.7)$$

Donde, T_m representa el par mecánico, T_e es el par electromagnético de la máquina, T_D representa el par de amortiguamiento y T_a es el par de aceleración.

La solución al sistema de ecuaciones diferenciales de (2.5) se puede obtener a partir de la aplicación de algoritmos de análisis numérico o utilizando una estrategia de Transformación de coordenadas, este último método simplifica términos y facilita el estudio del comportamiento dinámico de la máquina sincrónica.

2.1.3 Transformación de Coordenadas

Según [5], R. H. Park nos indica que las variables eléctricas de una máquina trifásica que se encuentren sobre el eje de coordenadas primitivas (abc) pueden ser reescritas en un nuevo eje, giratorio (dq0), usando la matriz de Transformación de Park $[P_\theta]$, bajo el supuesto que la máquina es ideal, donde se cumple lo siguiente:

- Devanado de armadura distribuido sinusoidalmente
- La histéresis presente en cada circuito magnético es igual cero.
- Se desprecia la saturación y las corrientes de Eddy en la armadura.

El proceso de transformación de coordenadas considera dos pasos, el primero consiste en pasar desde el eje de coordenadas primitivas hacia un eje estacionario " α, β ", así como se ilustra en la Figura 2.1.

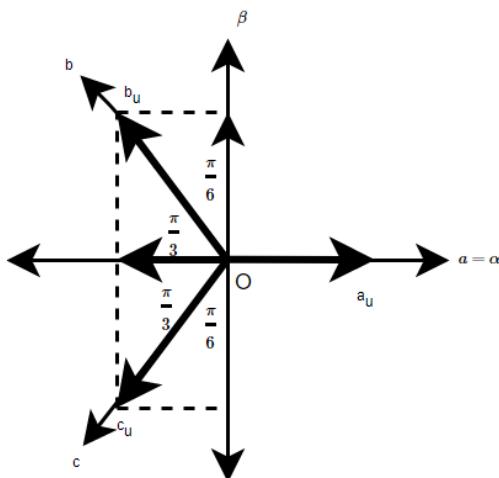


Figura 2.1 Transformación del eje coordenado “abc” al eje ortogonal “ α, β ”

Para obtener esta primera transformación, se utiliza la matriz de Transformación K, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$[f_{\alpha\beta}] = [K][f_{abc}] \quad (2.8)$$

Donde:

$$[K] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

El siguiente paso consiste en pasar desde el eje estacionario “ α, β ” al eje giratorio “dq0”, así como se muestra en la Figura 2.2.

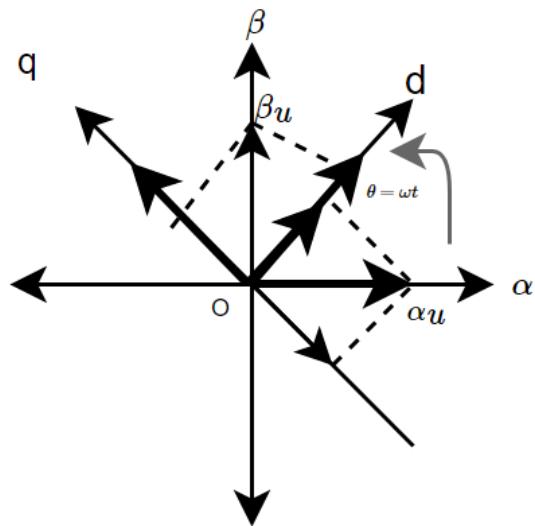


Figura 2.2 Transformación de eje ortogonal “ α, β ” al eje giratorio “dq0”

Esto se logra a través de la utilización de una matriz de Rotación $[R_\theta]$, como se muestra a continuación:

$$[f_{0dq}] = [R_\theta][f_{\alpha\beta}] \quad (2.9)$$

Donde:

$$[R_\theta] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ 0 & \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

Tal que: $\theta_r = \omega_r + \frac{\pi}{2} + \delta$

Ahora si multiplicamos la matriz de transformación $[K]$ con la matriz de rotación $[R_\theta]$, obtenemos la matriz de transformación de Park $[P_\theta]$, como se muestra a continuación:

$$[P_\theta] = [R_\theta][K] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Una vez obtenida la matriz de transformación de Park, es posible pasar del eje coordenado “abc” al eje giratorio “dq0”, mediante la siguiente ecuación:

$$[f_{0dq}] = [P_\theta][f_{abc}] \quad (2.10)$$

También se puede obtener la matriz inversa de la transformada de Park y está dada por:

$$[P_\theta]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Como se puede observar $[P_\theta]^{-1} = [P_\theta]^T$, esto se debe a que la matriz de transformación de Park es una matriz hermitiana, por lo tanto, la transformación no afecta la potencia (conservativa en potencia).

El eje de referencia “dq0” es un eje que se encuentra a la misma velocidad del eje del rotor, donde el eje directo (d) del rotor se encuentra alineado con el eje magnético del devanado de excitación y el eje de cuadratura (q) se encuentra desplazado 90 grados eléctricos del devanado de excitación.

Usar esta estrategia de transformación de coordenadas implica la simplificación de términos en las ecuaciones, como las inductancias, las cuales varían conforme a la posición angular θ y a su vez dependen del tiempo.

En [6] me indica que gran parte de la simplificación asociada con la Transformada de Park proviene de dos características clave que son:

- 1) En condiciones de funcionamiento en estado estacionario, todas las corrientes y flujos, incluidos los de los devanados del rotor y los devanados de armadura transformados, tienen valores constantes.

2) Al elegir los dos ejes separados 90 grados eléctricos, los flujos producidos por las corrientes en los devanados en un eje no producen enlaces de flujo en los devanados en el otro eje (flujos mutuos). Por lo tanto, estos conjuntos de bobinados son ortogonales.

Esto simplifica considerablemente la relación flujo-corriente del modelo y da lugar a una estructura de modelo que consta de dos redes independientes, una para el eje directo y otra para el eje de cuadratura.

2.1.4 Ecuaciones de la máquina sincrónica en coordenadas $dq0$

Aplicando la transformada de Park al sistema de ecuaciones (2.2) se tiene:

$$\begin{aligned} v_d &= -R_e i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} + \omega \lambda_q \\ v_q &= -R_e i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega \lambda_d \\ v_0 &= -R_0 i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Donde los enlaces de flujo λ se representan de acuerdo con su eje, como:

$$\begin{aligned} \lambda_d &= -L_d i_d + L_{df} i_f \\ \lambda_q &= -L_q i_q \\ \lambda_0 &= L_0 i_0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Reemplazando los enlaces de flujos en sus respectivos voltajes, tenemos:

$$\begin{aligned} v_d &= -R_e i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + L_{df} \frac{di_f}{dt} + \omega L_q i_q \\ v_q &= -R_e i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d + \omega L_{df} i_f \\ v_0 &= -R_0 i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Considerando el circuito de excitación, el voltaje de campo se define como:

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (2.14)$$

Donde:

$$\lambda_f = L_f i_f - l_{df} i_d \quad (2.15)$$

Entonces reescribiendo el voltaje de campo, se tiene:

$$v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} - L_{df} \frac{di_d}{dt} \quad (2.16)$$

2.1.5 Condiciones para sincronizar con la Red Eléctrica

Según [3] para sincronizar un generador síncrono con la red, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- a) Tanto la frecuencia de la Red como la frecuencia del generador deben ser iguales.
- b) La tensión del generador debe tener un valor eficaz igual a la tensión de la Red.
- c) Las tensiones producidas por el generador tienen que estar en fase con las tensiones de la Red.
- d) Las secuencias de fases del generador y de la Red deben ser idénticas.

2.1.6 Límites de sincronización con la Red Eléctrica.

De acuerdo con [7] me indica que los límites típicos de sincronización son:

- 1) Ángulo de cierre del interruptor: dentro de ± 10 grados eléctricos
- 2) Coincidencia de voltaje: de 0% a 5%.
- 3) Diferencia de frecuencia: menos de 0.067 Hz.

2.1.7 Potencia activa y reactiva que se desarrolla en la máquina sincrónica al estar conectada a una barra infinita.

Según [3], si se considera que la máquina sincrónica es de rotor cilíndrico entonces se puede despreciar la resistencia de inducido y el circuito equivalente es el que se muestra en la Figura 2.3.

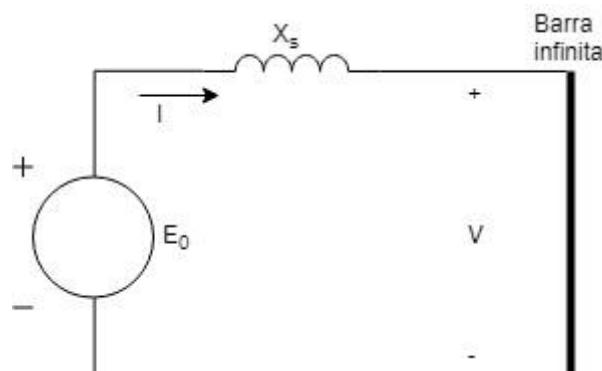


Figura 2.3 Circuito equivalente de la máquina sincrónica conectada a una barra infinita.

Entonces la potencia activa y reactiva desarrollada por la máquina sincrónica viene dada por las siguientes ecuaciones:

$$P = 3 \frac{E_0 V}{X_S} \sin \delta \quad (2.17)$$

$$Q = 3 \frac{E_0 V \cos \delta - V^2}{X_S} \quad (2.18)$$

Donde:

E_0 : fem inducida en el generador

V : voltaje de la barra infinita.

δ : ángulo entre E_0 y V .

X_S : reactancia síncrona (constante)

2.2 Máquina de corriente continua

En la actualidad la máquina de corriente continua ha sido desplazada por nuevos equipos electrónicos como son los rectificadores, inversores, etc. Sin embargo, el estudio de la máquina corriente continua hay que dedicarle su tiempo, debido a que todavía se usa como motor de accionamiento en el rango de baja potencia. En este capítulo se expone la teoría de la máquina corriente continua, el análisis de las características dinámicas de la máquina de derivación, los diagramas de bloques en el dominio del tiempo con sus respectivas ecuaciones de estado de la máquina en mención.

2.2.1 Descripción básica de la máquina de corriente continua

La máquina de corriente continua se encuentra compuesta por una parte fija y una parte móvil, que corresponde al estator y rotor respectivamente.

En la parte fija podemos encontrar un devanado de excitación y en el rotor se encuentra el devanado de armadura. Debido a la acción rectificadora del colector se obtiene una corriente continua entre las escobillas de salida.

Cuando la máquina de corriente continua funciona como motor se alimenta con voltaje de corriente continua en los terminales de la máquina, provocando un par que hace girar el rotor de la máquina.

Si el devanado de excitación y el devanado de armadura se alimentan de forma separada se la denomina como máquina con excitación independiente, en cambio si los circuitos son conectan eléctricamente en paralelo y son alimentado por una

misma fuente, se la denomina como máquina “shunt” o derivación. Otros tipos de conexión que existen son la máquina serie y la máquina compuesta, este último se refiere a una combinación del tipo serie con el “shunt” [8].

2.2.2 Ecuaciones de voltaje y par de la máquina DC

Las bobinas de la armadura giran en un campo magnético establecido por una corriente que fluye en el devanado de campo, se establece que se induce un voltaje en estas bobinas en virtud de esta rotación, además la commutación hace que las bobinas de la armadura permanezcan como un devanado estacionario con su eje magnético orthogonal al eje magnético del devanado de campo. Por lo tanto, los voltajes no se inducen en un devanado debido a derivada en el tiempo de la corriente que fluye en el otro. Teniendo en cuenta esto tendremos las siguientes ecuaciones de voltaje de campo y voltaje de armadura de forma matricial como:

$$\begin{aligned} V_a &= r_a(1 + \tau_a p) i_a + \omega_r L_{af} i_f \\ V_f &= r_f(1 + \tau_f p) i_f \end{aligned} \quad (2.19)$$

Donde la variable p representa d/dt , τ_f y τ_a son las constantes de tiempo de campo y armadura respectivamente. La velocidad del rotor definida por ω_r y L_{af} la inductancia mutua entre el campo y la armadura. En la Figura 2.4 vemos el circuito equivalente, $\omega_r L_{af} i_f$ representa el voltaje de armadura de circuito abierto para eso utilizaremos un variable sustituta que es

$$K_v = L_{af} i_f \quad (2.20)$$

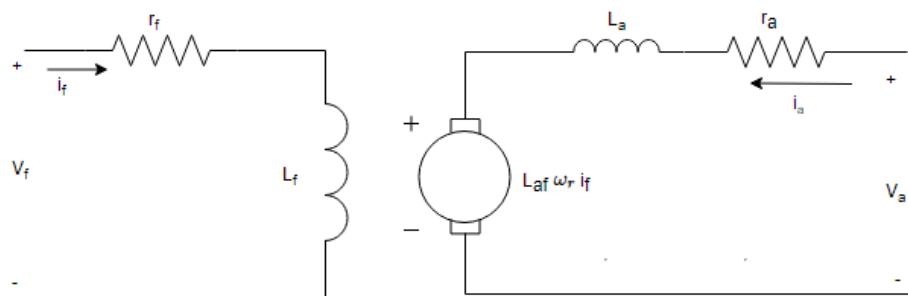


Figura 2.4 Circuito equivalente de máquina de corriente continua.

Para una máquina de corriente continua con un devanado de campo el par electromagnético se expresa de la siguiente manera:

$$T_e = L_{af} i_f i_a \quad (2.21)$$

El par electromagnético y la velocidad del rotor están relacionado por la siguiente ecuación

$$T_e = J \frac{dw_r}{dt} + B_m w_r + T_L \quad (2.22)$$

Donde J es la inercia del rotor sus respectivas unidades son $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$. Un par positivo actúa para girar el rotor en la dirección de aumento θ_r , T_L el par de carga positivo se opone a un T_e positivo y B_m es una constante que representa el coeficiente de amortiguamiento cuyas unidades son $\text{N}\cdot\text{m}$ generalmente este valor es pequeño y ciertas ocasiones se desprecia este valor [9].

2.2.3 Pérdidas de la máquina de corriente continua.

Según [10] en una máquina rotativa encontraremos pérdidas mecánicas (P_m), pérdidas eléctricas (P_e) y pérdidas en el hierro (P_{fe}), las cuales se pueden representar con la siguiente ecuación:

$$P_{\text{pérdidas}} = P_m + P_e + P_{fe} \quad (2.23)$$

Si la máquina opera en vacío se cumple que el par eléctrico (T_e) es igual al par resistente ($T_{\text{resistente}}$), lo que implica que la potencia de entrada (P_{in}) de la máquina sea igual a las pérdidas, es decir:

$$P_{in} = V_a I_a = P_{\text{pérdidas}} \quad (2.24)$$

Si igualamos las dos ecuaciones anteriores, tenemos:

$$V_a I_a = P_m + P_e + P_{fe} \quad (2.25)$$

Por lo tanto, si se desea determinar las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el hierro, se tendría que realizar la siguiente operación y las podríamos representar como P_o :

$$P_o = P_m + P_{fe} = V_a I_a - P_e = V_a I_a - R_a I_a^2 \quad (2.26)$$

2.3 Controladores de Potencia Activa y Potencia Reactiva.

Una central eléctrica debe tener un control de potencia activa y reactiva, para suplir la demanda eléctrica en un sistema de potencia.

Los flujos de potencia activa y reactiva mediante ecuaciones están estrechamente relacionadas, sin embargo, los controles generalmente se los realiza considerando diferentes acciones de control.

Los controles clásicos del generador sincrónico con excitación en los devanados son conocidos como control de frecuencia-potencia activa y control de voltaje-potencia reactiva.

2.3.1 Control de Potencia activa y frecuencia.

En un generador sincrónico el flujo de potencia activa depende de la energía suplida por el primo-motor, entonces esta energía es proporcional a la velocidad angular de la máquina de corriente continua, entonces la regulación de la velocidad permite controlar la potencia activa de salida [4].

A menudo el control de velocidad a lazo cerrado se lo denomina gobernador.

Usualmente se usa un control PI para minimizar la diferencia de error entre un valor de medición y un valor de referencia, tal como se ilustra en la Figura 2.5.

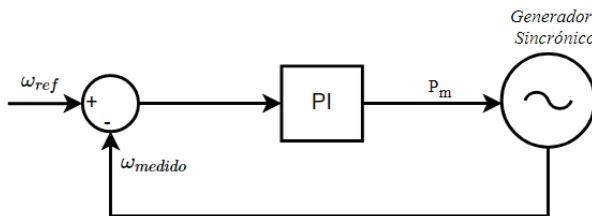


Figura 2.5 Control PI de velocidad

Para el control de potencia activa se pueden utilizar los controladores “droop”, los mismos que se definen mediante el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 2.6.

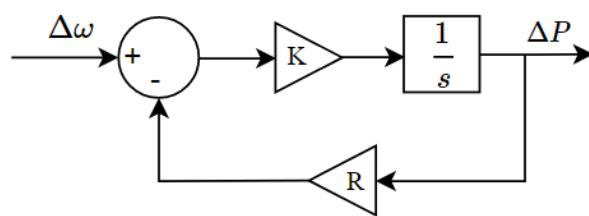


Figura 2.6 Control droop para potencia activa

En la Figura 2.6 se observa la función de transferencia del controlador droop, donde K es una constante de proporcionalidad, R es la regulación de velocidad,

ΔP es el cambio de potencia activa y $\Delta\omega$ es el cambio de velocidad. También este diagrama de bloques se puede representar mediante el diagrama de bloques de la Figura 2.7.

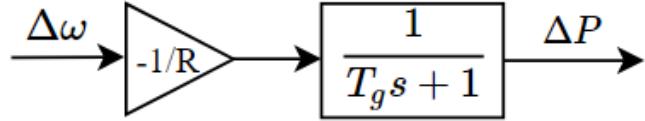


Figura 2.7 Diagrama simplificado del control droop.

Donde:

T_g se obtiene con la ecuación (2.27):

$$T_g = \frac{1}{K R} \quad (2.27)$$

Y R se calcula de la siguiente manera:

$$\%R = 100 \frac{\omega_{SL} - \omega_{FL}}{\omega_n} \quad (2.28)$$

Tal que:

ω_{SL} : velocidad angular sin carga

ω_{FL} : velocidad angular a plena carga

ω_n : velocidad angular nominal

Además R se la puede interpretar mediante la Figura 2.8.

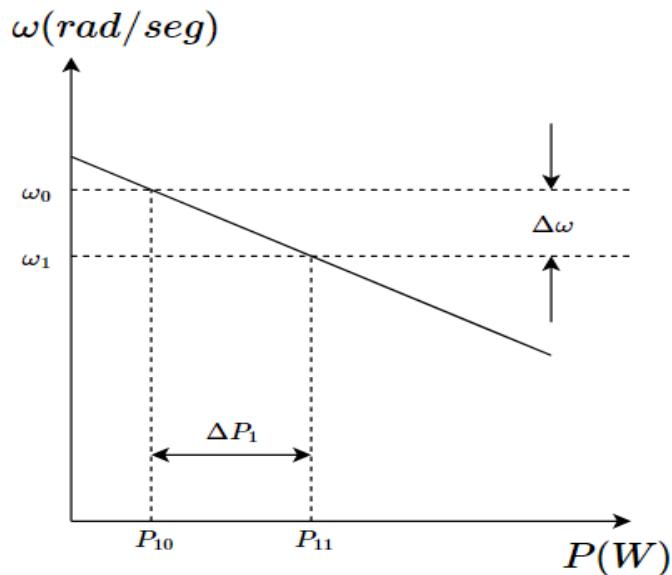


Figura 2.8 Control droop para potencia activa

En la Figura 2.8, se puede visualizar que un cambio en la potencia activa se ve reflejado en un cambio en la velocidad angular o frecuencia.
La pendiente de la gráfica anterior representa a R .

2.3.2 Control de potencia reactiva y voltaje.

El generador sincrónico puede absorber o suministrar potencia reactiva dependiendo de la excitación. Cuando se sobreexcita suministra potencia reactiva, sin embargo, la capacidad de suministrar o absorber continuamente potencia reactiva está limitada por el campo de la máquina alterna [4]. El generador sincrónico normalmente está equipado con un regulador automático de voltaje (AVR) que ajusta continuamente la excitación para controlar el voltaje en terminales del generador, como se muestra en la Figura 2.9.

Un regulador automático de voltaje simple de implementar consiste en utilizar un controlador PI, el cual se ajusta para que controle la excitación del campo y así mantener un nivel de voltaje constante en los terminales del generador.

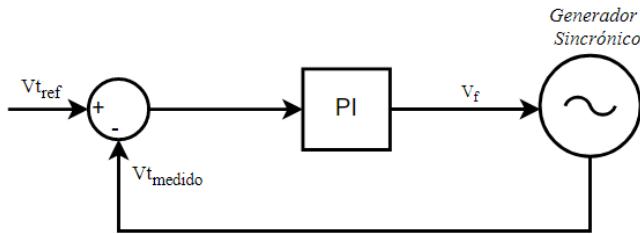


Figura 2.9 Control PI de voltaje de campo

Los dispositivos utilizados para este propósito se pueden clasificar de la siguiente manera:

- SVCs
- TCSC
- Capacitores series.
- Reactores en serie o paralelo [11].

Para el control de potencia reactiva se utilizan los controladores “droop”, cuyo funcionamiento se puede interpretar a través del diagrama de bloques que se ilustra en la Figura 2.10.

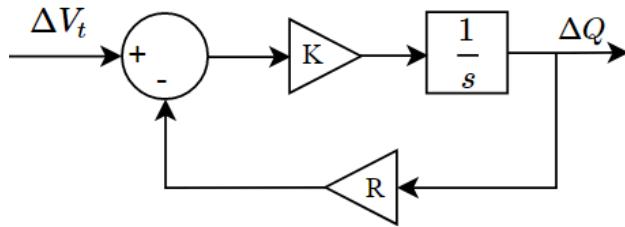


Figura 2.10 Control “droop” para potencia activa

En la Figura 2.10 se muestra la función de transferencia del controlador “droop”, donde K es una constante de proporcionalidad, R es la regulación de velocidad, ΔQ es el cambio de potencia reactiva y ΔV_t es el cambio de voltaje en los terminales del generador. También este diagrama de bloque se puede representar mediante la siguiente Figura 2.11.

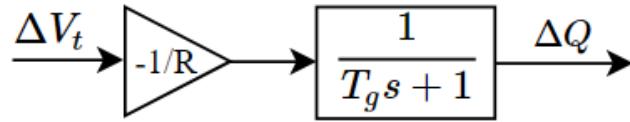


Figura 2.11 Diagrama simplificado del control “droop”.

Donde:

T_g se obtiene de la ecuación (2.29):

$$T_g = \frac{1}{K R} \quad (2.29)$$

Y R se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\%R = 100 \frac{V_{SL} - V_{FL}}{V_n} \quad (2.30)$$

Tal que:

V_{SL} : voltaje sin carga

V_{FL} : voltaje a plena carga

V_n : voltaje nominal

Además R se la puede representar mediante la Figura 2.12.

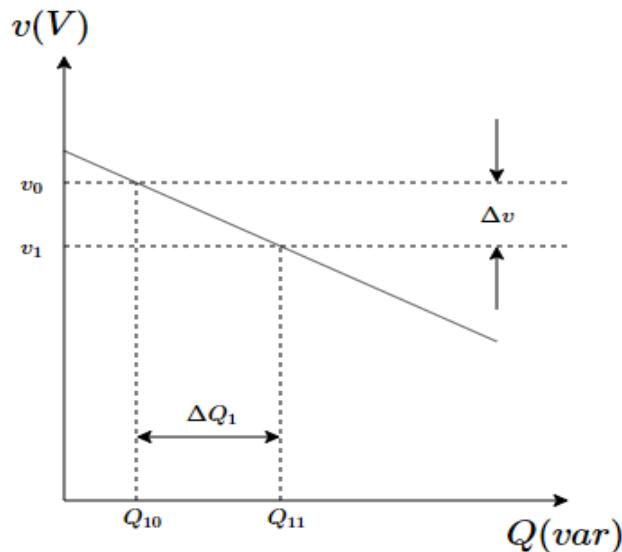


Figura 2.12 Control “droop” para potencia reactiva

En la Figura 2.12, se puede visualizar que un cambio en la potencia reactiva se ve reflejado en un cambio en el voltaje de terminales del generador.

La pendiente de la gráfica anterior representa a R .

2.4 Ajuste de Controladores PI mediante Toolbox FRtool.

Los compensadores dinámicos simples como los PID son muy utilizados en las aplicaciones de control debido a su trabajo eficiente. La técnica FRtool proporciona al usuario una forma interactiva que ayuda al aprendizaje y con participación fácil de usar. FRtool funciona con diagramas de frecuencia (gráficos de Nichols), como se observa en la Figura 2.13. Tiene la posibilidad de mostrar el diseño, así como sus especificaciones como restricciones graficas en el diagrama de Nichols, todo esto se actualiza en tiempo real mientras va modificando el controlador conformado por polos y ceros; también las restricciones son visibles de forma gráfica como son el “overshoot” (%OS) y las especificaciones de robustez (Ro).

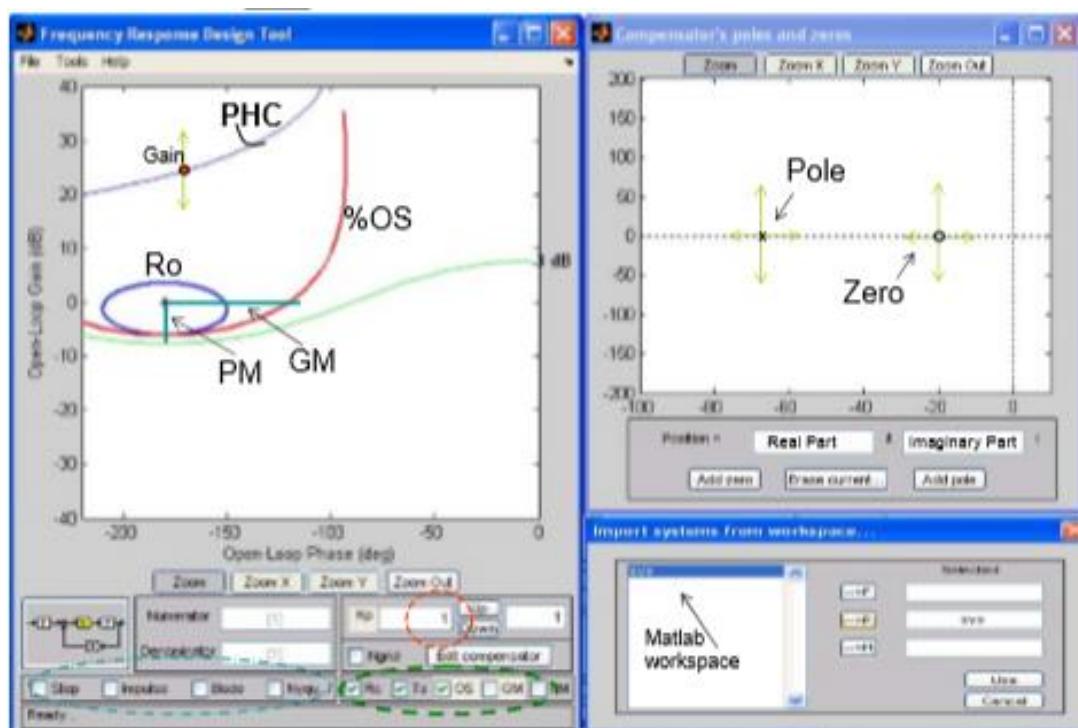


Figura 2.13 Interfaz gráfica de FRtool en Matlab [12]

Esta herramienta permite al usuario el diseño de control sin tener la necesidad de tener conocimientos previos y así el usuario pueda tomar mejores decisiones.

2.5 Simulación en Tiempo Real

Una simulación en tiempo real involucra el uso de pasos fijos de duración (tiempo discreto), permitiendo que la simulación sea diferente a una simulación convencional off-line, donde normalmente los pasos de tiempo no son controlados (tiempo continuo) para realizar la simulación.

La duración de una simulación en tiempo real es exactamente igual a lo que se demora una planta física en realizar determinada acción, por lo cual los resultados obtenidos son muy confiables.

Uno de los principales desarrolladores a nivel mundial de simuladores digitales en tiempo real es OPAL-RT, esta industria fabrica sus simuladores en base a PC / FPGA, equipos de prueba de hardware en lazo cerrado (HIL) y sistemas de prototipos de control rápido (RCP), para diseñar, probar y optimizar el control en redes eléctricas, sistemas de potencia, accionamientos de motores, industria automotriz, trenes, aviones y diversas industrias [1]. Sus principales consumidores son los centros de Investigación, universidades, politécnicas, entre otros.

ESPOL cuenta con la Tecnología de OPAL-RT OP5607 de 32 núcleos, como se muestra en la Figura 2.14.



Figura 2.14 OPAL-RT del Laboratorio de Simulación en tiempo real

La Tecnología de OPAL-RT es una computadora más poderosa en comparación con la que normalmente usamos, pero lo que la hace diferente es que tiene un sistema operativo de Linux en tiempo real, con gran poder de procesamiento. Para poder interactuar con el mundo externo, está dotado con entradas digitales y analógicas, en total se cuenta con 32 entradas analógicas, 32 salidas analógicas, 64 entradas digitales y 64 salidas digitales.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

El procedimiento utilizado para diseñar, desarrollar y probar los controladores de potencia activa y potencia reactiva se muestra en la Figura 3.1.

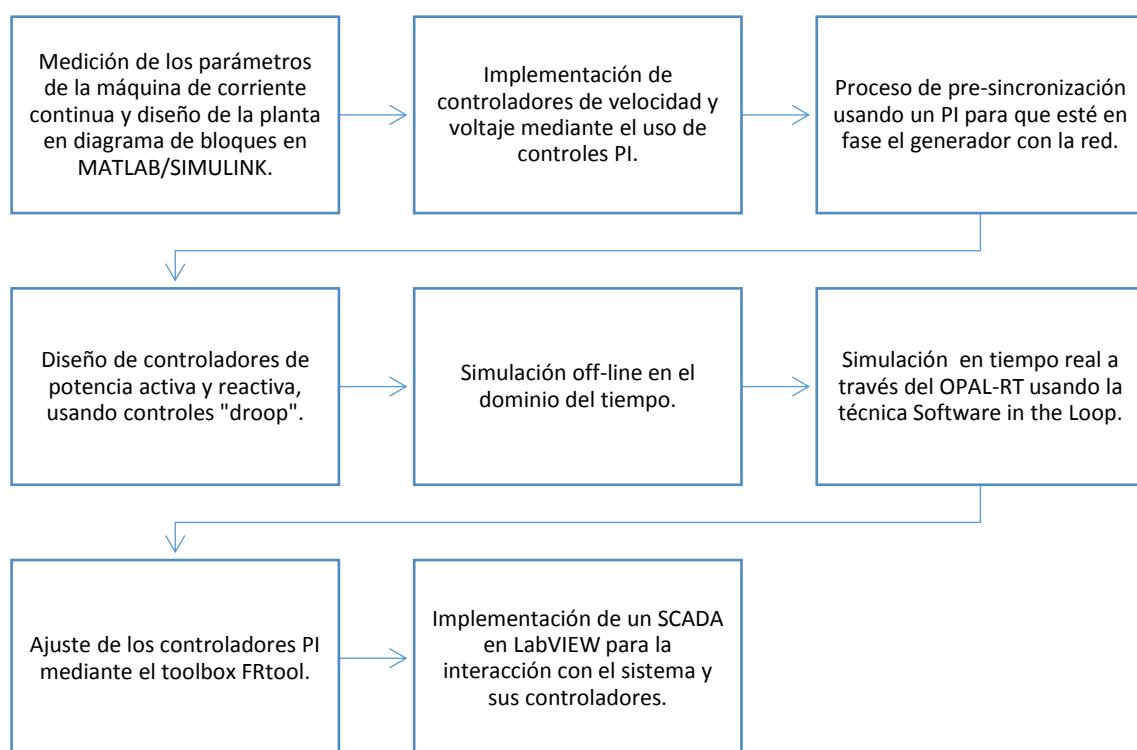


Figura 3.1 Procedimiento para el desarrollo del proyecto.

3.1 Ensayos para determinar los parámetros de la máquina DC

Toda máquina de corriente continua tiene parámetros electromecánicos que la definen y que son necesarios para poderla simular como una planta, el valor de estos parámetros es propio de cada máquina, es decir no necesariamente dos máquinas que tengan la misma capacidad y que hayan sido construidas por el mismo fabricante tendrán los mismos valores en sus parámetros.

Para determinar estos valores se ha empleado lo indicado en la guía de la IEEE Std 113 [13] y del libro de F.Tiberio [10].

3.1.1 Resistencia de armadura

Para medir este parámetro no se lo hace directamente desde las borneras de armadura, debido a que la máquina tiene colectores y delgas y como estas actúan por contacto, en ciertas ocasiones se puede medir un valor falso de la resistencia de armadura cuando los colectores no están en contacto con las delgas. Por este motivo realizar una prueba experimental a la máquina de corriente de continua, dará un mejor valor aproximado a la realidad.

La prueba experimental consiste en realizar la conexión que se ilustra en la Figura 3.2.

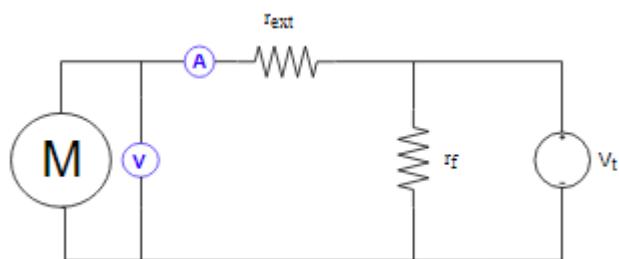


Figura 3.2 Conexión para determinar la resistencia de armadura de la máquina corriente continua.

En la Figura 3.2 se tiene a la máquina de corriente continua actuando como motor “shunt” sin carga (en vacío) a tensión reducida, se utiliza una resistencia externa (r_{ext}) de 100Ω en serie con la armadura, la cual permite limitar la corriente de inducido (armadura) y la resistencia de campo (r_f) es la que trae por defecto la máquina. Se deben realizar mediciones de corriente de armadura y de voltaje inducido, cuando se alimenta a la máquina con voltajes de 5 V a 130 V.

Finalmente, con aquellas mediciones se debe realizar la gráfica I_a vs E_a , cuya pendiente será la Resistencia de armadura.

3.1.2 Resistencia de campo

Para encontrar este parámetro se debe realizar una medición directa en los bornes de campo de la máquina de corriente continua a través de un multímetro.

3.1.3 Inductancia de campo

La inductancia de campo se la mide directamente en los bornes de campo de la máquina de corriente continua a través de un medidor LCR.

3.1.4 Constante de tiempo de armadura

Para obtener este parámetro se debe realizar la conexión que se muestra en la Figura 3.3, usando como r_{ext} una resistencia de 5.1Ω y una alimentación de $15 V$ en los terminales (V_t).

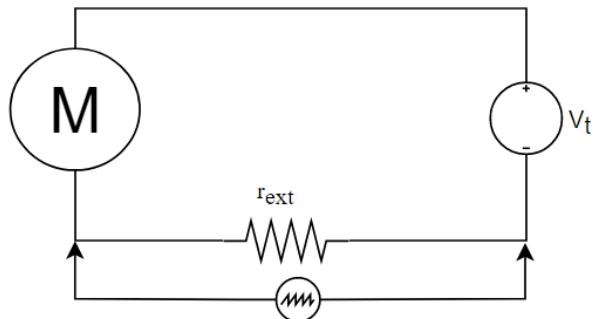


Figura 3.3 Prueba para determinar la constante de tiempo de armadura

Se debe configurar el osciloscopio para que realice el disparo en franco positivo a través del Chanel 1(punta de prueba conectada en la fuente DC) y guardar los datos medidos en Chanel 2(punta de prueba conectada en la resistencia externa), la referencia para ambas puntas de prueba será el lado negativo de la fuente DC. Los datos obtenidos pertenecerán al voltaje en la resistencia externa en función del tiempo, estos datos deben ser cargados en MATLAB y utilizar la herramienta “Curve Fitting Tool” para manipular la ecuación de voltaje de tal forma que se obtenga un transitorio de corriente (dividiendo el voltaje en la resistencia externa entre su resistencia) y desde allí despejar la constante de tiempo.

Otra forma de comprobar este parámetro es utilizando “Análisis de respuesta transitoria y estacionaria” de [14].

3.1.5 Constante de pérdidas de fricción

Para determinar este parámetro se aplicó lo indicado en [10], donde me indica que se debe realizar la conexión de la Figura 3.4.

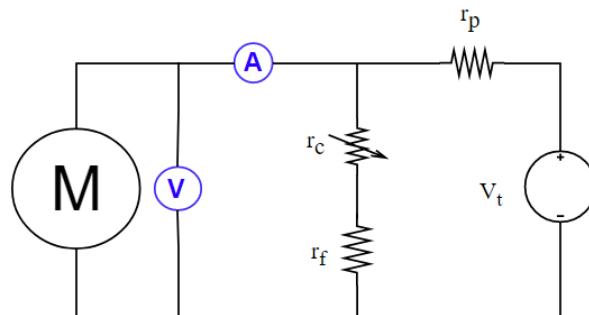


Figura 3.4 Conexión para determinar la constante de perdidas por fricción.

Como se observa en la Figura 3.4, la máquina de corriente continua está operando como motor “shunt” en vacío, donde se incluyen resistencias externas en los terminales del motor (r_p) y en el campo (r_c).

El reóstato r_p permite variar la tensión de armadura de la máquina y el reóstato de campo (r_c) tiene como fin controlar la corriente de campo y a su vez regular la velocidad de la máquina.

El procedimiento de la prueba experimental consiste en hacer operar a la máquina en tres velocidades diferentes y para cada velocidad obtener una gráfica de línea recta entre P_o y V^a , de tal forma que al final se obtenga tres rectas paralelas, así como se ilustra en la Figura 3.5.

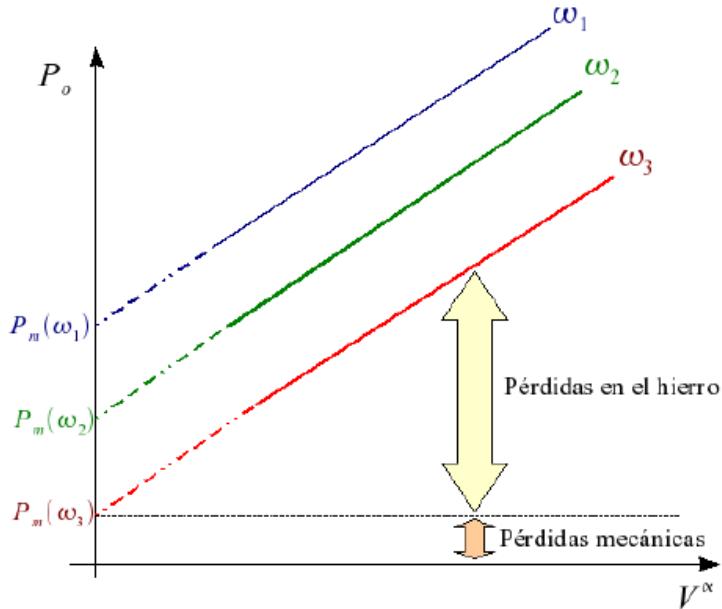


Figura 3.5 Pérdidas en vacío en función de la tensión de alimentación [10]

Como se observa en la Figura 3.5, el eje “Y” está representado por P_o (perdidas en vacío), este valor ya fue indicado en la parte de teoría de pérdidas de la máquina DC para poderlo calcular y luego graficar, además la intersección con el eje “Y” representa las pérdidas mecánicas para cada una de las velocidades de la máquina (ω).

Hay que tener en cuenta que, si se varía la resistencia r_p cambia el valor de la velocidad de la máquina, pero como se necesita realizar una línea recta para una velocidad constante, se puede volver a alcanzar el valor de la velocidad inicial ajustando el valor de la resistencia de campo (r_c), de tal forma que se mida los cambios existentes en el voltaje de armadura y en la corriente de armadura.

Una vez determinadas las pérdidas mecánicas existentes para cada una de las velocidades, se procede a realizar la curva entre pérdidas mecánicas (P_m) vs la velocidad angular al cuadrado (ω^2).

3.2 Parámetros de la máquina sincrónica

La máquina sincrónica TERCO MV1006 fue utilizada en proyectos integradores anteriores donde ya realizaron las pruebas respectivas para determinar los parámetros de la máquina, se decidió utilizar los parámetros determinados por [15] y que se muestran en la Tabla 3.1.

Parámetro	Variable	Valor	Unidades
Voltaje nominal LL estator	V_n	220	V
Corriente nominal estator	I_n	3.50	A
Resistencia de estator	R_s	1.1	Ω
Resistencia campo	R_f	131.4	Ω
Amortiguamiento	D	3.8120	p.u.
Reactancia de eje directo	x_d	0.7763	p.u.
Reactancia transitoria de eje directo	x'_d	0.2130	p.u.
Inductancia de campo	L_f	0.7500	p.u.
Inductancia mutua	L_{df}	0.6500	p.u.
Constante de tiempo de circuito abierto	T_{do}	0.0465	seg

Tabla 3.1 Parámetros de la máquina sincrónica [15]

3.3 Prueba de saturación magnética de la máquina de corriente continua.

Debido a que las máquinas de corriente continua se encuentran construidas con material ferromagnético, se realiza la prueba de saturación magnética a través de la obtención de la curva de vacío, la cual me permite identificar la zona de saturación del material ferromagnético. Esta curva se la puede obtener, ya sea operando a la máquina como generador o como motor. La prueba consiste en operar a la máquina sin carga a su velocidad nominal mientras se varía la corriente de campo (I_f) desde cero hasta el 125% del voltaje nominal. Para realizar esta prueba se debe realizar la conexión que se indica en la Figura 3.6.

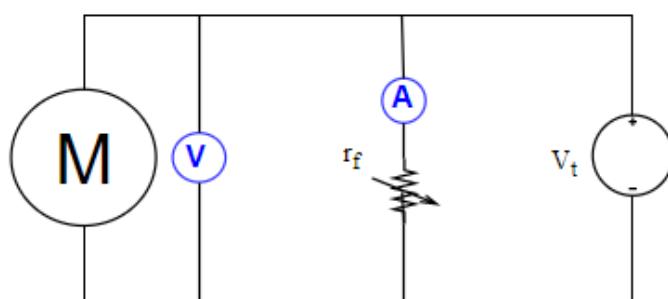


Figura 3.6 Esquemático de conexión para determinar curva de vacío.

La curva que se desea obtener debe mostrar la relación no lineal que existe entre el campo y la armadura de la máquina DC.

3.4 Modelo matemático de la máquina de corriente continua.

Para el análisis de un sistema de control es necesario entender los diagramas de bloques en el dominio del tiempo con sus respectivas ecuaciones de estados. Continuando con lo indicado en la teoría de la máquina de corriente continua, analizaremos a la máquina de corriente continua con conexión tipo “shunt”.

Los diagramas de bloques representan la interconexión de las ecuaciones del sistema, entonces las ecuaciones de voltaje de campo, armadura y la relación entre el torque con velocidad del rotor están dada por las ecuaciones (2.19), (2.20) y (2.22), para simplificar el modelo $L_{af}i_f$ se reemplaza por K_v , que es una constante determinada por la fuerza del imán, la resistencia del hierro y el entrehierro, y el número de vueltas del devanado del inducido. Asumiendo que K_v es una constante, entonces tenemos las siguientes ecuaciones

$$\frac{di_f}{dt} = -\frac{r_a}{L_a} i_a - \frac{K_v}{L_a} \omega_r + \frac{V_a}{L_a} \quad (3.1)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = -\frac{B_m}{J} \omega_r + \frac{K_v}{J} i_a - \frac{T_L}{J} \quad (3.2)$$

De acuerdo con las ecuaciones (2.24) y (2.25), se puede relacionar la velocidad del rotor de la máquina de corriente continua (la misma que será utilizada para mover el rotor del generador, debido a su acoplamiento) con el voltaje de armadura de la máquina de corriente continua o voltaje en los terminales, debido a que se encuentra el motor conectado en derivación. El diagrama de bloque se lo puede apreciar en la Figura 3.7.

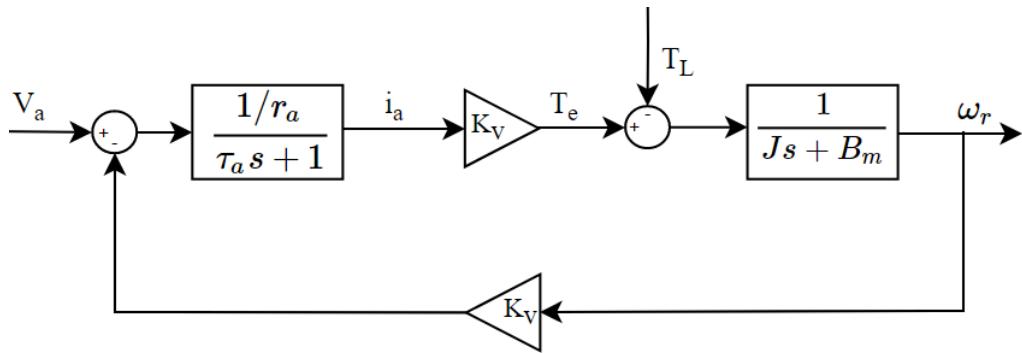


Figura 3.7 Diagrama de bloques que representa a la máquina DC

La figura 3.7 representa la planta de la máquina de corriente continua implementada en diagrama de bloques.

3.5 Control de velocidad

Debido a que se cuenta con el modelo matemático de la planta de la máquina de corriente continua se implementó un control “PI” para realizar el control de velocidad de la máquina y este controlador fue ajustado aplicando la herramienta de ajuste de “PID Tuner” que me otorga Matlab/SIMULINK y que se ilustra en la Figura 3.8.

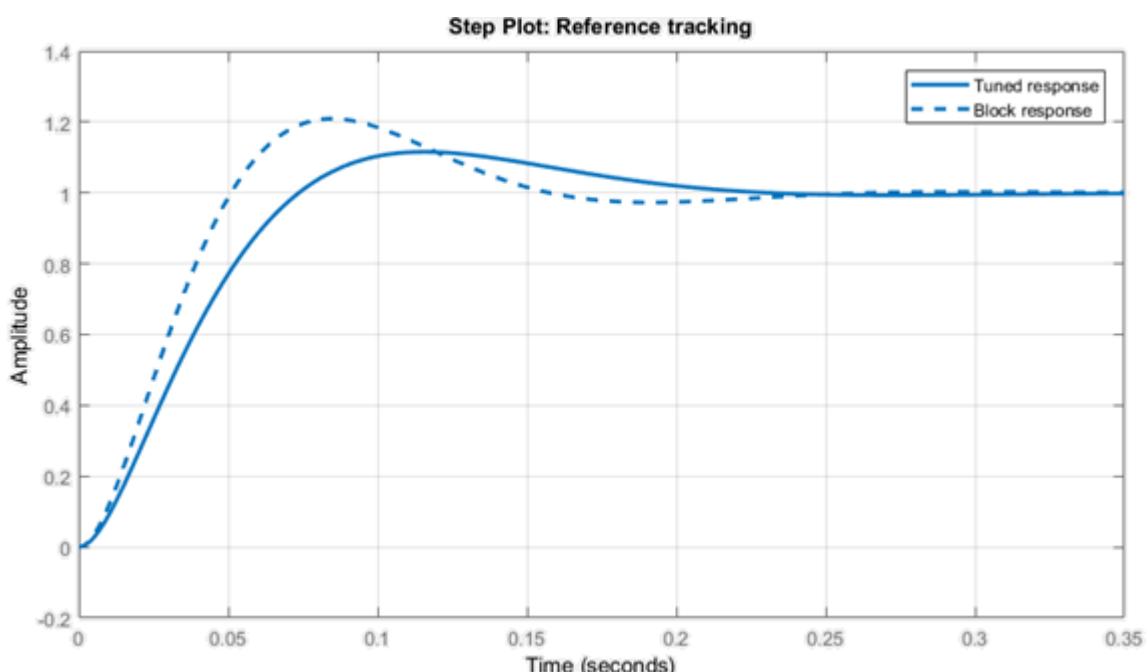


Figura 3.8 Sintonizador de PI

En la Figura 3.8 se observa la respuesta en el tiempo que tiene el PI para alcanzar el valor de referencia. Los valores obtenidos usando “PID Tuner” fueron de 2.01 y 76.65, para P e I respectivamente.

3.6 Control de voltaje

Para implementar este control se utilizó un control PI, el mismo que fue ajustado utilizando el toolbox “FRtool”, una vez identificada la planta a la cual se quiere aplicar el control, se procede a establecer las restricciones en el diagrama de Nyquist, hemos utilizado un %OS de 5%, un tiempo de estabilización de 0.1s y un $R_o=0.5$ en la Figura 3.9 obtenemos los siguientes resultados

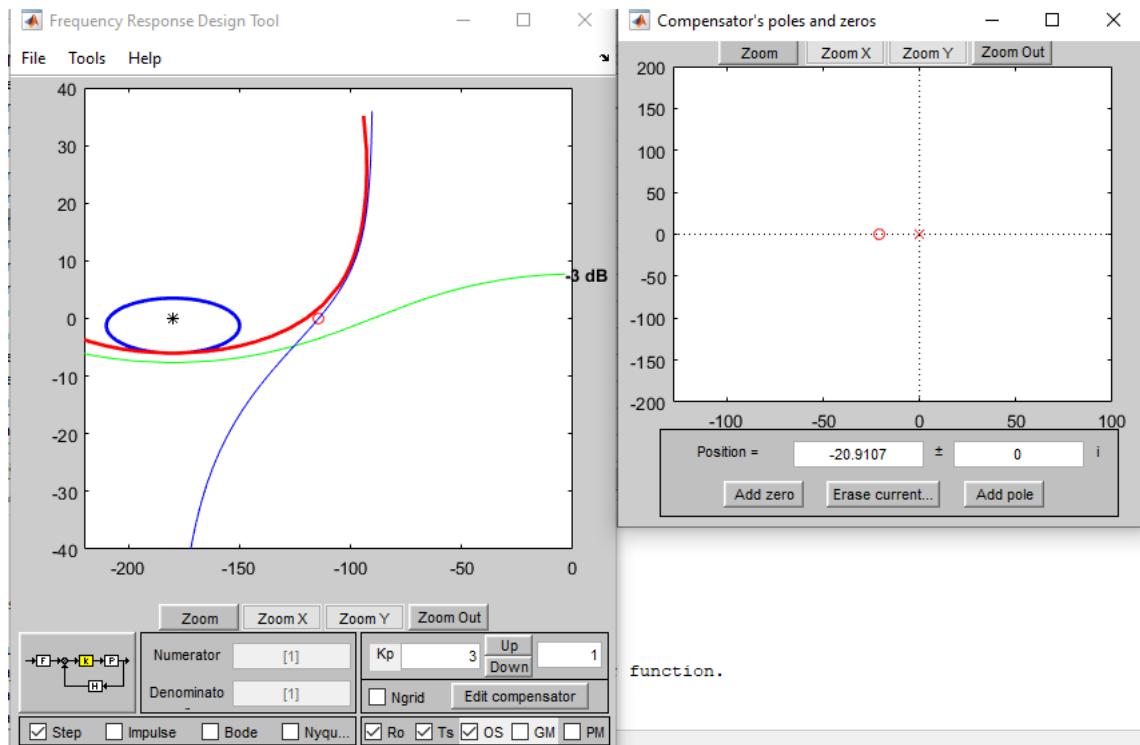


Figura 3.9 Implementación del controlador a través del diagrama de Nyquist [12]

Para el ajuste del controlador PI necesitamos un polo en el origen y un cero, entonces exportamos el controlador y tenemos que $P=3$ y $I=62.73$. en la Figura 3.10 podemos observar la respuesta del controlador cumpliendo nuestras restricciones de $\%OS < 5\%$ y el $T_s < 0.1s$.

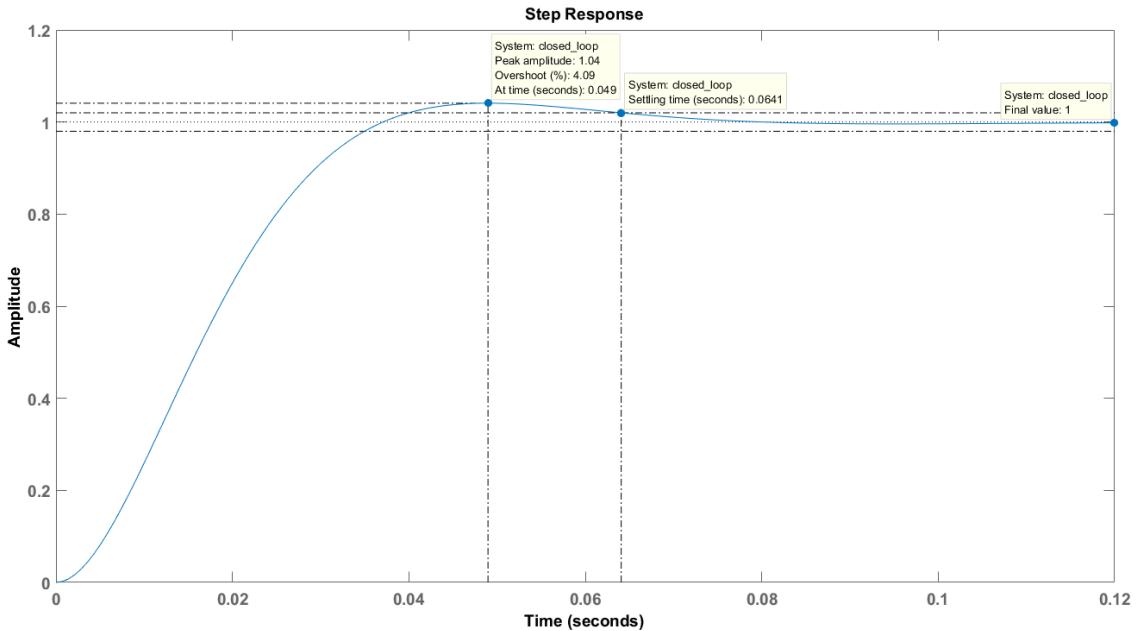


Figura 3.10 Respuesta del controlador ante un escalón.

3.7 Implementación del control de potencia activa

Para realizar este control se implementó lo indicado en el marco teórico sobre controlador “droop”, aplicando las ecuaciones (2.27) y (2.28) se obtuvieron los valores de 0.075 y 40 para T_g y R , respectivamente.

3.8 Implementación del control de potencia reactiva

Para realizar este control se implementó lo indicado en el marco teórico sobre controlador “droop”, aplicando las ecuaciones (2.29) y (2.30) se obtuvieron los valores de 0.15 y 20 para T_g y R , respectivamente.

3.9 Simulación en Tiempo Real

Para realizar la simulación en tiempo real se debe simplificar al sistema completo en 3 subsistemas, donde un subsistema tendrá los modelos de la máquina de corriente continua y de la máquina sincrónica, otro subsistema abarca todos los cálculos necesarios para la simulación y el ultimo subsistema es el de interfaz gráfica, donde se tiene a todas las salidas por pantalla, así como se observa en la Figura 3.11.

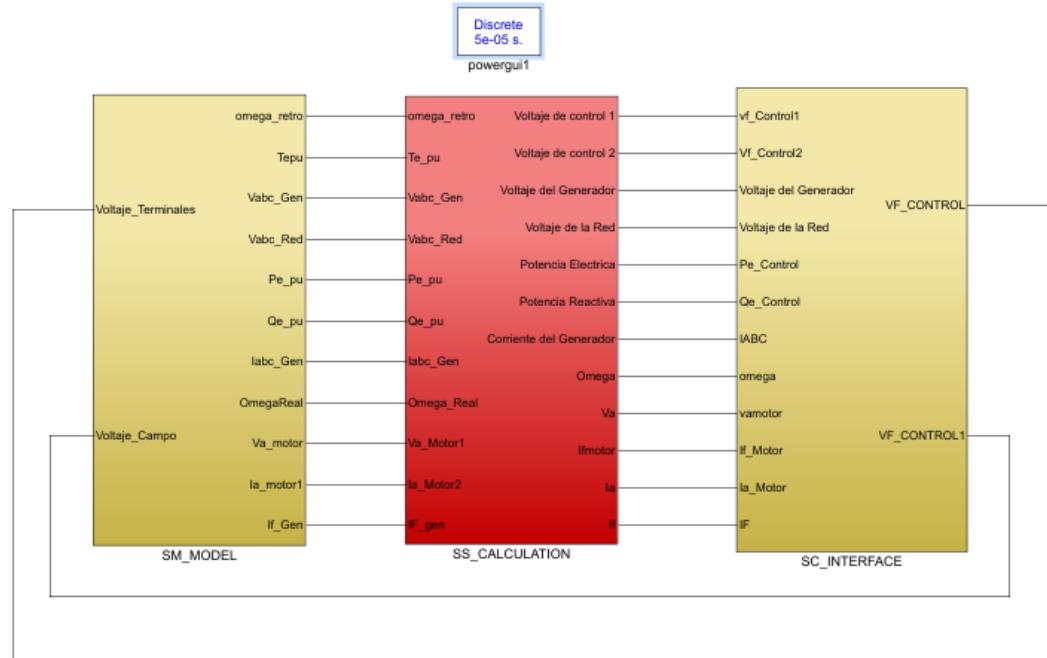


Figura 3.11 Subsistemas para la simulación en tiempo real

Para conectar los subsistemas se deben habilitar entradas y salidas que permitan interactuar a los subsistemas, estas señales utilizarán los bloques de OpComm independientemente tanto para salida como para entrada, estos bloques se encuentran disponibles en la librería RT-Lab de SIMULINK y se muestra un ejemplo en la Figura 3.12.

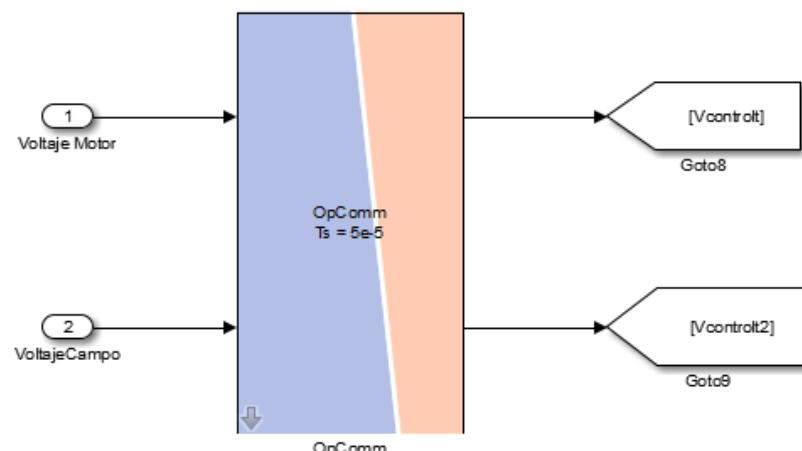


Figura 3.12 Bloque OpComm

Al bloque que se indica en la Figura 3.12 se le debe asignar un “sample time” para la simulación, el utilizado en nuestro proyecto fue de 50 μ s.

3.10 Implementación del Scada

Para realizar el Scada se usará el software de LabVIEW, el mismo que permite una programación gráfica y dinámica, para que pueda interactuar el usuario con el sistema y sus controladores. Para realizar la comunicación entre LabVIEW y RT-Lab se debe usar la librería de OPAL-RT disponible en LabVIEW, además de 2 archivos formato opal uno de “connections” y otro de “OPC_UA_Server_Config”. También en el archivo de RT-Lab se deben agregar los bloques de OpInput para que el usuario pueda ingresar datos o enviar ordenes desde LabVIEW y los bloques de OpOutput para leer datos desde RT-Lab y poderlos visualizar en los osciloscopios del Scada.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Parámetros de la Máquina de corriente continua obtenidos de los ensayos.

A continuación, se entregan los resultados de los parámetros de la máquina de corriente continua luego de realizar lo indicado en la metodología.

4.1.1 Resistencia de armadura

Los valores medidos de voltaje de armadura (E_a) y corriente de armadura (I_a) se muestran en la Tabla 4.1.

V_t (V)	I_a (A)	E_a (V)
5	0.29	0.23
10	0.34	0.46
15	0.40	0.69
20	0.46	0.89
30	0.56	1.34
40	0.67	1.76
50	0.77	2.22
60	0.88	2.67
70	0.98	3.10
80	1.08	3.53
90	1.19	3.95
100	1.30	4.37
110	1.41	4.79
120	1.51	5.22
130	1.61	5.65

Tabla 4.1 Valores medidos en la prueba de saturación magnética.

Con los valores de corriente de armadura y voltaje de armadura indicados en la Tabla 4.1 se realizó la curva con tendencia lineal que se muestra en la Figura 4.1.

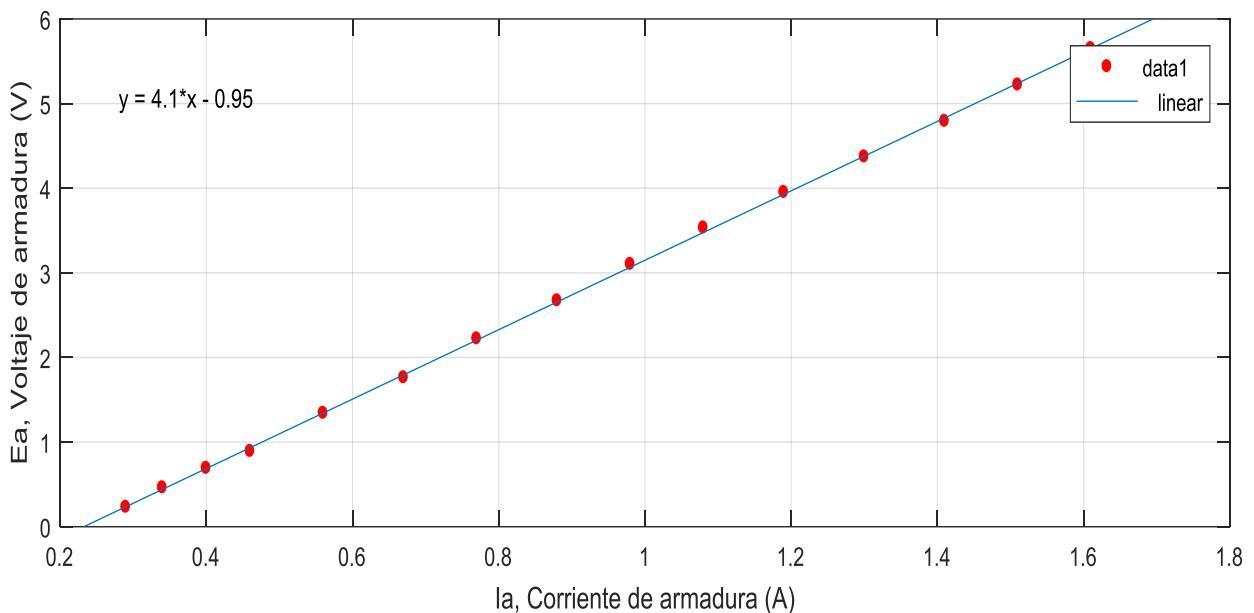


Figura 4.1 Curva de Resistencia de armadura

La ecuación que representa la curva de la Figura 4.1 fue determinada con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99, cuya pendiente es la resistencia de armadura de la máquina DC, siendo esta de 4.1Ω .

4.1.2 Resistencia de campo

El valor obtenido de la resistencia de campo es de 330Ω .

4.1.3 Inductancia de campo

La medición se la realizó con un medidor LCR-817 a una frecuencia de 1 kHz y el valor obtenido fue de 37.449 Henrios.

4.1.4 Constante de tiempo de armadura

El transitorio de corriente obtenido se observa en la Figura 4.2.

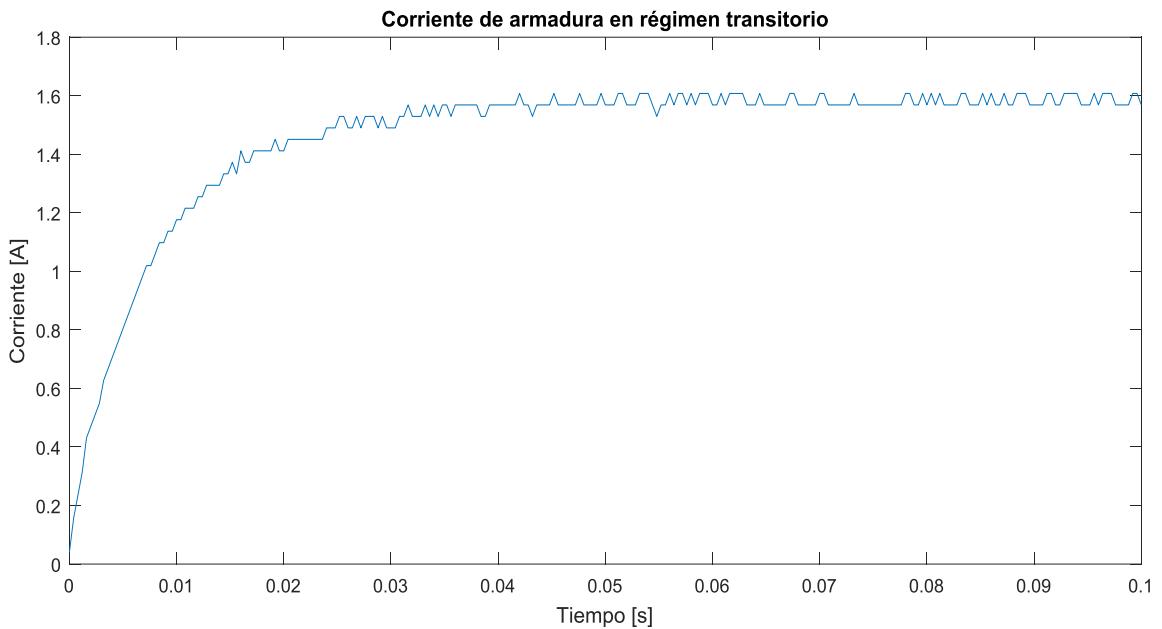


Figura 4.2 Transitorio de corriente de armadura.

Luego de manipular la ecuación del transitorio de corriente de armadura en “Curve Fitting Tool” se obtuvo como resultado una constante de tiempo de 0.0073s.

Comprobando con [14] me indica que una constante de tiempo (T) se la obtiene al 63.2% del escalón de entrada, en nuestro caso como la entrada es un escalón de 8 V, al 63.2% se obtiene como resultado 5.1 V. Revisando en nuestros datos, tenemos lecturas de 5 V y 5.2 V, por lo cual se realiza un promedio de los tiempos en que se obtuvo dichos valores, obteniendo como constante de tiempo un valor de 0.0072s.

Finalmente se decidió trabajar con la constante de tiempo de mayor valor.

4.1.5 Constante de pérdidas

Los datos obtenidos para una velocidad de 1733 RPM se muestran en la Tabla 4.2.

I_a (A)	I_f (A)	P_o (W)	V_a (V)
0.36	0.23	60.27	168.90
0.38	0.17	58.50	155.50
0.39	0.16	56.32	146.00
0.42	0.12	50.94	123.00
0.47	0.10	49.01	106.20
0.53	0.09	46.50	89.90

Tabla 4.2 Pérdidas en vacío y voltaje de armadura a una velocidad de 1733 RPM

Los datos obtenidos para una velocidad de 1600RPM se muestran en la Tabla 4.3.

I_a (A)	I_f (A)	P_o (W)	V_a (V)
0.35	0.20	51.65	149.00
0.36	0.18	50.23	141.00
0.37	0.16	47.80	130.70
0.38	0.14	45.12	120.30
0.41	0.11	43.02	106.60

Tabla 4.3 Pérdidas en vacío y voltaje de armadura a una velocidad de 1600 RPM.

Los datos obtenidos para una velocidad de 1500 RPM se muestran en la Tabla 4.4.

I_a (A)	I_f (A)	P_o (W)	V_a (V)
0.33	0.28	51.92	158.70
0.34	0.23	48.62	144.40
0.36	0.18	47.49	133.40
0.37	0.15	43.17	118.20
0.42	0.10	39.81	96.50

Tabla 4.4 Pérdidas en vacío y voltaje de armadura a una velocidad de 1500 RPM

A partir de los datos en las tablas anteriores se obtuvieron las pérdidas mecánicas.

Generalmente se elige $\alpha=2$

Las curvas se las realizaron usando la herramienta “Curve Fitting Tool” de MATLAB, ingresando como ecuación a:

$$y = a + bx^2$$

Donde:

a: intersección con el eje “y”

y: Pérdidas en vacío, P_o .

b: Pendiente de la curva.

x: Voltaje de armadura, V_a

La grafica para los datos de la Tabla 4.2, se muestra en la Figura 4.3.

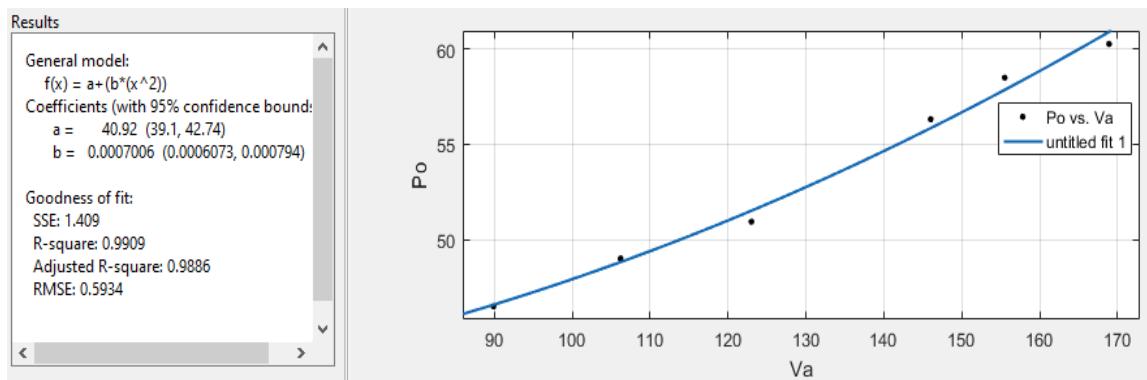


Figura 4.3 Curva P_o vs V_a , para una velocidad de 1733 RPM.

En la Figura 4.3 se observa que el valor de intersección es de 40.92, valor que representa a las perdidas mecánicas cuando se tiene una velocidad de 1733 RPM. La grafica para los datos de la Tabla 4.3, se muestra en la Figura 4.4.

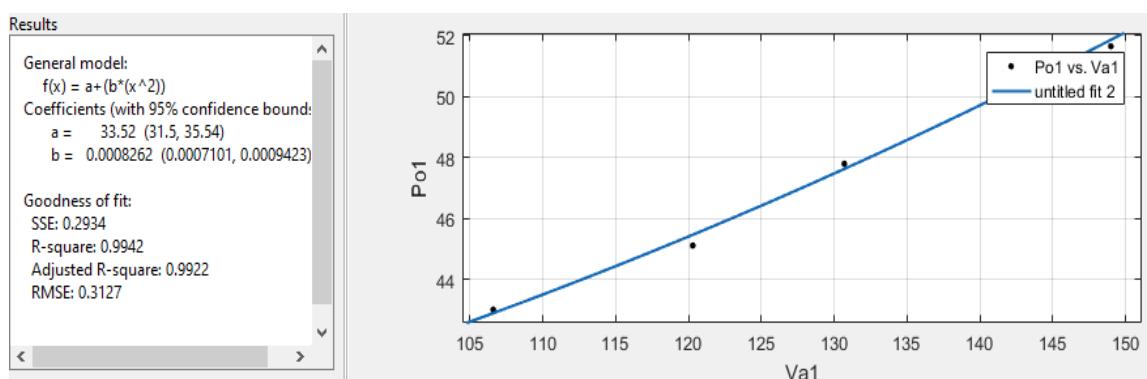


Figura 4.4 Curva P_o vs V_a , para una velocidad de 1600 RPM.

En la Figura 4.4 se observa que el valor de intersección es de 33.52, valor que representa a las perdidas mecánicas cuando se tiene una velocidad de 1600 RPM. La grafica para los datos de la Tabla 4.4, se muestra en la Figura 4.5.

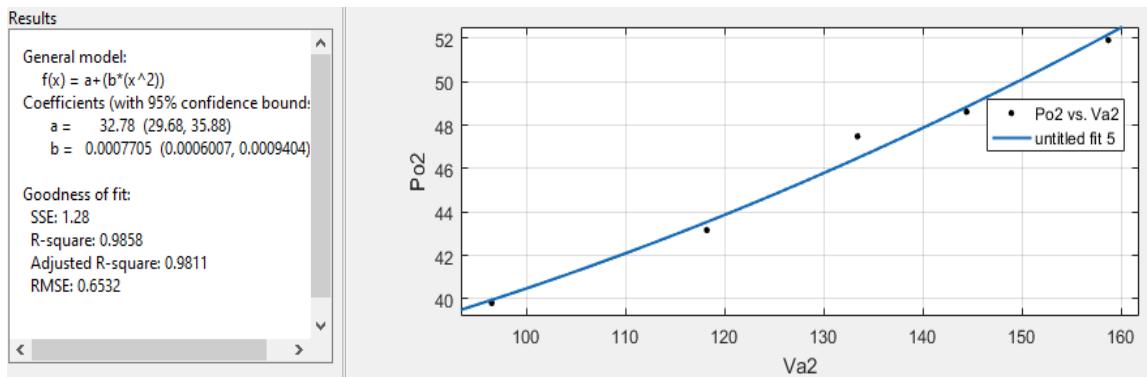


Figura 4.5 Curva P_o vs V_a , para una velocidad de 1500 RPM

En la Figura 4.5 se observa que el valor de intersección es de 32.78, valor que representa a las perdidas mecánicas cuando se tiene una velocidad de 1500 RPM.

Una vez obtenida la intersección para cada una de las curvas anteriores se realizó la curva entre pérdidas mecánicas (P_m) y velocidad rotacional al cuadrado (ω^2), la cual se muestra en la Figura 4.6.

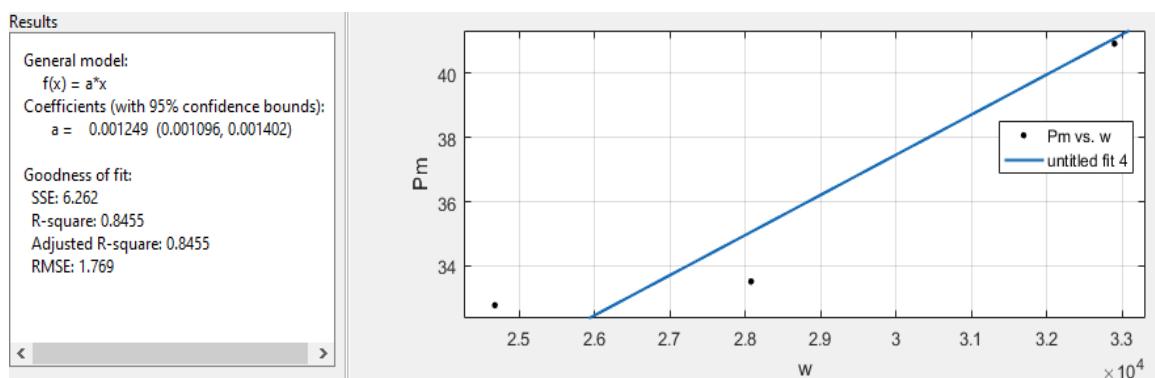


Figura 4.6 Curva para determinar la constante B_m .

La pendiente de la Figura 4.6, representa la constante de pérdidas (B_m), siendo esta de 0.001249 Nm.

4.1.6 Momento de Inercia

Para determinar este valor no se realizó pruebas experimentales, se usó el valor que me indica el fabricante en su página web [16] y se lo observa en la Figura 4.7.

General Data	MV1006-225	MV1006-226
Generator	1.2 kW 1400 rpm	1.2 kW 1700 rpm
Shunt motor	1.0 kW 1400 rpm	1.0 kW 1700 rpm
Series motor	1.0 kW 1150 rpm	1.0 kW 1400 rpm
Rotor	220 V 5.5 A	220 V 5.5 A
Excitation	220 V 0.55 A	220 V 0.55 A
The series winding has an extra terminal at 2/3 of the winding.		
Moment of inertia	$J = 0.012 \text{ kgm}^2$ (approx.)	
Dimensions	465 x 300 x 310 mm Shaft height 162 mm	
Weight	45 kg	

Figura 4.7 Valores de fábrica de la máquina de corriente continua [16]

Como se observa de la Figura 4.7, el momento de inercia de la máquina DC es de 0.012 Kg.m²

4.2 Curva de Saturación

Luego de realizar la prueba indicada en la metodología, los valores obtenidos fueron los indicados en la Tabla 4.5.

I_f (A)	E_a (V)
0.00	31.00
0.01	32.35
0.02	38.20
0.03	44.50
0.04	55.00
0.09	90.00
0.11	102.00
0.14	128.90
0.18	152.40
0.20	163.80
0.24	176.30
0.27	186.30
0.30	193.30
0.34	201.80
0.38	209.00
0.42	215.00
0.45	220.00
0.48	223.80
0.52	228.10
0.53	228.80
0.55	230.00

Tabla 4.5 Corriente de campo y voltaje de armadura de la máquina DC en vacío

Con los valores obtenidos en la Tabla 4.5, se realizó la curva de vacío, la misma que se muestra en la Figura 4.8.

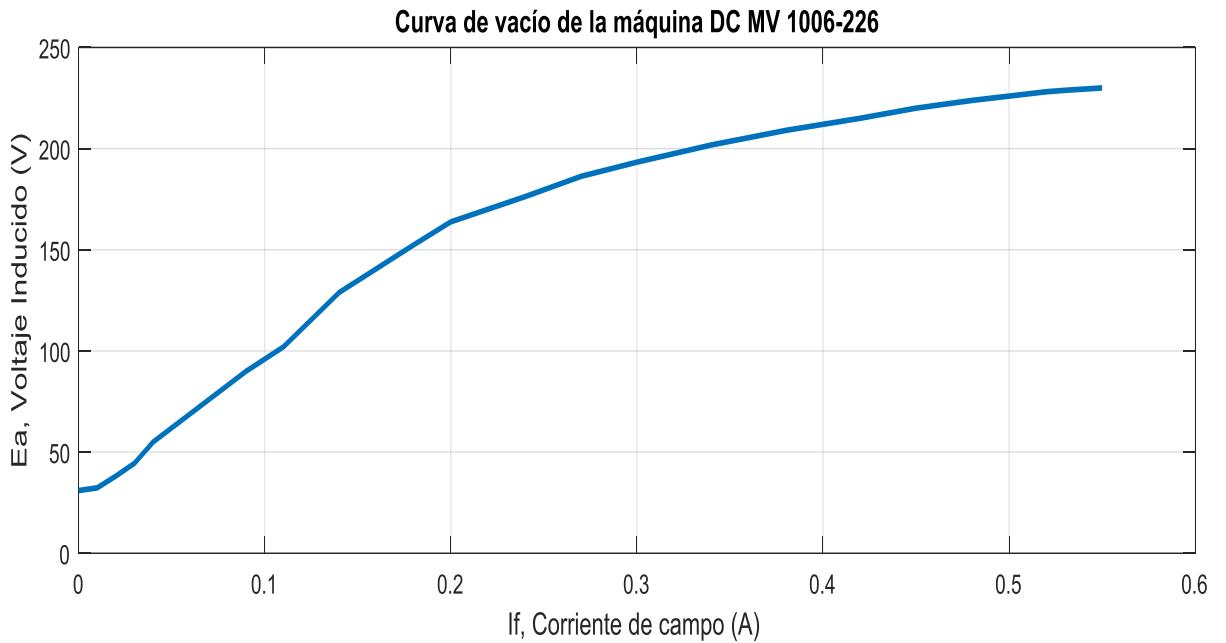


Figura 4.8 Curva de vacío de la máquina de corriente continua.

En la figura 4.8, si bien observamos al inicio, cuando no se tiene corriente de excitación (campo) ya existe un valor de voltaje inducido, a esto se le conoce como voltaje remanente, el cual se origina por el magnetismo remante que existe en los polos de la máquina [3]. Se observa además que la corriente de campo y el voltaje inducido presentan una relación no lineal. La máquina comienza a saturarse cuando se tiene 0.5 A en la excitación.

4.3 Resultados de la simulación off-line.

Luego de realizar la simulación off-line, se obtuvieron los resultados mediante gráficas para cada uno de los controladores implementados.

4.3.1 Control de velocidad

Para el control de velocidad se obtuvo como resultado lo ilustrado en la Figura 4.9.

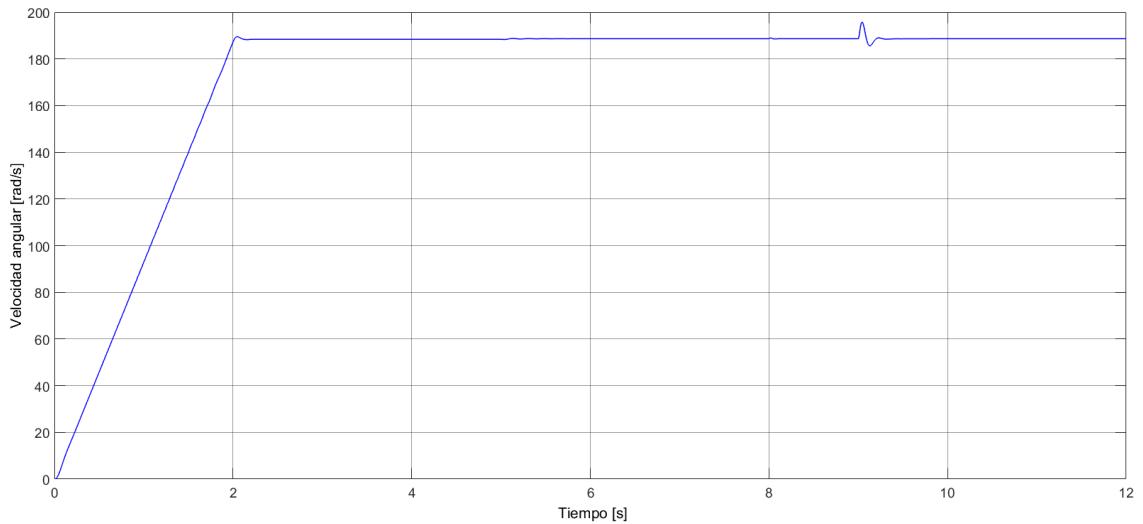


Figura 4.9 Control de velocidad de la máquina DC

En la Figura 4.9 podemos observar el comportamiento de la velocidad durante la simulación, en el cual le toma 2s en llegar al valor de referencia, en este caso 188.5 rad/s, el proceso de sincronización comienza a los 5s, a los 8s se cierra el interruptor para conectarse a la red y a los 9s comienza a entregar potencia activa.

4.3.2 Control de voltaje

Para el control de voltaje se obtuvo como resultado lo ilustrado en la Figura 4.10.

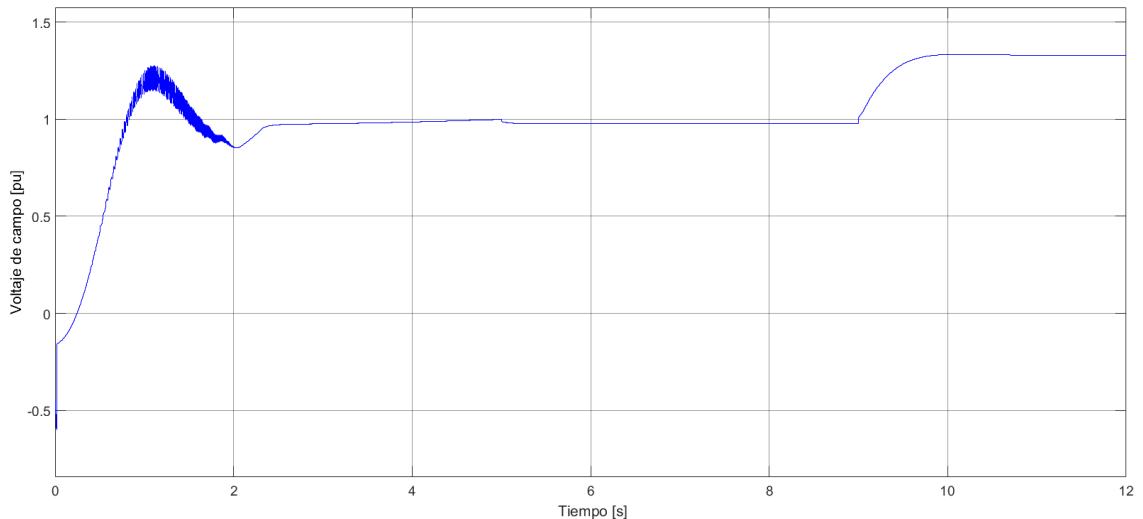


Figura 4.10 Control de voltaje de la máquina sincrónica

En la Figura 4.10 podemos observar el comportamiento del voltaje de campo durante la simulación en el cual le toma 4s en llegar al valor de referencia en este

caso 1 pu, el proceso de sincronización comienza a los 5s, a los 8s se cierra el interruptor para conectarse a la red y a los 9s el generador sincrónico comienza a entregar potencia Reactiva, es por eso que el voltaje de campo debe elevarse para poder entregar potencia reactiva.

4.3.3 Control de potencia activa

Para el control de potencia activa se obtuvo como resultado lo ilustrado en la Figura 4.11.

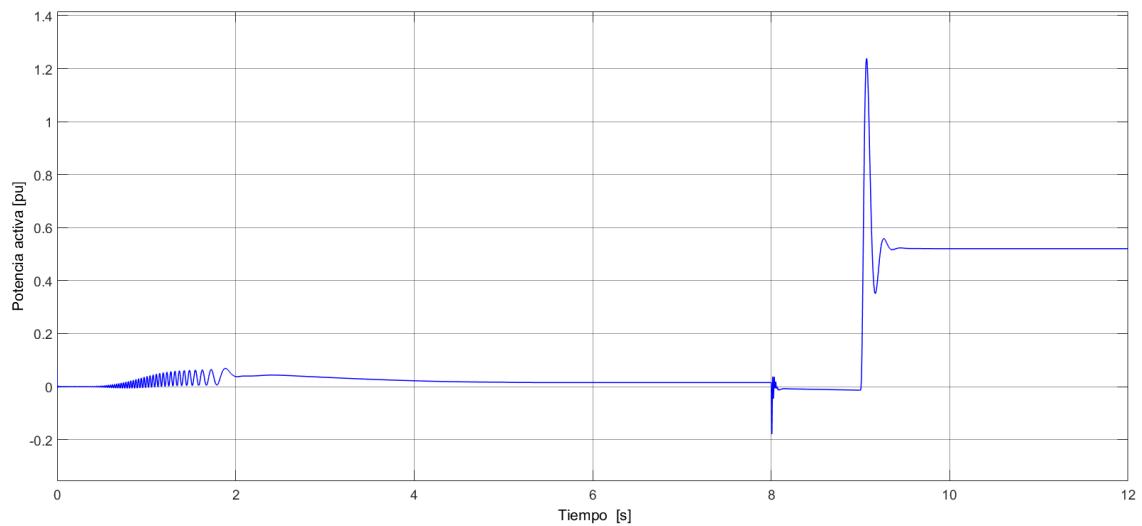


Figura 4.11 Control de Potencia Activa de la máquina síncrona.

En la Figura 4.11 podemos observar el comportamiento del control de potencia activa una vez sincronizado el generador con la red, a los 9s comienza a entregar potencia activa, aproximadamente 0.5 pu.

4.3.4 Control de potencia reactiva

Para el control de potencia reactiva se obtuvo como resultado lo ilustrado en la Figura 4.12.

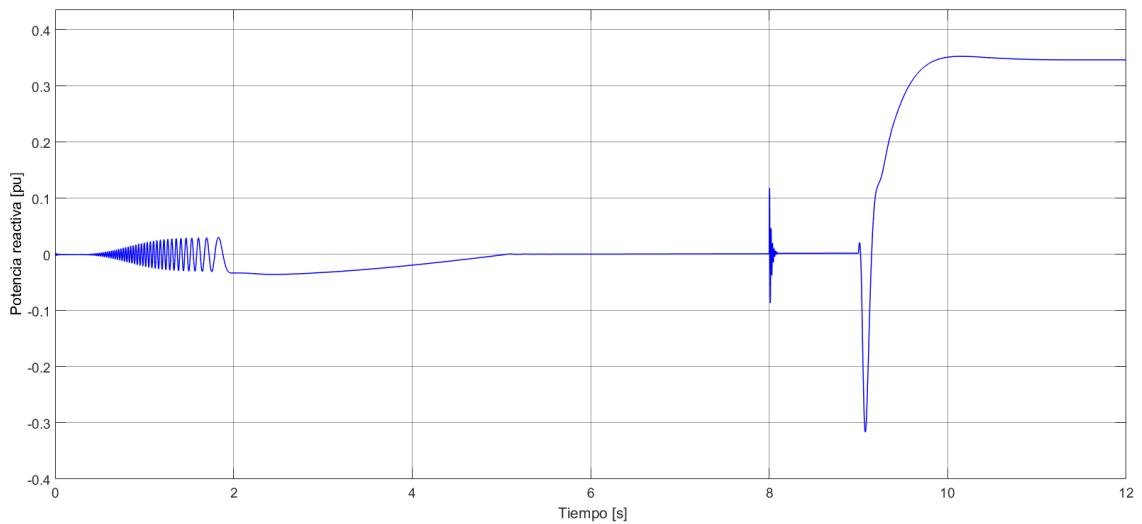


Figura 4.12 Control de Potencia Reactiva de la máquina síncrona.

En la Figura 4.12 podemos observar el comportamiento del control de potencia Reactiva una vez sincronizado el generador con la red, a los 9s comienza a entregar potencia reactiva, aproximadamente 0.35 pu.

4.4 Implementación del Scada

En la Figura 4.13 se observa el Scada con el cual el usuario puede interactuar con el proyecto implementado.

Se observa a nivel de la máquina de corriente continua los datos de corriente de armadura, corriente de campo, velocidad del rotor y voltaje en los terminales, este último parámetro tiene un indicador de alerta, el mismo que se activa cuando se supera el 1.05 del voltaje nominal.

En la máquina sincrónica se observa los voltajes de línea, corriente de línea, voltaje de campo, corriente de campo, frecuencia, potencia activa y potencia reactiva.

En la barra infinita se observan los voltajes de línea y la frecuencia del sistema.

Para el proceso de sincronización se observa un interruptor manual que permite realizar el proceso de pre-sincronización, además se tienen las 3 condiciones que se deben cumplir antes de sincronizar con la red y cuyos límites se especificaron en el marco teórico, una vez que se cumplen las 3 condiciones se encienden las 3 luces piloto, luego se habilita otro interruptor manual para finalmente conectarse a la red.

Una vez conectado a la red se puede operar el panel de consigna de potencias, donde se puede suministrar potencia activa hasta 960 W y en potencia reactiva se puede tanto consumir como suministrar hasta 720 var. Además, se muestra el factor de potencia al cual está operando la máquina sincrónica.

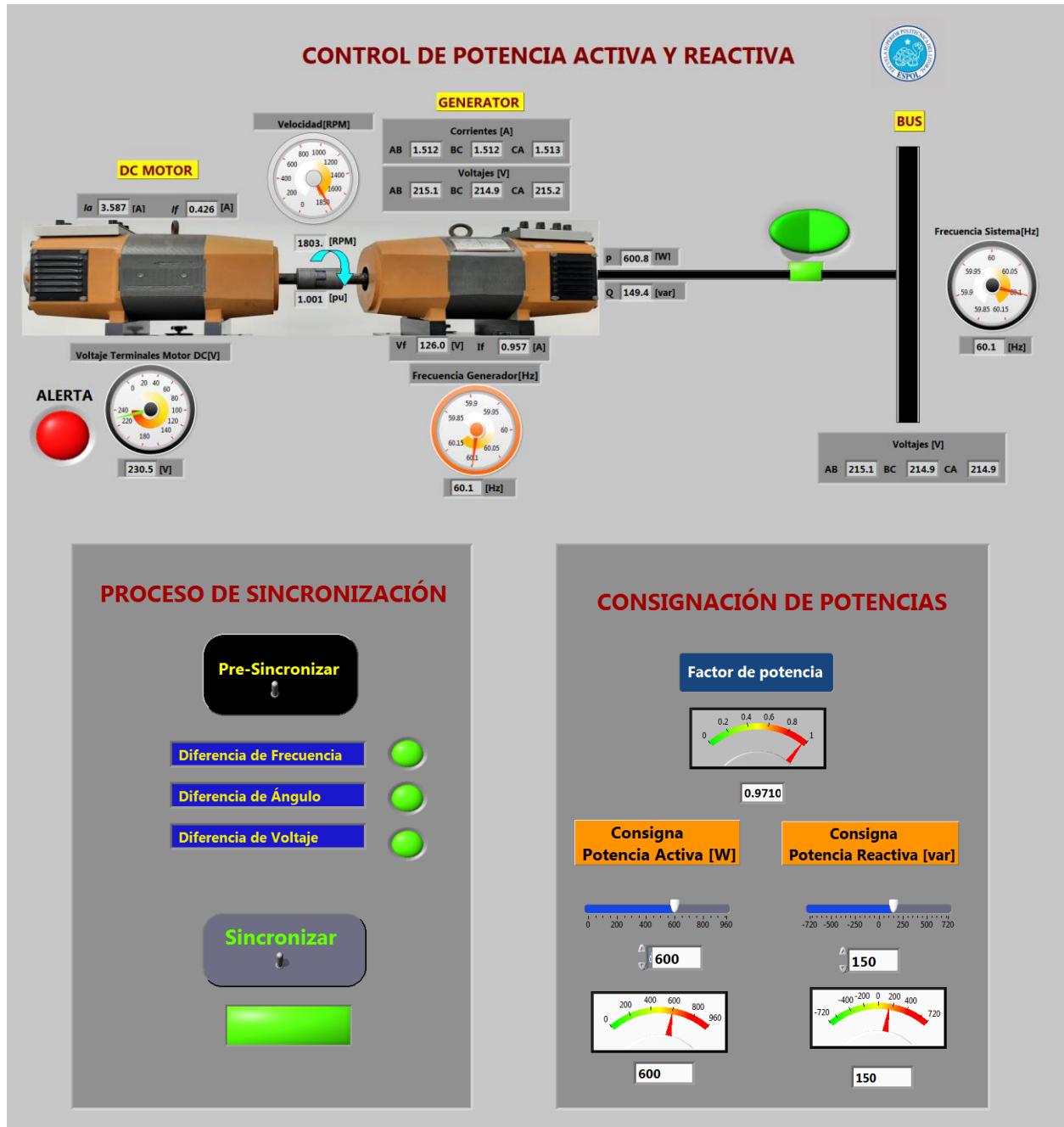


Figura 4.13 Scada para el control de potencia activa y reactiva del generador.

4.5 Resultados de la simulación en tiempo real.

4.5.1 Prueba 1

Para un ingreso de potencia activa de 450 W y de potencia reactiva de 250 var, así como se muestra en la Figura 4.14.

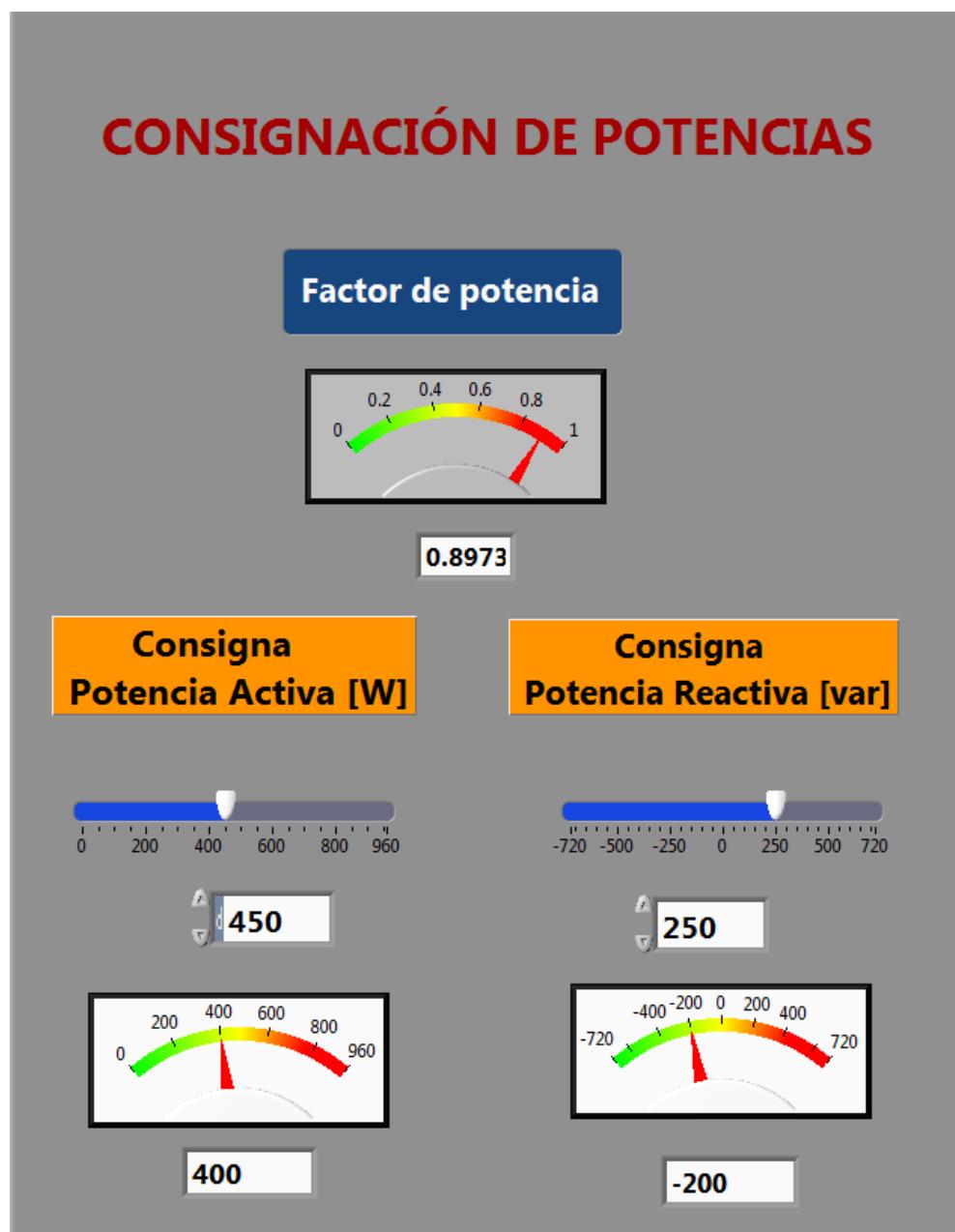


Figura 4.14 Ingreso de valores para P y Q.

Se obtuvieron los resultados mostrados en las Figura 4.15 y 4.16.

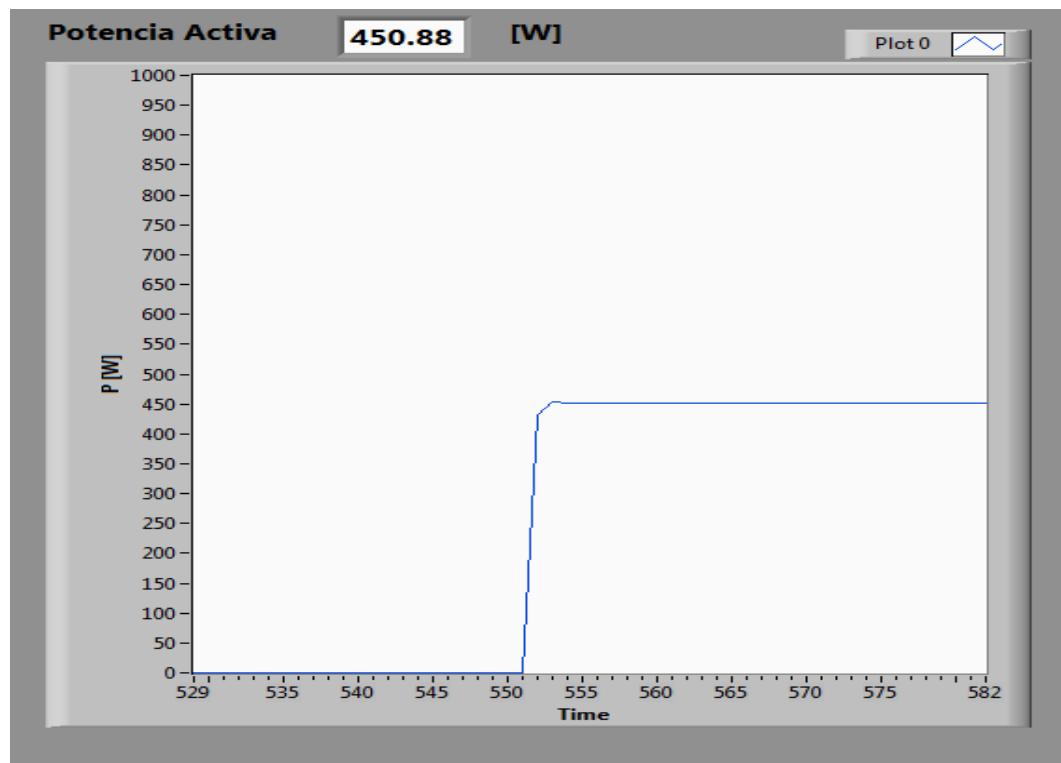


Figura 4.15 Potencia activa entregada a la red.

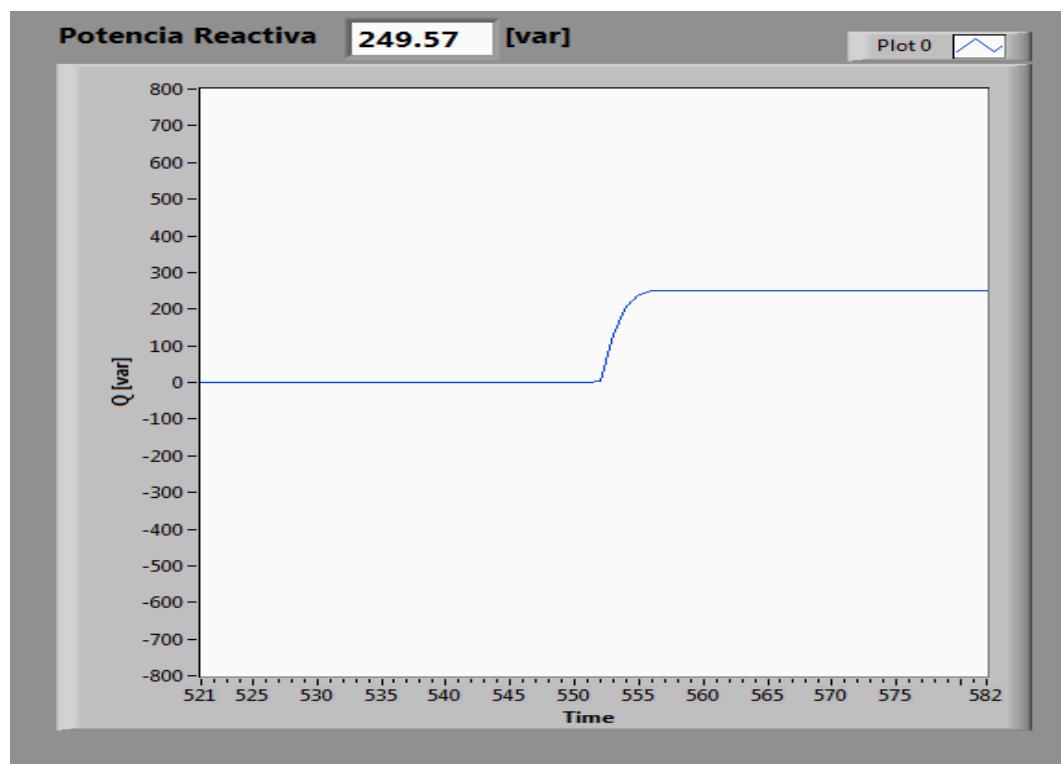


Figura 4.16 Potencia reactiva suministrada a la red.

4.5.2 Prueba 2

Para un ingreso de potencia activa de 400 W y un ingreso de potencia reactiva de -200 var, así como se muestra en la Figura 4.17.

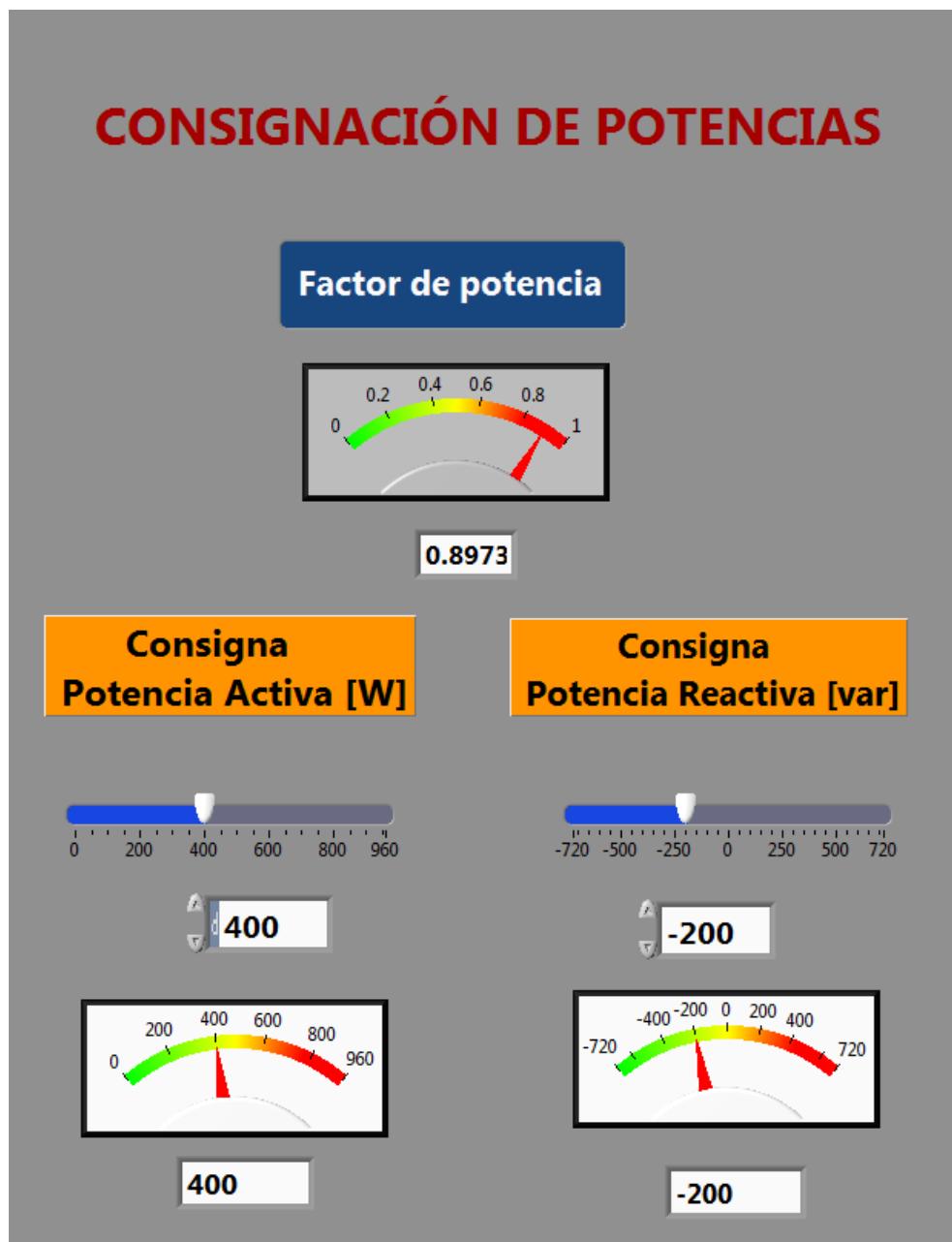


Figura 4.17 Valores de P y Q ingresados por el operador.

Se obtuvieron los siguientes valores en los bornes del generador, que se ilustran en la Figuras 4.18 y 4.19.

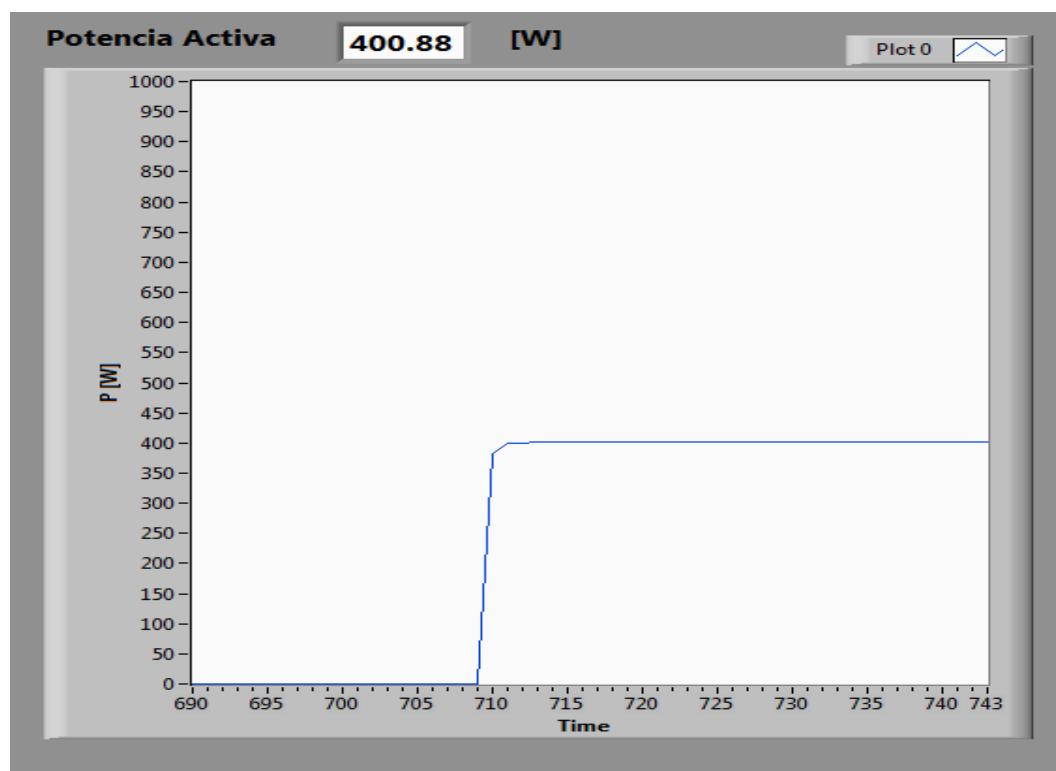


Figura 4.18 Potencia activa suministrada a la red.

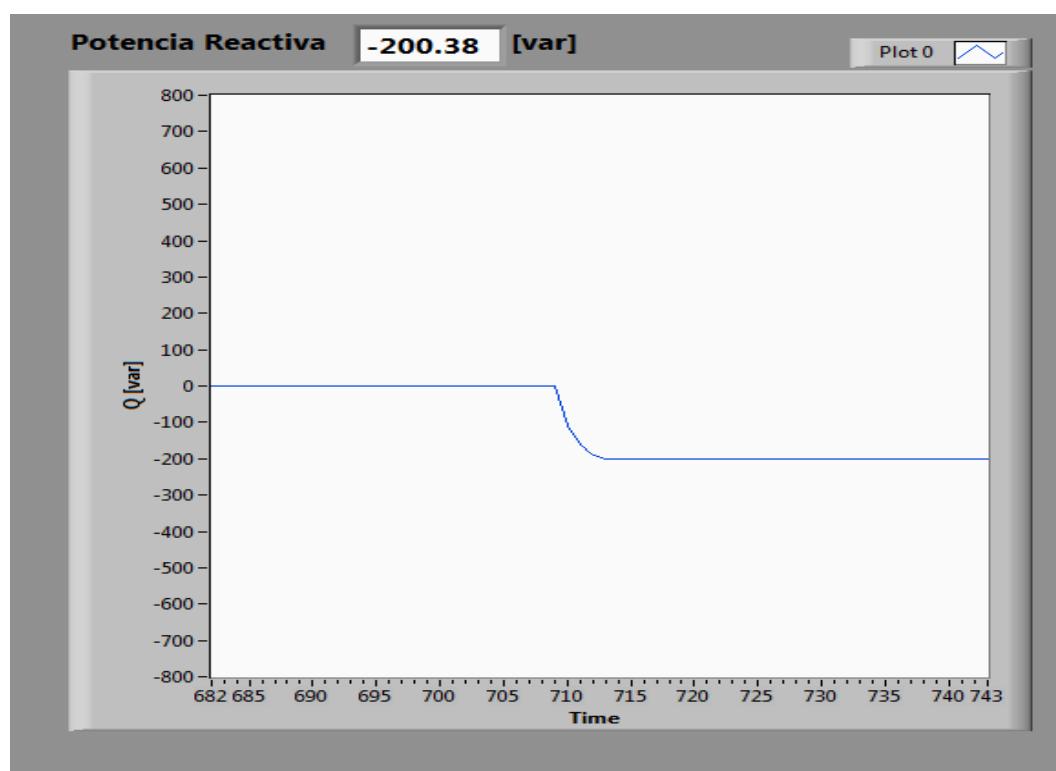


Figura 4.19 Consumo de potencia reactiva.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se implementó el control de potencia activa y reactiva del generador sincrónico conectado a la red en tiempo real, usando controladores “droop” y la técnica Software in the Loop en el OPAL-RT, logrando controlar la potencia activa y reactiva que se suministra a la red. En la simulación en tiempo real se entregó potencia activa y reactiva con un error máximo de 1.77% y 0.25% respectivamente. Las técnicas experimentales que se usaron para conseguir los parámetros de la máquina DC fueron efectivas, permitiendo que el modelo de la máquina DC tenga resultados similares a los reales. En la simulación off-line se obtuvieron los valores de velocidad, voltaje en los terminales, potencia activa y potencia reactiva, con un error menor al 1%. La función de sincronización implementada permite que el generador se sincronice con la red antes de los 5s. Los errores que se presentan de potencia activa son motivo de la utilización de una impedancia de gran valor a la salida de los terminales del generador, puesto que MATLAB no permite operar al generador en vacío, es decir, es un error de simulación de MATLAB/SIMULINK. Los errores que se presentan a nivel de potencia reactiva son muy bajos debido a que la impedancia que se está utilizando en bornes del generador es puramente resistiva.

Se recomienda que antes de realizar la simulación en tiempo real todas las funciones de transferencia y controladores se encuentren en tiempo discreto. Al usar los bloques de OplInput y OpOutput, se debe tener en cuenta el nombre de la variable a la cual representa, pues este mismo nombre debe ser ingresado en los archivos que permiten la intercomunicación entre RT-Lab y LabVIEW. Cuando se tiene un sistema con múltiples controladores, se recomienda ir probando en tiempo real desde el primer controlador implementado, caso contrario será muy difícil de encontrar algún error en el sistema. A futuro se puede implementar el control de potencia activa y reactiva usando la planta física, es decir usando la técnica Hardware in the Loop.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] TECHNOLOGIES, OPAL-RT, «Real-Time HIL/RCP Laboratory».
- [2] J. M. Aller, Máquinas eléctricas rotativas: Introducción a la Teoría General, EQUINOCCIO, 2008.
- [3] J. F. Mora, Máquinas Eléctricas, Quinta ed., Madrid: McGraw-Hill, Inc., 2003.
- [4] P. Kundur, Power System Stability And Control, Mc Graw Hil, Inc., 1994.
- [5] R. H. Park, «Two Reaction Theory of Synchronous Machines,» *Transactions A.I.E.E*, vol. 48, pp. 716-727, 1929.
- [6] IEEE Std 1110, «Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses,» pp. 5 - 8, 2002.
- [7] IEEE Std C37.102, «Guide for AC Generator Protection,» 2006.
- [8] S. Chapman, Máquinas eléctricas, Quinta ed., Mc Graw Hill, 2012.
- [9] P. Krause, O. Wasynczuk, S. Sudhoff y S. Pekarek, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, Third ed., John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
- [10] F. Tiberio, Pruebas sobre Máquinas Eléctricas, Primera ed., Vicens-Vives, 1965.
- [11] C. Wu, H. Liao y Z. Yang, «Voltage and frequency control of inverters connected in parallel forming a micro-grid,» 2010.
- [12] R. De Keyser y C. Ionescu, «FRtool: A Frequency Response Tool for CACSD in Matlab,» de *Computer Aided Control Systems Design*, Munich, 2006.
- [13] IEEE Std 113, «Test Procedures for Direct-Current Machines,» 1985.
- [14] K. Ogata, INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA, Quinta ed., Madrid: PEARSON EDUCATION, 2010.
- [15] F. Torres y E. Aimacaña, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DE UN GENERADOR SÍNCRONO UTILIZANDO LA TÉCNICA HARDWARE IN THE LOOP,» 2019.
- [16] TERCO, «tercosweden,» [En línea]. Available: <https://www.tercosweden.com/product/1393/>. [Último acceso: 12 Junio 2019].

ANEXOS

Script implementado en MATLAB para desarrollar el proyecto

```
%PARÁMETROS DE LA MÁQUINA DC
Va=220; %voltaje nominal de la máquina DC unidades Voltios [V].
Ra=4.1; %Resistencia de armadura de la máquina DC unidades Ohmios [Ohm].
ta=0.0073; %Constante de tiempo de la máquina DC
rf=330; %Resistencia de campo de la máquina DC unidades Ohmios [Ohm].
rfext=211; %Resistencia externa de campo de la máquina DC unidades Ohmios [Ohm].
Rf=rf+rfext; %Resistencia total de campo de la máquina DC unidades Ohmios [Ohm].
Lf=37.449; %Inductancia de campo de la máquina DC unidades Henrios [H].
If=Va/Rf; %Corriente de Campo de la máquina DC unidades Amperios [A].
Laf=2.8115; %Inductancia mutua de la máquina DC unidades Henrios [H].
Bm=0.001249*2; %Coeficiente de fricción de la máquina DC unidades [Nms].
Jm=0.012*2; %Constante de inercia del rotor de la máquina DC unidades [Kgm^2].
Kv=Laf*If; %Constante.
%%Datos de la máquina sincrónica
f=60; %Frecuencia nominal
p=4; %Número de polos
V_base=220;%voltaje en terminales base
S_base=1200;%potencia nominal en[VA]
w_e=2*pi*f; % velocidad eléctrica
wm=w_e*(2/p); %velocidad mecánica
Te_base= S_base/wm %Torque electromagnético base en [Nm]
```