

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

REPOTENCIACIÓN, MODELADO E IMPLEMENTACIÓN DE
CONTROL DIGITAL EN LA PLANTA DE GENERACIÓN
ELÉCTRICA FIEC-ESPOL.

INGE-2988

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

Presentado por

Reynolds Andrés Arteaga Pino

Gonzalo Fabrizio Vélez Olivo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Reynolds Arteaga y Cecilia Pino, por su amor incondicional, su sacrificio y por ser el pilar fundamental de mi formación personal y académica.

A mi hermana María Cecilia y a mis abuelos, Winston Arteaga y Mariana Andrade, por su apoyo constante, su confianza y su compañía en cada etapa de mi vida.

A mi familia, y de manera especial, dedico este logro a mis seres queridos que han partido, mis ángeles en el cielo, quienes siempre me bendicen, me cuidan y me guían desde lo alto. Su recuerdo vive en mí y ha sido una fuente permanente de fortaleza y motivación.

Reynolds Arteaga

Dedico este trabajo a mi familia, por ser el soporte constante que me acompañó a lo largo de mi formación y por sostenerme, con su presencia y confianza, en cada etapa de este camino.

A mis padres, Juana Olivo y Ernesto Vélez, por su ejemplo de responsabilidad, constancia y perseverancia. Su esfuerzo y su manera de enseñarme a enfrentar los retos con determinación han sido fundamentales para mi crecimiento personal y académico. Todo lo que soy y lo que aspiro a ser se construye, en gran parte, sobre los valores que me han transmitido.

Gonzalo Vélez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por acompañarme y bendecirme en cada etapa de este proceso académico.

Expreso mi profundo agradecimiento a mis padres, Reynolds Arteaga y Cecilia Pino, por su confianza, apoyo constante y sacrificio; sin ustedes, este logro no habría sido posible. A mi hermana María Cecilia y a mis abuelos, Winston Arteaga y Mariana Andrade, por su apoyo incondicional y por estar siempre presentes a lo largo de mi formación personal y profesional. A Maholly Álava por su apoyo emocional en el transcurso de este proyecto de titulación.

De manera especial agradezco a mi compañero de tesis, Gonzalo Vélez, por su colaboración y su compromiso en todo este proceso de formación académica.

A los ingenieros Efrén Herrera, Adriana Aguirre y Carlos Salazar por compartir sus conocimientos en este periodo de titulación.

Reynolds Arteaga

Agradezco a Dios por acompañarme y brindarme fortaleza durante todo este proceso académico.

Expreso mi profundo agradecimiento a mis padres, Juana Olivo y Ernesto Vélez, por su apoyo constante, su paciencia y el impulso permanente para seguir adelante. Su confianza fue determinante para culminar esta etapa. A mis hermanos, María Vélez, Stephanie Vélez, Cindy Vélez y Joseph Vélez, por su apoyo y por estar presentes a lo largo de mi formación personal y profesional.

De manera especial, agradezco a mi compañero de tesis, Andrés Arteaga, por el trabajo en equipo, la colaboración y el compromiso demostrado durante el desarrollo de este proyecto. Su aporte fue fundamental para alcanzar los objetivos planteados.

Finalmente, agradezco a todas las personas que directa o indirectamente brindaron apoyo durante la ejecución de este proyecto de titulación.

A los ingenieros Efren Herrera, Adriana Aguirre y Carlos Salazar por compartir sus conocimientos en este periodo de titulación.

Gonzalo Vélez

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Reynolds Andrés Arteaga Pino* y *Gonzalo Fabrizzio Vélez Olivo* 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”



Reynolds Arteaga



Gonzalo Vélez

EVALUADORES

Ph.D. Efrén Herrera

PROFESOR DE LA MATERIA

Ph.D. Carlos Salazar

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente trabajo de titulación aborda la reactivación funcional y la modernización tecnológica de la planta de generación eléctrica del Laboratorio de Sistemas de Control de la FIEC-ESPOL, la cual carecía de operatividad y documentación actualizada. Este proyecto tiene como objetivo principal transformar dicho activo en una plataforma experimental robusta para la docencia, bajo la premisa de que una arquitectura de control distribuido facilita la validación de algoritmos complejos; su justificación radica en la necesidad de dotar a los estudiantes de herramientas prácticas para la investigación aplicada. Metodológicamente, se ejecutó un diagnóstico exhaustivo que derivó en la reparación de la red PROFIBUS y el acondicionamiento del hardware industrial, incluyendo un PLC Siemens S7-300 y periferia ET200S; asimismo, se implementó el estándar de comunicación OPC para establecer un enlace en tiempo real con el entorno MATLAB/Simulink y se diseñaron controladores PID basados en un modelo matemático de caja gris identificado experimentalmente. Como resultado, se logró restablecer la comunicación industrial y se validó la capacidad del sistema para regular con precisión el voltaje y la frecuencia ante perturbaciones de carga, evidenciando un desempeño dinámico estable y confiable. Finalmente, se concluye que la plataforma desarrollada constituye una herramienta académica versátil que reduce la brecha entre la simulación y la implementación industrial, permitiendo la ejecución segura de prácticas de control automático avanzado.

Palabras Clave: Planta de Generación, Control en Tiempo Real, Identificación de Sistemas, OPC, PLC Siemens S7-300.

ABSTRACT

This degree work addresses the functional reactivation and technological modernization of the electric power generation plant at the FIEC-ESPOL Control Laboratory, which lacked operability and updated documentation. The main objective of this project is to transform said asset into a robust experimental platform for teaching, based on the premise that a distributed control architecture facilitates the validation of complex algorithms; its justification lies in the need to provide students with practical tools for applied research. Methodologically, an exhaustive diagnosis was executed which led to the repair of the PROFIBUS network and the conditioning of the industrial hardware, including a Siemens S7-300 PLC and ET200S peripherals; likewise, the OPC communication standard was implemented to establish a real-time link with the MATLAB/Simulink environment, and PID controllers were designed based on an experimentally identified gray-box mathematical model. As a result, industrial communication was restored, and the system's ability to precisely regulate voltage and frequency against load disturbances was validated, evidencing stable and reliable dynamic performance. Finally, it is concluded that the developed platform constitutes a versatile academic tool that reduces the gap between simulation and industrial implementation, allowing the safe execution of advanced automatic control practices.

Keywords: *Power Generation Plant, Real-Time Control, System Identification, OPC, Siemens S7-300 PLC.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Planta de Generación Eléctrica a Escala	4
1.4.2 Sistemas de Automatización e Instrumentación Industrial.....	8
1.4.3 Comunicación Industrial.....	13
1.4.4 Modelado e Identificación de Sistemas Dinámicos.....	14
1.4.5 Controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo)	17
CAPÍTULO 2	21
2. Metodología	21
2.1 Descripción general del enfoque metodológico	21
2.2 Análisis de Alternativas y Selección de la Estrategia de Solución.....	22

2.2.1	Alternativas de Arquitectura de Control	22
2.2.2	Selección y Justificación de la Alternativa	23
2.3	Diagnóstico del estado inicial de la planta	24
2.4	Sustitución, reparación y repotenciación de equipos	26
2.5	Verificación y calibración del hardware industrial	28
2.6	Reconfiguración y programación en TIA Portal.....	30
2.6.1	Organización general del programa en el PLC.....	31
2.6.2	Adquisición y escalado de señales.....	33
2.6.3	Lógica de actuación sobre variador, excitación y banco de cargas	35
2.6.4	Preparación de variables para integración con OPC y pruebas en línea.....	37
2.7	Configuración de comunicación industrial.....	40
2.7.1	Comunicación PROFIBUS para adquisición/actuación	40
2.7.2	Comunicación OPC (Profinet/Ethernet) con MATLAB	42
2.8	Selección de la estructura del modelo	43
2.8.1	Modelado matemático del sistema frecuencia-voltaje en el dominio del tiempo.....	44
2.8.2	Modelado matemático del sistema frecuencia-voltaje en el dominio del plano complejo s	47
2.8.3	Diagrama de bloques del sistema frecuencia-voltaje en el dominio del plano complejo s	48
2.9	Desarrollo del Entorno de Interfaz Hombre-Máquina (HMI)	50
2.9.1	HMI para modo manual de la planta de generación eléctrica	52
2.9.2	HMI para modo experimento de la planta de generación eléctrica	54
2.9.3	HMI para modo automático de la planta de generación eléctrica	56
2.10	Plan de experimentación para obtención del modelo y validación	58
2.10.1	Selección del punto de operación y evaluación de linealidad	59
2.10.2	Experimentos de identificación del modelo matemático general	67

2.10.3	Estimación de la matriz de transferencia MIMO $G(s)$	77
2.11	Diseño de los controladores PID	88
2.11.1	Matriz de Ganancias Relativas (RGA).....	88
2.11.2	Diseño del desacoplador inverso	89
2.11.3	Sintonización de los controladores PID	92
CAPÍTULO 3		99
3.	Resultados Y ANÁLISIS.....	99
3.1	Repotenciación y puesta en marcha de la planta y comunicación OPC de la planta..	99
3.2	Resultados del modelado matemático mediante enfoque de caja gris	102
3.3	Evaluación del desempeño de los controladores PID	107
3.3.1	Escenario 1: Frecuencia constante y voltaje variable:	109
3.3.2	Escenario 2: Voltaje constante y frecuencia variable.....	111
3.3.3	Escenario 3: Variación simultánea de voltaje y frecuencia	113
CAPÍTULO 4		117
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	117
	Conclusiones.....	117
	Recomendaciones.....	118
BIBLIOGRAFÍA		120
APÉNDICES.....		123

ABREVIATURAS

AC	Corriente Alterna (Alternating Current).
CPU	Unidad Central de Procesamiento (Central Processing Unit).
DB	Bloque de Datos (Data Block).
DC	Corriente Continua (Direct Current).
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FB	Bloque de Función (Function Block).
FC	Función (Function).
FIEC	Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación.
HIL	Hardware en el Bucle (Hardware-in-the-Loop).
HMI	Interfaz Hombre-Máquina (Human Machine Interface).
I/O	Entradas y Salidas (Input/Output).
MIMO	Múltiples Entradas, Múltiples Salidas (Multiple Input Multiple Output).
OB	Bloque de Organización (Organization Block).
OPC	Comunicaciones de Plataforma Abierta (Open Platform Communications).
PCB	Placa de Circuito Impreso (Printed Circuit Board).
PID	Proporcional - Integral - Derivativo.
PLC	Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller).
PWM	Modulación por Ancho de Pulso (Pulse Width Modulation).
RGA	Matriz de Ganancias Relativas
RPM	Revoluciones Por Minuto.
SISO	Una Entrada, Una Salida (Single Input Single Output).
TCP/IP	Protocolo de Control de Transmisión / Protocolo de Internet (Transmission Control Protocol/ Internet Protocol).
TIA	Automatización Totalmente Integrada (Totally Integrated Automation).
TITO	Dos Entradas, Dos Salidas (Two Input Two Output).
VFD	Variador de Frecuencia (Variable Frequency Drive).

SIMBOLOGÍA

A	Matriz dinámica o de estado del sistema.
B	Matriz de entrada del sistema.
b	Coefficiente de fricción viscosa del eje motor.
C	Matriz de salida del sistema.
D	Matriz de transmisión directa.
Ea	Voltaje inducido o fuerza electromotriz interna.
e(t)	Señal de error en el tiempo.
f	Frecuencia eléctrica (Hz).
IL	Corriente de carga.
J	Momento de inercia del conjunto motor-generador.
Kd	Ganancia de la acción derivativa.
Ki	Ganancia de la acción integral.
Km	Constante electromecánica del motor.
Kp	Ganancia de la acción proporcional.
k	Índice de Tiempo discreto.
Lf	Inductancia de campo/armadura.
n	Velocidad rotacional del motor (RPM).
P	Potencia activa.
p	Número de polos del generador.
Ra	Resistencia interna de armadura del generador.
Rf	Resistencia eléctrica de campo/bobinado.
RL	Resistencia de carga conectada al sistema.
r(t)	Señal de referencia o setpoint.
s	Variable compleja de Laplace.
Tc	Torque de carga o perturbación.
Te	Torque eléctrico o electromagnético.
Tm	Torque mecánico neto.
Ts	Tiempo de muestreo (segundos).
t	Tiempo (segundos).
u(t)	Señal de control o entrada al proceso.
V	Voltaje (Voltios).

Vg	Voltaje generado de salida.
Vin	Voltaje de entrada (alimentación del motor o excitación).
x	Vector de variables de estado.
y	Vector de variables de salida.
z	Variable compleja de la Transformada Z
ω	Velocidad angular del eje (rad/s).
Ω	Ohmio (Unidad de resistencia eléctrica).
%	Porcentaje.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema generación energía eléctrica [Plena Energía, 2022].....	4
Figura 1.2 Diagrama General de la planta de generación eléctrica.....	6
Figura 1.3 Diagrama de la estructura de un PLC [Sicma21, 2021]	9
Figura 1.4 SIMATIC S7-300 [Siemens AG, 2025].....	10
Figura 1.5 Funcionamiento de un VFD [Igueren, 2025]	10
Figura 1.6 VFD ATV312 [Schneider Electric, 2025]	11
Figura 1.7 Periferia Descentralizada ET200S [PLC-City, 2025]	12
Figura 1.8 Arquitectura OPC UA entre PLC y MATLAB/Simulink. [Electical Automation Hands-on, 2020]	14
Figura 1.9 Diagrama de Bloques PID [Grant Smith, 2024].....	19
Figura 1.10 Estructura teórica de un control PID discreto [Moreno et al. (2015)]	20
Figura 2.1 Vista Frontal de la Planta.....	22
Figura 2.2 Tablero de control de la planta	25
Figura 2.3 Equipos con falla de comunicación.....	25
Figura 2.4 Placa PCB que sustituye módulo terminal del ET200S.....	27
Figura 2.5 Placa PCB que sustituye el módulo relé del ET200S.....	28
Figura 2.6 Conector de direccionamiento PROFIBUS para el SIMOCODE PRO V ..	29
Figura 2.7 Vista de Dispositivos y Jerarquía del Proyecto de Automatización	30
Figura 2.8 Estructura del bloque principal OB1 en TIA Portal	32
Figura 2.9 Bloques funcionales implementados en TIA Portal	34
Figura 2.10 Lista de variables del Sistema	35
Figura 2.11 Implementación de la lógica de actuación analógica en el bloque FC2 .	36
Figura 2.12 Redes del bloque FC6 correspondientes al encendido y apagado del motor	37
Figura 2.13 Bloque de datos OPC_Data en TIA Portal	39
Figura 2.14 Prueba en Línea	40
Figura 2.15 Topología de la red PROFIBUS DP configurada en TIA Portal.....	41
Figura 2.16 Configuración del canal y dispositivo en KEPServerEX con la IP 200.126.14.100	42
Figura 2.17 Mapeo de variables (Tags) en el servidor OPC apuntando al DB2	43
Figura 2.18 Circuito Equivalente del Motor de Corriente Continua.....	45

Figura 2.19 Circuito Equivalente del Generador de Corriente Continua.....	46
Figura 2.20 Diagrama de bloques del sistema frecuencia–voltaje	49
Figura 2.21 Estructura general de la interfaz HMI en Simulink	50
Figura 2.22 Subsistema OPC para lectura y escritura de variables entre Simulink y el servidor OPC.....	51
Figura 2.23 Subsistema SISTEMA para supervisión y control mediante bloques Dashboard y señales OPC	52
Figura 2.24 Panel de Operación en Modo Manual.....	54
Figura 2.25 Panel de Operación en Modo Experimento	55
Figura 2.26 Esquema general de ejecución de experimentos y exportación de datos al entorno de trabajo de MATLAB	56
Figura 2.27 Interfaz de operación en modo automático con ajuste de referencias y parámetros de control.....	57
Figura 2.28 Sección de lectura de datos en modo automático.....	57
Figura 2.29 Sección del sistema de control en modo automático	58
Figura 2.30 Ensayo de barrido del voltaje de campo con el variador fijado en 10 V .	61
Figura 2.31 Determinación del límite superior del voltaje de campo antes de activar el modo seguro	62
Figura 2.32 Configuración del experimento con voltaje del variador fijo en 10 V y variación escalonada del voltaje de campo	63
Figura 2.33 Configuración del experimento con voltaje del variador fijo en 8.33 V y variación escalonada del voltaje de campo	63
Figura 2.34 Curvas características obtenidas con voltaje del variador en 10 V relación entre voltaje de campo, voltaje generado y frecuencia generada	64
Figura 2.35 Curvas características obtenidas con voltaje del variador en 8.33 V relación entre voltaje de campo, voltaje generado y frecuencia generada	65
Figura 2.36 Configuración del experimento con voltaje del campo fijo en 1.25 V y variación escalonada del voltaje de variador de frecuencia	65
Figura 2.37 Curvas características obtenidas con voltaje de campo en 1.25 V relación entre voltaje del variador de frecuencia, voltaje generado y frecuencia generada	66
Figura 2.38 Experimento para identificar el ramal $V_f \rightarrow f$ con voltaje de campo constante y carga nula	68

Figura 2.39 Importación de señales en System Identification para el ramal $V_f \rightarrow f$: entrada V_{fy} salida f	69
Figura 2.40 Validación del modelo $V_f \rightarrow f$ en Model Output: frecuencia medida vs. frecuencia simulada (FIT = 88,64%).	70
Figura 2.41 Configuración de identificación del ramal $V_f \rightarrow V_a$ en System Identification: entrada V_{fy} salida V_a	71
Figura 2.42 Validación del modelo $V_f \rightarrow V_a$ en Model Output: voltaje medido vs. voltaje simulado (FIT = 86.27%).	72
Figura 2.43 Condiciones del experimento para identificar $V_{fg} \rightarrow V_a$ con $V_f = 10$ " V" y variación de V_{fg} alrededor de 1,25 V.....	73
Figura 2.44 Importación de señales en System Identification para el ramal $V_{fg} \rightarrow V_a$: entrada V_{fgy} salida V_a	73
Figura 2.45 Validación del modelo $V_{fg} \rightarrow V_a$ en Model Output: voltaje medido vs. voltaje simulado (FIT = 96,17%).	74
Figura 2.46 Configuración de verificación del ramal $V_{fg} \rightarrow f$ en System Identification: entrada V_{fgy} salida f	75
Figura 2.47 Resultado de la verificación del ramal $V_{fg} \rightarrow f$ en Model Output: ajuste nulo o negativo, confirmando ausencia de relación.	75
Figura 2.48 Diagrama de bloques del modelo TITO con parámetros identificados y ganancias de perturbación (K_d , K_r) ajustadas.	77
Figura 2.49 Representación general de un sistema multivariable en el dominio de Laplace.....	78
Figura 2.50 Estructura TITO 2x2: descomposición del proceso en $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$ y $G_{22}(s)$	79
Figura 2.51 Implementación del modelo multivariable en estructura matricial, incluyendo perturbaciones por carga.....	81
Figura 2.52 Resultado en MATLAB de la discretización de las funciones de transferencia.....	82
Figura 2.53 Implementación del modelo multivariable discretizado en estructura matricial $G(z)$	83
Figura 2.54 Comparación y selección del mejor modelo identificado para la función de transferencia $V_{vf} \rightarrow f_{vg}$ (FIT = 88.25%).....	84

Figura 2.55 Comparación y selección del mejor modelo identificado para la función de transferencia $V_{vf} \rightarrow V_g$ (FIT = 85.88%)	84
Figura 2.56 Resultado de identificación para la función de transferencia $V_e \rightarrow f_{vg}$: ajuste nulo o negativo.....	85
Figura 2.57 Comparación y selección del mejor modelo identificado para la función de transferencia $V_e \rightarrow V_g$ (FIT = 96.14%)	85
Figura 2.58 Implementación del modelo multivariable identificado en estructura matricial $G(s)$, con entradas V_{vf} , V_e y salidas f_{vg} , V_g	86
Figura 2.59 Resultado en MATLAB de la discretización de las funciones de transferencia.....	87
Figura 2.60 Implementación del modelo multivariable discretizado en estructura matricial $G(z)$	87
Figura 2.61 Sistema de control mediante desacoplo inverso de un proceso TITO (Juan Garrido Jurado, 2012)	88
Figura 2.62 Matriz de Ganancias Relativas (RGA) obtenida para el modelo físico y el modelo identificado.....	89
Figura 2.63 Funciones de transferencia del desacoplador inverso para el modelo matemático y el modelo identificado en el dominio de la transformada de Laplace (s)	91
Figura 2.64 Resultados de los desacopladores inversos discretizados en el dominio de la transformada (z)	92
Figura 2.65 Respuesta temporal y sintonización PI del lazo de frecuencia para el modelo identificado de mejor ajuste	94
Figura 2.66 Respuesta temporal y sintonización PI del lazo de voltaje para el modelo identificado de mejor ajuste	94
Figura 2.67 Respuesta temporal y sintonización PI del lazo de frecuencia para el modelo matemático	95
Figura 2.68 Respuesta temporal y sintonización PI del lazo de voltaje para el modelo matemático.....	95
Figura 2.69 Diagrama de bloques completo del sistema (modelo matemático) con desacoplador inverso y controladores PI	97
Figura 2.70 Implementación en Simulink del esquema de control real con controladores PI discretos, anti-windup y desacoplador inverso	98

Figura 2.71 Parámetros implementados de los controladores PI discretos para los lazos de frecuencia y voltaje	98
Figura 3.1 Planta de generación eléctrica repotenciada y operativa (puesta en marcha en laboratorio)	100
Figura 3.2 Monitoreo de variables en el DB OPC_DATA [DB2] en TIA Portal para validación de programación y sensado	101
Figura 3.3 Verificación de comunicación PLC–OPC–MATLAB/Simulink mediante HMI en modo automático (prueba preliminar de control en tiempo real)	102
Figura 3.4 Interfaz de simulación en MATLAB/Simulink para la evaluación del porcentaje de ajuste (FIT).....	103
Figura 3.5 Porcentaje de ajuste del voltaje generado para el experimento con variación del voltaje del variador de frecuencia.....	104
Figura 3.6 Porcentaje de ajuste de la frecuencia generada para el experimento con variación del voltaje del variador de frecuencia	104
Figura 3.7 Porcentaje de ajuste del voltaje generado para el experimento con variación del voltaje de campo.....	105
Figura 3.8 Porcentaje de ajuste de la frecuencia generada para el experimento con variación del voltaje de campo.....	106
Figura 3.9 Estructura de control PID aplicada al sistema simulado (modelo matemático con desacoplador)	108
Figura 3.10 Estructura de control PID aplicada a la planta real (parámetros del modelo de mejor ajuste y supervisión en tiempo real).....	109
Figura 3.11 Respuesta temporal del sistema simulado ante frecuencia constante y voltaje variable	110
Figura 3.12 Respuesta temporal de la planta real ante frecuencia constante y voltaje variable.....	111
Figura 3.13 Respuesta temporal del sistema simulado ante voltaje constante y frecuencia variable	112
Figura 3.14 Respuesta temporal de la planta real ante voltaje constante y frecuencia variable.....	113
Figura 3.15 Respuesta temporal del sistema simulado ante variación simultánea de voltaje y frecuencia.....	114

Figura 3.16 Respuesta temporal de la planta real ante variación simultánea de voltaje y frecuencia 115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Señales de entrada y salida del sistema [J. M. Ortiz Morales y H. N. Peña Paredes, 2021]	6
Tabla 2.1 Puntos de operación estimados para la planta de generación eléctrica	67
Tabla 2.2 Parámetros de los controladores PI en el dominio de la transformada de Laplace (s).....	96
Tabla 2.3 Parámetros de los controladores PI en el dominio de la transformada Z ..	97
Tabla 3.1 Porcentaje de ajuste (FIT) del modelo matemático para las variables de salida.....	106
Tabla 3.2 Resumen de métricas de desempeño de los controladores PID	115

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La formación de ingenieros en el área de control y automatización exige espacios donde el estudiantado experimenta en planta los principios aprendidos en el aula. Conscientes de esto, el Laboratorio de Sistemas de Control de la ESPOL dispone de varias infraestructuras a escala que simula procesos industriales reales, permitiendo a los estudiantes abordar el ciclo completo, desde la identificación y el modelado del sistema; hasta el diseño, la implementación y la validación del control en tiempo real.

Dentro de estas instalaciones, se encuentra la planta de generación eléctrica que destaca por su alto valor didáctico; su diseño el cual está compuesto por un motor trifásico de corriente alterna acoplado a un alternador, permite emular los fundamentos de una central eléctrica, donde la frecuencia y la tensión de salida se regulan manipulando la velocidad del eje y la corriente de excitación del campo del alternador. Sin embargo, a pesar de su potencial, la planta ha permanecido desaprovechada debido a la carencia de documentación técnica actualizada, la falta de un modelo matemático validado y una arquitectura de control.

Este trabajo aborda esta problemática proponiendo la reactivación funcional y modernización de la planta de generación eléctrica. El proyecto se enfoca en implementar un sistema de control utilizando el hardware industrial existente un PLC Siemens S7-300, su periferia descentralizada ET200S y un variador de frecuencia, como interfaz de entrada/salida, adquisición y actuación que se comunica en tiempo real con una computadora. El resultado esperado es una plataforma de prácticas replicable y sostenible, que fortalece la docencia y la investigación aplicada en control industrial.

1.1 Descripción del problema

El Laboratorio de Sistemas de Control de la ESPOL dispone de una planta de generación eléctrica con potencial formativo, pero su estado actual impide su uso sistemático y seguro. El problema se manifiesta en tres áreas interconectadas las deficiencias técnicas y de documentación, las limitaciones operativas y la arquitectura de control.

La planta carece de planos eléctricos, listado de entradas y salidas (I/O) verificado y parámetros de operación normalizados. En adición a esto, la arquitectura de control original se encuentra inoperativa, llevando a la pérdida de comunicación entre la planta y los computadores del laboratorio. Esta ausencia de una base documentada verídica genera consecuencias directas en el ámbito operativo, careciendo de repetibilidad y trazabilidad, dos pilares fundamentales para la experimentación. Sin una estrategia de control funcional, es imposible garantizar que los resultados de una práctica sean consistentes o comparables.

Consecuentemente, el impacto más significativo es el pedagógico. El ciclo de aprendizaje del estudiantado no puede avanzar más allá de la simulación, debido a que la planta no ofrece una plataforma fiable para realizar la identificación del sistema, validar un modelo matemático con datos reales, ni implementar y sintonizar un controlador en lazo cerrado. En síntesis, el problema central es la existencia de un activo de laboratorio de alto potencial que se encuentra funcionalmente aislado, impidiendo que los estudiantes consoliden competencias clave para su formación

1.2 Justificación del problema

La reactivación de la planta de generación eléctrica se justifica por el valor pedagógico, técnico e institucional que genera. Al realizar el levantamiento de planos, obtener un modelo matemático a partir de datos experimentales, validar el controlador en hardware real, documentación de rangos y límites operativos; se consolida que el estudiantado vive el ciclo completo de control, electricidad, electrónica y automatización. La planta deja de estar improductiva y se convierte en una plataforma clave para prácticas, proyectos y trabajos de titulación, con estándares de seguridad, trazabilidad y metrología.

Institucionalmente, la puesta en marcha de la planta optimiza el uso del equipamiento industrial existente, aumentando las horas efectivas de laboratorio y generando el retorno de la inversión en infraestructura. Académicamente, reduce la brecha simulación–planta, fortalece un aprendizaje basado en la evaluación en métricas objetivas como el tiempo de establecimiento, el sobreimpulso y error en estado estacionario. Todo ello se alinea con la misión formativa de la ESPOL y con los objetivos de calidad educativa e innovación tecnológica, elevando la pertinencia y el impacto del aprendizaje en contextos reales de ingeniería.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Implementar un sistema de control en tiempo real para la planta de generación eléctrica del Laboratorio de Sistemas de Control, mediante el desarrollo de un modelo matemático y un controlador PID en MATLAB/Simulink, utilizando el hardware industrial existente como interfaz de adquisición y actuación, habilitando la planta como una plataforma funcional para docencia e investigación aplicada.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1) Configurar la arquitectura de hardware y comunicación de la planta, estableciendo un enlace de datos confiable en tiempo real mediante un servidor OPC.

- 2) Desarrollar el modelo matemático de la planta, aplicando técnicas de identificación de sistemas y validándolo con métricas de ajuste adecuadas.
- 3) Diseñar el controlador PID en MATLAB/Simulink, cumpliendo con los criterios de desempeño establecidos para la regulación de voltaje y frecuencia.
- 4) Validar experimentalmente el desempeño del controlador en tiempo real, ejecutando pruebas de lazo cerrado desde Simulink y evaluando métricas como tiempo de establecimiento, sobreimpulso y error en estado estacionario.
- 5) Elaborar una guía de prácticas de laboratorio, documentando el proceso de modelado y control, e incluyendo procedimientos de operación para el uso seguro de la planta.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Planta de Generación Eléctrica a Escala

1.4.1.1 Definición y componentes de una planta de generación eléctrica

Una planta de generación eléctrica es una instalación destinada a convertir una fuente de energía primaria —como agua, vapor, viento, gas o biomasa— en energía eléctrica apta para su distribución y consumo. Aunque las tecnologías específicas varían entre centrales hidroeléctricas, térmicas, eólicas o fotovoltaicas, el proceso general de generación sigue cuatro etapas fundamentales: selección de la fuente energética, transformación de la energía en movimiento, conversión electromecánica en un generador y entrega de la energía a la red eléctrica (Plena Energía, 2022).

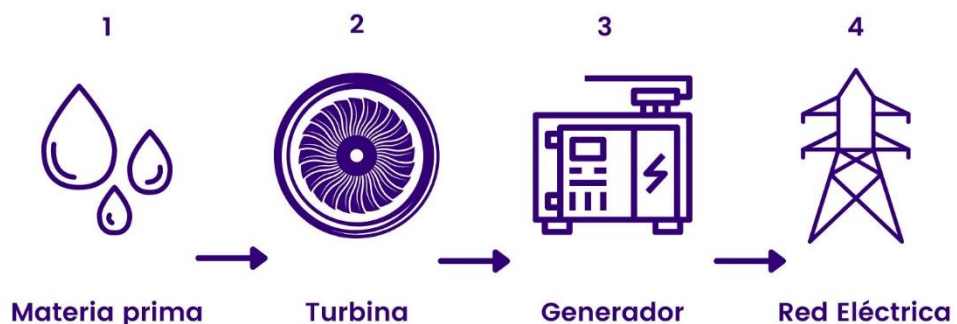


Figura 1.1 Esquema generación energía eléctrica [Plena Energía, 2022]

Los componentes esenciales de una planta de generación incluyen una fuente de energía primaria, responsable de producir el movimiento mecánico; una turbina o motor, que transforma la energía disponible en energía cinética rotacional; un generador eléctrico, encargado de convertir el movimiento del eje en energía eléctrica mediante inducción electromagnética; y un sistema de regulación, que controla variables críticas como la frecuencia, el voltaje y la excitación del generador. A estos elementos se suman los sistemas de control, encargados de la coordinación entre subsistemas, y las cargas eléctricas, utilizadas para evaluar la capacidad del sistema ante variaciones en la demanda (Chapman, 2016; Kundur, 1994).

En el caso de las plantas didácticas a escala, estos componentes se representan mediante versiones simplificadas pero funcionales, lo que permite entender los principios operativos de una central eléctrica real sin los riesgos y costos propios de su contraparte industrial. Estas plantas reproducen procesos de regulación de velocidad, control de excitación, estabilidad de frecuencia y respuesta a perturbaciones, constituyéndose en plataformas valiosas para la enseñanza de control, conversión de energía y sistemas dinámicos (Dorf & Bishop, 2017).

1.4.1.2 Descripción de la planta de generación eléctrica utilizada en el proyecto

La planta de generación eléctrica utilizada en este proyecto es un prototipo a escala que reproduce los principios esenciales de una central eléctrica convencional. Su objetivo es permitir el estudio práctico de la conversión de energía mecánica en energía eléctrica y el análisis de sistemas de control aplicados a procesos de generación. Para ello, la planta integra un conjunto electromecánico conformado por un motor que actúa como fuente motriz y un alternador síncrono encargado de la producción de energía eléctrica. Ambos equipos están acoplados mediante un sistema de transmisión mecánica que posibilita evaluar cómo la velocidad del eje influye en las variables eléctricas generadas.

El sistema incorpora un módulo de excitación (tarjeta electrónica) que regula el nivel de tensión producido por el generador, permitiendo analizar el efecto de la excitación en la estabilidad del voltaje. Para simular la demanda eléctrica, la planta cuenta con un banco de cargas resistivas conectadas en paralelo. Cada grupo está formado por una resistencia fija y una resistencia variable tipo reóstato, ambas controladas mediante contactores y ajustadas en el caso de la variable mediante un motor de corriente continua. Esta configuración permite realizar incrementos discretos y variaciones continuas de carga, lo cual es fundamental para el estudio de la respuesta del sistema ante perturbaciones.

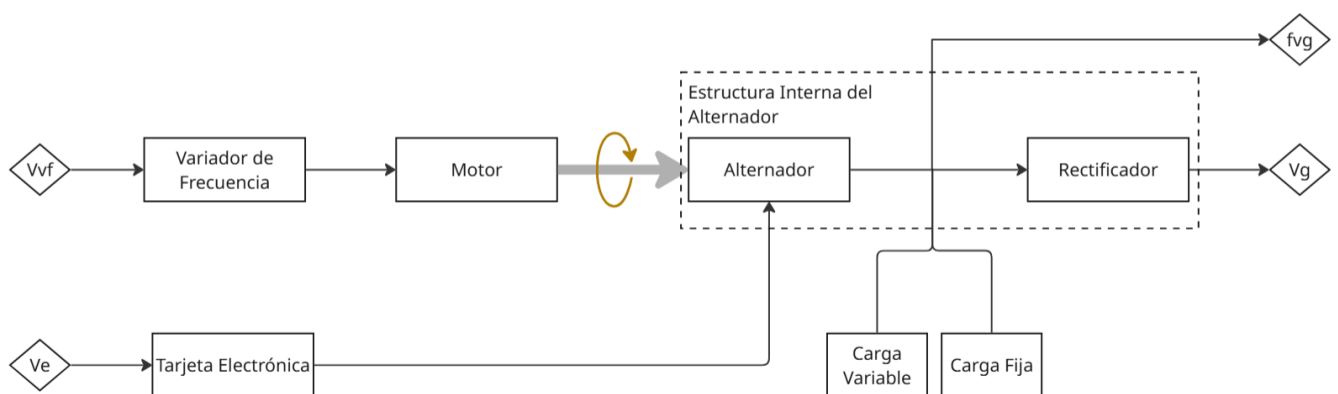


Figura 1.2 Diagrama General de la planta de generación eléctrica

Tabla 1.1 Señales de entrada y salida del sistema [J. M. Ortiz Morales y H. N. Peña Paredes, 2021]

Variable	Tipo	Descripción
V_{vf}	Entrada	Voltaje del variador de frecuencia
V_e	Entrada	Voltaje de campo del alternador
f_{vg}	Salida	Frecuencia de la señal de voltaje alterna generada
V_g	Salida	Voltaje DC rectificado a partir de la señal AC generada por el alternador

La velocidad del eje se mide mediante un codificador incremental, cuya señal permite determinar la frecuencia del motor acoplado al alternador y, en consecuencia, la frecuencia eléctrica generada. Esta medición ofrece una referencia precisa tanto para el control de frecuencia como para la adquisición de datos experimentales. De forma complementaria, la planta cuenta con un sistema de automatización compuesto por un PLC Siemens S7-300, un variador de

frecuencia encargado del control del motor, módulos periféricos ET200S para la adquisición y el envío de señales, y un SIMOCODE Pro V para la supervisión y protección del sistema eléctrico. La descripción técnica detallada de estos componentes se presenta en los apéndices; en esta sección se los menciona únicamente como parte del contexto general del sistema utilizado en la investigación.

1.4.1.3 Variables eléctricas y mecánicas relevantes para el control

En un sistema de generación eléctrica, el comportamiento dinámico depende de la interacción entre las variables mecánicas del conjunto motriz y las variables eléctricas asociadas al generador. Entre las variables mecánicas, la velocidad angular del eje es fundamental, pues determina directamente la frecuencia eléctrica producida por el generador síncrono. Esta relación se expresa mediante la ecuación básica

$$f = \frac{n \cdot p}{120} \quad (1.1)$$

, donde n es la velocidad en revoluciones por minuto y p el número de polos, lo que evidencia que cualquier perturbación mecánica afecta la estabilidad de la frecuencia (Chapman, 2016).

Otra variable mecánica relevante es el par aplicado por el motor a la máquina síncrona. El equilibrio entre el par motriz y el par electromagnético condiciona el estado estable del sistema; si este equilibrio se altera, se producen variaciones en la velocidad y, por ende, en la frecuencia eléctrica (Kundur, 1994). Estas dinámicas justifican la necesidad de incluir mediciones de velocidad y mecanismos de control que aseguren un régimen operativo estable.

Desde el punto de vista eléctrico, la tensión generada depende principalmente del nivel de excitación del generador síncrono. Un incremento en la corriente de campo eleva la magnitud del voltaje de salida, mientras que una reducción la disminuye. Por ello, el control de la excitación es esencial para mantener la estabilidad del voltaje frente a cambios en la carga o en las condiciones de operación (Dorf & Bishop, 2017).

Finalmente, la carga eléctrica constituye una variable externa que influye tanto en el comportamiento mecánico como en el eléctrico del sistema. Un aumento en la demanda incrementa el par electromagnético requerido, lo que puede provocar una disminución temporal de la velocidad y afectar la frecuencia y el voltaje. La

respuesta del sistema ante estas variaciones es un aspecto clave en el diseño de estrategias de control para garantizar un funcionamiento estable bajo distintas condiciones de carga.

1.4.2 Sistemas de Automatización e Instrumentación Industrial

1.4.2.1 Controladores Lógicos Programables (PLC)

El Controlador Lógico Programable, o PLC, es un ordenador digital de tipo industrial, diseñado específicamente para operar de manera fiable en entornos hostiles, caracterizados por vibraciones, ruido eléctrico y temperaturas extremas. Su función primordial es la automatización y el control de procesos electromecánicos. Históricamente, los PLC emergieron como un reemplazo robusto y flexible de los sistemas de control arcaicos basados en lógica de relés cableada. La ventaja fundamental, como señala W. Bolton en su obra de referencia *Programmable Logic Controllers* (2015), radica en la programabilidad; mientras que la lógica de relés es fija y requiere recableado físico para cualquier modificación, un PLC ejecuta un programa de usuario almacenado en su memoria, permitiendo cambios en la lógica de control de manera rápida y eficiente.

Dentro de un sistema de automatización, el PLC actúa como la unidad central responsable de supervisar el estado del proceso y ejecutar las acciones de control necesarias. Mediante ciclos de escaneo, evalúa las señales provenientes de sensores, ejecuta la lógica programada y actualiza las salidas, garantizando una operación determinista y continua. Su robustez y capacidad de diagnóstico lo convierten en un componente esencial en plantas industriales modernas.

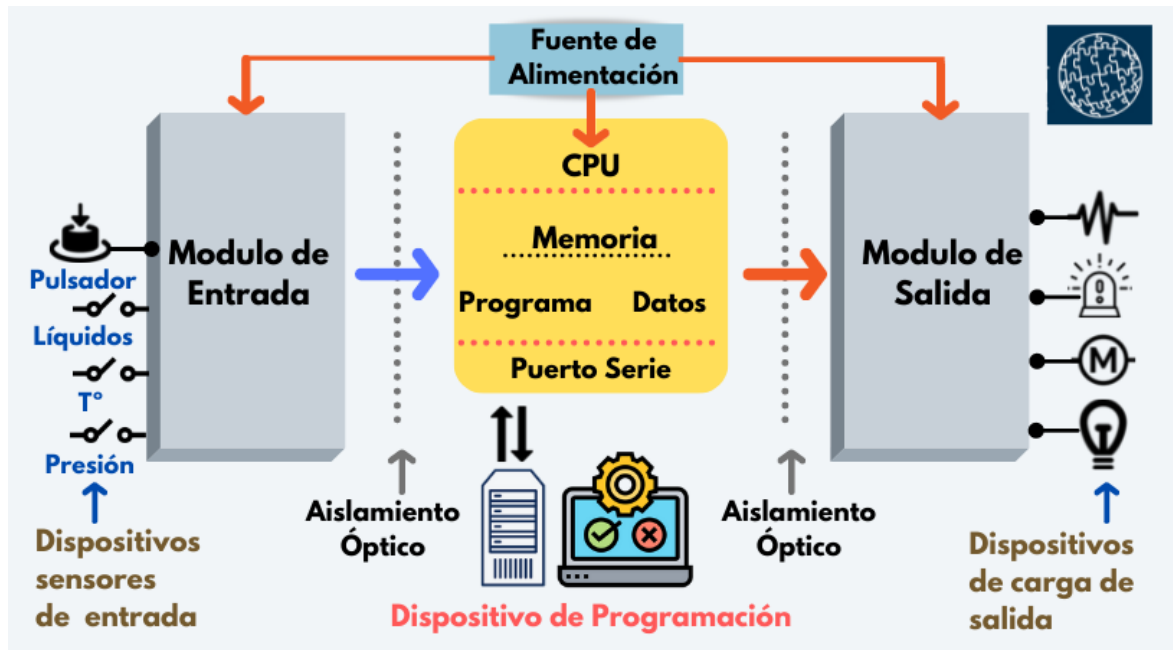


Figura 1.3 Diagrama de la estructura de un PLC [Sicma21, 2021]

El controlador específico utilizado en este proyecto es un Siemens SIMATIC S7-300. La serie SIMATIC S7-300 destaca por su diseño modular, su facilidad de integración con otros dispositivos y su compatibilidad con redes industriales como PROFIBUS y PROFINET. Permite incorporar módulos digitales, analógicos y de comunicación, y ofrece funciones de diagnóstico avanzadas, características que lo han posicionado como una plataforma estándar para aplicaciones de automatización industrial (Siemens AG, 2008).



Figura 1.4 SIMATIC S7-300 [Siemens AG, 2025]

1.4.2.2 Variadores de Frecuencia

El Variador de Frecuencia (VFD) es el dispositivo de electrónica de potencia que actúa como el actuador principal para controlar la velocidad del motor de corriente alterna (CA) que impulsa al alternador. El principio fundamental de un VFD se basa en la relación síncrona de un motor de CA su velocidad de rotación es directamente proporcional a la frecuencia de la alimentación eléctrica que lo acciona (Mohan et al., 2003).

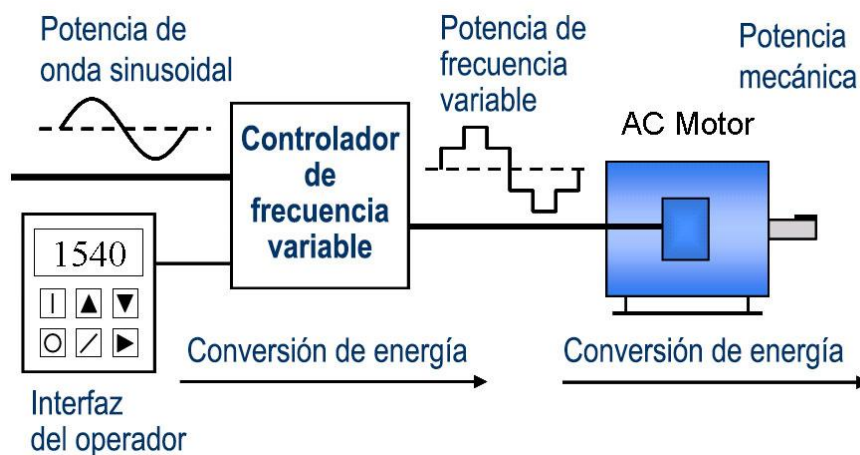


Figura 1.5 Funcionamiento de un VFD [Igueren, 2025]

La capacidad de ajustar la frecuencia de alimentación permite que el variador mantenga una velocidad constante frente a perturbaciones, optimice el consumo energético y reduzca el desgaste mecánico del accionamiento. En aplicaciones de control, este dispositivo se integra fácilmente con el PLC mediante señales

analógicas o protocolos de comunicación digital, lo que facilita la implementación de estrategias avanzadas de regulación. El variador utilizado en este proyecto, fabricado por Schneider Electric, incorpora además funciones de protección, rampas de aceleración y diagnósticos internos que incrementan la confiabilidad y seguridad del sistema (Schneider Electric, 2010).



Figura 1.6 VFD ATV312 [Schneider Electric, 2025]

1.4.2.3 Periferia Descentralizada ET200S

La periferia descentralizada permite distribuir módulos de entrada y salida cerca del proceso, reduciendo el cableado y facilitando la expansión del sistema. En lugar de conectar cada sensor o actuador directamente al PLC, las señales se concentran en estaciones remotas que se comunican con el controlador mediante buses industriales. Esto mejora la organización de la planta, reduce interferencias y simplifica el mantenimiento.

El sistema ET200S de Siemens utiliza un módulo interfaz que se comunica con el PLC a través de PROFIBUS o PROFINET. Desde la perspectiva lógica, las E/S remotas se integran como si fuesen módulos locales del controlador, permitiendo que la aplicación de control lea y escriba datos de forma transparente. Esta arquitectura distribuida proporciona flexibilidad, escalabilidad y un diagnóstico eficiente en campo (Siemens AG, 2008).

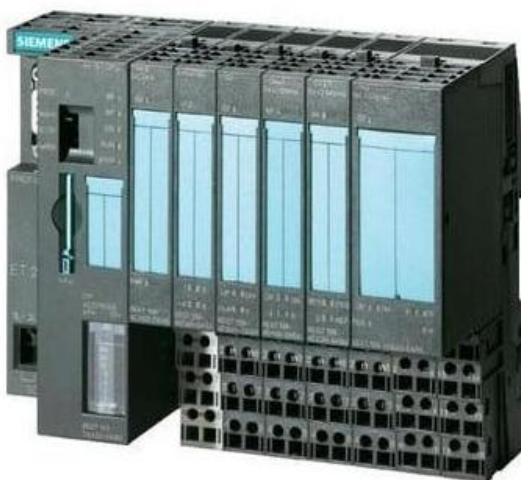


Figura 1.7 Periferia Descentralizada ET200S [PLC-City, 2025]

1.4.2.4 Sensores y actuadores en la planta

Los sensores proporcionan información esencial para la supervisión y el control del proceso. En sistemas electromecánicos, un codificador incremental permite medir la velocidad angular a partir de pulsos proporcionales al giro del eje, mientras que los sensores de voltaje y corriente permiten caracterizar el comportamiento eléctrico del sistema. Dispositivos inteligentes como SIMOCODE Pro V integran funciones de medición, protección y diagnóstico para motores trifásicos, comunicándose con el PLC para mejorar la seguridad y la confiabilidad operativa. Asimismo, los módulos de entrada del PLC y de la periferia descentralizada permiten registrar las magnitudes eléctricas relevantes del sistema.

Los actuadores, por su parte, ejecutan físicamente las órdenes emitidas por el controlador. Entre ellos se incluyen motores eléctricos gobernados mediante variadores de frecuencia, contactores y módulos de salida, tanto del PLC como de la periferia remota, utilizados para conmutar cargas o ejecutar secuencias operativas, así como relés de protección que garantizan un funcionamiento seguro. La correcta integración entre sensores, actuadores y el PLC permite implementar estrategias de control robustas y mantener la estabilidad del proceso bajo diversas condiciones de operación.

1.4.3 Comunicación Industrial

1.4.3.1 Protocolos de Comunicación Industrial

Para que los distintos dispositivos de un sistema automatizado (como el PLC maestro y su periferia) puedan intercambiar información de manera fiable y en tiempo real, se emplean protocolos de comunicación estandarizados. En la arquitectura de este proyecto coexisten dos estándares cruciales PROFIBUS DP e Industrial Ethernet.

Por un lado, PROFIBUS DP (Periferia Descentralizada) es un bus de campo serie clásico, robusto y altamente determinista, diseñado para la comunicación rápida entre un controlador central y los dispositivos de campo. Opera bajo una arquitectura maestro-esclavo, donde el PLC S7- 300 (maestro) gestiona cíclicamente la comunicación con los dispositivos esclavos, como la periferia descentralizada ET200S (Thompson, 2008).

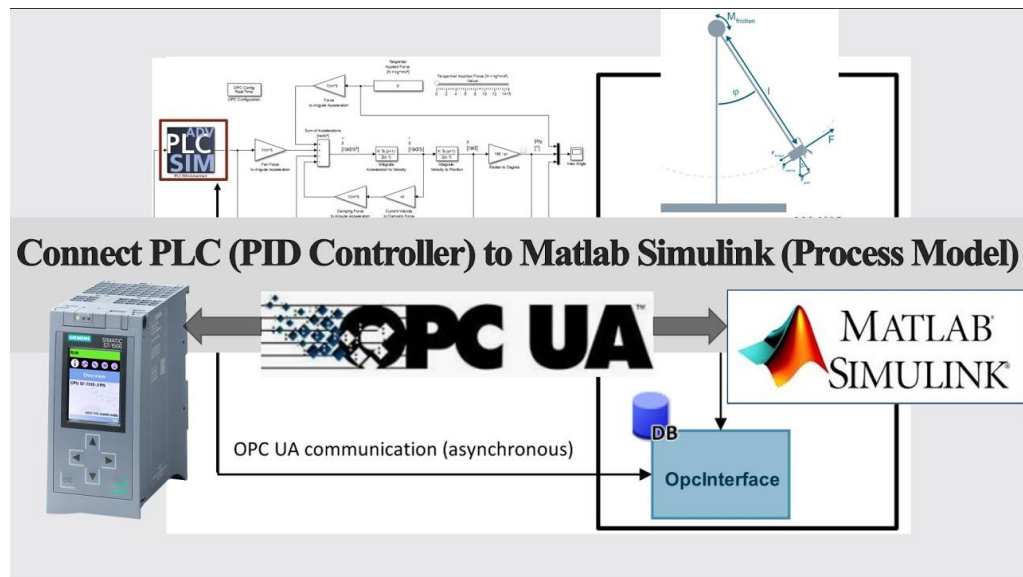
Por otro lado, Industrial Ethernet representa la adaptación del estándar IEEE 802.3 (ampliamente utilizado en redes de oficina) a las exigencias del entorno de fábrica. Estándares basados en Ethernet, como PROFINET, ofrecen ventajas significativas sobre los buses de campo serie tradicionales, incluyendo un ancho de banda mucho mayor, la capacidad de transmitir mensajes de mayor tamaño y un espacio de direccionamiento prácticamente ilimitado. Esta tecnología es fundamental para la comunicación entre el PLC y los sistemas de supervisión a nivel de PC (PI North America, 2022).

1.4.3.2 Estándar OPC (OLE for Process Control)

Lograr la interoperabilidad entre hardware industrial propietario, como el PLC S7-300, y software de supervisión y control en PC, como MATLAB/Simulink, presenta un desafío de comunicación significativo debido a la incompatibilidad de protocolos nativos. La solución estándar en la industria para superar esta barrera es la arquitectura OPC (Open Platform Communications). Según la OPC Foundation (2025), este estándar consiste en un conjunto de especificaciones diseñadas para asegurar el intercambio seguro, confiable y transparente de datos entre dispositivos y aplicaciones de múltiples fabricantes.

El funcionamiento de OPC se basa en una arquitectura cliente-servidor que actúa como una capa de abstracción crucial. En este esquema

- **El Servidor OPC** actúa como un "traductor universal". Es una aplicación que se comunica directamente con el hardware industrial (PLC) utilizando su protocolo nativo, recopila las variables o tags, y las expone de manera estandarizada al resto de la red.
- **El Cliente OPC** (en este proyecto, MATLAB) consume estos datos sin necesidad de conocer los detalles técnicos ni el protocolo propietario de Siemens.



**Figura 1.8 Arquitectura OPC UA entre PLC y MATLAB/Simulink.
[Electrical Automation Hands-on, 2020]**

Tal como describen Iwanitz y Lange (2009), este modelo desacopla eficazmente el software de aplicación del hardware de control. Al traducir las solicitudes genéricas en comandos específicos para cada equipo, OPC permite que sistemas heterogéneos coexistan e intercambien información en tiempo real sin conflictos de compatibilidad.

1.4.4 Modelado e Identificación de Sistemas Dinámicos

1.4.4.1 Concepto de modelado matemático de sistemas físicos

El modelado matemático consiste en representar un sistema físico mediante expresiones que describen cómo se comporta en función del tiempo y de sus variables de entrada y salida. En ingeniería, este proceso permite abstraer y simplificar fenómenos reales para poder analizarlos, simularlos o controlarlos sin necesidad de experimentar directamente con el equipo. Un modelo no busca

replicar todos los detalles del sistema, sino capturar sus dinámicas relevantes con un nivel de precisión útil para el objetivo de estudio (Ogata, 2010).

En el contexto de sistemas electromecánicos, como una planta de generación eléctrica, el modelo permite entender cómo interactúan variables como la velocidad del motor, la excitación del campo y la tensión de salida. Este conocimiento es esencial para diseñar controladores que regulen, por ejemplo, la frecuencia o el voltaje ante cambios de carga o perturbaciones. Como señalan Dorf y Bishop (2021), sin un modelo que represente la dinámica del sistema, resulta inviable diseñar soluciones de control eficientes y seguras.

En definitiva, el modelo matemático es una herramienta clave para analizar el comportamiento del sistema, validar estrategias de regulación y anticipar su respuesta frente a diferentes condiciones operativas. Sirve como base para el diseño de sistemas de control robustos que garanticen un funcionamiento estable, especialmente en procesos complejos como los de generación eléctrica.

1.4.4.2 Sistemas SISO y MIMO en el modelado dinámico

En el modelado de sistemas dinámicos, es fundamental distinguir entre sistemas SISO (*Single Input Single Output*) y MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Un sistema SISO presenta una sola entrada y una sola salida, lo que permite un análisis directo entre la acción de control y el efecto observado. Por el contrario, un sistema MIMO involucra múltiples entradas y salidas que pueden estar interconectadas, generando efectos cruzados entre variables. Este tipo de sistemas es común en procesos industriales complejos, donde las acciones sobre una variable pueden influir simultáneamente en varias otras (Ogata, 2010). Modelar un sistema MIMO implica representar estas interacciones mediante ecuaciones acopladas o matrices de funciones de transferencia, mientras que un sistema SISO puede describirse con una sola relación matemática.

El reconocimiento del tipo de sistema influye directamente en la estrategia de modelado y control. Por ejemplo, un horno doméstico regulado por un sensor de temperatura sería un sistema SISO; en cambio, una planta de generación eléctrica —como la utilizada en este proyecto— es un sistema MIMO, ya que variables como la velocidad del eje y la excitación afectan tanto la frecuencia como la tensión generada. En estos casos, el modelado multivariable permite capturar las dependencias cruzadas y diseñar controladores que regulen las salidas de manera coordinada. Según Dorf y Bishop (2021), los sistemas MIMO requieren

técnicas modernas de control, como el espacio de estados, para representar su dinámica de forma precisa y aplicar estrategias de regulación adecuadas.

1.4.4.3 Representación en espacio de estados

La representación en espacio de estados es un método formal que modela la dinámica de sistemas mediante un conjunto de variables internas y ecuaciones diferenciales matriciales de primer orden. Este enfoque se define por la ecuación de estado

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1.2)$$

, que describe la evolución interna, y la ecuación de salida

$$y = Cx + Du \quad (1.3)$$

, que relaciona dicho estado con las variables observables (Ogata, 2010). En estas expresiones, \dot{x} representa el vector de estado que contiene la información interna del sistema, mientras que u y y corresponden a los vectores de entrada (control) y salida (medición), respectivamente. La relación entre estas variables está determinada por las matrices del sistema A (matriz dinámica) define la evolución interna de los estados; B (matriz de entrada) establece cómo actúan las señales de control sobre dichos estados; C (matriz de salida) relaciona los estados internos con las variables observables; y D (matriz de transmisión directa) representa la influencia inmediata de la entrada en la salida. A diferencia de las funciones de transferencia, esta estructura matricial es ideal para modelar sistemas MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas), ya que permite gestionar las interacciones cruzadas entre variables de forma natural (Valera Fernández, 2016). En el contexto de este proyecto, este enfoque permite unificar matemáticamente cómo la velocidad del motor y el voltaje de excitación (entradas) influyen simultáneamente en la frecuencia y el voltaje generado (salidas), proporcionando un modelo compacto y eficiente para el diseño del controlador.

1.4.4.4 Identificación de sistemas

La identificación de sistemas es el proceso mediante el cual se obtiene un modelo matemático de un sistema físico a partir de datos experimentales. Consiste en aplicar señales de entrada al sistema real, medir sus salidas, y luego ajustar un modelo que reproduzca su comportamiento. Según Ljung (1999), este enfoque permite construir modelos útiles incluso cuando no se conocen completamente las

ecuaciones físicas del sistema, lo que resulta ideal para tareas de simulación y diseño de control. Para lograrlo, es fundamental realizar un diseño experimental adecuado, seleccionando señales de entrada que exploren todo el rango dinámico del sistema y registrando salidas bajo condiciones controladas (MathWorks, 2023).

Existen distintos enfoques según el grado de conocimiento previo sobre el sistema. En el método de caja blanca, se parte de las leyes físicas conocidas y se modela con ecuaciones exactas (Ogata, 2010). Por el contrario, el enfoque de caja negra utiliza exclusivamente los datos experimentales, sin asumir estructura interna; es común en sistemas complejos o parcialmente desconocidos. El modelo de caja gris combina ambos emplean una estructura basada en la física, pero estima parámetros desconocidos a partir de los datos (MathWorks, 2023). Este enfoque es especialmente útil en ingeniería, donde se tiene una comprensión parcial del sistema, pero se desea precisión ajustando parámetros mediante mediciones reales.

Una vez identificado un modelo, se debe validar su calidad mediante métricas objetivas. El porcentaje de ajuste (FIT) indica qué tan bien el modelo reproduce los datos, mientras que el error cuadrático medio (RMSE) evalúa la magnitud promedio del error en unidades físicas. Además, el análisis de residuales permite detectar si quedan patrones no explicados por el modelo; idealmente, los residuos deben comportarse como ruido aleatorio sin correlación con entradas pasadas (Ljung, 1999). Si el modelo supera estas pruebas, puede considerarse válido para ser usado en simulaciones y diseño de controladores confiables.

1.4.5 Controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo)

El controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es, con diferencia, el algoritmo de control por realimentación más utilizado en la industria, estimándose su presencia en más del 90% de los lazos de control (Åström & Hägglund, 2006). Fundamentalmente, este algoritmo se origina con el propósito esencial de mantener una variable de proceso en consonancia con un valor objetivo mediante la permanente minimización del error, que se define como la diferencia entre la referencia y la variable observada. Para alcanzar este objetivo de manera efectiva, el controlador modifica la señal de salida en función de la ponderación de tres términos de acción diferentes que consideran el estado actual, el pasado y las

proyecciones futuras del error, lo que permite una corrección dinámica y adaptativa ante posibles perturbaciones (Smith & Corripio, 1997).

No obstante, en vista del progreso tecnológico hacia sistemas digitalizados, se vuelve crucial diferenciar teórica y prácticamente entre su formulación clásica y su aplicación actual en plataformas computacionales.

1.4.5.1 Controlador PID Continuo

El modelo clásico PID se establece en el ámbito del tiempo continuo, bajo la suposición de que las señales son analógicas y fluyen de forma continua a través del sistema. En este contexto, la acción de control $u(t)$ se caracteriza mediante la ecuación diferencial que actúa de manera instantánea sobre la señal de error ($e(t)$). Desde un punto de vista matemático, la relación que define este comportamiento se puede representar de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.4)$$

A partir de esta ecuación, se puede examinar la contribución específica de cada término dentro del lazo de control. Por un lado, ganancia proporcional (K_p) genera una acción correctiva inmediata que es directamente proporcional a la magnitud actual del error; aunque esto mejora la rapidez de respuesta del sistema, de forma aislada no puede eliminar el error en estado estacionario (Ogata, 2010). Al mismo tiempo, el término relacionado con la ganancia integral (K_i) tiene la función de acumular el historial del error a lo largo del tiempo, lo que resulta esencial para eliminar cualquier desviación residual persistente, aunque su uso excesivo podría dar a oscilaciones no deseadas en la respuesta transitoria. Finalmente, la ganancia derivativa (K_d) reacciona ante la tasa de cambio o velocidad del error, lo que le permite predecir su comportamiento futuro. La arquitectura interna de estos tres términos y su configuración en paralelo para formar la señal de control final se presenta de manera clara en la Figura 1.9.

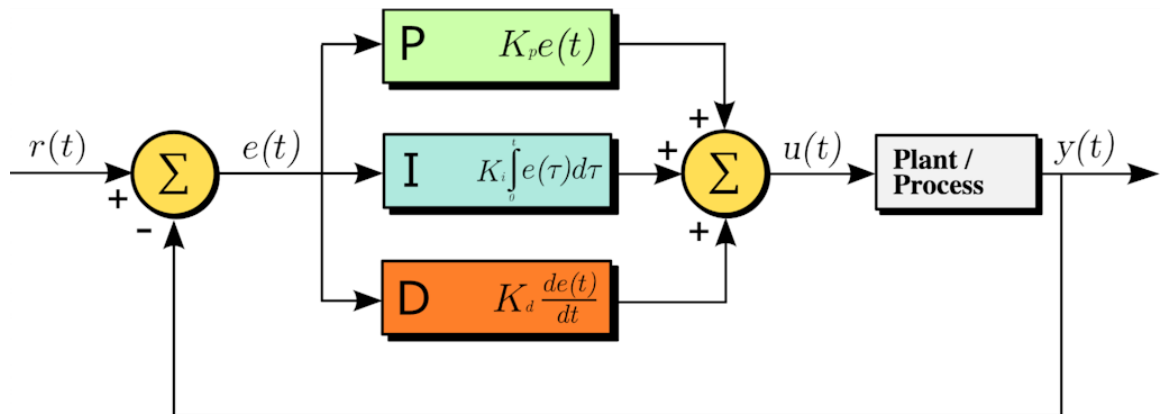


Figura 1.9 Diagrama de Bloques PID [Grant Smith, 2024]

1.4.5.2 Controlador PID Digital (discreto)

Dado que este proyecto usa el control por medio de equipos digitales como el PLC S7-300 y el programa MATLAB, es fundamental trasladar la teoría de control clásica al dominio discreto. En este contexto operativo, el controlador no percibe las señales de forma continua, sino que procesa muestras de las variables en intervalos de tiempo fijos y secuenciales, este parámetro es conocido técnicamente como tiempo de muestreo (T_s).

Dada esta característica de discontinuidad, las operaciones matemáticas relacionadas con el cálculo diferencial e integral deben ser aproximadas mediante métodos numéricos para ser ejecutables por el microprocesador. En consecuencia, la estructura interna del algoritmo es modificada, y los términos proporcional, integral y derivativo se calculan mediante ecuaciones en diferencias finitas y se suman en paralelo para generar la acción de control definitiva. Esta disposición estructural, que representa el flujo lógico de la señal dentro del procesador, se detalla esquemáticamente en la Figura 1.10.

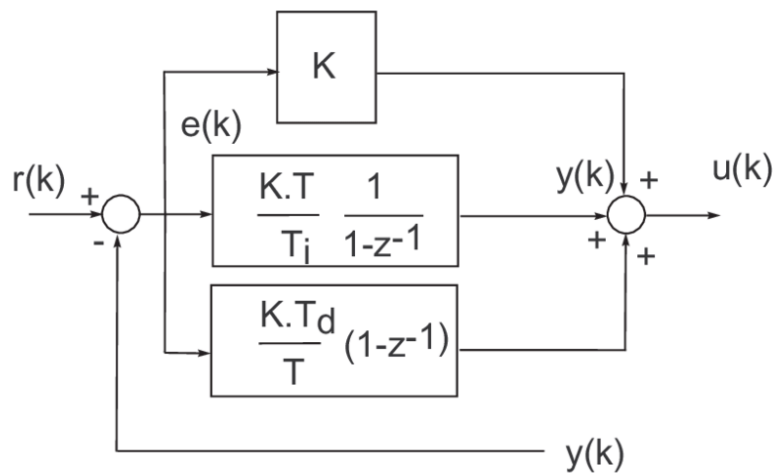


Figura 1.10 Estructura teórica de un control PID discreto [Moreno et al. (2015)]

De manera matemática, tomando como referencia la estructura expuesta en la Figura 1.10 y utilizando la aproximación rectangular hacia atrás para la integral y la derivada, la ley de control discreta para el instante de muestreo k se formula de la siguiente manera:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{j=0}^k e[j] + \frac{K_d}{T_s} (e[k] - e[k - 1]) \quad (1.5)$$

Donde $u[k]$ representa la señal de control y $e[k]$ el error en el instante actual, mientras que $e[k-1]$ corresponde al error registrado en el instante anterior.

Cabe resaltar que el valor de T_s es muy importante al diseñar. Si el tiempo de muestreo es corto, en relación con la dinámica natural del proceso, tal como se logra la rápida comunicación por medio de OPC, el controlador digital actuará casi igual que si fuera continuo. Así, los métodos usados en los bloques de Simulink hacen que las leyes de control se ejecuten una y otra vez, actualizando la señal que va a los actuadores con mucha exactitud (Ogata, 2010).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción general del enfoque metodológico

El desarrollo de este proyecto se sustentó en un enfoque metodológico integral que permitió avanzar de forma ordenada y verificable desde la recuperación operativa de la planta hasta la validación del desempeño del sistema de control en condiciones reales. A lo largo del proceso se ejecutaron actividades de repotenciación, diagnóstico técnico, instrumentación y acondicionamiento de señales, modelado dinámico, identificación experimental, diseño de control y verificación final de resultados. De manera complementaria, se adoptó una combinación de metodología experimental y técnicas de modelado tipo caja gris, lo que posibilitó construir modelos dinámicos apoyados tanto en principios físicos del sistema como en datos reales adquiridos directamente de la planta.

Este enfoque se estructuró de forma secuencial e iterativa: cada etapa generó información que retroalimentó a la siguiente y, cuando se identificaron discrepancias entre lo esperado y lo observado, fue necesario retornar a fases previas para recalibrar parámetros, ajustar condiciones experimentales o refinar la instrumentación, garantizando así coherencia entre el comportamiento del modelo y la respuesta del sistema físico. En consecuencia, el proyecto avanzó mediante ciclos sucesivos de intervención y prueba, asegurando que las decisiones técnicas se fundamentaran en evidencia experimental y en criterios de desempeño medibles. La Figura 2.1 presenta una vista general de la planta utilizada, donde se aprecia la distribución de los equipos principales y la disposición física del sistema al inicio del proyecto.

Adicionalmente, es importante señalar que todos los experimentos se ejecutaron con un tiempo de muestreo de 0.1 s, impuesto por la limitación de la comunicación OPC entre la planta y el computador de supervisión/control. Bajo esta restricción, el desarrollo del modelo matemático, las funciones de transferencia y los controladores se planteó inicialmente en el dominio de la transformada de Laplace (dominio s), para posteriormente discretizarlos y llevarlos al dominio de la transformada Z , permitiendo implementar el esquema de control digital propuesto

en este documento sin perder trazabilidad entre el diseño continuo y su ejecución muestreada.



Figura 2.1 Vista Frontal de la Planta

2.2 Análisis de Alternativas y Selección de la Estrategia de Solución

2.2.1 Alternativas de Arquitectura de Control

Se identificaron y analizaron tres alternativas principales para la arquitectura de control de la planta

A) PLC como pasarela de E/S y control en MATLAB/Simulink vía OPC (cliente/servidor)

El PLC S7-300 realiza adquisición/actuación; MATLAB/Simulink ejecuta la lógica de control y se comunica por OPC. Esta opción está avalada por implementaciones previas en la misma planta se configura un servidor OPC con periodo de lectura de 1 ms para exponer variables del S7-300 hacia MATLAB/Simulink y operar en tiempo real. También existen listados de mapeo de variables/direcciones en el PLC y guías de creación de modelos Simulink con bloques OPC de lectura/escritura, lo que reduce el riesgo de integración.

B) Control completamente embebido en el PLC

Esta opción implicaba utilizar un Controlador Lógico Programable (PLC) robusto, como el Siemens S7-300, para realizar todo el lazo de control PID internamente. Si bien los PLC son estándares en la industria por su robustez y modularidad, esta arquitectura limita la flexibilidad didáctica y de investigación, dificultando la implementación rápida y modificación de algoritmos de control complejos (como control óptimo o adaptativo) que son fácilmente programables en entornos académicos como MATLAB/Simulink.

C) Plataforma Dedicada de Prototipado Rápido

Se consideró el uso de sistemas comerciales diseñados específicamente para control en tiempo real estricto (Hard Real-Time) y Hardware-in-the-Loop (HIL). Aunque ofrecen el mejor desempeño técnico y una integración nativa con MATLAB/Simulink, su altísimo costo de adquisición y licenciamiento los hacía inviables para el presupuesto inmediato del proyecto, además de desaprovechar los equipos industriales ya disponibles en el laboratorio.

2.2.2 Selección y Justificación de la Alternativa

Alternativa seleccionada PLC S7-300 como interfaz de adquisición/actuación y control ejecutado en MATLAB/Simulink con comunicación OPC.

Justificación técnica y académica

- Rapidez para prototipado y validación en tiempo real. El flujo S7-300 \rightleftharpoons OPC \rightleftharpoons MATLAB/Simulink ya fue configurado con tasas de consulta del orden de 1 ms y variables mapeadas a bloques Simulink, lo que habilitó lazo cerrado y pruebas desde el PC de ingeniería en esta misma planta. Esto reduce esfuerzos de integración y prioriza el diseño/ajuste del controlador (PID).
- Aprovechamiento del hardware existente: El S7-300 es un PLC modular robusto, con periféricos (AI, contadores, ET200) y conectividad industrial que ya han sido instalados y probados en la planta; reutilizarlos preserva la “cara” industrial del banco y facilita la trazabilidad de señales (direcciones, módulos, contadores).
- Cobertura de objetivos del proyecto (identificar, controlar y enseñar). La metodología local ya contempla un *pipeline* de identificación (diseño del experimento, adquisición, acondicionamiento, validación), lo que encaja con Simulink/Toolbox de Identificación y con la operación OPC en tiempo real para cerrar lazo y medir desempeño (tiempo de estabilización, sobreimpulso).

- Escalabilidad hacia control multivariable avanzado. Una vez identificado el modelo, la plataforma permite migrar desde PID con desacoplador a control por reubicación de polos con observador de estados discretizado—una línea ya demostrada en la misma planta a nivel de simulación y banco de pruebas.

Implicaciones operativas de la selección

- Comunicación servidor OPC enlazado al S7-300/CP343 y MATLAB/Simulink; variables del PLC publicadas para lectura/escritura en tiempo real.
- Identificación diseño de experimentos, adquisición y preparación de datos con el Toolbox de Identificación, siguiendo el procedimiento utilizado en la planta.
- Control inicial PID (continuo → discretizado) con criterios de muestreo (Nyquist–Shannon) y desacopladores; posterior comparación con control de estados/observador.
- Guía didáctica prácticas ya existentes de identificación/control y documentación de hardware (CPU 317-2 PN/DP, ET200S, SIMOCODE) que facilitan la elaboración de tu manual.

2.3 Diagnóstico del estado inicial de la planta

Una vez definido el enfoque metodológico, el proceso inició con un diagnóstico exhaustivo del estado inicial de la planta. Esta evaluación fue indispensable porque permitió identificar con precisión las fallas existentes antes de proceder con cualquier actividad de repotenciación. Para ello, se realizó una inspección física y eléctrica que incluyó la revisión del gabinete de control, las conexiones internas, los dispositivos de protección, las rutas de cableado y las condiciones mecánicas de los equipos. Durante esta etapa se documentaron cuidadosamente anomalías tales como conexiones debilitadas y presencia de sulfatación en algunos módulos y terminales.

En paralelo, se verificó el estado general de los sensores y del variador de frecuencia, evaluando su capacidad de respuesta y la coherencia de sus señales. Asimismo, se inspeccionó el sistema descentralizado de E/S basado en módulos ET200S, donde se detectaron varios comportamientos irregulares asociados a fallas internas en su módulo relé. La Figura 2.2 permite observar el estado inicial del tablero de control, y en la figura 2.3 se evidencia las fallas de comunicación de los equipos.

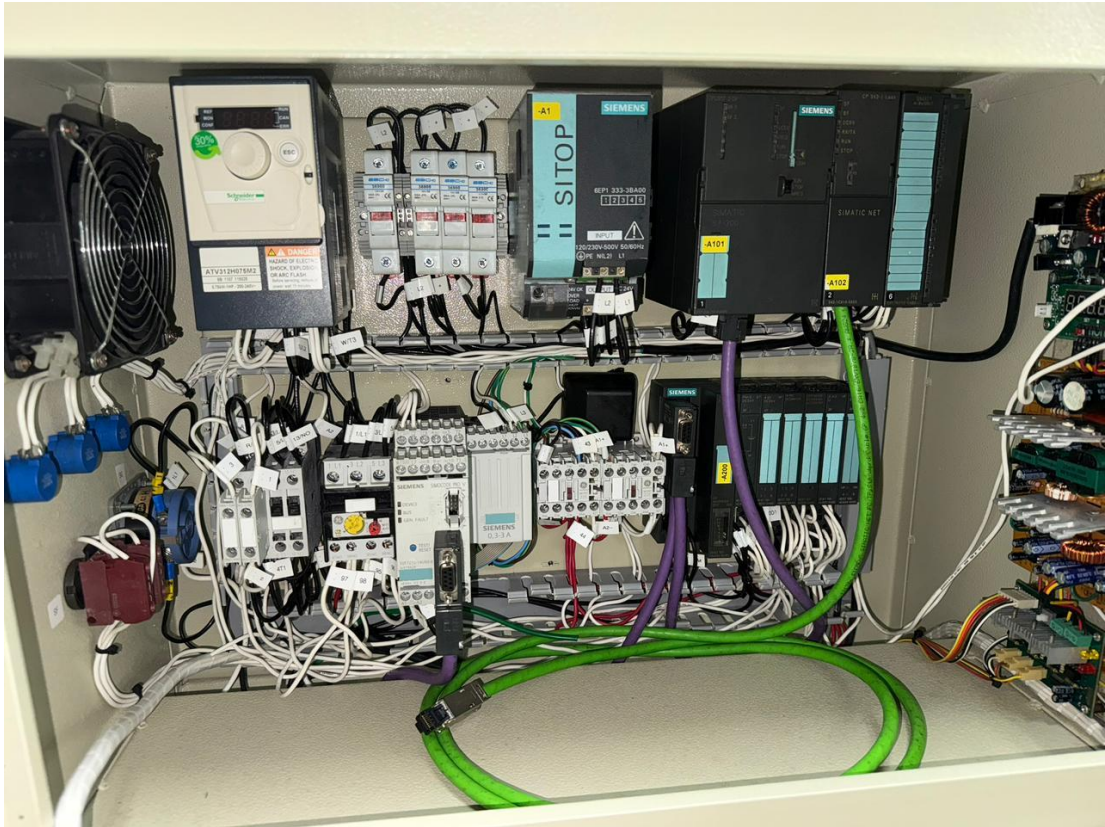


Figura 2.2 Tablero de control de la planta



Figura 2.3 Equipos con falla de comunicación

Además de la inspección funcional, se elaboró un registro detallado del estado de energización, en el que se midieron tensiones, corrientes y continuidad en distintos puntos del sistema. Esta verificación permitió asegurar que no existieran cortocircuitos ni cableado en mal estado, y que las protecciones se encontraran debidamente operativas. Para complementar esta información, en los apéndices se presenta el diagrama eléctrico que se realizó en la planta, lo cual permitió comprender la arquitectura eléctrica del sistema antes de intervenirlo.

2.4 Sustitución, reparación y repotenciación de equipos

Una vez concluido el diagnóstico inicial, fue evidente que la causa principal de los problemas de comunicación y de los fallos de bus en la planta se encontraba en el sistema descentralizado de E/S basado en la ET200S. En particular, el módulo IM151-1 Standard presentaba el estado “Not reachable” dentro del entorno TIA Portal, acompañado simultáneamente de los errores BF (Bus Fault) y SF (System Fault) en el PLC S7-300. Debido a ello, la repotenciación se orientó, en primera instancia, a restaurar la infraestructura de comunicación PROFIBUS y asegurar la disponibilidad eléctrica y lógica de cada módulo.

Durante esta intervención se identificó que el terminal de la ET200S, el cual es indispensable para completar internamente la línea de señalización del bus dentro de la estación, no estaba presente físicamente. Esta ausencia impedía que el PLC reconociera correctamente la arquitectura instalada. Tras una búsqueda en documentación técnica y foros especializados, se localizó el esquema eléctrico del terminal recomendado para la IM151-1 Standard, el cual consistía en una red resistiva conformada por tres resistencias de 150 Ω . Antes de fabricar la solución definitiva, se probó el circuito en una protoboard, conectando las resistencias con ayuda de los jumpers al extremo del último módulo de la estación.

Posteriormente, una vez verificado que la red resistiva funcionaba como se esperaba, se diseñó e imprimió una PCB dedicada, garantizando así la instalación permanente del terminal. Tal como se muestra en la Figura 2.4, la placa PCB diseñada replicó fielmente la función del terminal original de la ET200S.

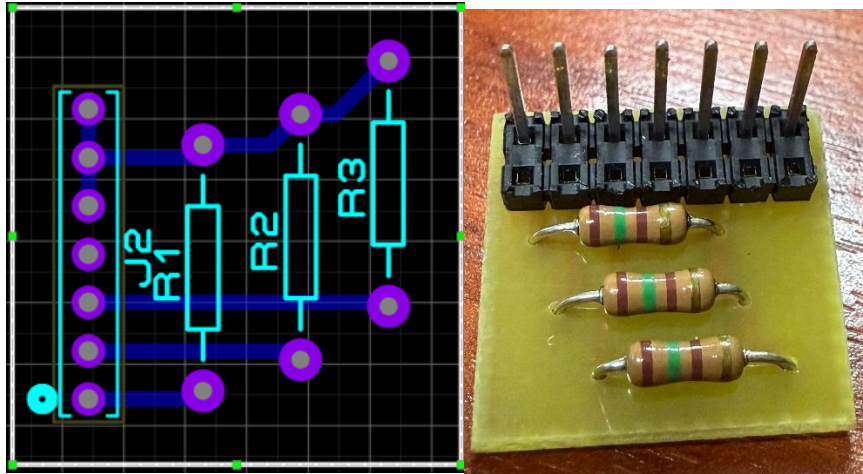


Figura 2.4 Placa PCB que sustituye módulo terminal del ET200S

Tras instalar la placa y retirar el módulo relé sulfatado que presentaba fallas intermitentes, la estación ET200S fue reconocida inmediatamente por el PLC, desapareciendo por completo las alarmas BF y SF. Este resultado confirmó que la causa del fallo estaba asociada tanto a la ausencia del terminal como al deterioro del módulo relé.

En paralelo, se desarrolló una segunda PCB destinada a sustituir las funciones del módulo relé dañado. Esta placa incorporó dos relés de 24 VDC, su propósito fue accionar dos contactos tipo normalmente abierto (NO) que permiten controlar una fuente de corriente continua utilizada para modificar la excitación del alternador uno de los relés activaba la función “UP” para incrementar el voltaje de excitación y el otro la función “DOWN” para disminuirlo. Ambos relés eran energizados directamente desde las salidas digitales disponibles del módulo de salidas digitales (DO) de la ET200S, aprovechando la infraestructura existente sin necesidad de adquirir un nuevo módulo.

La Figura 2.5 presenta la placa PCB de relés diseñada para esta función, donde se puede observar la distribución de los componentes y los conectores utilizados.

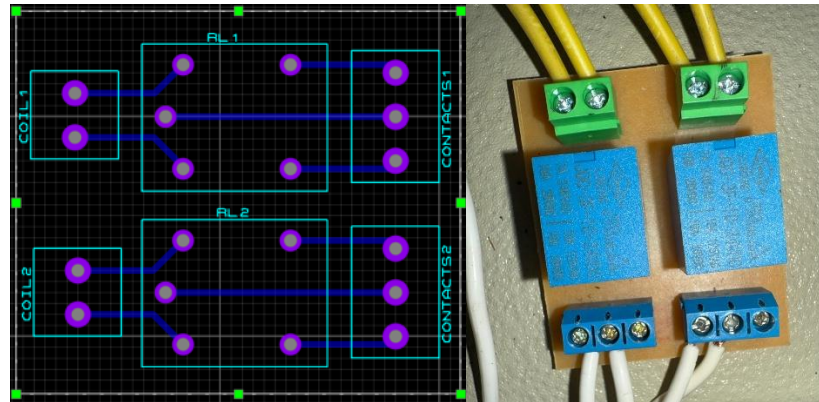


Figura 2.5 Placa PCB que sustituye el módulo relé del ET200S

Finalmente, la restauración del sistema fue complementada con la verificación de las fuentes DC y la reorganización del cableado del tablero de control, asegurando que todos los elementos intervenidos cumplieran con criterios de confiabilidad y estabilidad eléctrica para las etapas posteriores del proyecto.

2.5 Verificación y calibración del hardware industrial

Con la estación ET200S completamente funcional y la comunicación PROFIBUS restituida, se inició una etapa de verificación integral del hardware industrial involucrado en la operación de la planta. Esta fase permitió asegurar que el PLC, la ET200S, el SIMOCODE Pro V y el variador de frecuencia operaran de manera coherente antes de proceder con el modelado e identificación.

El primer dispositivo sometido a pruebas fue el variador de frecuencia Altivar 312. Las pruebas se realizaron con el motor conectado y en operación directa, ejecutando aceleraciones, desaceleraciones y cambios de consigna. Debido a que el variador mantenía su configuración del proyecto anterior, no fue necesario modificar parámetros avanzados, salvo la comprobación de sus valores nominales. Estas pruebas confirmaron que el variador respondía correctamente y mantenía estabilidad durante toda la secuencia de ensayo.

Posteriormente, se verificó la operatividad del PLC Siemens S7-300 modelo 317-2AJ10-0AB0. Tras la instalación del terminal PCB en la ET200S y la retirada del módulo relé deteriorado, el diagnóstico de TIA Portal reportó un estado completamente estable. El PLC pudo comunicarse sin interrupciones con la estación descentralizada y, además, se comprobó que las DO del módulo digital

podían activar de manera confiable los relés de la PCB personalizada encargada del control de excitación.

De forma complementaria, se realizó la configuración del sistema SIMOCODE Pro V, que inicialmente se encontraba instalado, pero sin dirección PROFIBUS asignada. Esta condición impedía su detección por parte del PLC y del entorno de ingeniería. Para resolverlo, se adquirió un dispositivo externo de direccionamiento PROFIBUS equipado con selector DIP. Una vez conectado al SIMOCODE y establecida la dirección 8, el equipo fue reconocido de inmediato dentro de TIA Portal, permitiendo visualizar sus parámetros, diagnóstico y estado operativo. En la Figura 2.6 se aprecia el dispositivo físico utilizado para la asignación de la dirección PROFIBUS.



Figura 2.6 Conector de direccionamiento PROFIBUS para el SIMOCODE PRO V

Finalmente, se realizaron pruebas sin carga y con carga en todos los equipos con el objetivo de evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación. Estas pruebas permitieron verificar la estabilidad de la comunicación, la respuesta de las salidas digitales, el funcionamiento de los relés en la PCB personalizada y la correcta interacción entre el variador Altivar 312, el SIMOCODE Pro V y el PLC. Este proceso garantizó que todos los elementos del sistema estuvieran plenamente operativos antes de continuar con los procesos de modelado, identificación y control.

2.6 Reconfiguración y programación en TIA Portal

La reconfiguración del sistema de control se llevó a cabo en el entorno TIA Portal, donde se reconstruyó completamente el proyecto de automatización de la planta de generación eléctrica. Esta reconstrucción fue necesaria debido a la pérdida de la configuración original y a la repotenciación del sistema, que implicó la sustitución de equipos dañados y la incorporación de nuevos dispositivos. El objetivo principal de esta etapa fue restablecer una lógica de control funcional que permitiera la adquisición confiable de señales, la actuación sobre los elementos de potencia y la posterior integración con herramientas de análisis y control en MATLAB/Simulink.

Como se puede observar en la figura 2.7 durante esta fase se integraron el PLC Siemens S7-300 (CPU 317-2 DP), la periferia descentralizada ET200S y el SIMOCODE Pro V, los cuales se interconectaron mediante una arquitectura de comunicación industrial basada en PROFIBUS DP. Esta red permitió el intercambio cíclico de datos necesarios para la operación del sistema; la configuración detallada de la comunicación, el direccionamiento y la validación del bus se presentan de manera específica en la Sección 2.7. En el presente apartado, la red se considera como el medio sobre el cual se ejecutó la lógica de control programada.

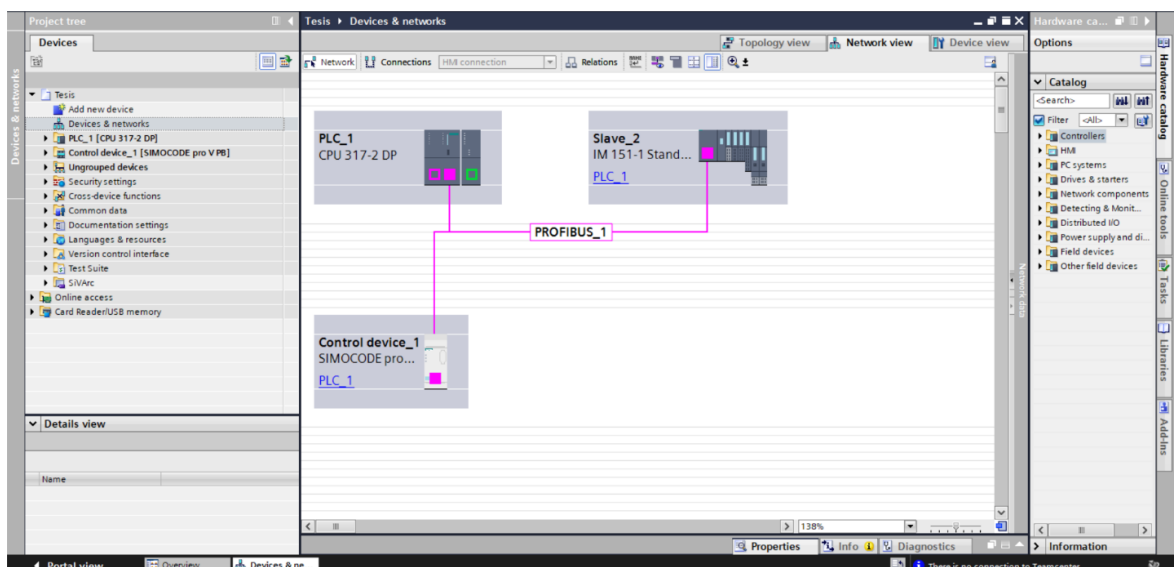


Figura 2.7 Vista de Dispositivos y Jerarquía del Proyecto de Automatización

2.6.1 Organización general del programa en el PLC

La estructura del programa de control en el PLC se organizó de manera modular, tomando como eje principal el bloque cíclico OB1, encargado de ejecutar de forma periódica la lógica general del sistema. Desde este bloque se coordinó la llamada a funciones y bloques funcionales específicos, permitiendo separar claramente las tareas de supervisión, adquisición de señales, procesamiento y actuación.

Para garantizar la integridad física de los componentes y la estabilidad de la planta, se implementó una lógica de control jerárquica en el OB1, la cual se sintetiza en el diagrama de flujo de la Figura 2.8.

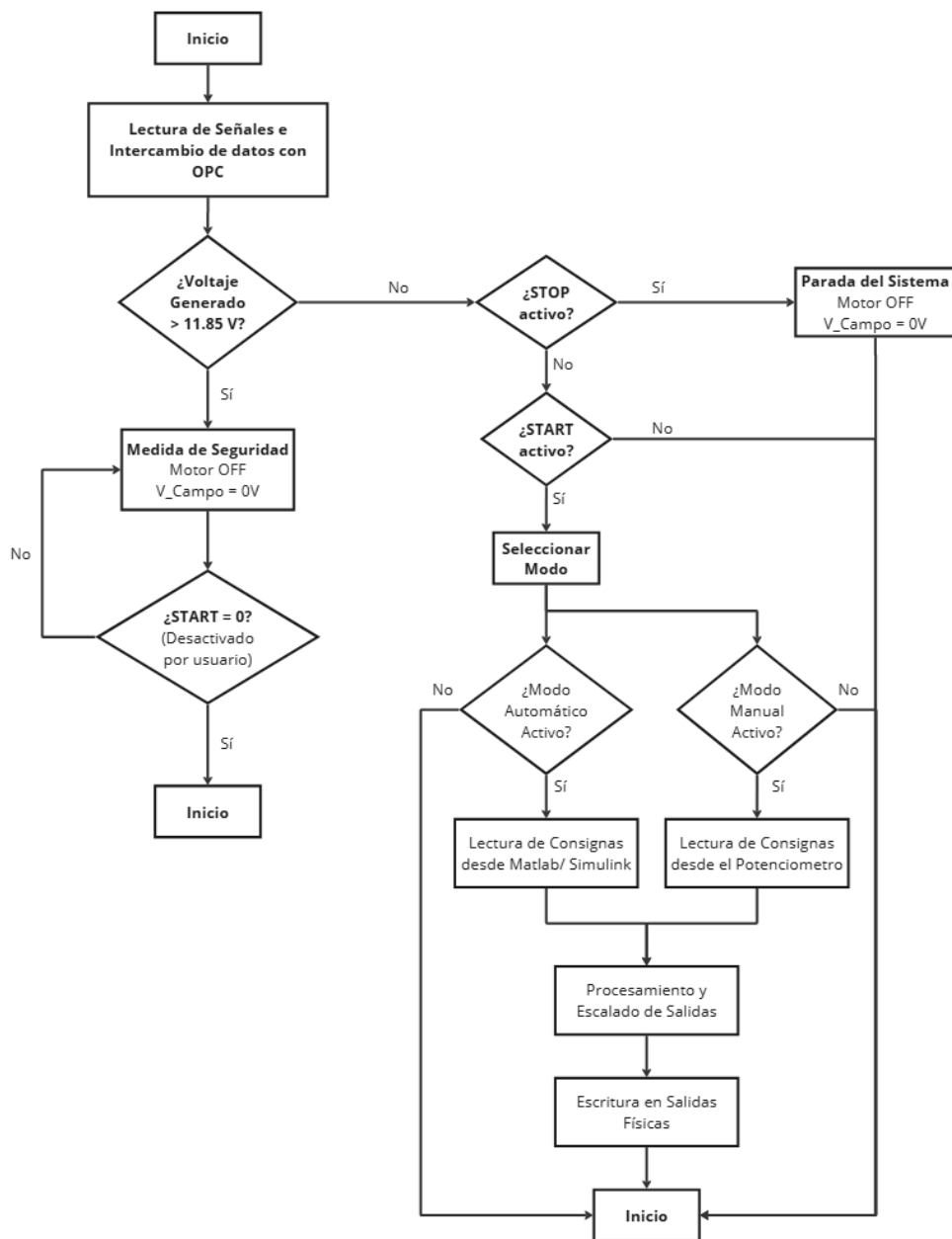


Figura 2.8 Estructura del bloque principal OB1 en TIA Portal

Como se observa en el diagrama, el ciclo de escaneo inicia con la adquisición centralizada de señales y el intercambio de datos con el servidor OPC. La ejecución posterior se rige bajo los siguientes niveles de prioridad

- **Nivel 1 Seguridad Crítica.** El sistema evalúa permanentemente el voltaje generado (V_{gen}). Si este supera el umbral de 11.85 V — límite operativo de los sensores instalados— se activa una medida de seguridad inmediata que apaga el motor y reduce el voltaje de campo a 0 V. Este estado constituye un enclavamiento

que exige una intervención del operador el sistema permanece bloqueado hasta que la señal de START sea desactivada físicamente y rearmada posteriormente.

- **Nivel 2 Gestión de Parada y Marcha.** En condiciones de voltaje seguro, se verifica el estado del comando STOP. Su activación detiene los elementos de potencia, pero a diferencia de la medida de seguridad, permite una reanudación directa si el comando START permanece activo.
- **Nivel 3 Selección de Modo y Operación.** Una vez validadas las condiciones de marcha, el programa discrimina entre el modo manual y automático. En el modo manual, las consignas de frecuencia y voltaje se obtienen de los potenciómetros físicos conectados a las entradas analógicas (%IW), mientras que, en el modo automático, el control se delega a las variables procesadas en MATLAB/Simulink y transmitidas vía OPC.

Finalmente, el ciclo concluye con el procesamiento y escalado de las señales en el bloque FB3, enviando las consignas finales hacia las salidas físicas (%QW) que gobiernan el variador de frecuencia y el sistema de excitación del alternador.

2.6.2 Adquisición y escalado de señales

La adquisición de señales del sistema se implementó de forma centralizada en el PLC, considerando tanto las variables provenientes de sensores analógicos y digitales como aquellas suministradas por dispositivos inteligentes de supervisión. Para ello, se desarrollaron bloques funcionales específicos orientados a la lectura, conversión y normalización de las señales antes de su uso en la lógica de control y en los procesos de modelado e identificación.

Tal como se observa en la Figura 2.9, el programa incorpora bloques dedicados al escalado de señales analógicas y al procesamiento del encoder incremental. En particular, se implementaron funciones independientes para el escalado de entradas analógicas, el escalado de salidas analógicas, la conversión de tipos de datos y el procesamiento del encoder incremental, lo que permitió mantener una estructura modular y reprogramable. Esta organización facilitó la separación entre la adquisición de hardware y el procesamiento lógico de las variables, manteniendo al programa principal con un orden y estilo profesional.



Figura 2.9 Bloques funcionales implementados en TIA Portal

Las señales analógicas provenientes de sensores y potenciómetros se leyeron inicialmente como valores crudos desde las direcciones de entrada del PLC (%IW). Entre estas señales se incluyeron mediciones asociadas al voltaje de campo, voltaje generado, potenciómetros de referencia de frecuencia y perturbación, entre otras. Posteriormente, estos valores se escalaron a magnitudes físicas mediante operaciones de conversión lineal, obteniendo variables expresadas en unidades comprensibles para el análisis del sistema. Las variables escaladas se almacenaron en bloques de datos específicos, permitiendo su uso consistente en diferentes partes del programa y su exposición hacia sistemas externos.

En paralelo, se integraron las variables eléctricas suministradas por el SIMOCODE Pro V, las cuales incluyen estados de falla, advertencias, mediciones de corriente, factor de potencia, voltaje de fase y potencia activa. La Figura 2.10 muestra parte de la tabla de variables del proyecto, donde se evidencia la asignación de direcciones, tipos de datos y accesibilidad de estas señales dentro del PLC. Estas variables fueron fundamentales para la supervisión del comportamiento eléctrico del sistema y para la validación de las condiciones de operación durante los experimentos.

	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Visibl...
1	Control device_1~Status-Group...	Default tag table	Bool	%I1.6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Control device_1~Status-Group...	Default tag table	Bool	%I1.7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Control device_1~Reset1-input	Default tag table	Bool	%Q1.6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Control device_1~Test1-input	Default tag table	Bool	%Q1.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Control device_1~CurrentI_L1(...	Default tag table	Word	%IW3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Control device_1~CurrentI_L2(...	Default tag table	Word	%IW5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Control device_1~CurrentI_L3(...	Default tag table	Word	%IW7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Control device_1~PhaseUnbala...	Default tag table	Word	%IW9		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	DI_MODO_MANUAL	Default tag table	Bool	%I0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	DI_MODO_AUTO	Default tag table	Bool	%I0.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	I_COUNT_FREQ_ENCODER_RAW	Default tag table	DWord	%ID288		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	AI_POT_CAMPO_RAW	Default tag table	Int	%IW272		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	AI_POT_FREQ_RAW	Default tag table	Int	%IW276		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	AI_POT_PERT_RAW	Default tag table	Int	%IW280		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	AI_VOLT_CAMPO_RAW	Default tag table	Int	%IW284		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	AI_VOLT_GEN_RAW	Default tag table	Int	%IW286		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	DO_SUBIR_CAMPO	Default tag table	Bool	%Q0.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	DO_BAJAR_CAMPO	Default tag table	Bool	%Q0.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19	DO_ACTIVAR_CARGA	Default tag table	Bool	%Q0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
20	AO_FREQ_CONTROL	Default tag table	Int	%QW256		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21	AO_PERT_CONTROL	Default tag table	Int	%QW258		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
22	Control device_1~PLC/PCS-OFF	Default tag table	Bool	%Q1.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
23	Control device_1~Status-OFF	Default tag table	Bool	%I1.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
24	Control device_1~Status-ON>	Default tag table	Bool	%I1.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25	Control device_1~Event-Prewar...	Default tag table	Bool	%I1.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
26	Control device_1~Status-Remo...	Default tag table	Bool	%I1.5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
27	Control device_1~PLC/PCS-ON>	Default tag table	Bool	%Q1.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
28	Control device_1~EmergencySt...	Default tag table	Bool	%Q1.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
29	DO_ACTIVAR_CONTADOR	Default tag table	Byte	%QB292		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
30	Seguridad1	Default tag table	Bool	%M7.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
31	Control_Seguridad	Default tag table	Bool	%M20.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
32	Dato1	Default tag table	Bool	%M20.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
33	Dato2	Default tag table	Bool	%M20.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 2.10 Lista de variables del Sistema

La medición de la velocidad del eje del conjunto motor–alternador se realizó mediante un codificador incremental, cuya señal se procesó a través de un bloque funcional dedicado. En este bloque se contabilizaron los pulsos generados durante un intervalo de tiempo definido, permitiendo calcular la frecuencia de giro del eje. A partir de esta información se determinó la frecuencia eléctrica generada, variable clave para el control y la identificación del sistema. Para mejorar la estabilidad de la señal, se incorporaron técnicas básicas de filtrado y promediado, reduciendo el efecto del ruido y de fluctuaciones instantáneas.

Finalmente, todas las variables adquiridas y escaladas se organizaron en bloques de datos estructurados, lo que permitió una integración ordenada con el sistema OPC y con las herramientas de análisis utilizadas posteriormente. Esta estrategia aseguró coherencia entre la adquisición de señales, la lógica de control y la etapa de modelado e identificación desarrollada en capítulos posteriores.

2.6.3 Lógica de actuación sobre variador, excitación y banco de cargas

La lógica de actuación del sistema se implementó principalmente dentro del bloque FB3 – Escalar Salidas Analógicas, FB5 – Setpoints, y FC6 – SIMOCODE PRO V, los cuales se ejecutan cuando el sistema opera en modo automático o manual. En estos bloques se concentraron las acciones de control sobre los

principales elementos de potencia de la planta el variador de frecuencia que gobierna el motor, el sistema de excitación del alternador y el banco de cargas resistivas. Esta lógica permitió traducir las consignas provenientes del sistema OPC en señales físicas de actuación, garantizando coherencia entre el control supervisado y la operación real de la planta.

Tal como se muestra en la Figura 2.11, las consignas de frecuencia y perturbación enviadas desde el sistema OPC fueron procesadas mediante el bloque de escalado de salidas analógicas, el cual convirtió estas referencias a los rangos eléctricos requeridos por el variador de frecuencia y por el actuador asociado a la perturbación. Las señales escaladas se enviaron posteriormente a las salidas analógicas del PLC, permitiendo un control continuo de la velocidad del motor y, en consecuencia, de la frecuencia eléctrica generada.

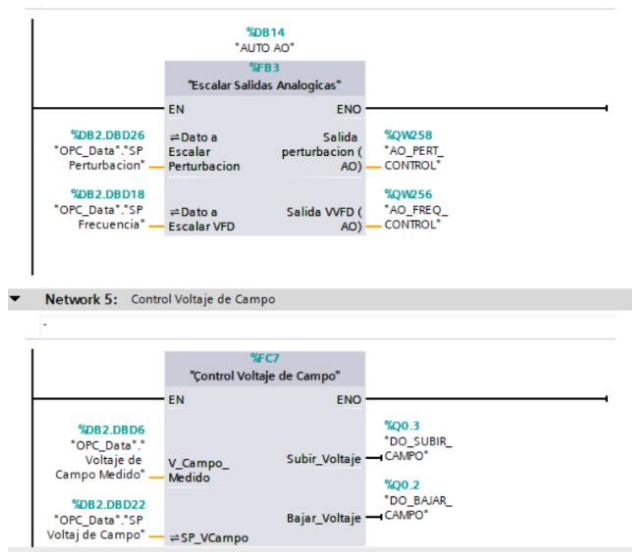


Figura 2.11 Implementación de la lógica de actuación analógica en el bloque FC2

El control de la excitación del alternador se implementó mediante un bloque funcional específico (FC7 – Control Voltaje de Campo), encargado de comparar el voltaje de campo medido con su respectiva consigna y generar señales digitales para incrementar o disminuir la excitación. Este esquema permitió regular el nivel de tensión generada de manera discreta, manteniendo una lógica de actuación simple y robusta acorde con las características del sistema.

La lógica de encendido y apagado del motor se implementó mediante salidas digitales asociadas al SIMOCODE PRO V. Como se observa en la Figura 2.12, las órdenes de MOTOR ON, MOTOR OFF y activación de carga fueron

gestionadas a través de señales binarias, permitiendo ejecutar secuencias de operación controladas y reproducibles durante las pruebas experimentales.

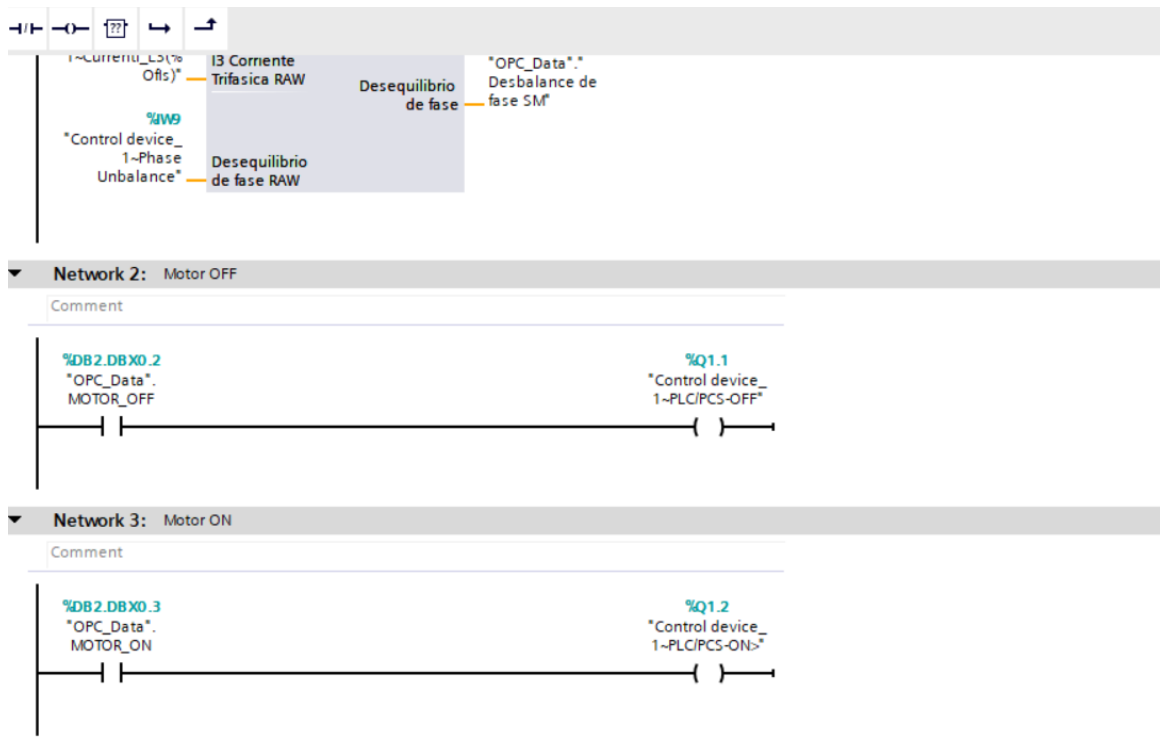


Figura 2.12 Redes del bloque FC6 correspondientes al encendido y apagado del motor

La principal diferencia entre el modo automático y manual del sistema radica en la fuente de las consignas, ya que en el modo manual se incorporó el escalado de señales provenientes de potenciómetros físicos, los cuales generan los valores de referencia que posteriormente son enviados al sistema OPC. Esta estrategia permitió validar el comportamiento del sistema de forma local y manual, manteniendo coherencia con la estructura de control utilizada en el modo automático.

La implementación paralela de los modos manual y automático, con una estructura lógica común, facilitó la validación progresiva del sistema y garantizó una transición segura entre ambos modos de operación. Esta lógica fue fundamental tanto para la ejecución de los experimentos de identificación del sistema como para la posterior validación del controlador PID.

2.6.4 Preparación de variables para integración con OPC y pruebas en línea

Como etapa final de la programación del PLC, se realizó la preparación y organización de las variables destinadas a la comunicación con el sistema OPC,

con el objetivo de permitir la supervisión, el control y la adquisición de datos desde una computadora externa. Para ello, se definió un bloque de datos específico (DB2 – OPC_Data) que concentró todas las variables relevantes del sistema, tanto de mando como de medición, facilitando su acceso estructurado desde el servidor OPC y los clientes externos.

Tal como se muestra en la Figura 2.13, el bloque OPC_Data incluyó señales binarias de control como START, STOP, MOTOR_ON, MOTOR_OFF y LOAD, así como variables analógicas correspondientes a magnitudes medidas y consignas del sistema. Entre estas se encuentran el voltaje generado, el voltaje de campo, la frecuencia medida, las consignas de frecuencia, voltaje de campo y perturbación, además de variables eléctricas trifásicas suministradas por el SIMOCODE Pro V, como las corrientes y el desbalance de fase. Esta organización permitió separar claramente las variables internas del PLC de aquellas expuestas para supervisión y control externo.

OPC_Data				
	Name	Data type	Offset	Start value
1	Static			
2	START	Bool	0.0	false
3	STOP	Bool	0.1	false
4	MOTOR_OFF	Bool	0.2	false
5	MOTOR_ON	Bool	0.3	false
6	Voltaje Generado	Real	2.0	0.0
7	Voltaje de Campo Me...	Real	6.0	0.0
8	Frecuencia Generada	Real	10.0	0.0
9	SP Voltaje Variador de ..	Real	14.0	0.0
10	SP Voltaje de Campo	Real	18.0	0.0
11	SP Perturbacion	Real	22.0	0.0
12	Pot Perturbacion	Real	26.0	0.0
13	Pot Voltaje Campo	Real	30.0	0.0
14	Pot Variador de Frecu...	Real	34.0	0.0
15	Matlab Perturbacion	Real	38.0	0.0
16	Matlab Voltaje Campo	Real	42.0	0.0
17	Matlab Variador de Fr...	Real	46.0	0.0
18	I1 SM	Real	50.0	0.0
19	I2 SM	Real	54.0	0.0
20	I3 SM	Real	58.0	0.0
21	Desbalance de fase SM	Real	62.0	0.0
22	LOAD	Bool	66.0	false
23	Modo Seguro	Bool	66.1	false

Figura 2.13 Bloque de datos OPC_Data en TIA Portal

Las variables almacenadas en este bloque fueron configuradas con atributos de visibilidad adecuados, permitiendo su lectura y escritura desde el servidor OPC de forma controlada. Esta estrategia garantizó que las consignas enviadas desde el entorno de supervisión se reflejaran correctamente en la lógica de control del PLC, mientras que las variables medidas proporcionaron una retroalimentación confiable del estado del sistema durante la operación.

Finalmente, como se ilustra en la Figura 2.14 se realizaron pruebas en línea para validar la correcta integración entre el PLC y el sistema OPC. Estas pruebas incluyeron la verificación de la actualización en tiempo real de las variables, la coherencia entre los valores visualizados en TIA Portal y en el cliente OPC, y la respuesta adecuada del sistema ante comandos externos. Los resultados confirmaron la estabilidad de la comunicación y dejaron el sistema preparado para

las etapas posteriores de diseño experimental, identificación del modelo y validación del controlador PID.

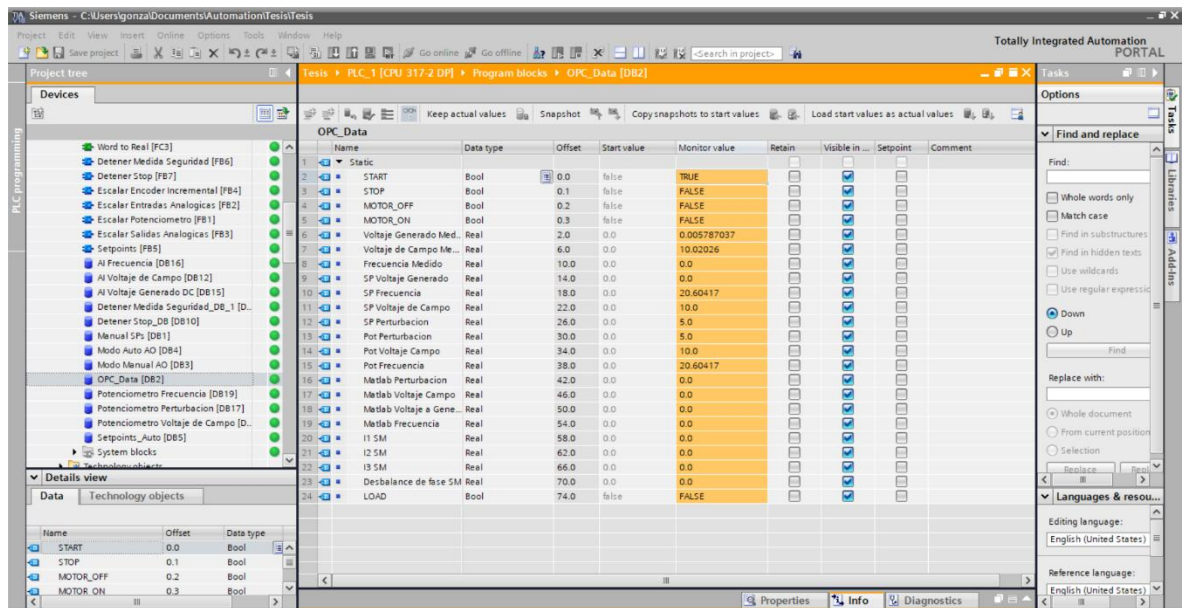


Figura 2.14 Prueba en Línea

2.7 Configuración de comunicación industrial

2.7.1 Comunicación PROFIBUS para adquisición/actuación

La comunicación industrial entre los dispositivos de campo y el controlador principal se implementó mediante una red PROFIBUS DP, la cual permitió la adquisición cíclica de señales y la actuación en tiempo real sobre los elementos de la planta. Esta red fue seleccionada debido a su amplio uso en entornos industriales, su carácter determinista y su compatibilidad nativa con los equipos Siemens utilizados en el proyecto.

La arquitectura de la red PROFIBUS se configuró bajo un esquema maestro-esclavo, en el cual el PLC Siemens S7-300 (CPU 317-2 DP) actuó como maestro del bus. A este se integraron como dispositivos esclavos la periferia descentralizada ET200S y el SIMOCODE Pro V, encargados de la adquisición de señales de campo y de la supervisión eléctrica del sistema, respectivamente. La Figura 2.15 muestra la topología final de la red PROFIBUS configurada en TIA Portal, donde se aprecia la interconexión entre los dispositivos y su pertenencia a un mismo segmento de red.

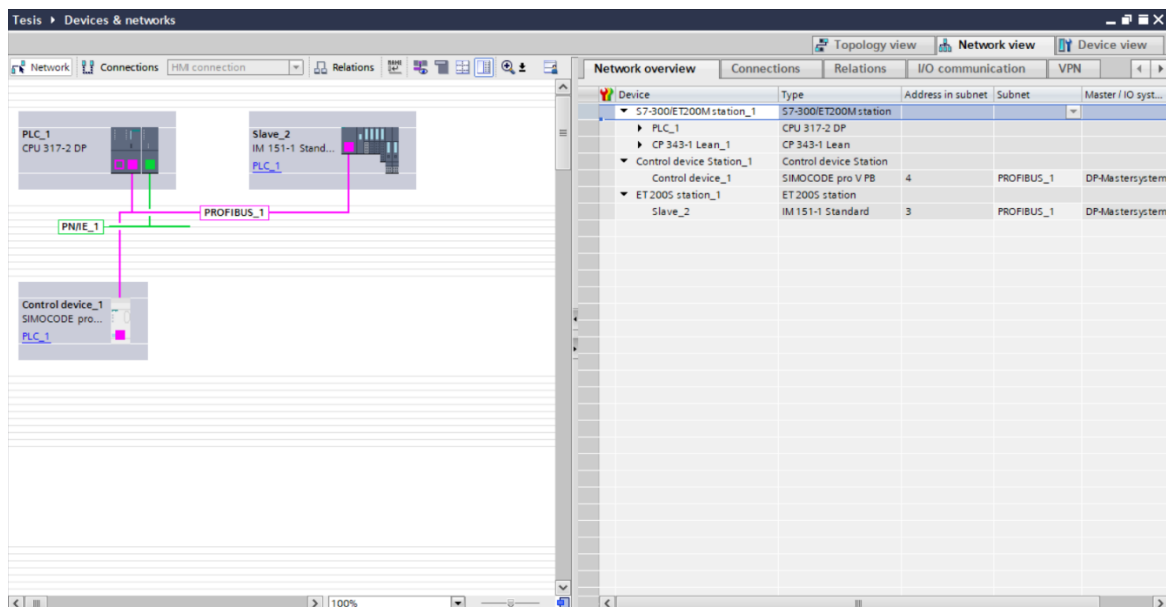


Figura 2.15 Topología de la red PROFIBUS DP configurada en TIA Portal

En el proceso de configuración se asignaron direcciones PROFIBUS únicas a cada dispositivo, garantizando una comunicación ordenada y sin conflictos en el bus. El PLC fue configurado con la dirección PROFIBUS 2, la ET200S con la dirección 3 y el SIMOCODE Pro V con la dirección 4, conforme a la planificación del sistema. Esta asignación permitió una identificación clara de cada nodo dentro de la red y facilitó la posterior integración de los módulos de entrada y salida asociados a cada dispositivo.

La ET200S se utilizó principalmente para la adquisición de señales analógicas y digitales, así como para la actuación sobre dispositivos externos, permitiendo reducir el cableado hacia el PLC y aumentar el modularidad del sistema. Por su parte, el SIMOCODE Pro V proporcionó al PLC variables eléctricas relevantes del motor y del sistema trifásico, además de funciones de protección y diagnóstico. La comunicación PROFIBUS permitió que estas variables se actualizarán de forma cíclica y sincronizada con el ciclo de control del PLC.

La correcta configuración y validación de la red PROFIBUS fue fundamental para garantizar la confiabilidad de las señales utilizadas durante las etapas de adquisición de datos, identificación del modelo y validación del controlador. Esta infraestructura de comunicación sirvió como base para la integración posterior del sistema OPC y para la interacción del PLC con herramientas externas de análisis y control, descritas en la sección siguiente.

2.7.2 Comunicación OPC (Profinet/Ethernet) con MATLAB

Para lograr la interoperabilidad entre el nivel de control industrial (PLC Siemens S7-300) y el nivel de supervisión y procesamiento avanzado (MATLAB/Simulink), se implementó una arquitectura de comunicación basada en el estándar OPC (OLE for Process Control). Esta estrategia fue fundamental para superar la incompatibilidad nativa entre el protocolo industrial del PLC y el entorno de simulación matemática.

La configuración se realizó utilizando el software KEPServerEX, el cual actuó como servidor OPC. Este programa se encargó de gestionar el intercambio de datos en tiempo real a través de la red Ethernet industrial establecida previamente. Como se puede observar en la Figura 2.16, se definió un canal de comunicación utilizando el driver Siemens TCP/IP Ethernet, seleccionando el modelo de dispositivo S7-300. Para establecer el enlace físico, se asignó al PLC la dirección IP 200.126.14.100, lo que permitió identificarlo de manera única dentro de la red local del laboratorio.

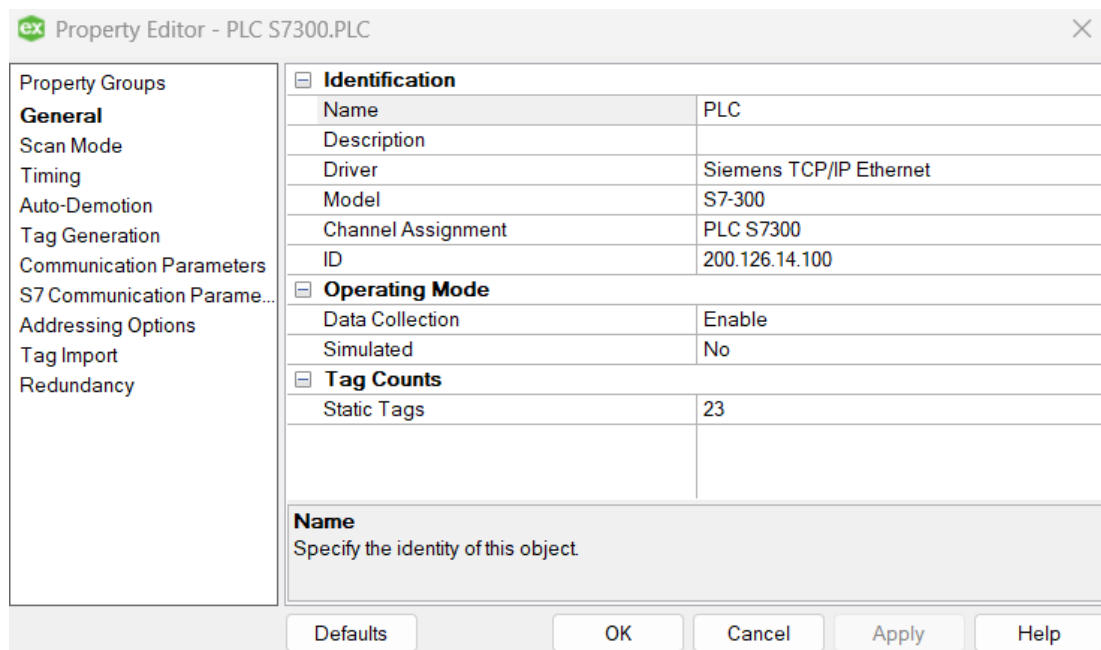


Figura 2.16 Configuración del canal y dispositivo en KEPServerEX con la IP 200.126.14.100

Una vez establecido el enlace de comunicación, se procedió al mapeo de las variables de interés. Debido a que la lógica del PLC centralizó los datos en el bloque de datos global DB2 (OPC_Data), el servidor OPC se configuró para apuntar específicamente a las direcciones de memoria de este bloque.

Como se muestra en la Figura 2.17, se crearon tags (etiquetas) correspondientes a las variables críticas del proceso, respetando el tipo de dato definido en el TIA Portal. Por ejemplo, las variables analógicas de control como MATLAB VOLTAJE CAMPO y MATLAB VOLTAJE VARIADOR DE FRECUENCIA se direccionaron a DB2.DBD42 y DB2.DBD46 respectivamente, configuradas como tipo Float para manejar decimales con precisión. De igual manera, las variables de monitoreo como FRECUENCIA GENERADA (DB2.DBD10) y VOLTAJE GENERADO MEDIDO (DB2.DBD2) se habilitaron para lectura continua.

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling
VOLTAJE GENERADO	DB2.DBD2	Float	100	None
VOLTAJE DE CAMPO MEDIDO	DB2.DBD6	Float	100	None
FRECUENCIA GENERADA	DB2.DBD10	Float	100	None
SP VOLTAJE VARIADOR DE FRECU...	DB2.DBD14	Float	100	None
SP VOLTAJE DE CAMPO	DB2.DBD18	Float	100	None
SP PERTURBACION	DB2.DBD22	Float	100	None
POT PERTURBACION	DB2.DBD26	Float	100	None
POT VOLTAJE CAMPO	DB2.DBD30	Float	100	None
POT VOLTAJE VARIADOR DE FREC...	DB2.DBD34	Float	100	None
MATLAB PERTURBACION	DB2.DBD38	Float	100	None
MATLAB VOLTAJE CAMPO	DB2.DBD42	Float	100	None
MATLAB VOLTAJE VARIADOR DE F...	DB2.DBD46	Float	100	None
I1 SM	DB2.DBD50	Float	100	None
I2 SM	DB2.DBD54	Float	100	None
I3 SM	DB2.DBD58	Float	100	None
DESBALANCE DE FASE SM	DB2.DBD62	Float	100	None
START	DB2.DBX0.0	Boolean	100	None
STOP	DB2.DBX0.1	Boolean	100	None
MOTOR OFF	DB2.DBX0.2	Boolean	100	None
MOTOR ON	DB2.DBX0.3	Boolean	100	None
LOAD	DB2.DBX66.0	Boolean	100	None
MODO SEGURO	DB2.DBX66.1	Boolean	100	None

Figura 2.17 Mapeo de variables (Tags) en el servidor OPC apuntando al DB2

2.8 Selección de la estructura del modelo

Para el desarrollo del modelo matemático de la planta de generación eléctrica se seleccionó una estructura de modelo de caja gris, considerando las características físicas del sistema y los objetivos del proyecto. La planta corresponde a un prototipo a escala con componentes electromecánicos reales, cuyo comportamiento global es conocido a partir de principios físicos, pero cuyos parámetros específicos no se encuentran completamente identificados. Este enfoque permitió combinar el conocimiento teórico del proceso —relación entre velocidad, frecuencia, excitación y carga— con datos experimentales obtenidos directamente del sistema, logrando un modelo interpretable y adecuado para el diseño de control.

2.8.1 Modelado matemático del sistema frecuencia-voltaje en el dominio del tiempo

Para el análisis dinámico de la planta de generación eléctrica a escala se adoptó como referencia metodológica el modelo desarrollado por Anchundia Veloz (2013), el cual fue propuesto específicamente para esta plataforma de laboratorio. En la presente tesis, se retoma la estructura del modelado y se la adapta al esquema actual de adquisición de datos e instrumentación disponible, manteniendo como objetivo obtener un modelo con complejidad controlada y utilidad directa para diseño de control.

Aunque la planta física incorpora un motor de inducción trifásico acoplado a un alternador automotriz, se emplea una representación equivalente para describir la dinámica dominante del conjunto motor–generador alrededor de un punto de operación. Siguiendo la aproximación de Anchundia Veloz (2013), el actuador mecánico se modela mediante un motor de corriente continua controlado por campo, debido a que (i) permite simplificar el análisis sin perder el comportamiento transitorio de interés; y (ii) al estar el motor de CA gobernado por un variador de frecuencia, su respuesta en velocidad y torque puede representarse de manera equivalente mediante un modelo reducido tipo CC en torno a condiciones nominales.

Con base en lo anterior, en la Figura 2.18 se presenta el circuito equivalente del motor controlado por campo. Cabe resaltar que, para esta tesis, dicho esquema fue redibujado y readaptado como elaboración propia, manteniendo la configuración conceptual del modelo base propuesto por Anchundia Veloz (2013), pero ajustando la presentación y notación para coherencia con este documento.

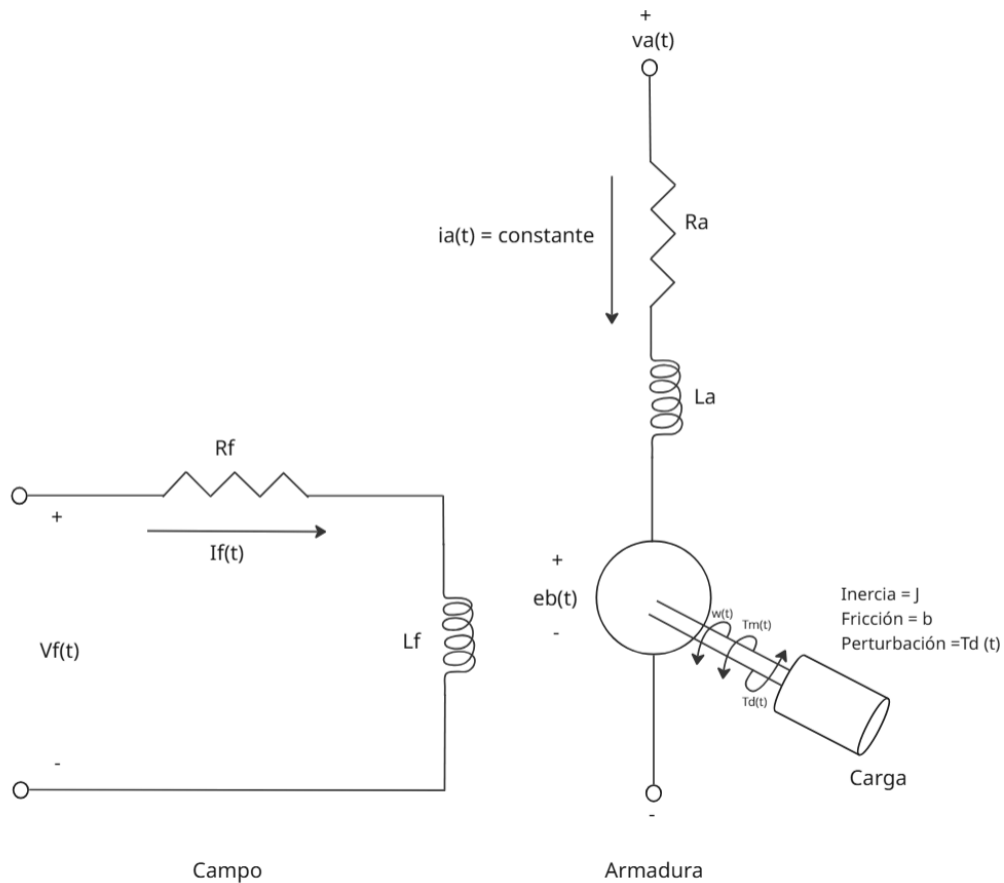


Figura 2.18 Circuito Equivalente del Motor de Corriente Continua

Aplicando la Ley de Voltajes de Kirchoff al devanado de campo (caracterizado por R_f y L_f), la dinámica eléctrica se expresa como

$$v_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \quad (2.1)$$

De acuerdo con la linealización utilizada en el trabajo de referencia, el torque electromagnético se relaciona linealmente con la corriente de campo mediante

$$T_m(t) = K_f i_f(t) \quad (2.2)$$

Al combinar ambas expresiones se obtiene un modelo de primer orden que vincula el torque con el voltaje de excitación

$$\tau_f \frac{dT_m(t)}{dt} + T_m(t) = K v_f(t) \quad (2.3)$$

donde $\tau_f = \frac{L_f}{R_f}$ y $K = \frac{K_f}{R_f}$ agrupan los parámetros eléctricos y electromecánicos del subsistema.

La respuesta mecánica se establece mediante el balance de torques en el eje, considerando la inercia equivalente J y la fricción viscosa b

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + b \omega(t) = T_m(t) - T_d(t) \quad (2.4)$$

donde $T_d(t)$ representa el torque de perturbación asociado al efecto de la carga. Para fines de control, dicho torque se aproxima mediante una relación proporcional con la carga equivalente $R_L(t)$

$$T_d(t) = K_d R_L(t) \quad (2.5)$$

Reordenando, la dinámica puede expresarse en forma estándar de primer orden

$$\tau_L \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = K_L(T_m(t) - K_d R_L(t)) \quad (2.6)$$

con $\tau_L = \frac{J}{b}$ y $K_L = \frac{1}{b}$. Finalmente, la frecuencia eléctrica generada por la planta se vincula con la velocidad angular del rotor mediante

$$f(t) = K_1 \omega(t) \quad (2.7)$$

Por otro lado, para el modelado del generador también se adopta el enfoque equivalente presentado por Anchundia Veloz (2013), en el cual el voltaje generado depende tanto de la excitación de campo como de la velocidad de giro. La Figura 2.19 muestra el circuito equivalente del generador utilizado como base; al igual que el caso anterior, este esquema fue readaptado y redibujado como elaboración propia, preservando la lógica del modelo original.

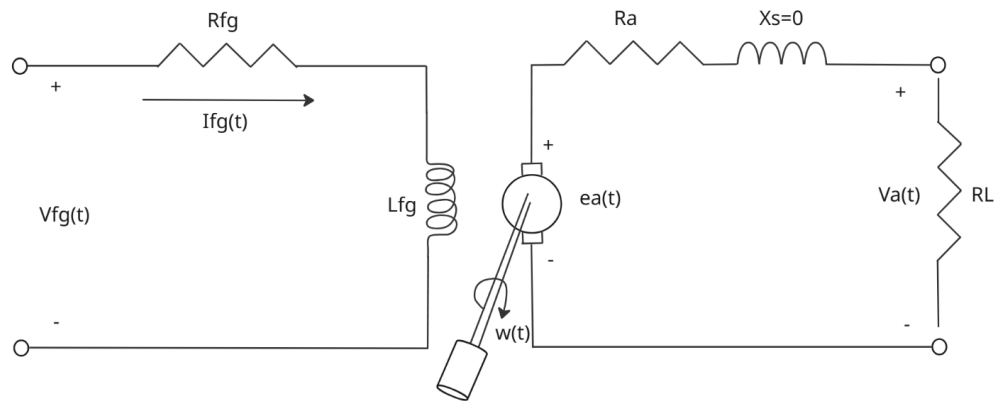


Figura 2.19 Circuito Equivalente del Generador de Corriente Continua

La dinámica de la corriente de campo del generador $i_{fg}(t)$ respecto al voltaje de excitación $v_{fg}(t)$ se aproxima como un sistema de primer orden

$$\tau_{fg} \frac{di_{fg}(t)}{dt} + i_{fg}(t) = K_{fg} v_{fg}(t) \quad (2.8)$$

Dada la naturaleza no lineal del proceso de generación, se emplea una linealización alrededor de un punto de operación para expresar el voltaje electromotriz interno como

$$e_a(t) = K_i i_{fg}(t) + K_w \omega(t) \quad (2.9)$$

y el voltaje terminal entregado a la carga como

$$v_a(t) = K_e e_a(t) + K_r R_L(t) \quad (2.10)$$

donde K_e y K_r recogen la sensibilidad del voltaje terminal frente a variaciones del voltaje interno y cambios de carga alrededor del punto de operación. Este conjunto de ecuaciones permite representar el acoplamiento entre excitación, velocidad (frecuencia) y voltaje generado, manteniendo una estructura adecuada para posterior identificación de parámetros y diseño de control.

2.8.2 Modelado matemático del sistema frecuencia-voltaje en el dominio del plano complejo s

Para representar el sistema frecuencia–voltaje en el dominio del plano complejo s , se emplea la transformada de Laplace como herramienta estándar de análisis en sistemas dinámicos y control. Bajo la suposición de linealidad alrededor de un punto de operación, con parámetros constantes y condiciones iniciales nulas, es posible transformar las ecuaciones diferenciales obtenidas en el dominio del tiempo a expresiones algebraicas en s , lo que facilita la obtención de funciones de transferencia y la construcción de modelos en forma de bloques.

Siguiendo la aproximación de Anchundia Veloz (2013), la dinámica del actuador mecánico del conjunto se expresa mediante un modelo equivalente de primer orden entre el voltaje de campo del motor y el torque electromagnético. Partiendo de la relación temporal del torque $T_m(t)$ en función del voltaje de campo $v_f(t)$ descrita en la ecuación (2.3), y aplicando la transformada de Laplace, se obtiene

$$\tau_f s T_m(s) + T_m(s) = K V_f(s) \Rightarrow \frac{T_m(s)}{V_f(s)} = \frac{K}{\tau_f s + 1} \quad (2.11)$$

En este punto, $T_m(s)$ representa el torque electromagnético del motor equivalente y $V_f(s)$ el voltaje de excitación de campo. La constante τ_f corresponde a la constante de tiempo del campo y K agrupa el efecto electromecánico equivalente del subsistema, de acuerdo con la formulación adoptada por Anchundia Veloz (2013).

De forma análoga, el efecto de la carga se incorpora como una perturbación mecánica equivalente. Siguiendo nuevamente el enfoque de Anchundia Veloz (2013), el torque perturbador se aproxima como una relación proporcional con la variación de carga $R_L(s)$

$$T_d(s) = K_d R_L(s) \quad (2.12)$$

Así, el torque neto aplicado al eje queda definido como

$$T_L(s) = T_m(s) - T_d(s) = T_m(s) - K_d R_L(s) \quad (2.13)$$

La dinámica mecánica velocidad–torque se describe mediante un sistema de primer orden

$$\tau_L s \Omega(s) + \Omega(s) = K_L T_L(s) \Rightarrow \frac{\Omega(s)}{T_L(s)} = \frac{K_L}{\tau_L s + 1} \quad (2.14)$$

donde $\Omega(s)$ corresponde a la velocidad angular del eje en [rad/s], τ_L es la constante de tiempo mecánica equivalente y K_L representa la ganancia mecánica del sistema.

Finalmente, puesto que la variable de interés del subsistema mecánico es la frecuencia eléctrica, se mantiene la relación proporcional entre frecuencia y velocidad angular

$$F(s) = K_1 \Omega(s) \quad (2.15)$$

Por otra parte, para el modelado del generador se conserva la estructura de representación linealizada propuesta por Anchundia Veloz (2013), en la cual el voltaje electromotriz interno depende de la excitación de campo y de la velocidad de giro. Bajo este esquema, el voltaje interno se expresa como

$$E_a(s) = K_i I_{fg}(s) + K_\omega \Omega(s) \quad (2.16)$$

donde $I_{fg}(s)$ es la corriente de campo del generador y el término $K_\omega \Omega(s)$ captura el acoplamiento del voltaje generado con la velocidad del eje.

La dinámica de la corriente de campo en función del voltaje de excitación se expresa mediante un primer orden

$$\tau_{fg} s I_{fg}(s) + I_{fg}(s) = K_{fg} V_{fg}(s) \Rightarrow \frac{I_{fg}(s)}{V_{fg}(s)} = \frac{K_{fg}}{\tau_{fg} s + 1} \quad (2.17)$$

Finalmente, el voltaje terminal entregado a la carga se modela como una relación lineal que incluye el efecto del voltaje interno y la variación de carga

$$V_a(s) = K_e E_a(s) + K_r R_L(s) \quad (2.18)$$

Estas expresiones en el dominio complejo s constituyen la base para construir una representación modular del sistema frecuencia–voltaje, identificar sus entradas, salidas y perturbaciones, y formular un modelo adecuado para el diseño de control en simulación y su posterior validación experimental.

2.8.3 Diagrama de bloques del sistema frecuencia–voltaje en el dominio del plano complejo s

Con el objetivo de visualizar la interconexión entre los subsistemas y disponer de un modelo directamente implementable en herramientas de simulación, las

ecuaciones obtenidas en el dominio s se representan mediante un diagrama de bloques. Siguiendo la estructura general utilizada por Anchundia Veloz (2013), el sistema se construye integrando el modelo del actuador mecánico (equivalente a la turbina o etapa motriz) con el modelo del generador (equivalente al alternador), de manera que la velocidad angular $\Omega(s)$ cumple un rol de acoplamiento entre ambos.

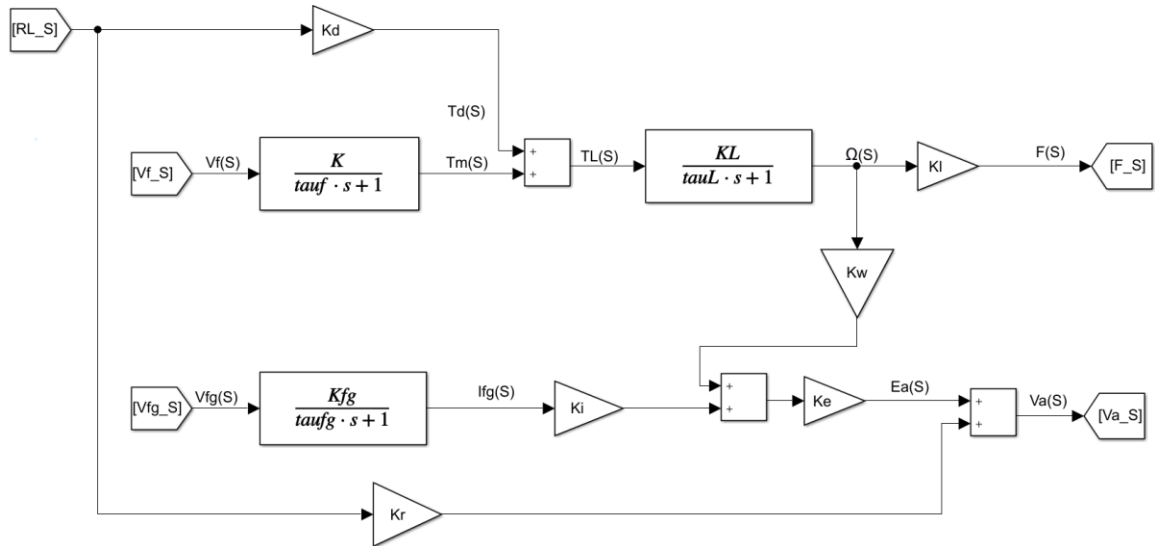


Figura 2.20 Diagrama de bloques del sistema frecuencia-voltaje

En el diagrama de bloques global (Figura 2.20), las variables de salida del sistema quedan definidas como la frecuencia $F(s)$ y el voltaje terminal $V_a(s)$. Las entradas asociadas a la acción de control corresponden al voltaje de campo del motor $V_f(s)$ y al voltaje de excitación del generador $V_{fg}(s)$. Adicionalmente, la variación de carga $R_L(s)$ se considera como señal de perturbación, debido a que afecta simultáneamente la dinámica mecánica mediante el término $T_d(s) = K_d R_L(s)$ y la dinámica eléctrica de salida mediante el término $K_r R_L(s)$. Bajo esta representación, el torque generado por el motor se obtiene mediante la función de transferencia $\frac{K}{\tau_f s + 1}$, la conversión torque-velocidad se describe por $\frac{K_L}{\tau_L s + 1}$, y la velocidad se transforma en frecuencia a través de K_1 ; mientras que en el generador, la excitación se modela con $\frac{K_{fg}}{\tau_{fg} s + 1}$, el voltaje interno incorpora los aportes de $I_{fg}(s)$ y $\Omega(s)$ a través de K_i y K_ω , y el voltaje terminal resulta de la combinación del voltaje interno y la perturbación de carga mediante K_e y K_r .

2.9 Desarrollo del Entorno de Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Una vez completada la programación, la configuración del hardware y la puesta en marcha del servidor OPC mediante KEPServerEX 6, se desarrollaron tres interfaces HMI en MATLAB/Simulink, orientadas a los distintos modos de operación de la planta de generación eléctrica

- HMI para modo manual de la planta de generación eléctrica.
- HMI para modo experimento de la planta de generación eléctrica.
- HMI para modo automático de la planta de generación eléctrica.

Antes de describir cada interfaz, es importante señalar que todas se diseñaron con el objetivo de facilitar la operación del sistema y la visualización de variables, proporcionando una interacción más cómoda y segura para el usuario. Para su implementación se utilizaron bloques Dashboard de Simulink y se organizó la lógica en subsistemas, con el fin de mantener una estructura más clara y ordenada.

De manera común, las tres interfaces se estructuraron en dos subsistemas principales, como se muestra en la Figura 2.21.

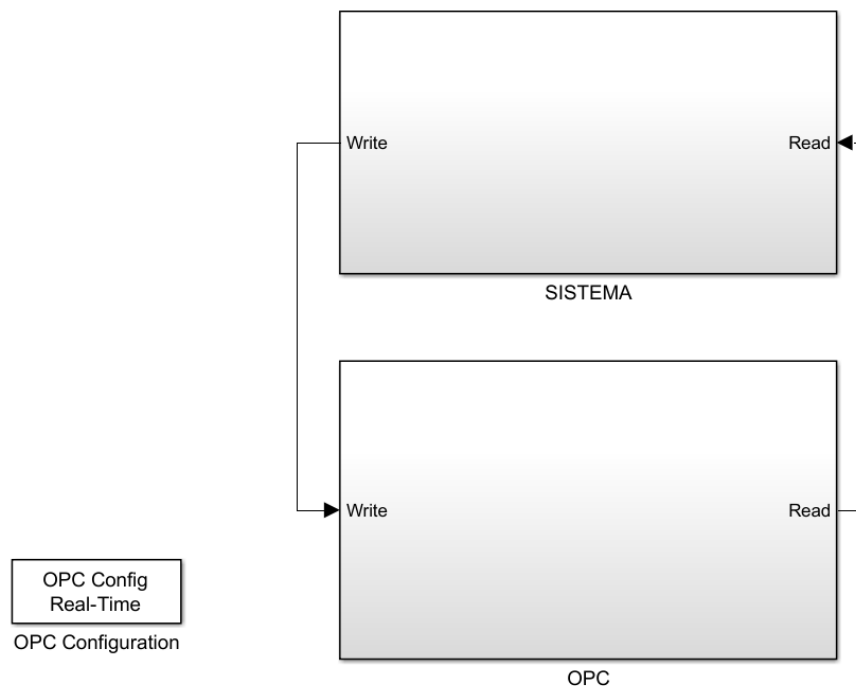


Figura 2.21 Estructura general de la interfaz HMI en Simulink

El primer subsistema, denominado OPC, se encarga de vincular Simulink/MATLAB con el servidor OPC, permitiendo tanto la lectura como la escritura de variables, tal como se aprecia en la Figura 2.22.

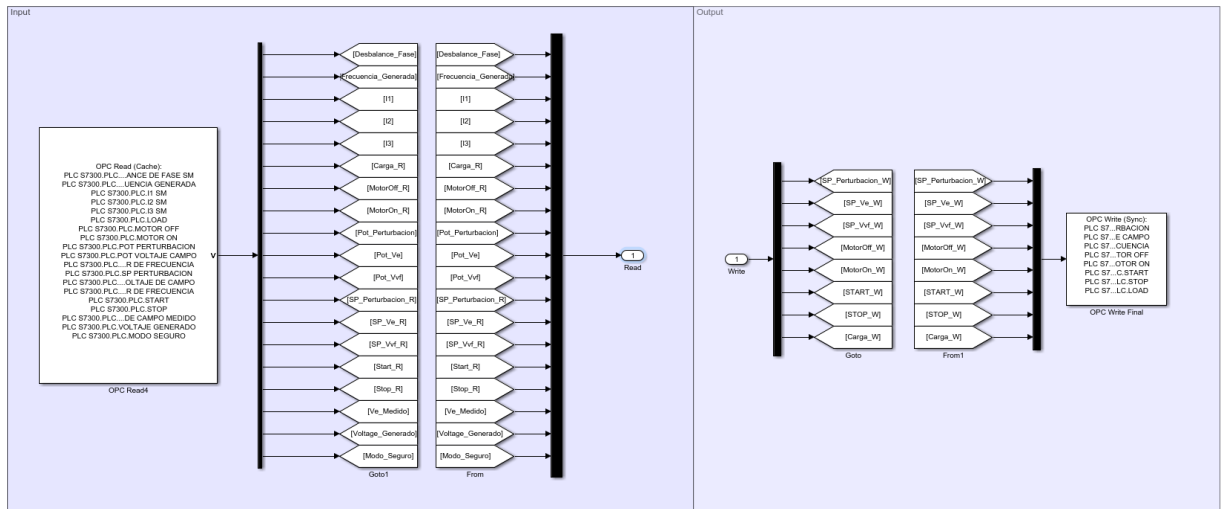


Figura 2.22 Subsistema OPC para lectura y escritura de variables entre Simulink y el servidor OPC

El segundo subsistema, denominado SISTEMA, integra los elementos de supervisión y control mediante Dashboard, así como los indicadores y displays necesarios. Este subsistema varía según el modo (manual, experimento o automático); sin embargo, en todos los casos mantiene la misma lógica general leer variables provenientes del OPC y enviar señales de escritura hacia el OPC, como se ilustra en la Figura 2.23.

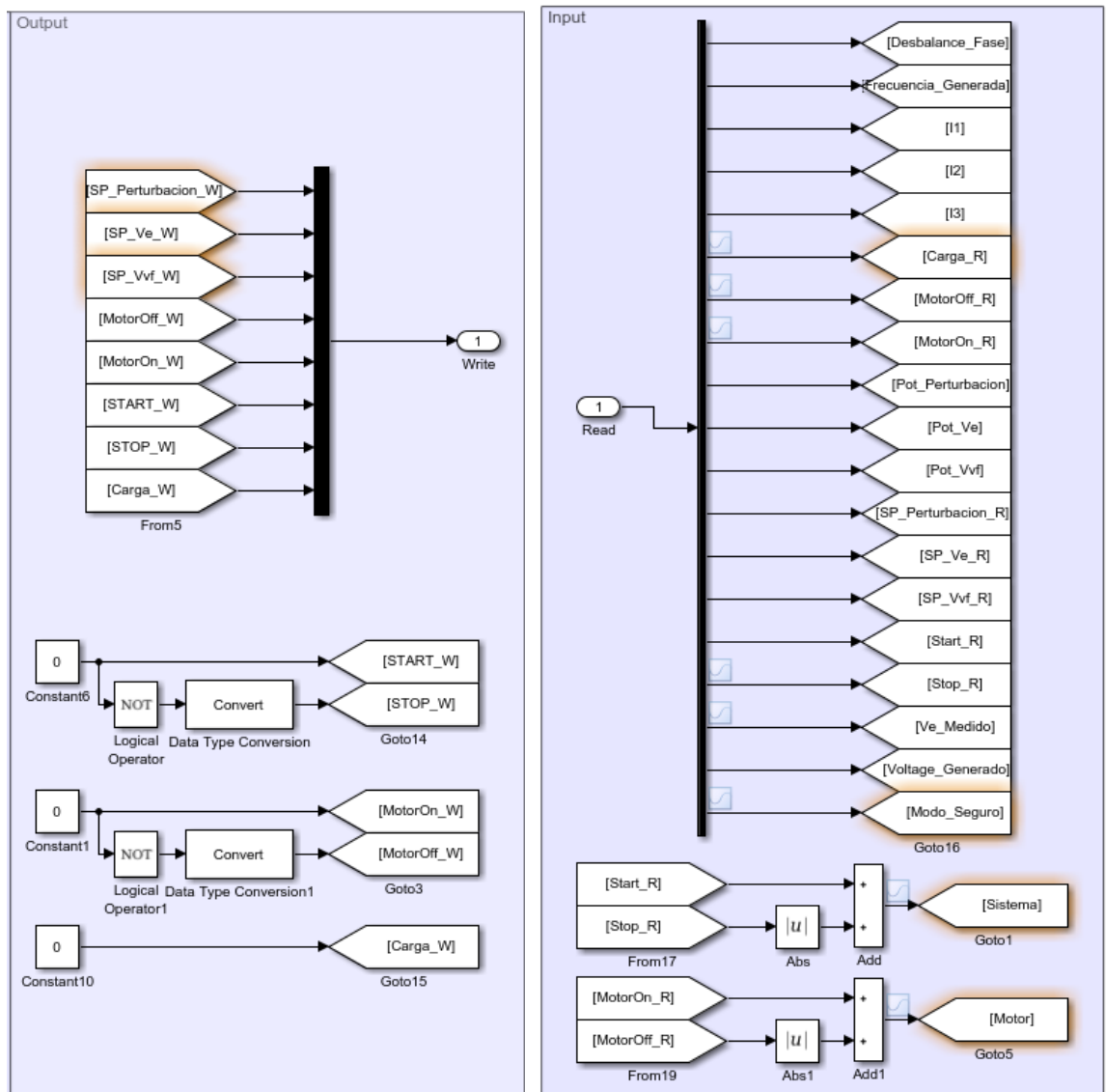


Figura 2.23 Subsistema SISTEMA para supervisión y control mediante bloques Dashboard y señales OPC

2.9.1 HMI para modo manual de la planta de generación eléctrica

Para que este panel de operación funcione de manera correcta, es indispensable que el modo manual de la planta sea previamente seleccionado mediante el interruptor ubicado físicamente en la planta de generación eléctrica. Solo bajo esta condición la interfaz HMI operará de forma coherente con el estado real del sistema.

Para la interfaz del modo manual, mostrada en la Figura 2.24, el panel se organizó en tres secciones principales con el fin de facilitar la supervisión y el control de la planta.

La primera sección corresponde a los puntos de ajuste, orientada a reflejar la lectura de los potenciómetros físicos del sistema. Estos permiten modificar variables relevantes de operación, como el voltaje de campo (0 a 10 V) y el voltaje del variador de frecuencia (0 a 10 V). Adicionalmente, se incluyen los puntos de ajustes, cuya diferencia frente a la lectura directa de los potenciómetros radica en que representan el valor efectivo que la planta utiliza durante su ejecución. Es importante recalcar que los puntos de ajustes solo se actualizan para igualarse a los valores de los potenciómetros cuando el sistema se encuentra encendido.

En la sección central se ubica el mando de control, desde el cual es posible activar o desactivar el sistema, el motor y la carga. En esta lógica de operación, tanto el motor como la carga únicamente pueden habilitarse cuando el sistema está activo, garantizando una secuencia de encendido segura.

En esta misma zona se incorporaron indicadores de estado para identificar visualmente la condición del sistema, el motor y la carga. Cuando el indicador se muestra en rojo, significa que el elemento está apagado; en verde, que se encuentra encendido; y en gris, que existe un error de comunicación entre MATLAB/Simulink y el servidor OPC. En cuanto al indicador de Modo Seguro, el color gris representa que está desactivado, mientras que el color amarillo indica que el sistema ha entrado en modo seguro. Tal como se definió en la programación, para desactivar esta condición se requiere esperar 5 segundos, luego apagar el sistema y, posteriormente, se podrá reanudar la operación de la planta.

Finalmente, en la parte derecha se dispone la sección de lectura de datos, donde se presentan las variables de interés para el monitoreo del proceso. Entre las más relevantes se encuentran la frecuencia del voltaje generado y el voltaje generado, debido a su relación directa con el desempeño de la planta.

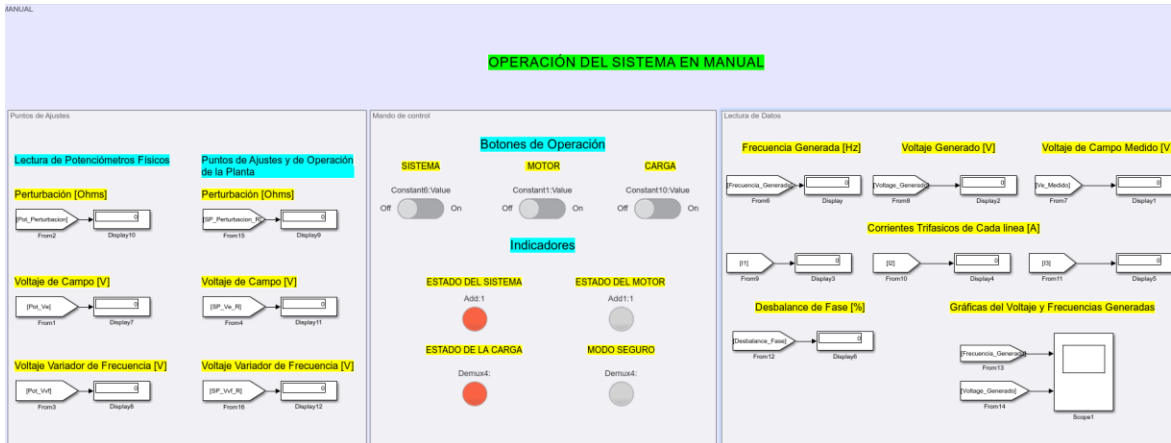


Figura 2.24 Panel de Operación en Modo Manual

2.9.2 HMI para modo experimento de la planta de generación eléctrica

Para que esta interfaz funcione de manera correcta, es necesario que el interruptor físico de la planta se encuentre seleccionado en modo automático. Tal como se muestra en la Figura 2.25, en esta pantalla, tanto el mando de control como la visualización de variables mantienen la misma estructura empleada en el modo manual.

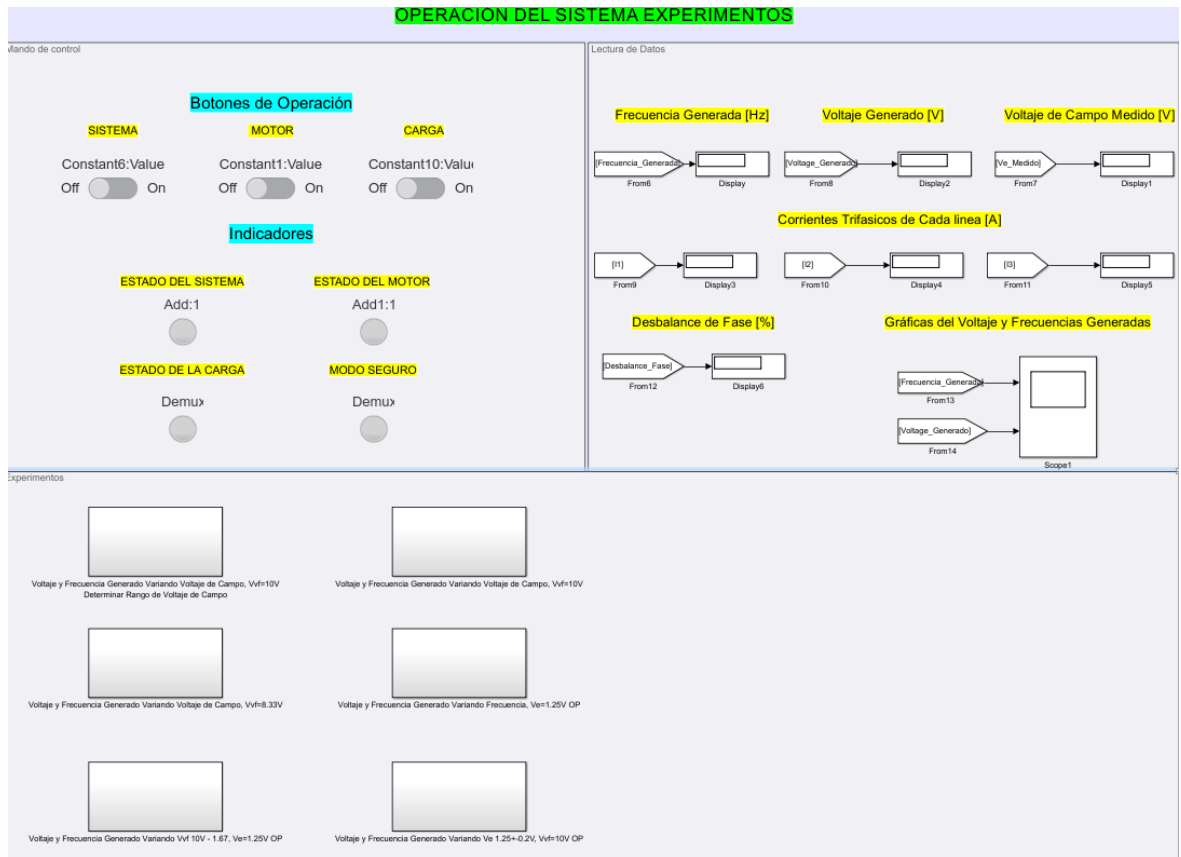


Figura 2.25 Panel de Operación en Modo Experimento

La principal diferencia de este panel radica en que las variables de control, específicamente el voltaje de campo y el voltaje del variador de frecuencia, no se ajustan mediante potenciómetros, sino que pueden ser generadas y modificadas directamente desde Simulink mediante distintos bloques de señal, como constante, escalón, entre otros. Esto permite ejecutar pruebas controladas con entradas definidas, facilitando la repetición de ensayos bajo condiciones similares. Se denomina modo experimento porque en esta interfaz se integraron los experimentos que se describen con mayor detalle en la Sección 2.10. En términos generales, como se ilustra en la Figura 2.26, el procedimiento consiste en aplicar variaciones programadas sobre las variables de control y registrar la respuesta del sistema. Posteriormente, los resultados obtenidos se exportan al entorno de trabajo de MATLAB, de modo que el operador pueda analizar, procesar y utilizar los datos en las etapas posteriores del proyecto.

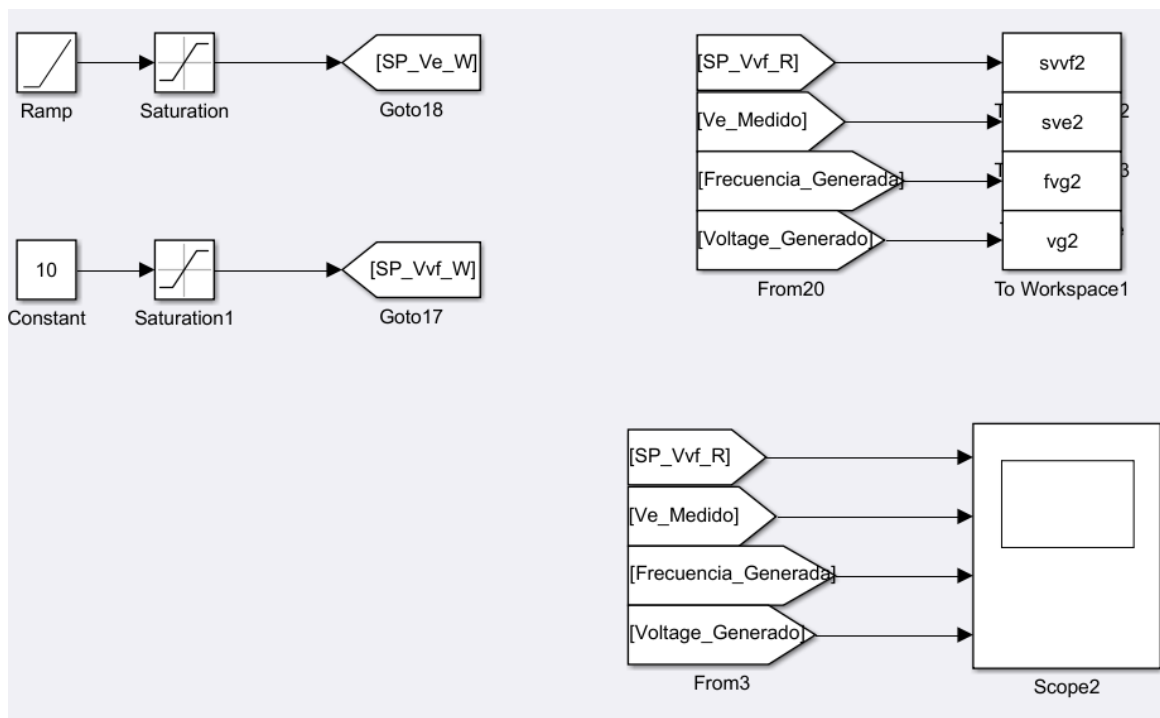


Figura 2.26 Esquema general de ejecución de experimentos y exportación de datos al entorno de trabajo de MATLAB

2.9.3 HMI para modo automático de la planta de generación eléctrica

Al igual que en el modo anterior (modo experimento), para que la interfaz del modo automático funcione de manera correcta es necesario que el interruptor físico de la planta se encuentre seleccionado en modo automático. En esta interfaz, como se muestra en la Figura 2.27, el panel de operación incorpora elementos adicionales; sin embargo, el funcionamiento de la sección de botones de operación y de los indicadores de estado se mantuvo igual al de las interfaces descritas previamente.

De forma adicional, se incluyó la sección Establecer nivel de voltaje y frecuencia, la cual permite ajustar en tiempo real los valores objetivo de voltaje y frecuencia que debe generar la planta. Asimismo, se añadió la sección Parámetros de los controladores, que habilita la modificación de los parámetros P, I, D y N de los controladores correspondientes al voltaje y a la frecuencia.

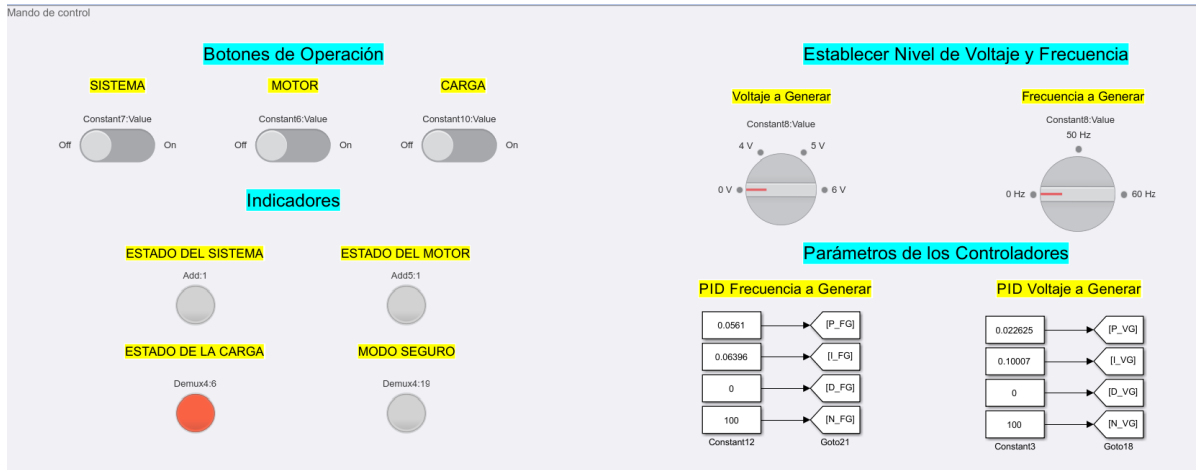


Figura 2.27 Interfaz de operación en modo automático con ajuste de referencias y parámetros de control

Como se observa en la Figura 2.28, en la parte central se ubicó la sección de lectura de datos, organizada en dos subsecciones. La primera corresponde a los datos originales de la planta, donde se muestran las mediciones principales del sistema y un visualizador tipo osciloscopio, que permite observar la respuesta de las salidas frente a las referencias o entradas deseadas. La segunda subsección corresponde a los datos escalados a niveles industriales, cuya diferencia principal es que el voltaje generado fue escalado para representar valores de operación más realistas, como 120 V, 240 V o 440 V.

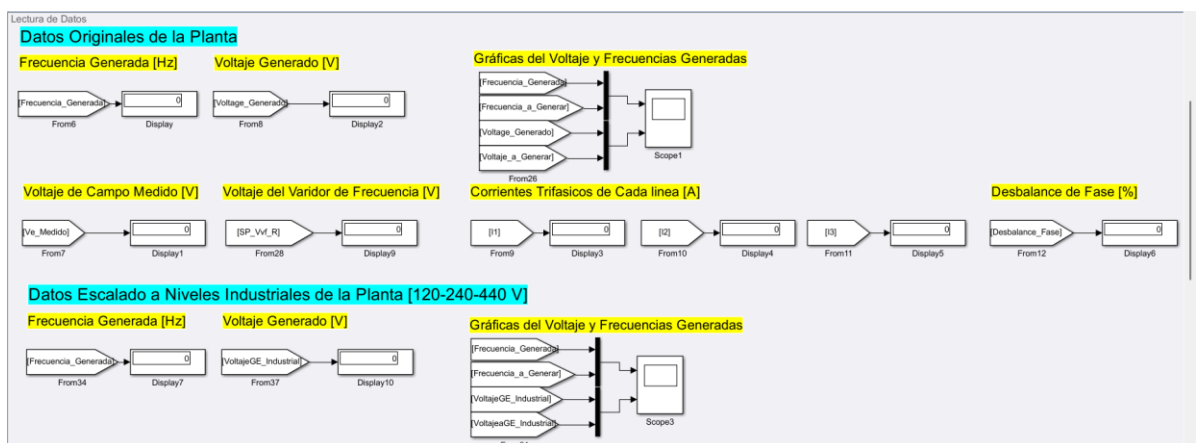


Figura 2.28 Sección de lectura de datos en modo automático

Finalmente, tal como se muestra en la Figura 2.29, se presenta la sección del sistema de controladores, donde se integra el controlador PID junto con los elementos asociados, tales como la señal de error aplicada al controlador y los desacopladores. Esta sección se desarrolla con mayor profundidad en la Sección 2.11.

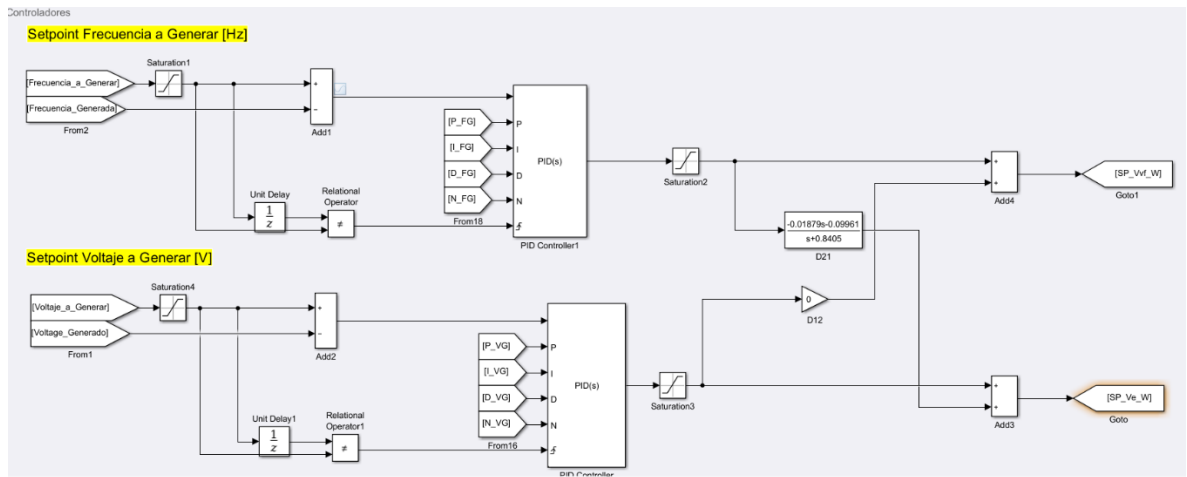


Figura 2.29 Sección del sistema de control en modo automático

2.10 Plan de experimentación para obtención del modelo y validación

El plan de experimentación se diseñó con el objetivo de obtener un modelo dinámico representativo de la planta de generación eléctrica y validar su comportamiento bajo condiciones reales de operación. Este plan constituyó una etapa clave dentro de la metodología, ya que permitió establecer de forma sistemática las condiciones bajo las cuales se ejecutaron los ensayos, asegurando coherencia entre los datos experimentales, el modelo identificado y el posterior diseño de control.

Como se mencionó anteriormente, todos los experimentos se realizaron con un tiempo de muestreo de 0.1 s, impuesto principalmente por las limitaciones inherentes a la comunicación OPC entre la planta y el computador de supervisión. Adicionalmente, este tiempo de muestreo permitió que el entorno Simulink/MATLAB opere en tiempo real junto con la planta física, garantizando una adquisición de datos consistente y sincronizada con la dinámica del sistema. Bajo esta restricción, se procuró que las señales de excitación, los cambios de referencia y los intervalos de observación fueran compatibles con la resolución temporal disponible, evitando efectos de aliasing o pérdida de información relevante.

El plan experimental se estructuró de manera progresiva, iniciando con la definición de puntos de operación y la evaluación de la linealidad local del sistema, para posteriormente ejecutar experimentos específicos de identificación y validación. Esta estrategia permitió que las pruebas se desarrollen alrededor de condiciones nominales bien definidas, de modo que las funciones de transferencia

obtenidas representen adecuadamente el comportamiento del sistema en la vecindad de dichos puntos. Asimismo, el enfoque adoptado facilitó aislar la influencia de cada variable manipulada sobre las variables de salida, reduciendo la incertidumbre asociada a los efectos de acoplamiento y perturbaciones.

En conjunto, el plan de experimentación no solo proporcionó la base de datos necesaria para la identificación del modelo matemático, sino que también permitió verificar la coherencia física de los parámetros estimados y su validez para el diseño del sistema de control. De esta manera, se aseguró que el modelo resultante sea adecuado tanto desde el punto de vista dinámico como desde su implementación práctica en un esquema de control digital en tiempo real.

2.10.1 Selección del punto de operación y evaluación de linealidad

Antes de iniciar la identificación de los parámetros del modelo matemático, fue necesario definir el punto de operación del sistema. Esto permitió que los experimentos se ejecuten alrededor de una condición nominal bien establecida y que, a partir de pequeñas variaciones controladas, se obtengan funciones de transferencia representativas en la vecindad de ese punto, lo cual es indispensable para diseñar un controlador con buen desempeño dentro del área de interés.

En primer lugar, se estableció el punto de operación asociado a la frecuencia generada y al voltaje de referencia del variador de frecuencia, ya que estas variables están estrechamente relacionadas el motor se encuentra acoplado mecánicamente al rotor del alternador, por lo que cualquier cambio de velocidad impuesto por el variador se refleja directamente en la frecuencia de generación. Antes de fijar el punto nominal, se revisó la condición mínima de operación del alternador a partir de la información de su placa (Apéndice B), donde se indica que la velocidad mínima del rotor es 1270 rpm. Considerando que el motor Siemens 1LA7070-4YA60 es de 4 polos y retomando la ecuación (1.1), la frecuencia eléctrica asociada a una velocidad n se expresa como

$$f(\text{Hz}) = \frac{n(\text{rpm}) \cdot 4}{120} \quad (2.19)$$

Sustituyendo $n = 1270$ rpm se obtiene una frecuencia aproximada de 42.33 Hz, la cual se tomó como referencia para comprender el comportamiento del sistema hacia el límite inferior de giro indicado por el fabricante. Sin embargo, para la etapa de identificación se definió como condición nominal una frecuencia de 60 Hz,

debido a que esta coincide con la frecuencia de la red eléctrica en Ecuador y representa el escenario operativo principal que se busca reproducir con la planta. A partir de ese punto nominal, se estableció una variación máxima de 10 Hz, fijando como condición inferior de ensayo 50 Hz. Esta elección también resulta conveniente porque 50 Hz corresponde a la frecuencia utilizada en la red eléctrica de muchos países europeos, por lo que constituye un segundo escenario realista de operación.

Una vez definido el punto de operación de la frecuencia generada en 60 Hz, se determinó el punto de operación correspondiente para la señal de mando del variador. La referencia del variador se aplica a través de una entrada analógica de 0 a 10 V, por lo que se asumió una relación proporcional entre el voltaje de referencia y la frecuencia objetivo. Bajo este criterio, el voltaje requerido para una frecuencia f se calculó como

$$V(V) = \frac{f(\text{Hz}) \cdot 10}{60} \quad (2.20)$$

De esta forma, para operar en el punto nominal de 60 Hz se requiere un voltaje de referencia de 10 V. Si se aplica la variación máxima definida (reducción de 10 Hz hasta 50 Hz), el voltaje equivalente es aproximadamente 8.33 V. En consecuencia, se estableció como punto de operación del variador el valor de 10 V, con una variación máxima de 1.67 V (hasta 8.33 V), consistente con la variación de 10 Hz definida para la frecuencia generada. Con estos valores se aseguró una base coherente para ejecutar los experimentos de identificación alrededor de un punto nominal único y controlado.

Lo siguiente que se realizó fue determinar el punto de operación del voltaje de campo, de manera que la frecuencia generada y el voltaje generado trabajen en una zona estable y aproximadamente lineal. Para ello se desarrollaron tres experimentos clave, manteniendo el voltaje del variador de frecuencia constante en su punto de operación de 10 V y, posteriormente, en 8,33 V. Todos los ensayos se ejecutaron desde la interfaz del modo experimento de la planta de generación eléctrica, descrita en la Sección 2.9.2. A continuación, se detallan los experimentos realizados.

2.10.1.1 Experimento validación del rango de voltaje de campo

Tal como se muestra en la Figura 2.30, este experimento consistió en fijar el voltaje del variador de frecuencia en su punto de operación (10 V) y aumentar el

voltaje de campo desde 0 hasta 10 V mediante una señal tipo rampa. El objetivo fue identificar, tanto de forma visual como a partir de los datos registrados, el intervalo de voltaje de campo que permite operar sin que el sistema ingrese a modo seguro ni presente señales de saturación o inestabilidad.

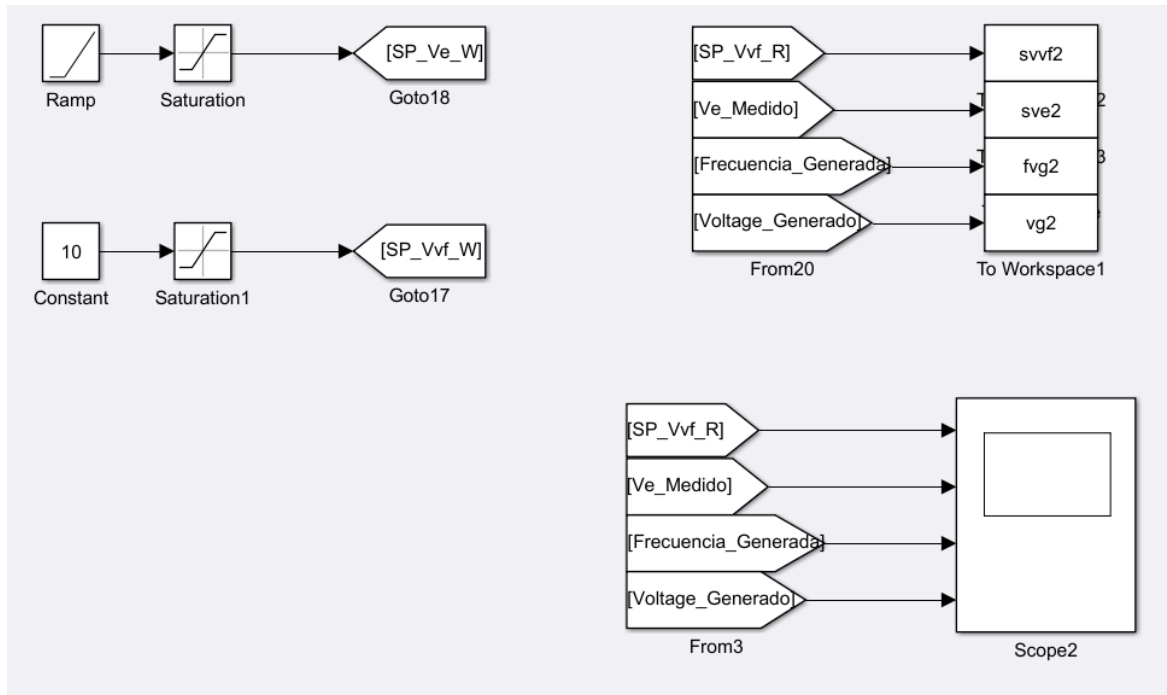


Figura 2.30 Ensayo de barrido del voltaje de campo con el variador fijado en 10 V
 Como se observa en la Figura 2.31, el voltaje de campo máximo para que el sistema genere energía de forma estable y segura fue de 2.829 V. En consecuencia, se decidió trabajar con un rango operativo de 0 a 2.5 V, con el fin de mantener un margen de seguridad durante la ejecución de los experimentos posteriores.

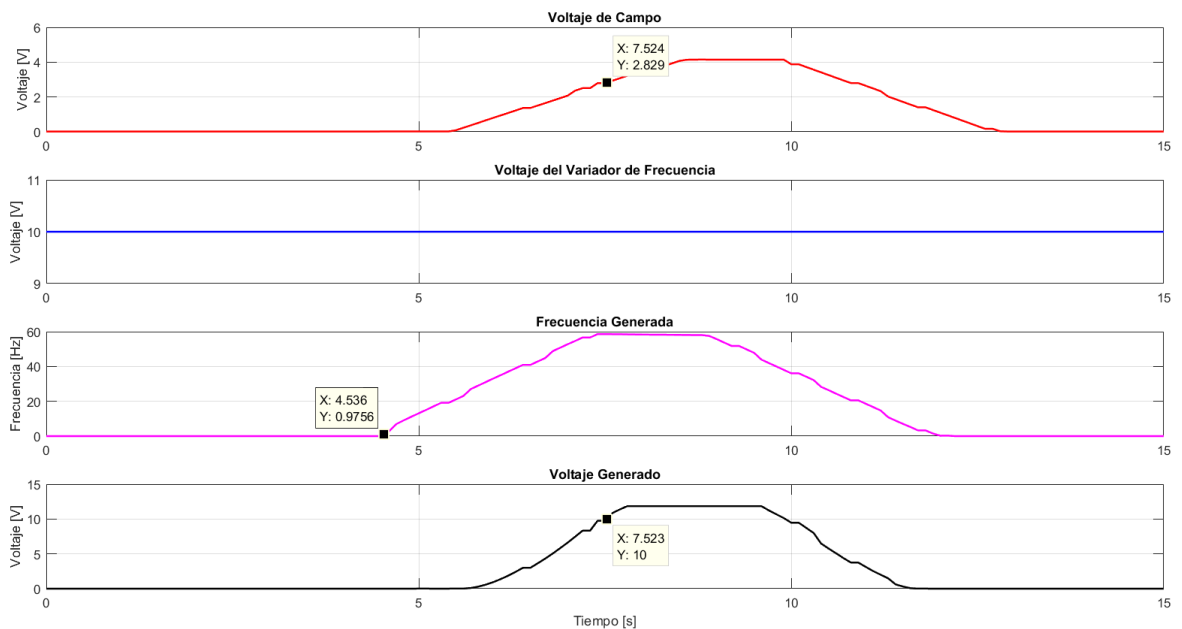


Figura 2.31 Determinación del límite superior del voltaje de campo antes de activar el modo seguro

2.10.1.2 Experimentos determinación del punto de operación del voltaje de campo

En esta sección se describen dos experimentos orientados a determinar el punto de operación del voltaje de campo, evaluando su influencia sobre el voltaje generado y la frecuencia generada. En ambos ensayos se trabajó con una carga constante de 12.5Ω .

En el primer experimento, tal como se muestra en la Figura 2.32, el voltaje del variador de frecuencia se fijó en 10 V y el voltaje de campo se incrementó desde 0 V hasta 2.5 V mediante pasos de 0.25 V aplicados cada 15 s, utilizando una señal tipo escalón. Esta secuencia se implementó mediante el bloque secuencia escalonada repetitiva, el cual permite definir valores discretos de la señal en intervalos de tiempo establecidos.

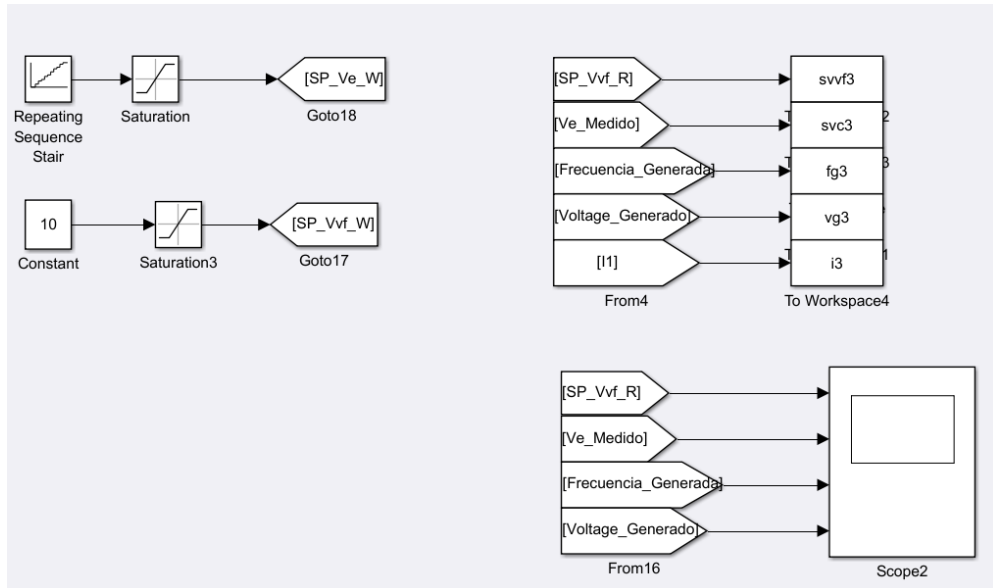


Figura 2.32 Configuración del experimento con voltaje del variador fijo en 10 V y variación escalonada del voltaje de campo

En el segundo experimento, como se observa en la Figura 2.33, se mantuvo la misma metodología de variación escalonada del voltaje de campo; sin embargo, el voltaje del variador de frecuencia se estableció en 8.33 V. La finalidad de ejecutar ambos ensayos fue comparar el comportamiento del sistema bajo cada condición y seleccionar el punto de operación que proporcione una respuesta más estable.

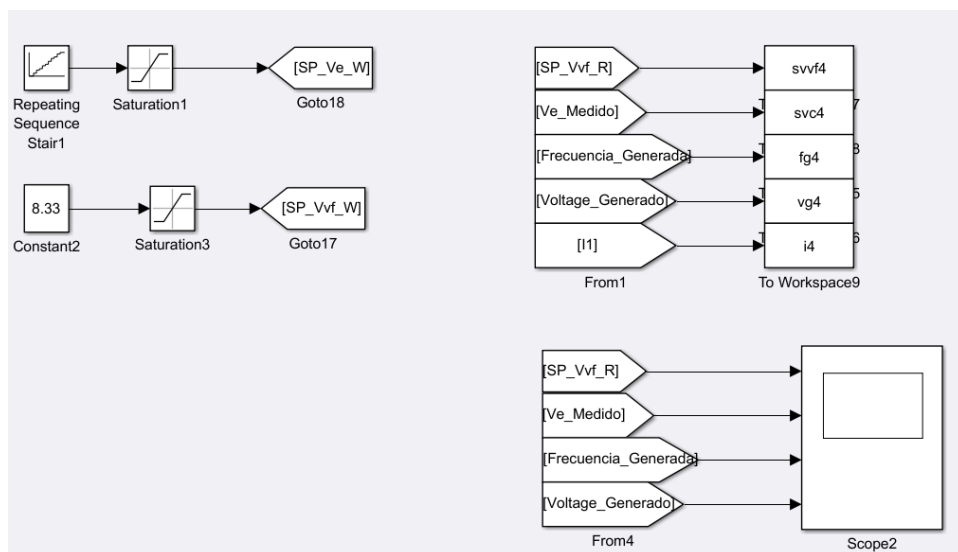


Figura 2.33 Configuración del experimento con voltaje del variador fijo en 8.33 V y variación escalonada del voltaje de campo

Una vez realizados los experimentos, los datos fueron procesados y se obtuvieron las curvas características del sistema, presentadas en las Figuras 2.34 y 2.35. A partir de estas curvas se determinó que la zona más estable para el voltaje de campo se encuentra alrededor de 1.25 V, con una variación aproximada de ± 0.2 V, tanto para el caso con 10 V como para el caso con 8.33 V en el variador. Adicionalmente, se evidenció que el voltaje de campo no influye de manera significativa sobre la frecuencia generada, ya que esta se mantiene con cambios relativamente pequeños a lo largo del rango evaluado.

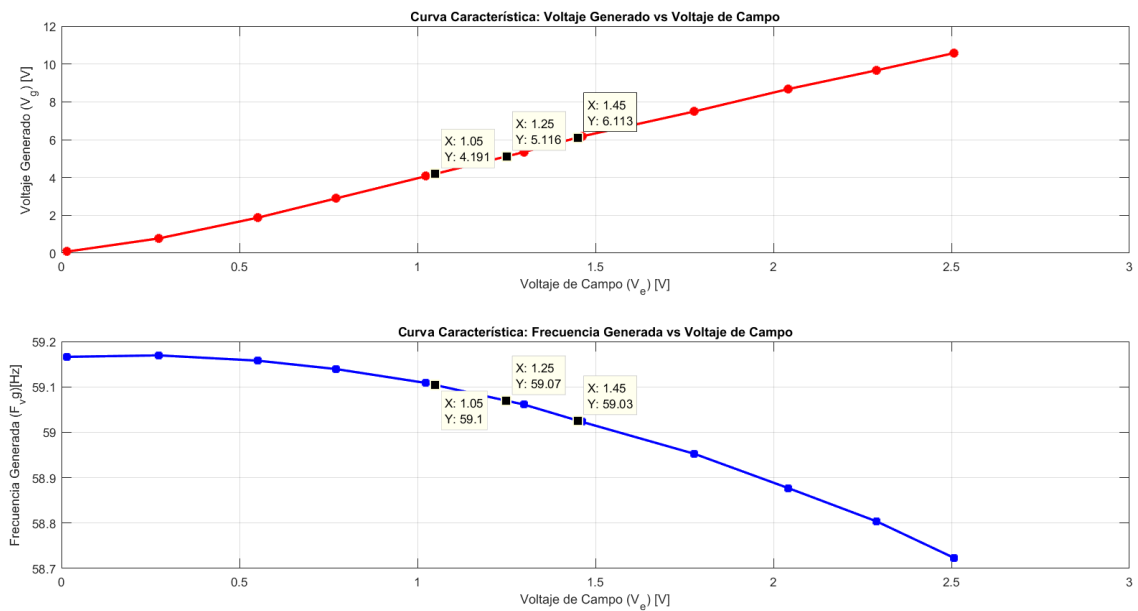


Figura 2.34 Curvas características obtenidas con voltaje del variador en 10 V relación entre voltaje de campo, voltaje generado y frecuencia generada

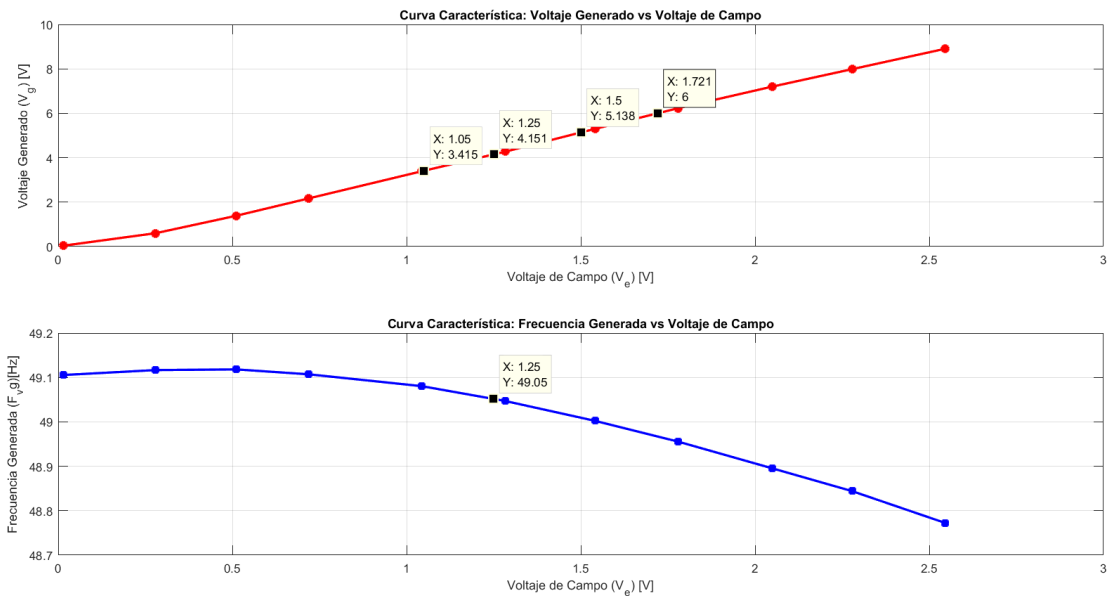


Figura 2.35 Curvas características obtenidas con voltaje del variador en 8.33 V relación entre voltaje de campo, voltaje generado y frecuencia generada

Finalmente, para confirmar que el punto de operación seleccionado para el voltaje de campo era adecuado, se realizó un tercer experimento. Como se muestra en la Figura 2.36, este ensayo consistió en variar el voltaje del variador de frecuencia de 0 a 10 V mediante una función rampa, mientras se mantuvo el voltaje de campo constante en su punto de operación (1.25 V).

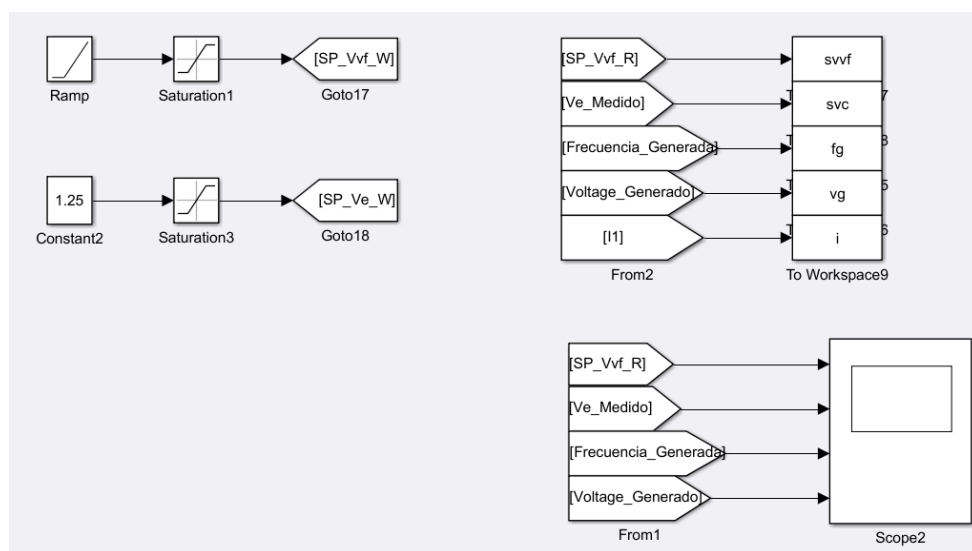


Figura 2.36 Configuración del experimento con voltaje del campo fijo en 1.25 V y variación escalonada del voltaje de variador de frecuencia

Como se aprecia en la Figura 2.37, la respuesta del sistema se mantuvo consistente y sin comportamientos abruptos dentro del rango evaluado, lo que permitió confirmar que el punto de operación del voltaje de campo seleccionado es el adecuado para una operación estable.

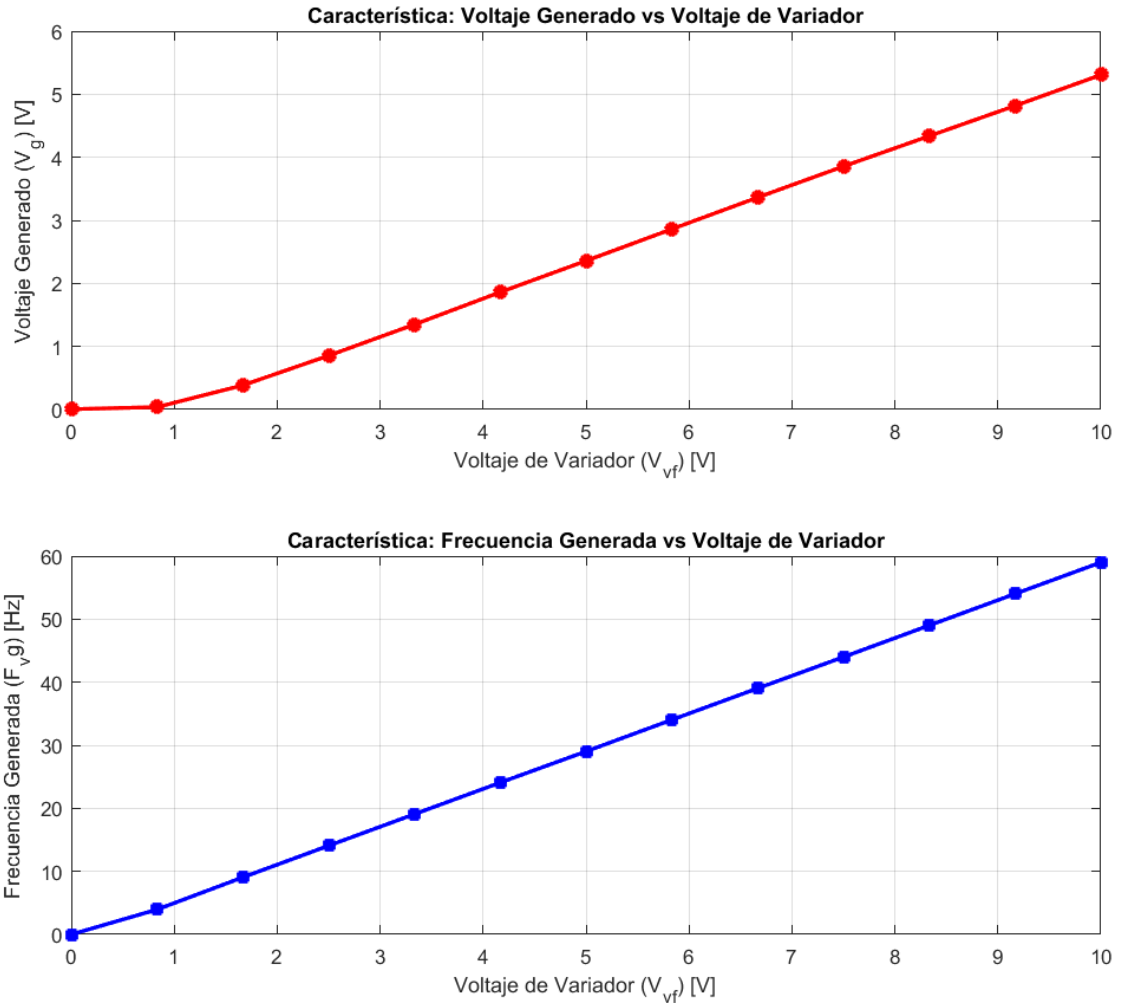


Figura 2.37 Curvas características obtenidas con voltaje de campo en 1.25 V relación entre voltaje del variador de frecuencia, voltaje generado y frecuencia generada

En síntesis, los valores identificados como puntos de operación se resumen en la Tabla 2.1. Se destaca que, incluso cuando el voltaje a generar alcanza aproximadamente 6 V y la frecuencia se sitúa alrededor de 50 Hz, el voltaje de campo permanece dentro de su rango operativo, tomando un valor cercano a 1.72 V, lo cual confirma la estabilidad del sistema en condiciones representativas de operación.

Tabla 2.1 Puntos de operación estimados para la planta de generación eléctrica

Variable	Punto de Operación	Descripción
V_{Vf}	10 – 1.67 [V]	Voltaje del variador de frecuencia
V_e	1.25 ± 0.2 [V]	Voltaje de campo del alternador
F_{Vg}	60 – 10 [Hz]	Frecuencia Deseada de la señal de voltaje alterna generada
V_g	5 ± 1 [V]	Voltaje DC Deseado a partir de la señal AC generada por el alternador

2.10.2 Experimentos de identificación del modelo matemático general

Con el fin de estimar los parámetros del modelo matemático del sistema frecuencia–voltaje, se realizaron varios experimentos de identificación orientados a ajustar las funciones de transferencia definidas en el diagrama de bloques del sistema (Figura 2.20). Dado que el sistema cuenta con dos variables manipuladas y dos variables de salida (frecuencia f y voltaje terminal V_a), el proceso se abordó bajo una estructura MIMO 2×2, considerando además a la carga R_L como una perturbación que afecta tanto la dinámica mecánica (torque de carga) como la salida eléctrica (término equivalente en V_a).

Antes de presentar los resultados, se resume la herramienta utilizada para la identificación. En este trabajo se empleó la aplicación de MATLAB System Identification (*systemIdentification*), la cual permite ingresar datos de entrada y salida para estimar modelos en forma de función de transferencia, definiendo su estructura (número de polos, ceros, retraso, entre otros). Además, la herramienta incluye el panel Model Output, que permite comparar la respuesta real medida con la respuesta simulada del modelo identificado, aplicando exactamente las mismas entradas al modelo.

Como métrica de calidad se utilizó el porcentaje de ajuste (FIT), que cuantifica qué tan bien el modelo reproduce la salida real:

$$FIT = \left[1 - \frac{\|Y - \hat{Y}\|}{\|Y - \bar{Y}\|} \right] \times 100 \quad (2.21)$$

donde Y corresponde a los datos reales medidos, \hat{Y} es la salida estimada por el modelo, \bar{Y} representa el promedio de los datos reales y $\|\cdot\|$ es una norma que mide la magnitud del error. En términos prácticos, un ajuste cercano al 100% indica una representación precisa, mientras que valores cercanos a 0% (o negativos) evidencian que el modelo no describe adecuadamente el sistema. Para esta tesis,

y en coordinación con el responsable de la planta, se definió como criterio mínimo de aceptación un ajuste mayor o igual al 60%.

2.10.2.1 Identificación del ramal $V_f \rightarrow f$

Para iniciar la identificación se ejecutó el experimento mostrado en la Figura 2.38, en el cual el voltaje de campo se mantuvo constante en su punto de operación de 1.25 V (en el diagrama de la Figura 2.20 corresponde a V_{fg}), la carga se estableció en 0Ω , y el voltaje del variador de frecuencia V_f se hizo variar alrededor de su operación, específicamente entre 10 V y 8.33 V. Con esta condición se identificó, en primera instancia, el ramal que relaciona el voltaje del variador con la frecuencia generada, cuya estructura se planteó como:

$$\frac{F(s)}{V_f(s)} = \frac{K K_L K_I}{(\tau_f s + 1)(\tau_L s + 1)} \quad (2.22)$$

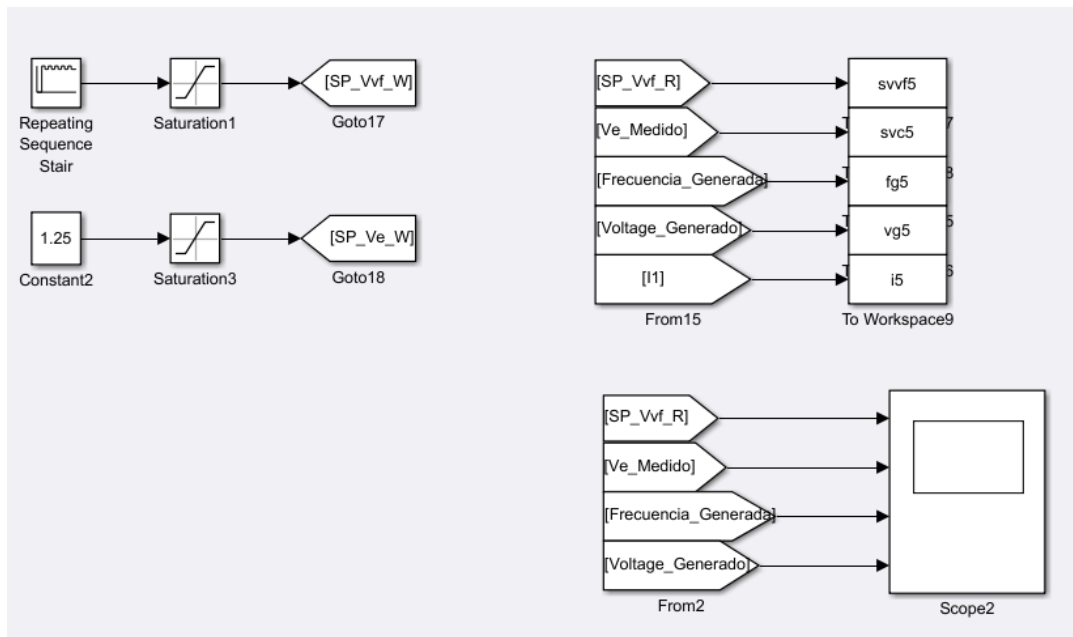


Figura 2.38 Experimento para identificar el ramal $V_f \rightarrow f$ con voltaje de campo constante y carga nula

Una vez obtenidos los datos del experimento, se importaron a la aplicación System Identification, asignando como entrada el voltaje del variador y como

salida la frecuencia generada, tal como se ilustra en la Figura 2.39.

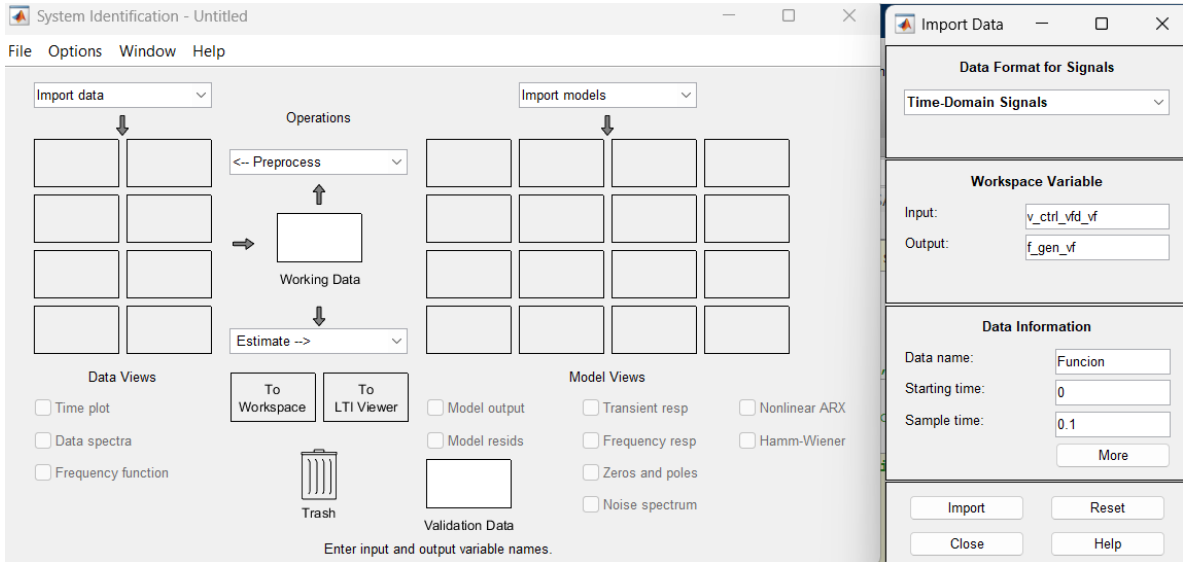


Figura 2.39 Importación de señales en System Identification para el ramal $V_f \rightarrow f$: entrada V_{fy} salida f

Como se observa en la Figura 2.40, el modelo identificado presentó un ajuste de 88,64%, valor que se consideró satisfactorio y válido para representar el comportamiento del sistema en el rango evaluado. La función de transferencia estimada fue:

$$\frac{F(s)}{V_f(s)} = \frac{5.9013}{(0.78219s+1)(0.78244s+1)} \quad (2.23)$$

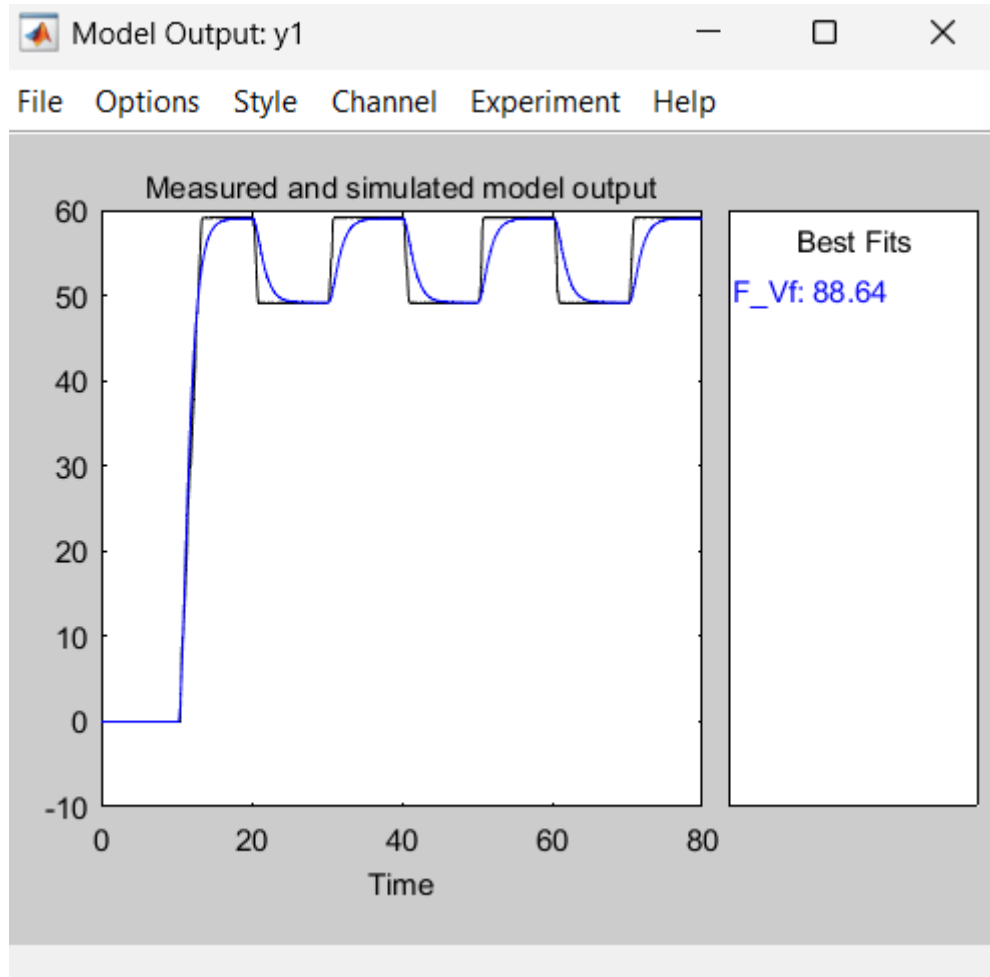


Figura 2.40 Validación del modelo $V_f \rightarrow f$ en Model Output: frecuencia medida vs. frecuencia simulada (FIT = 88,64%).

La ganancia total identificada corresponde al producto de tres componentes: la ganancia del motor (K), la ganancia asociada a la carga (K_L) y la constante de conversión (K_I). En particular:

- **Constante de conversión (K_I):** se determinó como $1/30$, a partir de la simplificación de la Ecuación 2.19, que relaciona la frecuencia eléctrica con la velocidad mecánica en rpm.
- **Ganancia asociada a la carga (K_L):** se calculó utilizando datos nominales del motor Siemens 1LA7070-4YA60 (Apéndice B), relacionando la velocidad nominal (1590 rpm) con el torque nominal (2,24 Nm).
- **Ganancia del motor (K):** conocidos K_I y K_L , se despejó K a partir de la ganancia total identificada, asegurando consistencia entre el modelo y la respuesta real de la planta.

El modelo presentó dos polos reales. Para asignar las constantes de tiempo se utilizó un criterio físico:

- τ_f (asociada a efectos eléctricos) se asignó al menor valor (0,78219 s), debido a que las dinámicas eléctricas tienden a ser más rápidas.
- τ_L (asociada a efectos mecánicos) se asignó al mayor valor (0,78244 s), representando la inercia del conjunto motor–alternador.

Finalmente, mediante un script de MATLAB se calculó los parámetros faltantes y se reescribió la función de transferencia en términos de sus ganancias físicas:

$$\frac{F(s)}{V_f(s)} = \frac{K K_L K_I}{(\tau_f s + 1)(\tau_L s + 1)} = \frac{(0.2494)(709.8214)(0.0333)}{(0.78219s + 1)(0.78244s + 1)} \quad (2.24)$$

2.10.2.2 Identificación del ramal $V_f \rightarrow V_a$

Una vez obtenida la función de transferencia del ramal $V_f \rightarrow f$, se utilizó el mismo conjunto de datos experimentales para estimar el ramal que relaciona el voltaje del variador de frecuencia con el voltaje generado. La estructura propuesta para este ramal fue:

$$\frac{V_a(s)}{V_f(s)} = \frac{K K_L K_W K_e}{(\tau_f s + 1)(\tau_L s + 1)} \quad (2.25)$$

Para ello se siguió el mismo procedimiento en la herramienta System Identification, asignando como señal de entrada el voltaje del variador V_f y como señal de salida el voltaje generado V_a , tal como se muestra en la Figura 2.41.

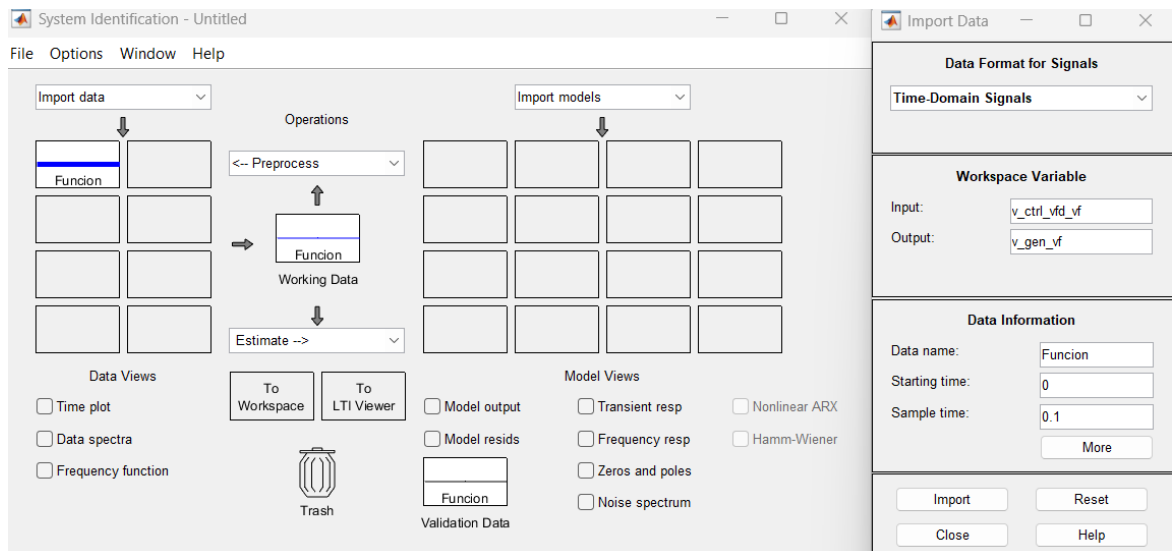


Figura 2.41 Configuración de identificación del ramal $V_f \rightarrow V_a$ en System Identification: entrada V_{fy} salida V_a .

Como se observa en la Figura 2.42, el modelo identificado presentó un ajuste (FIT) de 86,27%, valor que se consideró satisfactorio y válido para representar el comportamiento del sistema dentro del rango evaluado. La función de transferencia estimada fue:

$$\frac{V_a(s)}{V_f(s)} = \frac{0.53506}{(0.78219s+1)(0.78244s+1)} \quad (2.26)$$

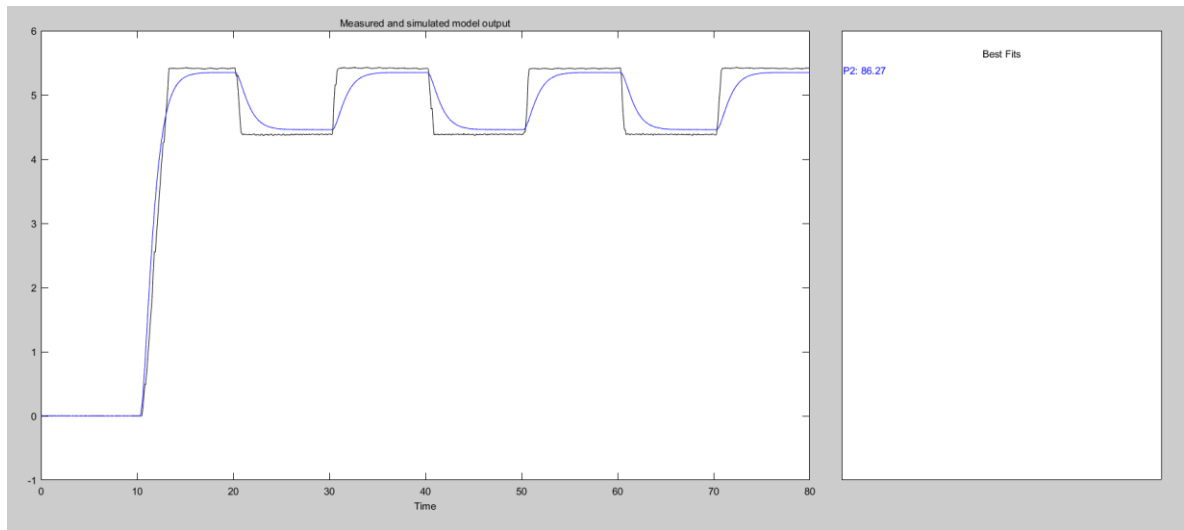


Figura 2.42 Validación del modelo $V_f \rightarrow V_a$ en Model Output: voltaje medido vs. voltaje simulado (FIT = 86.27%).

Dado que K y K_L ya habían sido determinados en la Ecuación (2.24), se mantuvieron estos valores y se calcularon K_w y K_e , asumiendo que $K_e = 1$, y mediante un script de MATLAB. Con ello, la función de transferencia se reescribió en términos físicos como:

$$\frac{V_a(s)}{V_f(s)} = \frac{K K_L K_w K_e}{(\tau_f s + 1)(\tau_L s + 1)} = \frac{(0.2494)(709.8214)(0.003019)(1.0)}{(0.78219s+1)(0.78244s+1)} \quad (2.27)$$

2.10.2.3 Identificación del ramal $V_{fg} \rightarrow V_a$

Para continuar con la estimación del modelo, se cambió el experimento, tal como se ilustra en la Figura 2.43. En este ensayo el voltaje del variador se mantuvo constante en 10 V, mientras que el voltaje de campo se varió alrededor de su punto de operación: $1.25 \pm 0.25V$.

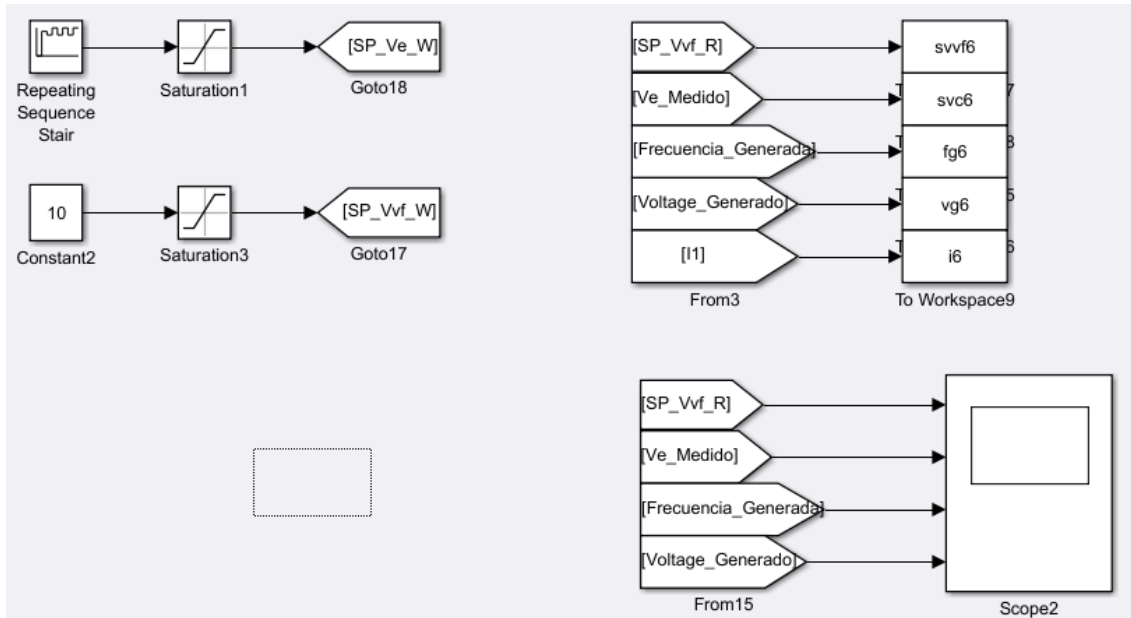


Figura 2.43 Condiciones del experimento para identificar $V_{fg} \rightarrow V_a$ con $V_f = 10$ V" y variación de V_{fg} alrededor de 1,25 V.

Una vez obtenidos los datos, se importaron a System Identification, asignando como entrada el voltaje de campo y como salida el voltaje generado, tal como se muestra en la Figura 2.44. Con estas condiciones se buscó identificar el ramal con estructura:

$$\frac{V_a(s)}{V_f(s)} = \frac{K_{fg} K_i K_e}{(\tau_{fg}s + 1)} \quad (2.28)$$

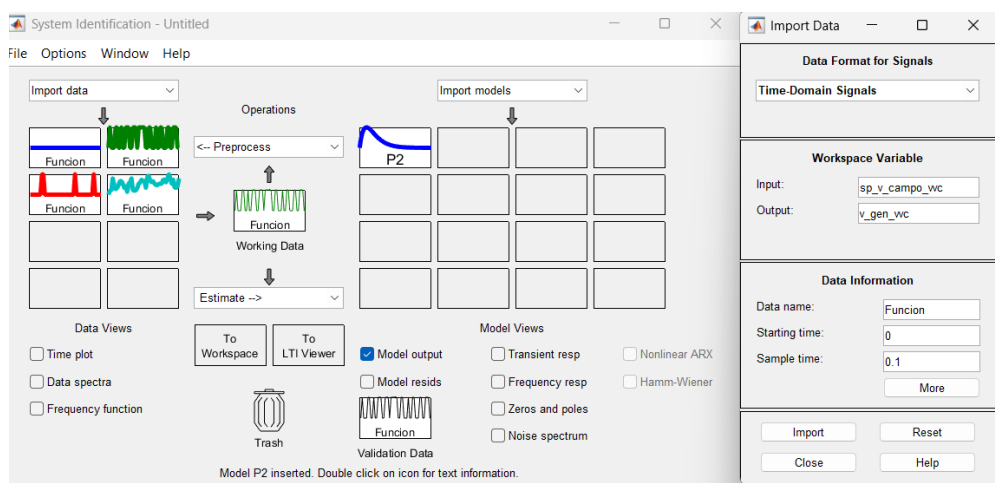


Figura 2.44 Importación de señales en System Identification para el ramal $V_{fg} \rightarrow V_a$: entrada V_{fgy} salida V_a .

Como se observa en la Figura 2.45, el modelo identificado presentó un ajuste de 96,17%, por lo que se lo consideró altamente representativo. La función estimada fue:

$$\frac{V_a(s)}{V_f(s)} = \frac{4.566}{(0.13935s+1)} \quad (2.29)$$

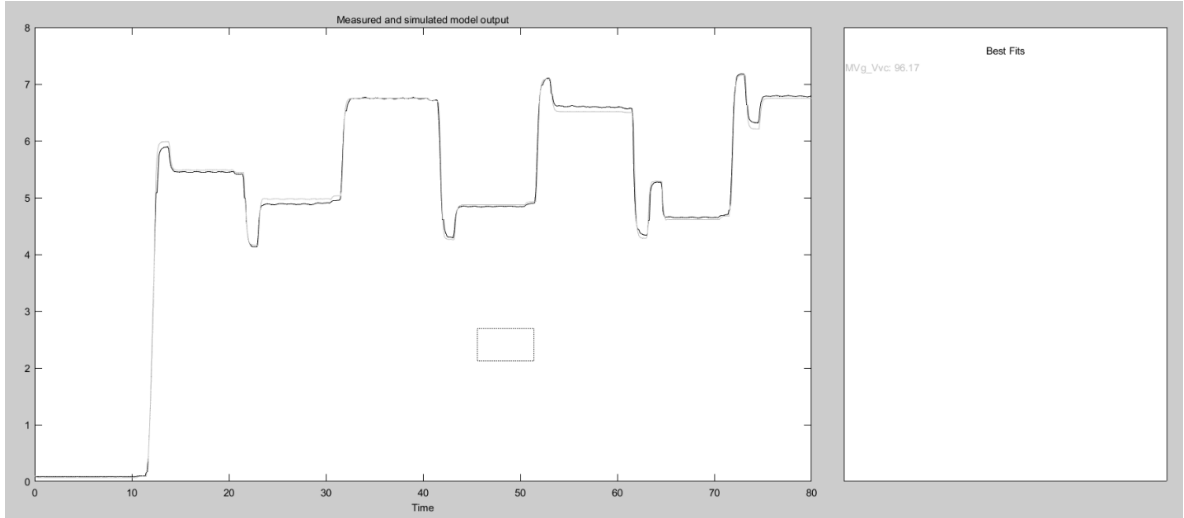


Figura 2.45 Validación del modelo $V_{fg} \rightarrow V_a$ en Model Output: voltaje medido vs. voltaje simulado (FIT = 96,17%).

Para resolver la indeterminación de los bloques en serie en la rama de excitación, se aplicó un criterio basado en los límites nominales del alternador descritos en el Apéndice B. Bajo la premisa de que la corriente máxima de campo de 3,2 A se produce ante un voltaje de excitación de 12 V, se determinó la ganancia de conductancia $K_{fg} = 0.2667$ A/V. Posteriormente, usando la ganancia estática total identificada (4,566) y manteniendo $K_e = 1$ para consolidación de parámetros, se calculó $K_i = 17.1225$ V/A. De esta forma se garantizó coherencia entre el modelo por bloques, la dinámica observada y las capacidades físicas del equipo. Finalmente, la función se reescribió como:

$$\frac{V_a(s)}{V_{fg}(s)} = \frac{K_{fg} K_i K_e}{(\tau_{fg}s+1)} = \frac{(0.2667)(17.1225)(1)}{(0.1395s+1)} \quad (2.30)$$

2.10.2.4 Verificación del ramal $V_{fg} \rightarrow f$

Por último, aunque el diagrama de bloques plantea que la relación entre el voltaje de campo y la frecuencia generada es nula, se verificó esta hipótesis mediante identificación. Para ello se utilizaron como entrada los datos de V_{fg} y como salida la frecuencia generada f , tal como se indica en la Figura 2.46.

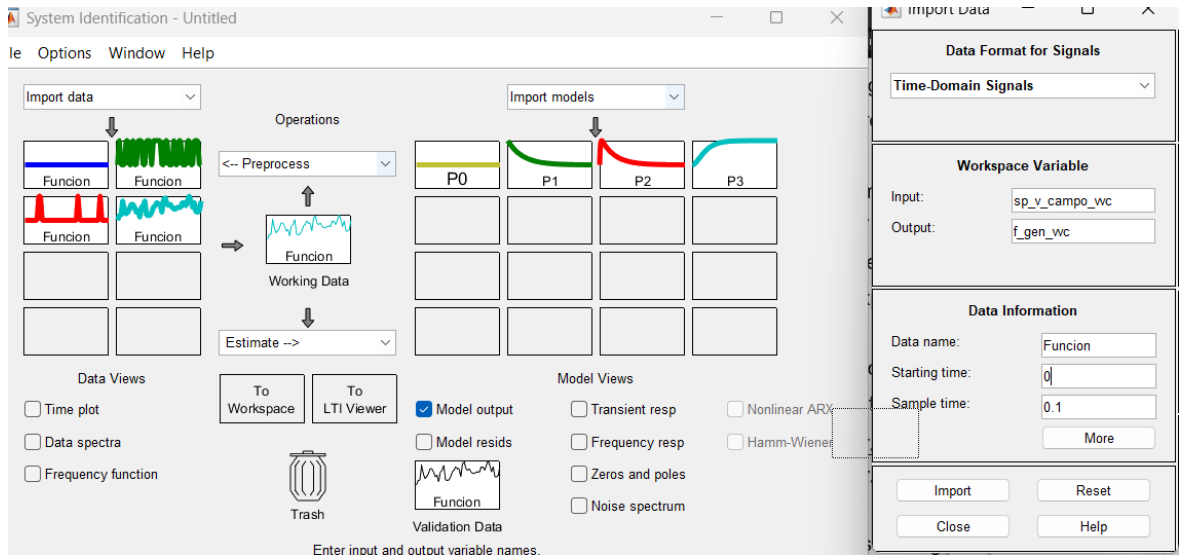


Figura 2.46 Configuración de verificación del ramal $V_{fg} \rightarrow f$ en System

Identification: entrada V_{fg} salida f

Como se aprecia en la Figura 2.47, el ajuste obtenido fue menor o igual a 0% (incluso negativo), lo cual confirma que el voltaje de campo no explica la variación de la frecuencia en el rango evaluado. Por tanto, se reafirma el planteamiento del modelo:

$$\frac{F(s)}{V_{fg}(s)} = 0 \quad (2.31)$$

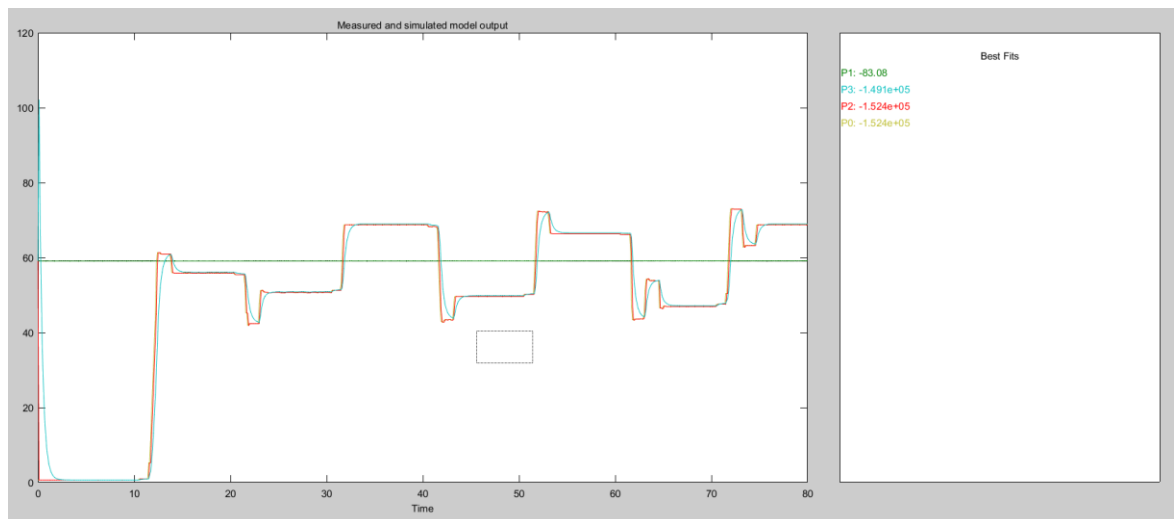


Figura 2.47 Resultado de la verificación del ramal $V_{fg} \rightarrow f$ en Model Output: ajuste nulo o negativo, confirmando ausencia de relación.

2.10.2.5 **Parametrización de los efectos de carga: estimación de K_d y K_r**

Para incorporar los efectos de carga en el modelo TITO, se procedió a estimar las ganancias de perturbación K_d y K_r , cuantificando el impacto de conectar una carga trifásica de $12,5 \Omega$ tanto en la dinámica mecánica como en la respuesta eléctrica del alternador. La metodología utilizada se basó en los mismos experimentos de identificación previos (variación de V_f y variación de V_{fg}), con la diferencia de que se ejecutaron bajo condiciones de carga nominal.

El parámetro K_d representa el par de oposición que aparece en el eje del motor cuando el alternador suministra energía a la carga. Para su cálculo se aplicó un balance de potencias en estado estacionario, utilizando los datos del experimento de dinámica V_f con carga. Primero, se calculó la potencia trifásica de salida a partir de la corriente RMS medida (I_{rms}) y la resistencia de carga R_L :

$$P_{out} = 3 I_{rms}^2 R_L \quad (2.32)$$

Posteriormente, el torque de carga se obtuvo relacionando la potencia eléctrica con la velocidad angular mecánica ω_m , derivada de la frecuencia generada:

$$K_d = \frac{P_{out}}{\omega_m} \quad (2.33)$$

donde $\omega_m = f \pi$, considerando la relación de polos y la conversión a rad/s del sistema.

La ganancia K_r modela la caída de tensión terminal provocada por la reacción de inducido y pérdidas resistivas internas. Para aislar este efecto, se compararon los resultados del experimento de dinámica de V_{fg} con carga frente a los registros sin carga. En primer lugar, se midió la caída de voltaje total ΔV_{total} . Debido a que la carga también reduce la velocidad, una parte de esa caída se atribuye al efecto de velocidad, el cual se descontó usando los parámetros K_e y K_w :

$$\Delta V_{velocidad} = K_e K_w \Delta \Omega \quad (2.34)$$

Con ello, K_r se definió como la diferencia restante:

$$K_r = \Delta V_{total} - \Delta V_{velocidad} \quad (2.35)$$

Finalmente, a partir del script de MATLAB se obtuvieron los valores:

$$K_r = 0.294229, K_d = 0.086446 \quad (2.36)$$

2.10.2.6 Ajuste de coherencia del voltaje estático: establecimiento de $K_e = 0.5$

El ajuste de coherencia mediante el establecimiento de $K_e = 0.5$ fue una solución técnica necesaria ante un fenómeno de duplicidad de ganancia asociado a la metodología de identificación utilizada. Al emplear datos absolutos (en lugar de variables de desviación) en System Identification, cada ramal (V_f y V_{fg}) fue identificado asignando, en estado estacionario, la contribución completa del voltaje de salida. Al integrar ambas ramas en la estructura multivariable del modelo TITO, la suma de contribuciones duplicó el voltaje nominal simulado ($\approx 11,06$ V), alejándose del valor real medido ($\approx 5,5$ V).

Para corregir esta discrepancia sin afectar la dinámica identificada, se aplicó un factor de escala de 0,5 en la ganancia eléctrica K_e . Este ajuste normaliza el nivel de voltaje estático de la simulación para que coincida con el punto de operación real, manteniendo intactas las constantes de tiempo y los polos identificados. De esta manera, el modelo conserva su fidelidad transitoria y se consolida una parametrización coherente para el diseño de controladores.

El diagrama de bloques final del modelo con los parámetros calculados se presenta en la Figura 2.48.

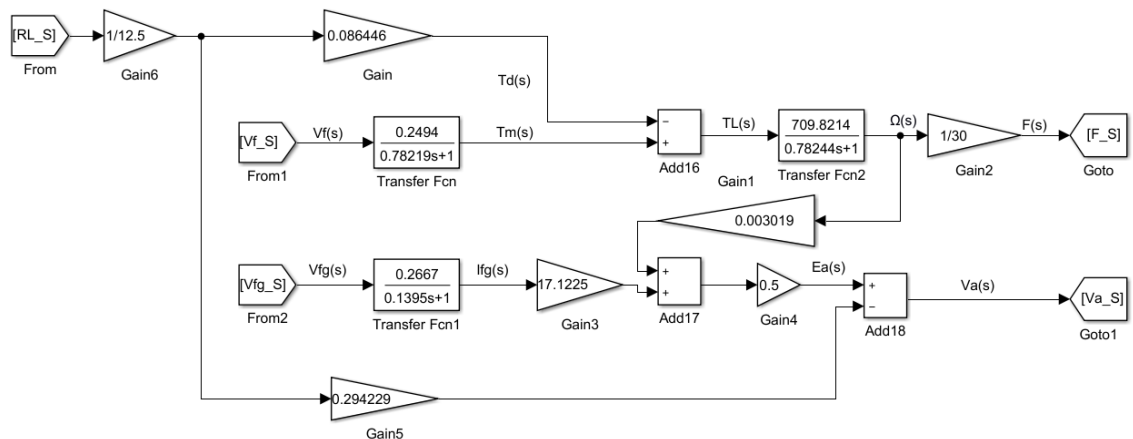


Figura 2.48 Diagrama de bloques del modelo TITO con parámetros identificados y ganancias de perturbación (K_d , K_r) ajustadas.

2.10.3 Estimación de la matriz de transferencia MIMO $G(s)$

Para el control de sistemas multivariables, una identificación precisa de la dinámica constituye un paso esencial, ya que permite comprender cómo

interactúan las variables del proceso y cómo una entrada puede afectar simultáneamente a más de una salida. De manera general, un sistema multivariable puede representarse como un bloque “proceso” que recibe un conjunto de entradas $u_1(s), u_2(s), \dots, u_n(s)$ y entrega un conjunto de salidas $y_1(s), y_2(s), \dots, y_n(s)$, tal como se ilustra en la Figura 2.49.

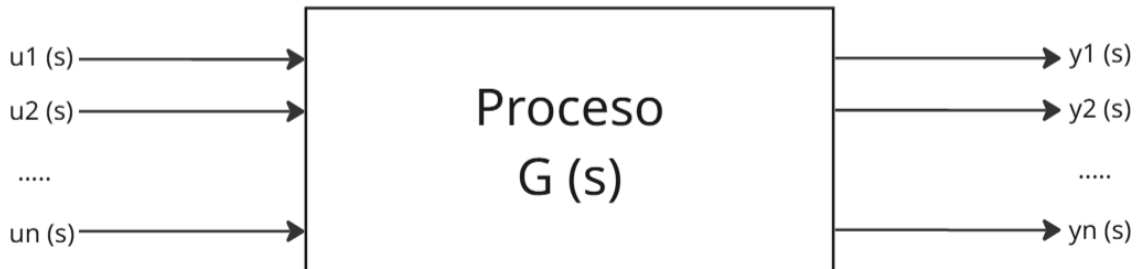


Figura 2.49 Representación general de un sistema multivariable en el dominio de Laplace.

En el caso particular de un sistema de dos entradas y dos salidas (TITO), la relación entrada–salida se describe mediante una matriz de funciones de transferencia, la cual encapsula tanto los caminos directos como los acoplamientos cruzados entre lazos.

De acuerdo con la metodología propuesta por Bobál, Navrátil y Dostál (2002), la estimación de la matriz de transferencia resulta clave para implementar estrategias de control capaces de responder a variaciones del proceso en el tiempo. En términos prácticos, esta matriz permite descomponer el sistema en componentes individuales $G_{11}(s), G_{12}(s), G_{21}(s), G_{22}(s)$, facilitando el análisis de interacciones y el posterior diseño de desacopladores que reduzcan la influencia mutua entre lazos.

En el dominio de la frecuencia (o dominio de Laplace), la relación general del sistema se expresa como:

$$Y(s) = G(s) U(s) \quad (2.37)$$

donde la matriz de transferencia estimada tiene la forma:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Esta estructura permite tratar cada elemento $G_{ij}(s)$ como un modelo identificable, y describe explícitamente cómo cada entrada contribuye a cada salida. La interpretación física de esta descomposición para el caso TITO se muestra en la

Figura 2.50, donde se observan los cuatro caminos dinámicos que convergen en las dos salidas mediante sumadores, evidenciando los acoplamientos cruzados.

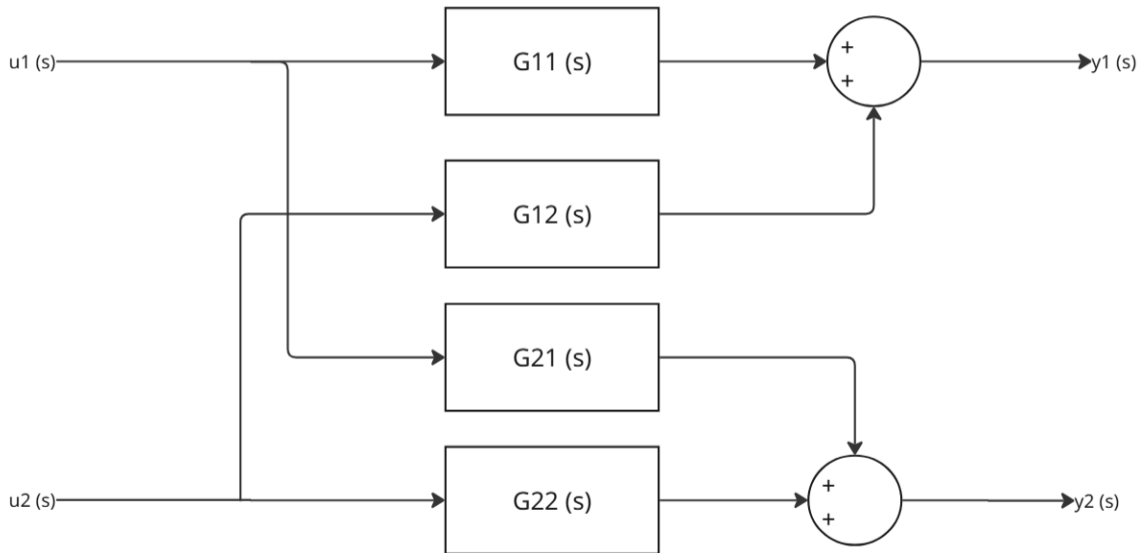


Figura 2.50 Estructura TITO 2x2: descomposición del proceso en $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$ y $G_{22}(s)$.

A partir de este punto, el modelado del sistema se abordará mediante funciones de transferencia, considerando dos matrices $G(s)$ distintas:

1. **Matriz del modelo matemático desarrollado previamente**, construida a partir de los parámetros físicos y la estructura del diagrama de bloques.
2. **Matriz obtenida por identificación**, compuesta por las funciones de transferencia que presentaron el mejor porcentaje de ajuste (FIT) al ser estimadas con la herramienta System Identification (*systemIdentification*).

Con esta comparación se contará tanto con una representación basada en el modelo físico como con una representación basada en el mejor ajuste a los datos experimentales, lo cual servirá como base para la etapa de análisis multivariable y diseño de control.

2.10.3.1 Matriz de transferencia del modelo matemático (basada en parámetros físicos) en el dominio de Transformada de Laplace (s)

A partir del modelo matemático presentado en la Figura 2.46, se construyó la matriz de transferencia $G(s)$ del sistema multivariable. Para ello, se obtuvieron las funciones de transferencia que relacionan cada entrada con cada salida. El procedimiento consistió en anular (hacer cero) la entrada no considerada en cada

análisis y, posteriormente, determinar la relación entre la entrada activa y las salidas del sistema.

Bajo esta definición, se estableció que la primera entrada corresponde al voltaje del variador de frecuencia V_f , la segunda entrada al voltaje de campo V_e ; mientras que la primera salida es la frecuencia generada f y la segunda salida el voltaje generado V_g . En consecuencia, la matriz de transferencia del modelo matemático queda definida como:

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{5.9}{(0.78219s+1)(0.78244s+1)} & 0 \\ \frac{0.2672}{(0.78219s+1)(0.78244s+1)} & \frac{2.2832}{0.1395s+1} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Desarrollando las funciones de transferencia para expresarlas en forma polinómica, se obtiene:

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{5.9}{0.612016s^2+1.56463s+1} & 0 \\ \frac{0.2672}{0.612016s^2+1.56463s+1} & \frac{2.2832}{0.1395s+1} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Finalmente, al adoptar la estructura matricial del sistema e incorporar las perturbaciones estimadas en la modelación (asociadas a la carga), se obtuvo el diagrama completo del modelo multivariable, el cual se presenta en la Figura 2.51.

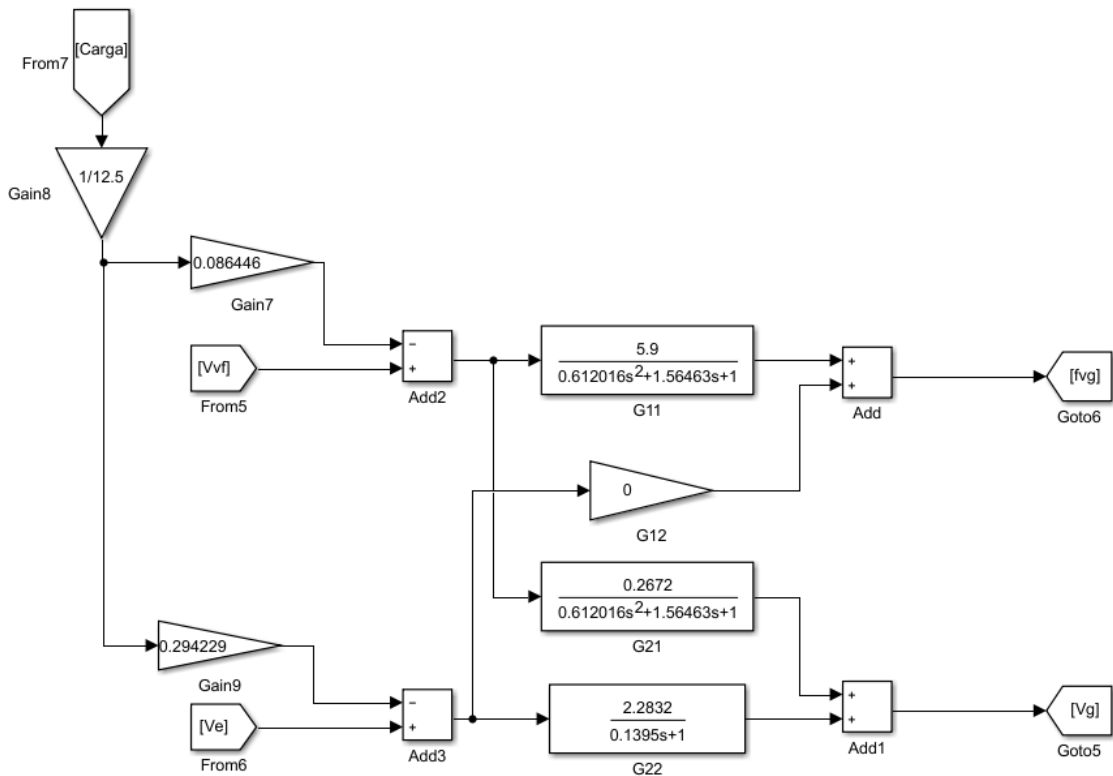


Figura 2.51 Implementación del modelo multivariable en estructura matricial, incluyendo perturbaciones por carga

2.10.3.2 Matriz de transferencia del modelo matemático (basada en parámetros físicos) en el dominio de Transformada Z

Una vez obtenidas las funciones de transferencia en el dominio de la transformada de Laplace (s), se procedió a su discretización para construir la matriz de transferencia del modelo matemático en el dominio de la transformada Z. Para ello, se utilizó la función `c2d(Funcion_Transferencia, Ts, 'zoh')` de MATLAB, empleando un tiempo de muestreo $T_s = 0.1$ sy el método de retención de orden cero (ZOH), de manera consistente con la adquisición de datos y la implementación digital del sistema.

Como resultado, se obtuvo la siguiente matriz de transferencia discreta:

$$G(z) = \begin{bmatrix} \frac{0.04428z+0.04067}{z^2-1.76z+0.7744} & 0 \\ \frac{0.002006z+0.001842}{z^2-1.76z+0.7744} & \frac{1.168}{z-0.4883} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

El resultado generado por MATLAB al discretizar las funciones de transferencia se presenta en la Figura 2.52

```

G_modelo_matematico_d =

From input 1 to output...
      0.04428 z + 0.04067
1:  -----
      z^2 - 1.76 z + 0.7744

      0.002006 z + 0.001842
2:  -----
      z^2 - 1.76 z + 0.7744

From input 2 to output...
1:  0

      1.168
2:  -----
      z - 0.4883

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

```

Figura 2.52 Resultado en MATLAB de la discretización de las funciones de transferencia

Posteriormente, la implementación del modelo multivariable discretizado en estructura matricial se presenta en la Figura 2.53.

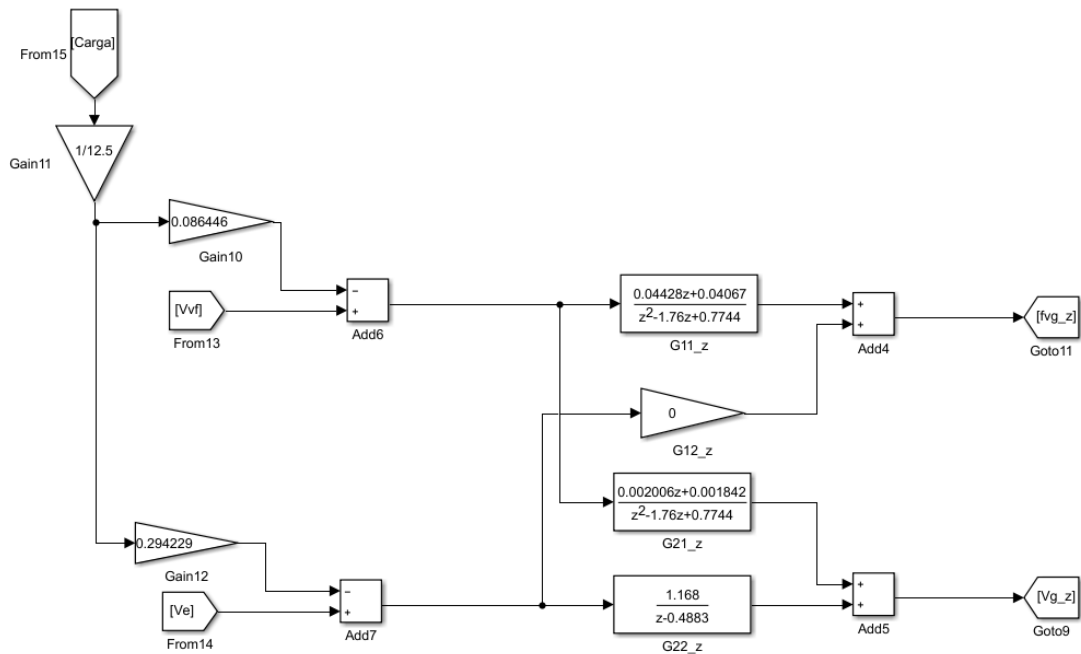


Figura 2.53 Implementación del modelo multivariable discretizado en estructura matricial $G(z)$

2.10.3.3 *Matriz de transferencia identificada (basada en ajuste FIT con System Identification)*

En esta sección se estimó la matriz de transferencia $G(s)$ mediante identificación, utilizando datos experimentales obtenidos con carga fija de 12.5Ω . Para ello se emplearon dos ensayos:

- Ensayo 1: el voltaje del variador de frecuencia V_{vf} varió entre 10 V y 8.33 V, mientras el voltaje de campo V_e se mantuvo constante en 1.25 V.
- Ensayo 2: el voltaje del variador de frecuencia V_{vf} se mantuvo constante en 10 V, mientras el voltaje de campo V_e varió alrededor de su punto de operación $1.25 \pm 0.2V$.

Con estos datos se estimaron las funciones de transferencia que relacionan cada entrada con cada salida, seleccionando en cada caso el modelo que presentó el mejor porcentaje de ajuste (FIT) dentro de la herramienta *System Identification*.

Para la función de transferencia que relaciona el voltaje del variador de frecuencia con la frecuencia generada ($V_{vf} \rightarrow f_{vg}$), se observa en la Figura 2.54 que el modelo con dos polos obtuvo el mejor desempeño, alcanzando un FIT de 88.25%.

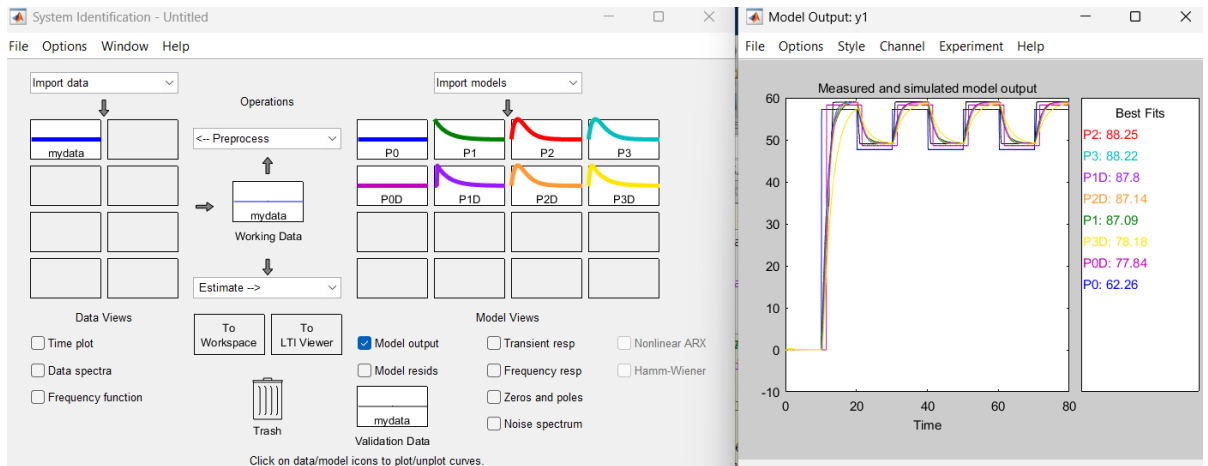


Figura 2.54 Comparación y selección del mejor modelo identificado para la función de transferencia $V_{vf} \rightarrow f_{vg}$ (FIT = 88.25%)

De manera análoga, para la función de transferencia que relaciona el voltaje del variador de frecuencia con el voltaje generado ($V_{vf} \rightarrow V_g$), la Figura 2.55 muestra que el modelo con dos polos presentó el mejor ajuste, con un FIT de 85.88%.

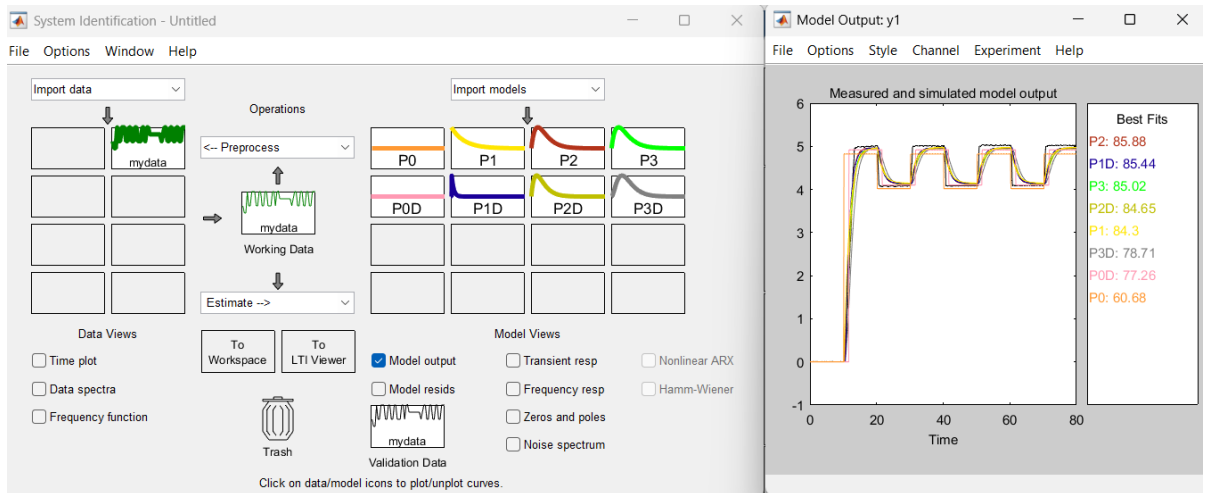


Figura 2.55 Comparación y selección del mejor modelo identificado para la función de transferencia $V_{vf} \rightarrow V_g$ (FIT = 85.88%)

Para estimar las funciones de transferencia asociadas al voltaje de campo, se emplearon los datos del segundo ensayo ($V_{vf} = 10\text{ V}$, $V_e = 1.25 \pm 0.2\text{ V}$) bajo carga. En la Figura 2.56 se evidencia que, para la función de transferencia ($V_e \rightarrow f_{vg}$), todos los modelos evaluados presentaron un FIT menor o igual a 0 (incluso negativo). En consecuencia, y de forma consistente con el comportamiento observado, se adoptó:

$$\frac{f_{vg}(s)}{V_e(s)} = 0 \quad (2.42)$$

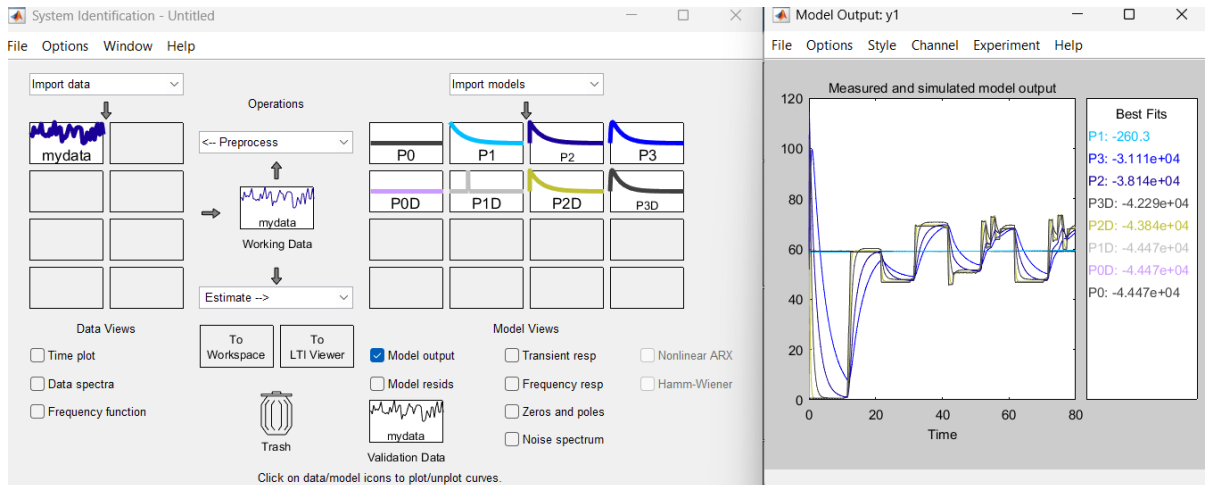


Figura 2.56 Resultado de identificación para la función de transferencia $V_e \rightarrow f_{vg}$: ajuste nulo o negativo

En contraste, para la función de transferencia que relaciona el voltaje de campo con el voltaje generado ($V_e \rightarrow V_g$), la Figura 2.57 muestra que el modelo con un polo presentó el mejor desempeño, con un FIT de 96.14%.

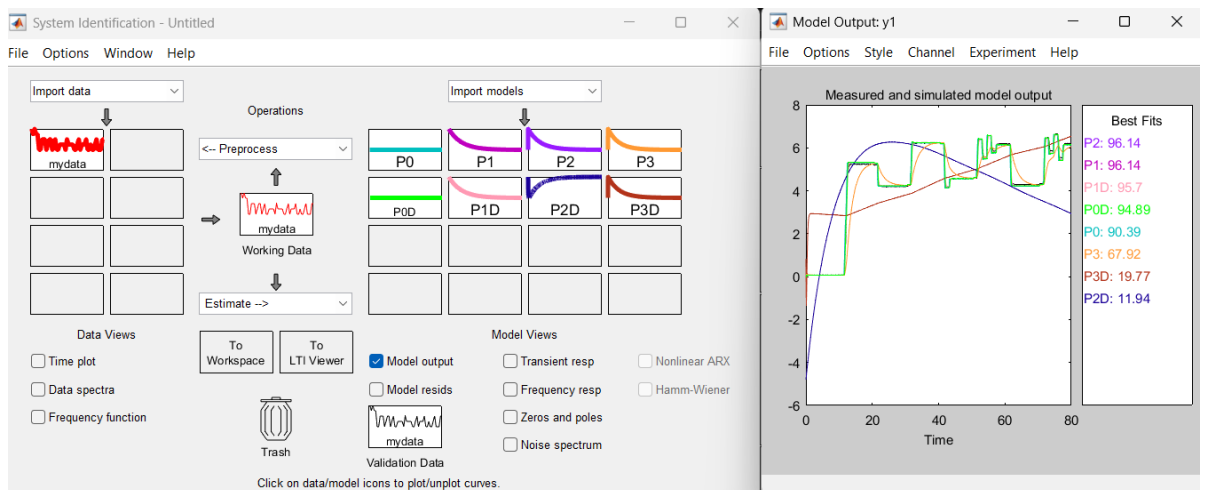


Figura 2.57 Comparación y selección del mejor modelo identificado para la función de transferencia $V_e \rightarrow V_g$ (FIT = 96.14%)

Bajo esta convención, se definió que las entradas del sistema son V_{vf} y V_e , mientras que las salidas corresponden a f_{vg} y V_g . Por tanto, la matriz de transferencia identificada queda expresada como:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{5.891}{0.6512s^2 + 1.614s + 1} & 0 \\ \frac{0.4965}{0.6503s^2 + 1.613s + 1} & \frac{4.192}{0.1385s + 1} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Finalmente, al adoptar la estructura matricial del sistema con las funciones de transferencia identificadas, se obtuvo el diagrama completo del modelo multivariable, el cual se presenta en la Figura 2.58.

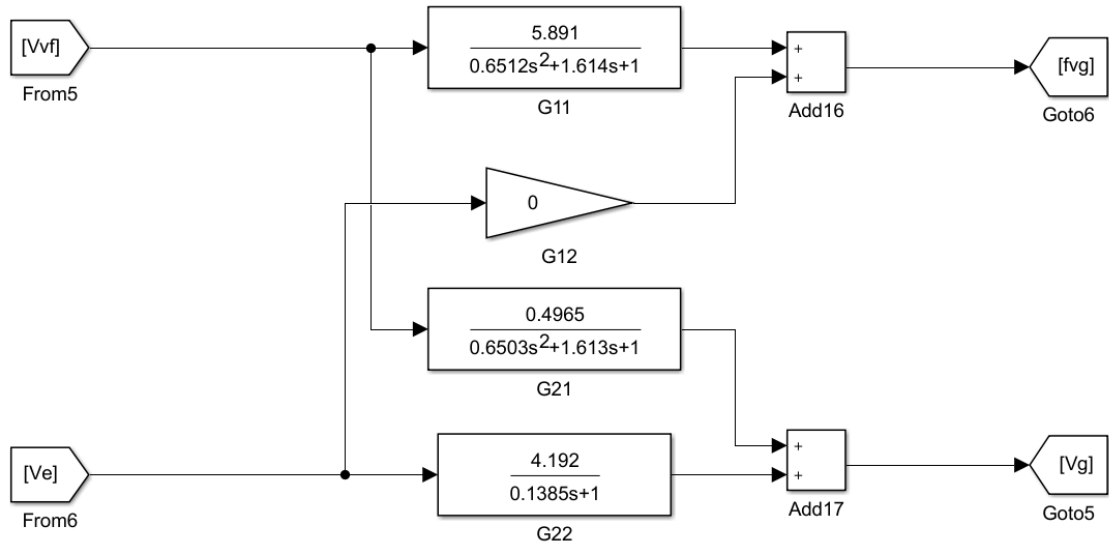


Figura 2.58 Implementación del modelo multivariable identificado en estructura matricial $G(s)$, con entradas V_{vf} , V_{ey} salidas f_{vg} , V_g

2.10.3.4 Matriz de transferencia del modelo con mejor identificación en el dominio de Transformada Z

De manera análoga a lo realizado para el modelo matemático, las funciones de transferencia identificadas en el dominio de la transformada de Laplace (s) se discretizaron para obtener la matriz de transferencia del modelo identificado en el dominio de la transformada Z . Para ello, se utilizó la función `c2d(Funcion_Transferencia, Ts, 'zoh')` de MATLAB, empleando un tiempo de muestreo $T_s = 0.1$ y el método de retención de orden cero (ZOH).

Como resultado, se obtuvo la siguiente matriz de transferencia discreta:

$$G(z) = \begin{bmatrix} \frac{0.04166z+0.03836}{z^2-1.767z+0.7805} & 0 \\ \frac{0.003516z+0.003237}{z^2-1.767z+0.7805} & \frac{2.156}{z-0.4858} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

El resultado generado por MATLAB al discretizar las funciones de transferencia se presenta en la Figura 2.59,

```

G_identificada_d =

From input 1 to output...
      0.04166 z + 0.03836
1:  -----|
      z^2 - 1.767 z + 0.7805

      0.003516 z + 0.003237
2:  -----
      z^2 - 1.767 z + 0.7803

From input 2 to output...
1:  0

      2.156
2:  -----
      z - 0.4858

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

```

Figura 2.59 Resultado en MATLAB de la discretización de las funciones de transferencia

Mientras que la implementación del modelo multivariable discretizado en estructura matricial se muestra en la Figura 2.60.

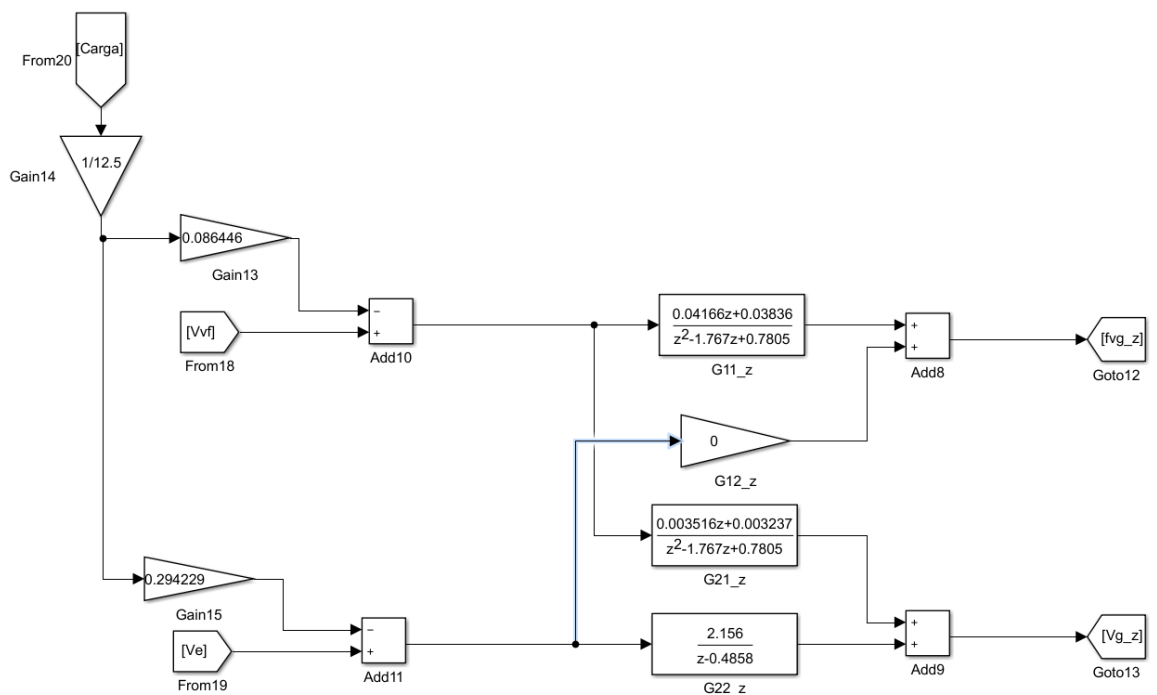


Figura 2.60 Implementación del modelo multivariable discretizado en estructura matricial $G(z)$.

2.11 Diseño de los controladores PID

En este trabajo se adoptó un enfoque de control multivariable descentralizado (MIMO) basado en desacoplo, el cual transforma la planta multivariable en un conjunto de lazos SISO (una entrada–una salida) aproximadamente independientes mediante la incorporación de un bloque desacoplador. Sobre cada lazo resultante se implementó un controlador PID individual (Smith & Corripio, 1997; Orellana et al., 2017). Este enfoque resultó conveniente por su simplicidad y amplia aplicación en control industrial, ya que permite emplear técnicas de sintonización monovariable bien establecidas y diseñar cada lazo de forma separada. La estructura general de la estrategia de control se presenta en la Figura 2.61.

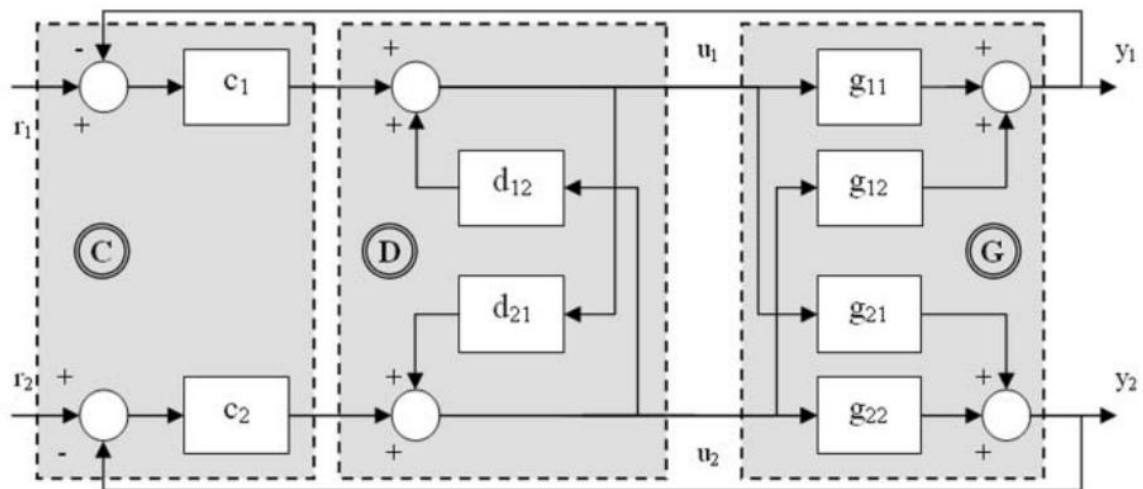


Figura 2.61 Sistema de control mediante desacoplo inverso de un proceso TITO (Juan Garrido Jurado, 2012)

2.11.1 Matriz de Ganancias Relativas (RGA)

Para seleccionar el emparejamiento entrada–salida más conveniente se empleó la Matriz de Ganancias Relativas (Relative Gain Array, RGA). La RGA normaliza las ganancias estacionarias del proceso y cuantifica el grado de interacción entre variables en un sistema multivariable. A partir de la matriz de ganancias estáticas $K = G(0)$, la RGA se define como:

$$\Lambda = K \circ (K^{-1})^T \quad (2.45)$$

donde \circ representa el producto elemento a elemento (Hadamard) (Bristol, 1966). En esta tesis, la RGA se calculó en MATLAB utilizando la ganancia en estado estacionario del modelo lineal, evaluando cada elemento de $G(s)$ en $s = 0$.

Cada término λ_{ij} indica cómo varía la ganancia efectiva del lazo y_i-u_j cuando los demás lazos se encuentran cerrados. Valores $\lambda_{ij} \approx 1$ reflejan baja interacción, mientras que valores alejados de la unidad evidencian acoplamiento significativo. En general, se recomienda emparejar cada variable controlada con la variable manipulada asociada a un λ_{ij} positivo y cercano a 1, evitando emparejamientos con elementos negativos, ya que pueden introducir interacciones indeseables y comprometer la estabilidad (Orellana et al., 2017; Bristol, 1966).

Como se muestra en la Figura 2.62, el análisis RGA aplicado tanto al modelo basado en parámetros físicos como al modelo obtenido mediante identificación arrojó la matriz identidad:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

RGA Modelo Físico (2.10.3.1):

1	0
0	1

RGA Modelo ID (2.10.3.2):

1	0
0	1

Figura 2.62 Matriz de Ganancias Relativas (RGA) obtenida para el modelo físico y el modelo identificado

Este resultado indica que el sistema presenta un desacoplo en estado estacionario (o una estructura equivalente de tipo triangular inferior), de modo que el canal principal ($V_{vf} \rightarrow f_{vg}$) se comporta de manera independiente respecto del segundo. En términos prácticos, ello valida que el emparejamiento es directo y adecuado, y respalda la implementación de una estrategia de control descentralizada mediante controladores PID independientes para frecuencia y voltaje, con mínima interferencia entre lazos.

2.11.2 Diseño del desacoplador inverso

Una vez definido el emparejamiento entrada-salida, se diseñó un desacoplador inverso para la planta 2x2 con el propósito de atenuar las interacciones cruzadas entre ambos lazos. Este bloque introduce acciones de compensación tipo feedforward entre las entradas, buscando que el comportamiento del sistema sea

aproximadamente diagonal y, por tanto, reducir el acoplamiento entre variables manipuladas y salidas no deseadas.

Para un sistema 2×2 descrito por la matriz de transferencia $G(s)$, cuya estructura general se expresa en términos de $G_{ij}(s)$, el desacoplador inverso ideal puede representarse como:

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\ -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Bajo esta formulación, el producto $G(s)D(s)$ tiende a reducir los términos fuera de la diagonal principal, disminuyendo las transferencias cruzadas. El desacoplador se calculó en MATLAB a partir de los modelos disponibles e incorporó dentro de la ruta de control. Si bien la presencia de retardos, dinámicas no modeladas o incertidumbre paramétrica puede impedir un desacoplo perfecto, un desacoplo aproximado suele ser suficiente para mejorar el desempeño global al reducir la interacción entre lazos (Smith & Corripio, 1997).

De acuerdo con la Figura 2.63, el desacoplador obtenido para el modelo matemático (basado en parámetros físicos) fue:

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-0.02667s - 0.1912}{s^2 + 2.557s + 1.634} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

mientras que para el modelo identificado se obtuvo:

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-0.02523s - 0.1821}{s^2 + 2.48s + 1.538} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

```

--- Desacoplador D21 (Modelo Físico 2.10.3.1) ---

D21_f =

      -0.02667 s - 0.1912
      -----
      s^2 + 2.557 s + 1.634

Continuous-time transfer function.
|
--- Desacoplador D21 (Modelo ID 2.10.3.2) ---

D21_i =

      -0.02523 s - 0.1821
      -----
      s^2 + 2.48 s + 1.538

Continuous-time transfer function.

```

Figura 2.63 Funciones de transferencia del desacoplador inverso para el modelo matemático y el modelo identificado en el dominio de la transformada de Laplace (s)

En el caso de los desacopladores en el dominio discreto, las funciones se discretizaron y los resultados se presentan en la Figura 2.64. Para el modelo matemático, se obtuvo:

$$D(z) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-0.001469z+0.003153}{z^2-1.76z+0.7744} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

mientras que para el modelo identificado se obtuvo:

$$D(z) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-0.00139z+0.003001}{z^2-1.767z+0.7804} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

<pre> Di_d = From input 1 to output... 1: 1 2: 0 From input 2 to output... -0.00139 z + 0.003001 1: ----- z^2 - 1.767 z + 0.7804 2: 1 Sample time: 0.1 seconds Discrete-time transfer function. </pre>	<pre> Dm_d = From input 1 to output... 1: 1 2: 0 From input 2 to output... -0.001469 z + 0.003153 1: ----- z^2 - 1.76 z + 0.7744 2: 1 Sample time: 0.1 seconds Discrete-time transfer function. </pre>
---	---

Figura 2.64 Resultados de los desacopladores inversos discretizados en el dominio de la transformada (z)

2.11.3 Sintonización de los controladores PID

Con el desacoplador inverso implementado y el sistema multivariable adecuadamente desacoplado, se procedió a la sintonización de controladores PID independientes para cada uno de los lazos de control: frecuencia generada y voltaje generado. El diseño de los controladores se realizó inicialmente en el dominio de la transformada de Laplace (s), empleando un enfoque continuo, lo cual permitió analizar con mayor claridad la dinámica del sistema y facilitar el cumplimiento de las especificaciones de desempeño.

La sintonización se llevó a cabo mediante técnicas clásicas SISO, apoyadas por la herramienta interactiva SISOTOOL de MATLAB/Simulink (Control System Designer), utilizando análisis en el lugar geométrico de las raíces y en el dominio del tiempo. Los parámetros se ajustaron de forma iterativa hasta cumplir los siguientes criterios de diseño:

- tiempo de estabilización menor o igual a 8 s,
- sobreimpulso nulo (0 %) ante cambios de referencia,
- error estacionario cero frente a perturbaciones tipo escalón, garantizado por la acción integral.

Estos requisitos se definieron debido a que tanto la frecuencia como el voltaje de generación deben mantenerse dentro de márgenes estrictos, evitando desviaciones significativas durante el régimen transitorio y permanente.

Como resultado del proceso de sintonización, se determinó que un controlador de tipo PI era suficiente para ambos lazos, prescindiendo del término derivativo. Esta decisión se justificó porque la acción derivativa no fue necesaria para cumplir las especificaciones y, además, su uso puede amplificar el ruido de medición, lo cual resulta poco conveniente en entornos industriales.

Durante la implementación se incorporó un esquema de anti-windup, con el objetivo de prevenir la acumulación excesiva del término integral cuando la señal de control alcanza los límites físicos del actuador. En este trabajo, el mecanismo anti-windup se implementó de manera que, ante un cambio de consigna, el error integral acumulado se reinicia, evitando efectos de arrastre entre referencias consecutivas y mejorando el comportamiento transitorio del sistema.

Las respuestas temporales obtenidas para ambos modelos evidencian el cumplimiento de las especificaciones. Para el modelo identificado con mejor porcentaje de ajuste, se obtuvo un tiempo de estabilización aproximado de 6.24 s en el lazo de frecuencia (Figura 2.65) y de 7.12 s en el lazo de voltaje (Figura 2.66). En el caso del modelo matemático, el tiempo de estabilización fue de 7.02 s para la frecuencia (Figura 2.67) y de 5.64 s para el voltaje (Figura 2.68), manteniéndose en todos los casos un sobreimpulso nulo y error estacionario cero.

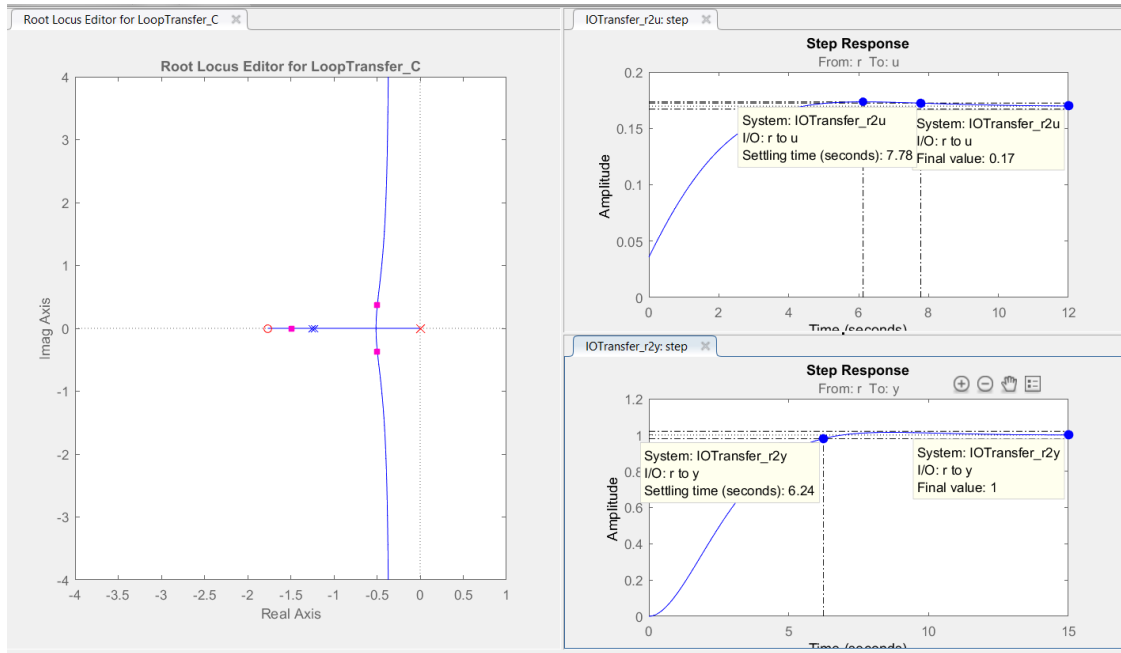


Figura 2.65 Respuesta temporal y sintonización PI del lazo de frecuencia para el modelo identificado de mejor ajuste

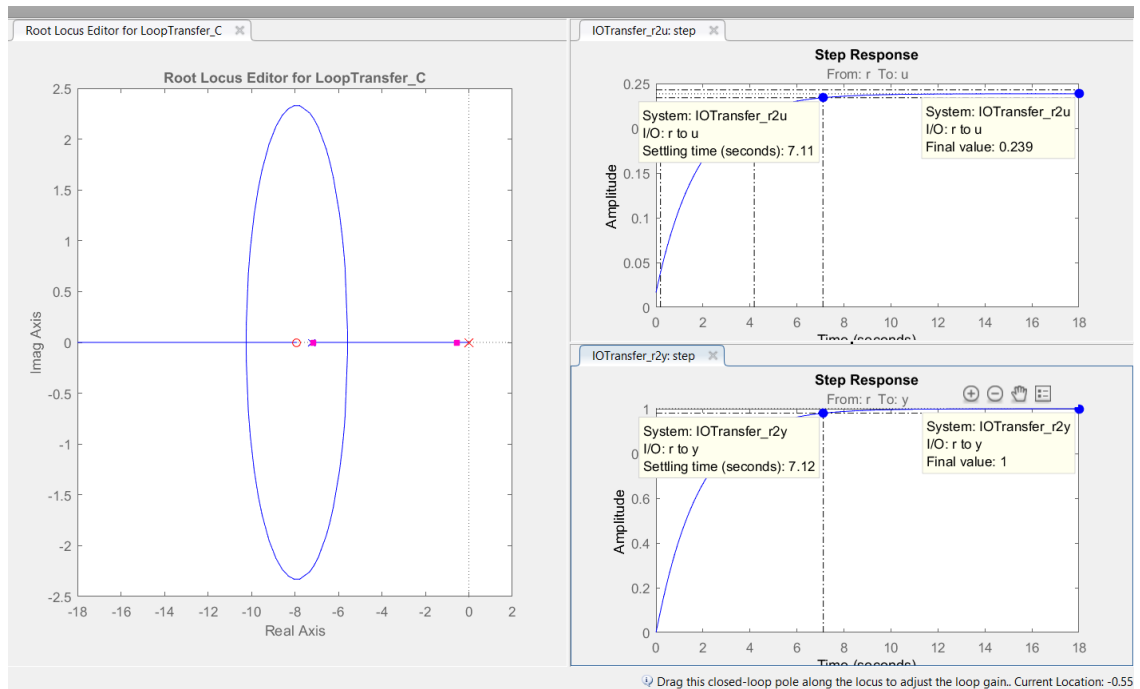


Figura 2.66 Respuesta temporal y sintonización PI del lazo de voltaje para el modelo identificado de mejor ajuste

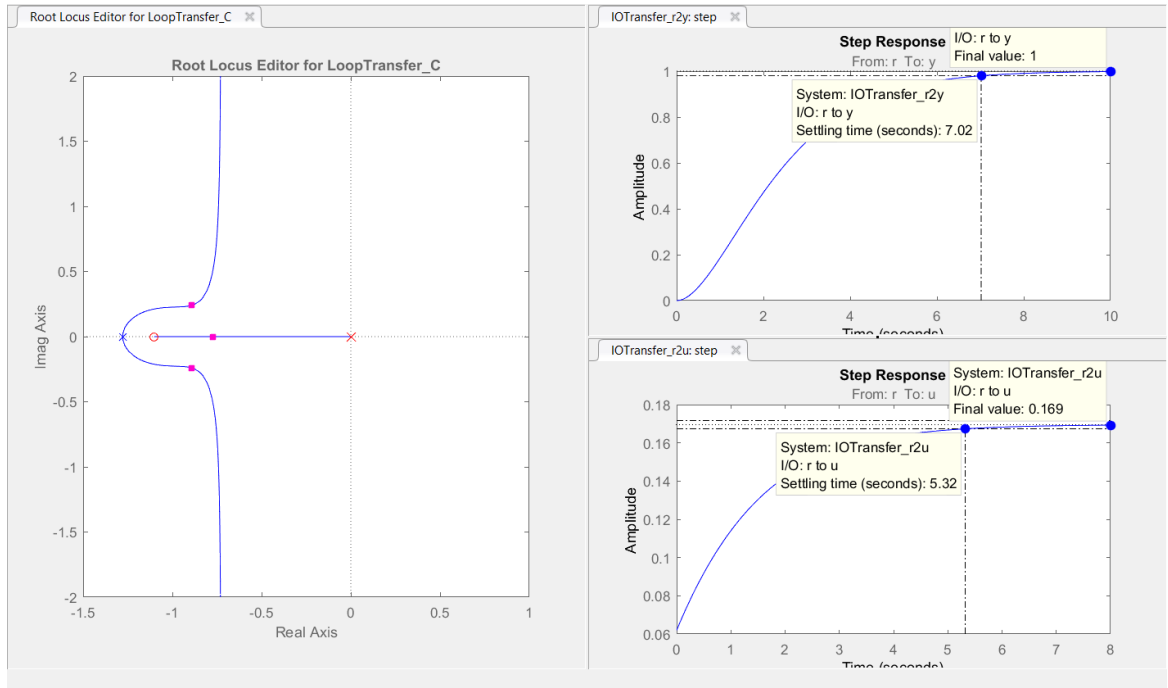


Figura 2.67 Respuesta temporal y sintonización PI del lazo de frecuencia para el modelo matemático

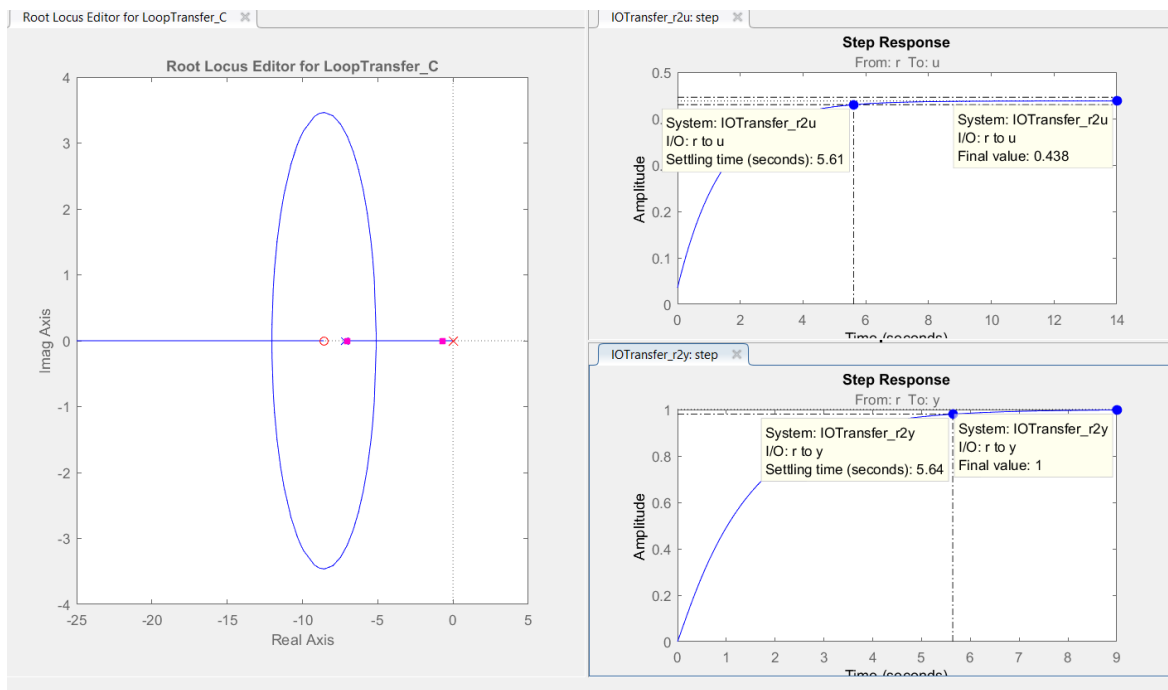


Figura 2.68 Respuesta temporal y sintonización PI del lazo de voltaje para el modelo matemático

Los parámetros finales de los controladores continuos obtenidos se resumen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros de los controladores PI en el dominio de la transformada de Laplace (s)

Controlador	Kp	Ki	Kd
Frecuencia Generada del Modelo Matemático	0.0620	0.0684	0
Voltaje Generado del Modelo Matemático	0.0350	0.3001	0
Frecuencia Generada del Mejor Porcentaje de Ajuste	0.0358	0.0632	0
Voltaje Generado del Mejor Porcentaje de Ajuste	0.0165	0.1304	0

Una vez definidos los controladores en el dominio continuo, se procedió a su discretización para implementar el esquema de control en el sistema real. Este proceso se realizó empleando la forma regular (paralela) del PID discreto, con un tiempo de muestreo $T_s = 0.1$ s, seleccionado en coherencia con las limitaciones de comunicación vía OPC y con el requisito de operación en tiempo real de la planta.

Los parámetros del controlador en el dominio de la transformada Z se resumen en la Tabla 2.3, y corresponden a los valores efectivamente utilizados durante la etapa experimental. Es importante destacar que las ganancias K_p , K_i y K_d se mantienen numéricamente iguales al pasar del dominio continuo al discreto, debido a que se empleó el bloque Discrete PID Controller de Simulink en configuración paralela. En este caso, la discretización no se realiza mediante una transformación externa de las ganancias, sino que es ejecutada internamente por el bloque a partir del algoritmo seleccionado, incorporando explícitamente el tiempo de muestreo.

De este modo, K_p , K_i y K_d continúan representando la intensidad de las acciones proporcional, integral y derivativa definidas en el diseño continuo, mientras que los efectos del muestreo y del método de aproximación (por ejemplo, Euler hacia adelante) quedan reflejados en la ecuación discreta del controlador a través de T_s . Por esta razón, no se requiere un ajuste numérico adicional de los parámetros P , I y D ; la equivalencia entre el controlador continuo y su implementación digital

depende principalmente de que T_s sea lo suficientemente pequeño en relación con la dinámica dominante del sistema, de manera que la aproximación discreta preserve el desempeño esperado. Asimismo, a partir de la ecuación (1.5) puede expresarse el controlador en términos de K_{pp} , K_{ip} y K_{dp} ; sin embargo, para la forma regular implementada en Simulink, dicha parametrización es equivalente y consistente con el uso directo de K_p , K_i y K_d del diseño continuo.

Tabla 2.3 Parámetros de los controladores PI en el dominio de la transformada Z

Controlador	K_{pp}	K_{ip}	K_{dp}
Frecuencia Generada del Modelo Matemático	0.0620	0.00684	0
Voltaje Generado del Modelo Matemático	0.0350	0.03001	0
Frecuencia Generada del Mejor Porcentaje de Ajuste	0.0358	0.00632	0
Voltaje Generado del Mejor Porcentaje de Ajuste	0.0165	0.01304	0

Finalmente, el diagrama de bloques completo del sistema simulado con controlador digital y desacoplador (modelo matemático) se presenta en la Figura 2.69.

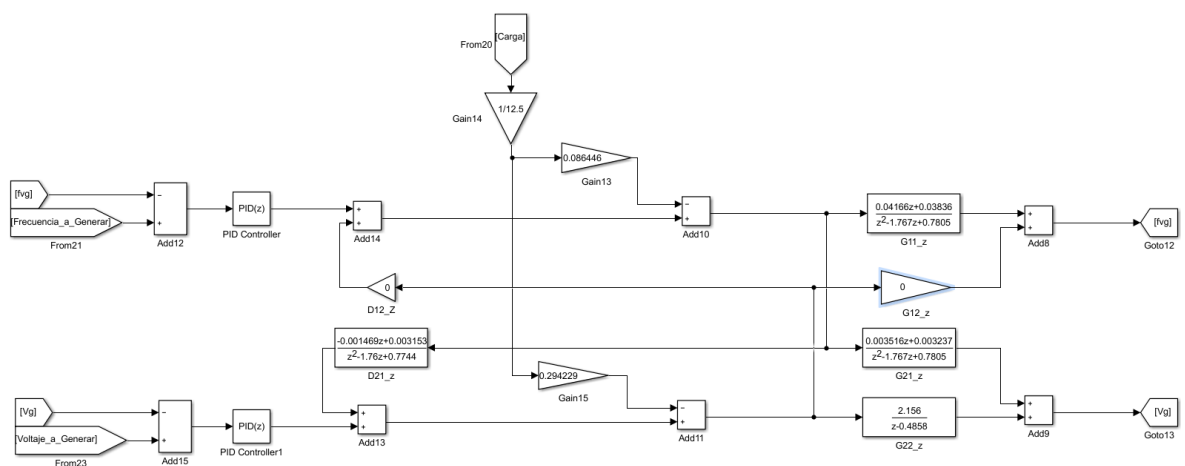


Figura 2.69 Diagrama de bloques completo del sistema (modelo matemático) con desacoplador inverso y controladores PI

Y el esquema completo de control implementado en el sistema real, que incluye el desacoplador inverso, los controladores PI discretos y el mecanismo de anti-

windup, se presenta en la Figura 2.70, mientras que los parámetros digitales implementados se muestran en la Figura 2.71.

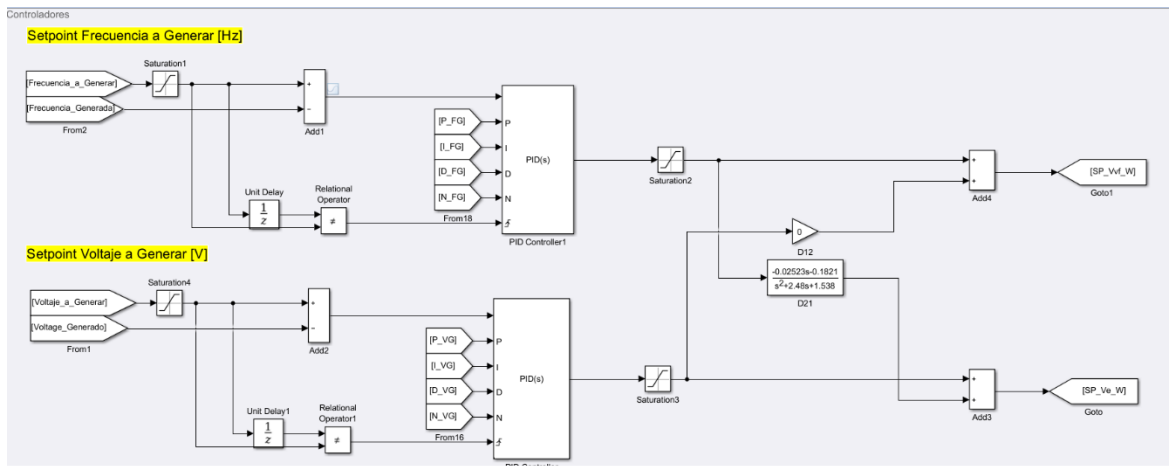


Figura 2.70 Implementación en Simulink del esquema de control real con controladores PI discretos, anti-windup y desacoplador inverso

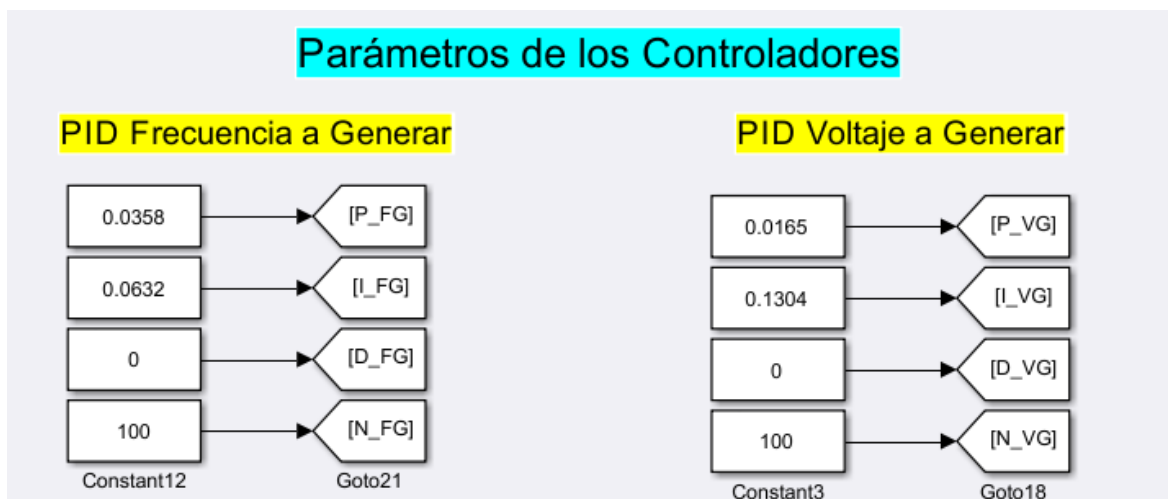


Figura 2.71 Parámetros implementados de los controladores PI discretos para los lazos de frecuencia y voltaje

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentaron y analizaron los resultados obtenidos a partir de las soluciones implementadas en la investigación. Se priorizaron los hallazgos más representativos y aquellos que evidenciaron el cumplimiento de los objetivos planteados, destacando el desempeño técnico del sistema y la calidad de los resultados alcanzados.

Para organizar el análisis, el capítulo se estructuró en tres subsecciones principales. En primer lugar, se evaluaron los resultados de la repotenciación y la puesta en marcha de la planta de generación eléctrica, verificando el funcionamiento integrado de sus subsistemas, el comportamiento operativo bajo condiciones reales de laboratorio y la estabilidad de la adquisición de datos. En este apartado también se incluyeron los resultados de la comunicación industrial mediante OPC, donde se comprobó la transmisión y visualización correcta de variables desde el PLC hacia las computadoras del laboratorio y el entorno de supervisión.

En segundo lugar, se analizaron los resultados del modelo matemático desarrollado mediante el enfoque de caja gris, comparando su respuesta con los datos experimentales y valorando su capacidad para representar la dinámica relevante del sistema. Se presentaron métricas y evidencias de ajuste que permitieron sustentar la validez del modelo en los rangos de operación considerados.

Finalmente, se evaluó el desempeño de los controladores PID discretizados diseñados e implementados, considerando criterios de respuesta dinámica y precisión en régimen permanente. Se reportaron los resultados obtenidos tanto en simulación como en la operación sobre la planta real, incluyendo el comportamiento ante cambios de referencia y perturbaciones, con el objetivo de demostrar la efectividad de la estrategia de control propuesta.

3.1 Repotenciación y puesta en marcha de la planta y comunicación OPC de la planta

Una vez finalizada la conexión, configuración e integración de los equipos que conforman la planta de generación eléctrica, se verificó su puesta en marcha y operación continua bajo condiciones estables. Como se muestra en la Figura 3.1, el sistema quedó operativo y con comunicación correcta entre los módulos

principales. Esta condición se corroboró mediante los indicadores luminosos (LED) en estado verde, los cuales evidenciaron el funcionamiento normal de los equipos, sin alarmas activas y con enlace de comunicación establecido entre los dispositivos de automatización y supervisión.



Figura 3.1 Planta de generación eléctrica repotenciada y operativa (puesta en marcha en laboratorio)

Con el objetivo de validar que la programación del PLC y la parametrización de los sensores se realizaron adecuadamente, se revisó el bloque de datos OPC_DATA [DB2] en TIA Portal. Tal como se observa en la Figura 3.2, el DB mostró la actualización continua de las variables críticas del proceso, entre ellas el voltaje generado, la frecuencia generada, el voltaje de campo y las señales

provenientes de los potenciómetros físicos. La estabilidad de lectura y la coherencia de los valores registrados confirmaron que el escalamiento, el mapeo de señales y la asignación de direcciones para publicación vía OPC se encontraban correctamente configurados, lo cual aseguró una adquisición confiable de datos desde la planta hacia los sistemas externos de monitoreo.

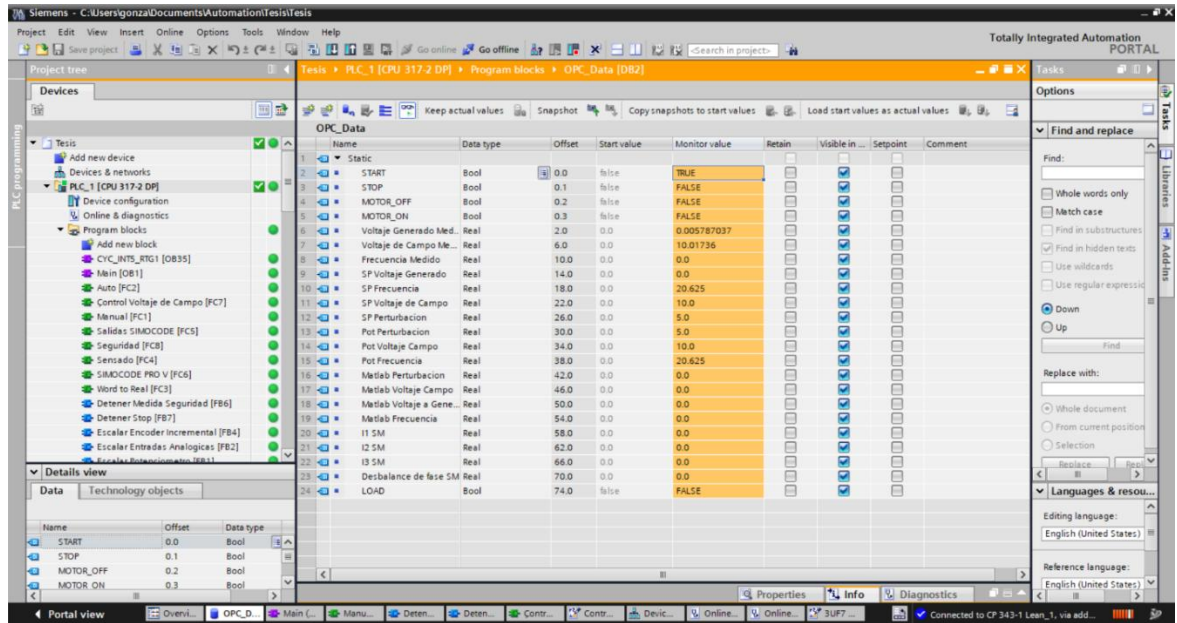


Figura 3.2 Monitoreo de variables en el DB OPC_DATA [DB2] en TIA Portal para validación de programación y sensado

Posteriormente, para comprobar la comunicación industrial y la adquisición de datos en tiempo real entre la planta y MATLAB/Simulink, se empleó la interfaz HMI desarrollada para el modo automático. En esta etapa se ejecutaron pruebas iniciales de control implementando un PID preliminar (ajuste por tanteo) únicamente con fines de verificación de enlace, lectura de variables y respuesta del sistema. Como se aprecia en la Figura 3.3, las señales azul y roja correspondieron a los puntos de ajuste (consignas) de frecuencia y voltaje, mientras que la señal naranja representó la respuesta medida en la planta (frecuencia y voltaje generados).

La validación se realizó durante un tiempo de simulación de 80 s, con un tiempo de muestreo de 0.1 s, lo cual permitió confirmar que la adquisición de datos y la supervisión se ejecutaron de forma sincronizada con la operación real del sistema. En consecuencia, se evidenció que la planta trabajó en tiempo real con la interfaz desarrollada, manteniendo una transmisión estable de variables a través de OPC

y garantizando condiciones adecuadas para las etapas posteriores de experimentación, modelado y control.

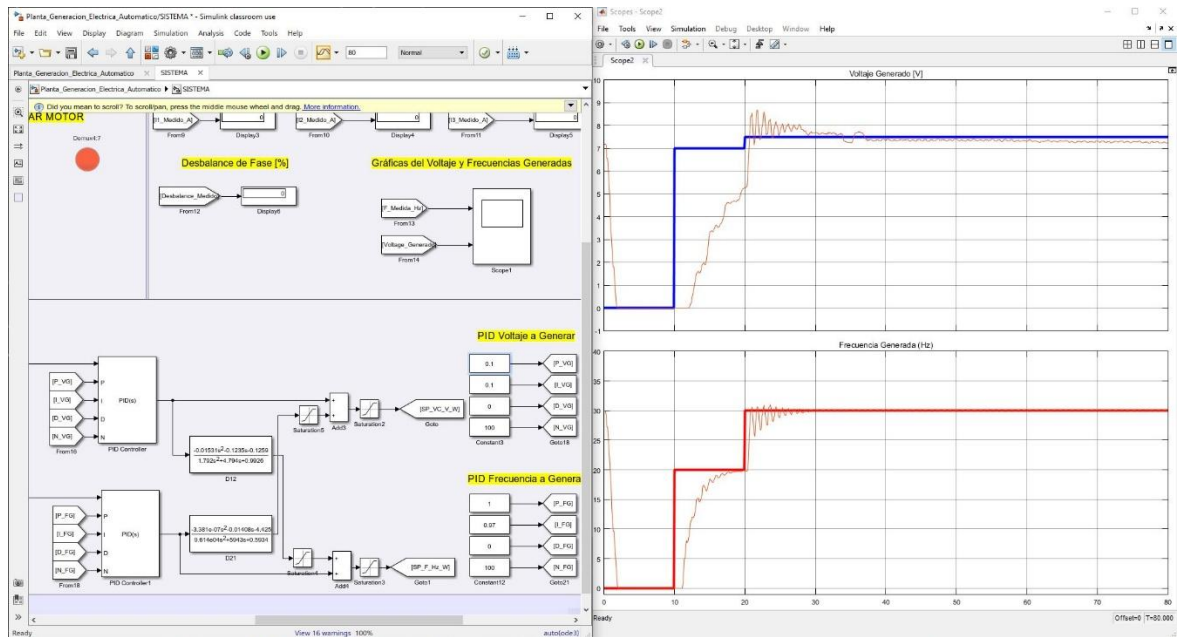


Figura 3.3 Verificación de comunicación PLC–OPC–MATLAB/Simulink mediante HMI en modo automático (prueba preliminar de control en tiempo real)

3.2 Resultados del modelado matemático mediante enfoque de caja gris

Para evaluar el grado de precisión del modelo matemático propuesto en la representación del comportamiento de la planta real, se empleó la métrica de porcentaje de ajuste (FIT) definida en la ecuación (2.21) y descrita en la Sección 2.10.2 del presente documento. Esta métrica cuantifica la similitud entre las señales simuladas y las mediciones experimentales, tomando como referencia el error cuadrático normalizado respecto a la variación de la señal real. En términos prácticos, mientras más cercano sea el valor del FIT al 100 %, mayor será la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento dinámico del sistema físico; valores reducidos o negativos indican una baja correspondencia entre el modelo y la planta real.

El análisis del porcentaje de ajuste se aplicó principalmente a las variables voltaje generado y frecuencia generada, ya que constituyen las salidas de interés del sistema. Para ello, se consideraron dos escenarios experimentales representativos, previamente descritos con mayor detalle en la Sección 2.10.2, donde se documentó la adquisición de datos y los resultados obtenidos en la planta física:

- **Experimento 1:** Variación del voltaje del variador de frecuencia de 10 V a 8.33 V, manteniendo el voltaje de campo constante en 1.25 V y una carga fija de 12.5 Ω .
- **Experimento 2:** Variación del voltaje de campo alrededor de 1.25 V \pm 0.2 V, manteniendo constante el voltaje del variador de frecuencia.

Para el caso simulado, se utilizó la interfaz mostrada en la Figura 3.4, la cual incorpora bloques *To Workspace* que permitieron almacenar las señales de entrada y salida del modelo matemático. Estas señales fueron posteriormente procesadas mediante scripts en MATLAB para el cálculo del porcentaje de ajuste correspondiente a cada variable y escenario de prueba.

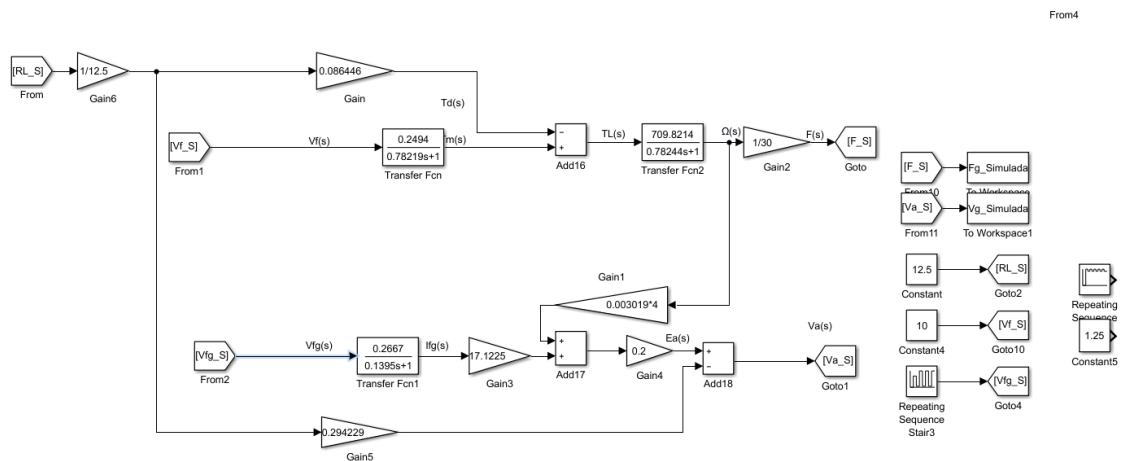


Figura 3.4 Interfaz de simulación en MATLAB/Simulink para la evaluación del porcentaje de ajuste (FIT)

En el Experimento 1, donde el voltaje del variador de frecuencia varía y el voltaje de campo se mantiene constante, los resultados obtenidos muestran que el modelo matemático alcanzó un FIT de 76.20 % para el voltaje generado, como se observa en la Figura 3.5. Este valor indica una correspondencia adecuada entre la respuesta simulada y la respuesta real, especialmente en el comportamiento dinámico dominante del sistema.

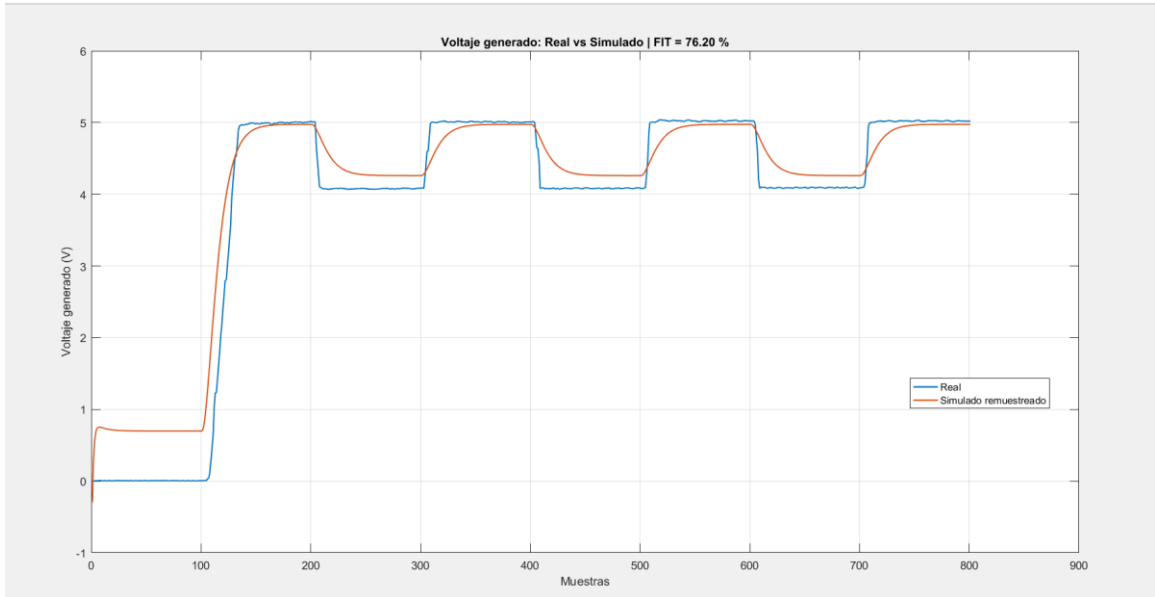


Figura 3.5 Porcentaje de ajuste del voltaje generado para el experimento con variación del voltaje del variador de frecuencia

Para el mismo experimento, la Figura 3.6 presenta un FIT de 84.90 % para la frecuencia generada, lo que evidencia un desempeño superior del modelo en la representación de esta variable. Este resultado sugiere que la dinámica asociada a la frecuencia fue capturada con mayor precisión, tanto en régimen transitorio como en estado estacionario.

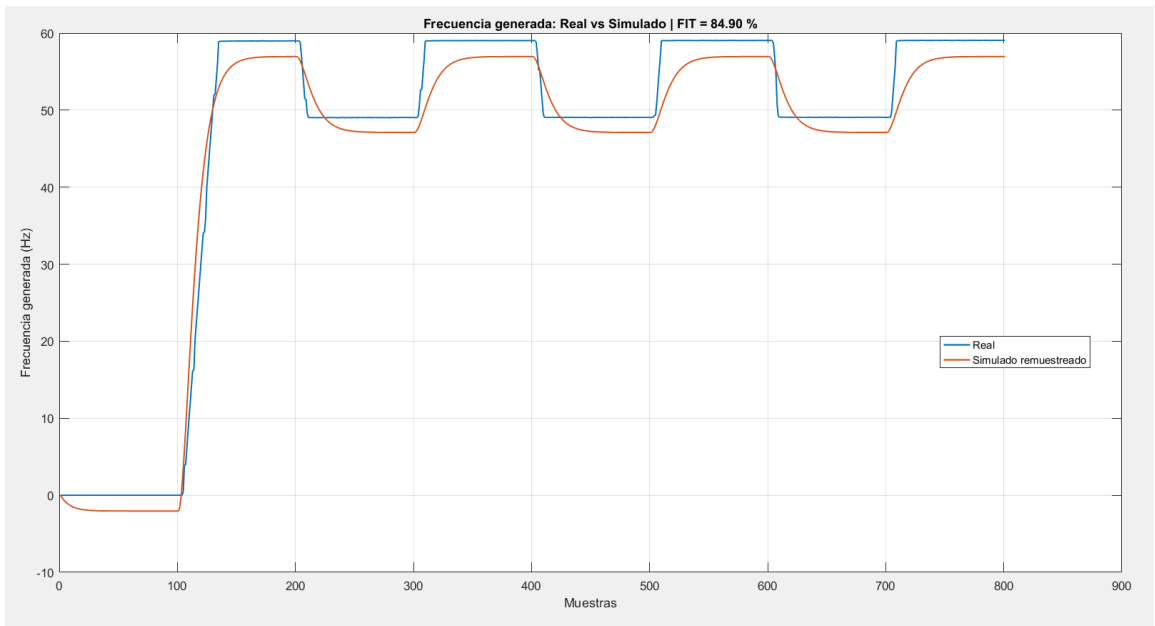


Figura 3.6 Porcentaje de ajuste de la frecuencia generada para el experimento con variación del voltaje del variador de frecuencia

En el Experimento 2, donde el voltaje del variador de frecuencia se mantiene constante y el voltaje de campo es la variable excitada, el modelo matemático presentó un FIT de 63.39 % para el voltaje generado, como se muestra en la Figura 3.7. Si bien este valor es inferior al obtenido en el primer experimento, continúa indicando una capacidad razonable del modelo para reproducir la tendencia general del comportamiento del voltaje, aunque con mayores discrepancias en ciertos intervalos.

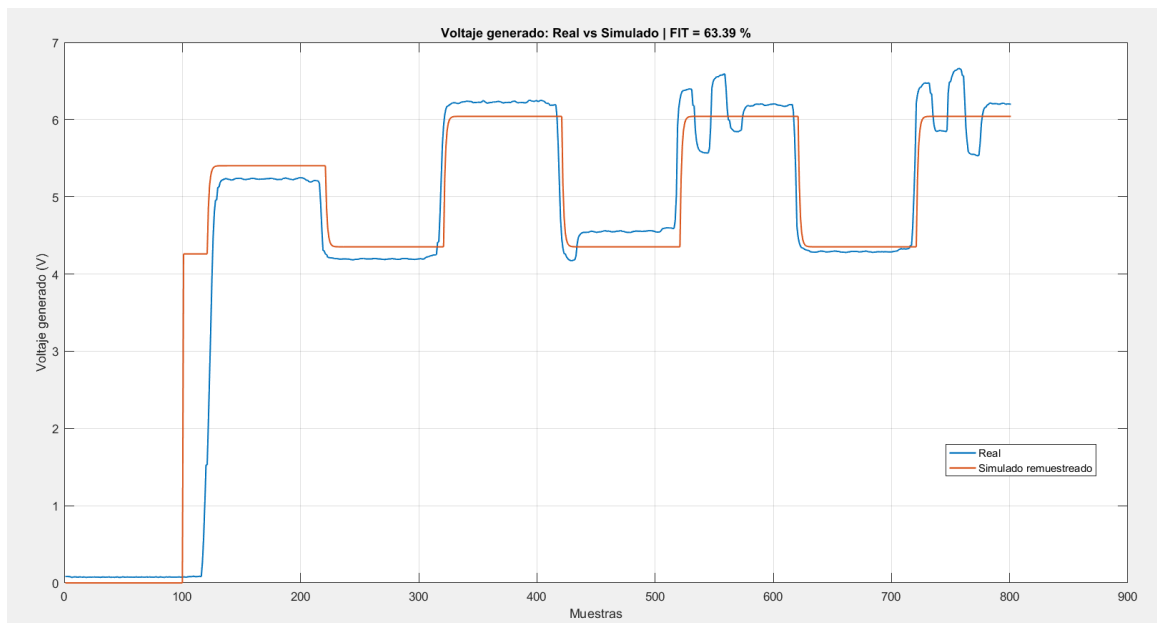


Figura 3.7 Porcentaje de ajuste del voltaje generado para el experimento con variación del voltaje de campo

En contraste, la Figura 3.8 muestra un FIT de -71.08% para la frecuencia generada en este segundo experimento. Este resultado negativo no implica necesariamente un fallo del modelo, sino que se atribuye a que, en la planta real, la frecuencia presentó variaciones muy pequeñas alrededor de su valor nominal, acompañadas de un nivel considerable de ruido de medición. Bajo estas condiciones, la métrica FIT se vuelve extremadamente sensible a pequeñas discrepancias, lo que conduce a valores bajos o incluso negativos, aun cuando el modelo reproduzca adecuadamente la dinámica física subyacente.

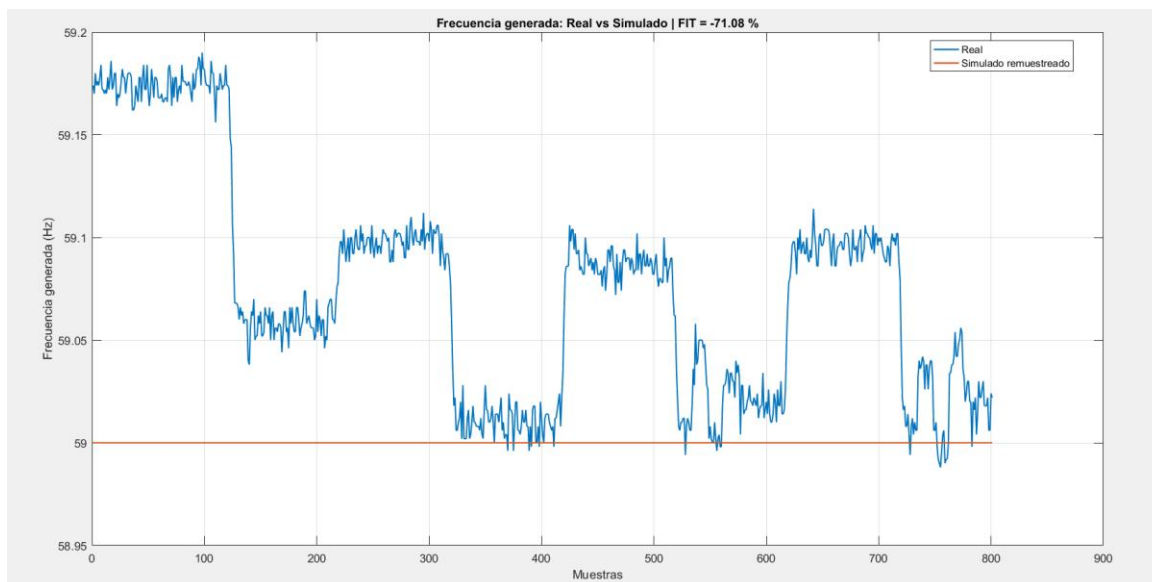


Figura 3.8 Porcentaje de ajuste de la frecuencia generada para el experimento con variación del voltaje de campo.

De manera resumida, los porcentajes de ajuste obtenidos para ambos experimentos se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Porcentaje de ajuste (FIT) del modelo matemático para las variables de salida

Experimento	FIT Voltaje Generado	FIT Frecuencia Generada
Voltaje de campo constante y voltaje de variador de frecuencia variable	76.20%	84.90%
Voltaje de variador de frecuencia constante y voltaje de campo variable	63.39%	-71.08%

El análisis de la Tabla 3.1 permite concluir que el modelo matemático presenta un mejor desempeño en escenarios donde la frecuencia es excitada de forma significativa, como ocurre cuando se varía el voltaje del variador de frecuencia. En este caso, los valores de FIT superiores al 75 % indican una representación adecuada del comportamiento dinámico de la planta real. Por el contrario, cuando la frecuencia permanece prácticamente constante y solo se ve afectada de manera marginal por la variación del voltaje de campo, el ruido de medición y la

baja amplitud de la señal limitan la efectividad del indicador FIT, dando lugar a valores reducidos o negativos.

En conjunto, estos resultados evidencian que el modelo matemático captura de forma consistente la dinámica dominante del sistema en los rangos de operación más relevantes, especialmente para el diseño y validación de estrategias de control, aunque presenta limitaciones inherentes cuando las variaciones de la variable analizada son mínimas frente al ruido experimental.

3.3 Evaluación del desempeño de los controladores PID

Para evaluar el desempeño de los controladores PID implementados, se consideraron dos escenarios complementarios. En el primero, se emplearon los parámetros sintonizados a partir del modelo matemático para regular el voltaje y la frecuencia generados en el entorno de simulación, con el objetivo de verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño bajo condiciones controladas. En el segundo escenario, se utilizaron los parámetros obtenidos del modelo con mejor porcentaje de ajuste (FIT) para regular el voltaje y la frecuencia generados directamente en la planta real, permitiendo contrastar el rendimiento del controlador frente a las no idealidades propias del sistema físico (ruido de medición, saturaciones, retardos y variaciones de carga). De esta manera, se comprobó tanto la validez del diseño como su aplicabilidad práctica en operación real.

Las métricas empleadas para el análisis del desempeño fueron las mismas en ambos escenarios, con el fin de realizar una comparación consistente:

- Tiempo de estabilización: $T_s \leq 8s$
- Error estacionario: $E_{ss} = 0$
- Porcentaje de sobreimpulso: $M_p = 0\%$

Para la validación experimental se realizaron tres pruebas, manteniendo la carga activa en todos los casos, con el propósito de evaluar la respuesta del sistema ante cambios escalonados en las consignas y observar la capacidad de seguimiento del controlador en diferentes condiciones de operación:

1. Frecuencia constante y voltaje variable: la frecuencia de referencia se fijó en 60 Hz, mientras que el voltaje de referencia se modificó secuencialmente entre 4 V, 5 V y 6 V, con cambios cada 30 s.

2. Voltaje constante y frecuencia variable: el voltaje de referencia se fijó en 5 V, mientras que la frecuencia de referencia alternó entre 60 Hz y 50 Hz, con cambios cada 30 s.
3. Variación simultánea de voltaje y frecuencia: el voltaje de referencia cambió entre 4 V, 5 V y 6 V cada 30 s, mientras que la frecuencia de referencia alternó entre 60 Hz y 50 Hz cada 40 s.

El análisis se inició con el sistema simulado, empleando la estructura de control mostrada en la Figura 3.9, donde se integran el modelo matemático, el desacoplador y los controladores PID para evaluar su respuesta temporal bajo las consignas definidas.

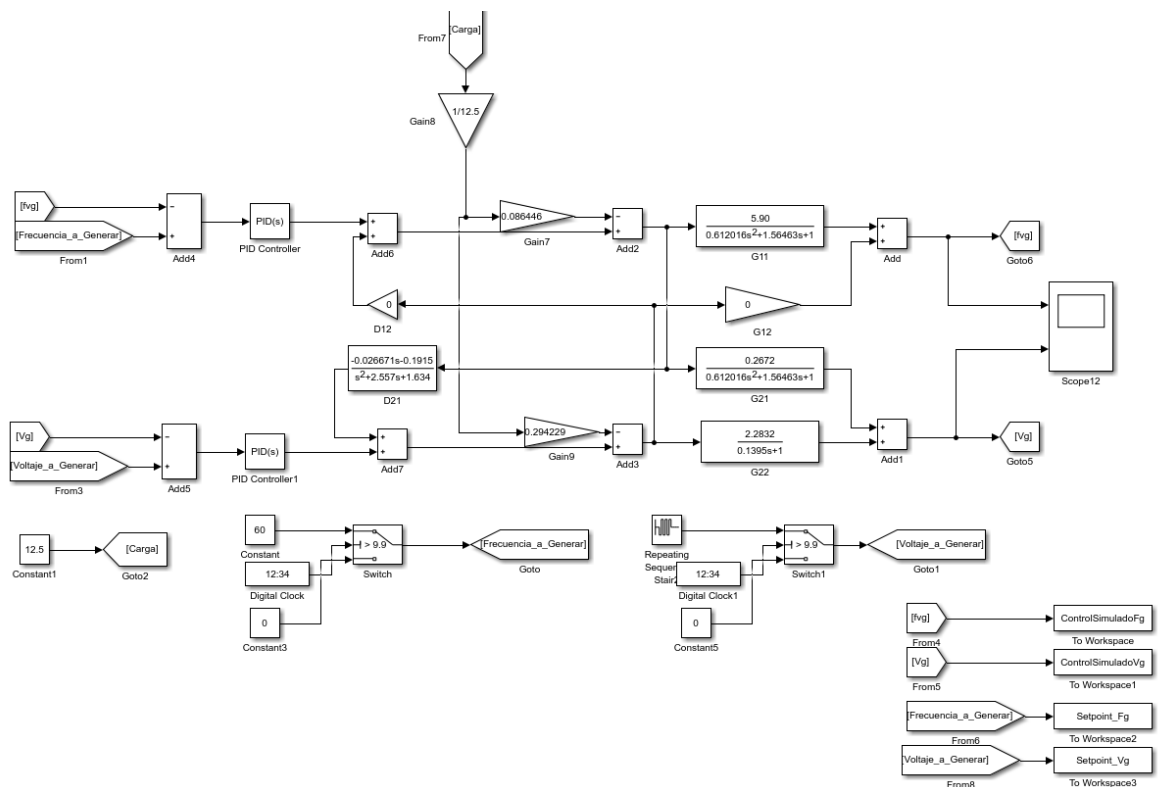


Figura 3.9 Estructura de control PID aplicada al sistema simulado (modelo matemático con desacoplador)

Posteriormente, se analizó el sistema real, utilizando la estructura presentada en la Figura 3.10, la cual incluye la implementación del controlador sobre la planta física, la adquisición de señales y el esquema de supervisión en tiempo real.

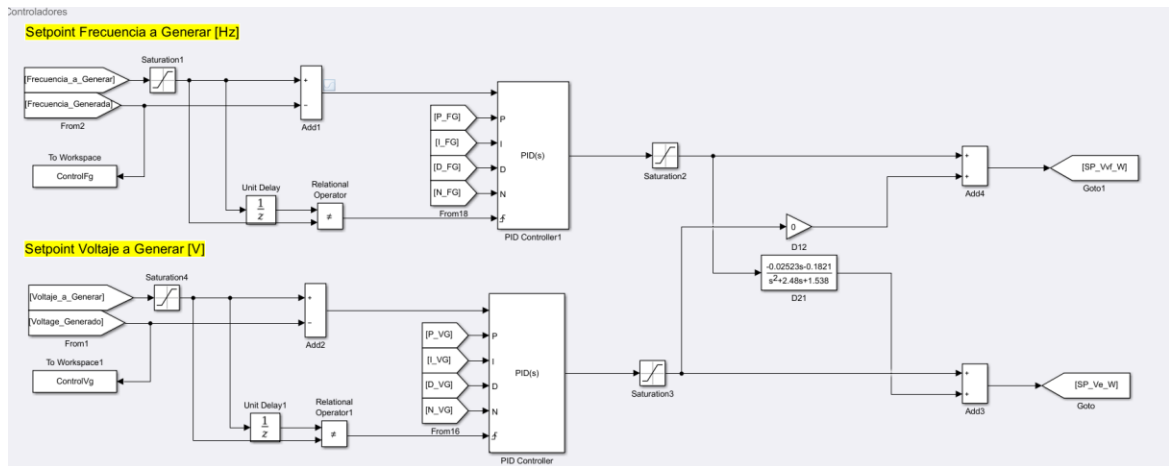


Figura 3.10 Estructura de control PID aplicada a la planta real (parámetros del modelo de mejor ajuste y supervisión en tiempo real)

3.3.1 Escenario 1: Frecuencia constante y voltaje variable:

En la Figura 3.11 se muestra la respuesta del sistema simulado cuando la frecuencia de referencia se mantiene constante en 60 Hz y el voltaje de referencia varía escalonadamente. Se observa que tanto el voltaje como la frecuencia generados siguen de manera adecuada sus respectivos setpoints. Para el voltaje generado, se obtuvo un sobreimpulso promedio nulo ($M_p = 0.00\%$), un tiempo de estabilización promedio de $T_s = 5.64$ s y un error estacionario prácticamente nulo ($E_{ss} = 0.0000$ V). De forma similar, la frecuencia generada presentó $M_p = 0.00\%$, un tiempo de estabilización promedio de $T_s = 7.02$ s y un error estacionario de $E_{ss} = 0.0000$ Hz.

Estos resultados evidencian que, en el entorno simulado, ambos lazos cumplen plenamente los criterios de desempeño establecidos ($T_s \leq 8$ s, $E_{ss} = 0$, $M_p = 0\%$),

logrando un seguimiento estable, sin oscilaciones ni sobrepasos, y con convergencia exacta al valor de referencia.

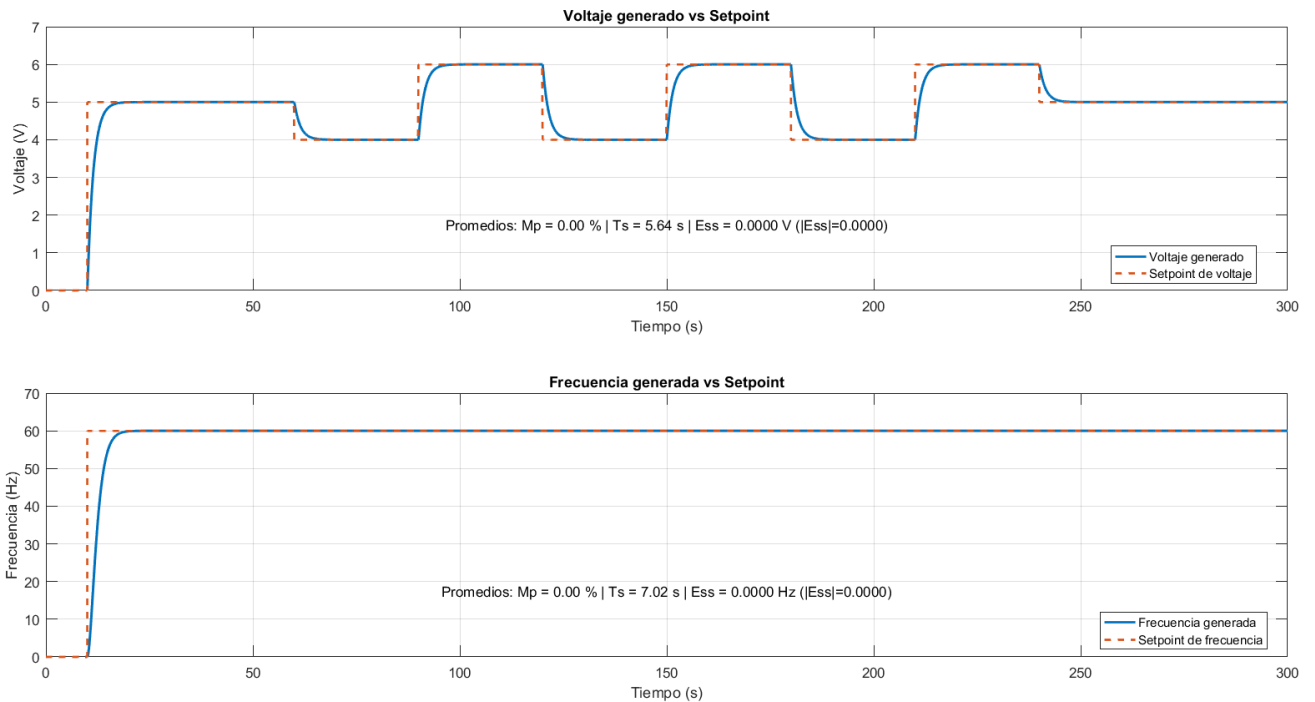


Figura 3.11 Respuesta temporal del sistema simulado ante frecuencia constante y voltaje variable

En la Figura 3.12 se presenta la respuesta correspondiente de la planta real para el mismo escenario. En el caso del voltaje real generado, se observa un sobreimpulso promedio de $M_p = 13.54\%$, un tiempo de estabilización promedio de $T_s = 24.70$ s y un error estacionario cercano a cero ($E_{ss} = -0.0092$ V). Estos resultados indican un buen seguimiento en régimen permanente, aunque con una dinámica más lenta y un mayor sobreimpulso respecto al caso simulado, atribuible a no linealidades, retardos y perturbaciones propias del sistema físico.

Por su parte, la frecuencia real generada no presenta sobreimpulso ($M_p = 0.00\%$), alcanza un tiempo de estabilización de $T_s = 10.60$ s y muestra un error estacionario de $E_{ss} = 0.9154$ Hz, evidenciando un comportamiento estable, pero con una desviación permanente respecto al setpoint. En conjunto, los resultados confirman que el controlador mantiene la estabilidad del sistema, aunque el desempeño dinámico real es más exigente que el observado en simulación.

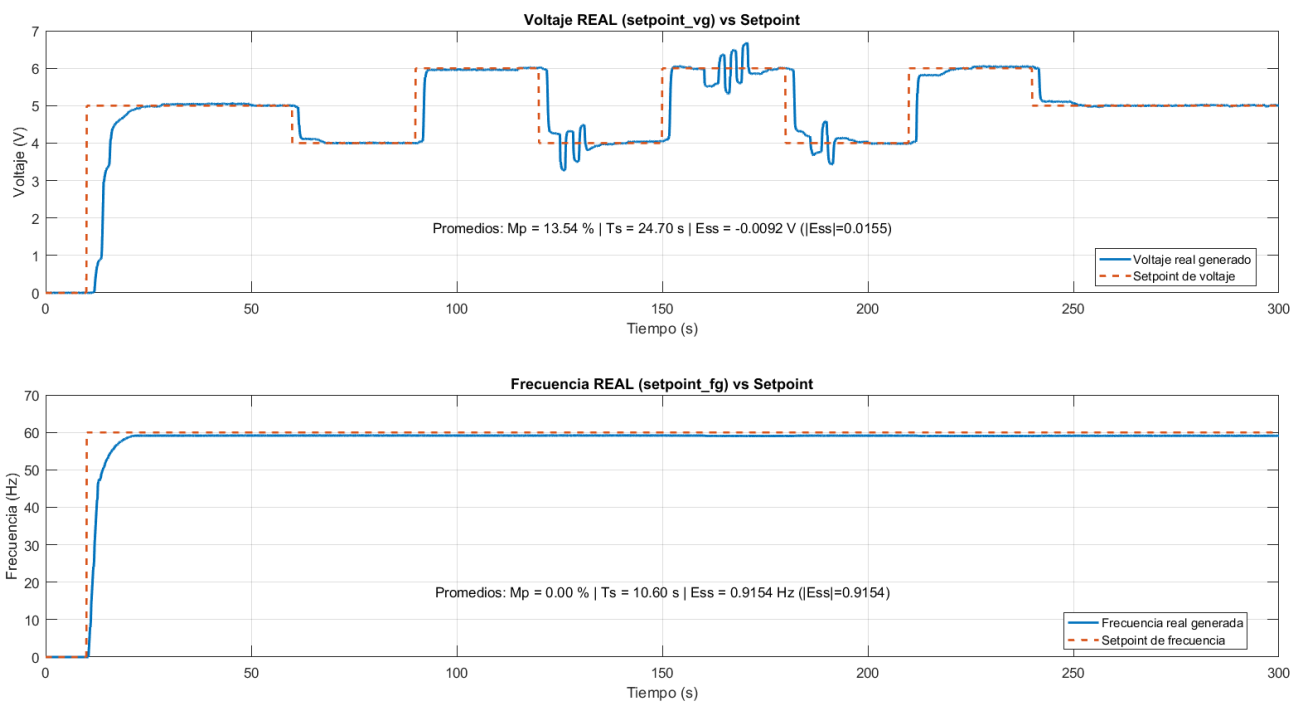


Figura 3.12 Respuesta temporal de la planta real ante frecuencia constante y voltaje variable

3.3.2 Escenario 2: Voltaje constante y frecuencia variable

La Figura 3.13 muestra la respuesta del sistema simulado cuando el voltaje de referencia se mantiene constante y la frecuencia varía escalonadamente. Para el voltaje generado, se obtuvo un sobreimpulso nulo ($M_p = 0.00\%$), un tiempo de estabilización promedio de $T_s = 5.65$ s y error estacionario cero, lo que evidencia un seguimiento preciso y estable.

En cuanto a la frecuencia generada, se registró igualmente $M_p = 0.00\%$, un tiempo de estabilización promedio de $T_s = 7.02$ s y un error estacionario de $E_{ss} = -1.00$ Hz. Aunque este error es pequeño, el comportamiento general se mantiene controlado y libre de oscilaciones. En conjunto, estos resultados confirman que el modelo simulado reproduce adecuadamente la dinámica del sistema y que la sintonización del controlador PID cumple los criterios de desempeño definidos.

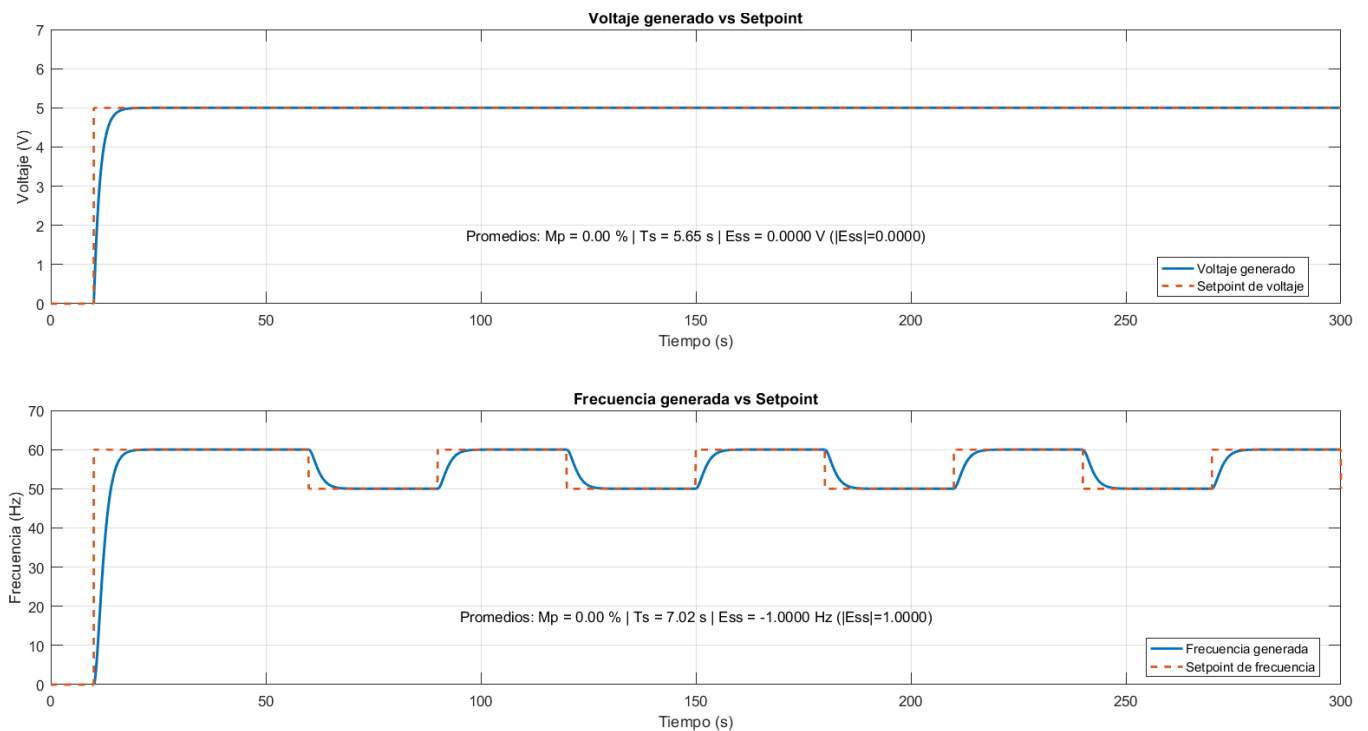


Figura 3.13 Respuesta temporal del sistema simulado ante voltaje constante y frecuencia variable

La Figura 3.14 presenta la respuesta de la planta real para este mismo escenario. En el voltaje real generado se observa un sobreimpulso promedio de $M_p = 14.47\%$, un tiempo de estabilización considerablemente elevado ($T_s = 289.60$ s) y un error estacionario reducido ($E_{ss} = -0.0356$ V). Este comportamiento evidencia que, aunque el sistema converge al valor de referencia, existen oscilaciones persistentes y una dinámica lenta, probablemente asociadas a variaciones de carga, no linealidades del generador y perturbaciones externas.

Por otro lado, la frecuencia real generada presenta un desempeño más favorable, con un sobreimpulso prácticamente nulo ($M_p = 0.19\%$), un tiempo de estabilización de $T_s = 13.34$ s y un error estacionario de $E_{ss} = -0.4638$ Hz. En conjunto, el sistema conserva estabilidad global, aunque el control de voltaje en condiciones reales muestra limitaciones dinámicas significativas.

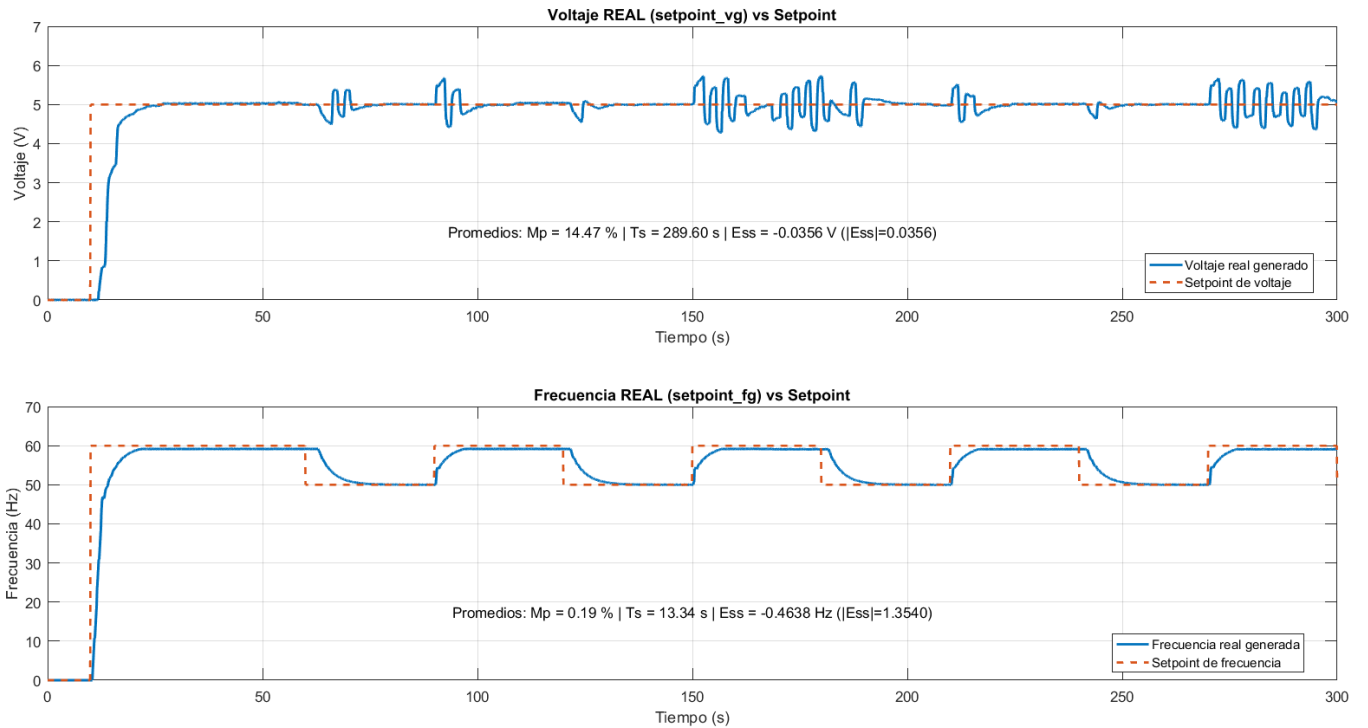


Figura 3.14 Respuesta temporal de la planta real ante voltaje constante y frecuencia variable

3.3.3 Escenario 3: Variación simultánea de voltaje y frecuencia

En la Figura 3.15 se muestra la respuesta del sistema simulado cuando tanto el voltaje como la frecuencia varían de forma escalonada. Para ambas variables se obtuvo un sobreimpulso promedio nulo ($M_p = 0.00\%$), tiempos de estabilización promedio de $T_s = 5.64$ s para el voltaje y $T_s = 7.02$ s para la frecuencia, y error estacionario igual a cero. Estos resultados validan nuevamente que el modelo simulado y la sintonización del controlador PID permiten cumplir de forma consistente con los criterios de desempeño establecidos.

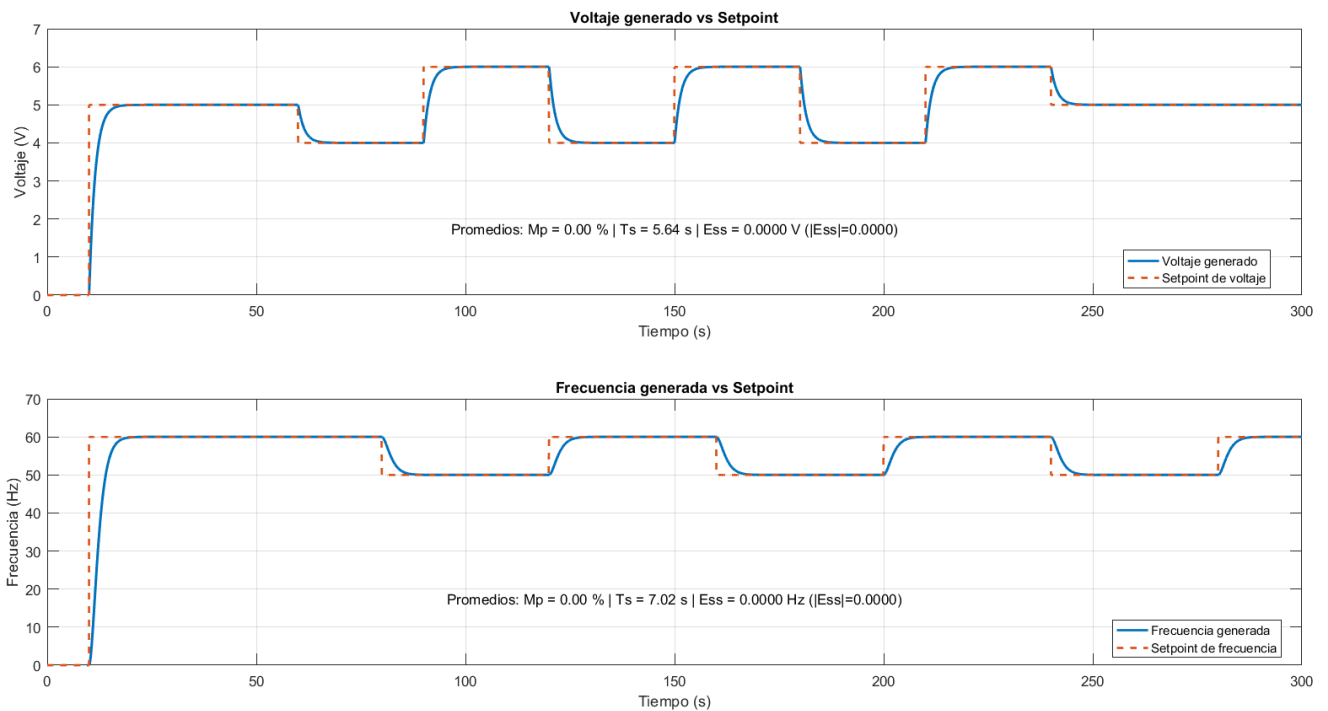


Figura 3.15 Respuesta temporal del sistema simulado ante variación simultánea de voltaje y frecuencia

La Figura 3.16 presenta la respuesta correspondiente de la planta real. Para el voltaje real generado, se observa un sobreimpulso promedio de $M_p = 21.20\%$, un tiempo de estabilización de $T_s = 21.50$ s y un error estacionario pequeño ($E_{ss} = 0.0035$ V), lo que indica convergencia adecuada en régimen permanente, pero con sobrepasos y oscilaciones transitorias más pronunciadas.

En cuanto a la frecuencia real generada, se registra un sobreimpulso reducido ($M_p = 0.21\%$), un tiempo de estabilización de $T_s = 14.25$ s y un error estacionario de $E_{ss} = 0.5094$ Hz. En conjunto, estos resultados confirman la estabilidad del sistema bajo operación real, aunque evidencian limitaciones en el desempeño dinámico, especialmente en el lazo de voltaje, que podrían mitigarse mediante una sintonización adicional o estrategias de control más avanzadas.

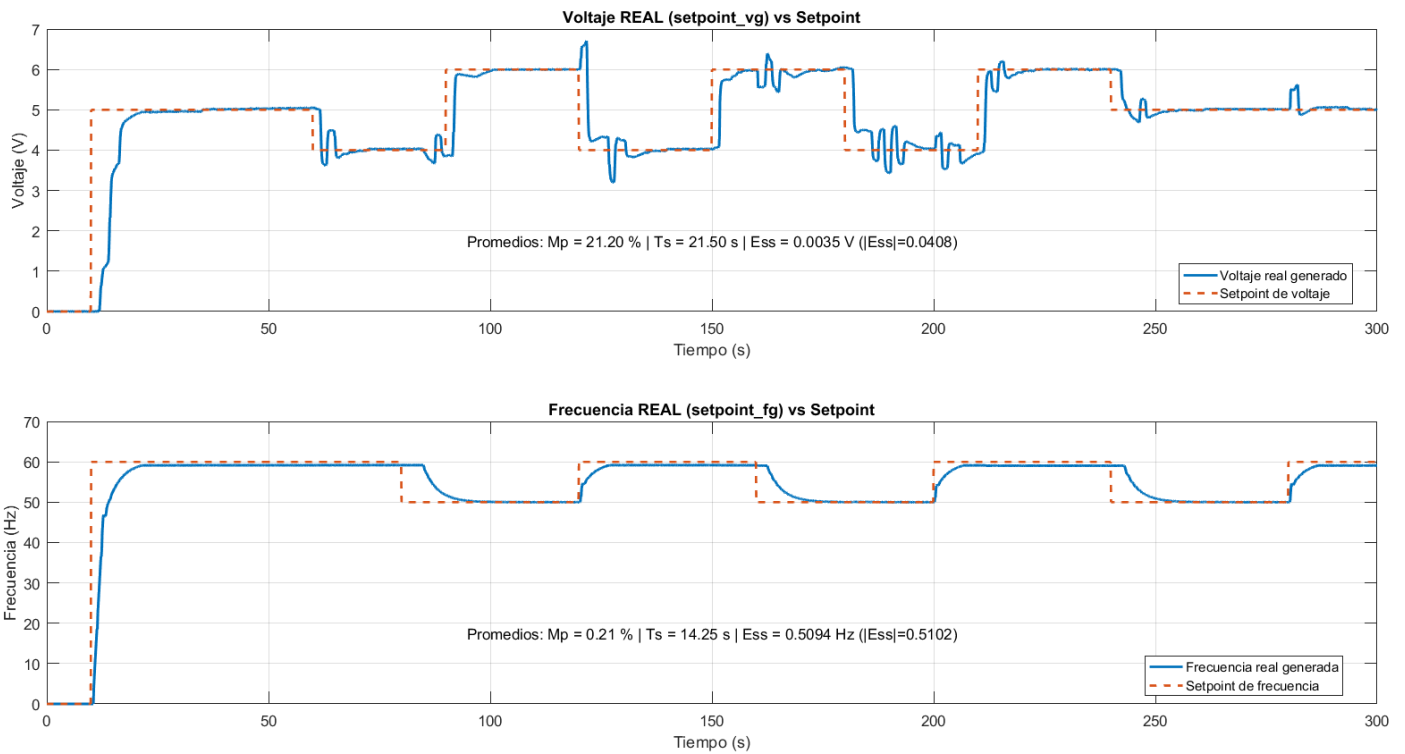


Figura 3.16 Respuesta temporal de la planta real ante variación simultánea de voltaje y frecuencia

Tabla 3.2 Resumen de métricas de desempeño de los controladores PID

Escenario	Sistema	Variable	M_p [%]	T_s [s]	E_{ss}
Frecuencia constante / Voltaje variable	Simulado	Voltaje	0.00	5.64	0.0000 V
	Simulado	Frecuencia	0.00	7.02	0.0000 Hz
	Real	Voltaje	13.54	24.70	-0.0092 V
	Real	Frecuencia	0.00	10.60	0.9154 Hz
Voltaje constante / Frecuencia variable	Simulado	Voltaje	0.00	5.65	0.0000 V
	Simulado	Frecuencia	0.00	7.02	-1.0000 Hz
	Real	Voltaje	14.47	289.60	-0.0356 V
	Real	Frecuencia	0.19	13.34	-0.4638 Hz
Variación simultánea	Simulado	Voltaje	0.00	5.64	0.0000 V
	Simulado	Frecuencia	0.00	7.02	0.0000 Hz
	Real	Voltaje	21.20	21.50	0.0035 V
	Real	Frecuencia	0.21	14.25	0.5094 Hz

De forma global, los resultados demuestran que el controlador PID cumple plenamente los criterios de desempeño en el entorno simulado, logrando respuestas rápidas, sin sobreimpulso y con error estacionario nulo en todos los escenarios evaluados. Esto valida la correcta sintonización de los parámetros y la coherencia del modelo utilizado para el diseño del control.

En la planta real, si bien se mantiene la estabilidad del sistema en todos los casos, se observa un deterioro del desempeño dinámico, particularmente en el lazo de voltaje, donde se presentan mayores sobreimpulsos y tiempos de estabilización significativamente más altos. Estas diferencias se atribuyen principalmente a no linealidades, retardos, saturaciones, ruido de medición y perturbaciones propias del sistema físico, las cuales no están completamente representadas en el modelo simulado.

No obstante, el controlador logra garantizar convergencia al punto de operación y estabilidad global del sistema, lo que confirma su viabilidad para operación real. Los resultados sugieren que mejoras adicionales, como una re-sintonización específica para la planta, el uso de estrategias anti-windup más avanzadas o técnicas de control robusto, podrían optimizar aún más el desempeño dinámico bajo condiciones reales de operación.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo, se concluyó que el objetivo general de implementar un sistema de control en tiempo real para la planta de generación eléctrica del Laboratorio de Sistemas de Control fue cumplido satisfactoriamente. La integración del modelado matemático, el diseño de controladores PID y la utilización del hardware industrial existente permitió habilitar la planta como una plataforma funcional tanto para docencia como para investigación aplicada.

En relación con el primer objetivo específico, se logró configurar de manera exitosa la arquitectura de hardware y comunicación de la planta, estableciendo un enlace de datos confiable en tiempo real mediante un servidor OPC. La comunicación PLC–OPC–MATLAB/Simulink demostró ser estable y consistente durante las pruebas experimentales, permitiendo la adquisición y supervisión continua de variables críticas como voltaje generado, frecuencia generada, voltaje de campo y señales de control, lo cual validó la correcta integración de los sistemas de automatización y supervisión.

Respecto al segundo objetivo específico, se desarrolló un modelo matemático de la planta mediante un enfoque de caja gris, combinando fundamentos físicos con técnicas de identificación de sistemas. La validación del modelo, realizada a través de la métrica de porcentaje de ajuste (FIT), evidenció que el modelo representó adecuadamente la dinámica dominante del sistema en los rangos de operación más relevantes, especialmente en los experimentos donde las variaciones de las variables fueron significativas. Si bien se identificaron limitaciones en escenarios con baja excitación y alto ruido, el modelo resultó suficientemente preciso para fines de diseño y validación de controladores.

En cumplimiento del tercer objetivo específico, se diseñaron controladores PID digitales para la regulación de voltaje y frecuencia utilizando MATLAB/Simulink, incorporando una estrategia de control descentralizada con desacopladores. Los controladores fueron sintonizados para cumplir criterios estrictos de desempeño,

tales como tiempo de estabilización menor o igual a 8 segundos, sobreimpulso nulo y error estacionario cercano a cero. En el entorno simulado, los resultados confirmaron el cumplimiento total de estas especificaciones, evidenciando un seguimiento preciso y estable de las consignas.

En cuanto al cuarto objetivo específico, la validación experimental en tiempo real permitió comprobar que los controladores PID mantuvieron la estabilidad global del sistema bajo condiciones reales de operación. Aunque el desempeño dinámico en la planta real presentó diferencias respecto a la simulación, principalmente a mayores tiempos de estabilización y sobreimpulsos en el lazo de voltaje, estas variaciones se atribuyeron a no linealidades, retardos, ruido de medición y perturbaciones inherentes al sistema físico. A pesar de ello, el sistema convergió de forma consistente a los puntos de operación deseados, confirmando la viabilidad del control implementado.

Finalmente, en relación con el quinto objetivo específico, el trabajo desarrollado permitió sentar las bases para la elaboración de una guía de prácticas de laboratorio, al documentar de manera estructurada los procesos de puesta en marcha, modelado, diseño de control y operación segura de la planta. Estas prácticas fueron desarrolladas y consolidadas en el Apéndice D, con el propósito de que la planta quede habilitada como un recurso didáctico y experimental para futuras cohortes de estudiantes e investigadores.

En conjunto, los resultados obtenidos evidenciaron que la estrategia de control propuesta fue adecuada para una primera etapa de repotenciación y automatización de la planta de generación eléctrica, logrando un equilibrio entre simplicidad, desempeño y aplicabilidad real.

Recomendaciones

En virtud de los resultados alcanzados y de las limitaciones identificadas durante la ejecución del proyecto, se proponen las siguientes recomendaciones como líneas de acción para futuros trabajos de investigación y mejora de la planta de generación eléctrica:

En primer lugar, para fortalecer la validación de la robustez de los controladores, se recomienda realizar el mantenimiento correctivo o la sustitución del motor de paso encargado de la variación de la resistencia de carga. Durante este trabajo,

las pruebas se realizaron con cargas fijas debido a la inoperatividad mecánica del actuador y a las limitaciones de tiempo para su desmontaje. La habilitación de este mecanismo permitiría generar perturbaciones continuas y dinámicas en la carga, sometiendo al sistema a escenarios de operación más realistas y exigentes, lo cual enriquecería el análisis del rechazo a perturbaciones y la estabilidad del control.

Adicionalmente, con el objetivo de ampliar las capacidades de supervisión y diagnóstico del relé inteligente SIMOCODE Pro V, se recomienda la implementación de transformadores de potencial a la salida del generador. Si bien el sistema actual permite una medición efectiva de corrientes, el acondicionamiento de las señales de tensión en corriente alterna permitiría completar el monitoreo trifásico, habilitando el cálculo directo de variables de potencia y calidad de energía. Esto incrementaría significativamente la cantidad y calidad de información disponible para análisis y control.

En cuanto al modelado matemático, se sugiere desarrollar modelos que consideren explícitamente la naturaleza AC de las máquinas eléctricas involucradas. Aunque los modelos aproximados en corriente continua empleados en este trabajo resultaron adecuados para el diseño inicial de controladores PID, un modelado basado en transformaciones de ejes (como $dq0$) permitiría capturar con mayor precisión la dinámica electromecánica del sistema, mejorando la fidelidad de las simulaciones frente al comportamiento real de la planta.

Finalmente, considerando la naturaleza multivariable (MIMO) del proceso, se recomienda ampliar el alcance del control más allá de la estrategia PID con desacopladores utilizada en esta tesis. Resultaría de gran interés diseñar e implementar técnicas de control moderno, tales como control por variables de estado con observadores, controladores PID basados en lógica difusa o control predictivo basado en modelos (MPC). Un estudio comparativo entre estas estrategias permitiría evaluar de forma cuantitativa cuál ofrece un mejor desempeño en términos de estabilidad, rechazo a perturbaciones y robustez ante variaciones paramétricas, consolidando a la planta como un banco de pruebas avanzado para investigación en control automático.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez Villanueva, M. A., & Gonzalez Rugel, J. L. (2005). Diseño e implementación de un sistema de control de frecuencia y voltaje utilizando MATLAB [Trabajo de graduación, Escuela Superior Politécnica del Litoral].
- Anchundia Veloz, J. J. (2013). Construcción de un sistema de control de frecuencia-voltaje para un sistema de generación eléctrica a escala para el laboratorio de control automático [Informe de proyecto de graduación, Escuela Superior Politécnica del Litoral].
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2009). Control PID Avanzado. Madrid: Prentice Hall. (Traducción española de Advanced PID Control, ISA, 2006).
- Bristol, E. H. (1966). On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11(1), 133-134.
- Castaño, S. (s.f.). MIMO MPC. Control Automático Educación. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-predictivo/mimo-mpc/>
- Chapman, S. J. (2016). *Electric machinery fundamentals* (5.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2021). *Modern control systems* (14.^a ed.). Pearson.
- Garrido Jurado, J. (2012). Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia].
- Kubalčík, M., & Bobál, V. (2002). Adaptive control of a two input–two output system using delta models. En *Adaptation and Learning in Control and Signal Processing 2001* (pp. 163–168). Elsevier. https://www.researchgate.net/publication/228992098_ADAPTIVE_CONTROL_OF_A_TWO_INPUT-TWO_OUTPUT_SYSTEM_USING_DELTA_MODELS
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. McGraw-Hill.
- Laifa, S., Boudjehem, B., & Boudjehem, D. (2020). Analytical Design of Multi-loop Fractional IMC-PID-Filter Controllers for MIMO System Using Equivalent NIOPDT Models. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 15, 383–393. <https://www.wseas.org/multimedia/journals/control/2020/a805103-1014.pdf>
- Ljung, L. (1999). *System identification: Theory for the user* (2.^a ed.). Prentice Hall.

- MathWorks. (2023). System Identification overview (MATLAB & Simulink Documentation). MathWorks, Inc.
<https://www.mathworks.com/help/ident/gs/about-system-identification.html>
- Moreno, L., Garrido, S., & Balaguer, C. (2015). Apuntes de Control de Sistemas II. Universidad Carlos III de Madrid.
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna (5.ª ed.). Pearson Educación.
- Orellana, R., Coronel, M., & Rojas, R. (2017). Efecto de las técnicas de desacoplamiento en sistemas multivariables. Ingeniería y Desarrollo, 35(2), 471-490.
- Plena Energía. (2022). Generación de energía eléctrica: Qué es, tipos, tendencias en España y más. <https://www.plena-energia.com/post/generacion-de-energia-electrica>
- Ramírez-Betancour, R., Valenzuela-Rendón, I., & Rangel-Magdaleno, J. (2018). Control de velocidad de un motor de CD basado en mediciones de la corriente de armadura. Ingeniería, investigación y tecnología, 19(4).
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432018000400009
- Schneider Electric. (s. f.). Altivar 312 (ATV312H075M2) (página de producto).
<https://www.se.com/co/es/product/ATV312H075M2/variador-de-velocidad-atv312-075-kw-18-kva-60-w-200-240-v-monof%C3%A1sico/>
- Schneider Electric. (2016). Altivar 312: Variable speed drives for asynchronous motors – Programming manual. Schneider Electric Industries SAS.
https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=BBV46385&p_enDocType=User+guide
- SICMA21. (2021). ¿Qué es un PLC? <https://www.sicma21.com/que-es-un-plc/>
- Siemens. (s. f.). SIMATIC S7-300 (página de producto).
<https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/simatic-s7-300.html>
- Siemens AG. (2008). SIMATIC ET 200S: Sistema de periferia descentralizada. Instrucciones de servicio (A5E00155773-06). Siemens Industry.
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/348/1144348/att_33247/v1/et200S_operating_instructions_es-ES.pdf

- Siemens AG. (2011). S7-300: CPU 31xC y CPU 31x – Datos técnicos (A5E00105477-08). Siemens Industry.
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/149/36305149/att_1849/v1/s7300_cpu_31xc_and_cpu_31x_manual_es-ES_es-ES.pdf
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (1997). Control Automático de Procesos. México: Limusa. (Ed. original: Principles and Practice of Automatic Process Control, 2ª ed.).
- Valera Fernández, Á. (2016). Modelado y control en el espacio de estados. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Woolf, P., et al. (2022, 30 de octubre). 12: Control de entrada múltiple, salida múltiple (MIMO). LibreTexts Español.
[https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Ingenieria/Ingenieria_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Contrales_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_\(Woolf\)/12%3A_Control_de_entrada_m%C3%BAltiple%2C_salida_m%C3%BAltiple_\(MIMO\)](https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Ingenieria/Ingenieria_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Contrales_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/12%3A_Control_de_entrada_m%C3%BAltiple%2C_salida_m%C3%BAltiple_(MIMO))

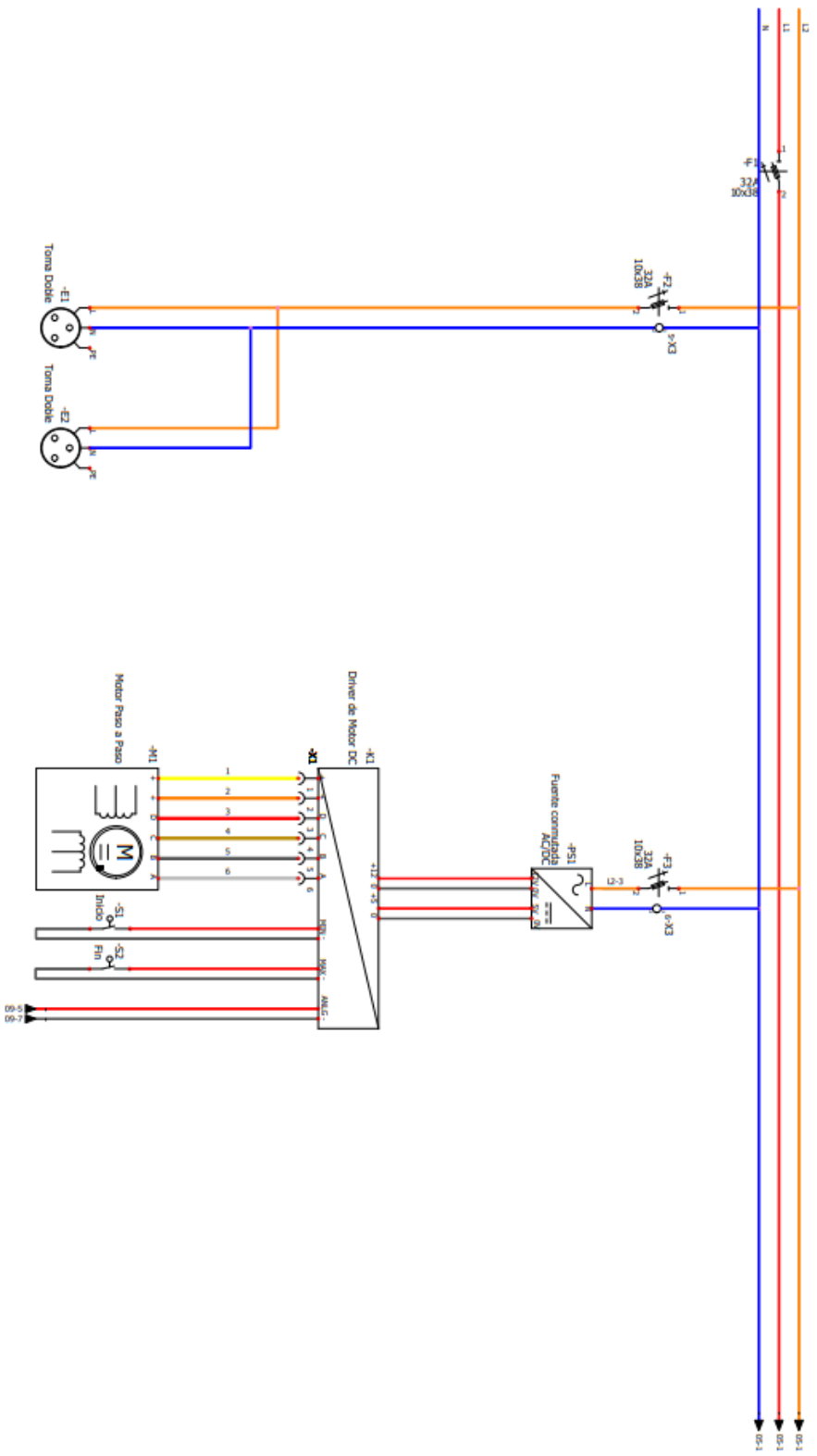
APÉNDICES

1-Colección

Hoja	Descripción	Función	Sitio	Revisión	Fecha	Creado por	Carpeta	Descripción de carpeta
01	Portada	=F1	+L1	0	10/16/2025	Gonzalo Velez		
02	Listado de planos	=F1	+L1	0	10/16/2025	Gonzalo Velez		
04	Esquema de alimentación general	=F1	+L1	0	10/16/2025	Gonzalo Velez		
05	Esquema de Potencia y Alimentación Auxiliar DC	=F1	+L1	0	10/26/2025	Gonzalo Velez		
06	Esquema de distribución 24 VDC	=F1	+L1	0	10/29/2025	Gonzalo Velez		
07	Esquema de mando	=F1	+L1	0	10/29/2025	Gonzalo Velez		
08	Esquema automatizador- P.L.C	=F1	+L1	0	11/20/2025	Gonzalo Velez		
09	Esquema automatizador- E/S	=F1	+L1	0	11/20/2025	Gonzalo Velez		

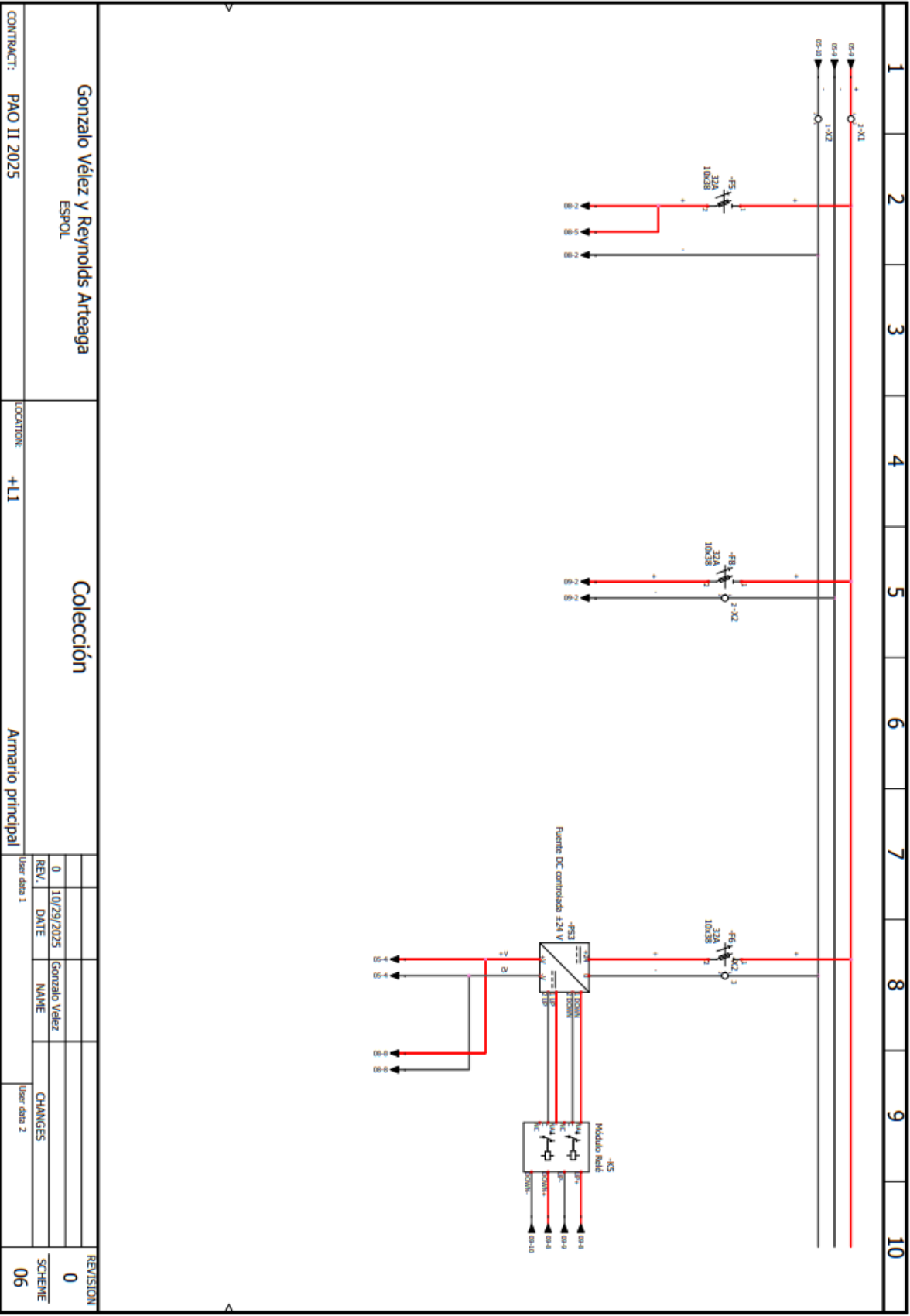
Gonzalo Velez y Reynolds Arteaga		Colección	
ESPOL		Armarío principal	
CONTRACT:	PAO II 2025	LOCATION:	+L1
REV.	0	DATE	10/16/2025
		NAME	Gonzalo Velez
		CHANGES	User data 2
REVISION	0		
SCHEME	02		

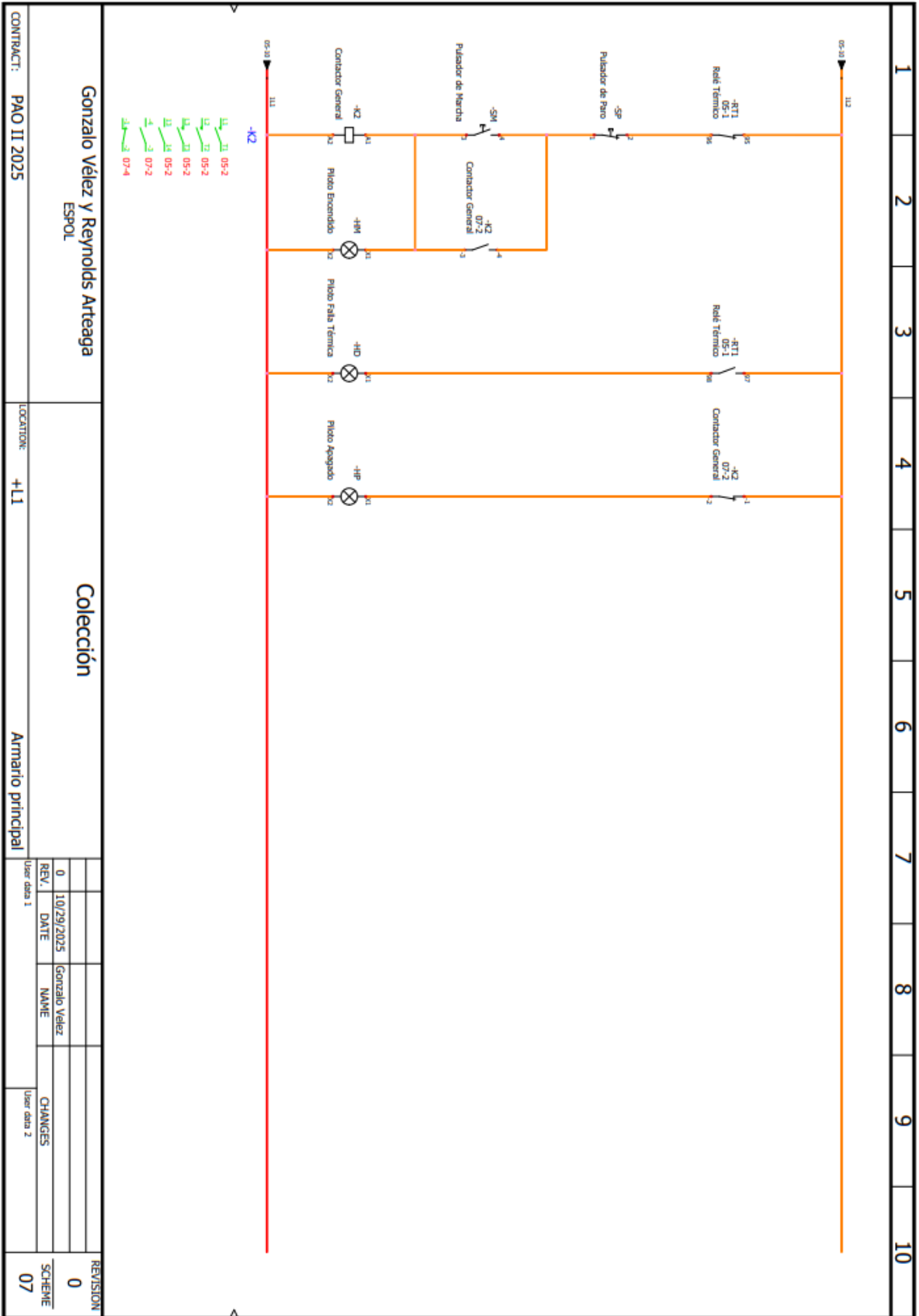
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10



Gonzalo Vélez y Reynolds Arteaga ESPOL		Colección	
CONTRACT: PAO II 2025	LOCATION: +L1	Armarío principal	
REVISION		CHANGES	
0	10/16/2025	Gonzalo Vélez	
REV.	DATE	NAME	
User data 1		User data 2	
0		04	
SCHEME			

Document created with version: 2025.0.1.00002
 Modificado por INGENIERO EDUCACIONAL CALA para usar en la universidad

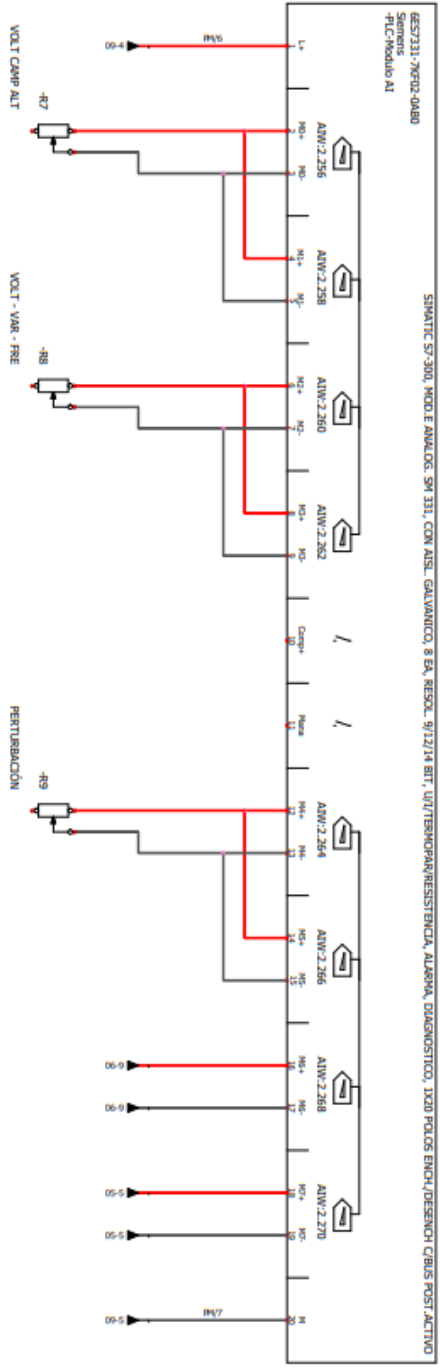
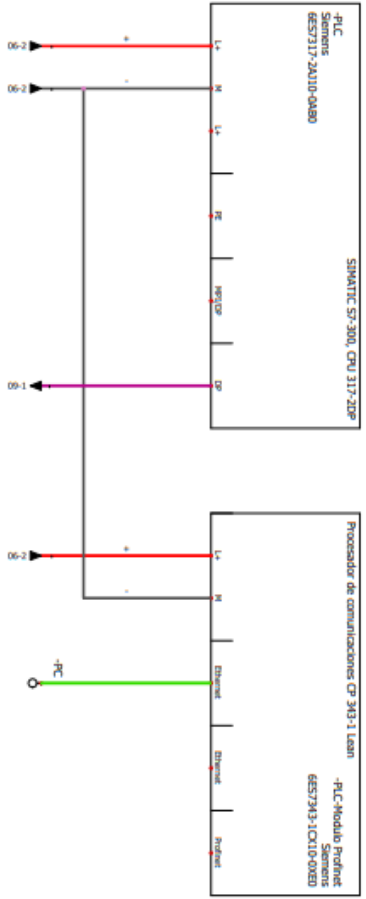




CONTRACT: PAO II 2025

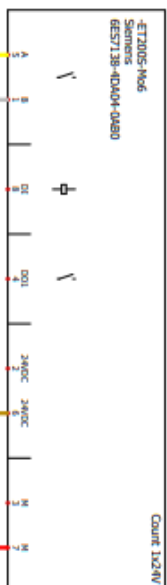
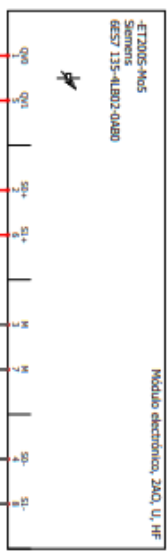
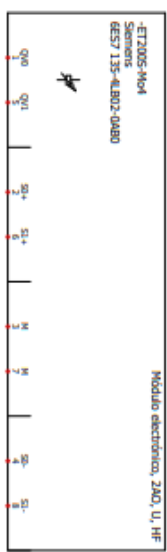
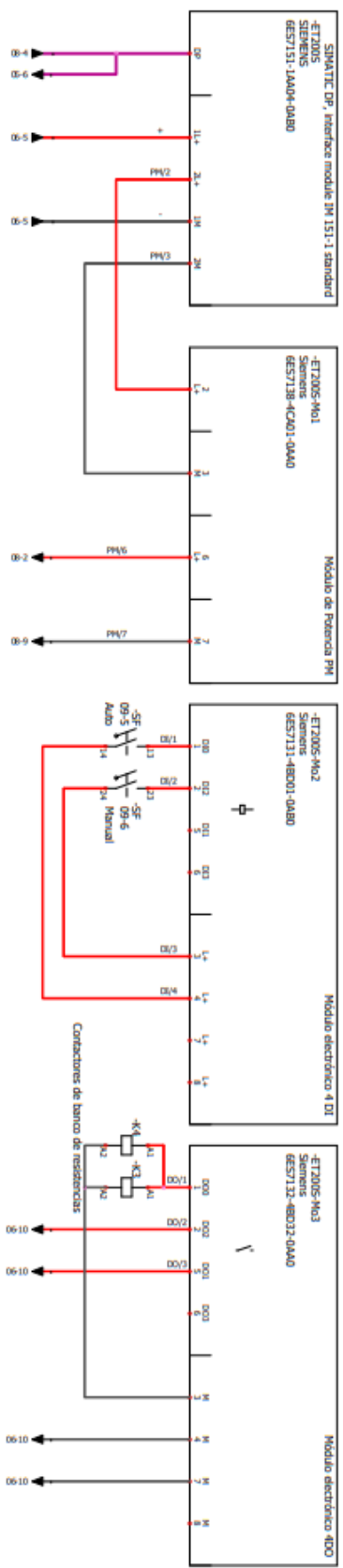
LOCATOR: +LI

REV.	DATE	NAME	CHANGES
0	10/29/2025	Gonzalo Velez	
			User data 1
			User data 2



CONTRACT: PAO II 2025		LOCATION: +LI		Armarío principal	
Gonzalo Vélaz y Reynolds Arteaga ESPOL			Colección		
REVISION		DATE		NAME	
0		11/30/2025		Gonzalo Vélaz	
CHANGES		DATE		NAME	
SCHEME		DATE		NAME	
08					

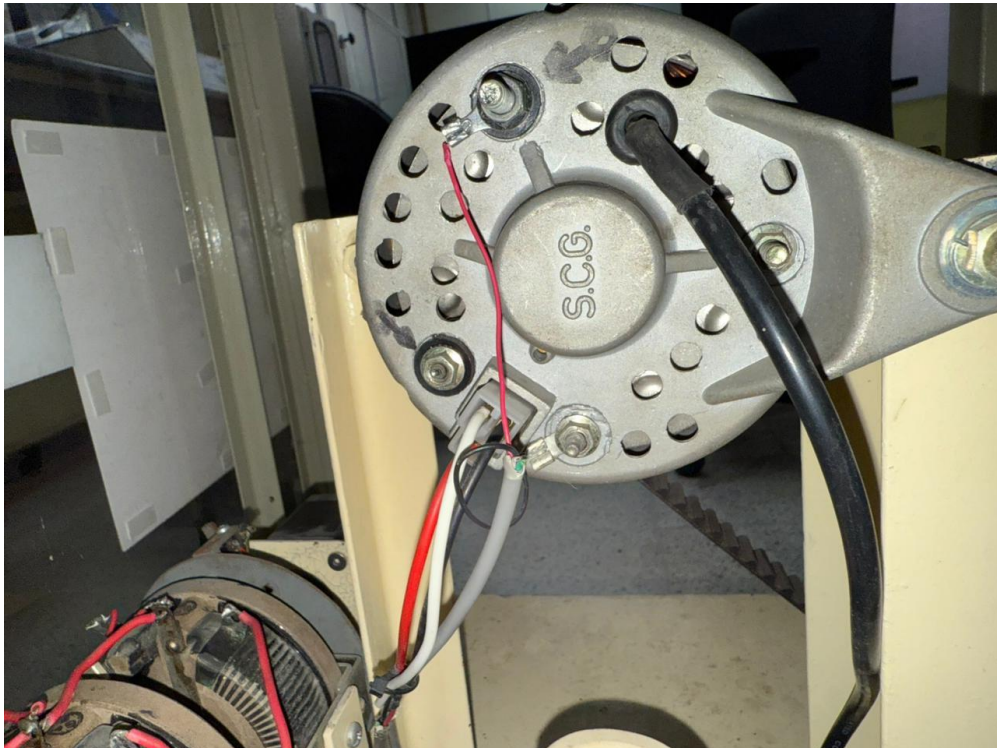
Document created with version 2025.0.2.1.00000



<p>Gonzalo Vélez y Reynolds Arteaga ESPOL</p>		<p>Colección</p>	
<p>CONTRACT: PAO II 2025</p>	<p>LOCATION: +LI</p>	<p>Armario principal</p>	
<p>REVISION</p>	<p>0</p>	<p>DATE</p>	<p>11/30/2025</p>
<p>SCHEME</p>	<p>09</p>	<p>NAME</p>	<p>Gonzalo Velez</p>
<p>CHANGES</p>	<p>User data 2</p>	<p>NAME</p>	<p>Gonzalo Velez</p>
<p>REVISION</p>	<p>0</p>	<p>DATE</p>	<p>11/30/2025</p>
<p>SCHEME</p>	<p>09</p>	<p>NAME</p>	<p>Gonzalo Velez</p>

APÉNDICE B: ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS EQUIPOS

Alternador Automotriz



Datos de Placa del Alternador	
Máxima cresta de voltaje de salida	0,26 [V]
Corriente de dispersión a 12 [V]	0,2 [mA]
Máxima corriente de campo	3,2 [A]
Mínima velocidad del rotor	1270 [rpm]
Máxima corriente de salida a full carga	43 [A]
Máxima potencia de salida	537 [W]

Motor Siemens 1LA7070-4YA60

ESPECIFICACIONES NOMINALES PARA MOTORES TRIFÁSICOS ESTÁNDAR 1LA7 Y 1LA5 60Hz														
Tipo	Frame IEC	Potencia		Factor de Servicio	Corriente Nominal [A]		Eficiencia η	Factor de Potencia $\cos \phi$	Velocidad Nominal (rpm)	Torque Nominal [Nm]	Torque de Arranque [Ta/Tn]	Corriente de Arranque [Ia/In]	Peso Neto IMB3 [kg]	Rodamientos AS/BS
		HP	Kw		440V	220V								
MOTORES DE 2 POLOS														
1LA7 070-2YA60	71	0.8	0.6	1.15	2.4	1.2	77.4	0.79	3430	1.56	2.7	6	6.0	6202 2Z C3 / 6202 2Z C3
1LA7 073-2YA60	71	1	0.7	1.15	3.5	1.75	62.8	0.89	3320	2.15	2.5	4.7	6.0	6202 2Z C3 / 6202 2Z C3
1LA7 080-2YA60	80	2	1.1	1.15	5.3	2.65	69.2	0.80	3370	3.17	1.8	3.7	8.4	6004 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 083-2YA60	80	2	1.5	1.15	6.2	3.1	73.4	0.86	3410	4.18	3.3	6.3	10	6004 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 090-2YB60	90 L	2.4	1.8	1.15	3.5	7	81.0	0.82	3460	4.9	2.4	5.5	11.7	6205 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 093-2YB60	90 L	3	2.2	1.1	4.5	9	82.3	0.79	3450	6.2	2.7	5.7	14.6	6205 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 097-2YB60	90 L	4	3.0	1.15	5.5	11	84.5	0.84	3460	8.2	2.4	5.9	16.4	6205 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 113-2YB60	112 M	5	3.7	1.15	7	14	85.2	0.82	3508	10.2	2.7	7.8	26.6	6206 2Z C3 / 6205 2Z C3
1LA7 113-2YC60	112 M	6	4.5	1.25	8.5	17	84.6	0.81	3492	12.3	2.6	7.5	26.6	6206 2Z C3 / 6205 2Z C3
1LA7 115-2YB60	112 M	7.5	5.6	1.15	9.5	19	86.0	0.89	3480	15.3	2.0	5.8	30	6206 2Z C3 / 6205 2Z C3
1LA7 132-2YB70	132 S/M	10	7.5	1.15	13.3	26.6	88.1	0.83	3525	20.5	2.7	6.8	52, 8	6208 2Z C3 / 6208 2Z C3
1LA7 132-2YC70	132 S/M	12	9.0	1.05	15.2	30.4	87.5	0.88	3500	24.6	2.7	6.8	53, 3	6208 2Z C3 / 6208 2Z C3
1LA7 133-2YB70	132 S/M	15	11.2	1.15	19	38	88.1	0.87	3515	30.5	2.0	6.5	56.5	6208 2Z C3 / 6208 2Z C3
1LA7 165-2YB70	160 M/L	20	14.9	1.15	26	52	88.5	0.85	3530	42.0	2.0	4.8	83.5	6209 2Z C3 / 6209 2Z C3
1LA7 165-2YC70	160 M/L	25	18.7	1.15	31.8	63.6	89.5	0.86	3510	50.8	2.1	5	84.5	6209 2Z C3 / 6209 2Z C3
1LA7 167-2YB70	160 M/L	30	22.4	1.15	38.6	77.2	89.6	0.84	3530	61.0	2.1	4.6	95.2	6209 2Z C3 / 6209 2Z C3
1LA5 183-2YB80	180 M	35	26.1	1.15	43.5	87	91.9	0.85	3545	70.5	2.1	6.6	135	6210 2Z C3 / 6210 2Z C3
1LA5 184-2YB80	180 M	40	29.8	1.05	52	104	91.5	0.82	3550	80.5	2.3	6.4	135	6210 2Z C3 / 6210 2Z C3
1LA5 206-2YB80	200 L	50	37.3	1.15	67	134	92.5	0.78	3554	101.0	2.4	6.6	189	6212 2Z C3 / 6212 2Z C3
1LA5 207-2YB80	200 L	60	44.8	1.15	76.6	153.2	92.4	0.82	3564	120.0	2.4	6.6	207	6212 2Z C3 / 6212 2Z C3
1LA5 223-2YB80	225 S/M	75	56.0	1.15	91.5	183	93.1	0.86	3550	151.0	1.9	6.8	229	6213 2Z C3 / 6212 2Z C3
MOTORES DE 4 POLOS														
1LA7 070-4YC60	71	0.4	0.3	1.05	1.6	0.8	63.3	0.77	1640	1.7	1.8	2.8	4.7	6202 2Z C3 / 6202 2Z C3
1LA7 070-4YA60	71	0.5	0.4	1.15	1.9	0.95	63.6	0.81	1590	2.24	1.3	2.7	4.7	6202 2Z C3 / 6202 2Z C3
1LA7 071-4YA60	71	0.6	0.4	1.15	2.2	1.1	70.2	0.76	1680	2.54	1.8	3.4	6.0	6202 2Z C3 / 6202 2Z C3
1LA7 073-4YA60	71	0.8	0.6	1.15	2.9	1.45	64.0	0.79	1650	3.24	1.9	3.7	6.0	6202 2Z C3 / 6202 2Z C3
1LA7 080-4YA60	80	1.0	0.7	1.15	3.5	1.75	64.2	0.87	1660	4.3	1.9	3.7	8.1	6004 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 081-4YA60	80	1.2	0.9	1.05	4.0	2.0	69.0	0.85	1675	5.1	2.2	3.7	9.3	6004 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 083-4YA60	80	1.5	1.1	1.15	5.0	2.5	65.9	0.89	1650	6.4	1.8	3.0	9.3	6004 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 096-4YB60	90 L	2	1.5	1.15	3.3	6.6	82.3	0.8	1720	8.4	2.2	4.4	15.2	6205 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 096-4YC60	90 L	2.4	1.8	1.15	3.7	7.4	81.5	0.78	1703	10.2	2.7	5.2	15.3	6205 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 097-4YB60	90 L	3.0	2.2	1.15	4.3	8.6	83.0	0.82	1730	12.3	1.8	3.6	16.4	6205 2Z C3 / 6004 2Z C3
1LA7 112-4YB60	112 M	4	3.0	1.15	6.1	12.2	85.5	0.74	1745	16.4	2.8	7.6	25.4	6206 2Z C3 / 6205 2Z C3
1LA7 112-4YC60	112 M	5	3.7	1.15	7.9	15.8	85.3	0.73	1740	20.5	2.3	6.5	25.4	6206 2Z C3 / 6205 2Z C3
1LA7 114-4YB60	112 M	6	4.5	1.05	9	18	85.7	0.76	1740	24.6	2.8	8.7	28.3	6206 2Z C3 / 6205 2Z C3
1LA7 115-4YB60	112 M	7.5	5.6	1.15	10	20	87.5	0.83	1740	30.7	2.2	5.6	30	6206 2Z C3 / 6205 2Z C3
1LA7 132-4YB70	132 S/M	10	7.5	1.15	12.2	24.4	88.3	0.83	1755	40.5	2.3	6	51.8	6208 2Z C3 / 6208 2Z C3
1LA7 132-4YC70	132 S/M	12	9.0	1.15	17	34	88.1	0.78	1745	49.5	2.5	6.6	51.8	6208 2Z C3 / 6208 2Z C3
1LA7 135-4YB70	132 S/M	15	11.2	1.15	21.5	43	89.8	0.76	1755	61.5	1.8	5	61.5	6208 2Z C3 / 6208 2Z C3
1LA7 164-4YB70	160 M/L	20	14.9	1.15	27.8	55.6	90.9	0.77	1758	81.2	1.8	6.3	79	6209 2Z C3 / 6209 2Z C3
1LA7 167-4YB70	160 M/L	25	18.7	1.15	33	66	91.8	0.81	1755	102.0	1.8	5.4	89	6209 2Z C3 / 6209 2Z C3
1LA5 183-4YB80	180 M	30	22.4	1.05	39	78	91.80	0.82	1767	121.0	2.0	4.9	130	6210 2Z C3 / 6210 2Z C3
1LA5 186-4YB80	180 M	36	26.9	1.05	46.5	93	92.1	0.82	1758	147.0	2.0	6.8	140	6210 2Z C3 / 6210 2Z C3

Variador de Frecuencia - ATV312H075M2





⚠️ PELIGRO

PELIGRO DE DESCARGA ELÉCTRICA, EXPLOSIÓN O ARCO ELÉCTRICO

- Solo estará autorizado a trabajar con este sistema de variador el personal debidamente formado que esté familiarizado con el contenido de este manual y el resto de documentación pertinente de este producto, lo entienda y haya recibido formación en seguridad para reconocer y evitar los riesgos que implica. La instalación, el ajuste, la reparación y el mantenimiento deben ser realizados por personal cualificado
 - El integrador del sistema es responsable del cumplimiento de todos los requisitos de los códigos eléctricos locales y nacionales, así como del resto de reglamentos aplicables relacionados con la correcta conexión a masa de todo el equipo.
 - Muchos componentes del producto, incluidas las placas de circuito impreso, funcionan con tensión de red. No los toque. Utilice solo herramientas con aislante eléctrico
 - No toque los componentes no apantallados ni las bornas cuando haya tensión
 - Los motores pueden generar tensión cuando se gira el eje. Antes de realizar cualquier tipo de trabajo en el sistema de variador, bloquee el eje del motor para impedir que gire
 - La tensión CA puede asociar la tensión a los conductores no utilizados en el cable del motor. Añale los dos extremos de los conductores no utilizados del cable del motor.
 - No cortocircuite entre las bornas de bus CC, los condensadores de bus CC o las bornas de resistencia de frenado
 - Antes de trabajar en el sistema de variador:
 - Desconecte toda la potencia, incluida la alimentación de control externa que pueda haber.
 - Coloque la etiqueta de "No conectar" en todos los interruptores de alimentación
 - Bloquee todos los interruptores de alimentación en la posición abierta
 - Espere 15 minutos para que los condensadores de bus CC se descarguen. El LED de bus CC se descarguen. El LED de bus CC no es un indicador de la ausencia de tensión de bus CC que puede exceder 800 V CC.
 - Mida la tensión de bus CC entre las bornas de bus CC (PA+, PC-) usando un voltímetro con la capacidad adecuada para comprobar que la tensión es $\leq 42\text{ V CC}$
 - Si los condensadores de bus CC no se descargan correctamente, póngase en contacto con su representante local de Schneider Electric. No repare ni haga funcionar el producto
 - Instale y cierre todas las cubiertas antes de aplicar tensión.
- No seguir estas instrucciones puede provocar daños serio o incluso la muerte.**

Sólo personal cualificado deberá llevar a cabo la instalación, manejo, reparación y mantenimiento de los equipos eléctricos. Schneider Electric no asume las responsabilidades que pudieran surgir como consecuencia de la utilización de este producto. La siguiente información está diseñada para utilizar un único variador conectado a un solo motor con una longitud de cable de motor inferior a 50 metros (164 ft). Para más información, consulte la guía de instalación (BBV46393) y programación (BBV46387) del ATV312 en www.schneider-electric.com.

1 Comprobación de la entrega del variador

- Retire el ATV312 del embalaje y compruebe que no presenta daños.

⚠️ ADVERTENCIA

EQUIPO DAÑADO

No maneje ni instale ningún variador o accesorio del variador que parezca estar dañado. Si no se respetan estas instrucciones pueden producirse graves lesiones, daños materiales o incluso la muerte.

- Asegúrese de que la referencia del variador impresa en la etiqueta coincide con la del albarán de envío correspondiente a la orden de pedido.

Escriba la referencia del modelo de variador: _____ y el número de serie: _____

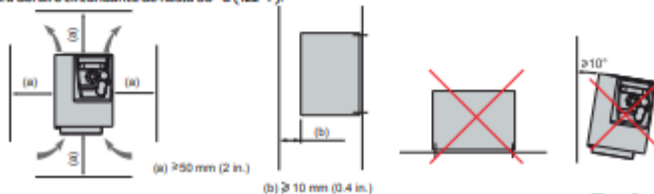


2 Comprobación de la compatibilidad de la tensión de red

- Verifique que la **tensión de red** sea compatible con el rango de alimentación del variador.
Tensión de red _____ voltios / Rango de tensiones del variador _____ voltios.
Rango del variador: ATV312●●●●M2 = 200/240 V monofásico / ATV312●●●●M3 = 200/240 V trifásico
ATV312●●●●M4 = 380/500 V trifásico / ATV312●●●●M5 = 525/600 V trifásico.

3 Instalación del variador verticalmente

Para una temperatura del aire circundante de hasta 50 °C (122 °F).

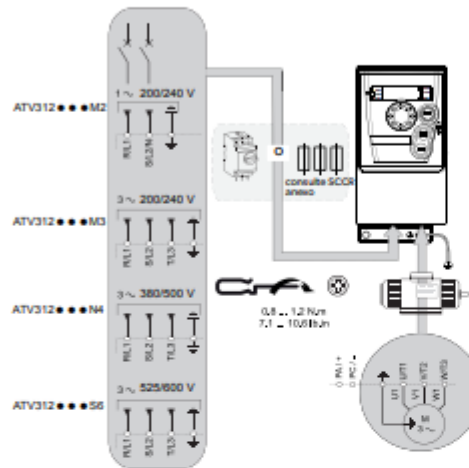


Para otras condiciones térmicas, consulte el manual de instalación (BBV46393) en www.schneider-electric.com.

4 Conexión del variador:

Alimentación

- Conecte el variador a la masa.
- Compruebe el calibre del disyuntor o del fusible (consulte SCCR anexo).
- Compruebe que la tensión del motor es compatible con la tensión del variador.
Tensión del motor: _____ voltios.
- Conecte el variador al motor.
- Conecte el variador a la alimentación de red.

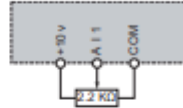


5 Cableado de control y selección del control

configuración: 51 o 52

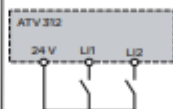
51 [Configuración Remoto] (Control por referencia externa)

- verificar SW1 = "SOURCE"
- Cableado de la referencia de velocidad:

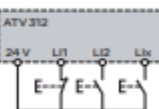


- Cableado del control:

El control utiliza 2 hilos:



El control utiliza 3 hilos:



- Etapas siguientes, hacer: 1, 2, 3, 51

52 [Configuración Local] (Control por referencia interna)



6 Alimentación del variador

- Compruebe que las entradas lógicas utilizadas no están activas (Consultar L1, L2, L3).
- Alimente el variador.
- La primera vez que se enciende, el variador muestra **nSt** (control de 3 hilos) o **r d y** (control de 2 hilos); después de pulsar el variador mostrará **bFr**.
- En los siguientes arranques, el variador mostrará **nSt** o **r d y**.

7 Ajuste de los parámetros del motor

- Consulte la placa de características del motor para ajustar los parámetros siguientes.

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
d r c - (CONTROL DEL MOTOR)	bFr	[Frec. estándar motor]: Frecuencia estándar del motor (Hz)	50.0	
	unS	[Tensión nom. motor]: Tensión nominal del motor en la placa de características del motor (V)	Calibre del variador	
	FrS	[Frec. nom. motor]: Frecuencia nominal del motor en la placa de características del motor (Hz)	50.0	
	nCr	[Int. Nominal Motor]: Corriente nominal del motor en la placa de características del motor (A)	Calibre del variador	
	nSP	[Vel. Nominal Motor]: Velocidad nominal del motor en la placa de características del motor (rpm)	Calibre del variador	
	CaS	[Motor 1 cos φ]: Cos φ nominal del motor en la placa de características del motor	Calibre del variador	

7 Ajuste de los parámetros del motor (continuación)

- Ajuste el parámetro **tun** a **YES**.

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
drc- [CONTROL DEL MOTOR]	tun	[Autoajuste] Autoajuste para unS, FrS, nCr, nSP y CoS .	no	

⚠ PELIGRO

PELIGRO DE DESCARGA ELÉCTRICA O ARCO ELÉCTRICO

- Durante el autoajuste, el motor funciona a corriente nominal.
- No manipule el motor durante el autoajuste.

Si no se respetan estas instrucciones, se producirán lesiones graves o incluso la muerte.

⚠ PELIGRO

FUNCIONAMIENTO INADECUADO DEL EQUIPO

- Los parámetros nominales del motor **unS, FrS, nCr, nSP** y **CoS** deben configurarse correctamente antes de iniciar el autoajuste.
- Si uno o más de estos parámetros se modifican después de que se haya realizado el autoajuste, **tun** volverá a **no** y deberá repetirse el proceso.

Si no se respetan estas instrucciones, se producirán lesiones graves o incluso la muerte.

8 Ajuste de los parámetros básicos

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
SEt - [AJUSTES]	RCC	[Aceleración]: Tiempo de aceleración (s)	3.0	
	dEC	[Desaceleración]: Tiempo de desaceleración (s)	3.0	
	LSP	[Velocidad mínima]: Frecuencia del motor con referencia mínima (Hz)	0.0	
	nSP	[Vel. máxima]: Frecuencia del motor con referencia máxima (Hz)	50.0	
	tH	[Térmica motor]: Corriente nominal del motor en la placa de características del motor (A)	Calibre del variador	
r-a- [ENTRADAS/SALIDAS]	rrS	[Asig. marcha atrás]: Asignación de marcha atrás	L12	
Fun->PSS- [VEL. PRESELECC.]	PS2	[2 vel. preselecc.]: Velocidades preseleccionadas	L13	
	PS4	[4 vel. preselecc.]: Velocidades preseleccionadas	L14	
Fun->SR- [ENTRADAS SUMATORIAS]	SR2	[Ref. sumat. 2]: Entrada analógica	R12	

9 Ajuste de los parámetros de control

Menú	Código	Descripción	5.1 [Configuración Remoto]	5.2 [Configuración Local]	Ajuste de cliente
LbL- [CONTROL]	Fr1	[Canal Ref. 1]: Control de referencia	AL1 (Ajuste de fábrica), NL2, NL3	ALu1	
r-a- [ENTRADAS/SALIDAS]	bCC	[Control 2/3 hilos]: Control de comandos	2C : 2 hilos (Ajuste de fábrica) 3C : 3 hilos	LwC	

91 [Configuración Remoto] (Ajuste de fábrica)

Parámetros predeterminados de fábrica:

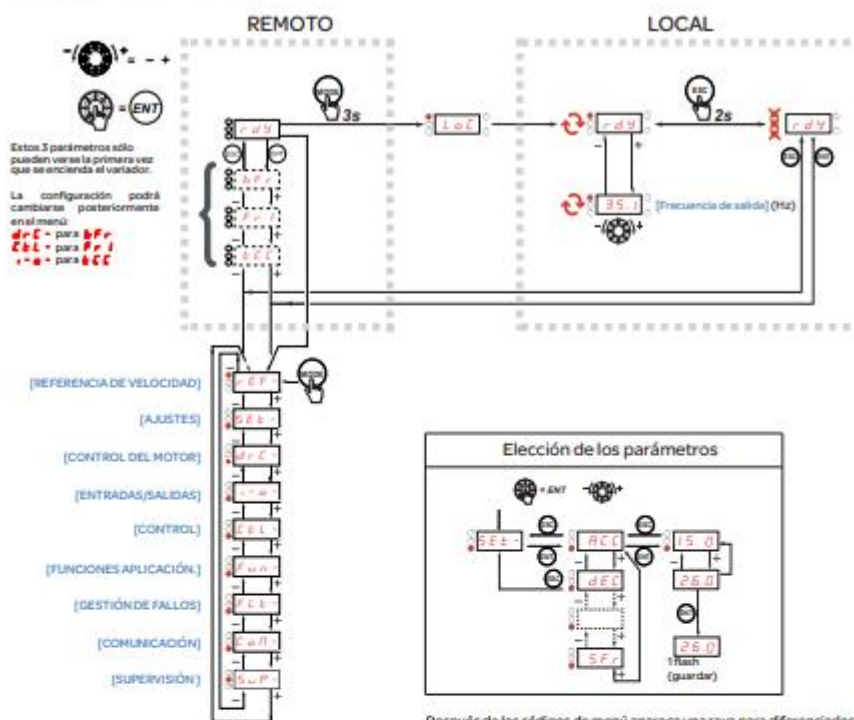
Fr1 = AL1
bCC = 2C

92 [Configuración Local]



10 Arranque del motor

Estructura de menús



Nota: el variador vuelve a la configuración REMOTO tras el funcionamiento con el ajuste de fábrica ([Restaurar config.] (FCS)) o modificando la macroconfiguración ([Macroconfiguración] (CFG)).

Consulte el manual del programación (BBV46387) para una descripción completa del menú.

Diagrama esquemático para reemplazo del módulo relé del ET200 S

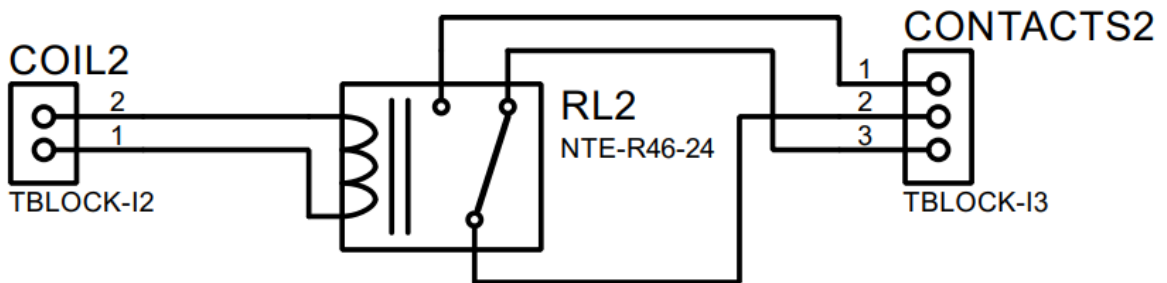
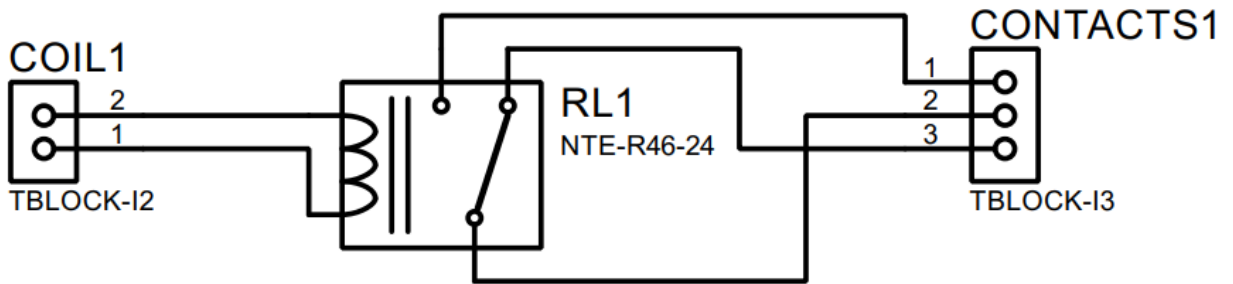


Diagrama PCB para reemplazo del módulo relé del ET200 S

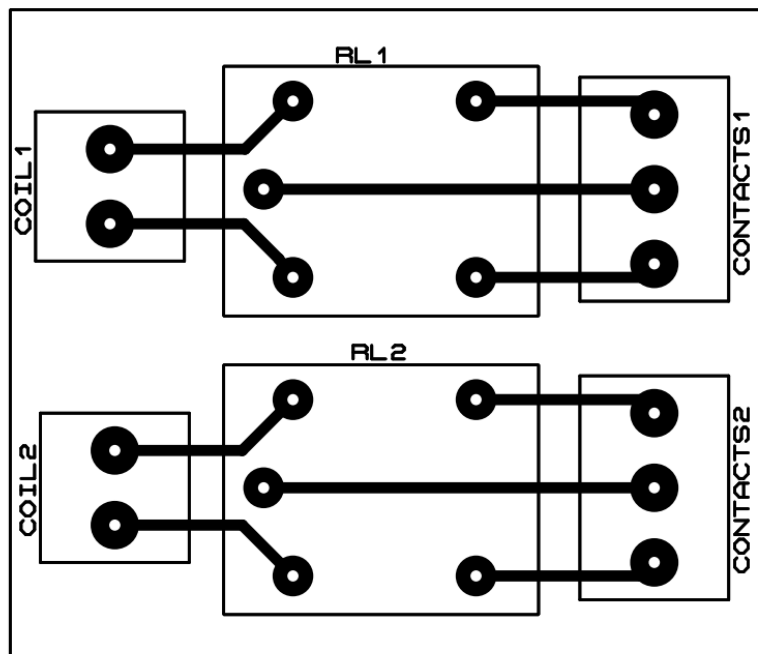


Diagrama esquemático para reemplazo del bus terminal del ET200 S

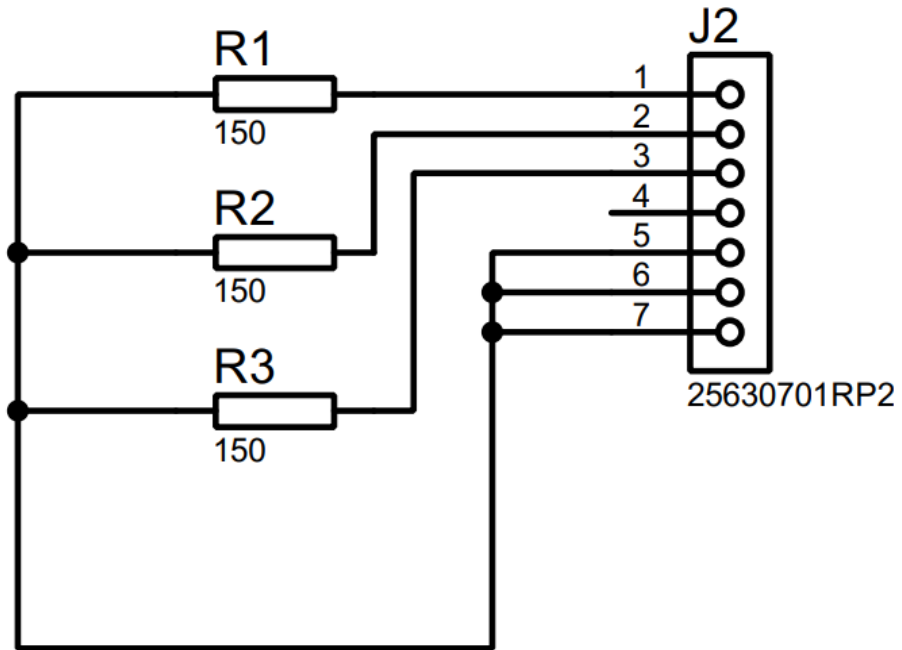
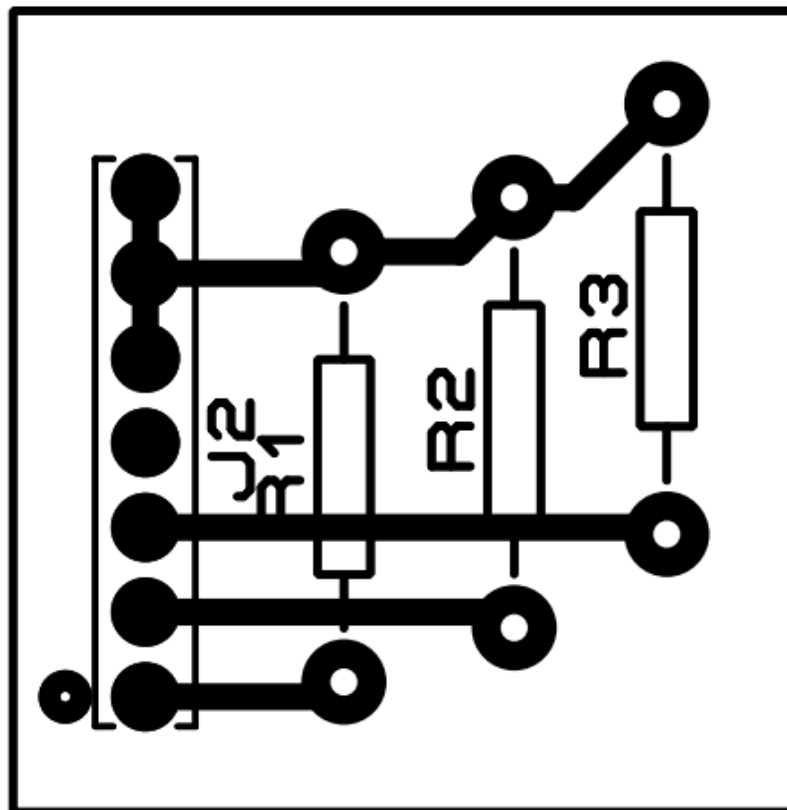


Diagrama PCB para reemplazo del bus terminal del ET200 S



APÉNDICE C: CONFIGURACIÓN DEL KEPSERVEREX 6

Property Editor - PLC S7300.PLC

Property Groups

- General**
- Scan Mode
- Timing
- Auto-Demotion
- Tag Generation
- Communication Parameters
- S7 Comm. Parameters
- Addressing Options
- Tag Import
- Redundancy

Identification	
Name	PLC
Description	
Driver	Siemens TCP/IP Ethernet
Model	S7-300
Channel Assignment	PLC S7300
ID	200.126.14.100

Operating Mode	
Data Collection	Enable
Simulated	No

Defaults OK Cancel Apply Help

Property Editor - PLC S7300.PLC

Property Groups

- General
- Scan Mode**
- Timing
- Auto-Demotion
- Tag Generation
- Communication Parameters
- S7 Comm. Parameters
- Addressing Options
- Tag Import
- Redundancy

Scan Mode	
Scan Mode	Respect Client-Specified Scan Rate
Initial Updates from Cache	Disable

Defaults OK Cancel Apply Help

Property Editor - PLC S7300.PLC

Property Groups

- General
- Scan Mode
- Timing**
- Auto-Demotion
- Tag Generation
- Communication Parameters
- S7 Comm. Parameters
- Addressing Options
- Tag Import
- Redundancy

Communication Timeouts	
Connect Timeout (s)	3
Request Timeout (ms)	2000
Attempts Before Timeout	2
Timing	
Inter-Request Delay (ms)	0

Defaults OK Cancel Apply Help

Property Editor - PLC S7300.PLC

Property Groups

- General
- Scan Mode
- Timing
- Auto-Demotion**
- Tag Generation
- Communication Parameters
- S7 Comm. Parameters
- Addressing Options
- Tag Import
- Redundancy

Auto-Demotion	
Demote on Failure	Disable

Defaults OK Cancel Apply Help

Property Editor - PLC S7300.PLC

Property Groups

- General
- Scan Mode
- Timing
- Auto-Demotion
- Tag Generation**
- Communication Parameters
- S7 Comm. Parameters
- Addressing Options
- Tag Import
- Redundancy

Tag Generation	
On Device Startup	Do Not Generate on Startup
On Duplicate Tag	Delete on Create
Parent Group	
Allow Automatically Generated Subgrou...	Enable
Create	Create tags

Defaults OK Cancel Apply Help

Property Editor - PLC S7300.PLC

Property Groups

- General
- Scan Mode
- Timing
- Auto-Demotion
- Tag Generation
- Communication Param...**
- S7 Comm. Parameters
- Addressing Options
- Tag Import
- Redundancy

Communication Parameters	
Port Number	102
MPI ID	0

Defaults OK Cancel Apply Help

Property Editor - PLC S7300.PLC

Property Groups	<ul style="list-style-type: none"> General Scan Mode Timing Auto-Demotion Tag Generation Communication Parameters S7 Comm. Parameters Addressing Options Tag Import Redundancy 																		
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">S7 Comm. Parameters</td> </tr> <tr> <td>Maximum PDU Size</td> <td>960</td> </tr> <tr> <td colspan="2">S7-200</td> </tr> <tr> <td>Local TSAP</td> <td>4D57</td> </tr> <tr> <td>Remote TSAP</td> <td>4D57</td> </tr> <tr> <td colspan="2">S7-300/400/1200/1500</td> </tr> <tr> <td>Link Type</td> <td>PC</td> </tr> <tr> <td>CPU Rack</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>CPU Slot</td> <td>2</td> </tr> </table>		S7 Comm. Parameters		Maximum PDU Size	960	S7-200		Local TSAP	4D57	Remote TSAP	4D57	S7-300/400/1200/1500		Link Type	PC	CPU Rack	0	CPU Slot	2
S7 Comm. Parameters																			
Maximum PDU Size	960																		
S7-200																			
Local TSAP	4D57																		
Remote TSAP	4D57																		
S7-300/400/1200/1500																			
Link Type	PC																		
CPU Rack	0																		
CPU Slot	2																		
<p>Defaults OK Cancel Apply Help</p>																			

Property Editor - PLC S7300.PLC

Property Groups	<ul style="list-style-type: none"> General Scan Mode Timing Auto-Demotion Tag Generation Communication Parameters S7 Comm. Parameters Addressing Options Tag Import Redundancy 				
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Addressing Options</td> </tr> <tr> <td>Byte Order</td> <td>Big Endian</td> </tr> </table>		Addressing Options		Byte Order	Big Endian
Addressing Options					
Byte Order	Big Endian				
<p>Defaults OK Cancel Apply Help</p>					

Property Editor - PLC S7300.PLC

Property Groups

- General
- Scan Mode
- Timing
- Auto-Demotion
- Tag Generation
- Communication Parameters
- S7 Comm. Parameters
- Addressing Options
- Tag Import**
- Redundancy

Tag Import

Tag Import Type	Step 7 Project File
Step 7 Project (*.S7P)	
Program Path	

Defaults OK Cancel Apply Help

Property Editor - PLC S7300.PLC

Property Groups

- General
- Scan Mode
- Timing
- Auto-Demotion
- Tag Generation
- Communication Parameters
- S7 Comm. Parameters
- Addressing Options
- Tag Import
- Redundancy**

Redundancy

Secondary Path	
Operating Mode	Switch On Failure
Monitor Item	
Monitor Interval (s)	300
Return to Primary ASAP	Yes

Defaults OK Cancel Apply Help

- Project
 - Connectivity
 - PLC S7300
 - PLC
 - Aliases
 - Advanced Tags
 - Alarms & Events
 - Add Area...
 - Data Logger
 - Add Log Group...
 - ETH Exporter
 - Add Poll Group...
 - IDF for Splunk
 - Add Splunk Connection...
 - IoT Gateway
 - Add Agent...
 - Local Historian
 - Add Datastore...
 - Scheduler
 - Add Schedule...
 - SNMP Agent
 - Add Agent...

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
DESBALANCE DE FASE SM	DB2.DBD62	Float	100	None	
FRECUENCIA GENERADA	DB2.DBD10	Float	100	None	
I1 SM	DB2.DBD50	Float	100	None	
I2 SM	DB2.DBD54	Float	100	None	
I3 SM	DB2.DBD58	Float	100	None	
LOAD	DB2.DBX66.0	Boolean	100	None	
MATLAB PERTURBACION	DB2.DBD38	Float	100	None	
MATLAB VOLTAJE CAMPO	DB2.DBD42	Float	100	None	
MATLAB VOLTAJE VARIADOR DE F...	DB2.DBD46	Float	100	None	
MODULO SEGURO	DB2.DBX66.1	Boolean	100	None	
MOTOR OFF	DB2.DBX02	Boolean	100	None	
MOTOR ON	DB2.DBX03	Boolean	100	None	
POT PERTURBACION	DB2.DBD26	Float	100	None	
POT VOLTAJE CAMPO	DB2.DBD30	Float	100	None	
POT VOLTAJE VARIADOR DE FREC...	DB2.DBD34	Float	100	None	
SP PERTURBACION	DB2.DBD22	Float	100	None	
SP VOLTAJE DE CAMPO	DB2.DBD18	Float	100	None	
SP VOLTAJE VARIADOR DE FRECU...	DB2.DBD14	Float	100	None	
START	DB2.DBX01	Boolean	100	None	
STOP	DB2.DBX01	Boolean	100	None	
VOLTAJE DE CAMPO MEDIDO	DB2.DBD6	Float	100	None	
VOLTAJE GENERADO	DB2.DBD2	Float	100	None	

APÉNDICE D: PRÁCTICAS PROPUESTAS

Práctica 1: Identificación de Sistemas Multivariables

Nombre:

Paralelo:

Fecha:

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Al finalizar esta sesión el estudiante estará en capacidad de identificar un sistema TITO (Two-Input Two-Output) utilizando MATLAB® y el toolbox System Identification, obteniendo un modelo en funciones de transferencia representativo alrededor de un punto de operación definido.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Comprender qué es un sistema TITO y por qué se identifica alrededor de un punto de operación.
- Estimar las funciones de transferencia principales del sistema TITO usando el toolbox **System Identification** de MATLAB®.

1.2 Introducción

1.2.1 ¿Qué es un sistema MIMO?

Un sistema **MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)** es un sistema dinámico que presenta **múltiples entradas y múltiples salidas**, en el cual cada una de las entradas puede influir simultáneamente sobre una o varias salidas del proceso. A diferencia de los sistemas SISO (Single-Input Single-Output), en los sistemas MIMO existe interacción entre variables, lo que incrementa la complejidad tanto del análisis como del diseño de controladores.

Desde el punto de vista matemático, un sistema MIMO puede representarse mediante una matriz de funciones de transferencia, donde cada elemento describe la relación dinámica entre una entrada específica y una salida determinada. Esta representación permite analizar de manera estructurada el efecto individual y cruzado de las entradas sobre las salidas del sistema.

En la Figura 1 se muestra el esquema general de un sistema MIMO, en el cual un proceso $G(s)$ recibe un conjunto de entradas $u_1(s), u_2(s), \dots, u_n(s)$ y genera un conjunto de salidas $y_1(s), y_2(s), \dots, y_n(s)$. Este tipo de estructura es común en procesos industriales reales, donde varias variables de control actúan de forma simultánea sobre múltiples variables de interés.

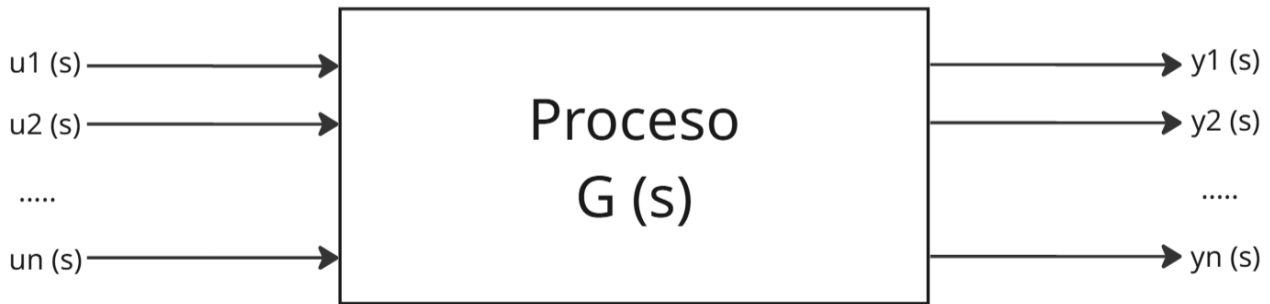


Figura 1. Representación general de un sistema MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).

1.2.2 ¿Qué es un sistema TITO?

Un sistema TITO (Two-Input Two-Output) es un sistema multivariable que posee dos entradas y dos salidas, donde cada entrada puede influir sobre una o ambas salidas. Matemáticamente, este tipo de sistemas puede representarse como:

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix}$$

En esta práctica se definen:

Entradas

- $u_1 = V_{vf}$: Voltaje de control del variador de frecuencia.
- $u_2 = V_e$: Voltaje de campo del alternador.

Salidas

- $y_1 = f_{vg}$: Frecuencia generada.
- $y_2 = V_g$: Voltaje generado.

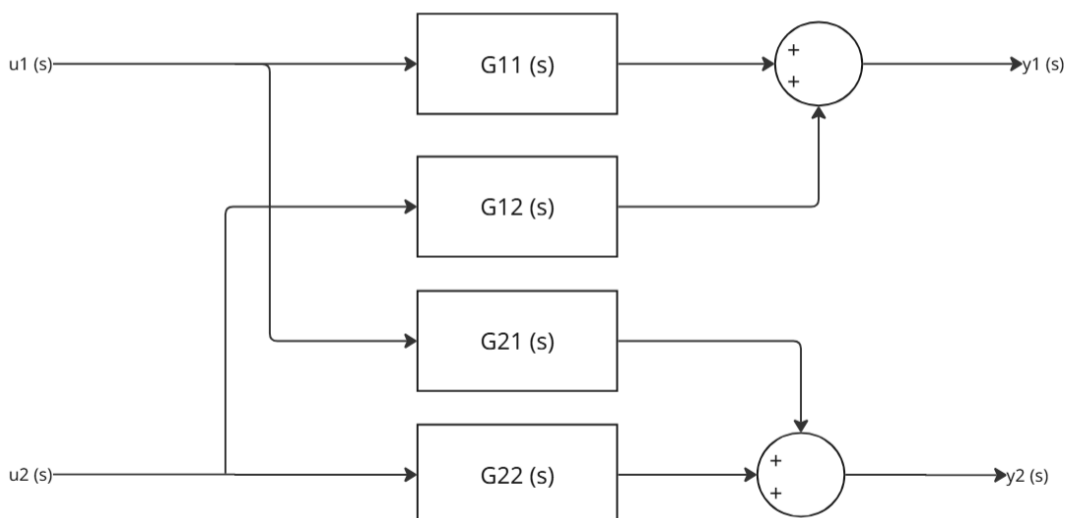


Figura 2. Representación general de un sistema TITO (Two-Input Two-Output).

1.2.3 Descripción de la planta

La planta experimental está compuesta por un variador de frecuencia, un motor eléctrico, un alternador automotriz y una etapa de rectificación, con posibilidad de operar con y sin carga. El motor se encuentra acoplado mecánicamente al rotor del alternador; por esta razón, cualquier variación en la velocidad impuesta por el variador se refleja directamente en la frecuencia de generación.

El sistema cuenta con dos señales de mando principales. Por un lado, el voltaje del variador V_{vf} regula la velocidad del motor y, en consecuencia, influye de forma directa en la frecuencia generada f_{vg} , además de afectar indirectamente el voltaje generado V_g . Por otro lado, el voltaje de campo V_e , aplicado mediante una tarjeta electrónica, controla la excitación del alternador, impactando principalmente sobre el voltaje generado. La Figura 3 presenta el diagrama funcional de la planta y el flujo de señales entre entradas, proceso y salidas.

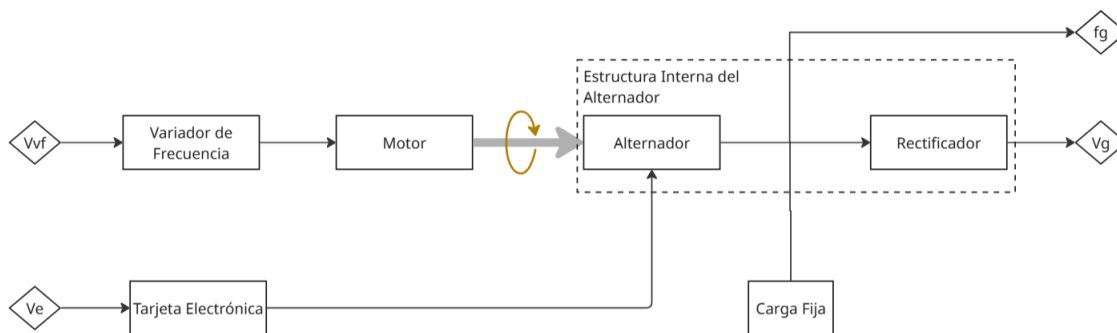


Figura 3. Diagrama funcional de la planta motor-alternador y relación entre variables de entrada y salida.

1.2.4 Explicación de la Interfaz Simulink a Usar

Para la ejecución de los experimentos y la adquisición de datos se utiliza una interfaz HMI desarrollada en Simulink, la cual permite operar la planta de generación eléctrica de forma segura y controlada. Esta interfaz se encuentra integrada dentro del archivo de Simulink denominado *Planta_Generacion_Electrica_Experimentos.slx*, el cual contiene tanto el entorno de operación como los subsistemas destinados a la realización de ensayos experimentales.

En primer lugar, para operar la planta es obligatorio activar el sistema y posteriormente activar el motor. Una vez que el motor se encuentra en funcionamiento, el usuario puede, de manera opcional, activar la carga. Por motivos de seguridad y protección del sistema, la carga solo puede ser desactivada cuando el motor se encuentra apagado, evitando transitorios no deseados durante la operación.

La Figura 4 muestra la interfaz principal del sistema, donde se identifican los botones de operación,

los indicadores de estado del sistema, del motor y de la carga, así como las variables medidas en tiempo real, tales como la frecuencia generada, el voltaje generado, el voltaje de campo medido, las corrientes trifásicas y el desbalance de fase. Adicionalmente, la interfaz permite visualizar gráficas en línea del voltaje y la frecuencia generadas.

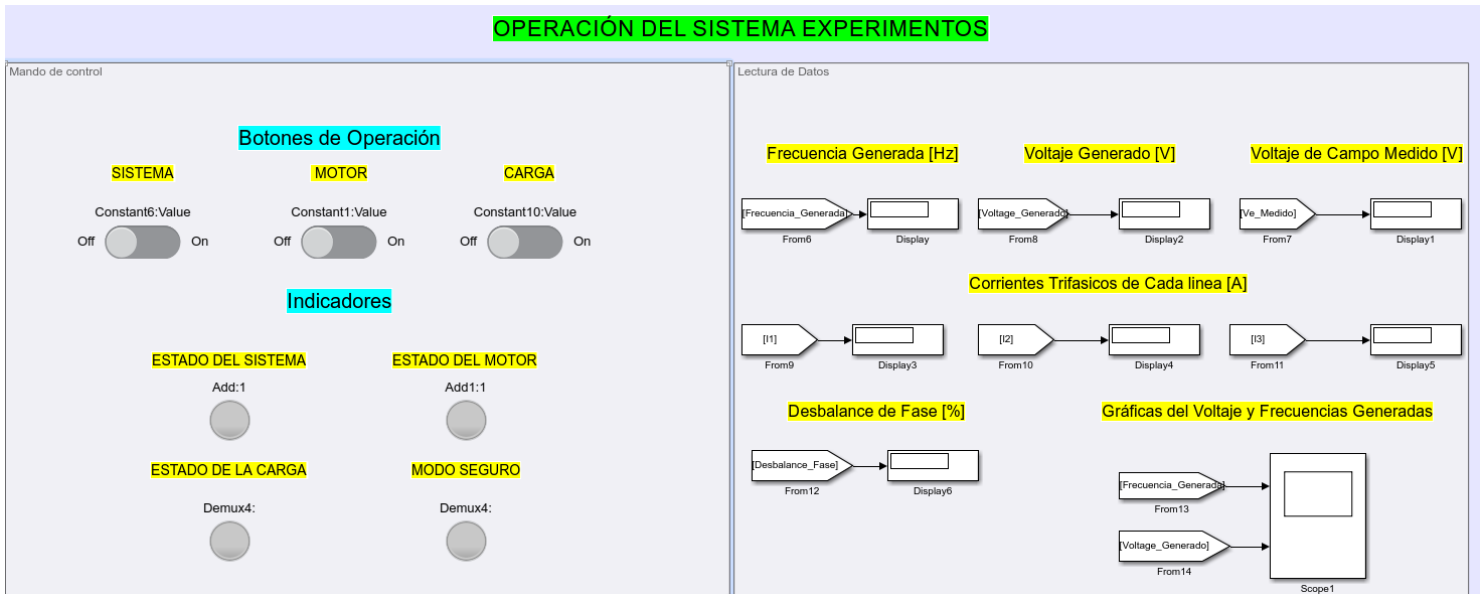


Figura 4. Interfaz HMI principal para la operación y monitoreo del sistema de generación eléctrica.

La planta cuenta con un conjunto de subsistemas de experimentación, los cuales contienen experimentos previamente configurados para la obtención de datos. Estos subsistemas se muestran en la Figura 5 y corresponden a distintos escenarios de operación, como variaciones del voltaje de campo o del voltaje del variador, con y sin carga.

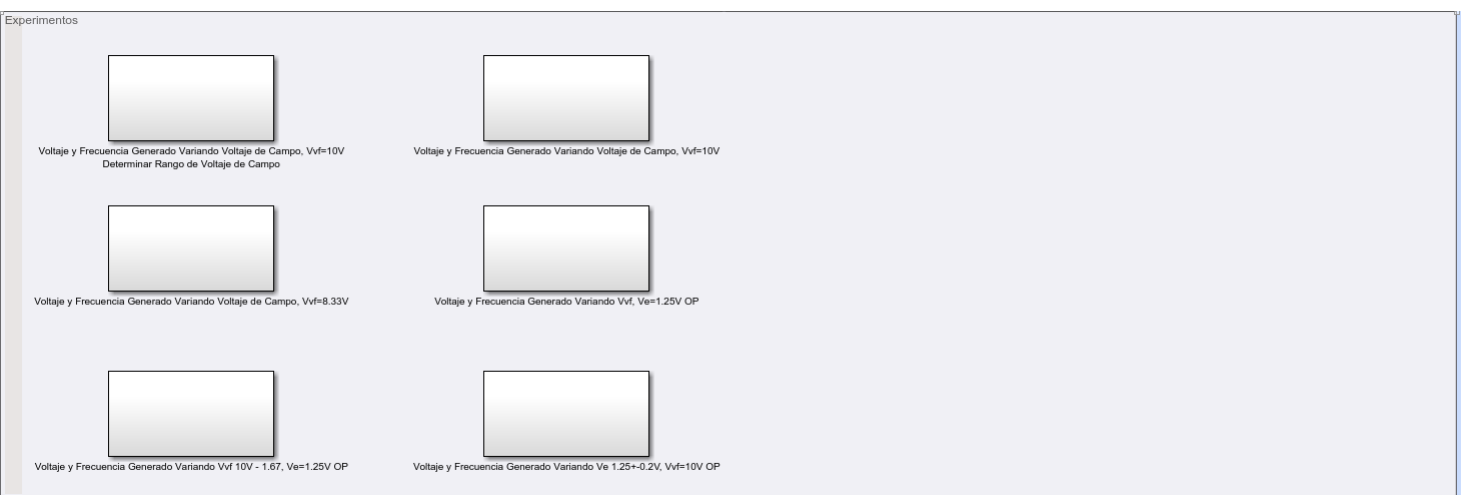


Figura 5. Subsistemas de experimentación disponibles en el archivo *Planta_Generacion_Electrica_Experimentos.slx*

Cada experimento se encuentra implementado internamente mediante bloques de Simulink, como se ilustra en la Figura 6. En estos subsistemas se generan las señales de referencia, se aplican las saturaciones correspondientes y se registran las variables de interés para su posterior análisis e identificación del sistema.

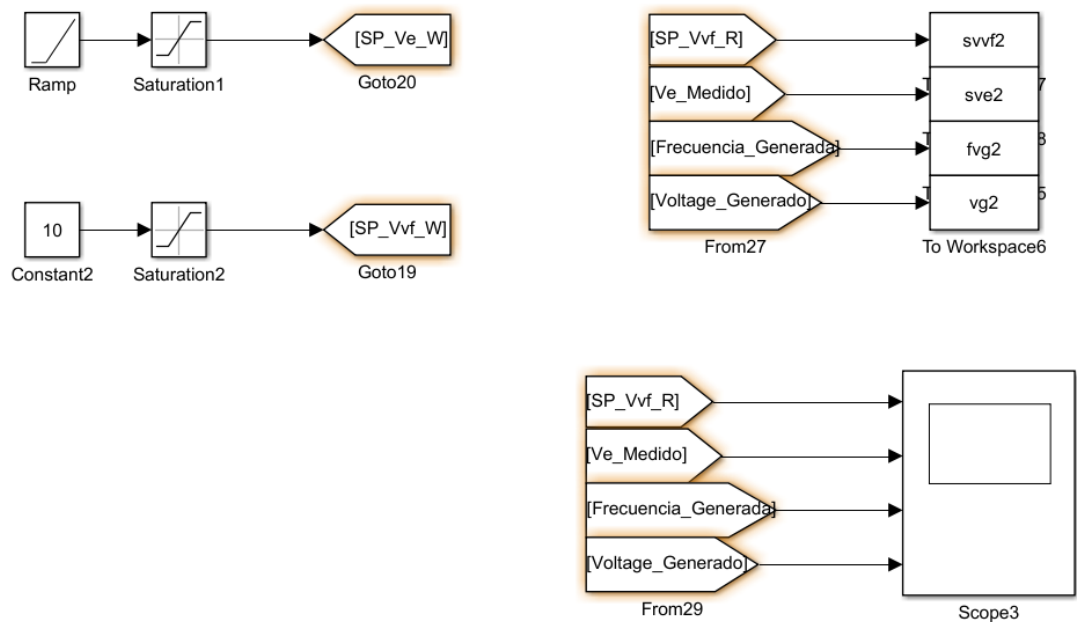


Figura 6. Estructura interna de un subsistema de experimento en Simulink (generación de referencias y registro de variables).

Es importante destacar que los experimentos no se ejecutan automáticamente por el simple hecho de estar contenidos dentro del subsistema. Para que un experimento se lleve a cabo, este debe ser habilitado desde la interfaz principal, es decir, debe encontrarse conectado y visible en el HMI principal, tal como se muestra en la Figura 7. De esta manera, el usuario mantiene el control sobre cuándo se ejecutan los ensayos y se asegura que la adquisición de datos corresponda al escenario seleccionado.

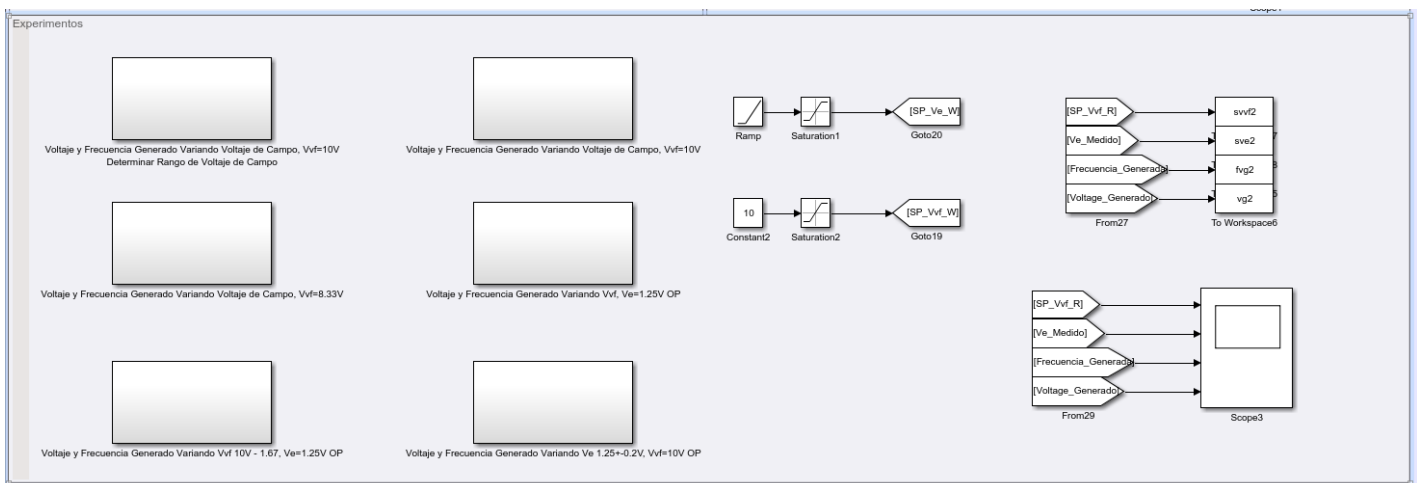


Figura 7. Integración de subsistemas de experimentación en el HMI principal para la ejecución de ensayos.

1.3 Caso de estudio

En esta práctica se asigna al estudiante la tarea de identificar las funciones de transferencia que describen el comportamiento dinámico de la planta de generación eléctrica mostrada en la Figura 8. Con base en las curvas características presentadas en las Figuras 9 y 10, el estudiante deberá estimar el punto de operación (Pto_{OP}) del sistema y definir las condiciones nominales bajo las cuales se ejecutarán los experimentos de identificación.

Para el análisis se considera un tiempo de muestreo de $T_s = 0.1$ s. Adicionalmente, debido a la relación directa entre el variador de frecuencia y la velocidad del conjunto motor–alternador, se establecen dos condiciones nominales para el voltaje del variador de frecuencia: 10 V (condición asociada a 60 Hz) y 8.33 V (condición asociada a 50 Hz). Por tanto, el estudiante deberá determinar un punto de operación del voltaje de campo que garantice un funcionamiento estable y seguro en ambas condiciones del variador, es decir, tanto para $V_{vf} = 10$ V como para $V_{vf} = 8.33$ V.

Como criterio de diseño experimental, el punto de operación se seleccionará de forma que permita aplicar una perturbación de salida para el voltaje generado equivalente a $\Delta_{out} = 20\%$ alrededor de la condición nominal, asegurando que el sistema opere dentro de una zona adecuada para aproximación lineal. Finalmente, se recalca que el rango de operación permitido para el voltaje de campo se encuentra entre 0 V y 2.5 V, por lo que todas las pruebas deben mantenerse dentro de estos límites.



Figura 8. Planta experimental de generación eléctrica utilizada en la práctica.

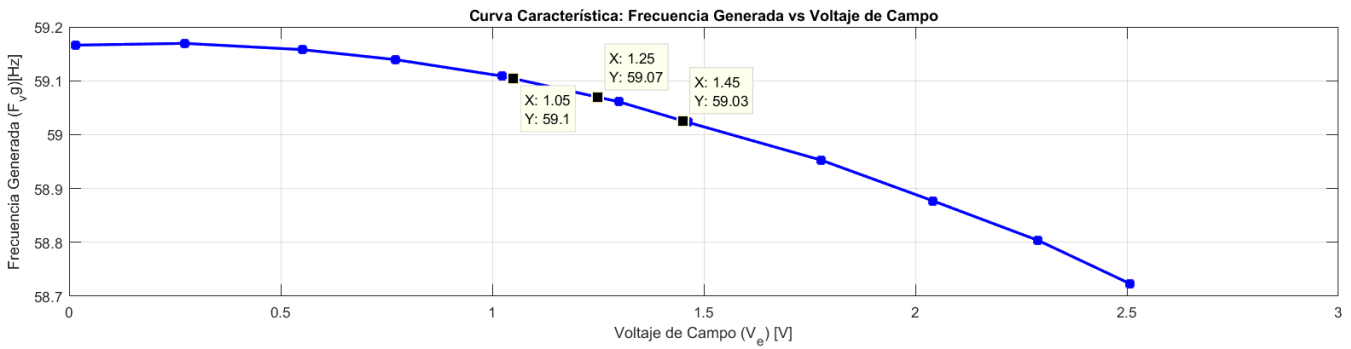
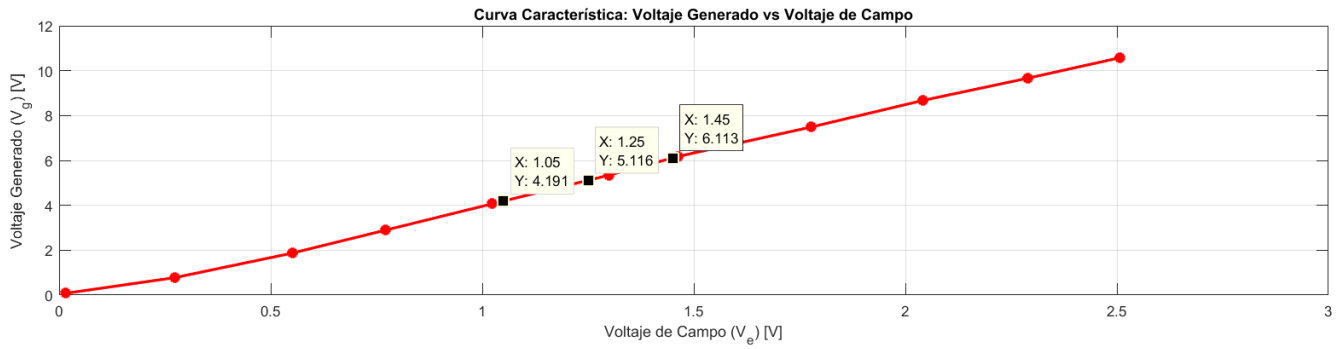


Figura 9. Curvas características obtenidas con voltaje del variador en 10 V relación entre voltaje de campo, voltaje generado y frecuencia generada

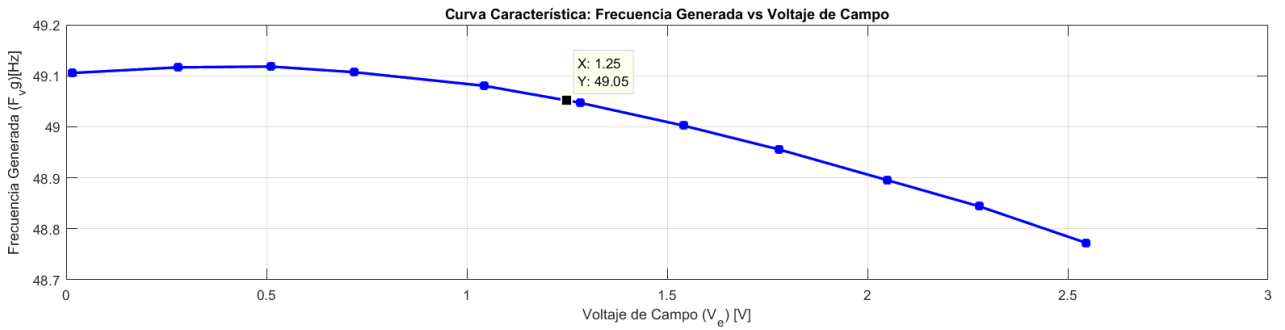
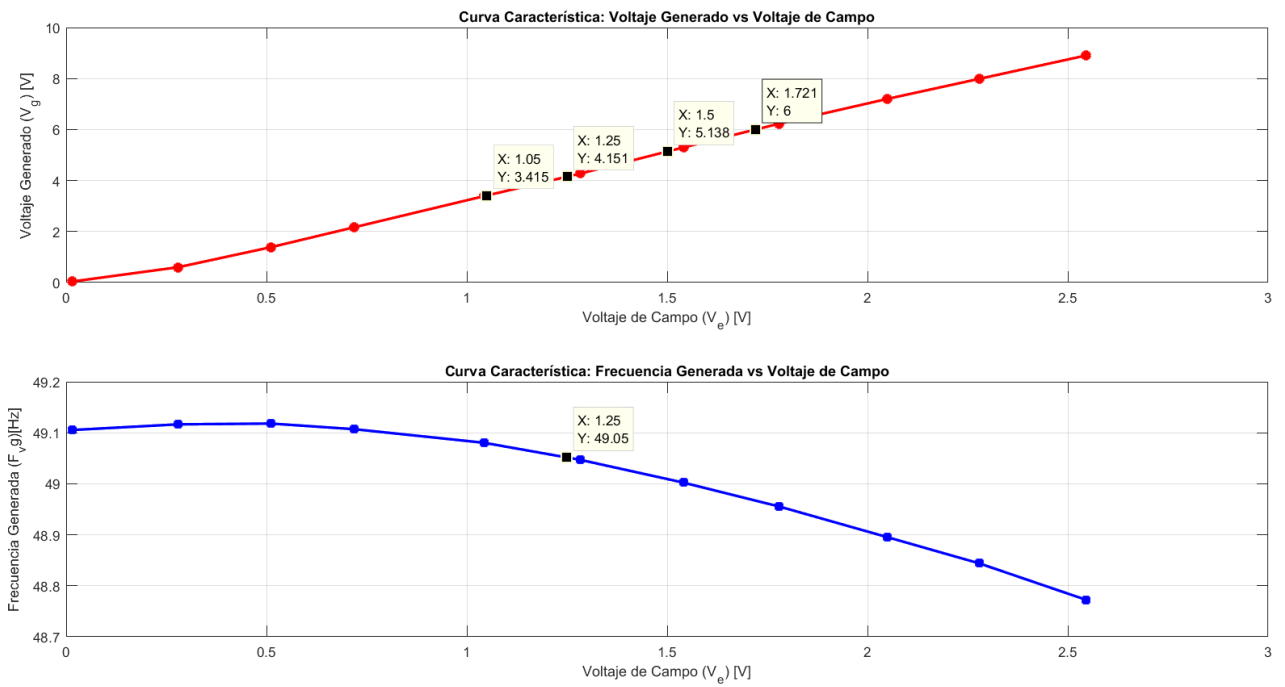


Figura 10. Curvas características obtenidas con voltaje del variador en 8.33 V relación entre voltaje de campo, voltaje generado y frecuencia generada

1.4 Ejercicio

Utilizando como apoyo la Guía de prácticas de Laboratorio de Sistemas de Control, se solicita al estudiante desarrollar el presente ejercicio de identificación del sistema TITO correspondiente a la planta de generación eléctrica. Para ello, descargue el script base SP_TITO.m y realice las modificaciones necesarias según lo indicado a continuación. Recuerde comentar adecuadamente las líneas de código desarrolladas, colocar al inicio del script su nombre y paralelo, y separar el código por secciones para una mejor organización y comprensión.

Durante las sesiones de laboratorio, obtenga los datos experimentales de la planta haciendo uso de la interfaz HMI descrita previamente. Recuerde configurar correctamente las señales de excitación (rampa, escalón o variación gradual) de acuerdo con el experimento a ejecutar.

- Guarde los datos adquiridos en una carpeta destinada para esta práctica.
- Descargue el script SP_TITO.m y ábralo en el mismo directorio donde se encuentran almacenados los archivos de datos (.mat).

En el script proporcionado, el estudiante deberá añadir las líneas de código necesarias para realizar las siguientes actividades:

1. Separar las señales de entrada, salida y tiempo correspondientes a cada experimento, almacenándolas en las variables adecuadas. Sugerencia: Identifique previamente qué variable representa cada columna de los archivos .mat asociados a la dinámica del variador de frecuencia y del voltaje de campo.
2. Graficar de forma independiente las señales de entrada y salida del sistema en función del tiempo. Recuerde incluir títulos, cuadrículas, etiquetas de ejes y unidades correspondientes.
3. Estimar el comportamiento dinámico dominante del sistema a partir de las gráficas obtenidas, considerando parámetros como el tiempo de establecimiento, sobreimpulso porcentual o tiempo pico, según corresponda.
4. Identificar el punto de operación de las señales de entrada y estimar el punto de operación de las salidas a partir de los datos experimentales. Sugerencia: El punto de operación de la entradas puede identificarse directamente de la gráfica, mientras que el de la salidas puede estimarse utilizando el comando **mean** sobre el intervalo donde el sistema se encuentre en régimen permanente. Registre estos valores como *in1_op*, *in2_op* y *out1_op*, *out2_op*.
5. Importar los datos en la herramienta System Identification de MATLAB®, utilizando el comando `systemIdentification`. Para la importación, considere el tiempo de muestreo $T_s = 0.1$ s y asegúrese de ingresar los datos.
6. Una vez obtenidas las funciones de transferencia, el estudiante deberá simular el sistema

utilizando la estructura mostrada en la **Figura 2**. Para ello, es necesario incorporar un **bloque de bias correspondiente al valor negativo del voltaje de operación del campo (Bias – VeOP V)**, de modo que las señales de entrada al modelo sean incrementales. Esta consideración permite que el comportamiento del sistema simulado reproduzca de forma fiel el comportamiento real de la planta.

Identificación en System Identification

- En la ventana Import Data, configure correctamente el Sample Time de 0.1s y el Starting Time de 0.
- Desde el menú Preprocess, seleccione la opción Select Range e importe al menos dos grupos de datos que contengan un período completo de la señal cada uno. Estos grupos deben ser disjuntos y lo más similares posible entre sí.
- Seleccione uno de los conjuntos de datos como Working Data y otro como Validation Data.
- Desde el menú Estimate, seleccione la opción Process Models o Transfer Function Models para estimar las funciones de transferencia del sistema. No incluya retardos (delay) ni integradores.
- Realice la estimación de al menos tres funciones de transferencia con distinta estructura (número de polos y ceros) y seleccione aquella que mejor represente el comportamiento del sistema. Se recomienda obtener un porcentaje de ajuste superior al 60 % entre la respuesta del modelo identificado y la salida real del sistema.

Práctica 2: Diseño y prueba de Controladores PID - Sistemas Multivariables

Nombre:

Paralelo:

Fecha:

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

Al finalizar esta sesión, el estudiante estará en capacidad de determinar en qué condiciones un sistema TITO (Two-Input Two-Output) puede ser desacoplado y obtener los desacopladores correspondientes. Asimismo, podrá utilizar las herramientas sisotool de MATLAB® para el diseño y ajuste de controladores PID, aplicando criterios basados en el método del lugar geométrico de las raíces, y evaluar su desempeño en un sistema multivariable.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Reforzar los conocimientos sobre lugar geométrico de las raíces a través de la herramienta sisotool.
- Representar especificaciones de funcionamiento como zonas o regiones en el lugar geométrico de las raíces.
- Evaluar el desempeño de los **controladores PID** en sistemas multivariables y **comparar** los resultados obtenidos con las simulaciones del sistema.

2.2 Introducción

2.2.1 Controladores en sistemas TITO y enfoque aplicado a la planta

En un sistema TITO (Two-Input Two-Output), dos variables manipuladas actúan simultáneamente sobre dos variables controladas, generando acoplamientos cruzados entre lazos. Esto implica que una acción de control aplicada en una entrada puede afectar no solo a su salida “principal”, sino también a la otra salida del sistema. Debido a esta interacción, el diseño de controladores en sistemas TITO puede abordarse mediante estrategias multivariables o mediante un enfoque descentralizado, donde se diseñan controladores SISO para cada lazo, incorporando un mecanismo para reducir la interacción.

En esta planta de generación eléctrica, las variables se definen como:

- Entradas (variables manipuladas):
 $u_1 = V_{vf}$ (voltaje del variador de frecuencia),
 $u_2 = V_e$ (voltaje de campo del alternador).

- Salidas (variables controladas):
 $y_1 = f_{vg}$ (frecuencia generada),
 $y_2 = V_g$ (voltaje generado).

Bajo esta estructura, el sistema se representa mediante una matriz de transferencia:

$$\begin{bmatrix} f_{vg}(s) \\ V_g(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{vf}(s) \\ V_e(s) \end{bmatrix}$$

De acuerdo con la identificación realizada para la planta, las funciones de transferencia obtenidas son:

$$G_{11}(s) = \frac{5.891}{0.6512s^2 + 1.614s + 1}, G_{12}(s) \approx 0$$

$$G_{21}(s) = \frac{0.4965}{0.6503s^2 + 1.613s + 1}, G_{22}(s) = \frac{4.192}{0.1385s + 1}$$

Lo anterior confirma el comportamiento físico del sistema: el variador V_{vf} domina la dinámica de la frecuencia generada (G_{11}) y también influye en el voltaje generado (G_{21}), mientras que el voltaje de campo V_e impacta principalmente en V_g mediante G_{22} . Además, el término G_{12} resulta despreciable, lo que indica que V_e no afecta de forma relevante a la frecuencia generada.



Figura 1. Planta experimental de generación eléctrica utilizada en la práctica.

2.2.2 Enfoque de control: descentralizado con desacoplo inverso

Con el objetivo de simplificar el diseño de control y reducir el acoplamiento cruzado, se adopta un esquema de **control descentralizado** complementado con un **desacoplador inverso**. En este enfoque se implementan dos controladores (por ejemplo, PID) asociados a los lazos principales:

- **Controlador de frecuencia:** $C_1(s)$ actuando sobre V_{vf} para regular f_{vg} .
- **Controlador de voltaje:** $C_2(s)$ actuando sobre V_e para regular V_g .

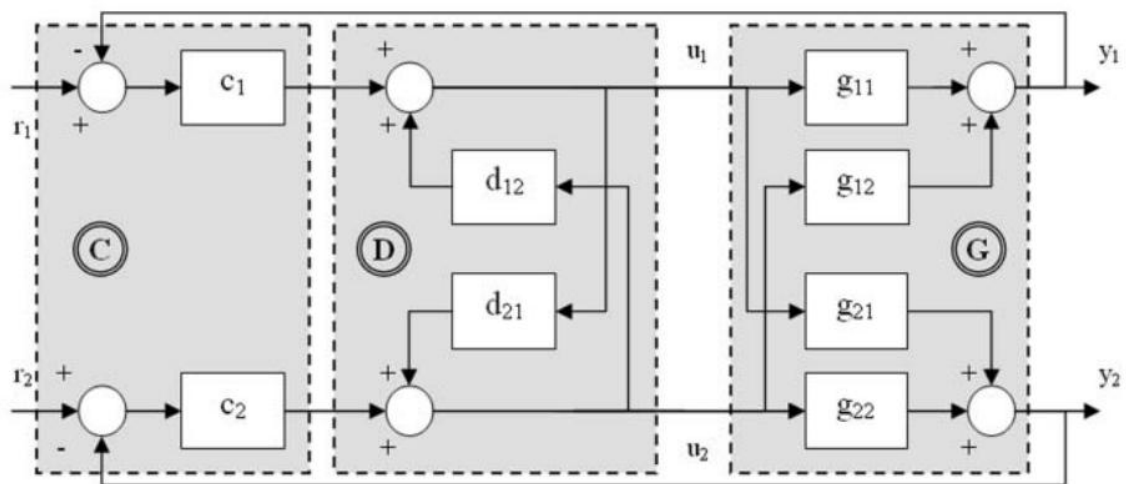


Figura 4. Sistema de control mediante desacoplo inverso de un proceso TITO

El desacoplador introduce acciones de compensación tipo *feedforward* entre las entradas, buscando que el sistema resultante sea aproximadamente diagonal; es decir, que cada entrada afecte principalmente a su salida asignada, minimizando las interacciones no deseadas entre lazos.

Para una planta 2×2 , el desacoplador inverso ideal puede escribirse como:

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\ -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix}$$

En el caso particular de esta planta, dado que $G_{12}(s) \approx 0$, el término superior derecho del desacoplador se anula, por lo que se obtiene:

$$D(s) \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix}$$

Por tanto, la compensación relevante se concentra en el término:

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)}$$

Utilizando los modelos identificados para la planta, con

$$G_{21}(s) = \frac{0.4965}{0.6503s^2 + 1.613s + 1}, G_{22}(s) = \frac{4.192}{0.1385s + 1},$$

se obtiene la siguiente compensación:

$$D_{21}(s) = -\frac{0.02523 s + 0.1821}{s^2 + 2.48 s + 1.538}$$

y, en consecuencia, la **matriz del desacoplador resultante** queda:

$$D(s) \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{0.02523 s + 0.1821}{s^2 + 2.48 s + 1.538} & 1 \end{bmatrix}$$

Este desacoplador permite **atenuar la influencia de V_{vf} sobre el voltaje generado V_g** , reduciendo el acoplamiento cruzado y mejorando el comportamiento multivariable al controlar de forma simultánea la **frecuencia generada** y el **voltaje generado**.

2.3 Procedimiento

Presente en un documento PDF toda la información solicitada como evidencia del trabajo realizado. Las gráficas deben elaborarse en MATLAB® utilizando el comando plot e incluir título, cuadrícula, nombres de ejes y leyenda cuando corresponda. Recuerde que el eje x representa siempre el tiempo.

Para la ejecución y prueba de los controladores se trabajará alrededor de los **puntos de operación** de la planta, definidos en la Tabla 1, de manera que la identificación y el control se realicen con señales incrementales (Δ) dentro de una región de operación segura.

Tabla 1 Puntos de operación estimados para la planta de generación eléctrica

Variable	Punto de Operación	Descripción
V_{vf}	10 – 1.67 [V]	Voltaje del variador de frecuencia
V_e	1.25 \pm 0.2 [V]	Voltaje de campo del alternador
F_{vg}	60 – 10 [Hz]	Frecuencia Deseada de la señal de voltaje alterna generada
V_g	5 \pm 1 [V]	Voltaje DC Deseado a partir de la señal AC generada por el alternador

Consideraciones de saturación y operación alrededor del punto nominal

En esta planta existen límites físicos en las variables manipuladas (señales de control):

- Voltaje del variador de frecuencia V_{vf} : rango físico 0 a 10 V. Para el lazo de frecuencia, el sistema opera nominalmente con $V_{vf,op} = 10$ V (correspondiente a 60 Hz). Por esta razón, no se permite sobreimpulso en la señal de control del variador, ya que cualquier intento de exceder 10 V saturaría el actuador. La variación típica definida para operación es hasta 8.33 V, es decir $\Delta V_{vf} \approx -1.67$ V, lo que equivale a 16.7% del rango completo (1.67/10).
- Voltaje de campo V_e : rango físico 0 a 2.5 V. Se trabaja alrededor del punto nominal $V_{e,op} = 1.25$ V, con variaciones típicas de ± 0.2 V. Esto representa aproximadamente 8% del rango completo (0.2/2.5) y permite mantener la operación dentro de una zona segura y aproximadamente lineal.

2.3.1 Ejercicio 1: Diseño del PID para control de frecuencia f_{vg}

Diseñar un controlador PID (o una de sus combinaciones) para regular la frecuencia generada f_{vg} actuando sobre el voltaje del variador V_{vf} , de forma que ante una entrada tipo escalón se cumplan las siguientes especificaciones:

- Error de estado estacionario: $e_{ss} = 0$.
- Sobreimpulso: $M_p = 0\%$ (sin sobrepasar el valor final).

- Tiempo de estabilización: $T_s \leq 8$ s.

Considere que V_{vf} está físicamente limitado entre 0 y 10 V, y que el punto nominal de operación para 60 Hz corresponde a $V_{vf,op} = 10$ V. Por esta razón, el controlador debe ajustarse de manera que la señal de control no genere sobreimpulso, ya que el actuador se encontraría en saturación cuando opere en la condición nominal.

Finalmente, pruebe el desempeño del sistema controlado realizando variaciones de referencia dentro del rango operativo:

- **Cambios de setpoint entre 60 Hz y 50 Hz.**

Registre y compare los índices de desempeño diseñados y obtenidos (use marcadores sobre las gráficas para estimar T_s , M_p y e_{ss}).

2.3.2 Ejercicio 2: Diseño del PID para control de voltaje V_g

Diseñar un controlador PID (o una de sus combinaciones) para regular el voltaje generado V_g actuando sobre el voltaje de campo V_e , de forma que ante una entrada tipo escalón se cumplan las siguientes especificaciones:

- Error de estado estacionario: $e_{ss} = 0$.
- Sobreimpulso: $M_p = 0\%$.
- Tiempo de estabilización: $T_s \leq 8$ s.

Considere que V_e está limitado físicamente entre 0 y 2.5 V, y que se opera alrededor del punto nominal $V_{e,op} = 1.25$ V con variaciones típicas de ± 0.2 V ($\approx 8\%$ del rango total). En consecuencia, el controlador debe diseñarse para mantener la señal de control dentro de dicho rango, evitando saturación.

Finalmente, pruebe el desempeño del sistema controlado realizando variaciones de referencia dentro del rango operativo:

- **Cambios de setpoint entre 4 V, 5 V y 6 V.**

Registre y compare los índices de desempeño diseñados y obtenidos mediante las gráficas del HMI y/o señales almacenadas en Workspace.

Uso de la interfaz (HMI)

Para operar la planta desde Simulink se utiliza la interfaz HMI del modo automático. El procedimiento de operación es:

1. **Colocar los parámetros de los controladores PID** calculados en el Ejercicio 1 y Ejercicio 2
2. **Activar el SISTEMA** desde el botón correspondiente.
3. **Encender el MOTOR** una vez que el sistema se encuentre habilitado.
4. **Activar la CARGA (opcional)** únicamente si se requiere realizar pruebas con carga

conectada.

Por seguridad operativa, la carga debe activarse/desactivarse de acuerdo con las restricciones del sistema; en esta práctica se recomienda ejecutar las pruebas **sin carga** salvo que se indique lo contrario.

5. Ajustar y variar los setpoints desde el panel “Establecer Nivel de Voltaje y Frecuencia”.
6. Verificar el comportamiento del sistema mediante los indicadores y las gráficas de lectura de datos disponibles en el HMI, y verificar que los controladores funcionen de forma correcta.

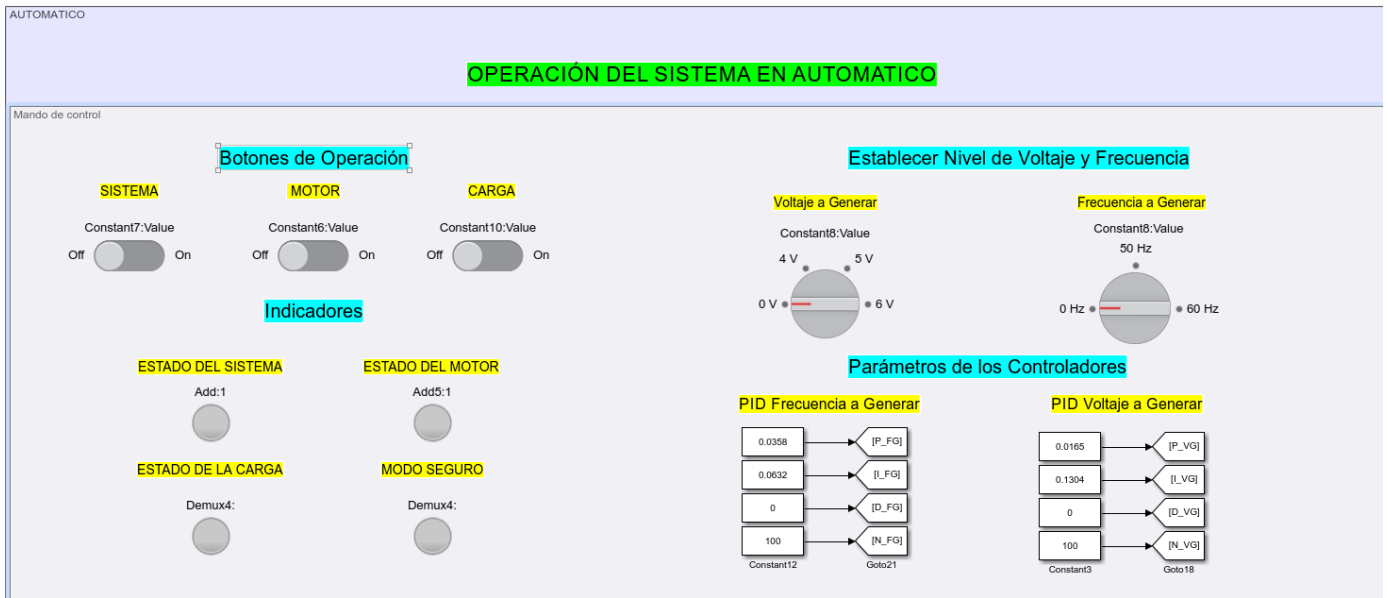


Figura 2. Interfaz HMI del modo automático para operación y configuración de setpoints de frecuencia y voltaje, y configuración de los controladores.

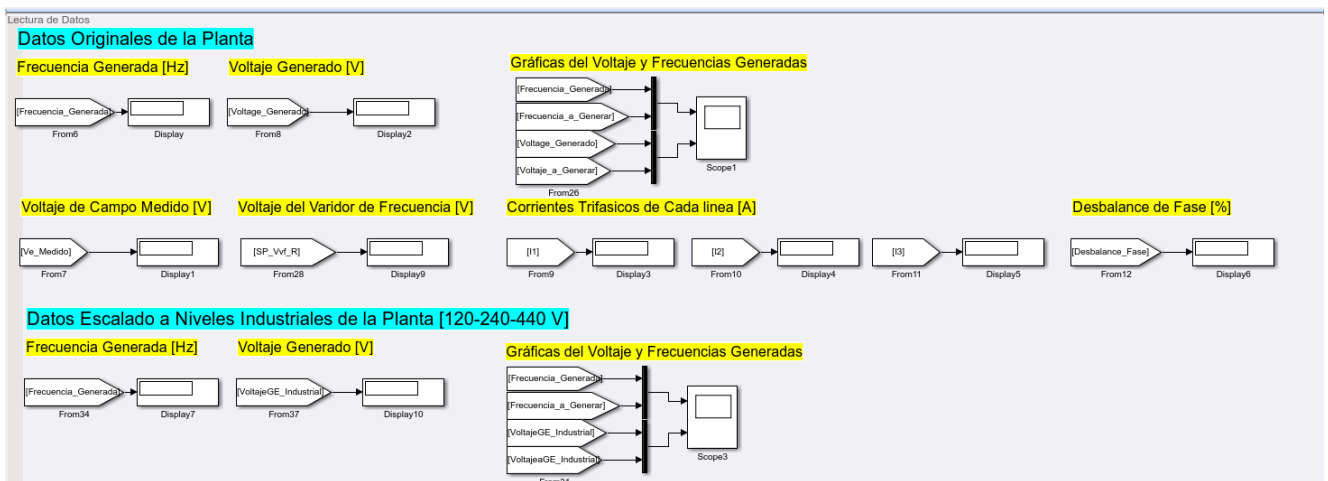


Figura 3. Panel de lectura y visualización de variables de la planta (datos originales y escalados a nivel industrial).

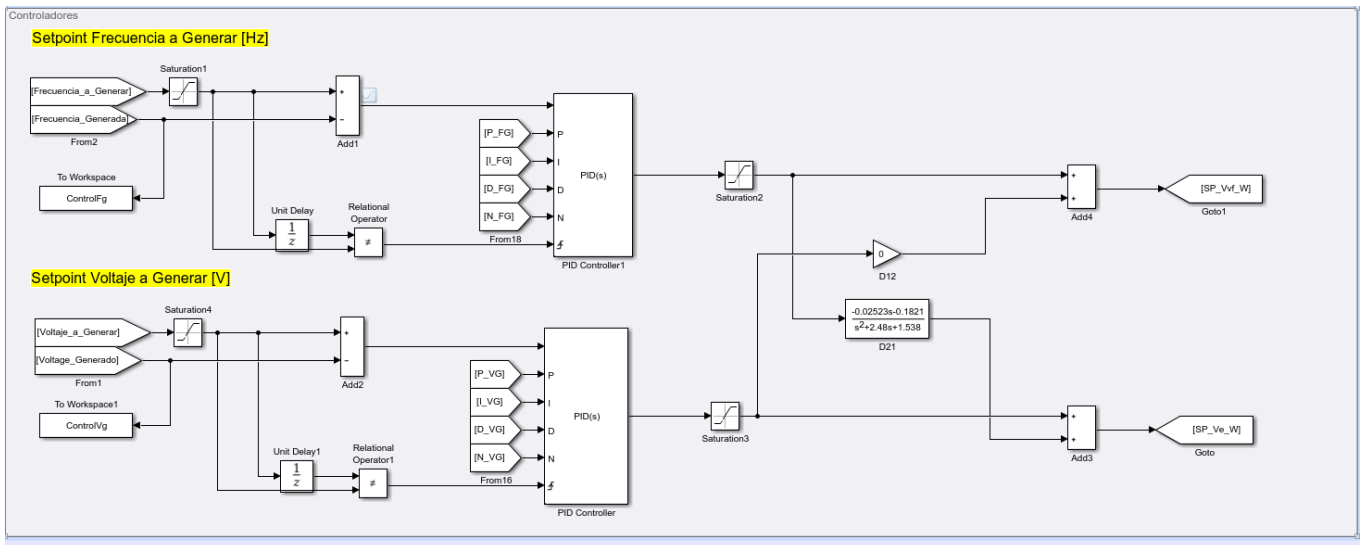


Figura 4. Subsistema de controladores PID y desacoplador inverso implementado en Simulink para control TITO.

**APÉNDICE E: PROGRAMACIÓN Y VARIABLES
PRINCIPALES EN TIA PORTAL DEL SISTEMA**

Program blocks

Main [OB1]

Main Properties

General

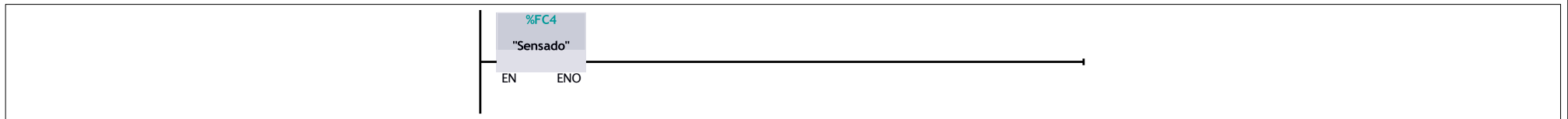
Name	Main	Number	1	Type	OB	Language	LAD
Numbering	Manual						

Information

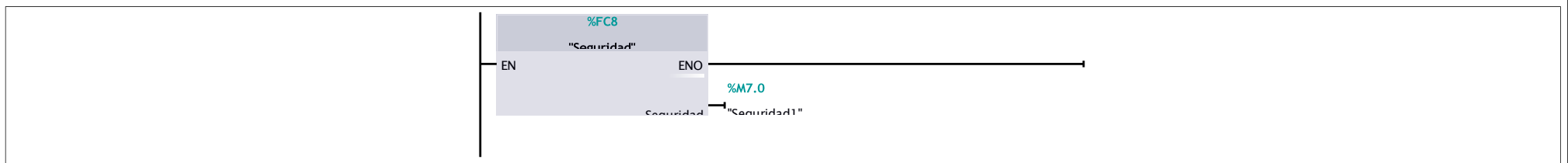
Title	"Main Program Sweep (Cycle)"	Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Default value	Comment
▼ Temp				
OB1_EV_CLASS	Byte	0.0		Bits 0-3 = 1 (Coming event), Bits 4-7 = 1 (Event class 1)
OB1_SCAN_1	Byte	1.0		1 (Cold restart scan 1 of OB 1), 3 (Scan 2-n of OB 1)
OB1_PRIORITY	Byte	2.0		Priority of OB Execution
OB1_OB_NUMBR	Byte	3.0		1 (Organization block 1, OB1)
OB1_RESERVED_1	Byte	4.0		Reserved for system
OB1_RESERVED_2	Byte	5.0		Reserved for system
OB1_PREV_CYCLE	Int	6.0		Cycle time of previous OB1 scan (milliseconds)
OB1_MIN_CYCLE	Int	8.0		Minimum cycle time of OB1 (milliseconds)
OB1_MAX_CYCLE	Int	10.0		Maximum cycle time of OB1 (milliseconds)
OB1_DATE_TIME	Date_And_Time	12.0		Date and time OB1 started
Constant				

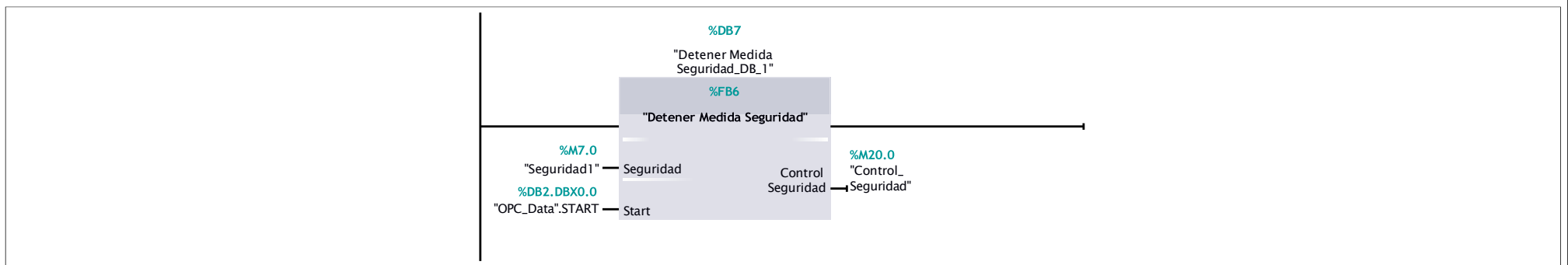
Network 1: Sensado de Señales



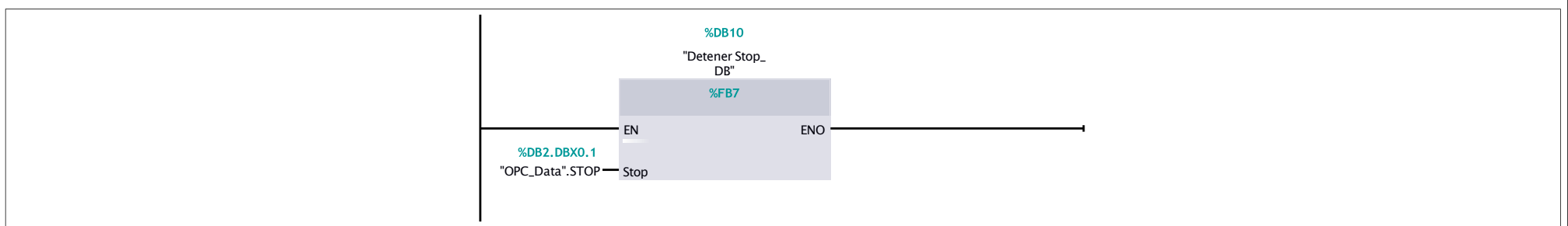
Network 2: Medida de Seguridad Voltaje Generado Mayor a 11.85 V



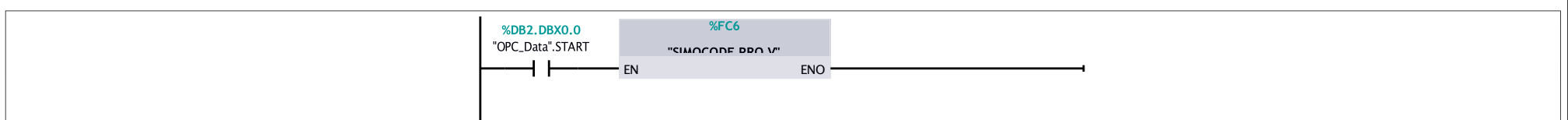
Network 3: Modo Seguro



Network 4: Apagado Seguro



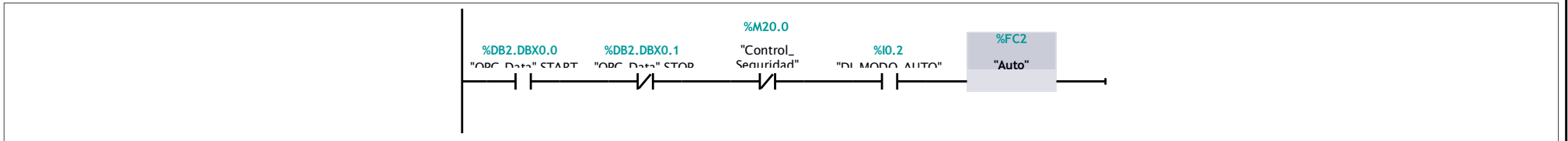
Network 5: SIMOCODE PRO V



Network 6: Modo Manual del Sistema



Network 7: Modo Automatico del Sistema



Program blocks

CYC_INT5_RTG1 [OB35]

CYC_INT5_RTG1 Properties

General

Name	CYC_INT5_RTG1	Number	35	Type	OB	Language	LAD
-------------	---------------	---------------	----	-------------	----	-----------------	-----

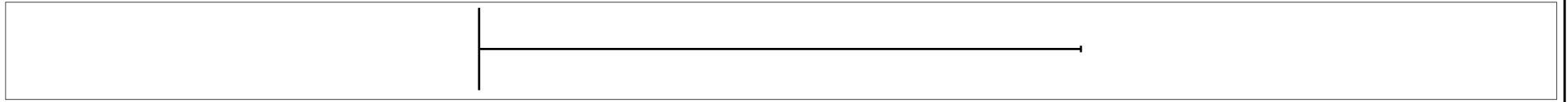
Numbering Manual

Information

Title	"Cyclic Interrupt"	Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Default value	Comment
▼ Temp				
OB35_EV_CLASS	Byte	0.0		Bits 0-3 = 1 (Coming event), Bits 4-7 = 1 (Event class 1)
OB35_STRT_INF	Byte	1.0		16#36 (OB 35 has started)
OB35_PRIORITY	Byte	2.0		Priority of OB Execution
OB35_OB_NUMBR	Byte	3.0		35 (Organization block 35, OB35)
OB35_RESERVED_1	Byte	4.0		Reserved for system
OB35_RESERVED_2	Byte	5.0		Reserved for system
OB35_PHASE_OFFSET	Word	6.0		Phase offset (msec)
OB35_RESERVED_3	Int	8.0		Reserved for system
OB35_EXC_FREQ	Int	10.0		Frequency of execution (msec)
OB35_DATE_TIME	Date_And_Time	12.0		Date and time OB35 started
Constant				

Network 1:

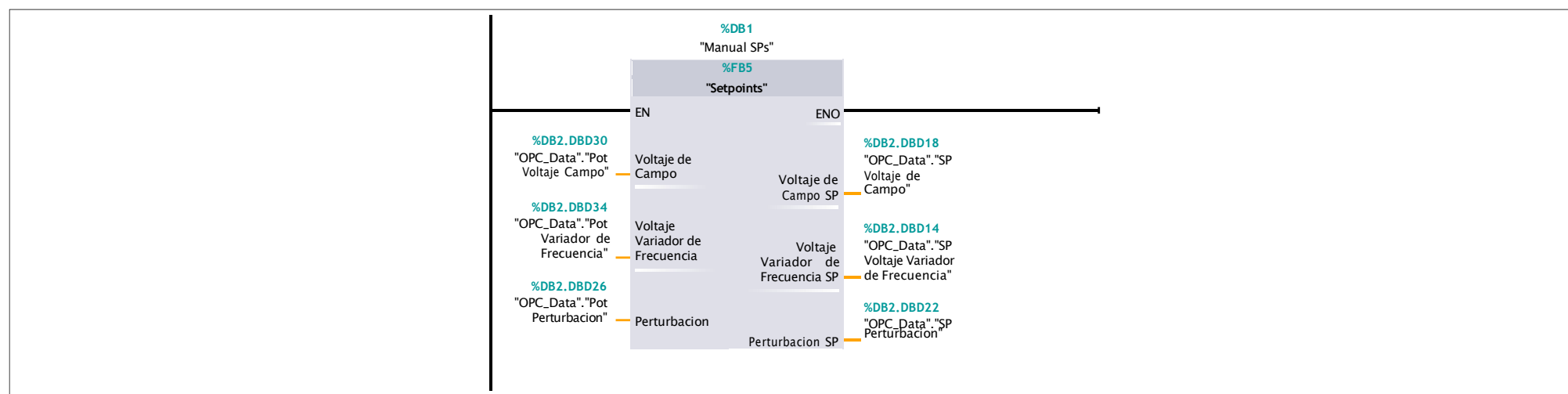


Program blocks

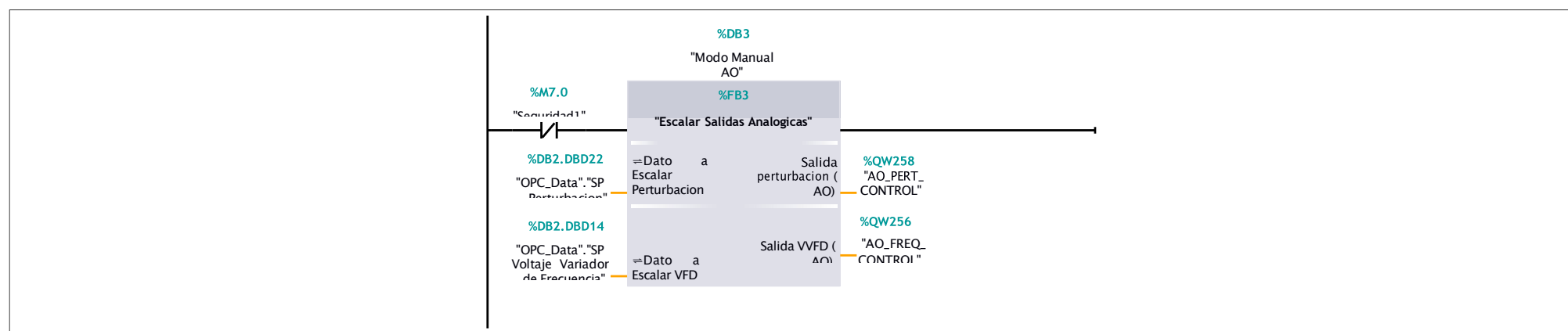
Manual [FC1]

Manual Properties							
General							
Name	Manual	Number	1	Type	FC	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					
Name	Data type	Offset	Default value	Comment			
Input							
Output							
InOut							
Temp							
Constant							
▼ Return							
Manual	Void						

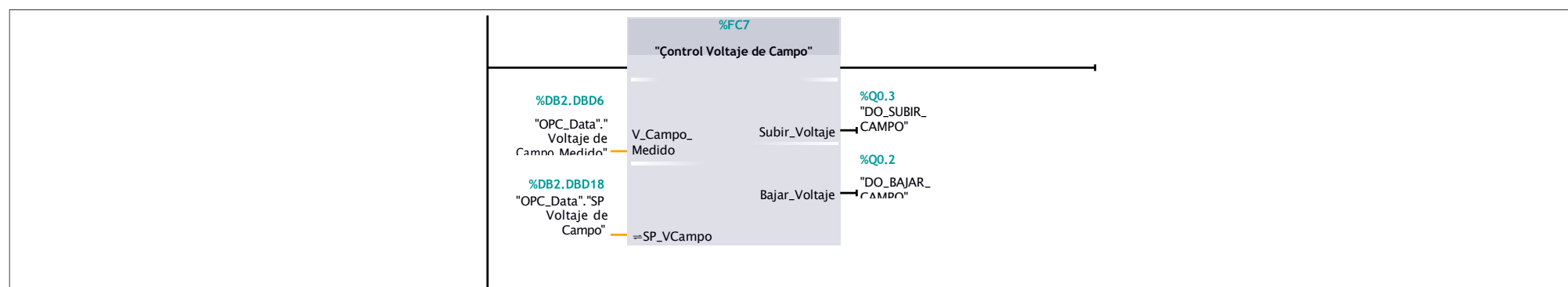
Network 1:



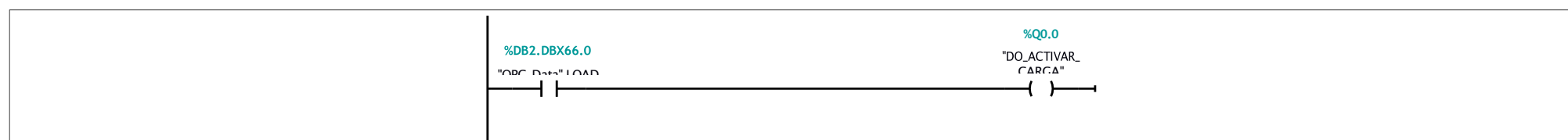
Network 2: Salidas: Perturbacion y Frecuencia



Network 3: Control Voltaje de Campo



Network 4: Controlar carga



Totally Integrated
Automation Portal

Program blocks

OPC_Data [DB2]

OPC_Data Properties

General

Name	OPC_Data	Number	2	Type	DB	Language	DB
------	----------	--------	---	------	----	----------	----

Numbering	Automatic
-----------	-----------

Information

Title		Author		Comment		Family	
-------	--	--------	--	---------	--	--------	--

Version	0.1	User-defined ID	
---------	-----	-----------------	--

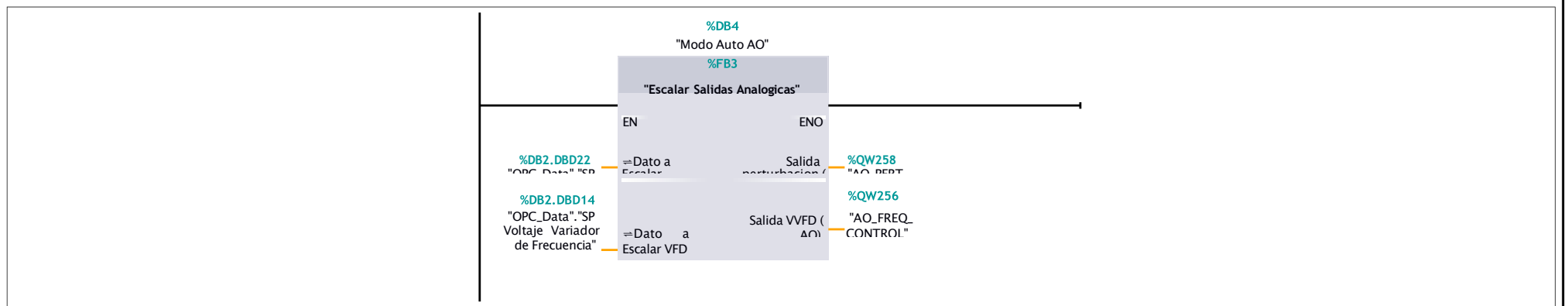
Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Static										
START	Bool	0.0	false	False	True	True	True	False		
STOP	Bool	0.1	false	False	True	True	True	False		
MOTOR_OFF	Bool	0.2	false	False	True	True	True	False		
MOTOR_ON	Bool	0.3	false	False	True	True	True	False		
Voltaje Generado	Real	2.0	0.0	False	True	True	True	False		
Voltaje de Campo Medido	Real	6.0	0.0	False	True	True	True	False		
Frecuencia Generada	Real	10.0	0.0	False	True	True	True	False		
SP Voltaje Variador de Fre-cuencia	Real	14.0	0.0	False	True	True	True	False		
SP Voltaje de Campo	Real	18.0	0.0	False	True	True	True	False		
SP Perturbacion	Real	22.0	0.0	False	True	True	True	False		
Pot Perturbacion	Real	26.0	0.0	False	True	True	True	False		
Pot Voltaje Campo	Real	30.0	0.0	False	True	True	True	False		
Pot Variador de Frecuencia	Real	34.0	0.0	False	True	True	True	False		
Matlab Perturbacion	Real	38.0	0.0	False	True	True	True	False		
Matlab Voltaje Campo	Real	42.0	0.0	False	True	True	True	False		
Matlab Variador de Frecuen-cia	Real	46.0	0.0	False	True	True	True	False		
I1 SM	Real	50.0	0.0	False	True	True	True	False		
I2 SM	Real	54.0	0.0	False	True	True	True	False		
I3 SM	Real	58.0	0.0	False	True	True	True	False		
Desbalance de fase SM	Real	62.0	0.0	False	True	True	True	False		
LOAD	Bool	66.0	false	False	True	True	True	False		
Modo Seguro	Bool	66.1	false	False	True	True	True	False		

Program blocks

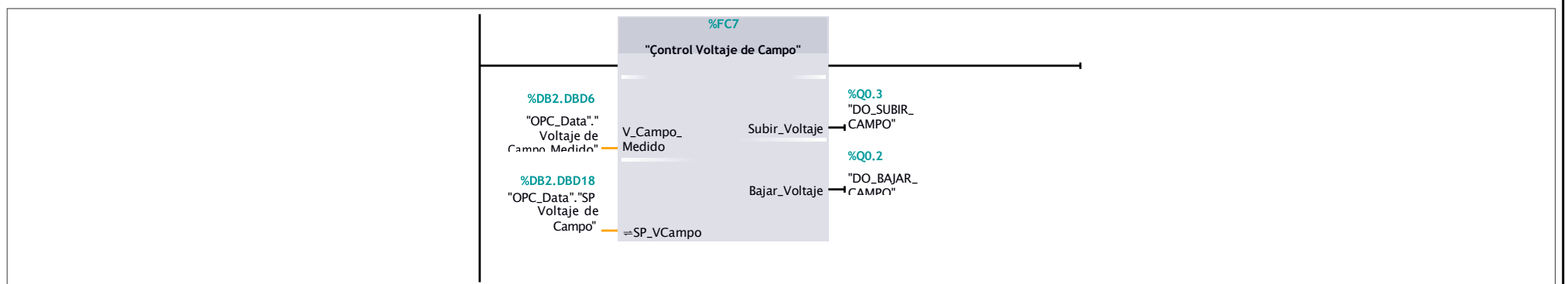
Auto [FC2]

Auto Properties							
General							
Name	Auto	Number	2	Type	FC	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					
Name	Data type	Offset	Default value	Comment			
Input							
Output							
InOut							
Temp							
Constant							
▼ Return							
Auto	Void						

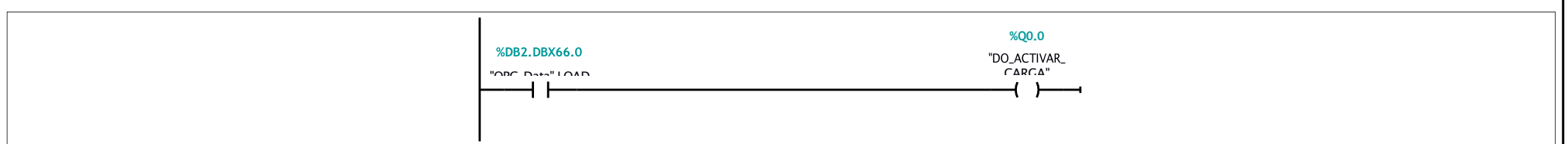
Network 1: Salidas: Perturbacion y Frecuencia



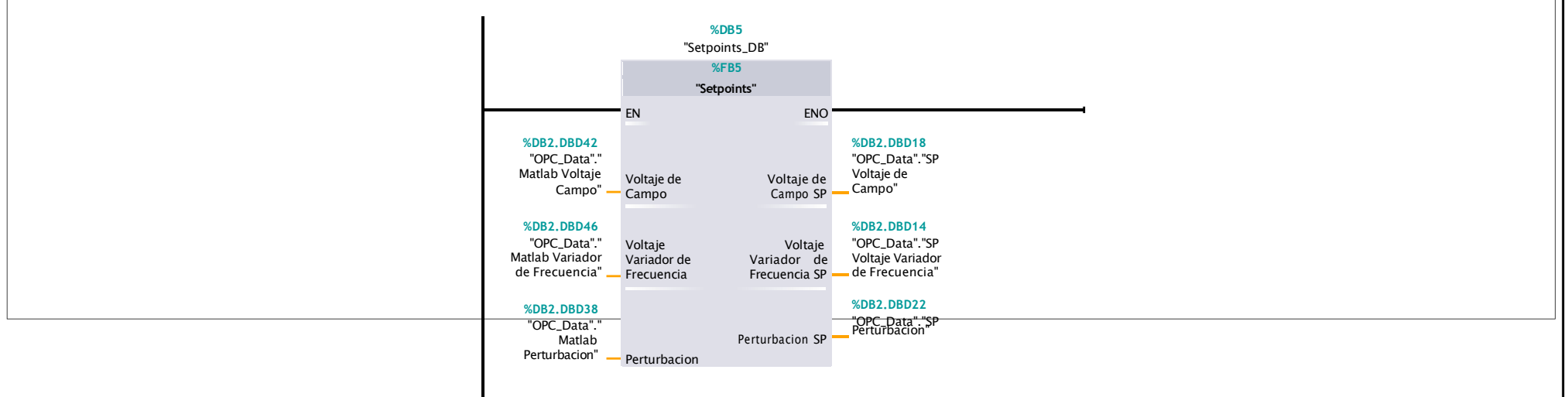
Network 2: Control Voltaje de Campo



Network 3: Controlar carga



Network 4:



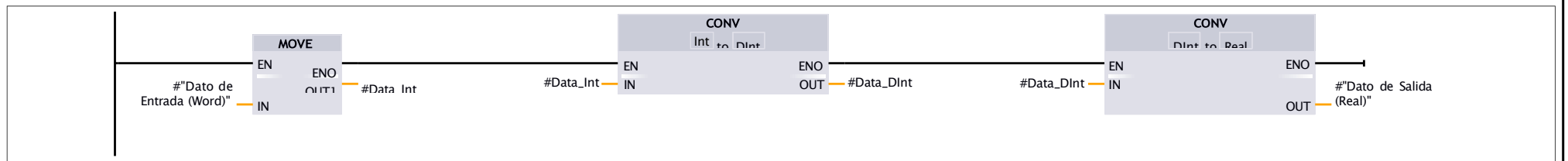
Program blocks

Word to Real [FC3]

Word to Real Properties							
General							
Name	Word to Real	Number	3	Type	FC	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Default value	Comment
▼ Input				
Dato de Entrada (Word)	Word			
▼ Output				
Dato de Salida (Real)	Real			
InOut				
▼ Temp				
Data_Int	Int	0.0		
Data_DInt	DInt	2.0		
Constant				
▼ Return				
Word to Real	Void			

Network 1:



Program blocks

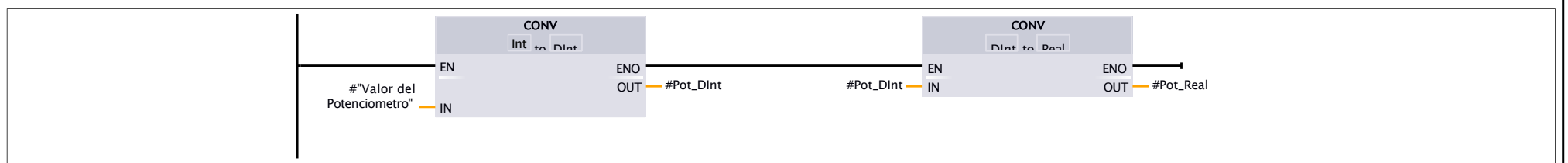
Escalar Potenciometro [FB1]

Escalar Potenciometro Properties

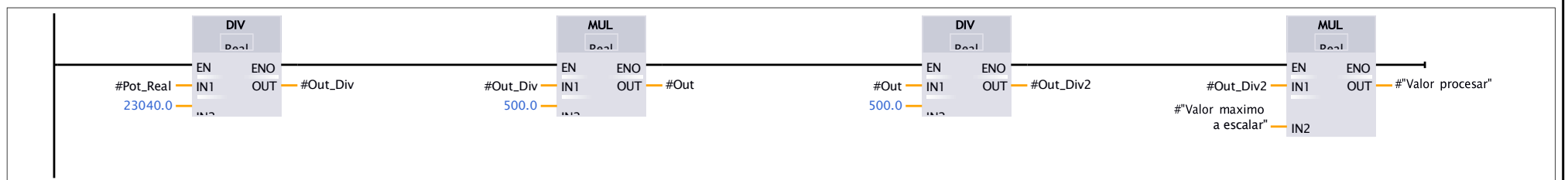
General							
Name	Escalar Potenciometro	Number	1	Type	FB	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Default value	Accessible from HMI/OPC UA/Web API	Writable from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
Valor del Potenciometro	Int	0.0	0	True	True	True	False		
Valor maximo a escalar	Real	2.0	0.0	True	True	True	False		
Valor minimo a escalar	Real	6.0	0.0	True	True	True	False		
▼ Output									
Valor escalado pot	Real	10.0	0.0	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
▼ IEC_Timer_0_Instance	TON	14.0		True	True	True	True		
▼ Input									
IN	Bool	14.0	false	True	True	True	False		
PT	Time	16.0	T#0MS	True	True	True	False		
▼ Output									
Q	Bool	20.0	false	True	True	True	False		
ET	Time	22.0	T#0MS	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
STATE	Byte	26.0	16#0	True	True	True	False		
STIME	Time	28.0	T#0MS	True	True	True	False		
ATIME	Time	32.0	T#0MS	True	True	True	False		
▼ Temp									
Out	Real	0.0							
Pot_DInt	DInt	4.0							
Pot_Real	Real	8.0							
Out_Div	Real	12.0							
Out_Div2	Real	16.0							
Valor procesar	Real	20.0							
Constant									

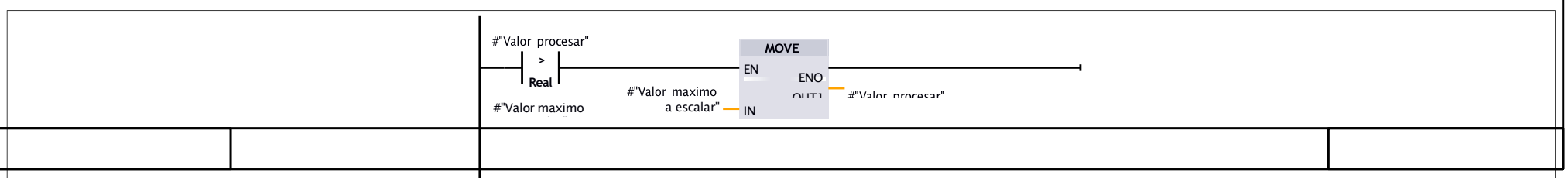
Network 1:



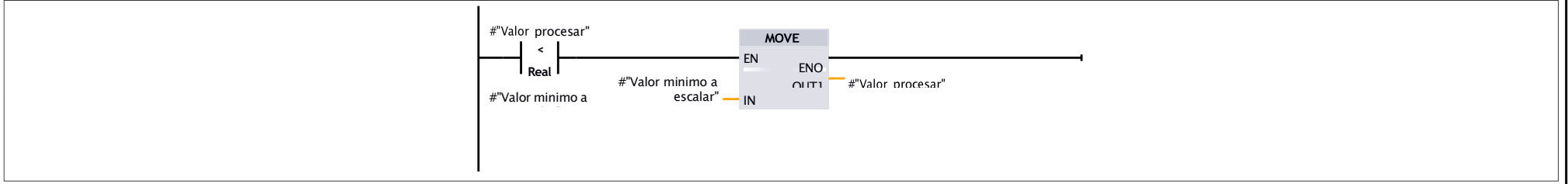
Network 2:



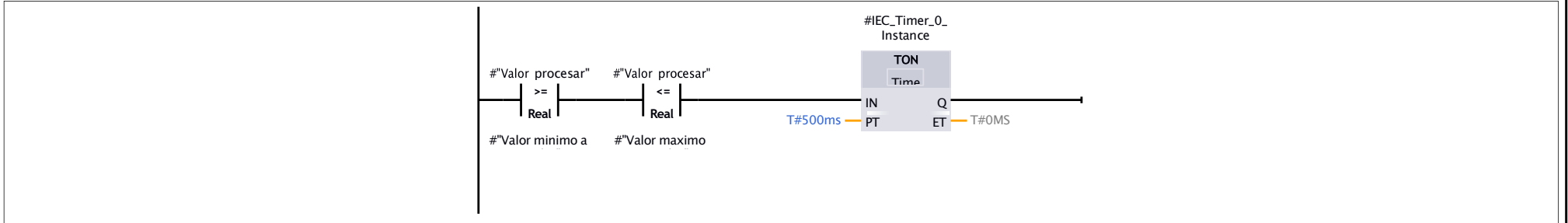
Network 3:



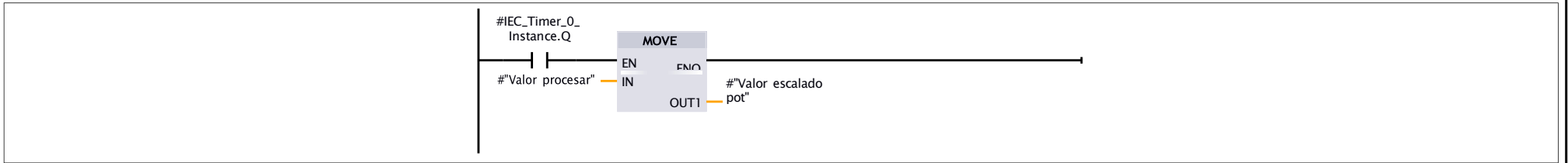
Network 4:



Network 5:



Network 6:



Program blocks

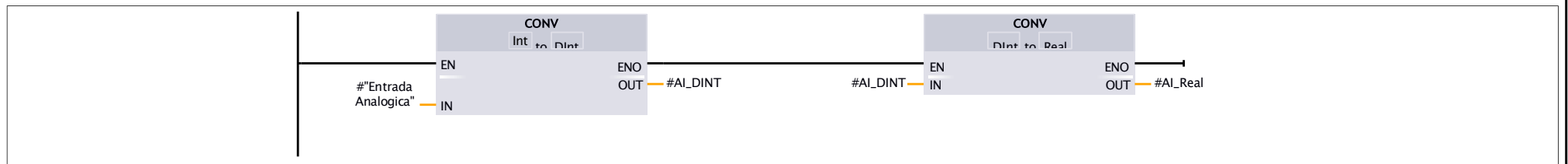
Escalar Entradas Analogicas [FB2]

Escalar Entradas Analogicas Properties

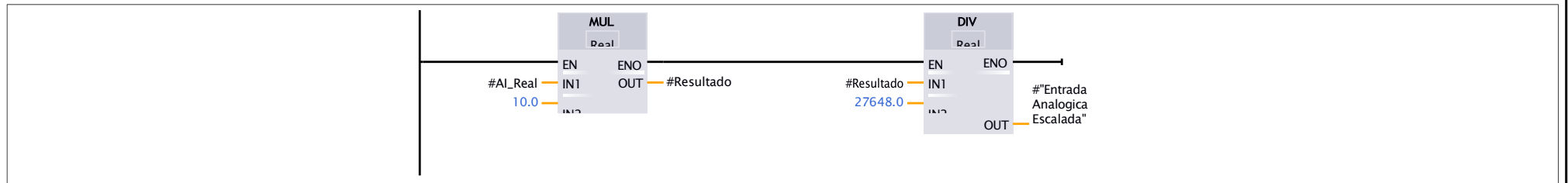
General							
Name	Escalar Entradas Analogicas	Number	2	Type	FB	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Default value	Accessible from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Input									
Entrada Analogica	Int	0.0	0	True	True	True	False		
▼ Output									
Entrada Analogica Escalada	Real	2.0	0.0	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
Static_1	Bool	6.0	false	True	True	True	False		
▼ Temp									
Temp_1	Word	0.0							
Temp_2	Real	2.0							
Temp_3	Real	6.0							
AI_DINT	DInt	10.0							
AI_Real	Real	14.0							
Resultado	Real	18.0							
Constant									

Network 1:



Network 2:



Program blocks

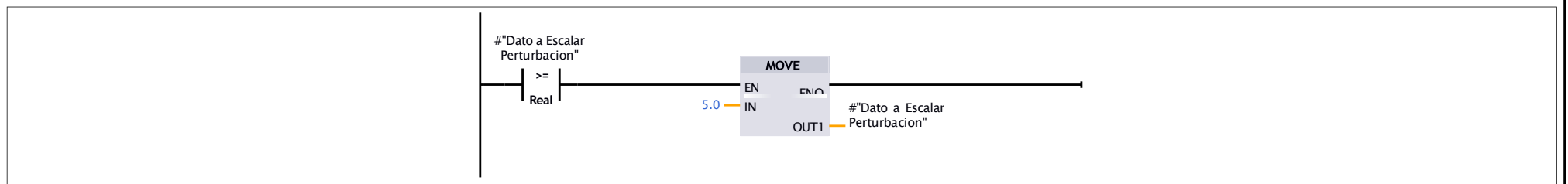
Escalar Salidas Analogicas [FB3]

Escalar Salidas Analogicas Properties

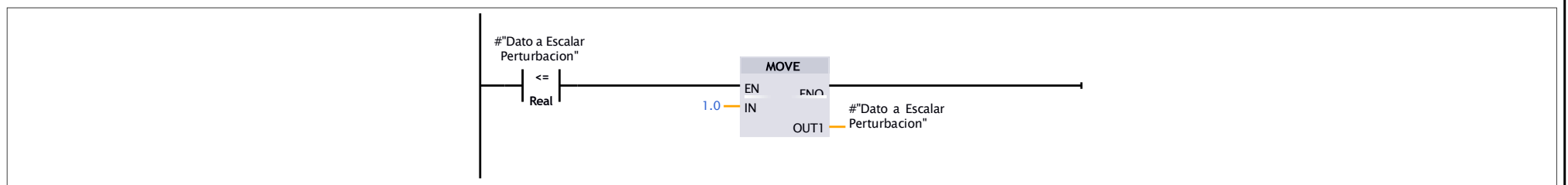
General							
Name	Escalar Salidas Analogicas	Number	3	Type	FB	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Default value	Accessible from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
Input									
▼ Output									
Salida perturbacion (AO)	Int	0.0	0	True	True	True	False		
Salida VVFD (AO)	Int	2.0	0	True	True	True	False		
▼ InOut									
Dato a Escalar Perturbacion	Real	4.0	0.0	True	True	True	False		
Dato a Escalar VFD	Real	8.0	0.0	True	True	True	False		
▼ Static									
Falso	Bool	12.0	false	True	True	True	False		
Falso_1	Bool	12.1	false	True	True	True	False		
▼ Temp									
Error_Perturbacion	Word	0.0							
Error_VFD	Word	2.0							
Constant									

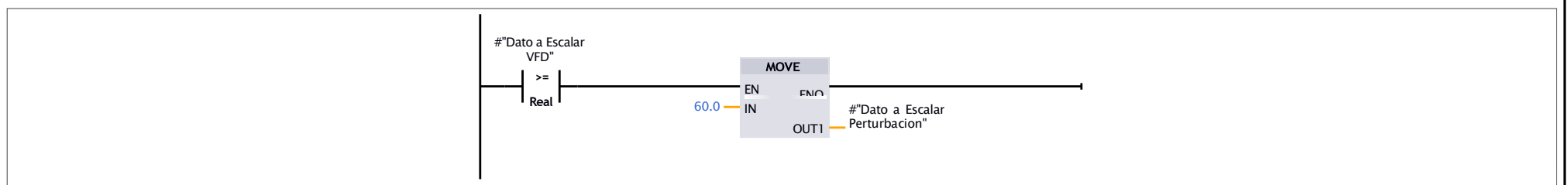
Network 1:



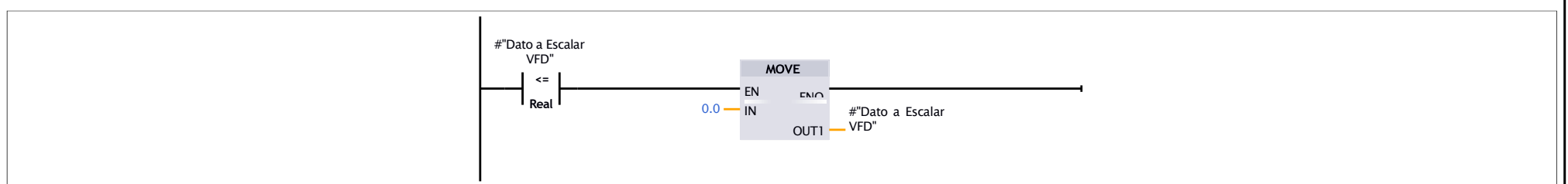
Network 2:



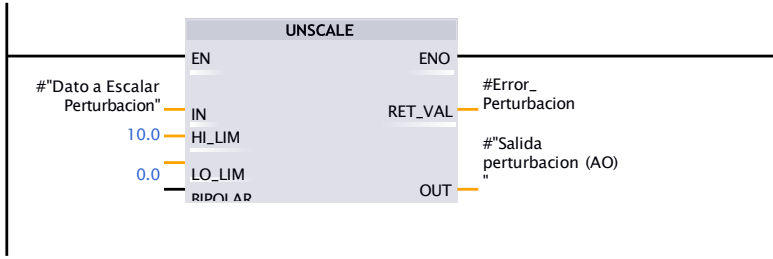
Network 3:



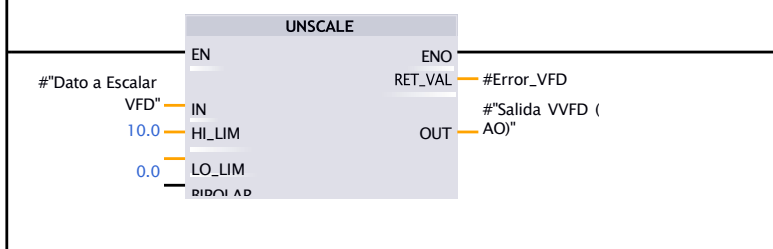
Network 4:



Network 5: Escalar la salida analogica de perturbacion



Network 6: Escalar la salida analogica de VFD

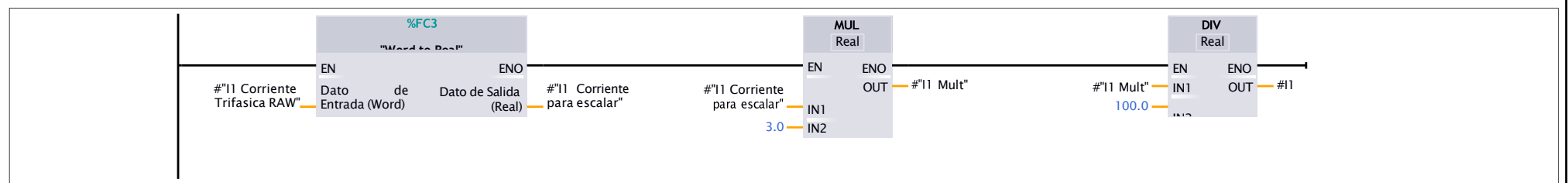


Program blocks

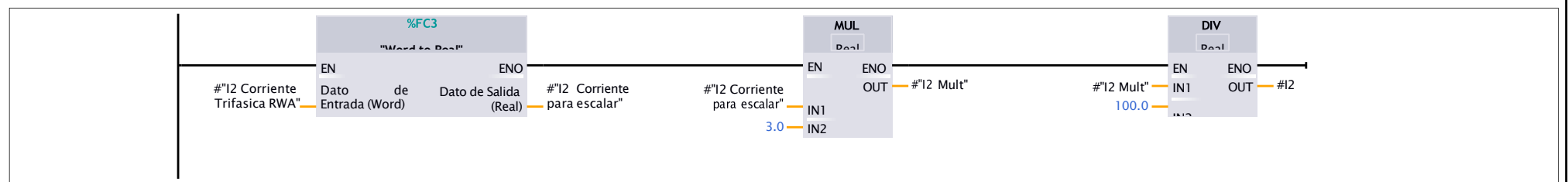
Salidas SIMOCODE [FC5]

Salidas SIMOCODE Properties							
General							
Name	Salidas SIMOCODE	Number	5	Type	FC	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					
Name	Data type	Offset	Default value	Comment			
▼ Input							
I1 Corriente Trifasica RAW	Word						
I2 Corriente Trifasica RWA	Word						
I3 Corriente Trifasica RAW	Word						
Desequilibrio de fase RAW	Word						
▼ Output							
I1	Real						
I2	Real						
I3	Real						
Desequilibrio de fase	Real						
InOut							
▼ Temp							
I1 Corriente para escalar	Real	0.0					
I2 Corriente para escalar	Real	4.0					
I3 Corriente para escalar	Real	8.0					
I1 Mult	Real	12.0					
I2 Mult	Real	16.0					
I3 Mult	Real	20.0					
Constant							
▼ Return							
Salidas SIMOCODE	Void						

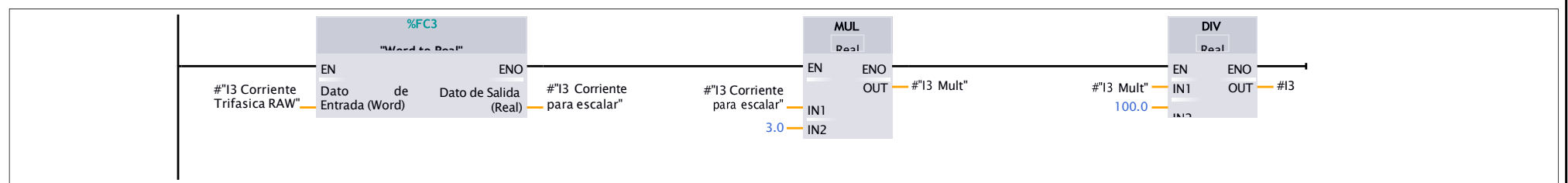
Network 1:



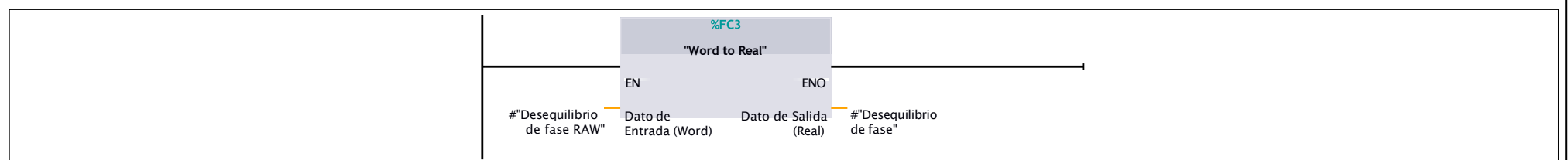
Network 2:



Network 3:



Network 4:



Program blocks

Control Voltaje de Campo [FC7]

Control Voltaje de Campo Properties

General

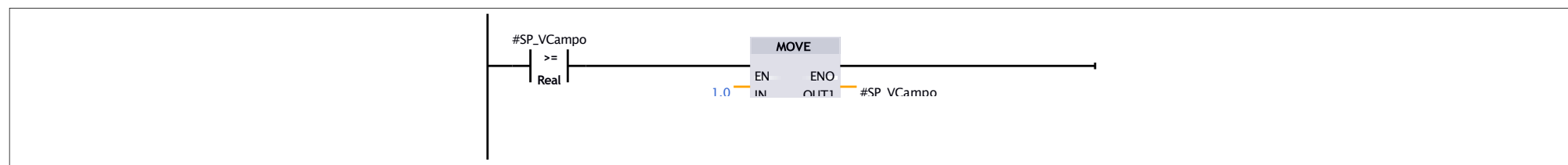
Name	Control Voltaje de Campo	Number	7	Type	FC	Language	LAD
Numbering	Automatic						

Information

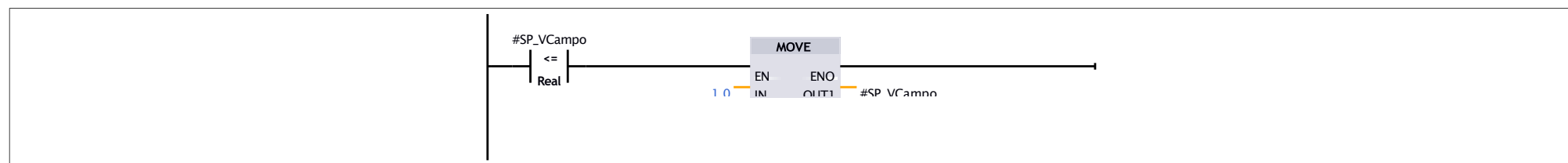
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Default value	Comment
▼ Input				
V_Campo_Medido	Real			
▼ Output				
Subir_Voltaje	Bool			
Bajar_Voltaje	Bool			
▼ InOut				
SP_VCampo	Real			
▼ Temp				
LS_V_CAM	Real	0.0		
LI_V_CAM	Real	4.0		
HS_V_CAM	Real	8.0		
HR_V_CAM	Real	12.0		
Desactivar_Subir	Real	16.0		
Desactivar_Bajar	Real	20.0		
Constant				
▼ Return				
Control Voltaje de Campo	Void			

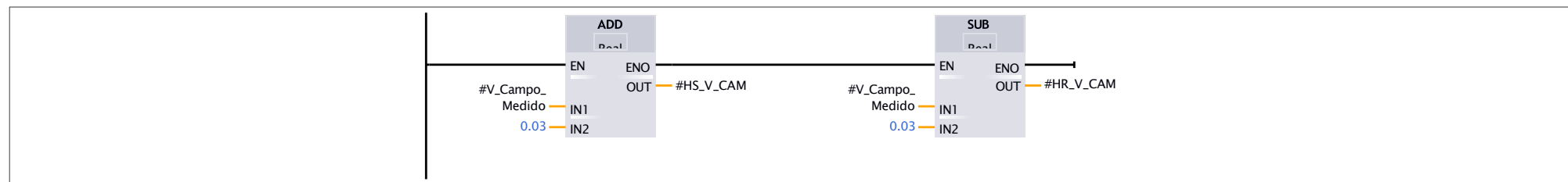
Network 1:



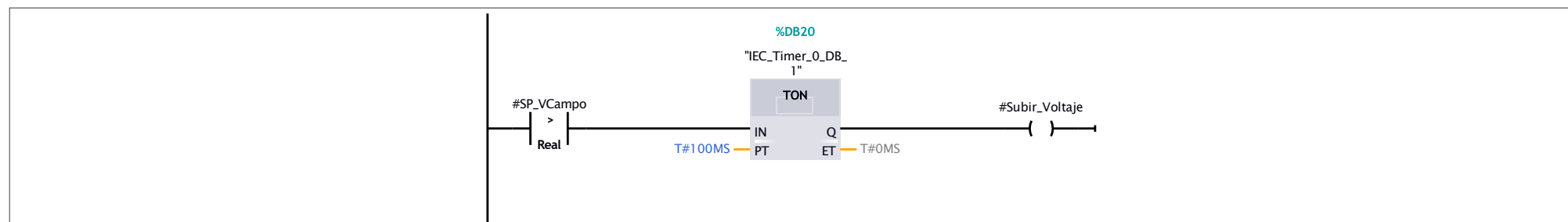
Network 2:



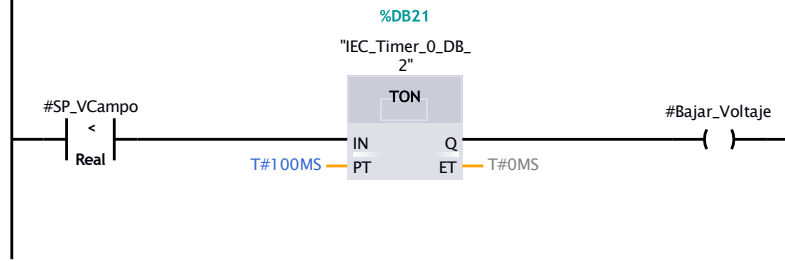
Network 3:



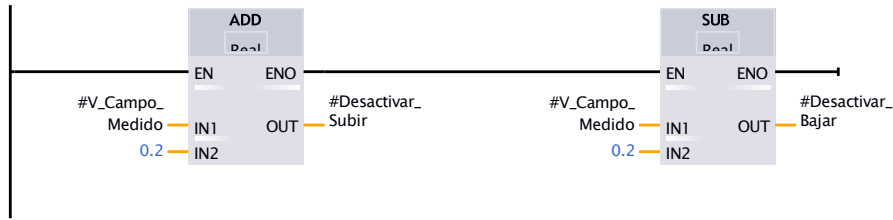
Network 4:



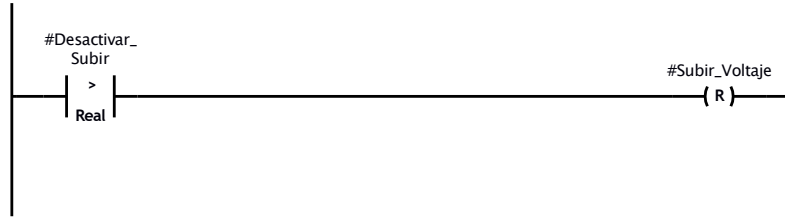
Network 5:



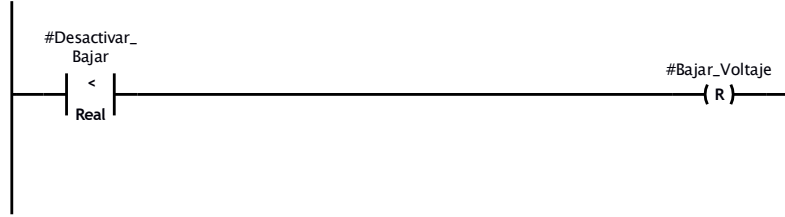
Network 6: APROXIMACION



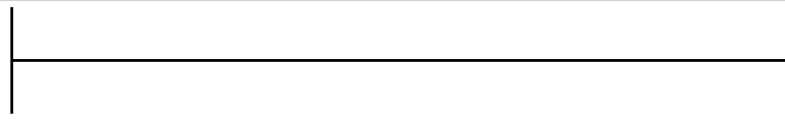
Network 7:



Network 8:



Network 9:



Program blocks

Escalar Encoder Incremental [FB4]

Escalar Encoder Incremental Properties

General

Name	Escalar Encoder Incremental	Number	4	Type	FB	Language	LAD
------	-----------------------------	--------	---	------	----	----------	-----

Numbering	Automatic
-----------	-----------

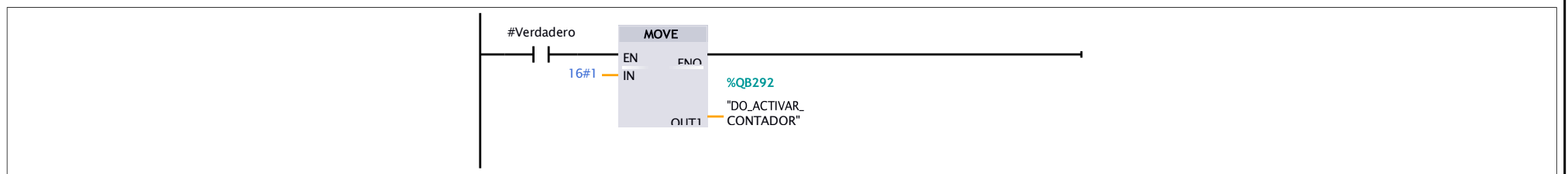
Information

Title		Author		Comment		Family	
-------	--	--------	--	---------	--	--------	--

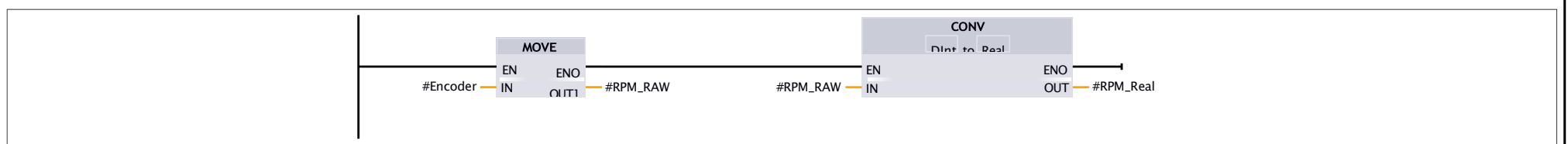
Version	0.1	User-defined ID	
---------	-----	-----------------	--

Name	Data type	Offset	Default value	Accessible from HMI/OPC UA/Web API	Writable from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
Encoder	DWord	0.0	16#0	True	True	True	False		
▼ Output									
Frecuencia	Real	4.0	0.0	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
Falso	Bool	8.0	false	True	True	True	False		
Verdadero	Bool	8.1	true	True	True	True	False		
▼ Temp									
RPM_RAW	Dint	0.0							
RPM_Real	Real	4.0							
RPM	Real	8.0							
Constant									

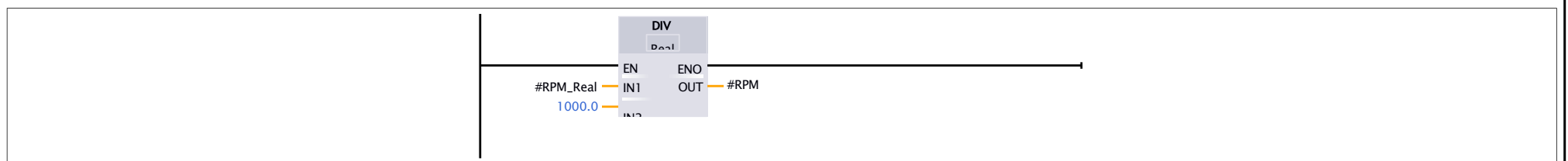
Network 1:



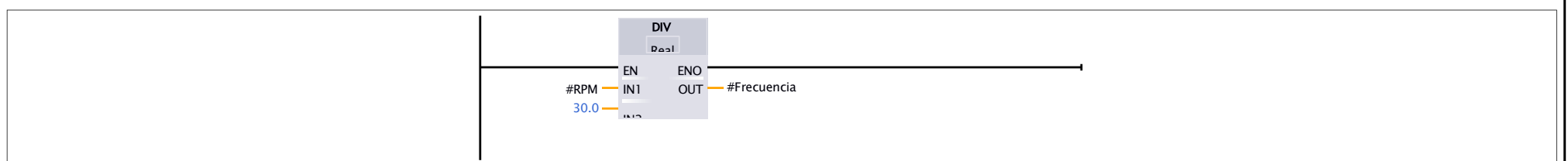
Network 2:



Network 3:



Network 4:



Program blocks

Sensado [FC4]

Sensado Properties

General

Name	Sensado	Number	4	Type	FC	Language	LAD
------	---------	--------	---	------	----	----------	-----

Numbering	Automatic
-----------	-----------

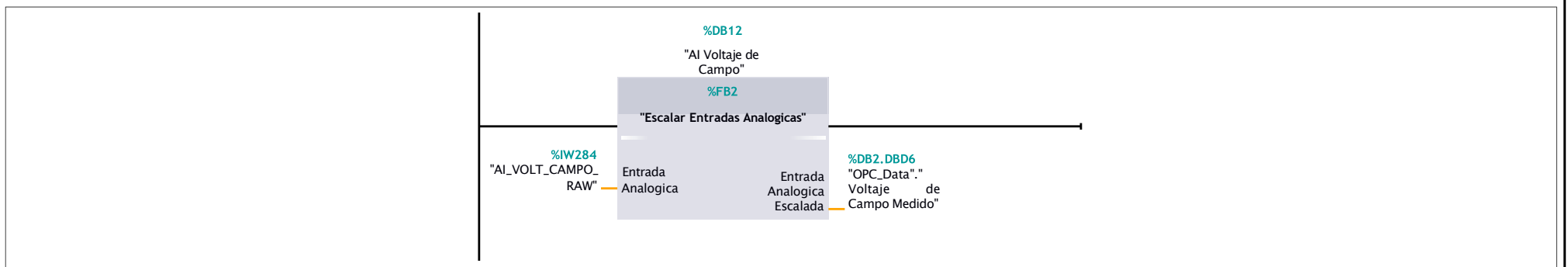
Information

Title		Author		Comment		Family	
-------	--	--------	--	---------	--	--------	--

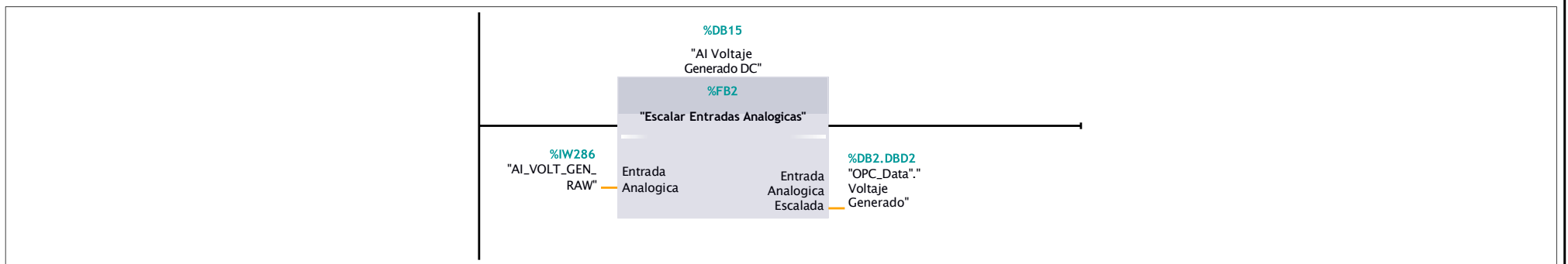
Version	0.1	User-defined ID	
---------	-----	-----------------	--

Name	Data type	Offset	Default value	Comment
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Sensado	Void			

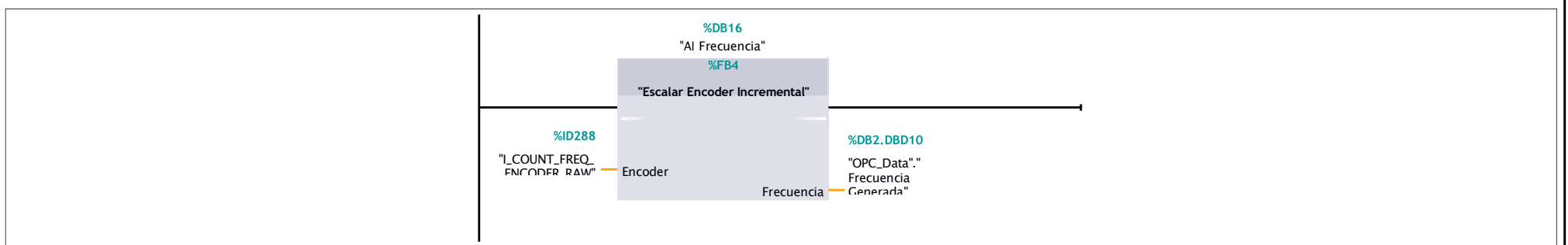
Network 1: Medición del Voltaje de Campo (V)



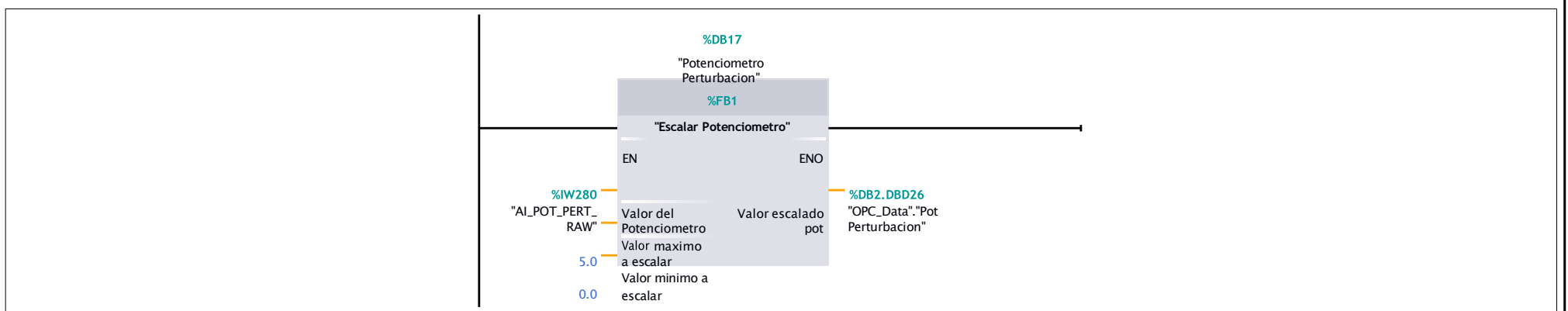
Network 2: Medición del Voltaje Generado DC (V)



Network 3: Medición de Frecuencia (Hz)

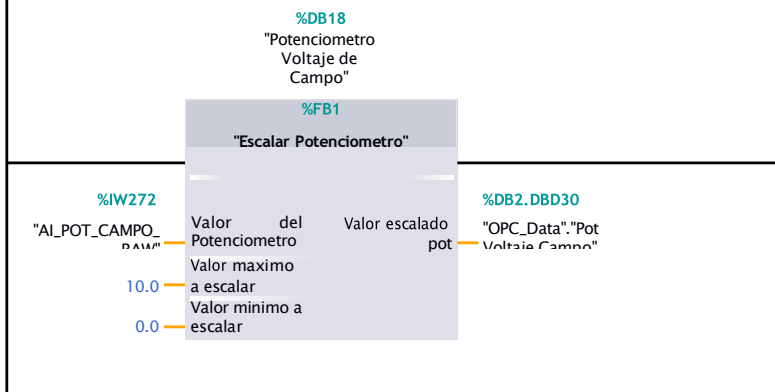


Network 4: Modo Manual Potenciómetro de Perturbación

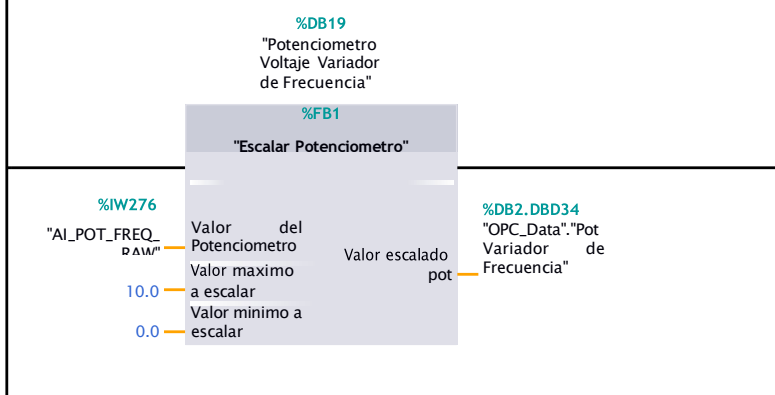


Network 5: Modo Manual Potenciómetro de Voltaje de Campo

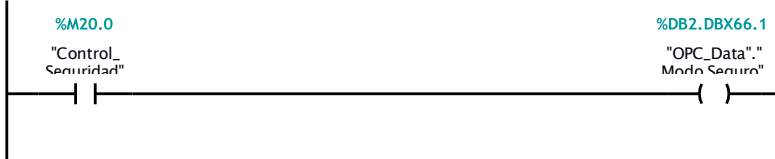
Totally Integrated Automation Portal



Network 6:



Network 7:



Program blocks

AI Voltaje de Campo [DB12]

AI Voltaje de Campo Properties

General

Name	AI Voltaje de Campo	Number	12	Type	DB	Language	DB
-------------	---------------------	---------------	----	-------------	----	-----------------	----

Numbering Automatic

Information

Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Input										
Entrada Analogica	Int	0.0	0	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Entrada Analogica Escalada	Real	2.0	0.0	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
Static_1	Bool	6.0	false	True	True	True	True	False		

Program blocks

AI Voltaje Generado DC [DB15]

AI Voltaje Generado DC Properties

General

Name	AI Voltaje Generado DC	Number	15	Type	DB	Language	DB
-------------	------------------------	---------------	----	-------------	----	-----------------	----

Numbering Automatic

Information

Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi- ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ- able from HMI/ OPC UA/ Web API	Visible in HMI engi- neering	Setpoint	Supervi- sion	Comment
▼ Input										
Entrada Analogica	Int	0.0	0	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Entrada Analogica Escalada	Real	2.0	0.0	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
Static_1	Bool	6.0	false	True	True	True	True	False		

Program blocks

AI Frecuencia [DB16]

AI Frecuencia Properties

General

Name	AI Frecuencia	Number	16	Type	DB	Language	DB
-------------	---------------	---------------	----	-------------	----	-----------------	----

Numbering Automatic

Information

Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/ Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Input										
Encoder	DWord	0.0	16#0	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Frecuencia	Real	4.0	0.0	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
Falso	Bool	8.0	false	True	True	True	True	False		
Verdadero	Bool	8.1	true	True	True	True	True	False		

Program blocks

Potenciometro Perturbacion [DB17]

Potenciometro Perturbacion Properties

General

Name	Potenciometro Perturbacion	Number	17	Type	DB	Language	DB
-------------	----------------------------	---------------	----	-------------	----	-----------------	----

Numbering	Automatic
------------------	-----------

Information

Title		Author		Comment		Family	
--------------	--	---------------	--	----------------	--	---------------	--

Version	0.1	User-defined ID	
----------------	-----	------------------------	--

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/ Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Input										
Valor del Potenciometro	Int	0.0	0	True	True	True	True	False		
Valor maximo a escalar	Real	2.0	0.0	True	True	True	True	False		
Valor minimo a escalar	Real	6.0	0.0	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Valor escalado pot	Real	10.0	0.0	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
▼ IEC_Timer_0_Instance	TON	14.0		True	True	True	True	True		
▼ Input										
IN	Bool	14.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	16.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	20.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	22.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	26.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	28.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	32.0	T#0MS	True	True	True	True	False		

Program blocks

Potenciometro Voltaje de Campo [DB18]

Potenciometro Voltaje de Campo Properties

General							
Name	Potenciometro Voltaje de Campo	Number	18	Type	DB	Language	DB
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/ Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Input										
Valor del Potenciometro	Int	0.0	0	True	True	True	True	False		
Valor maximo a escalar	Real	2.0	0.0	True	True	True	True	False		
Valor minimo a escalar	Real	6.0	0.0	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Valor escalado pot	Real	10.0	0.0	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
▼ IEC_Timer_0_Instance	TON	14.0		True	True	True	True	True		
▼ Input										
IN	Bool	14.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	16.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	20.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	22.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	26.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	28.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	32.0	T#0MS	True	True	True	True	False		

Program blocks

Potenciometro Voltaje Variador de Frecuencia [DB19]

Potenciometro Voltaje Variador de Frecuencia Properties

General

Name	Potenciometro Voltaje Variador de Frecuencia	Number	19	Type	DB	Language	DB
Numbering	Automatic						

Information

Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Input										
Valor del Potenciometro	Int	0.0	0	True	True	True	True	False		
Valor maximo a escalar	Real	2.0	0.0	True	True	True	True	False		
Valor minimo a escalar	Real	6.0	0.0	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Valor escalado pot	Real	10.0	0.0	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
▼ IEC_Timer_0_Instance	TON	14.0		True	True	True	True	True		
▼ Input										
IN	Bool	14.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	16.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	20.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	22.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	26.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	28.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	32.0	T#0MS	True	True	True	True	False		

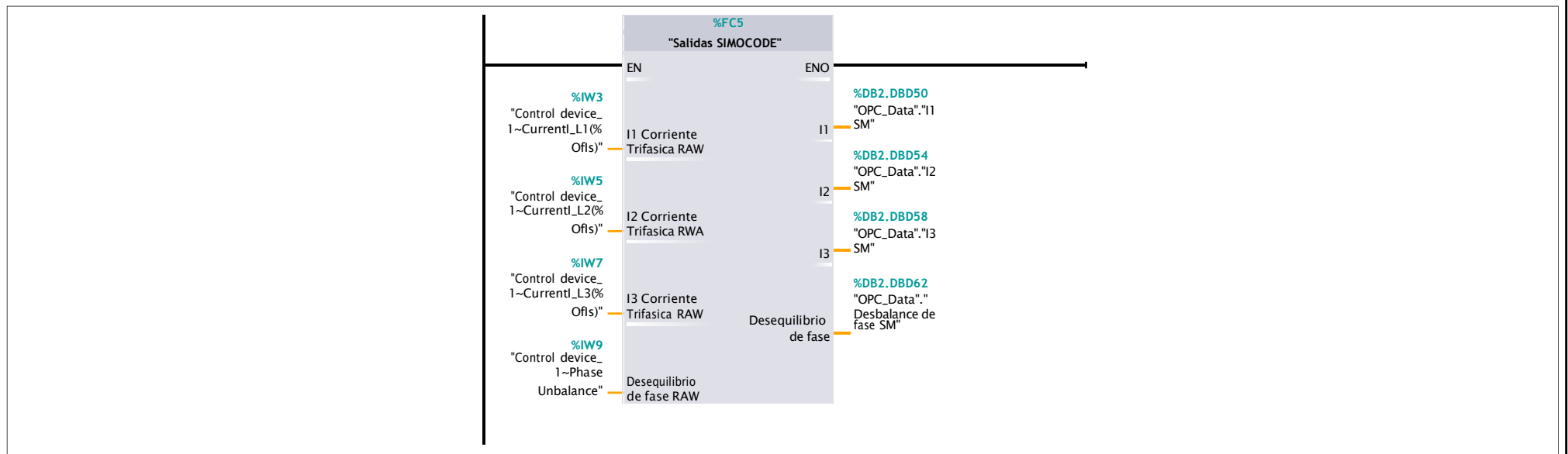
Program blocks

SIMOCODE PRO V [FC6]

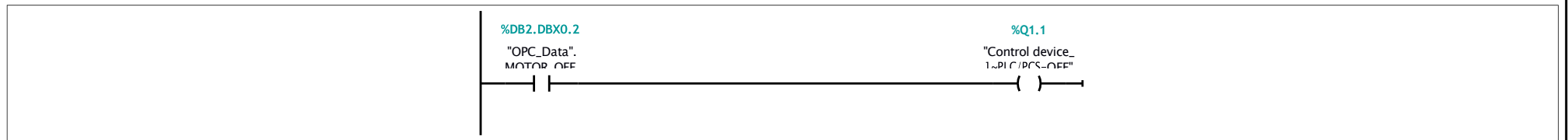
SIMOCODE PRO V Properties

General							
Name	SIMOCODE PRO V	Number	6	Type	FC	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					
Name	Data type	Offset	Default value	Comment			
Input							
Output							
InOut							
Temp							
Constant							
▼ Return							
SIMOCODE PRO V	Void						

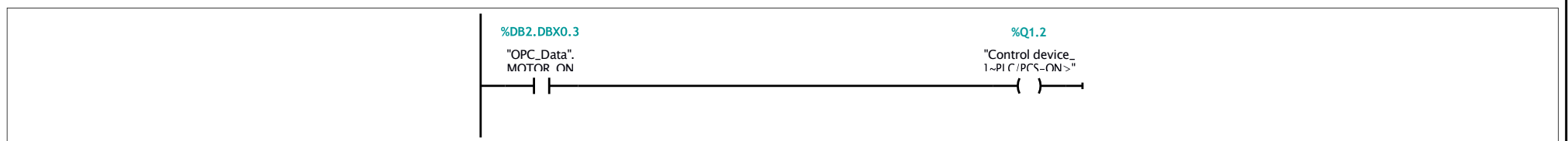
Network 1:



Network 2: Motor OFF



Network 3: Motor ON



Program blocks

Setpoints [FB5]

Setpoints Properties

General

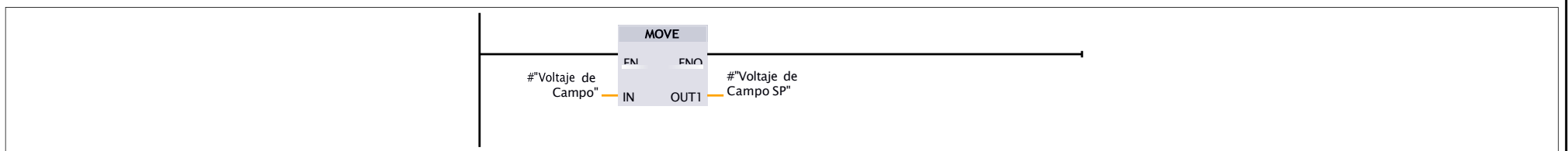
Name	Setpoints	Number	5	Type	FB	Language	LAD
Numbering	Automatic						

Information

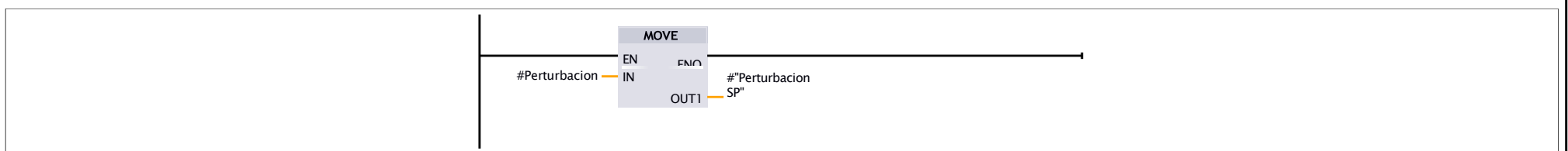
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Default value	Accessible from HMI/OPC UA/Web API	Writable from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
Voltaje de Campo	Real	0.0	0.0	True	True	True	False		
Voltaje Variador de Frecuencia	Real	4.0	0.0	True	True	True	False		
Perturbacion	Real	8.0	0.0	True	True	True	False		
▼ Output									
Voltaje de Campo SP	Real	12.0	0.0	True	True	True	False		
Voltaje Variador de Frecuencia SP	Real	16.0	0.0	True	True	True	False		
Perturbacion SP	Real	20.0	0.0	True	True	True	False		
InOut									
Static									
Temp									
Constant									

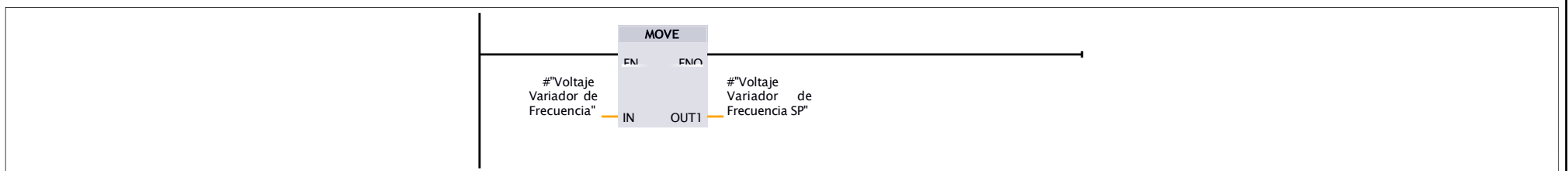
Network 1:



Network 2:



Network 3:



Totally Integrated
Automation Portal

Program blocks

Modo Manual AO [DB3]

Modo Manual AO Properties

General

Name	Modo Manual AO	Number	3	Type	DB	Language	DB
-------------	----------------	---------------	---	-------------	----	-----------------	----

Numbering	Automatic
------------------	-----------

Information

Title		Author		Comment		Family	
--------------	--	---------------	--	----------------	--	---------------	--

Version	0.1	User-defined ID	
----------------	-----	------------------------	--

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
Input										
▼ Output										
Salida perturbacion (AO)	Int	0.0	0	True	True	True	True	False		
Salida VVFD (AO)	Int	2.0	0	True	True	True	True	False		
▼ InOut										
Dato a Escalar Perturbacion	Real	4.0	0.0	True	True	True	True	False		
Dato a Escalar VFD	Real	8.0	0.0	True	True	True	True	False		
▼ Static										
Falso	Bool	12.0	false	True	True	True	True	False		
Falso_1	Bool	12.1	false	True	True	True	True	False		

Program blocks

Modo Auto AO [DB4]

Modo Auto AO Properties

General

Name	Modo Auto AO	Number	4	Type	DB	Language	DB
-------------	--------------	---------------	---	-------------	----	-----------------	----

Numbering Automatic

Information

Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
Input										
▼ Output										
Salida perturbacion (AO)	Int	0.0	0	True	True	True	True	False		
Salida VVFD (AO)	Int	2.0	0	True	True	True	True	False		
▼ InOut										
Dato a Escalar Perturbacion	Real	4.0	0.0	True	True	True	True	False		
Dato a Escalar VFD	Real	8.0	0.0	True	True	True	True	False		
▼ Static										
Falso	Bool	12.0	false	True	True	True	True	False		
Falso_1	Bool	12.1	false	True	True	True	True	False		

Program blocks

Seguridad [FC8]

Seguridad Properties

General

Name	Seguridad	Number	8	Type	FC	Language	LAD
------	-----------	--------	---	------	----	----------	-----

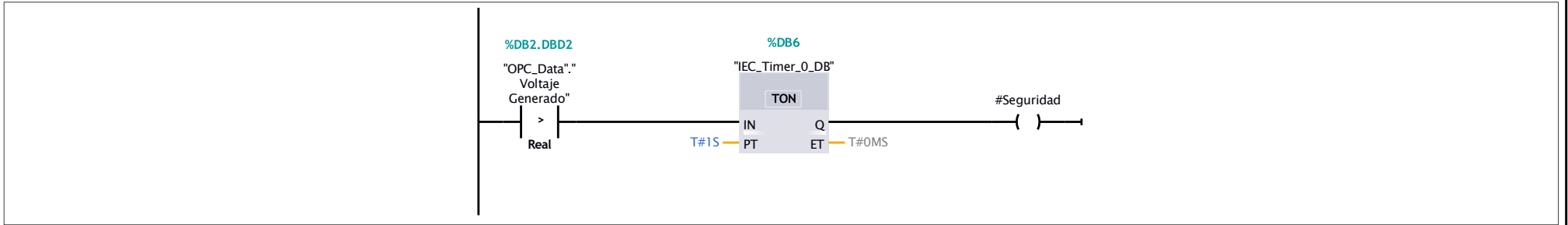
Numbering Automatic

Information

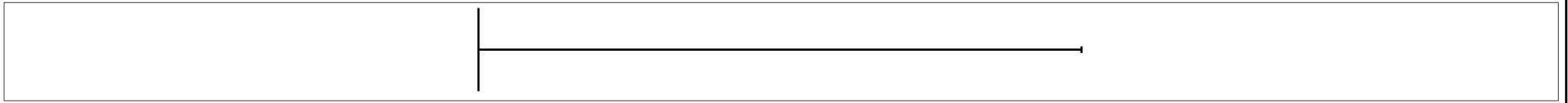
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Default value	Comment
Input				
▼ Output				
Seguridad	Bool			
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Ret_Val	Void			

Network 1:



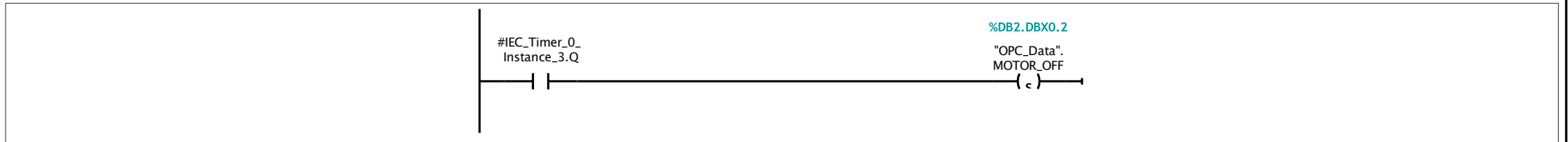
Network 2:



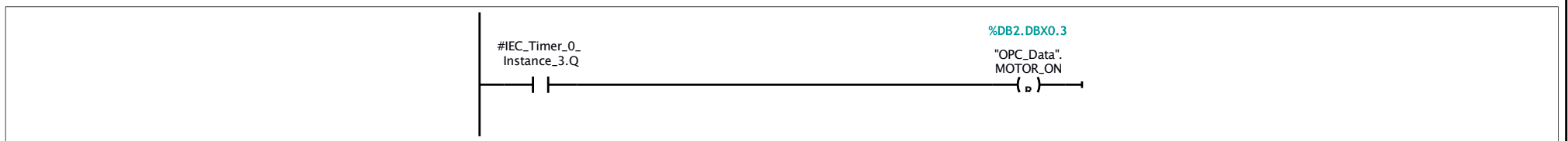
Totally Integrated Automation Portal

Name	Data type	Offset	Default value	Accessible from HMI/OPC UA/Web API	Writable from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
hola	Bool	0.0							
hola1	Bool	0.1							
Constant									

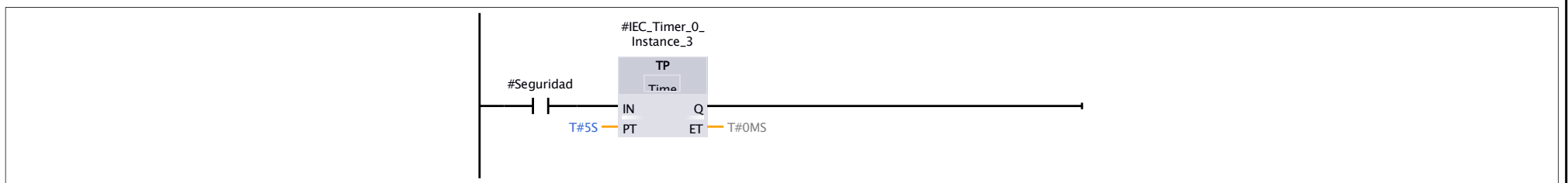
Network 1:



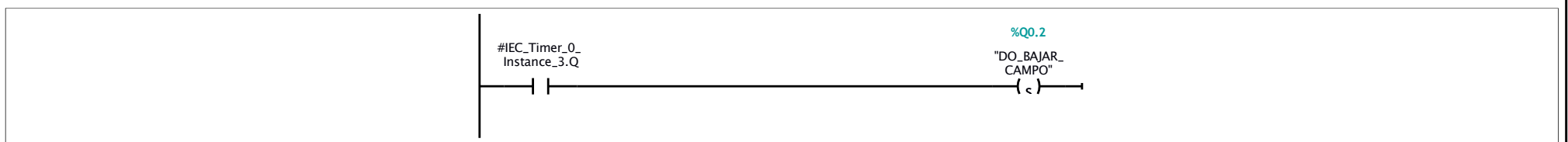
Network 2:



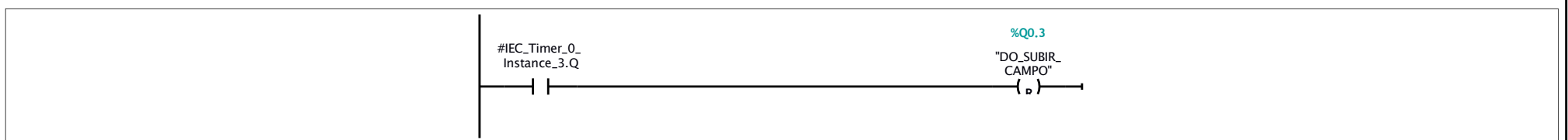
Network 3:



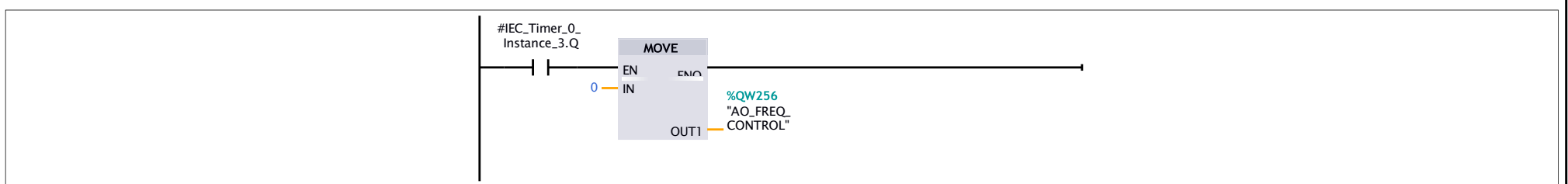
Network 4:



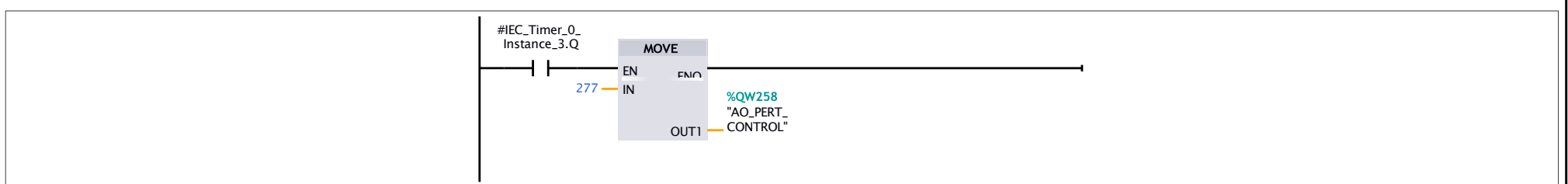
Network 5:



Network 6:

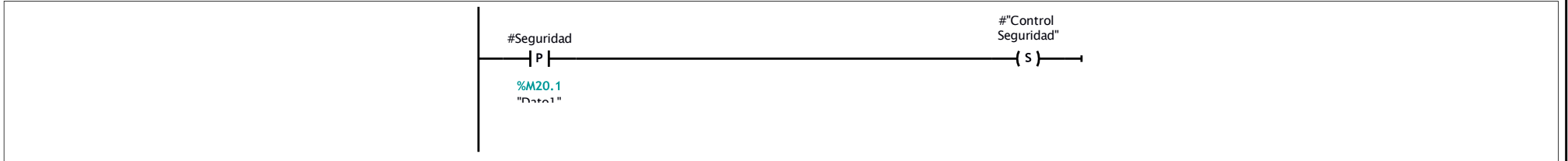


Network 7:

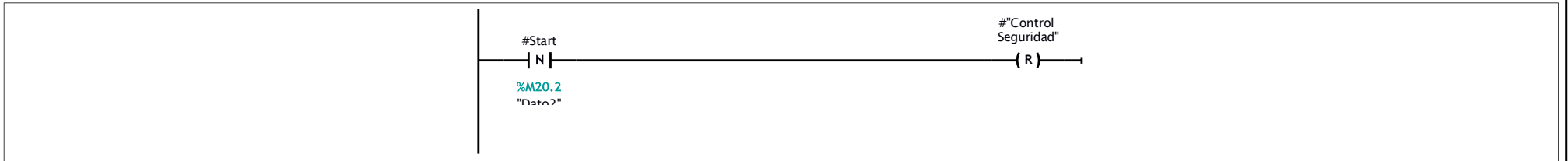


Network 8:

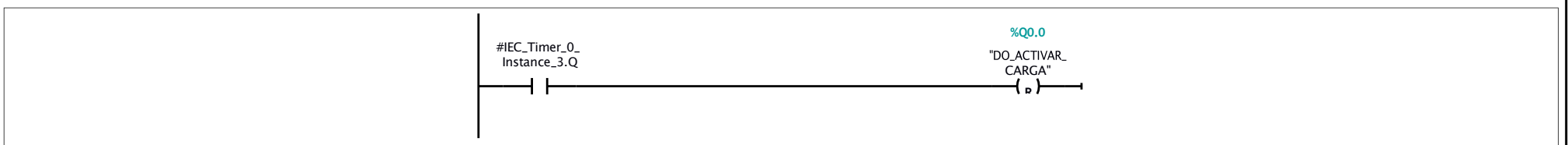
Totally Integrated
Automation Portal



Network 9:



Network 10:



Program blocks

Detener Stop [FB7]

Detener Stop Properties

General

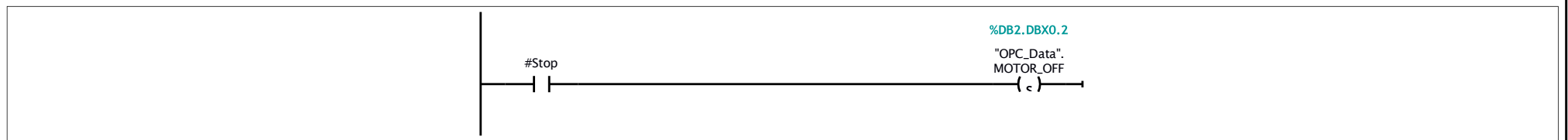
Name	Detener Stop	Number	7	Type	FB	Language	LAD
Numbering	Automatic						

Information

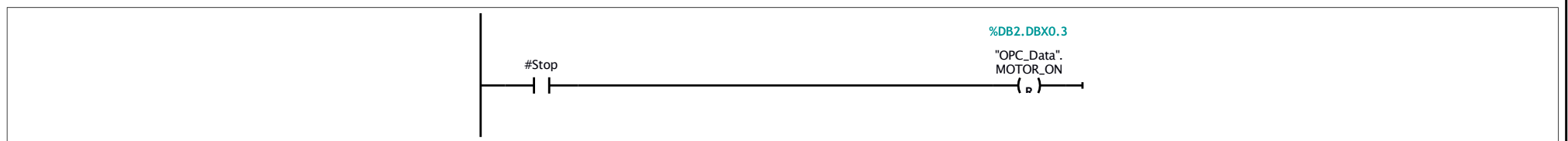
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Default value	Accessible from HMI/OPC UA/Web API	Writable from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
Stop	Bool	0.0	false	True	True	True	False		
Output									
InOut									
▼ Static									
▼ IEC_Timer_0_Instance_3	TP	2.0		True	True	True	True		
▼ Input									
IN	Bool	2.0	false	True	True	True	False		
PT	Time	4.0	T#0MS	True	True	True	False		
▼ Output									
Q	Bool	8.0	false	True	True	True	False		
ET	Time	10.0	T#0MS	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
STATE	Byte	14.0	16#0	True	True	True	False		
STIME	Time	16.0	T#0MS	True	True	True	False		
ATIME	Time	20.0	T#0MS	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

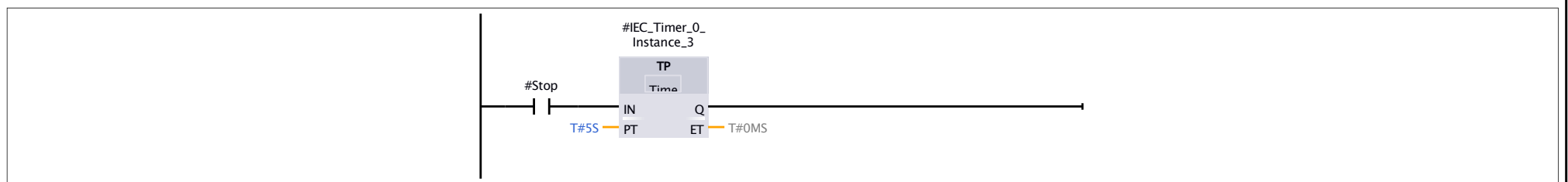
Network 1:



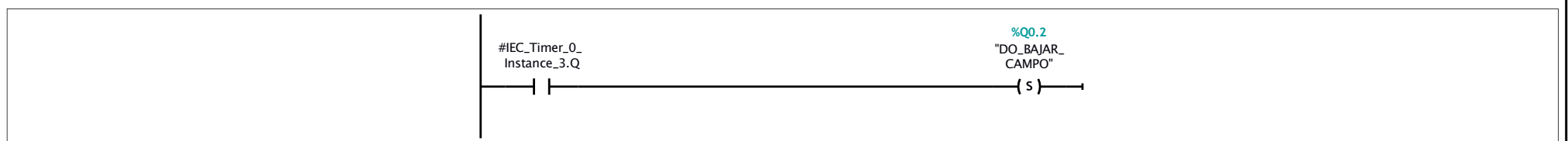
Network 2:



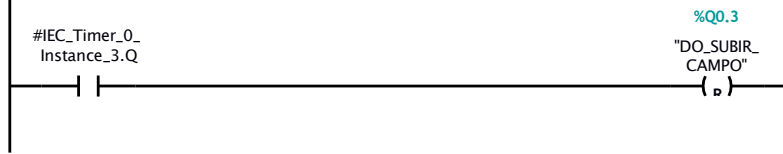
Network 3:



Network 4:



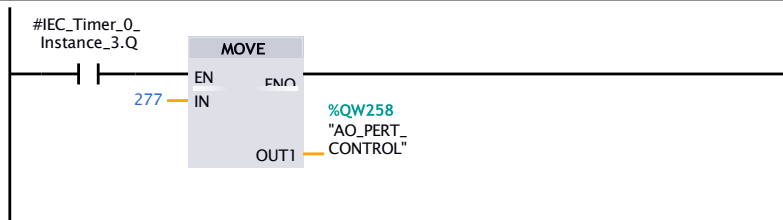
Network 5:



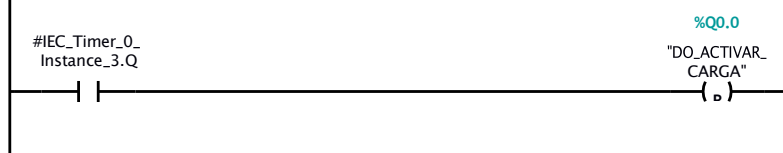
Network 6:



Network 7:



Network 8:



Program blocks

Detener Stop_DB [DB10]

Detener Stop_DB Properties

General

Name	Detener Stop_DB	Number	10	Type	DB	Language	DB
------	-----------------	--------	----	------	----	----------	----

Numbering

Numbering	Automatic
-----------	-----------

Information

Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/ Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Input										
Stop	Bool	0.0	false	True	True	True	True	False		
Output										
InOut										
▼ Static										
▼ IEC_Timer_0_Instance_3	TP	2.0		True	True	True	True	True		
▼ Input										
IN	Bool	2.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	4.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	8.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	10.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	14.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	16.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	20.0	T#0MS	True	True	True	True	False		

Program blocks

Detener Medida Seguridad_DB_1 [DB7]

Detener Medida Seguridad_DB_1 Properties

General							
Name	Detener Medida Seguridad_DB_1	Number	7	Type	DB	Language	DB
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA/Web API	Writable from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input										
Seguridad	Bool	0.0	True	True	True	True	True	False		
Start	Bool	0.1	false	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Control Seguridad	Bool	2.0	false	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
▼ IEC_Timer_0_Instance	TON	4.0		True	True	True	True	True		
▼ Input										
IN	Bool	4.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	6.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	10.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	12.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	16.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	18.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	22.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ IEC_Timer_0_Instance_1	TOF	26.0		True	True	True	True	True		
▼ Input										
IN	Bool	26.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	28.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	32.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	34.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	38.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	40.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	44.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ IEC_Timer_0_Instance_2	TON	48.0		True	True	True	True	True		
▼ Input										
IN	Bool	48.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	50.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	54.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	56.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	60.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	62.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	66.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ IEC_Timer_0_Instance_3	TP	70.0		True	True	True	True	True		
▼ Input										
IN	Bool	70.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	72.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	76.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	78.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	82.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	84.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	88.0	T#0MS	True	True	True	True	False		

Program blocks / System blocks / Program resources

UNSCALE [FC106]

UNSCALE Properties							
General							
Name	UNSCALE	Number	106	Type	FC	Language	STL
Numbering	Automatic						
Information							
Title	UNSCALING VALUES	Author	SEA	Comment		Family	CONVERT
Version	2.0	User-defined ID	UNSCALE				

Name	Data type	Offset	Default value	Comment
▼ Input				
IN	Real			input value to be unscaled
HI_LIM	Real			upper limit in engineering units
LO_LIM	Real			lower limit in engineering units
BIPOLAR	Bool			1=bipolar; 0=unipolar
▼ Output				
OUT	Int			result of the unscale conversion
InOut				
▼ Return				
Ret_Val	Word			

Program blocks / System blocks / Program resources

IEC_Timer_0_DB_1 [DB20]

IEC_Timer_0_DB_1 Properties							
General							
Name	IEC_Timer_0_DB_1	Number	20	Type	DB	Language	DB
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author	SIMATIC	Comment		Family	IEC_TC
Version	1.0	User-defined ID	TON				

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Input										
IN	Bool	0.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	2.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	6.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	8.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	12.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	14.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	18.0	T#0MS	True	True	True	True	False		

Program blocks / System blocks / Program resources

IEC_Timer_0_DB_2 [DB21]

IEC_Timer_0_DB_2 Properties							
General							
Name	IEC_Timer_0_DB_2	Number	21	Type	DB	Language	DB
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author	SIMATIC	Comment		Family	IEC_TC
Version	1.0	User-defined ID	TON				

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Input										
IN	Bool	0.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	2.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	6.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	8.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	12.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	14.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	18.0	T#0MS	True	True	True	True	False		

Program blocks / System blocks / Program resources

IEC_Timer_0_DB [DB6]

IEC_Timer_0_DB Properties

General

Name	IEC_Timer_0_DB	Number	6	Type	DB	Language	DB
------	----------------	--------	---	------	----	----------	----

Numbering	Automatic
-----------	-----------

Information

Title		Author	SIMATIC	Comment		Family	IEC_TC
Version	1.0	User-defined ID	TON				

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writ-able from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Setpoint	Supervi-sion	Comment
▼ Input										
IN	Bool	0.0	false	True	True	True	True	False		
PT	Time	2.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
▼ Output										
Q	Bool	6.0	false	True	True	True	True	False		
ET	Time	8.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
InOut										
▼ Static										
STATE	Byte	12.0	16#0	True	True	True	True	False		
STIME	Time	14.0	T#0MS	True	True	True	True	False		
ATIME	Time	18.0	T#0MS	True	True	True	True	False		

PLC tags / Default tag table [33]

PLC tags

PLC tags										
Name	Data type	Address	Retain	Accessi-ble from HMI/OPC UA/Web API	Writable from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engi-neering	Supervision			Comment
Control device_1~Status-Group-Fault	Bool	%I1.6		True	True	True				
Control device_1~Status-Group-Warning	Bool	%I1.7		True	True	True				
Control device_1~Reset1-input	Bool	%Q1.6		True	True	True				
Control device_1~Test1-input	Bool	%Q1.3		True	True	True				
Control device_1~Current_L1(%OfIs)	Word	%IW3		True	True	True				
Control device_1~Current_L2(%OfIs)	Word	%IW5		True	True	True				
Control device_1~Current_L3(%OfIs)	Word	%IW7		True	True	True				
Control device_1~PhaseUnbalance	Word	%IW9		True	True	True				
DI_MODO_MANUAL	Bool	%I0.0		True	True	True				
DI_MODO_AUTO	Bool	%I0.2		True	True	True				
I_COUNT_FREQ_ENCODER_RAW	DWord	%ID288		True	True	True				
AI_POT_CAMPO_RAW	Int	%IW272		True	True	True				
AI_POT_FREQ_RAW	Int	%IW276		True	True	True				
AI_POT_PERT_RAW	Int	%IW280		True	True	True				
AI_VOLT_CAMPO_RAW	Int	%IW284		True	True	True				
AI_VOLT_GEN_RAW	Int	%IW286		True	True	True				
DO_SUBIR_CAMPO	Bool	%Q0.3		True	True	True				
DO_BAJAR_CAMPO	Bool	%Q0.2		True	True	True				
DO_ACTIVAR_CARGA	Bool	%Q0.0		True	True	True				
AO_FREQ_CONTROL	Int	%QW256		True	True	True				
AO_PERT_CONTROL	Int	%QW258		True	True	True				
Control device_1~PLC/PCS-OFF	Bool	%Q1.1		True	True	True				
Control device_1~Status-OFF	Bool	%I1.1		True	True	True				
Control device_1~Status-ON>	Bool	%I1.2		True	True	True				
Control device_1~Event-PrewarningOverload(I>115%Is)	Bool	%I1.3		True	True	True				
Control device_1~Status-Remote-Mode	Bool	%I1.5		True	True	True				
Control device_1~PLC/PCS-ON>	Bool	%Q1.2		True	True	True				
Control device_1~EmergencyStart-input	Bool	%Q1.4		True	True	True				
DO_ACTIVAR_CONTADOR	Byte	%QB292		True	True	True				
Seguridad1	Bool	%M7.0		True	True	True				
Control_Seguridad	Bool	%M20.0		True	True	True				
Dato1	Bool	%M20.1		True	True	True				
Dato2	Bool	%M20.2		True	True	True				

PLC tags / Default tag table [33]

User constants

User constants			
Name	Data type	Value	Comment

Totally Integrated Automation Portal		Control device_1 [SIMOCODE pro V PB]			
Control device_1					
Identification\Device					
Article number	3UF7 010-1A*00-0	Short code	SIMOCODE proV PB	Vendor	SIEMENS AG
Device family	Load feeder	Device subfamily	Motor management system	Hardware version	
Firmware version					
Identification\Marking					
Plant identifier		Location designation		Installation date	2025-11-19 00:00:00.000
Description					
PROFIBUS parameters\					
Station address	4	Startup parameter block	True	Basic type	1
PROFIBUS parameters\Diagnostics					
Diagnostics triggered by device faults	True	Diagnostics triggered by trips	True	Diagnostics triggered by warnings	False
Diagnostics triggered by events	False				
Device configuration					
Basic unit	SIMOCODE pro V (PB)	Version	V2.0	Thermistor	False
Name	Control device_1	Author	gonza	Comment	
Device configuration\Modules					
Current measurement	0.3 - 3A	Digital module 1	-	Operator panel	False
Current/voltage measurement	True	Temperature module 1	False	Analog module 1	False
Ground-fault module	-	Application (control function)	Direct starter		
Motor protection\Motor protection\Overload protection					
Set current Is1	3.00A	Transformation ratio - active	False	Class	10
Response to trip level	warn	Cooling down period	60.0s	Pause time	0.0s
Type of load	tri-phase	Response to prewarning level (I>115%Is)	warn	Delay prewarning (I>115%Is)	5.0s
Reset	Manual				
Motor protection\Motor protection\Unbalance protection					
Level	40%	Response	warn	Delay	5.0s
Motor protection\Motor protection\Stalled rotor					
Level	0% of Is	Response	deactivated	Delay	5.0s
Motor control\Control station\Control station					
Remote	None-None-None-None				
Motor control\Control station\Control station\Mode selector					
S1	Fixed level - '1'	S2	Fixed level - '1'		
Motor control\Control station\Control station\Local control [LC]					
OFF (Local control)	Not connected	ON (Local control)	Not connected		
Motor control\Control station\Control station\PLC/DCS [DP]					
OFF (PLC/DCS)	Cyclic receive - Bit 0.1	ON (PLC/DCS)	Cyclic receive - Bit 0.2		
Motor control\Control station\Control station\PC [DPV1]					
OFF (PC)	Not connected	ON (PC)	Not connected		
Motor control\Control station\Control station\Operator panel [OP]					
OFF (Operator panel)	Not connected	ON (Operator panel)	Not connected		
Motor control\Control function\Operating mode					
Non-maintained command mode	False	Type of consumer load	Resistive load		
Motor control\Control function\Control commands					
OFF	OFF (Enabled control command)	ON	ON> (Enabled control command)		
Motor control\Control function\Auxiliary control inputs					
Feedback ON	Status - current flowing				
Motor control\Control function\Timings					
Feedback (FB) time	25.5s	Execution time	6553.5s		
Monitoring functions\Current limits\I > (higher limit)					
Trip level	324% of Is	Response to trip level	trip	Trip delay	0.5s
Warning level	108% of Is	Response to warning level	warn	Warning delay	0.5s
Monitoring functions\Current limits\I < (lower limit)					
Trip level	0% of Is	Response to trip level	deactivated	Trip delay	0.5s
Warning level	0% of Is	Response to warning level	deactivated	Warning delay	0.5s
Monitoring functions\Current limits\					
Hysteresis for current limits	5% of threshold value				
Monitoring functions\Voltage\U < (lower limit)					
Trip level	0V	Trip level active status	always except with TPF (on+)	Response to trip level	deactivated

Totally Integrated Automation Portal									
Trip delay	0.5s		Warning level	0V		Warning level active status	always except with TPF (on+)		
Response to warning level	deactivated		Warning delay	0.5s					
Monitoring functions\Voltage\									
Hysteresis for voltage, Cos-Phi, power	5% of threshold value								
Monitoring functions\Cos-Phi\Cos-Phi < (lower limit)									
Trip level	0%		Response to trip level	deactivated		Trip delay	0.5s		
Warning level	50%		Response to warning level	warn		Warning delay	0.5s		
Monitoring functions\Active power\P > (upper limit)									
Trip level	0.000kW		Response to trip level	deactivated		Trip delay	0.5s		
Warning level	0.000kW		Response to warning level	deactivated		Warning delay	0.5s		
Monitoring functions\Active power\P < (lower limit)									
Trip level	0.000kW		Response to trip level	deactivated		Trip delay	0.5s		
Warning level	0.000kW		Response to warning level	deactivated		Warning delay	0.5s		
Monitoring functions\Operating hours monitoring\Motor operating hours monitoring									
Level	0h		Response	deactivated					
Monitoring functions\Operating hours monitoring\Stop time									
Level	0h		Response	deactivated					
Monitoring functions\Operating hours monitoring\Number of starts monitoring motor									
Permissible starts	1		Time range for starts	0hh : 0mm : 0ss		Response to overshoot	deactivated		
Response to prewarning	deactivated		Interlocking time	0hh : 0mm : 0ss					
Monitoring functions\Ground fault\Internal ground fault\Trip level									
Response	warn		Delay	0.5s					
Inputs\Basic unit - inputs									
Debouncing times	16ms								
Outputs\Basic unit									
BU - output 1	Contactor control - 1 QE1			BU - output 2	Display - QLA (OFF)		BU - output 3	Display - QLE> (ON>)	
Outputs\Cyclic send data\Byte 0									
Bit 0.0	Not connected			Bit 0.1	Status - OFF		Bit 0.2	Status - ON>	
Bit 0.3	Event - prewarning overload (> 115%Is)			Bit 0.4	Not connected		Bit 0.5	Status - remote mode	
Bit 0.6	Status - group fault			Bit 0.7	Status - group warning				
Outputs\Cyclic send data\Byte 1									
Bit 1.0	Not connected			Bit 1.1	Not connected		Bit 1.2	Not connected	
Bit 1.3	Not connected			Bit 1.4	Not connected		Bit 1.5	Not connected	
Bit 1.6	Not connected			Bit 1.7	Not connected				
Outputs\Cyclic send data\Analog values									
Byte 2/3 (analog value)	Current I_L1 (% of Is)			Byte 4/5	Current I_L2 (% of Is)		Byte 6/7	Current I_L3 (% of Is)	
Byte 8/9	Phase unbalance								
Outputs\Acylic send data\Byte 0									
Bit 0.0	Not connected			Bit 0.1	Not connected		Bit 0.2	Not connected	
Bit 0.3	Not connected			Bit 0.4	Not connected		Bit 0.5	Not connected	
Bit 0.6	Not connected			Bit 0.7	Not connected				
Outputs\Acylic send data\Byte 1									
Bit 1.0	Not connected			Bit 1.1	Not connected		Bit 1.2	Not connected	
Bit 1.3	Not connected			Bit 1.4	Not connected		Bit 1.5	Not connected	
Bit 1.6	Not connected			Bit 1.7	Not connected				
Standard functions\Test/ Reset									
Test/Reset keys disabled	False								
Standard functions\Test/ Reset\Test 1									
Test 1 - input	Cyclic receive - Bit 0.3								
Standard functions\Test/ Reset\Test 2									
Test 2 - input	Not connected								
Standard functions\Test/ Reset\Reset 1									
Reset 1 - input	Cyclic receive - Bit 0.6								
Standard functions\Test/ Reset\Reset 2									
Reset 2 - input	Not connected								
Standard functions\Test/ Reset\Reset 3									
Reset 3 - input	Not connected								
Standard functions\Test Position Feedback (TPF)									
Test Position Feedback (TPF) - input	Not connected			Type	NO contact				
Standard functions\External fault\External fault 1									
External fault 1 - input	Not connected			External fault 1 - reset	Not connected		Response	signal	
Type	NO contact			Active status	always		Test/reset button, RS-232 (panel reset)	True	

Totally Integrated
Automation Portal

Auto reset	False	Remote reset, reset 1,2,3	True	Off command reset	False
Marking					
Standard functions\External fault\External fault 2					
External fault 2 - input	Not connected	External fault 2 - reset	Not connected	Response	signal
Type	NO contact	Active status	always	Test/reset button, RS-232 (panel reset)	True
Auto reset	False	Remote reset, reset 1,2,3	True	Off command reset	False
Marking					
Standard functions\External fault\External fault 3					
External fault 3 - input	Not connected	External fault 3 - reset	Not connected	Response	signal
Type	NO contact	Active status	always	Test/reset button, RS-232 (panel reset)	True
Auto reset	False	Remote reset, reset 1,2,3	True	Off command reset	False
Marking					
Standard functions\External fault\External fault 4					
External fault 4 - input	Not connected	External fault 4 - reset	Not connected	Response	signal
Type	NO contact	Active status	always	Test/reset button, RS-232 (panel reset)	True
Auto reset	False	Remote reset, reset 1,2,3	True	Off command reset	False
Marking					
Standard functions\External fault\External fault 5					
External fault 5 - input	Not connected	External fault 5 - reset	Not connected	Response	signal
Type	NO contact	Active status	always	Test/reset button, RS-232 (panel reset)	True
Auto reset	False	Remote reset, reset 1,2,3	True	Off command reset	False
Marking					
Standard functions\External fault\External fault 6					
External fault 6 - input	Not connected	External fault 6 - reset	Not connected	Response	signal
Type	NO contact	Active status	always	Test/reset button, RS-232 (panel reset)	True
Auto reset	False	Remote reset, reset 1,2,3	True	Off command reset	False
Marking					
Standard functions\Operational Protection Off (OPO)					
Operational Protection Off - input	Not connected	Type	NO contact		
Standard functions\Power failure monitoring (UVO)					
Control external power failure monitoring	Not connected	Power failure monitoring - type	deactivated	Power failure time	0.0s
Restart time delay	0s				
Standard functions\Emergency start					
Emergency start - input	Cyclic receive - Bit 0.4				
Standard functions\Watchdog (PLC/DCS monitoring)					
PLC/DCS monitoring - input	Not connected	Bus monitoring	True	PLC/DCS monitoring	True
Bus/PLC fault - Reset	Manual				
Standard functions\Time stamping					
Time stamping - input 0	Not connected	Time stamping - input 1	Not connected	Time stamping - input 2	Not connected
Time stamping - input 3	Not connected	Time stamping - input 4	Not connected	Time stamping - input 5	Not connected
Time stamping - input 6	Not connected	Time stamping - input 7	Not connected	Time stamping active	False
Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 1 3I/1Q					
Truth table 1 - input 1	Not connected	Truth table 1 - input 2	Not connected	Truth table 1 - input 3	Not connected
Truth table 1 - note					
Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 1 3I/1Q\Truth table 1 3I/1Q					
Input 1	Input 2	Input 3	Output 1		
0	0	0	0		
0	0	1	0		
0	1	0	0		
0	1	1	0		
1	0	0	0		
1	0	1	0		
1	1	0	0		
1	1	1	0		
Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 2 3I/1Q					
Truth table 2 - input 1	Not connected	Truth table 2 - input 2	Not connected	Truth table 2 - input 3	Not connected
Truth table 2 - note					

Totally Integrated
Automation Portal

Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 2 3I/1Q\Truth table 2 3I/1Q\

Input 1	Input 2	Input 3	Output 1
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 3 3I/1Q

Truth table 3 - input 1	Not connected	Truth table 3 - input 2	Not connected	Truth table 3 - input 3	Not connected
Truth table 3 - note					

Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 3 3I/1Q\Truth table 3 3I/1Q\

Input 1	Input 2	Input 3	Output 1
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 4 3I/1Q

Truth table 4 - input 1	Not connected	Truth table 4 - input 2	Not connected	Truth table 4 - input 3	Not connected
Truth table 4 - note					

Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 4 3I/1Q\Truth table 4 3I/1Q\

Input 1	Input 2	Input 3	Output 1
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 5 3I/1Q

Truth table 5 - input 1	Not connected	Truth table 5 - input 2	Not connected	Truth table 5 - input 3	Not connected
Truth table 5 - note					

Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 5 3I/1Q\Truth table 5 3I/1Q\

Input 1	Input 2	Input 3	Output 1
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 6 3I/1Q

Truth table 6 - input 1	Not connected	Truth table 6 - input 2	Not connected	Truth table 6 - input 3	Not connected
Truth table 6 - note					

Logic modules\Truth table 3I/1Q\Truth table 6 3I/1Q\Truth table 6 3I/1Q\

Input 1	Input 2	Input 3	Output 1
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

Logic modules\Truth table 2I/1Q\Truth table 7 2I/1Q

Truth table 7 - input 1	Not connected	Truth table 7 - input 2	Not connected	Truth table 7 - note	
-------------------------	---------------	-------------------------	---------------	----------------------	--

Logic modules\Truth table 2I/1Q\Truth table 7 2I/1Q\Truth table 7 2I/1Q\

Input 1	Input 2	Output 1
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Logic modules\Truth table 2I/1Q\Truth table 8 2I/1Q

Truth table 8 - input 1	Not connected	Truth table 8 - input 2	Not connected	Truth table 8 - note	
-------------------------	---------------	-------------------------	---------------	----------------------	--

Logic modules\Truth table 2I/1Q\Truth table 8 2I/1Q\Truth table 8 2I/1Q\

Input 1	Input 2	Output 1
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Logic modules\Truth table 5I/2Q\Truth table 9 5I/2Q

Truth table 9 - input 1	Not connected	Truth table 9 - input 2	Not connected	Truth table 9 - input 3	Not connected
Truth table 9 - input 4	Not connected	Truth table 9 - input 5	Not connected	Truth table 9 - note	

Signal conditioning 4 - note					
Logic modules\Non-volatile element\Non-volatile element 1					
Non-volatile element 1 - input	Not connected	Non-volatile element 1 - reset	Not connected	Non-volatile element 1 - type	Non-inverting
Logic modules\Non-volatile element\Non-volatile element 2					
Non-volatile element 2 - input	Not connected	Non-volatile element 2 - reset	Not connected	Non-volatile element 2 - type	Non-inverting
Logic modules\Non-volatile element\Non-volatile element 3					
Non-volatile element 3 - input	Not connected	Non-volatile element 3 - reset	Not connected	Non-volatile element 3 - type	Non-inverting
Logic modules\Non-volatile element\Non-volatile element 4					
Non-volatile element 4 - input	Not connected	Non-volatile element 4 - reset	Not connected	Non-volatile element 4 - type	Non-inverting
Logic modules\Flashing\Flashing 1					
Flashing 1 - input	Not connected				
Logic modules\Flashing\Flashing 2					
Flashing 2 - input	Not connected				
Logic modules\Flashing\Flashing 3					
Flashing 3 - input	Not connected				
Logic modules\Flicker\Flicker 1					
Flicker 1 - input	Not connected				
Logic modules\Flicker\Flicker 2					
Flicker 2 - input	Not connected				
Logic modules\Flicker\Flicker 3					
Flicker 3 - input	Not connected				
Logic modules\Limit monitor					
Hysteresis for limit monitor	5% of threshold value				
Logic modules\Limit monitor\Limit monitor 1					
Limit monitor 1 - input	Not connected	Type	> (overshoot)	Active status	always (on)
Limit	0	Delay	0.5s	Marking	
Logic modules\Limit monitor\Limit monitor 2					
Limit monitor 2 - input	Not connected	Type	> (overshoot)	Active status	always (on)
Limit	0	Delay	0.5s	Marking	
Logic modules\Limit monitor\Limit monitor 3					
Limit monitor 3 - input	Not connected	Type	> (overshoot)	Active status	always (on)
Limit	0	Delay	0.5s	Marking	
Logic modules\Limit monitor\Limit monitor 4					
Limit monitor 4 - input	Not connected	Type	> (overshoot)	Active status	always (on)
Limit	0	Delay	0.5s	Marking	
Logic modules\Calculators\Calculation module 1					
Calculator 1 - input	Not connected	Calculator 1 - numerator	0	Calculator 1 - denominator	1
Calculator 1 - offset	0	Calculator 1 - note			
Logic modules\Calculators\Calculation module 2					
Calculator 2 - input 1	Not connected	Calculator 2 - input 2	Not connected	Calculator 2 - operating mode	Both inputs of the type word
Calculator 2 - numerator 1	0	Calculator 2 - denominator 1	1	Calculator 2 - operator	+ (addition)
Calculator 2 - numerator 2	0	Calculator 2 - denominator 2	1	Calculator 2 - offset	0
Calculator 2 - note					
3UF50 - compatibility mode					
3UF50 - compatibility mode	False	3UF50 - mode	DPV0	3UF50 - basic type	1
Analog value recording					
Trigger input	Not connected	Assigned analog value	Not connected	Trigger edge	positive
Sampling rate	0.1s	Pre-trigger	0%		
Time-of-day synchronization					
Time-of-day synchronization	0	Time interval	1.00s		
SYNC/FREEZE					
Capable of SYNC	True	Capable of FREEZE	True		
SYNC/FREEZE \					
Group		Active		Group properties	
1		False		SYNC/FREEZE	
2		False		SYNC/FREEZE	
3		False		SYNC/FREEZE	
4		False		SYNC/FREEZE	
5		False		SYNC/FREEZE	
6		False		SYNC/FREEZE	
7		False		SYNC/FREEZE	
8		False		SYNC/FREEZE	

Totally Integrated
Automation Portal

Watchdog

Watchdog activated True

Diagnostics addresses\Diagnostics addresses

Station diagnostics 8189 Alternative device address 8188

I/O addresses\Input addresses

Start address 1 End address 10 Process image OB1-PI
Interrupt OB number 40

I/O addresses\Output addresses

Start address 1 End address 4 Process image OB1-PI

Control device_1 [SIMOCODE pro V PB] / Charts

Chart sequence & extras

Run sequence of charts in: Control device_1 (Control device Station_1)

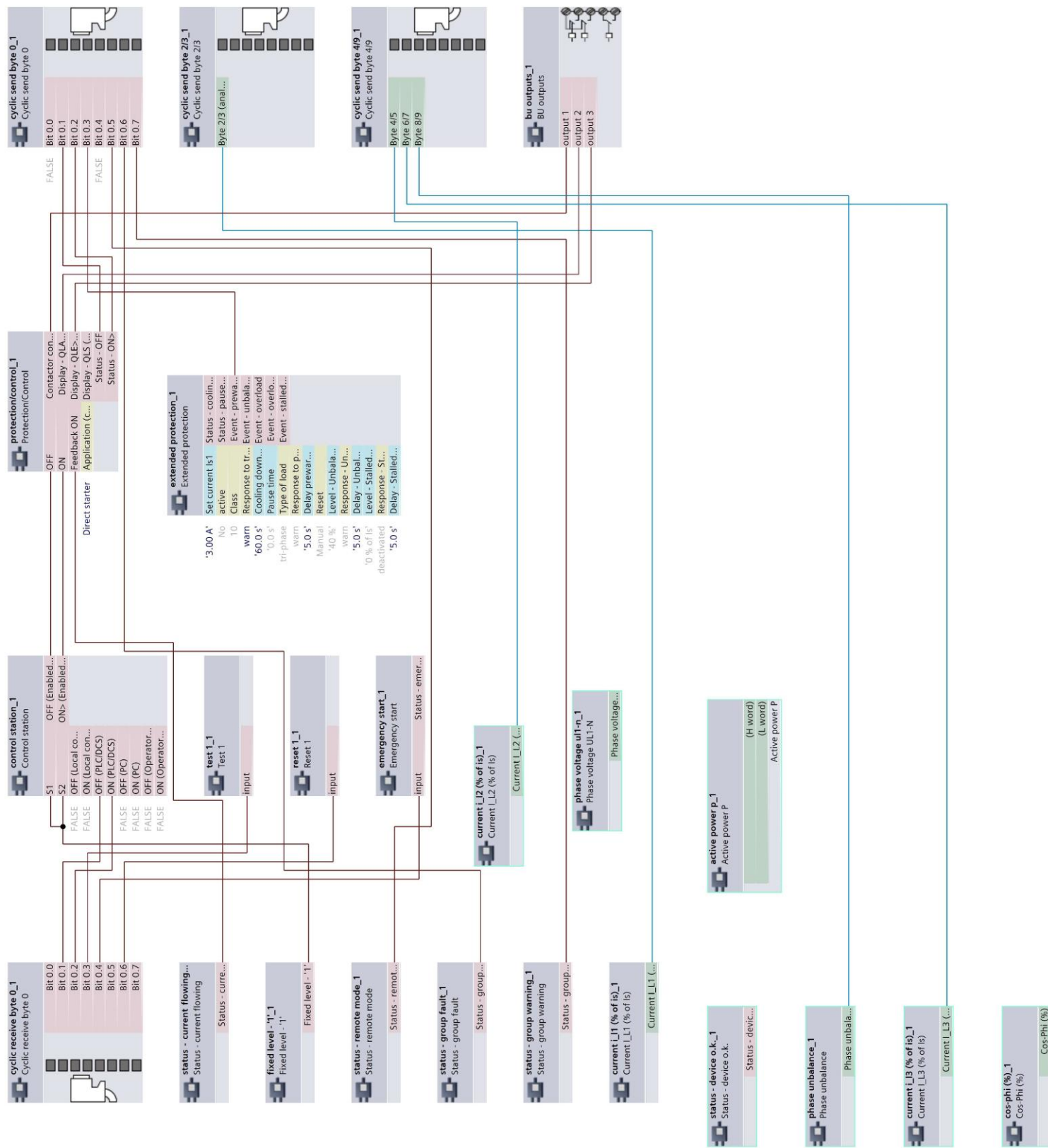
Run sequence	Chart/object	Type	Task	Additional tasks	Enable chart	Reduction ratio	Phase offset	Optimize chart	Comment
	▼ Chart_1	CFC	default			0	0	False	
1	cyclic receive byte 0_1	Cyclic receive byte 0	default						
2	protection/control_1	Protection/Control	default						
3	status - current flowing_1	Status - current flowing	default						
4	fixed level - '1'_1	Fixed level - '1'	default						
5	control station_1	Control station	default						
6	cyclic send byte 0_1	Cyclic send byte 0	default						
7	status - remote mode_1	Status - remote mode	default						
8	status - group fault_1	Status - group fault	default						
9	status - group warning_1	Status - group warning	default						
10	current i_l1 (% of is)_1	Current I_L1 (% of Is)	default						
11	cyclic send byte 2/3_1	Cyclic send byte 2/3	default						
12	cyclic send byte 4/9_1	Cyclic send byte 4/9	default						
13	bu outputs_1	BU outputs	default						
14	test 1_1	Test 1	default						
15	reset 1_1	Reset 1	default						
16	emergency start_1	Emergency start	default						
17	extended protection_1	Extended protection	default						
18	status - device o.k._1	Status - device o.k.	default						
19	phase unbalance_1	Phase unbalance	default						
20	current i_l2 (% of is)_1	Current I_L2 (% of Is)	default						
21	current i_l3 (% of is)_1	Current I_L3 (% of Is)	default						
22	cos-phi (%)_1	Cos-Phi (%)	default						
23	phase voltage ul1-n_1	Phase voltage UL1-N	default						
24	active power p_1	Active power P	default						

Totally Integrated
Automation Portal

Control device_1 [SIMOCODE pro V PB] / Charts

Chart_1

Chart_1 - Data flow /Task: default - Partition_1



Control device_1 [SIMOCODE pro V PB]

Traces

Name

Totally Integrated
Automation Portal

Control device_1 [SIMOCODE pro V PB] / Traces

Measurements

This folder is empty.

Totally Integrated
Automation Portal

Control device_1 [SIMOCODE pro V PB] / Traces

Combined measurements

Name