

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Diseño y construcción de un sistema experimental de
carga programable para la demostración de distintas
estrategias de control de velocidad de motor con
accionamientos Sinamics G120, PROFINET, S7-1200
y WinCC TIA Portal
Carlos Nicolás Jiménez Leal

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:
Mg. Rodrigo Pinto Cárdenas.

Profesores Guía:
Dr. Samuel Vergara.
Dr. Guillermo Ramírez.

Concepción, marzo de 2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Mg. Rodrigo Pinto Cárdenas.

Diseño y construcción de un sistema experimental de carga programable para la demostración de distintas estrategias de control de velocidad de motor con accionamientos Sinamics G120, PROFINET, S7-1200 y WinCC TIA Portal

Carlos Nicolás Jiménez Leal

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Marzo 2026

Resumen

En este proyecto se desarrolló el diseño y construcción de un equipo experimental de carga programable, utilizando tecnología industrial Siemens. Este equipo experimental permite analizar y comparar el desempeño de dos estrategias de control de velocidad en motores de inducción: Control Escalar (V/F) y Control Vectorial sin Sensor (SLVC), ante distintos escenarios de carga, programados en uno de los accionamientos configurado para control de torque.

El sistema integra dos variadores de frecuencia Sinamics G120, un PLC S7-1200, que se comunicaron mediante Ethernet con protocolo de comunicación industrial PROFINET por medio del software TIA Portal WinCC. En la configuración, un accionamiento registrará un motor en modo control de velocidad, por otro lado, el segundo accionamiento opera en modo control de torque, permitiendo simular una carga mecánica variable sobre el eje del primer motor. Esta carga será programada mediante el controlador PLC, logrando emular perfiles de par constante y par cuadrático, mientras que el control de velocidad podrá seguir referencias de velocidad constante y aumentos escalonados.

La implementación incluyó el desarrollo del software de control en el PLC S7-1200 para la gestión de comandos y perfiles, y la creación de una interfaz HMI en WinCC para el monitoreo en tiempo real y la historización de variables clave como velocidad, par y corrientes. Finalmente, se realizaron pruebas experimentales para evaluar el desempeño dinámico y en estado estable del sistema bajo las diferentes estrategias de control y perfiles de carga. La plataforma experimental podría resultar ser una herramienta pedagógica y de investigación para el análisis práctico de accionamientos de velocidad variable.

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi pareja, quien me ha acompañado desde la enseñanza media hasta el día de hoy, siendo un gran apoyo y un pilar fundamental a lo largo de mi vida.

También agradezco a todos los profesores que he conocido a lo largo de mi trayectoria académica, de quienes he aprendido, aunque haya sido en los aspectos más mínimos. En especial, a mi profesora de matemáticas de enseñanza básica, ya que, de no haber sido por ella, no habría logrado desarrollarme hasta el nivel al que he llegado.

De igual manera, agradezco a todos los compañeros y amigos que he conocido a lo largo de mi vida. Aunque actualmente no mantenga contacto con muchos de ellos, valoro profundamente el apoyo que me brindaron durante el tiempo que compartimos.

Finalmente, agradezco a todos los estudiantes y profesores que cooperaron en la preparación de este documento, así como también a quienes harán uso de él.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
ABREVIACIONES	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS	1
1.2.1 Control y Automatización	2
1.2.2 Equipos de Potencia y Accionamiento	5
1.2.3 Sistema de Alimentación	6
1.2.4 Sistema de Medición	7
1.2.5 Investigaciones Anteriores	7
1.2.6 Discusión	8
1.3. INDICADOR DE LOGRO	9
1.4. OBJETIVOS	9
1.4.1 Objetivo General	9
1.4.2 Objetivos Específicos	9
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	10
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. INTRODUCCIÓN	12
2.2. PLATAFORMA EXPERIMENTAL	12
2.2.1 Tipos de Torque	13
2.2.2 Análisis del Comportamiento	14
2.2.3 PROFINET	16
2.3. ACCIONAMIENTOS G120	16
2.3.1 Power Module	17
2.3.2 Control Unit	21
2.4. MOTOR DE INDUCCIÓN	34
2.5. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE	36
2.6. HMI	37
2.7. SWITCH	38
2.8. DISCUSIÓN	39
CAPÍTULO 3. DISEÑO	40
3.1. INTRODUCCIÓN	40
3.2. DIAGRAMAS DE DESPLIEGUE	40
3.2.1 Elementos de la Plataforma Experimental	40
3.2.2 Diagrama de Fuerza	42
3.2.3 Diagrama de Comunicación	43
3.3. PERFILES DE TORQUE	44
3.4. SISTEMA DE COMUNICACIÓN	45
3.4.1 Comunicación de Accionamientos	45
3.4.2 Comunicación del PLC	46
3.4.3 Cambio de Formato de Datos	49
3.4.4 Identificación PROFINET	49
3.5. SISTEMA DE SUPERVISIÓN	50
3.6. DISCUSIÓN	50
CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN	51
4.1. INTRODUCCIÓN	51

4.2.	INTEGRACIÓN DE COMPONENTES.....	51
4.3.	COMISIONAMIENTO DE ACCIONAMIENTOS.....	52
4.3.1	<i>Controladores</i>	54
4.4.	IMPLEMENTACIÓN TIA PORTAL	55
4.4.1	<i>Configuración PROFINET</i>	55
4.4.2	<i>Programación PLC</i>	57
4.5.	DESARROLLO DE HMI	62
4.6.	DISCUSIÓN	68
CAPÍTULO 5.	PRUEBAS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS	69
5.1.	INTRODUCCIÓN	69
5.2.	PRUEBAS EXPERIMENTALES	69
5.3.	REQUERIMIENTOS DE EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO.....	69
5.4.	CONFIGURACIÓN DE PRUEBAS EN LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL.....	70
5.5.	RESULTADOS	70
5.5.1	<i>Prueba 1</i>	70
5.5.2	<i>Prueba 2</i>	78
5.5.3	<i>Prueba 3</i>	85
5.5.4	<i>Prueba 4</i>	92
5.6.	EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO.....	98
5.6.1	<i>Accionamiento con Control de Velocidad</i>	99
5.6.2	<i>Accionamiento con Control de Torque</i>	101
5.7.	DISCUSIÓN	102
CAPÍTULO 6.	CONCLUSIONES	104
6.1.	SUMARIO	104
6.2.	CONCLUSIONES.....	104
6.3.	TRABAJO FUTURO.....	104
BIBLIOGRAFÍA.....		106
ANEXO A. DISEÑO DE LA APLICACIÓN DE CONTROL.....		110
ANEXO B. DETALLE DEL DESARROLLO DEL HMI.....		137
ANEXO C. CONFIGURACIÓN DE LAS PRUEBAS.....		155
ANEXO D. CÓDIGOS		161
ANEXO E. DETALLE TÉCNICO		170

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Datos de entrada PM240	17
Tabla 2.2 Datos de salida PM240.....	18
Tabla 2.3 Datos de Comunicación CU240E-2.	21
Tabla 2.4 Métodos de regulación CU240E-2.....	21
Tabla 2.5 Datos de Comunicación CU250S-2 PN.	21
Tabla 2.6 Métodos de regulación CU250S-2 PN.....	22
Tabla 2.7 Datos Mecánicos Motor de Inducción.	34
Tabla 2.8 Valores Nominales Motor de Inducción.	35
Tabla 2.9 Características PLC S7-1200.	36
Tabla 2.10 Bloques de Organización de PLC S7-1200.....	37
Tabla 3.1 Variables de Interés CU240.	46
Tabla 3.2 Variables de Interés CU250.	46
Tabla 3.3 Asignación de Comunicación.	49
Tabla 5.1 Pruebas Experimentales.	69
Tabla 5.2 Desempeño del MCV.....	99
Tabla 5.3 Desempeño del MCT.	101

Lista de Figuras

Fig. 2.1: Esquema General de Plataforma Experimental	12
Fig. 2.2: Curva Torque v/s Velocidad: Torque Constante	13
Fig. 2.3: Curva Torque v/s Velocidad: Torque Cuadrático	14
Fig. 2.4: Curva Torque v/s Velocidad: Torque Lineal	14
Fig. 2.5: Curva Torque v/s Velocidad: Torque Hiperbólico	14
Fig. 2.6: Representación de Interacción entre Accionamientos	15
Fig. 2.7: Logo PROFINET	16
Fig. 2.8: G120.....	17
Fig. 2.9: PM240.....	17
Fig. 2.10: Circuito equivalente del Power Module	18
Fig. 2.11: Gráficos Power Module	19
Fig. 2.12: Circuito del VSI Trifásico.....	19
Fig. 2.13: Voltajes Dependiendo de la Secuencia de Estados de los Switch en el VSI	20
Fig. 2.14: Control Unit	21
Fig. 2.15: Rangos de Operación V/F Sinamics	23
Fig. 2.16: V/F Sinamics G120.....	23
Fig. 2.17: Control Indirecto de Campo Orientado con Orientación del Flujo del Rotor	25
Fig. 2.18: Diagrama Funcional del Control Vectorial.....	26
Fig. 2.19: Diagrama Funcional de la Interfase del Power Module	27
Fig. 2.20: Diagrama Funcional del Filtro de punto de consigna I_q	27
Fig. 2.21: Diagrama Funcional del I_d Set Point.....	28
Fig. 2.22: Diagrama Funcional del Controlador de Flujo	28
Fig. 2.23: Diagrama Funcional de los Controladores I_q e I_d	29
Fig. 2.24: Controlador de Velocidad.....	31
Fig. 2.25: Velocidad Lazo Cerrado y Torque Control	31
Fig. 2.26: Telegrama libre, CU 250S-2	32
Fig. 2.27: Palabras de Mando y Estado	33
Fig. 2.28: Startdrive.....	34
Fig. 2.29: Motor de Inducción.....	34
Fig. 2.30: Circuito equivalente por fase del motor de Inducción	35
Fig. 2.31: S7-1200	36
Fig. 2.32: Logo TIA PORTAL.....	37
Fig. 2.33: HMI Industrial	38
Fig. 2.34: WinCC Professional	38
Fig. 2.35: Switch de Comunicación	38
Fig. 2.36: Topologías PROFINET	39
Fig. 3.1: Accionamientos Facilitados por la Empresa.....	41
Fig. 3.2: S7-1200 TK1.....	41
Fig. 3.3: Switch	41
Fig. 3.4: HMI.....	42
Fig. 3.5: Diagrama de Fuerza	42
Fig. 3.6: Diagrama de comunicaciones del sistema	44
Fig. 3.7: Diseño de Sistema de Comunicación.....	47
Fig. 3.8: Funcionalidad de Bloque FB 'Control Drive'	48
Fig. 4.1: Equipo Experimental	51

Fig. 4.2: Comisionamiento en STARTDRIVE	52
Fig. 4.3: Configuración PROFINET MCV	52
Fig. 4.4: Configuración PROFINET MCT.....	53
Fig. 4.5: Configuración de Reportes al PLC al MCV	53
Fig. 4.6: Configuración de Reportes al PLC al MCT.....	54
Fig. 4.7: Valor de Controlador VDC (Control V/f).....	54
Fig. 4.8: Valor de Controlador I_max (Control Max Frecuencia)	54
Fig. 4.9: Valor de Controlador I_max (Control Max Voltaje)	54
Fig. 4.10: Valor de Controlador Velocidad (con encoder).....	54
Fig. 4.11: Topología en Tía Portal	55
Fig. 4.12: Asignación PROFINET PLC S7-1200	55
Fig. 4.13: Asignación PROFINET Estacion HMI.....	56
Fig. 4.14: Asignación PROFINET CU250S-2 PN.....	56
Fig. 4.15: Asignación PROFINET CU240E-2 PN.....	56
Fig. 4.16: Esquema de conexión Tía Portal	56
Fig. 4.17: Asignación de Espacios PZD CU250	57
Fig. 4.18: Asignación de Espacios PZD CU240	57
Fig. 4.19: FB SP_Generador	58
Fig. 4.20: FB Sel_Vel.....	58
Fig. 4.21: Función Block ControlDrive Superior MCV.....	59
Fig. 4.22: Función Block ControlDrive Intermedio MCV	59
Fig. 4.23: Función Block ControlDrive Inferior MCV	60
Fig. 4.24: FB SP_Cuadratico.....	60
Fig. 4.25: FB Sel_Tor.....	61
Fig. 4.26: Función Block ControlDrive Superior MCT	61
Fig. 4.27: Función Block ControlDrive Intermedio MCT	62
Fig. 4.28: Función Block ControlDrive Inferior MCT.....	62
Fig. 4.29: Pantalla de Inicio	63
Fig. 4.30: Pantalla del Accionamiento con Control de Velocidad	63
Fig. 4.31: Pantalla del Panel de Comando del MCV	64
Fig. 4.32: Pantalla del Accionamiento con Control de Velocidad con Panel Desplegado	64
Fig. 4.33: Pantalla del Accionamiento con Control de Torque	65
Fig. 4.34: Pantalla del Panel de Comando del MCT	65
Fig. 4.35: Pantalla del Accionamiento con Control de Torque con Panel Desplegado	65
Fig. 4.36: Pantalla Panel de Mando Velocidad & Torque Drive	66
Fig. 4.37: Pantalla del Panel Gráfico Torque v/s Velocidad	66
Fig. 4.38: Pantalla Panel de Mando Velocidad & Torque Drive con Panel Desplegado	67
Fig. 4.39: Pantalla de Registros Históricos	67
Fig. 4.40: Pantalla de Ajuste	68
Fig. 5.1: Prueba 1 HMI.....	71
Fig. 5.2: Prueba 1: Set Point y Velocidad MCV	72
Fig. 5.3: Prueba 1: Set Point y Torque MCT	72
Fig. 5.4: Prueba 1: Torques de la Plataforma Experimental	73
Fig. 5.5: Prueba 1: Velocidades de la Plataforma Experimental.....	74
Fig. 5.6: Prueba 1: Corrientes MCV	75
Fig. 5.7: Prueba 1: Corrientes MCT	75
Fig. 5.8: Prueba 1: Voltajes MCV.....	77
Fig. 5.9: Prueba 1: Voltajes MCT	77

Fig. 5.10: Prueba 2 HMI.....	78
Fig. 5.11: Prueba 2: Set Point y Velocidad MCV	79
Fig. 5.12: Prueba 2: Set Point y Torque MCT	79
Fig. 5.13: Prueba 2: Torques de la Plataforma Experimental	80
Fig. 5.14: Prueba 2: Velocidades de la Plataforma Experimental	81
Fig. 5.15: Prueba 2: Corrientes MCV	82
Fig. 5.16: Prueba 2: Corrientes MCT	82
Fig. 5.17: Prueba 2: Voltajes MCV	83
Fig. 5.18: Prueba 2: Voltajes MCT	84
Fig. 5.19: Prueba 3 HMI.....	85
Fig. 5.20: Prueba 3: Velocidad v/s Torque de la Plataforma Experimental.....	86
Fig. 5.21: Prueba 3: Set Point y Velocidad MCV	86
Fig. 5.22: Prueba 3: Set Point y Torque MCT	87
Fig. 5.23: Prueba 3: Torques de la Plataforma Experimental	88
Fig. 5.24: Prueba 3: Velocidades de la Plataforma Experimental.....	88
Fig. 5.25: Prueba 3: Corrientes MCV	89
Fig. 5.26: Prueba 3: Corrientes MCT	89
Fig. 5.27: Prueba 3: Voltajes MCV	90
Fig. 5.28: Prueba 3: Voltajes MCT	91
Fig. 5.29: Prueba 4 HMI.....	92
Fig. 5.30: Prueba 4: Velocidad v/s Torque de la Plataforma Experimental.....	93
Fig. 5.31: Prueba 4: Set Point y Velocidad MCV	93
Fig. 5.32: Prueba 4: Set Point y Torque MCT	94
Fig. 5.33: Prueba 4: Torques de la Plataforma Experimental	95
Fig. 5.34: Prueba 4: Velocidades de la Plataforma Experimental.....	95
Fig. 5.35: Prueba 4: Corrientes MCV	96
Fig. 5.36: Prueba 4: Corrientes MCT	96
Fig. 5.37: Prueba 4: Voltajes MCV	97
Fig. 5.38: Prueba 4: Voltajes MCT	98
Fig. 5.39: Desempeño del MCV.....	99
Fig. 5.40: Reproducibilidad Control V/f.....	100
Fig. 5.41: Reproducibilidad Control SLVC	100
Fig. 5.42: Desempeño del MCT	101
Fig. 5.43: Reproducibilidad Control TC	102

Abreviaciones

Mayúsculas

CMR	: Campo Magnético Rotatorio.
VSI.	: Inversor Fuente de Voltaje.
MCV.	: Motor con Control de Velocidad.
MCT.	: Motor con Control de Torque.
PZD.	: Datos de Proceso.
CU.	: Control Unit
PM.	: Power Module
VC.	: Vector Control
SLVC.	: Sensorless Vector Control

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

En el contexto de la industria chilena, sectores estratégicos como la gran minería, la industria forestal y la manufactura dependían críticamente de la eficiencia y continuidad operativa de sus procesos. En este escenario, los accionamientos eléctricos de velocidad variable se consolidaron como el estándar tecnológico para el control de movimiento, evolucionando de simples actuadores de potencia a nodos inteligentes de información. Sin embargo, la modernización de las plantas productivas nacionales presentaba el desafío constante de integrar equipos de diversos proveedores en un mismo ecosistema de automatización. La llegada del estándar PROFINET solucionó este problema, eliminando las dificultades de conectar marcas distintas y permitiendo que todos los equipos se comunicaran entre sí de forma rápida y sencilla.

Los sistemas de accionamiento de velocidad variable debían validarse bajo condiciones de carga que simularan escenarios industriales reales, donde la capacidad de emular perfiles de torque variables resultaba fundamental. En la industria, era común encontrar aplicaciones que requerían perfiles específicos, como par constante (cintas transportadoras, sistemas de elevación, etc.) y par cuadrático (bombas centrífugas y ventiladores). La posibilidad de programar estos perfiles permitió realizar pruebas exhaustivas que replicaban fielmente las condiciones operativas reales.

Este proyecto desarrolló una plataforma experimental basada en tecnología Siemens que utilizó el protocolo de comunicación PROFINET, integrando la visualización del HMI, del controlador PLC S7-1200 y de dos variadores Sinamics G120: Uno operando en modo control de velocidad y otro funcionando en modo control de torque, actuando como una carga programable. El sistema permitió demostrar y comparar de manera sistemática el comportamiento de las estrategias de control V/F y Sensorless Vector Control (SLVC) bajo diferentes perfiles de carga, proporcionando así una herramienta práctica y versátil para la docencia, la investigación aplicada y el análisis comparativo de accionamientos de velocidad variable en contextos industriales reales.

1.2. Trabajos Previos

El desarrollo de esta plataforma experimental se fundamenta en el estudio exhaustivo de la documentación técnica oficial de los componentes Siemens. Esta revisión se centra específicamente en los manuales y hojas de datos que definen los límites operativos y las capacidades funcionales del hardware, estableciendo las bases técnicas para la implementación práctica del sistema.

1.2.1 Control y Automatización

- ♣ Siemens, '*SIMATIC S7-1200 CPU 1212C DC/DC/DC Data Sheet*', Art. No. 6ES7212-1AE40-0XB0, 2025.

Su hoja de datos confirma la capacidad de comunicación PROFINET integrada, esencial para actuar como controlador principal (IO-Controller) y gestionar los variadores de frecuencia. Su memoria de trabajo y capacidades de procesamiento, documentadas en la ficha técnica, son suficientes para ejecutar la lógica de control que gestionará los perfiles de velocidad y par.

- ♣ Siemens, '*SINAMICS CU240E-2 PN Control Unit Data Sheet*', Art. No. 6SL3244-0BB12-1FA0, 2023.

El Data Sheet de la Unidad de Control SINAMICS CU240E-2 PN fue esencial para este proyecto, ya que confirmó que este modelo específico admite PROFINET, control vectorial sin sensor (SLVC) y control de torque, capacidades indispensables para implementar las estrategias de control y la carga programable definidas en los objetivos.

- ♣ Siemens, '*SINAMICS G120 Convertidor con las Control Units CU240B-2 y CU240E-2: Instrucciones de servicio*', Ed. 04/2014, versión de firmware V4.7, A5E34259001E AA, Núremberg, Alemania: Siemens, 2014.

Este manual proporciona la información detallada de instalación, cableado, puesta en marcha y parametrización específica de las unidades de control CU240E-2 que se utilizan. A diferencia de la hoja de datos, este manual entrega las guías prácticas paso a paso para configurar los modos de control V/F, Sensorless Vector Control y control de torque, que son fundamentales para el funcionamiento del sistema de carga programable.

- ♣ Siemens, '*SINAMICS G120 Control Units CU240B-2/CU240E-2 List Manual*', Ed. 04/2014, A5E33839529B AA, Núremberg, Alemania: Siemens, 2014.

Este documento proporciona la lista completa de parámetros, funciones y códigos de falla específicos de las unidades de control. A diferencia del manual de servicio y la hoja de datos, este listado permite identificar y configurar exactamente los parámetros y diagramas de función necesarios para implementar el control de torque y velocidad, facilitando la resolución de problemas durante la puesta en marcha del sistema.

- ♣ Siemens, '*Data sheet for SINAMICS Control unit CU250S-2 CAN*' Art. No. 6SL3246-0BA22-1CA0.

El Data Sheet de la Unidad de Control SINAMICS CU250S-2 es fundamental para este

proyecto, ya que confirma que esta unidad admite el uso de encoder y ofrece capacidades avanzadas de control de torque con realimentación precisa, lo que permite implementar perfiles de carga más exactos y confiables en el sistema de control de torque.

- ♣ Siemens, ‘Instrucciones de servicio: SINAMICS G120 Convertidores con las Control Units CU250S-2’, Edición 10/2020, Firmware V4.7 SP13, Número de documento A5E31759476E AJ, 2020.

Este manual proporciona las instrucciones detalladas de instalación, configuración y parametrización específicas de la unidad CU250S-2, incluyendo la conexión y configuración del encoder, que es fundamental para el correcto funcionamiento del control de torque con realimentación precisa.

- ♣ Siemens, ‘SINAMICS G120 Control Units CU250S-2 List Manual’ (Ed. 01/2013). A5E31759720B AA. Siemens.

Este documento proporciona además de los diagramas funcionales, una lista completa y detallada de parámetros específicos de la unidad CU250S-2, permitiendo configurar con precisión las funciones avanzadas de control con encoder, la localización de parámetros para la comunicación de datos vía PROFINET y la optimización del control de torque, aspectos no cubiertos en el data sheet ni en el manual de servicio general.

- ♣ Siemens, ‘*SINAMICS G120, G120P, G120C, G120D, G110M Fieldbuses*’ – *Function Manual*, Ed. 04/2015, FW V4.7.3, A5E34229197B AB, Siemens, Nuremberg, Germany, 2015.

El documento es importante para este proyecto, ya que ayuda en la configuración y parametrización de la comunicación PROFINET entre los variadores G120 y el PLC S7-1200. Esta guía oficial permite implementar correctamente el intercambio de datos en tiempo real, esencial para la comunicación del control de velocidad y par, así como para la integración del sistema completo.

- ♣ Siemens AG, ‘*Function blocks to control the SINAMICS with SIMATIC S7 in TIA-Portal*’, Manual V2.4, Entry-ID: 109475044, Jul. 2019.

Este documento es un manual técnico y de aplicación oficial de Siemens que detalla el uso de la librería de bloques de función estándar, la cual está diseñada para integrar eficientemente accionamientos de la familia SINAMICS con controladores SIMATIC S7. Para el desarrollo del software de la plataforma experimental, esta guía constituye una herramienta de diseño, ya que proporciona los bloques de control que deben ejecutarse en la CPU S7-1200.

- ♣ Siemens AG, ‘*SIMATIC PROFINET Descripción del sistema: Manual de sistema*’, Ed. 03/2012, N.º de artículo A5E00298290-06, Mar. 2012.

El documento de Siemens constituye la base teórica y normativa fundamental para el diseño de la red de comunicación de la plataforma experimental. Este documento detalla la arquitectura, las topologías y los principios operativos del estándar PROFINET, estableciendo los criterios para la interacción entre el controlador principal y los dispositivos de accionamiento.

- ♣ Siemens AG, '*SIMATIC PROFINET con STEP 7: Manual de funciones*', Ed. 11/2022, N.º de artículo A5E03444489-AM, Nov. 2022.

El manual de funciones "PROFINET con STEP 7" de Siemens es un documento técnico esencial que detalla los procedimientos de configuración, parametrización y diagnóstico de redes PROFINET dentro del entorno de ingeniería TIA Portal. Para el desarrollo de la plataforma experimental, este documento proporciona las directrices para estructurar el proyecto de software, permitiendo integrar el controlador lógico S7-1200 con los dispositivos de fuerza Sinamics G120 de manera óptima. Su aplicación metodológica justifica las decisiones de configuración en el sistema, tales como la asignación de nombres de dispositivo (Device Name), la definición de los tiempos de actualización de red (Update Time) para garantizar el determinismo en el lazo de control, y el establecimiento de la topología física.

- ♣ Siemens AG, '*SIMATIC S7 S7-1200 Programmable controller: System Manual*', V4.4, N.º de artículo A5E02486680-AN, Nov. 2019.

Este manual es el documento técnico oficial que define la arquitectura, configuración y programación de los controladores lógicos de esta familia. En la plataforma experimental, este manual fundamenta el diseño del sistema de control principal al establecer rigurosamente los límites operativos de la CPU elegida, tales como la capacidad de memoria y el tamaño máximo de los bloques lógicos (OB, FC, FB y DB). Su aplicación proporciona las directrices exactas para estructurar el software en TIA Portal, gestionar interrupciones de diagnóstico y configurar la red PROFINET, garantizando que el PLC ejecute las rutinas de control y el intercambio de datos con los variadores Sinamics G120 de manera robusta y determinística.

- ♣ PROFIBUS & PROFINET International (PI), '*PROFINET Cabling and Interconnection Technology Guideline for PROFINET*' Version 5.3, Orden N.º 2.252, Mayo 2023.

El documento "PROFINET Cabling and Interconnection Technology Guideline" es la normativa técnica oficial de la organización PROFIBUS & PROFINET International que establece los estándares y mejores prácticas para el diseño, selección e instalación de la capa física en redes industriales, detallando las especificaciones rigurosas de cables, conectores (como los RJ45 industriales) y sistemas de blindaje necesarios para una transmisión de datos robusta.

1.2.2 Equipos de Potencia y Accionamiento

- ♣ Siemens, '*SINAMICS PM240 Power Module Data Sheet*', Art. No. 6SL3224-0BE13-7UA0, 2017.

La hoja de datos de este módulo, asociado a la Control Unit, valida que está correctamente dimensionado para el motor de 0.37 kW. Sus especificaciones de corriente de salida y capacidades de sobrecarga son críticas para manejar los transitorios de par durante los cambios en los perfiles de carga programables sin dañar el equipo.

- ♣ Siemens, '*1LA7 Induction Motor Data Sheet*', Model 1LA7073-4AB10', 2025.

La integración de esta hoja de datos del motor a utilizar es fundamental para el desarrollo del proyecto, ya que entrega los parámetros nominales de placa (como la potencia de 0.37 kW, la velocidad de 1370 RPM y el torque nominal de 2.6 Nm) estrictamente necesarios para la puesta en marcha. Estos valores permiten configurar y parametrizar de forma precisa los algoritmos de control vectorial (VC/SLVC) en las unidades de control de los variadores Sinamics G120.

- ♣ Siemens AG, '*SINAMICS - Low Voltage Engineering Manual*', S150, Versión 4.0, May. 2008.

El manual de ingeniería "SINAMICS - Low Voltage Engineering Manual" de Siemens es un referente técnico que expone los principios fundamentales de operación, las directrices de compatibilidad electromagnética (EMC) y los criterios de dimensionamiento para sistemas de accionamiento de la familia SINAMICS. En el desarrollo de la plataforma experimental, este documento sustenta el marco teórico y eléctrico del diseño, proporcionando las bases físicas y matemáticas para la configuración de los lazos de control de torque y velocidad.

- ♣ Siemens AG, '*SINAMICS G120, SINAMICS G120D Frequency converter: Function Manual*', Ed. 08/2011, Firmware V3.2, N.º de artículo A5E01137279B AD, Ago. 2011.

El manual de funciones "SINAMICS G120, SINAMICS G120D Frequency converter" de Siemens es un documento técnico especializado que describe en detalle la estructura interna, la parametrización y los algoritmos de control integrados en el G120. Para el desarrollo de la plataforma experimental, este manual es una herramienta clave, ya que explica el funcionamiento de la tecnología BICO (Binector-Connector Technology) y los lazos de control interno del accionamiento. Su uso permite justificar la configuración exacta de los parámetros del variador para que opere bajo algoritmos de control vectorial y de torque, posibilitando que el motor actúe de manera precisa como una carga mecánica programable.

- ♣ R. Cárdenas Dobson, '*Control Vectorial de Máquinas Jaula de Ardilla*', Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica.

El documento "Control Vectorial de Máquinas Jaula de Ardilla" del Dr. Roberto Cárdenas Dobson, presentado en la Universidad de Chile, es una clase que profundiza en las bases teóricas y la implementación práctica de algoritmos avanzados para el accionamiento de motores de inducción. En el marco del proyecto de título, esta presentación proporciona el sustento académico y matemático necesario para comprender y justificar el funcionamiento interno de las unidades de control de los variadores Sinamics G120. En particular, sus detalladas explicaciones sobre el control vectorial indirecto, las transformaciones de coordenadas (ejes d-q) y el diseño de lazos de control de corriente, flujo y velocidad resultan invaluable para configurar adecuadamente la plataforma experimental.

- ♣ B. Wu, '*High-Power Converters and AC Drives*'. Hoboken, NJ, USA: IEEE Press/Wiley, 2006.

El libro "High-Power Converters and AC Drives" es una obra de referencia académica exhaustiva que aborda en profundidad las topologías de los convertidores de potencia, las técnicas de modulación (como PWM) y los esquemas de control avanzado para accionamientos de corriente alterna. En el contexto de la plataforma experimental, esta literatura proporciona el marco teórico riguroso necesario para comprender la etapa de potencia, la síntesis de voltaje y las estrategias de conmutación internas de los variadores Sinamics G120. Su integración en la investigación permite fundamentar matemáticamente los algoritmos de control dinámico aplicados al motor de inducción, justificando cómo el accionamiento manipula las corrientes del estator para emular con alta fidelidad el comportamiento de una carga mecánica programable, lo cual asegura el rigor científico y la validez técnica de los ensayos realizados en el laboratorio.

1.2.3 Sistema de Alimentación

- ♣ Siemens, '*SITOP Power Supply Data Sheet*', Model 6EP1333-1LB00, 2025.

La documentación de esta fuente garantiza que puede entregar una tensión estable de 24 [V] DC con la potencia suficiente (120 [W]) para alimentar de manera confiable al PLC y a las unidades de control de los variadores, protegiendo la electrónica sensible de fluctuaciones durante todas las pruebas experimentales.

1.2.4 Sistema de Medición

- ♣ Autonics, *‘E40 Series 40 mm Diameter Incremental Rotary Encoders Instruction Manual’*, Busan, Republic of Korea, TCD210019AD, Jul. 2021.

Este instructivo contiene la información completa de instalación, cableado, conexión eléctrica y especificaciones mecánicas necesarias para integrar correctamente el encoder E40S6-1024-3-T-4 con la unidad de control CU250S-2, asegurando una señal de realimentación confiable para el control de torque de alta precisión.

- ♣ Autonics, *‘Rotary Encoder Technical Overview’*, Busan, Republic of Korea, 2025.

Este manual proporciona los fundamentos técnicos generales sobre el funcionamiento, tipos de señales, formatos de salida y consideraciones de aplicación de los encoders incrementales, información esencial para comprender el principio de operación del encoder E40S6-1024-3-T-4 y asegurar su correcta implementación en la unidad de control.

1.2.5 Investigaciones Anteriores

- ♣ Chiliquinga Chanaluisa, E. D. & Iza Iza, G. A., *‘DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA ANÁLISIS DE VARIABLES ELÉCTRICAS EN EL ARRANQUE DE MOTORES’*, Universidad Técnica de Cotopaxi, 2023.

La documentación detalla el diseño y construcción de un banco de pruebas desarrollado en la Universidad Técnica de Cotopaxi, cuyo propósito es registrar y analizar las variables eléctricas que intervienen específicamente durante el arranque de motores. La principal similitud que comparte con este proyecto es que ambos consisten en el desarrollo práctico de plataformas experimentales o bancos de ensayo con fines académico-didácticos orientados al estudio de motores eléctricos. La principal diferencia radica en que el documento se centra en el comportamiento eléctrico del arranque de motores, en cambio, este proyecto se focaliza en las distintas cargas programables.

- ♣ Vargas García, J. A., *‘Desarrollo de un sistema de supervisión IoT para un banco de pruebas utilizando autómatas programables PLC S7-1200 y LabVIEW’*, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2022.

El documento de Vargas García detalla el desarrollo de un sistema de supervisión para un banco de pruebas empleando un autómata programable S7-1200 programado mediante TIA Portal. Este trabajo tiene similitud metodológica y tecnológica con el presente proyecto, ya que ambos

fundamentan su arquitectura en el ecosistema de Siemens para la gestión, control y monitoreo de plataformas experimentales.

- ♣ Alvarado Pérez, E. W., Proaño Andrade, R. I. & Vera Suárez, C. X., '*DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA CONTROL INDUSTRIAL PROGRAMABLE*', Universidad Politécnica Salesiana, 2015.

El documento presenta el diseño e implementación de un banco de pruebas enfocado en el control industrial programable para el análisis de motores eléctricos trifásicos asincrónicos. Este trabajo comparte con el actual proyecto de habilitación profesional el objetivo de integrar variadores de frecuencia y controladores lógicos programables (PLC) para evaluar el comportamiento del motor en un entorno experimental.

- ♣ Franco Mejía, E., Posada, J. & Ramírez, J. M., '*Banco de pruebas para motores de inducción*', Universidad del Valle', 2008.

El documento describe el desarrollo de un banco de pruebas para motores de inducción orientado a la docencia e investigación para el control V/F, el cual incorpora un emulador de cargas mecánicas.

A diferencia del presente proyecto, en este documento se utilizó elementos distintos para el desarrollo de comunicación y operación de la plataforma experimental. Por lo cual no cuenta con el protocolo industrial estandarizado PROFINET ni con la tecnología industrializada Siemens.

- ♣ Torres Rincón, E. V., '*BANCO DE PRUEBAS Y CONTROL PARA MOTORES DE INDUCCION DE PEQUEÑA POTENCIA*', Universidad Autónoma de Occidente, 2008.

El documento presenta el desarrollo de un banco de pruebas para motores de inducción de baja potencia con el objetivo de proveer una herramienta física y didáctica que permita la validación y el análisis práctico de estrategias de control en motores de corriente alterna.

A diferencia del presente proyecto, en este documento se utilizó una tarjeta de desarrollo con un microcontrolador (MC68HC908MR32) que utiliza el protocolo de comunicación mark/space NRZ. Por lo cual no cuenta con el protocolo industrial estandarizado PROFINET ni con la tecnología industrializada Siemens.

1.2.6 Discusión

El análisis de la documentación técnica confirma la viabilidad del proyecto, demostrando que todos los componentes seleccionados presentan compatibilidad técnica y cuentan con las

funcionalidades requeridas para el sistema. Los variadores pueden operar en los modos de control especificados, el PLC posee la capacidad de comunicación necesaria para la integración vía PROFINET, y los equipos de potencia están correctamente dimensionados para operar en conjunto.

El desempeño del sistema estará determinado principalmente por las capacidades establecidas en el firmware de los componentes, particularmente en lo que respecta a la efectividad del Control Vectorial sin Sensor (SLVC), la cual depende directamente de los algoritmos implementados por el fabricante en la unidad de control del variador G120. Por lo tanto, la contribución de este trabajo no reside en desarrollar nuevos algoritmos de control, sino en integrar todos estos equipos, programarlos y demostrar su funcionamiento coordinado como un sistema completo. El valor principal está en crear una herramienta práctica que permita representar y medir las diferencias entre las estrategias de control V/F y SLVC, transformando los conceptos teóricos en una demostración concreta y cuantificable.

1.3. Indicador de Logro

El proyecto se considerará acabado cuando se tenga un equipo experimental de carga programable basado en tecnología Siemens, que permita evidenciar el desempeño de los tipos de control V/F y el Vectorial sin Sensor (SLVC) en el accionamiento G120.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar e implementar una plataforma experimental de carga programable, basada en tecnología Siemens, para demostrar el desempeño de las estrategias de control de velocidad de motores de inducción V/F y Sensorless Vector Control (SLVC).

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar la arquitectura de la plataforma experimental, considerando los componentes dispuestos desde la empresa RP Ingeniería.
- Implementar una plataforma experimental instrumentada que permita la generación de perfiles de carga controlados y la adquisición de variables eléctricas y mecánicas relevantes.
- Evaluar el desempeño dinámico y en estado estable del conjunto bajo diferentes condiciones.

1.5. Alcances y Limitaciones

- Se utilizarán exclusivamente los equipos, sistemas y software ya disponibles en las instalaciones de la empresa RP Ingeniería.
- Las estrategias de control de velocidad a implementar y demostrar serán V/F (Voltaje/Frecuencia) y Sensorless Vector Control (SLVC).
- Las curvas de par-velocidad programables serán torque constante y torque cuadrático.
- Las curvas de velocidad programable para el accionamiento maestro serán velocidad constante y aumento escalonado.
- Los sistemas de control de velocidad y par operarán dentro de los límites funcionales que posea el firmware de las tarjetas de control (CU) de los accionamientos Sinamics G120 existentes.
- La lectura y escritura de datos entre el PLC y los variadores se realizará utilizando el protocolo PROFINET RT.

1.6. Temario y Metodología

La metodología que se utilizó para el desarrollo del presente proyecto comienza con la recopilación de manuales y DATA SHEET de los distintos componentes de la plataforma experimental a partir del listado de componentes realizado. Posteriormente se estudió la viabilidad del proyecto a partir de la base teórica de los distintos elementos de la plataforma. Realizando el análisis del comportamiento de esta en base a los conocimientos teóricos y técnicos tanto de los documentos Siemens como los documentos académicos. Luego se realizó el diseño de la plataforma experimental, tanto de manera físico como en software. Finalmente, con la plataforma experimental implementada tanto físicamente como en su sistema de comunicación se realizan las pruebas requeridas para su posterior análisis.

El temario realizado en este informe de tesis se basa en lo requerido por la empresa mandante y se divide en los siguientes capítulos:

En el Capítulo 1: Introducción, presenta el contexto del proyecto, sus objetivos y el trabajo previo. Se realiza una revisión de la documentación técnica de los componentes Siemens (variadores G120, PLC S7-1200, comunicación PROFINET) y los académicos, que servirán como base para el diseño y desarrollo del sistema experimental.

Capítulo 2: En este capítulo, se expone el estudio de viabilidad de la plataforma experimental en base a sus principales componentes.

En el Capítulo 3: Se diseñó la plataforma experimental, tanto en la parte de implementación

física como en la implementación digital de los principales elementos de la plataforma.

En el Capítulo 4: Se implementó lo diseñado en el capítulo anterior, tanto físicamente como en las plataformas STARTDRIVE y TIA PORTAL

En el Capítulo 5: Pruebas y Evaluación de Resultados, se describen las pruebas que se realizarán en la plataforma experimental y el posterior análisis y evaluación de resultados de estas.

En el Capítulo 6: Conclusiones, se realizan las conclusiones generales del proyecto, ya con todo el desarrollo realizado.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Introducción

En este capítulo se expone el marco teórico de la plataforma experimental, en el cual se basó su viabilidad.

2.2. Plataforma Experimental

La plataforma experimental corresponde a un banco de pruebas que busca emular perfiles de carga mecánica de torque. A su vez, cuenta con un sistema instrumentado basado en tecnología Siemens, la cual es utilizada a nivel industrial. El esquema general de este sistema se ilustra en la Fig. 2.1.

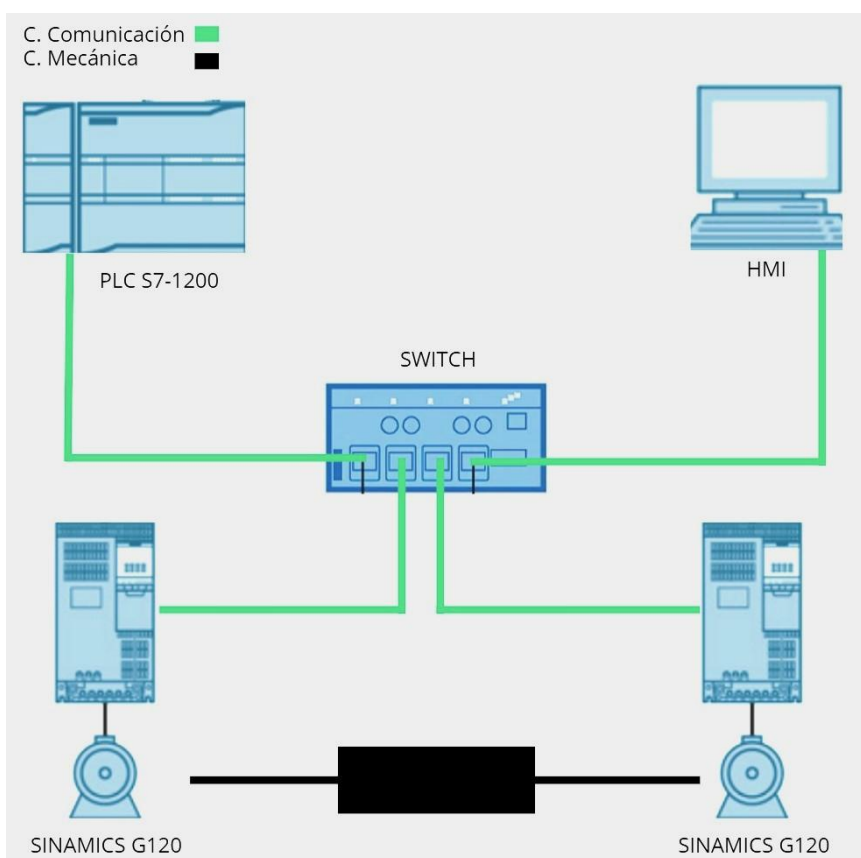


Fig. 2.1: Esquema General de Plataforma Experimental

El esquema general de la plataforma experimental, presentado en la Fig. 2.1, se compone de cinco elementos: los accionamientos G120 (con motores de inducción), el controlador lógico programable (S7-1200), el sistema de supervisión (HMI) y un switch de comunicación.

En el esquema se acoplan dos accionamientos industriales (G120) mediante su eje mecánico,

lo cual permite emular cargas mecánicas. Además, la plataforma es un sistema instrumentado con comunicación mediante el switch de sobremesa, el cual opera como nodo central de la red vía PROFINET.

El sistema busca principalmente emular una carga mecánica en el eje, con el objetivo de simular equipos industriales utilizados en conjunto con accionamientos eléctricos bajo el protocolo PROFINET.

2.2.1 Tipos de Torque

El torque es una magnitud vectorial que cuantifica el efecto de giro de una fuerza aplicada sobre un objeto [35].

En el contexto de características de cargas en accionamientos eléctricos, el torque de carga total determina el torque eléctrico que debe desarrollar el motor en régimen estacionario, lo cual se representa en la Ecuación (2.1) [37].

$$T_{L,tot} = T_L + B \cdot w_m \quad (2.1)$$

Con $T_{L,tot}$ como torque de carga total, T_L como torque de carga útil, velocidad angular del motor $w_m(t)$ y el coeficiente de roce viscoso B .

El torque de carga útil (T_L) es el torque requerido para realizar el trabajo mecánico útil, este se divide en dos: según sentido de torque (Cargas potenciales o reactivas) y según el tipo de dependencia del torque [37].

Existen 3 clases de dependencia del torque: Clase 1 (Depende de velocidad), Clase 2 (Depende de la posición) y Clase 3 (Depende del tiempo y proceso) [37].

Existen 4 tipos de carga clase 1 para los motores de inducción: constante, cuadrático, lineal e hiperbólico [36].

La carga constante se visualiza en la Fig 2.2. Esta función constante representa distintos equipos industriales, por ejemplo: grúas, mecanismos de tracción y cintas transportadoras [36].

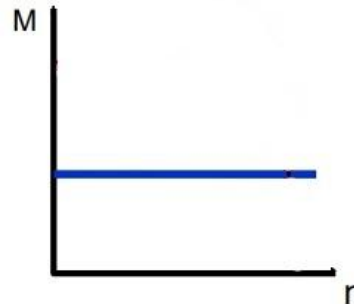


Fig. 2.2: Curva Torque v/s Velocidad: Torque Constante

La carga cuadrática se observa en la Fig 2.3. Esta función constante representa distintos equipos industriales, por ejemplo: ventiladores y bombas centrífugas [36].

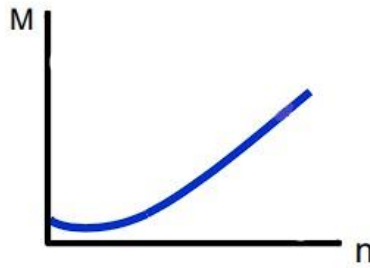


Fig. 2.3: Curva Torque v/s Velocidad: Torque Cuadrático

La carga lineal se ilustra en la Fig 2.4. Esta función constante representa distintos equipos industriales, por ejemplo: calandras plásticas [36].

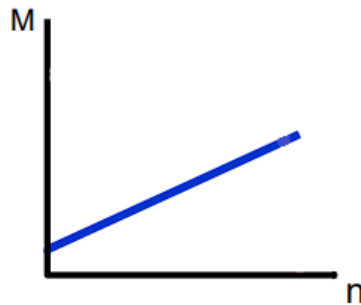


Fig. 2.4: Curva Torque v/s Velocidad: Torque Lineal

La carga hiperbólica se muestra en la Fig 2.5. Esta función constante representa distintos equipos industriales, por ejemplo: bobinadores y Debobinadores [36].

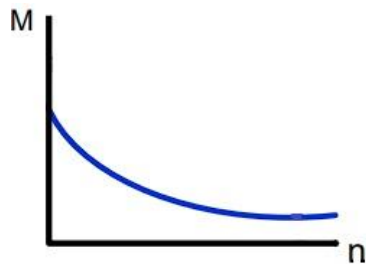


Fig. 2.5: Curva Torque v/s Velocidad: Torque Hiperbólico

2.2.2 Análisis del Comportamiento

La plataforma experimental tiene un comportamiento en el cual dos motores interactúan mediante su eje, ejerciendo una fuerza rotacional en sentido opuesto entre sí. Por lo tanto, se realizó un análisis rotacional con enfoque en las relaciones físicas y el modelo dinámico del sistema.

Las relaciones físicas de la plataforma experimental se centran en la relación de velocidad e inercia existente entre los componentes que interactúan.

La velocidad de ambos motores es igual debido al acoplamiento entre estos [1]. Esta relación se describe mediante la ecuación (2.2).

$$w_{mv}(t) = w_{mt}(t) = w_{ac}(t) \quad (2.2)$$

Siendo $w_{mv}(t)$ la velocidad angular en el eje del motor que controla su velocidad, $w_{mt}(t)$ la velocidad angular en el eje del motor que controla su torque y $w_{ac}(t)$ la velocidad angular en el acople.

La inercia en el eje de los motores se describe en la ecuación (2.3).

$$J_{eq} = J_{mv} + J_{mt} + J_{ac} \quad (2.3)$$

Con J_{eq} correspondiendo a la inercia equivalente del conjunto, J_{mv} la inercia del motor que controla su velocidad, J_{mt} la inercia del motor que controla su torque y J_{ac} la inercia del acople.

El modelo dinámico desarrollado describe la evolución de las variables del sistema basándose en la segunda ley de Newton para el movimiento rotacional.

Dado que la velocidad de los tres componentes que interactúan es igual, según lo establecido en la ecuación (2.2), se asume que es solo un objeto que gira a velocidad angular del motor $w_m(t)$ con una inercia J_{eq} . Esta velocidad de rotación es provocada por la interacción de los torques generados por cada accionamiento, tal como se ilustra en la Fig. 2.6.

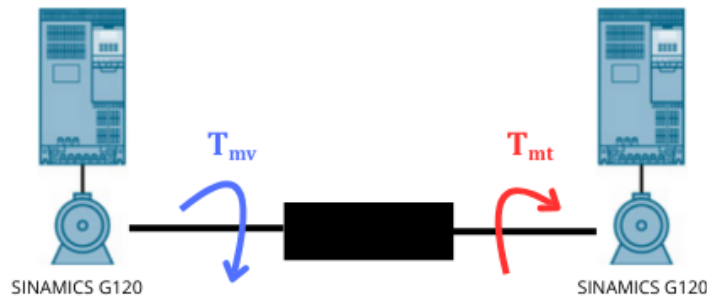


Fig. 2.6: Representación de Interacción entre Accionamientos

Al aplicar la segunda ley de Newton en la unión de los motores de la Fig. 2.6, se obtiene la ecuación (2.4) [3].

$$T_{mv} = T_{mt} + J_{eq} \cdot \frac{dw_m(t)}{dt} + B \cdot w_m(t) \quad (2.4)$$

Siendo T_{mv} el torque del motor que controla su velocidad y T_{mt} el torque del motor que controla su torque. Además, la ecuación (2.4) está planteada desde la perspectiva del accionamiento que controla la velocidad.

2.2.3 PROFINET

PROFINET (PROcess FieLd NETwork) visto en la Fig. 2.7 es un protocolo de comunicación desarrollado por la organización PROFIBUS & PROFINET International (PI) (con más de 1700 empresas miembro). Está diseñado para conectar dispositivos industriales con varios tipos de equipamiento productivo, como motores, sensores y otros dispositivos electrónicos. El protocolo fue diseñado para ser independiente del fabricante, lo que significa que los dispositivos de diferentes marcas pueden funcionar juntos sin problemas. Además, el protocolo se ha optimizado para proporcionar un rendimiento óptimo a través de soluciones innovadoras como la detección automática de equipamiento, herramientas de diagnóstico avanzadas y recuperación rápida en caso de fallas. Estas características hacen que las redes basadas en PROFINET sean ideales para los entornos industriales modernos [13].



Fig. 2.7: Logo PROFINET

2.3. Accionamientos G120

Un accionamiento es un sistema que en su forma final produce energía mecánica. Por su parte, un accionamiento eléctrico es un sistema capaz de convertir la energía eléctrica en energía mecánica, el cual actúa de intermediario entre la fuente de energía (red eléctrica) y la máquina accionada (proceso o aplicación) [38].

El accionamiento G120 físicamente se compone por un Power Module (PM) en conjunto de un Control Unit (CU) y se aprecia en la Fig. 2.8.



Fig. 2.8: G120

En particular el SINAMICS G120 es un convertidor de frecuencia modular y multifuncional diseñado para diversas tareas, como: Sistemas transportadores, transelevadores sencillos, Procesos continuos y Posicionamiento de ejes coordinados individuales o múltiples [28].

También se integra a la perfección con Totally Integrated Automation (TIA Portal) y SINAMICS Startdrive, por lo que tiene una ingeniería estándar para todos los variadores [28].

2.3.1 Power Module

El Power Module se compone de un rectificador, un DC-Link y un inversor. La plataforma experimental utilizó un PM-240 de la Fig. 2.9, sus características principales se ilustran en la Tabla 2.1 y 2.2.



Fig. 2.9: PM240

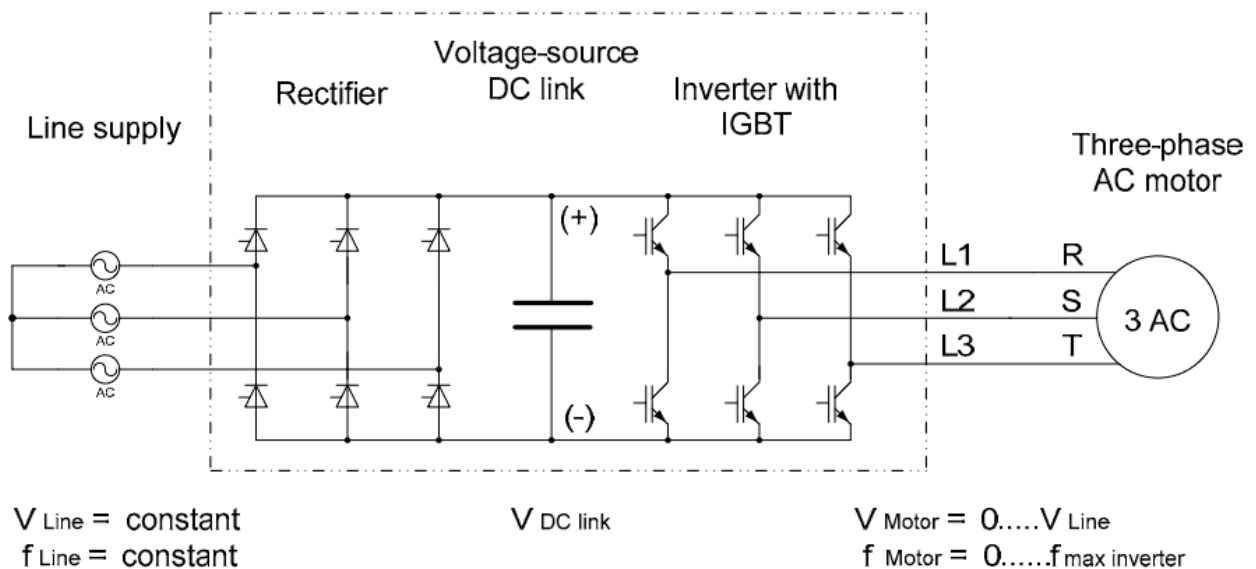
TABLA 2.1 Datos de entrada PM240.

Parámetro	Valor
Número de Fases	3 AC
Voltaje de Línea	[380 480] $\pm 10\%$ V
Frecuencia de Línea	[47 63] Hz
Corriente Nominal	1.7 A

TABLA 2.2 Datos de salida PM240.

Parámetro	Valor	
Numero de Fases	3	AC
Voltaje Nominal	400	V
Potencia Nominal	0.37	kW
Corriente Nominal	2.6	A
Frecuencia de Salida Control Vectorial	[0 200]	Hz
Frecuencia de Salida Control V/F	[0 550]	Hz
Factor de Potencia	0.85	
Eficiencia	0.97	

El Power Module alimenta al motor mediante su estator y su circuito se observa en la Fig. 2.10 [20].

**Fig. 2.10: Circuito equivalente del Power Module**

Los gráficos de los voltajes del Power Module se muestra en la Fig 2.11. En este aparecen las 3 fases de transformación de voltaje mediante electrónica de potencia con modulación PWM. En la primera ingresa el voltaje AC desde las líneas de alimentación. Luego al pasar por el rectificador se convierte en voltaje DC que se almacena en el DC-LINK funcionando como fuente de voltaje DC (VSI). Finalmente, al pasar por el inversor se convierte en energía AC de señal cuadrada que alimenta las fases del motor [20].

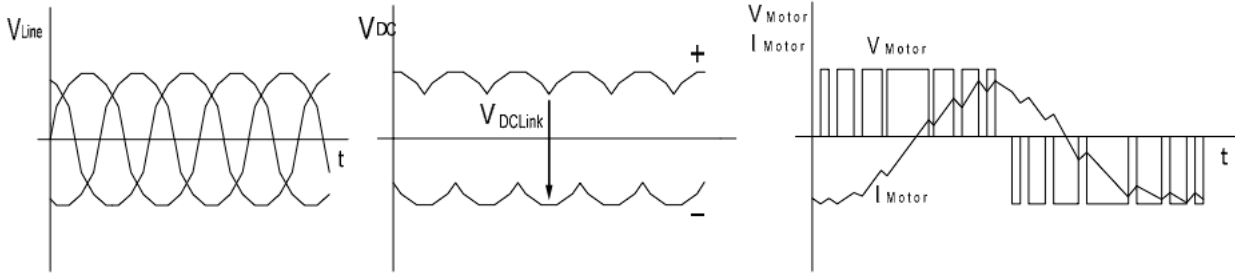


Fig. 2.11: Gráficos Power Module

El voltaje de salida del Rectificador (o de entrada en la VSI) se representa mediante la ecuación (2.3). Con V_{rect} siendo el Voltaje de salida del Rectificador, V_{DCLINK} Voltaje en el DC-LINK y V_{Line} voltaje de alimentación RMS [20].

$$V_{rect} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_{DCLINK} \quad (2.1)$$

$$V_{rect} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot 1.32 \cdot V_{Line} \quad (2.2)$$

$$V_{rect} = 1.03 \cdot V_{Line} \quad (2.3)$$

El Power module funciona como un VSI con V_{Line} constante como se visualiza en la Fig. 2.12. El circuito del inversor trifásico VSI se visualiza en la Fig. 2.37. Este permite la generación de señales alternas con amplitud y frecuencia variable y cuenta en la representación gráfica con un arreglo de semiconductores que permiten dos niveles de voltaje ($\frac{V_d}{2}$ y $\frac{-V_d}{2}$). Además, se puede apreciar dos puntos neutros (N y n) el cual da paso al Voltaje del modo común el cual tiene el triple de frecuencia y su amplitud se reduce en factor de 3, este voltaje permite la representación de voltajes de fases que dependan del estado de comunicación de los Switch (0 o 1), lo cual simplifica las ecuaciones [39].

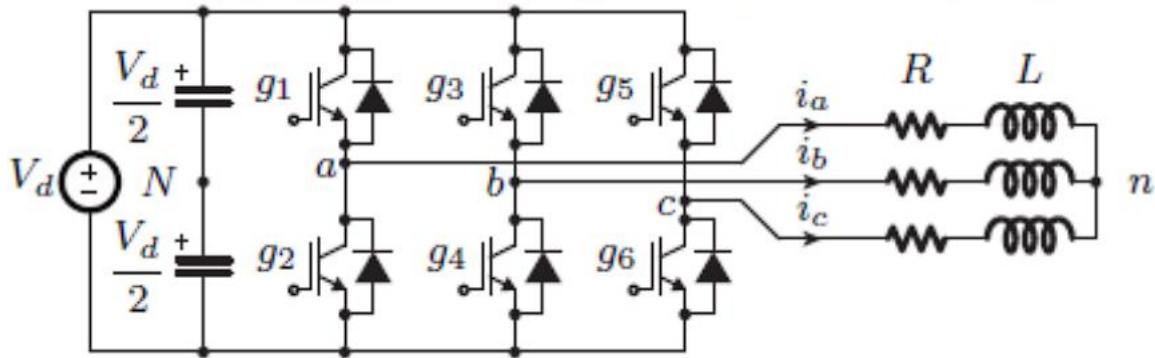


Fig. 2.12: Circuito del VSI Trifásico

El voltaje de salida expresado mediante el estado de los semiconductores se visualiza en las ecuaciones (2.4), (2.5) y (2.6). Con V_d siendo la fuente de alimentación DC, V_{aN} voltaje entre la Fase A y el punto N, V_{bN} voltaje entre la Fase B y el punto N, V_{cN} voltaje entre la Fase C y el punto N y g_N el estado de conmutación del Switch [39].

$$V_{aN} = \frac{V_d}{2} \cdot (g_1 - g_2) \quad (2.4)$$

$$V_{bN} = \frac{V_d}{2} \cdot (g_3 - g_4) \quad (2.5)$$

$$V_{cN} = \frac{V_d}{2} \cdot (g_5 - g_6) \quad (2.6)$$

Además, el voltaje entre neutros se visualiza en la ecuación (2.7). Con V_{nN} como el voltaje entre los neutros del VSI [39].

$$V_{nN} = \frac{V_{aN} + V_{bN} + V_{cN}}{3} \quad (2.7)$$

También, el voltaje entre neutros se visualiza en la ecuación (2.8). Con desde el punto de vista de los estados de los Switch [39].

$$V_{nN} = V_d \cdot \frac{(g_1 - g_2) + (g_3 - g_4) + (g_5 - g_6)}{6} \quad (2.8)$$

Comenzando con el principio de que si el semiconductor superior conduce crea un voltaje positivo, y que si el semiconductor inferior conduce crea un voltaje negativo y, además, que si ambos semiconductores conducen al mismo tiempo estos entran en cortocircuito. Se obtienen los siguientes voltajes vistos en la Fig. 2.13 [26].

v_a	v_b	v_c	v_{ab}	v_{bc}	v_{ca}	v_{an}	v_{bn}	v_{cn}
+	+	+	0	0	0	0	0	0
-	+	+	$-V_{DC}$	0	V_{DC}	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$
+	-	+	V_{DC}	$-V_{DC}$	0	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$
+	+	-	0	V_{DC}	$-V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$
-	-	+	0	$-V_{DC}$	V_{DC}	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$
+	-	-	V_{DC}	0	$-V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$
-	+	-	$-V_{DC}$	V_{DC}	0	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$
-	-	-	0	0	0	0	0	0

Fig. 2.13: Voltajes Dependiendo de la Secuencia de Estados de los Switch en el VSI

2.3.2 Control Unit

La unidad de control supervisa y controla el módulo de potencia y el motor conectado en varios modos diferentes. Admite la comunicación con un controlador local o central y el control de los dispositivos [29].

Para la plataforma experimental se utilizaron dos modelos distintos de CU el CU240E-2 PN y el CU250S-2 PN vistas en la Fig. 2.14. Sus características de control se visualizan en la Tabla 2.3 a la 2.6.



Fig. 2.14: Control Unit

(a) CU240E-2 PN (b) CU250S-2 PN

TABLA 2.3 Datos de Comunicación CU240E-2.

Parámetro	Valor
Interfaz Bus de Campo	USS/PROFINET/PROFIBUS
Zócalo de Conector RJ45	X2

TABLA 2.4 Métodos de regulación CU240E-2.

Tipo de Control
V/f lineal / Cuadrático / parametrizable
V/f con regulación de flujo (FCC)
Regulación vectorial, sin encoder
Regulación de par, sin encoder

TABLA 2.5 Datos de Comunicación CU250S-2 PN.

Parámetro	Valor
Interfaz Bus de Campo	USS/PROFINET/PROFIBUS
Zócalo de Conector RJ45	X2

TABLA 2.6 Métodos de regulación CU250S-2 PN.

Tipo de Control
V/f lineal / Cuadrático / parametrizable
V/f con regulación de flujo (FCC)
V/f ECO lineal / cuadrático
Regulación vectorial, sin encoder
Regulación vectorial, con encoder
Regulación de par, sin encoder
Regulación de par, con encoder

- **Modos de Control del Motor**

Los modos de control u Open-loop and closed-loop control de los accionamientos Sinamics G120 se clasifican en dos: V/f control y Field-orientated closed-loop. Esta última técnica de control que también se conoce como Control Vectorial se subdivide dependiendo si cuenta con retroalimentación física de velocidad como: Vector Control Without Speed Feedback (Sensorless Vector Control (SLVC)) y Vector Control With Speed Feedback (Vector Control (VC)) [12].

Los métodos de control de cada accionamiento específicos vienen dados desde sus CU, el MCV encuentra sus métodos de control en la Tabla 2.13, en cambio el MCT encuentra sus métodos de control en la Tabla 2.15.

- **V/F**

En el caso del V/F control de la plataforma experimental con Accionamiento G120. La tensión en el estator del motor de inducción se ajusta proporcional a la frecuencia de su CMR. El objetivo del control V/f es mantener el flujo Φ constante en el motor. En este caso, esto es proporcional a la corriente de magnetización I_M y, además, a la relación entre el voltaje V_ϕ y la frecuencia en el Estator F_e . Para generar el torque máximo posible a partir de una corriente dada, el flujo debe mantenerse constante en su valor nominal. Esto significa que el valor de la corriente de magnetización debe ser constante incluso si la frecuencia del estator cambia. Esto se puede lograr aproximadamente si el voltaje del estator V_ϕ se cambia de manera proporcional a la frecuencia del estator. El control característico V/f se deriva de estos principios básicos [12]. Los rangos de operación del V/F control se visualizan en la Fig 2.15 [12].

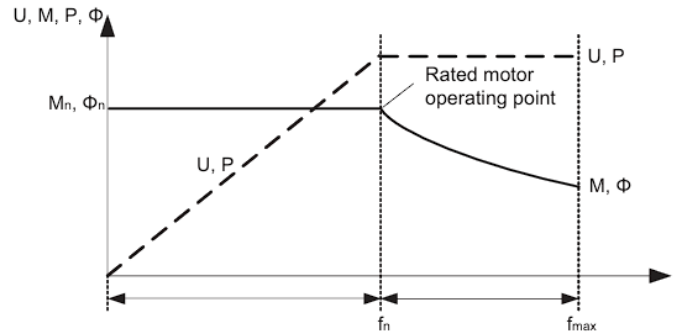


Fig. 2.15: Rangos de Operación V/F Sinamics

Ahora el V/f control visto desde el lado de los CU se ilustra en la Fig. 2.16.

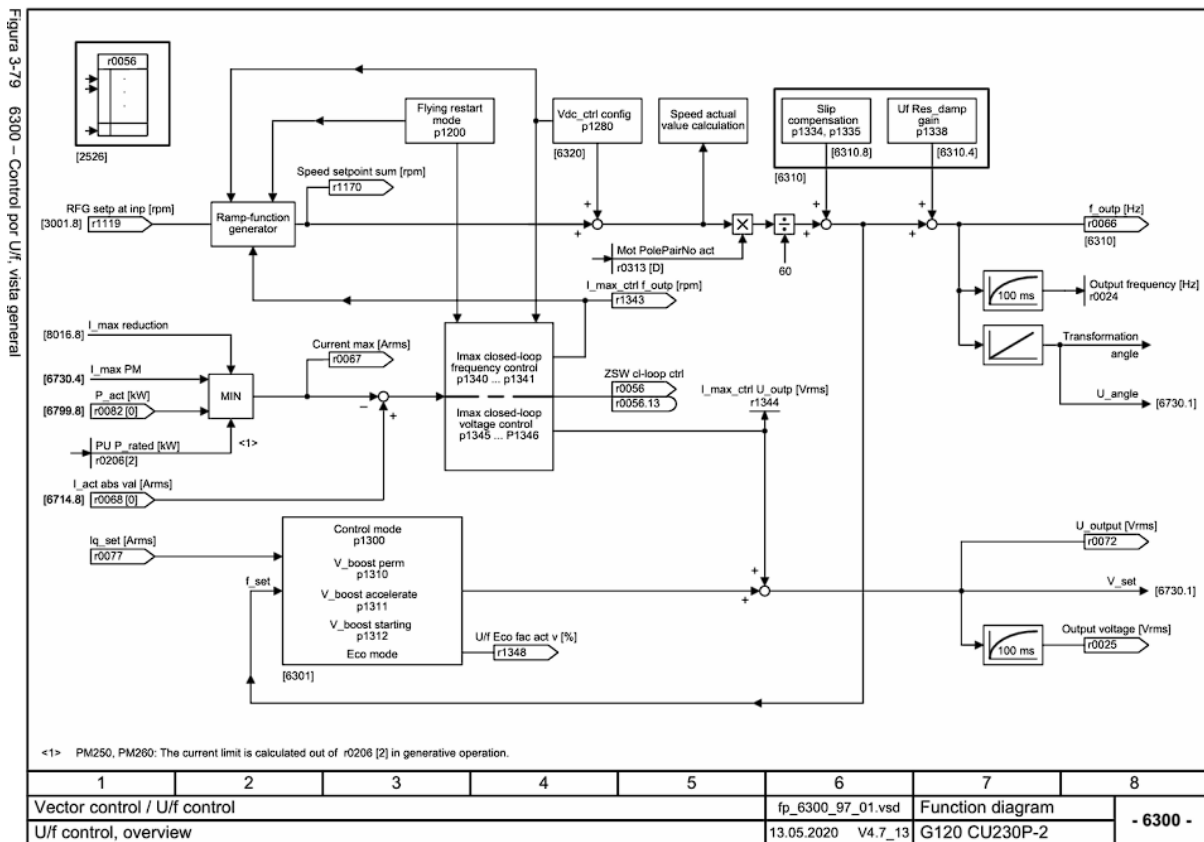


Fig. 2.16: V/F Sinamics G120

En el diagrama funcional del control V/F de la Fig. 2.16, la referencia de velocidad proveniente del PLC ingresa desde el bloque del generador de rampas (RFG) (r1119). Este bloque suaviza los cambios bruscos de la consigna, limitando la aceleración para evitar disparos por sobrecorriente (con valor en el parámetro r1343) debido a la inercia mecánica; además, cuenta con regulación del voltaje del DC-link (p1280). De este bloque sale la consigna de velocidad suma (r1170), a la cual luego se le añade el parámetro p1280. A la salida de esta sumatoria, el cálculo de velocidad estimada se multiplica

por el número de polos calculados (r313) y se divide por 60. De este modo se obtiene una frecuencia a la cual se le suma la frecuencia de deslizamiento de compensación (p1334 y p1335) y, consiguientemente, se le añade otra frecuencia de ganancia para la amortiguación de resonancia (p1338). Así se obtiene la frecuencia de salida set (r66). Además, la frecuencia set pasa por un filtro que da salida a su señal filtrada (r24) y, de igual manera, se obtiene la transformada del ángulo para las transformadas de valores rotacionales.

La frecuencia obtenida, antes de que se le sume la ganancia p1338, va al bloque en el que se le asigna una tensión. A la salida de este bloque se le suma la cantidad en que se reduce el voltaje a la salida del convertidor (r1344). Finalmente, se obtiene el voltaje de alimentación en el estator (r72), con lo cual se establecen los valores de V/f.

- Control Vectorial

Por el lado del Vector Control, este se basa en que para una situación de carga específica o par requerido en el rotor, la corriente del motor necesaria se aplica con relación al flujo del motor para la obtención del par requerido. La corriente del estator se lleva a un sistema de coordenadas rotatorias de esta manera vinculándose con el flujo del rotor, por lo que se puede descomponer la corriente generadora de flujo I_d que se alinea con el flujo del rotor y en el componente de corriente generadora de torque I_q que es perpendicular al flujo del rotor. Estos componentes se corrigen para seguir sus puntos de consigna en el controlador de corriente usando sus propios controladores PI dedicados y son cantidades iguales en operación en estado estacionario. Cabe mencionar que, en la condición de estado estacionario, el componente de corriente que genera el campo I_d es proporcional al flujo Φ y el torque es proporcional al producto de I_d e I_q [12].

El diagrama del Field-Oriented Closed-Loop se visualiza en la Fig. 2.17 [21]. En este diagrama se pretende mantener un error igual a cero en estado estacionario para las corrientes de cuadratura y del eje directo del estator, a partir de referencias y mediciones. Este esquema se compone de dos segmentos: uno de sincronización y otro estacionario, los cuales son posibles gracias a transformaciones matemáticas sobre un marco de referencia.

Por la izquierda del diagrama, a partir de las referencias del flujo del rotor (λ_r^*) y del torque eléctrico (T_e^*), se obtienen las corrientes del estator, tanto la de cuadratura (i_{qs}^*) como la del eje directo (i_{ds}^*). Además, a partir de la corriente de cuadratura, se obtiene la velocidad angular de deslizamiento (w_{sl}).

Por la derecha, se obtiene la velocidad angular mecánica (w_r) desde el motor, la cual, al sumarse con la velocidad angular de deslizamiento, permite obtener la velocidad angular del estator

(w_s); al integrar esta última, se obtiene el ángulo del flujo del rotor (θ_f). Este ángulo sirve de referencia para la transformada abc/dq de la medición de las corrientes trifásicas del estator (i_{as}, i_{bs}, i_{cs}) a i_{ds} y i_{qs} , lo que permite asegurar un error en estado estacionario igual a cero.

A la salida de la comparación de las corrientes, estas pasan por controladores PI, con lo cual se obtienen los voltajes de referencia v_{ds}^* y v_{qs}^* . Estos se transforman de dq a abc tomando como referencia el ángulo del flujo del rotor. Finalmente, se obtienen los índices de modulación que permiten establecer la señal PWM dirigida al VSI.

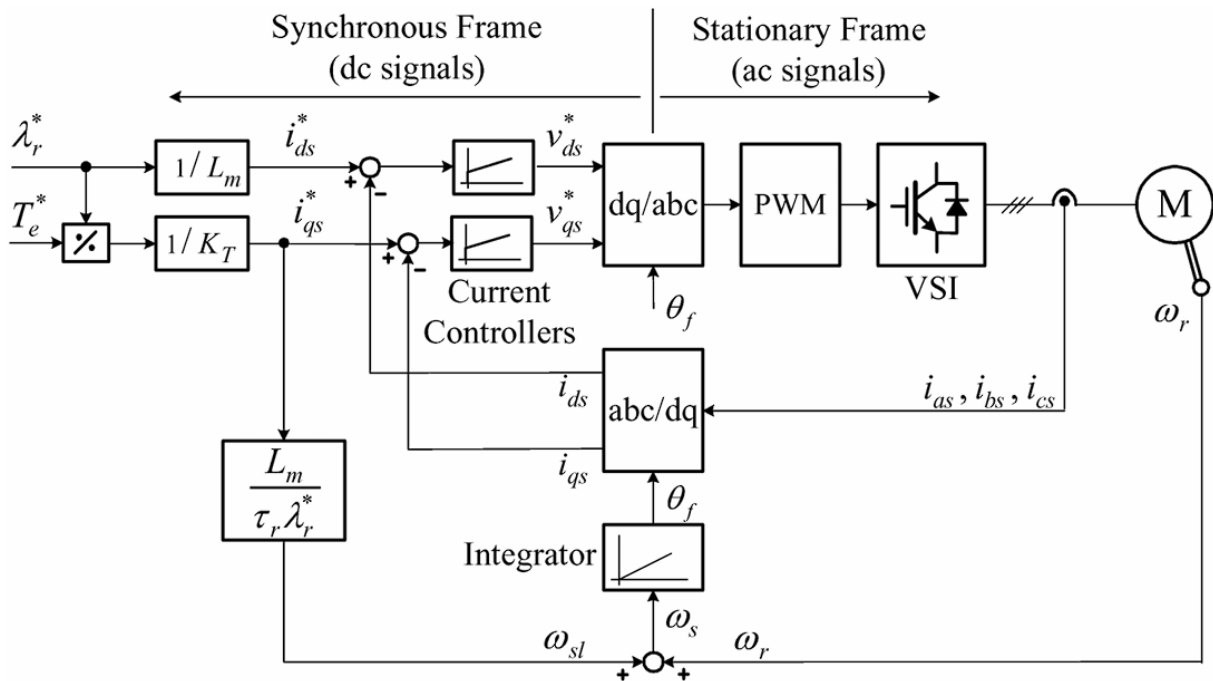


Fig. 2.17: Control Indirecto de Campo Orientado con Orientación del Flujo del Rotor

La ecuación que representa el ángulo del flujo en el rotor es la (2.17) [21].

$$\theta_f = \int (w_r + w_{sl}) dt \quad (2.17)$$

La ecuación que representa la constante de tiempo en el rotor es la (2.18) [21]. Con L_r siendo la inductancia en el rotor y R_r la resistencia en el rotor.

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (2.18)$$

La ecuación que representa la velocidad angular de deslizamiento es la (2.19) [21]. Con L_m siendo la inductancia de magnetización.

$$w_{sl} = \frac{L_m}{\tau_r \lambda_r^*} \cdot i_{qs}^* \quad (2.19)$$

La ecuación que representa la corriente de referencia de cuadratura es la (2.20) [21]. Con K_T siendo constante de torque.

$$i_{qs}^* = \frac{1}{K_T \lambda_r^*} \cdot T_e^* \quad (2.20)$$

La ecuación que representa la corriente de referencia de eje directo es la (2.22) [21].

$$i_{ds}^* = \frac{1}{L_m} \cdot \lambda_r^* \quad (2.22)$$

El diagrama del Field-Orientated Closed-Loop del G120 se representa mediante los diagramas funcionales para ambas CU y se visualiza en la Fig. 2.18. Este diagrama a su vez funciona en conjunto con los diagramas [6730], [6710], [6722], [6723] y [6714]. Estos últimos se visualizan desde la Fig. 2.18 a la Fig. 2.23.

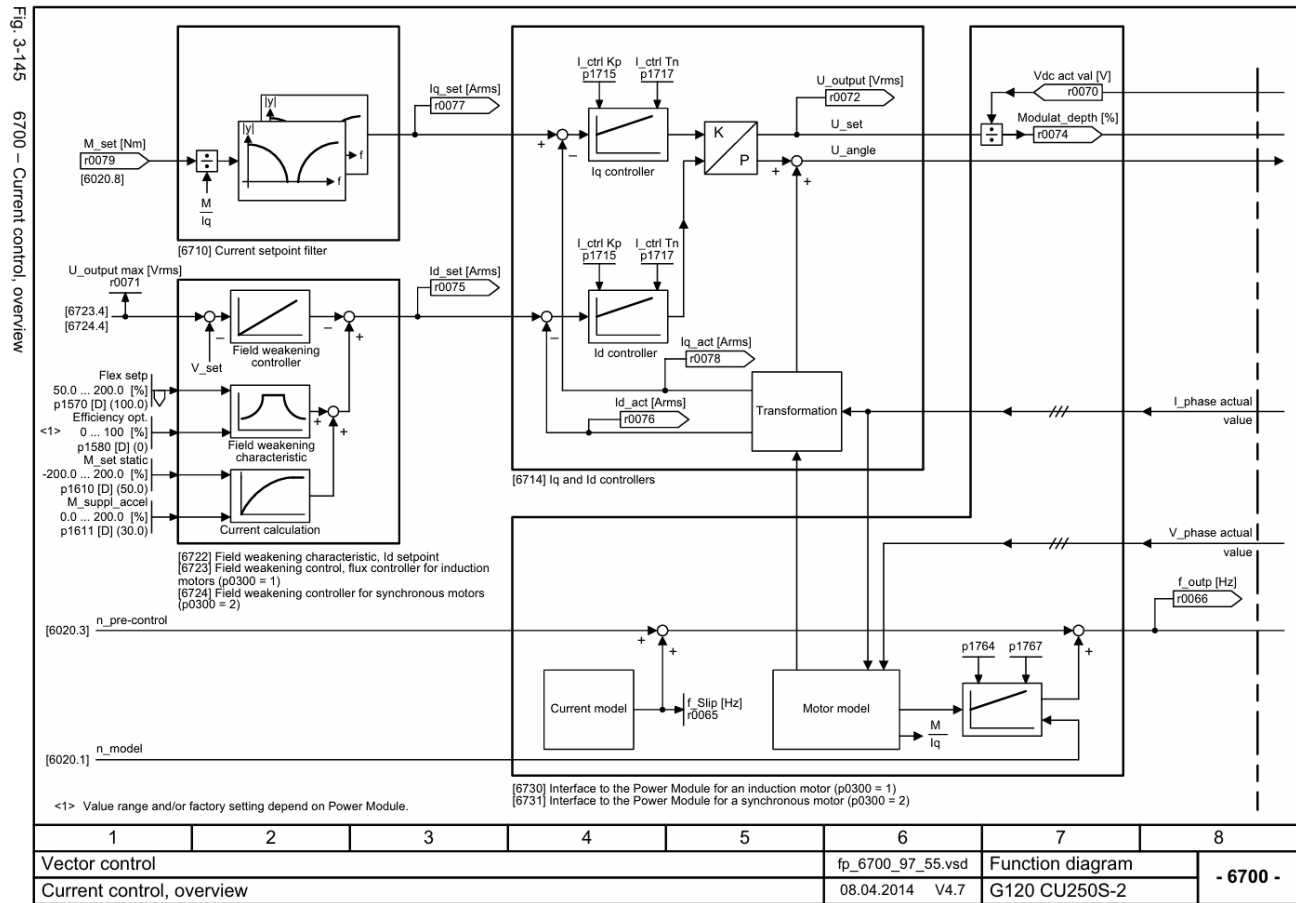


Fig. 2.18: Diagrama Funcional del Control Vectorial

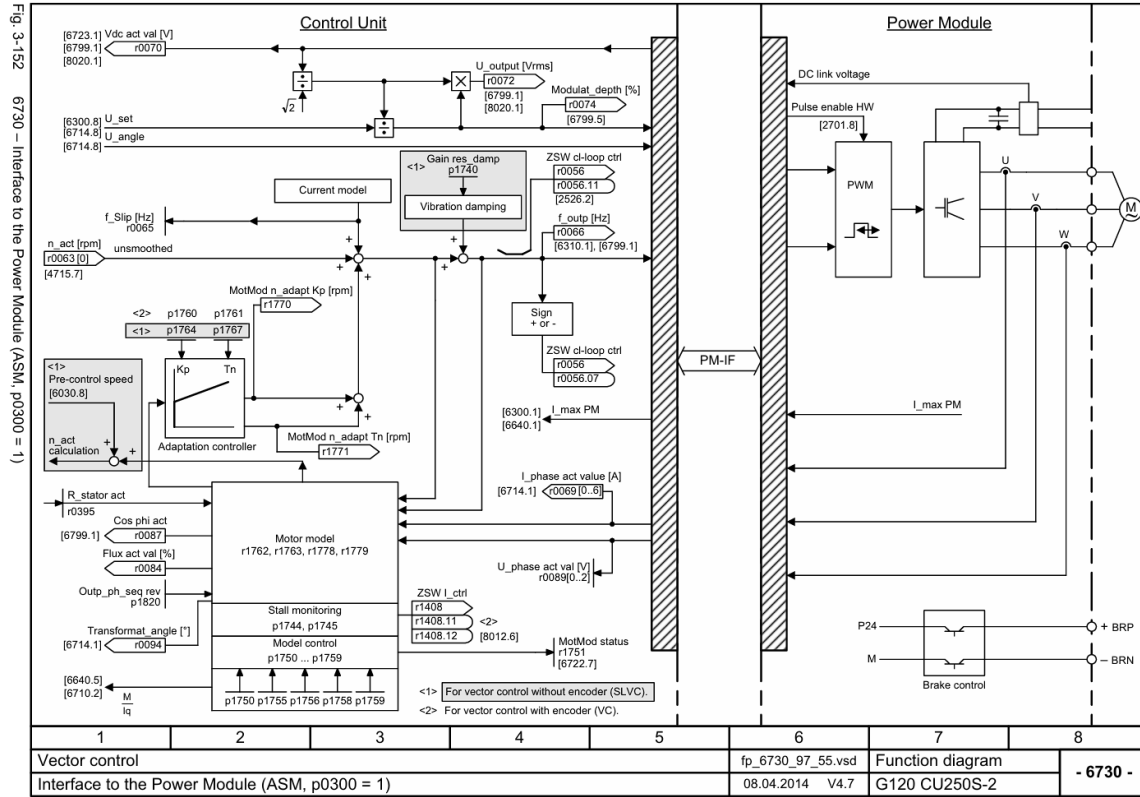


Fig. 2.19: Diagrama Funcional de la Interfase del Power Module

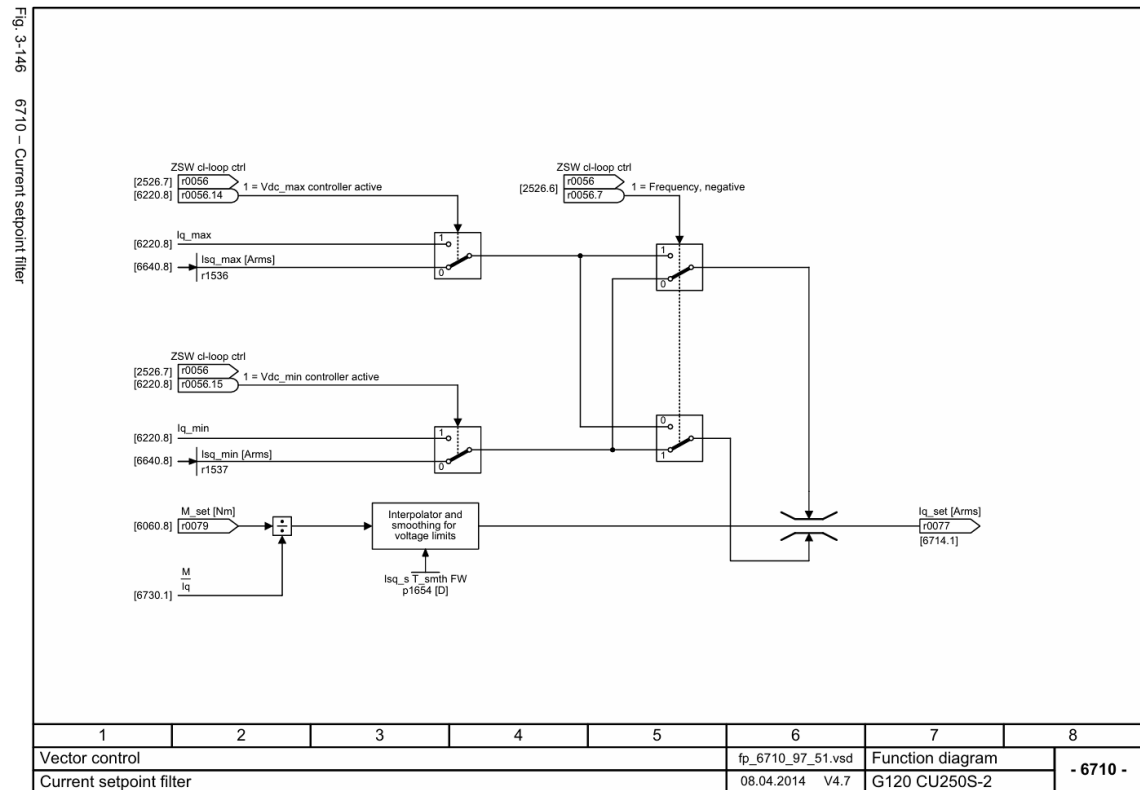


Fig. 2.20: Diagrama Funcional del Filtro de punto de consigna Iq

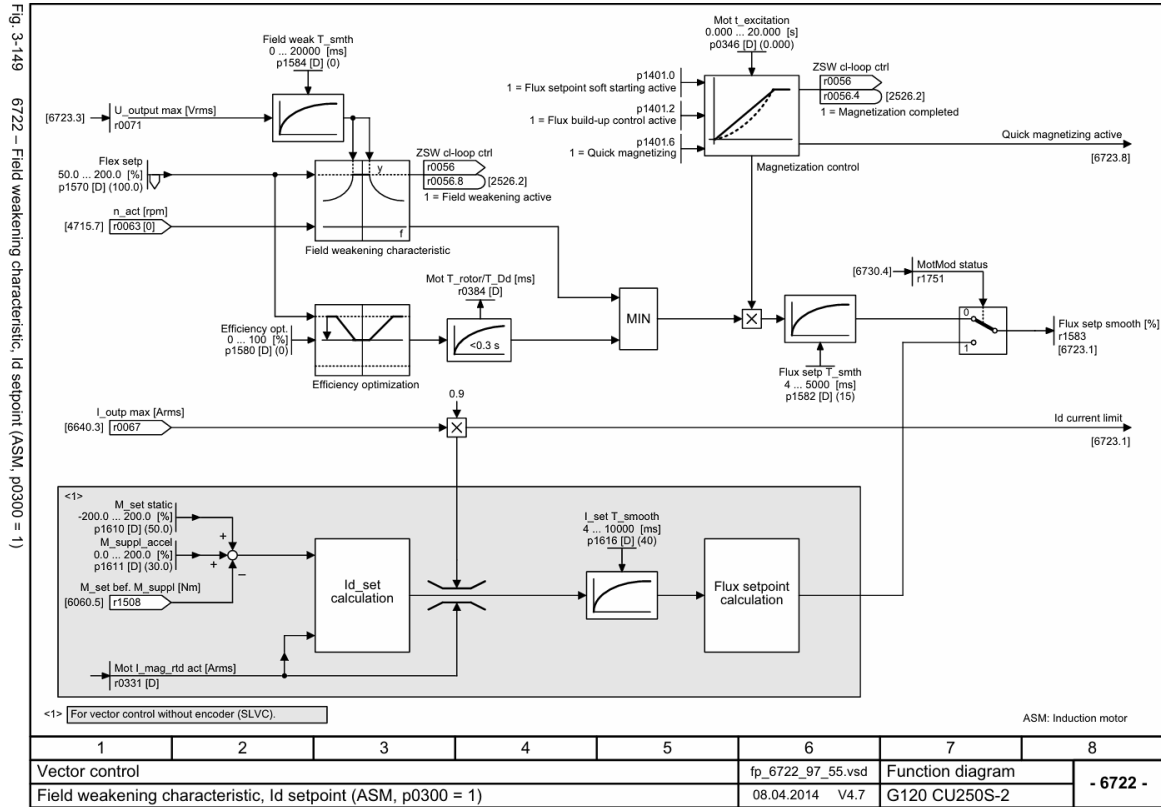


Fig. 2.21: Diagrama Funcional del Id Set Point

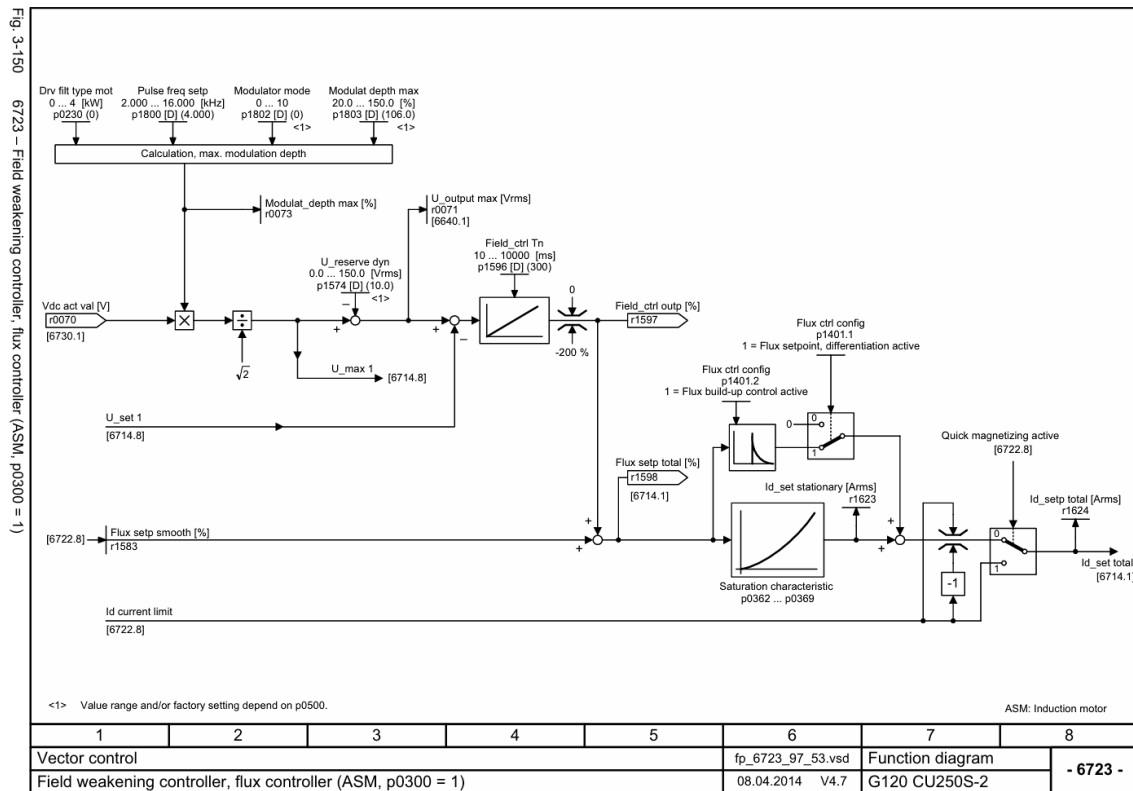


Fig. 2.22: Diagrama Funcional del Controlador de Flujo

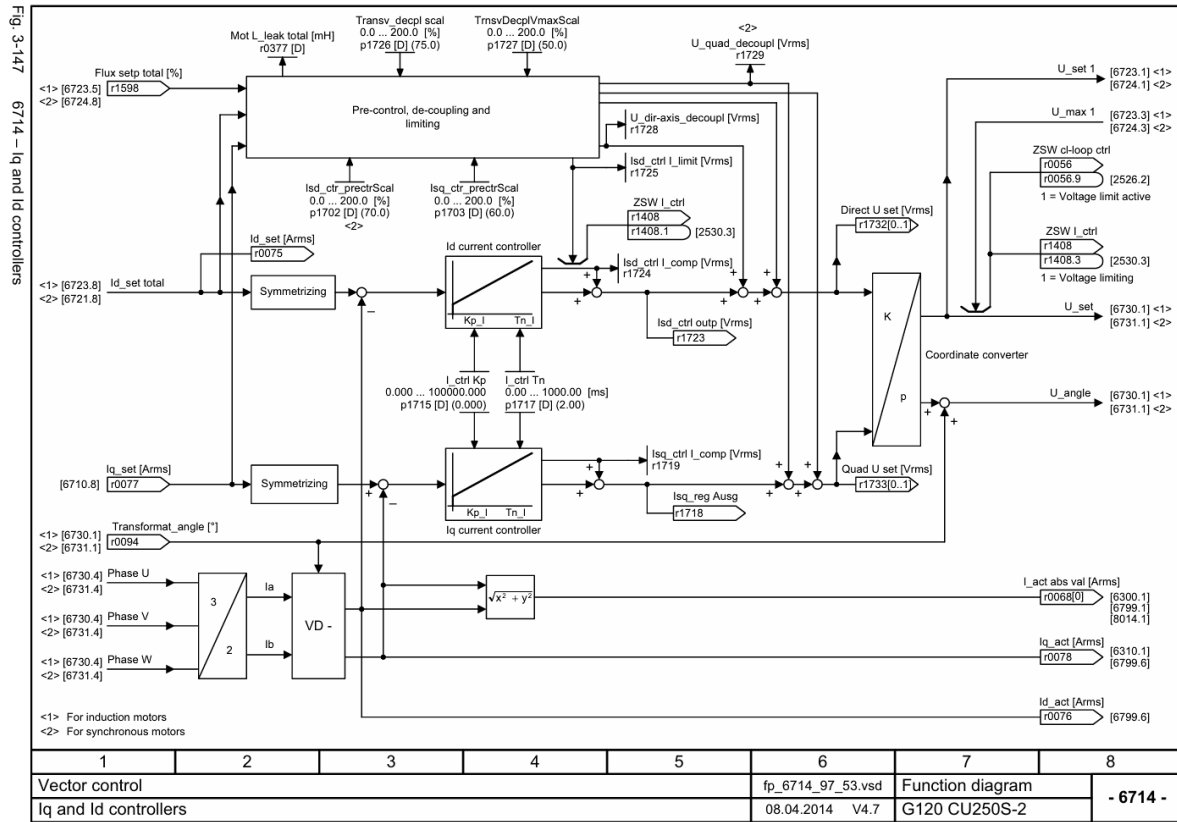


Fig. 2.23: Diagrama Funcional de los Controladores Iq e Id

En el diagrama de la Fig. 2.18, por la derecha se obtienen los valores trifásicos de corriente y voltaje desde el motor, los cuales ingresan al modelo del motor. A partir de esto, se obtiene el ángulo de la transformada (r94) (del diagrama 6730), la componente proporcional de adaptación de velocidad del modelo del motor (r1770 y r1771) (del Diagrama 6730) y la relación entre el torque y la corriente de cuadratura ($\frac{M}{I_q}$).

Por la parte superior izquierda se obtienen las referencias de las corrientes. La corriente de cuadratura se obtiene a partir del torque de referencia (r79), el cual se divide por la relación entre estas magnitudes ($\frac{M}{I_q}$). Luego, esta señal pasa por los límites de corriente de cuadratura (r1537 y r1536) (del Diagrama 6710), lo que da como resultado la referencia de la corriente de cuadratura (r77).

Por su parte, la corriente del eje directo toma una referencia basada en la diferencia entre la tensión máxima de salida (r71) y el punto de consigna de la velocidad real (V_set). A la salida pasa por el controlador de debilitamiento de campo. Este controlador se somete a una comparación con la sumatoria de la característica de debilitamiento del campo y el cálculo de la corriente, obteniéndose finalmente la referencia del eje directo (r75).

Estas referencias se comparan con la transformación de las mediciones de las corrientes trifásicas del motor, basada en el ángulo de transformación (r94) (del diagrama 6714). El error resultante de esta comparación ingresa a los correspondientes controladores PI, cuyos valores de ganancia y tiempo de integración se definen en los parámetros p1715 y p1717. Posteriormente, la señal ingresa al bloque K/P (Coordinate Converter), lo que determina la tensión de salida (r72). Este valor se divide por el voltaje del DC-link (r70), generando así la modulación de la señal PWM (r74). Asimismo, el bloque K/P entrega un ángulo que se suma al ángulo de la transformada (r94) (del Diagrama 6714), estableciendo de este modo el ángulo de la tensión.

En la parte inferior del diagrama se visualiza la frecuencia a la cual operará la señal PWM que modula los semiconductores del VSI. En esta sección se suma la frecuencia proveniente de la velocidad actual del motor (r63) (del Diagrama 6730) con la frecuencia de deslizamiento (r65). A la salida de esta sumatoria se le adiciona la componente proporcional de adaptación de velocidad del modelo del motor, la cual proviene de un controlador PI con valores de ganancia y tiempo integrativo en los parámetros p1764 y p1767 (p1760 y p1761 para el modo VC) (del diagrama 6730), dando paso a la frecuencia de salida (r66).

Como se mencionó anteriormente en el caso del G120 existen dos principales tipos de Control Vectorial el Vector Control without Speed Encoder (SLVC) y Vector control with speed feedback (Vector control (VC)).

Por el lado del Vector Control without Speed Encoder (SLVC) al no utilizar una retroalimentación de velocidad, la posición del flujo y la frecuencia del motor se debe determinarse utilizando el modelo de velocidad del motor [12]. Cabe destacar que a bajas frecuencias (≈ 0 Hz), el modelo no puede determinar la velocidad. Por lo cual se tiene la incapacidad del modelo para determinar la velocidad a ≈ 0 Hz, la incertidumbre en los parámetros del modelo y la inexactitud de la medición son las razones por las cuales se produce un cambio de operación controlada en lazo cerrado a lazo abierto en este rango [12].

Para utilizar el Vector control with speed encoder (VC), este requiere un Encoder. De igual manera al usar el control de velocidad con Encoder, puede ser necesario adaptar los cálculos del modelo del motor utilizando la parte integral y proporcional de la adaptación de velocidad (r1770/r1771), mediante los parámetros P1752 y P1756 [12].

Ya en los diagramas utilizados en el STARTDRIVE ambas técnicas de control (SLVC y VC) tienen la misma estructura de controlador de velocidad, incluyendo un controlador PI, un precontrol y Droop (asegura que el punto de ajuste de velocidad se reduzca proporcionalmente a medida que

• Comunicación de Accionamientos

Como se mencionó anteriormente, las CU tienen la capacidad de comunicarse con otros dispositivos, lo cual permite el intercambio de datos en un sistema de accionamiento instrumentado.

Los datos del sistema se intercambian mediante telegramas, los cuales están compuestos por una serie de palabras de 16 bits denominadas PZD (Prozessdaten o datos de proceso).

El telegrama libre (999) otorga la libertad de intercambiar libremente los PZD que se estimen necesarios, a diferencia de los otros telegramas, que vienen con PZD predefinidos. En la Fig. 2.26 se encuentran los diagramas funcionales 2470 y 2468, los cuales detallan el funcionamiento del telegrama libre dentro de la CU.

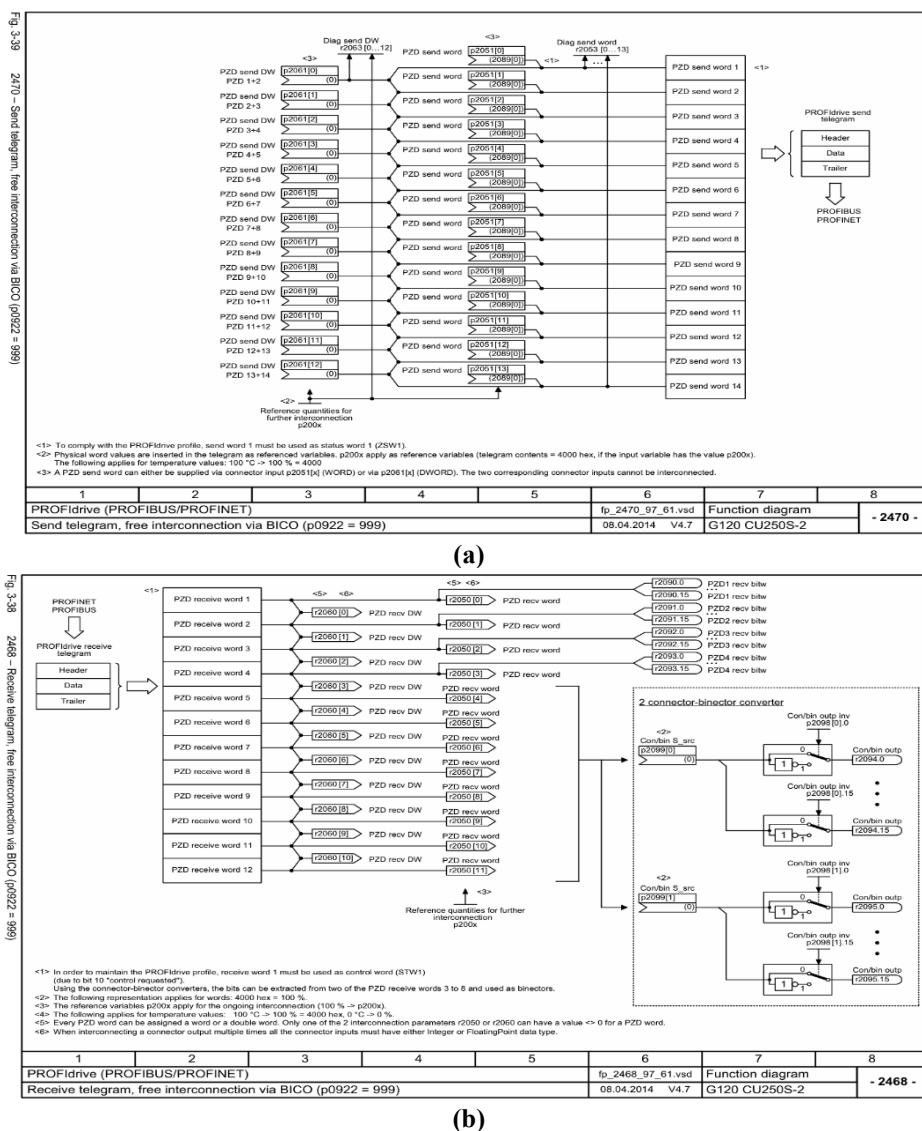


Fig. 2.26: Telegrama libre, CU 250S-2

(a) Envío de Telegramas CU250S-2 PN (b) Recepción de Telegramas CU250S-2 PN

El envío de datos ilustrado en la Fig. 2.26 se configura mediante el parámetro p2051, el cual dispone de 13 espacios para envío de PZD. Adicionalmente, existe la posibilidad de enviar palabras dobles a través del parámetro p2061.

Por su parte, la recepción de datos, también esquematizada en la Fig. 2.26, se estructura de idéntica manera para ambas CU. Esta se realiza mediante el parámetro de lectura r2050, el cual cuenta con 11 índices para la recepción de PZD. Asimismo, se tiene la capacidad de recibir palabras dobles mediante el parámetro r2060.

Dentro del telegrama se comunica la palabra de mando (STW1) para la operación del motor, y la palabra de estado (ZSW1) para las alarmas del motor y el registro de las variables de interés. Los bits disponibles de las palabras de mando y de estado se visualizan en la Fig. 2.27, donde se detalla la función específica asignada a cada uno de ellos.

Signal targets for STW1 in Interface Mode SINAMICS (p2038 = 0)		Signal sources for ZSW1 in Interface Mode SINAMICS (p2038 = 0)	
Signal	Meaning	Signal	Meaning
STW1.0	1 = ON (pulses can be enabled) 0 = OFF1 (braking with ramp-function generator, then pulse suppression & ready for switching on)	ZSW1.0	1 = Ready for switching on
STW1.1	1 = No OFF2 (enable is possible) 0 = OFF2 (immediate pulse suppression and switching on inhibited)	ZSW1.1	1 = Ready for operation (DC link loaded, pulses inhibited)
STW1.2	1 = No OFF3 (enable is possible) 0 = OFF3 (braking with the OFF3 ramp p1135, then pulse suppression and switching on inhibited)	ZSW1.2	1 = Operation enabled (drive follows n_set)
STW1.3	1 = Enable operation (pulses can be enabled) 0 = Inhibit operation (suppress pulses)	ZSW1.3	1 = Fault present
STW1.4	1 = Ramp-function generator enable 0 = Inhibit ramp-function generator (set the ramp-function generator output to zero)	ZSW1.4	1 = No coast down active (OFF2 inactive)
STW1.5	1 = Continue ramp-function generator 0 = Freezes the ramp-function generator	ZSW1.5	1 = No Quick stop active (OFF3 inactive)
STW1.6	1 = Setpoint enable 0 = Inhibits the setpoint (the ramp-function generator input is set to zero)	ZSW1.6	1 = Switching on inhibited active
STW1.7	1 = Acknowledge faults	ZSW1.7	1 = Alarm present
STW1.8	Reserved	ZSW1.8	1 = Speed setpoint - actual value deviation within tolerance t_off
STW1.9	Reserved	ZSW1.9	1 = Control requested <2>
STW1.10	1 = Control via PLC <1>	ZSW1.10	1 = f or n comparison value reached/exceeded
STW1.11	1 = Dir of rot reversal <2>	ZSW1.11	1 = I, M, or P limit not reached
STW1.12	Reserved	ZSW1.12	1 = Open holding brake
STW1.13	1 = Motorized potentiometer, setpoint, raise	ZSW1.13	1 = No motor overtemperature alarm
STW1.14	1 = Motorized potentiometer, setpoint, lower	ZSW1.14	1 = Motor rotates forwards (n_act ≥ 0) 0 = Motor rotates backwards (n_act < 0)
STW1.15	Reserved	ZSW1.15	1 = No alarm, thermal overload, power unit

(a)

(b)

Fig. 2.27: Palabras de Mando y Estado

(a) Control Word 1 (b) Status Word 1

La configuración de las CU se lleva a cabo mediante el programa STARTDRIVE. Sinamics STARTDRIVE de la Fig. 2.28 es un software de puesta en marcha para la integración intuitiva de los variadores SINAMICS, totalmente integrado en el TIA Portal [31].



Fig. 2.28: Startdrive

2.4. Motor de Inducción

Un motor convierte energía eléctrica en energía mecánica. En particular, el motor de inducción utiliza corriente alterna para realizar esta conversión sobre un eje rotatorio. Se tiene una estructura de jaula de ardilla, por lo que, al alimentar el devanado del Estator con corriente trifásica se produce un CMR que gira a velocidad sincrónica N_s , generando un flujo variable (FEM) que induce corriente en el rotor. Esta corriente crea un campo que tiende a seguir al campo del estator, produciendo el giro del rotor [9].

El motor que utiliza la plataforma experimental es uno del modelo 1LA7073-4AB10 se visualiza en la Fig. 2.29 y encuentra sus características en la Tabla 2.7 y 2.8.



Fig. 2.29: Motor de Inducción

TABLA 2.7 Datos Mecánicos Motor de Inducción.

Parámetro	Valor
Momento de Inercia	0.00077 $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
Par Nominal	2.6 Nm
Velocidad	1370 rpm
Numero de Polos	4
Peso	6 Kg
Norma	IEC
Grado de Protección	IP55
Refrigeración	IC 411

TABLA 2.8 Valores Nominales Motor de Inducción.

Parámetro	Valor
Voltaje	230/400 ΔY V
Corriente	1.84/1.06 ΔY A
Frecuencia	50 Hz
Potencia	0.37 kW
Factor de Potencia	0.78
Eficiencia	65.8 %

La representación eléctrica simplificada del motor por fase se ve en la Fig. 2.30.

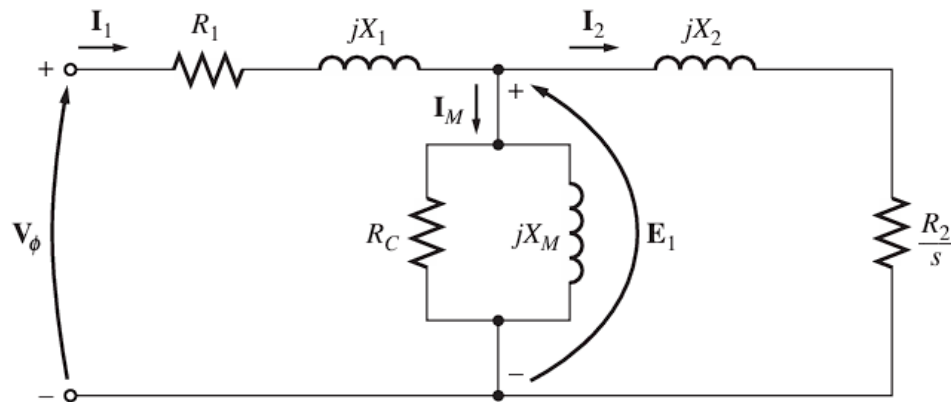


Fig. 2.30: Circuito equivalente por fase del motor de Inducción

Siendo V_ϕ el voltaje de alimentación, I_1 la corriente de alimentación, R_1 la resistencia del Estator, jX_1 la impedancia del Estator, I_M la corriente de magnetización, R_c las pérdidas en el núcleo, jX_M la reactancia de magnetización, I_2 corriente en el Rotor, jX_2 la impedancia del Rotor, R_2 la resistencia del Rotor, E_1 el voltaje transformado del rotor y s el deslizamiento (Que es igual a la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o un porcentaje).

La velocidad sincrónica se representa mediante la ecuación (2.5). Siendo f_e la frecuencia del estator y P los polos del motor [9].

$$N_s = \frac{120 \cdot f_e}{P} \quad (2.5)$$

En operación normal del motor los campos magnéticos del rotor y en el estator B_R y B_E giran a velocidad sincrónica (Que magnetizan las barras del rotor, con sentido magnético contrario) mientras que el eje del rotor gira a una velocidad menor (N_m) [9]. Si este último gira a N_s las barras del rotor estarán estacionarias en relación con el campo magnético y no habrá ningún voltaje inducido [9] (Fuerza de Lorentz).

La diferencia entre la velocidad campos magnéticos N_s y la velocidad del rotor N_m se define como deslizamiento N_{des} . Esta última se representa en la ecuación (2.6), también se representa como porcentaje (S) en la ecuación (2.7) [9].

$$N_{des} = N_s - N_m \quad (2.6)$$

$$s = \frac{N_s - N_m}{N_s} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Por el lado de las frecuencias del motor. La frecuencia que se produce en el rotor (f_r) gira a velocidad mecánica respecto a la frecuencia eléctrica del estator (f_e), encuentra su diferencia mediante el deslizamiento (Ya que, si son iguales, el motor se detiene) y se representa mediante la ecuación (2.8) [9].

$$f_r = s \cdot f_e \quad (2.8)$$

2.5. Controlador Lógico Programable

Los PLC de Siemens son controladores lógicos programables que se utilizan para automatizar procesos industriales. Son dispositivos robustos y confiables que pueden manejar una amplia gama de tareas, desde el control de motores hasta la gestión de procesos complejos [30].

La plataforma experimental utilizó un PLC S7-1200 de la Fig. 2.31. Sus características se visualizan en la Tabla 2.9.



Fig. 2.31: S7-1200

TABLA 2.9 Características PLC S7-1200.

Parámetro	Valor
Alimentación	24V(DC)
Puertos PROFINET	1
Soporte Dispositivos PROFINET	16
Velocidad de Transferencia Max	100 Mbit/s

La programación realizada en el PLC se ejecuta en un ciclo continuo mediante bloques de organización. En la Tabla 2.10 se muestran los bloques de organización disponibles en el PLC [18]

que permiten estructurar el programa, estableciendo una interfaz entre el sistema operativo y el programa de usuario [18], en estos se encuentra el bloque de programa principal OB1 (Main Cycle), que ejecuta un ciclo continuo definiendo el tiempo de ciclo de escaneo del PLC ejecutando continuamente la lógica del usuario, además de este bloque principal, en la tabla se encuentran los bloques de interrupción disponibles en el PLC, estos se ejecutan fuera del ciclo normal del programa cíclico (OB1) cuando ocurre algún evento específico, teniendo 6 distintos tipos de estos bloques disponibles en el PLC.

TABLA 2.10 Bloques de Organización de PLC S7-1200.

Tipo	Código
Ciclo	OB 1
Arranque	OB 100
Alarma de Retardo	OB 20
Alarma de Cíclica	OB 30
Alarma de Proceso	OB 38
Alarma de error de Tiempo	OB 80
Alarma de error de Diagnóstico	OB82

La programación del PLC S7-1200 se realizó mediante TIA PORTAL visto en la Fig 2.32. Este es un software de ingeniería en automatización industrial donde, principalmente, se puede programar PLCs y HMIs de la marca Siemens que integra una gran cantidad de componentes de las máquinas para el control de un sistema industrial, y sirve para la automatización de fábricas e incluso, para proyectos de domótica [32].



Fig. 2.32: Logo TIA PORTAL

En esta se crea una estación PROFINET IO en la cual se intercambiarán información entre los equipos, cumpliendo un rol ya sea de 'Controller' o 'Devices'. Por el lado de la programación, en esta se busca obtener un bloque Función Block, mediante el código lógico del PLC que se ejecuta en un ciclo continuo. Los datos que se ejecutan en el Función Block se almacenan en Data Block necesario para la ejecución cíclica de la programación realizada.

2.6. HMI

HMI es el acrónimo de Human Machine Interface (interfaz humano-máquina). La definición

de una interfaz humano-máquina es la de una interfaz de usuario o un panel de control que combina software y hardware para ayudar al operario a comunicarse entre sistemas y máquinas visto en la Fig. 2.33 [33].



Fig. 2.33: HMI Industrial

El entorno de desarrollo para la interfaz HMI depende de la tecnología que utilice el sistema para comunicarse con el operador. En el caso de la plataforma experimental, dado que emplea tecnología Siemens, la implementación de la interfaz se lleva a cabo mediante WinCC Professional, que se visualiza en Fig. 2.34. Este es un software SCADA y HMI desarrollado por Siemens que se utiliza para supervisar, controlar y optimizar procesos industriales en tiempo real.



Fig. 2.34: WinCC Professional

2.7. Switch

Un Switch de red, también conocido como conmutador, es un dispositivo que permite interconectar múltiples dispositivos dentro de una red de área local [34].

El Switch de la plataforma experimental corresponde al D-Link DGS-108 de la Fig. 2.35 es un switch de sobremesa no gestionado que proporciona múltiples puntos de conexión para transferencias de datos.



Fig. 2.35: Switch de Comunicación

Las topologías que se pueden realizar dependen del protocolo de comunicación. La plataforma experimental al llevar protocolo PROFINET. Es compatible con topologías de línea, árbol, anillo y estrella como se ve en la Fig 2.36. Además, es compatible con conexiones inalámbricas mediante Bluetooth o Wi-Fi [16].

La topología de línea ofrece ventaja de contar con conmutadores incorporados, pero la desventaja de si un nodo de la línea falla, todos los nodos dependientes pierden la comunicación [16].

La topología de estrella y árbol ofrece ventaja de que, si falla un solo nodo, no se afecta el funcionamiento de toda la red. Pero la desventaja de llevar un equipo adicional es que, si falla un conmutador central de la estrella o árbol, se afecta la comunicación con todos los nodos de esa área [16].

La topología de anillo ofrece la ventaja de redundancia de medios, en caso de que falle un cable o nodo en el anillo, el funcionamiento continúa. Pero la desventaja de que requiere dispositivos compatibles con redundancia MRP y MRPD [16].

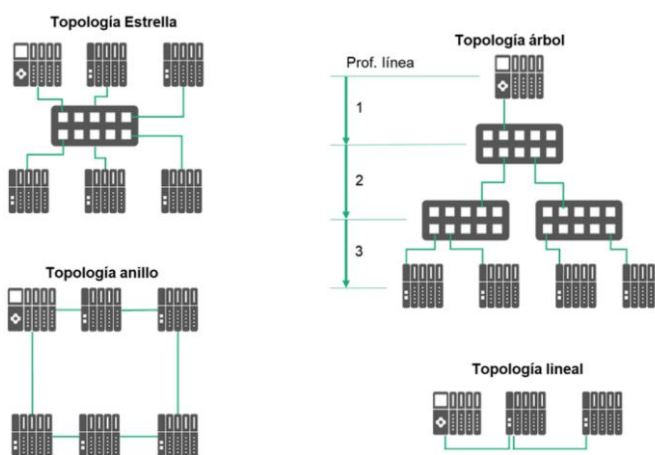


Fig. 2.36: Topologías PROFINET

2.8. Discusión

El presente capítulo estableció los fundamentos teóricos y técnicos esenciales que sustentan la viabilidad de la plataforma experimental. A través del análisis de la tecnología industrial Siemens, que abarca los accionamientos Sinamics G120, el PLC S7-1200, la interfaz HMI y el protocolo de comunicación PROFINET, se proporcionan las bases para desarrollar e implementar la plataforma de carga programable, dando viabilidad al objetivo general del proyecto. Asimismo, la fundamentación matemática de los perfiles de torque y las estrategias de control de velocidad, como el control V/F y el Vectorial sin Sensor (SLVC).

Capítulo 3. Diseño

3.1. Introducción

En este capítulo se expone el diseño de la plataforma experimental, el cual permitirá su posterior implementación.

3.2. Diagramas de Despliegue

El diseño de la implementación física de la plataforma experimental se desarrolló a partir de los equipos proporcionados por la empresa RP Ingeniería. Esta integración se define mediante dos diagramas: un diagrama de fuerza (que vincula los sistemas eléctrico y mecánico) y un diagrama de comunicaciones.

3.2.1 Elementos de la Plataforma Experimental

Los distintos elementos del sistema son proporcionados por la empresa RP Ingeniería. El listado detallado de estos componentes se encuentra en el “Anexo E. Detalle Técnico”.

La plataforma experimental cuenta principalmente con cuatro equipos: los accionamientos G120, un switch, un PLC y una HMI.

En cuanto a los accionamientos G120, estos se encuentran montados en maletas con conexión domiciliaria, tal como se visualiza en la Fig. 3.1. Cada maleta incluye un diferencial de 2P, un riel de conexión con la salida del PM240, el transformador (dentro de una caja a la izquierda), la resistencia de frenado en el centro y una unidad de control. El G120 01 incluye una CU 250S-2; por lo tanto, este convertidor es el encargado del control de torque. Por su parte, el SINAMICS G120 02 incluye los mismos componentes, pero cuenta con una CU 240P-2, la cual se encarga del control de velocidad.



(a)

(b)

Fig. 3.1: Accionamientos Facilitados por la Empresa

(a) G120 01 (b) G120 02

El PLC S7-1200, al igual que los accionamientos, está montado en una maleta, tal como se visualiza en la Fig. 3.2. Esta maleta contiene el PLC junto con un sistema de alimentación llamado SITOP y un diferencial de 1P.

**Fig. 3.2: S7-1200 TK1**

Por otro lado, se visualiza el switch de sobremesa en la Fig. 3.3.

**Fig. 3.3: Switch**

Finalmente, el HMI se visualiza en la Fig. 3.4. Este se compone de un computador y un monitor mediante el cual se despliega el sistema de supervisión.



Fig. 3.4: HMI

3.2.2 Diagrama de Fuerza

El plano de instalación de fuerza propuesto se representa mediante un esquema electromecánico en la Fig 3.5. El diseño de este diagrama se fundamenta en la información técnica recopilada en el Capítulo 1, y para su representación gráfica se empleó la simbología bajo la norma IEC 60617 [27]. Los circuitos de conexión detallados para cada componente se encuentran en el “Anexo E. Detalle Técnico”.

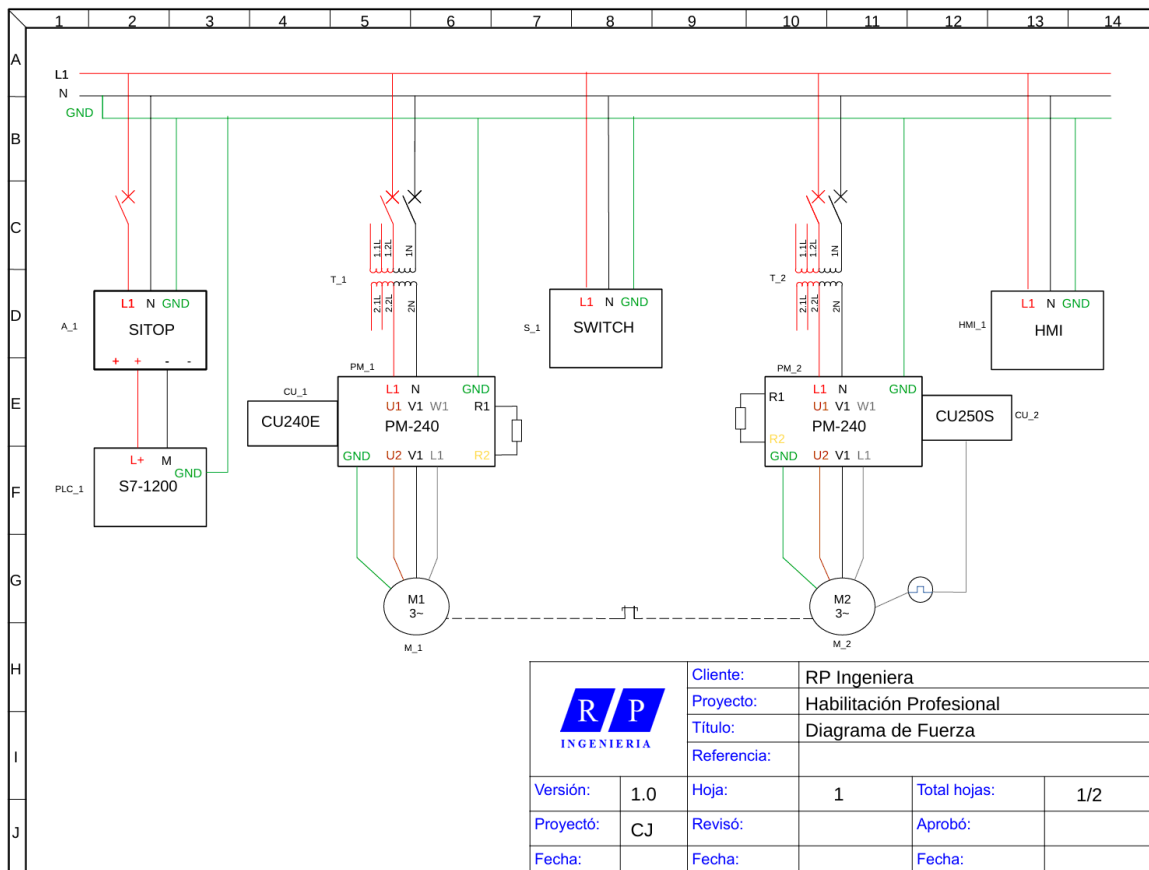


Fig. 3.5: Diagrama de Fuerza

En el diagrama de la Fig. 3.5 se establece la conexión a una red del tipo TN-S, la cual corresponde a una red domiciliaria monofásica compuesta por la línea de fase, el neutro y la tierra.

En el sector central se ubica el switch con su respectiva alimentación, junto a los accionamientos eléctricos. A la izquierda se sitúa el accionamiento encargado del control de velocidad y, a la derecha, el accionamiento encargado del control de torque. Aguas arriba se simboliza el transformador con la posibilidad de conexión en dos puntos. Este se conecta a las líneas L1 y N, las cuales, a su vez, están destinadas para que el convertidor funcione de manera monofásica [4]. Las CU de cada accionamiento se conectan a través de la ranura PM-IF en los PM; además, se establece la conexión de las resistencias de frenado en los bornes R1 y R2. Los motores van conectados a los bornes de salida del PM. Adicionalmente, se consideró una conexión que separa los circuitos de tierra de la red de los del convertidor que se conecta al motor [4]. Finalmente, aguas abajo se realizó la conexión mecánica entre los motores con el acople, además de la conexión del encoder a la CU, el cual se representa con una función de generador de pulsos cuadrados.

Por los laterales se encuentra el sistema de comunicación, el cual está conectado a un sistema de alimentación SITOP sobre los bornes del S7-1200. Por el lado de la HMI, esta va conectada directamente a la red mediante su cable de alimentación.

Adicionalmente a todo lo mencionado, se agregó un tag respectivo a cada componente para su identificación más sencilla en el espacio físico.

3.2.3 Diagrama de Comunicación

El esquema de integración de comunicaciones del sistema de la plataforma experimental se presenta en la Fig. 3.6, presenta una topología en estrella [16], esto debido a la utilización del Switch de comunicación D-Link DGS-108.

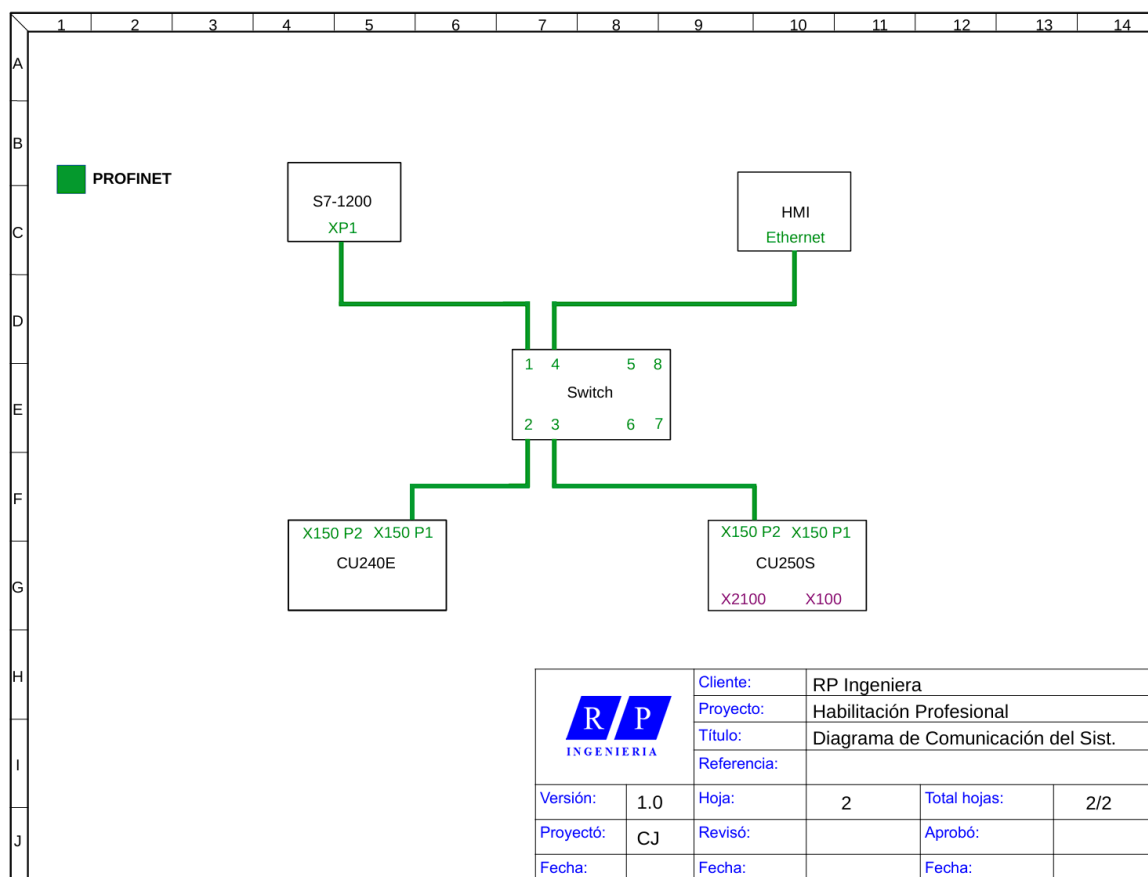


Fig. 3.6: Diagrama de comunicaciones del sistema

3.3. Perfiles de Torque

La simulación de carga del sistema se enfoca en accionamientos conectados a equipos industriales con una dependencia de torque de clase 1. Esto dado que el alcance de este trabajo establece restricciones sobre los puntos de consigna que utilizará la plataforma experimental, los perfiles de torque a simular son de tipo constante y cuadrático. Por su parte, los perfiles de velocidad son de tipo constante y escalonado.

Los perfiles de Set Point se programarán vía TIA PORTAL por lo cual se tuvo en cuenta las distintas herramientas de programación con las que cuenta esta plataforma.

Para el perfil de consigna constante, se asignó un valor numérico fijo directamente al parámetro de referencia del accionamiento.

En el caso de perfil de consigna escalonada, se utilizó un ciclo de temporización independiente del programa principal. Este se empleó para contabilizar la duración de cada escalón mediante iteraciones. Asimismo, la gestión del número de escalones se realizó a través de los bloques contadores propios del programa.

Por último, para el perfil de Set Point cuadrático se utilizó la velocidad medida del MCV para vincularla con la consigna enviada al MCT. La ecuación para relacionar estas dos variables y establecer la forma de onda de la Fig. 2.3, se representa en la ecuación (3.1).

$$T_{DRV_T} = (V_{DRV_V})^2 \cdot K \quad (3.1)$$

Para el cálculo del valor de la constante K se toman los valores máximos que se pueden generar cada variable, como se visualiza en la ecuación (3.4)

$$100 = (100)^2 \cdot K \quad (3.2)$$

$$K = \frac{100}{10000} \quad (3.3)$$

$$K = 0.01 \quad (3.4)$$

3.4. Sistema de Comunicación

El diseño del sistema de comunicación de la plataforma experimental se basa en la interconexión de los accionamientos G120 con el PLC, el cual, a su vez, se comunica con la HMI vía PROFINET.

Dentro de la red PROFINET IO de la plataforma, se establece que cada variador SINAMICS G120 y el PLC S7-1200 debe contar con un nombre de dispositivo (Device name) y una dirección IP.

El diseño de estación IO queda definida por el PLC S7-1200 que cumple el rol de IO Controller y los accionamientos que cumplen el rol de IO Devices.

3.4.1 Comunicación de Accionamientos

En primer lugar, en el diseño de comunicación de los accionamientos se establece cuáles son las capacidades y funciones que tiene este.

Las capacidades de las CU, establece la comunicación mediante telegramas libres con PZD, además de ejecutar lazos de control, ya sean en lazo abierto o cerrado, operando a distintos tipos de Set Point.

Por su parte, la principal función de las CU consiste en recepcionar los PZD provenientes desde el HMI, ejecutando la consigna requerida mediante los lazos de control correspondientes en cada prueba.

Para que los accionamientos cumplan con estas características, el sistema de comunicaciones se estructura en torno al envío y recepción de telegramas, configurándose de la siguiente manera:

En el envío de datos, el primer bit (p2051[0]) se envió la palabra de mando STW1 (Control Word 1) de la Fig. 2.22. En este se encomienda la señal de arranque del motor, que se configurará dependiendo de la operación del motor requerida, en el segundo bit (p2051[1]) se sitúa la consigna que se envía al motor.

En la recepción de datos, el primer bit (r2050[0]) se recibió la palabra de estado ZSW1 (Status Word 1) de la Fig. 2.22. En este se indica el estado operativo del motor para la creación de alarmas de este. En los siguientes bits se sitúa las variables de interés definidas en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 que se envía al PLC.

TABLA 3.1 Variables de Interés CU240.

Variable	Parámetro
Set Point (Consigna)	r1114
Velocidad	r63
Torque	r70
Corriente Total	r26
Corriente Id	r76
Corriente Iq	r78
Voltaje de Motor	r72
Voltaje DC-LINK	r70

TABLA 3.2 Variables de Interés CU250.

Variable	Parámetro
Set Point (Consigna)	r1508
Velocidad	r63
Torque	r70
Corriente Total	r26
Corriente Id	r76
Corriente Iq	r78
Voltaje de Motor	r72
Voltaje DC-LINK	r70

3.4.2 Comunicación del PLC

El PLC es el cerebro de la plataforma experimental y se encargara de comunicar todos los elementos. La comunicación se hizo con programación en TIA PORTAL mediante subrutinas que funcionan cíclicamente.

El diseño de programación en el Tía Portal se ejecuta sobre el ciclo principal OB1 Main Cycle. En este bloque se realizó un intercambio de datos mediante telegramas que contienen PZD. Los bloques que se utilizan son los FB (Función Block) en el cual se ejecutara la programación

cíclicamente y los bloques DB (Data Block) en el cual se almacenaran los datos que se intercambiaran cíclicamente.

El diseño de comunicación de la plataforma experimental consta de un bloque principal FB que será utilizado para la comunicación de ambos accionamientos. Este bloque extraerá datos desde un DB que contendrá los datos requeridos del motor que se visualizaran desde el HMI y enviara datos a un DB que contendrá los comandos que se accionaran desde el HMI al motor.

Adicionalmente, se implementó un FB para crear cada función de Set Point (El Set Point lineal no necesita función propia) y otro FB para la selección del tipo de Set Point requerido. Todo esto visto en la Fig. 3.7.

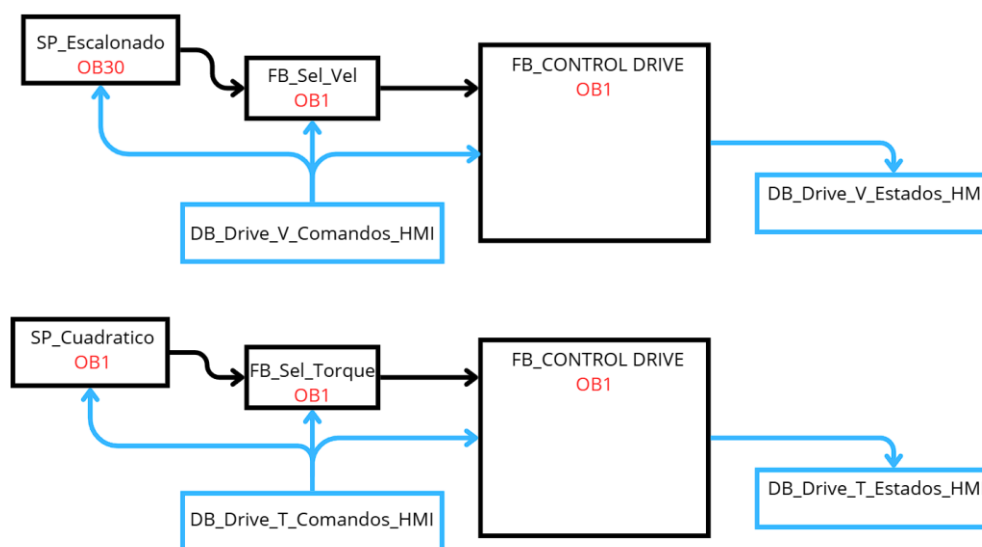


Fig. 3.7: Diseño de Sistema de Comunicación

Cabe mencionar que cada FB que se crea dentro del programa tendrá su propio DB con sus datos internos.

En la Fig. 3.7 se crean dos DB adicionales para la interacción con el sistema de supervisión HMI. También cabe resaltar que el bloque FB SP_Escalonado tendrá su propio ciclo dado por el diseño de este. En el cual se utilizó el bloque de organización OB 30 Alarma cíclica de la Tabla 2.10.

El PLC interactúa con el HMI y los accionamientos mediante el bloque FB _CONTROL_DRIVE de cada accionamiento. La funcionalidad y estructura interna de este bloque se ilustra en la Fig. 3.8. Este bloque se estructura por: lectura de datos, procesamiento de datos y salida de datos.

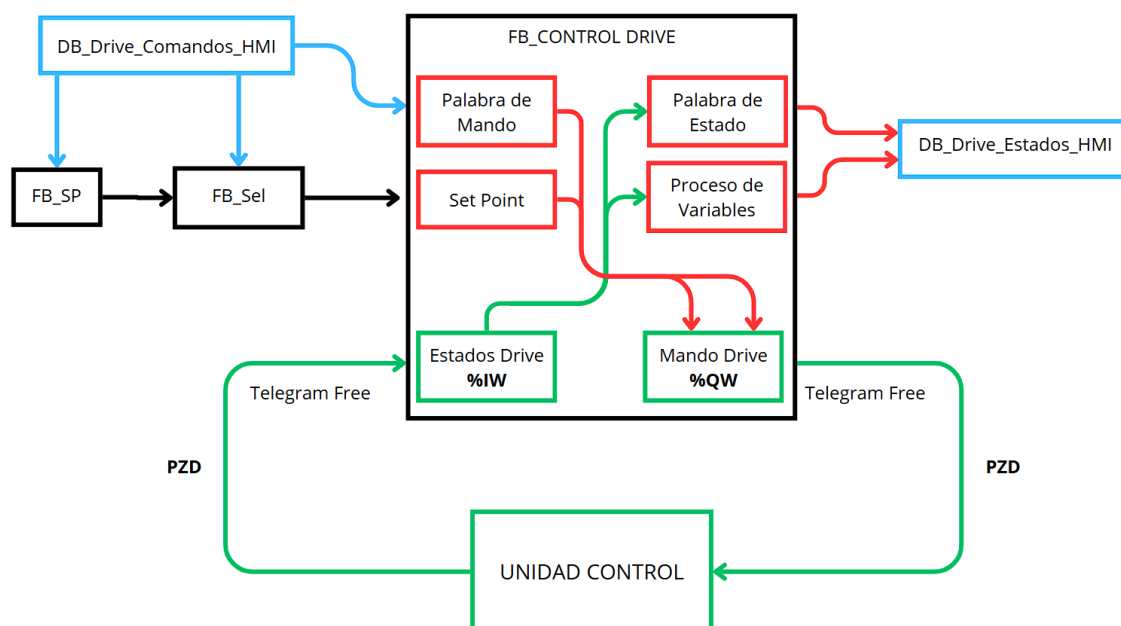


Fig. 3.8: Funcionalidad de Bloque FB ‘Control Drive’

En el bloque FB_CONTROL_DRIVE de la Fig 3.8 ingresan los comandos que provienen desde el HMI, los cuales interactuará con los bloques de generación y selección de Set Point. Asimismo, ingresan los PZD desde el accionamiento mediante los PZD en los espacios %IW dentro del PLC.

Dentro del bloque FB_CONTROL_DRIVE, los comandos del HMI se vinculan con los bits de la palabra de mando de la Fig. 2.22 y con los procesos de generación y selección de Set Point. Estos últimos pasan por un proceso de conversión de formato decimal a palabra de 16 bits, permitiendo que la CU reciba la consigna directamente desde la HMI. De este modo, se controla el motor a través de los PZD asignados en los espacios %QW.

Por otro lado, se procesan los PZD recibidos desde la CU (palabra de estado y variables de interés) para su visualización en la HMI.

Cabe destacar que en la conversión de palabra de 16 bits a decimal se utilizan los valores de referencia de cada accionamiento, dado que los CU envía la palabra de 16 bits en estos rangos de valores ([0 Valor Referencia]) mediante los parámetros P2000 (Velocidad), P2001 (Voltaje), P2002 (Corriente) y P2003 (Torque).

A la salida del bloque FB_CONTROL_DRIVE, tanto la palabra de mando como el Set Point recibido desde el HMI y posteriormente procesado, va directo al CU mediante los telegramas. En

paralelo a este proceso, están los bits de la palabra de estado que van a su visualización en el HMI y las variables traducidas a los valores requeridos para la visualización de estos.

3.4.3 Cambio de Formato de Datos

Como se mencionó anteriormente, la comunicación en los accionamientos Siemens funcionan mediante palabras de 16 bits. Por lo tanto, para que el sistema de supervisión pueda ser utilizado por un operador de planta, se tuvo que transformar los datos tanto para él su envío como recepción de estos.

Dentro de la plataforma experimental funcionaran 3 tipos de datos: unidades de ingeniería, hexadecimal y porcentual.

La ecuación utilizada para la transformación de valores de ingeniería a palabra de 16 bits se observa en la ecuación (3.5).

$$V_{16} = \frac{(V_{dec} - Ref_{min}) \cdot 16384}{(Ref_{max} - Ref_{min})} \quad (3.5)$$

Con V_{16} como el valor hexadecimal, V_{dec} como el valor decimal a transformar, Ref_{min} el valor de referencia mínimo estipulado y Ref_{max} como el valor de referencia máximo estipulado.

La ecuación utilizada para la transformación de palabra de 16 bits a valores de ingeniería se observa en la ecuación (3.6).

$$V_{dec} = \frac{(Ref_{max} - Ref_{min}) \cdot V_{16}}{(16384 + Ref_{min})} \quad (3.6)$$

La ecuación utilizada para la transformación de valores de ingeniería a valores porcentuales se observa en la ecuación (3.7), con $V_{\%}$ como el valor porcentual.

$$V_{\%} = \frac{(V_{dec} - Ref_{min}) \cdot 100}{(Ref_{max} - Ref_{min})} \quad (3.7)$$

3.4.4 Identificación PROFINET

En la Tabla 3.1 se sitúan las asignaciones de nombre PROFINET y Dirección IP de los elementos de la plataforma experimental.

TABLA 3.3 Asignación de Comunicación.

Equipo	Nombre PROFINET	Dirección IP
PLC S7-1200	As1	192.168.0.10
CU240E	drive_V	192.168.0.11
CU250S	drive_T	192.168.0.12
HMI	Os1.ie general_1	192.168.0.20

3.5. Sistema de Supervisión

El sistema de supervisión está diseñado para ser operado por el personal de planta. Para ello, se implementó una interfaz que contempla diversas funciones operativas y de monitoreo.

En la primera pantalla se dará la bienvenida al programa con una pantalla de inicio sobre la plataforma experimental.

Desde la segunda pantalla a la cuarta se optó por tener tres páginas individuales dinámicas para la visualización de las curvas y operación de los accionamientos, con dos pantallas para cada accionamiento y otra con la visualización de ambos accionamientos.

También se creó una pantalla para cada panel de control de cada accionamiento siendo las pantallas quinta y sexta, además en la pantalla de visualización de ambos accionamientos está disponible una pantalla con la curva de torque v/s velocidad siendo la séptima pantalla.

Al igual se crearon una pantalla con los datos históricos de la plataforma experimental, una pantalla de ajustes del motor siendo la octava y novena pantalla.

3.6. Discusión

El presente capítulo dio cumplimiento al primer objetivo específico del proyecto al consolidar el diseño de arquitectura de la plataforma experimental. A través de la elaboración de los diagramas de fuerza y la estructuración de la red de comunicaciones, se logró definir la interconexión entre los equipos. Asimismo, se desarrolló la lógica de programación del PLC y de los perfiles de consigna. Por último, se desarrolló el diseño del sistema de supervisión que se visualiza mediante el HMI.

Capítulo 4. Implementación

4.1. Introducción

En este capítulo se expone la implementación de la plataforma experimental mediante la integración física y configuración de sus elementos.

4.2. Integración de Componentes

A partir de los diagramas de fuerza y comunicaciones, se llevó a cabo la integración de los equipos proporcionados por la empresa, conformando la plataforma experimental que se visualiza en la Fig. 4.1. El procedimiento detallado de conexión de la plataforma se encuentra documentado en el “Anexo E. Detalle Técnico”



Fig. 4.1: Equipo Experimental

4.3. Comisionamiento de Accionamientos

Ya con la comunicación PROFINET de ambos accionamientos diseñada, se procede a la configuración de estos mediante STARTDRIVE.

Primeramente, se realiza el comisionamiento de los accionamientos mediante la Fig. 4.2. Tanto para el MCT como el MCV se ingresa los datos de la Tabla 2.8.

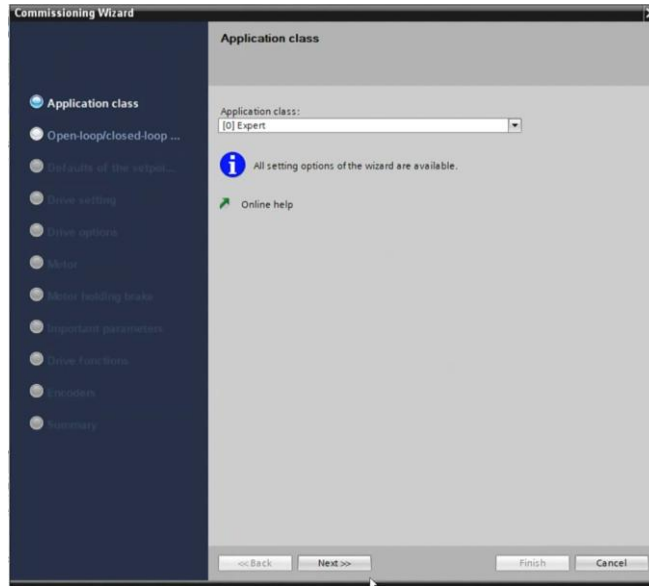


Fig. 4.2: Comisionamiento en STARTDRIVE

Con el comisionamiento de cada accionamiento realizado se procede a la configuración PROFINET de las CU mediante sus parámetros (P: Parámetro de ajuste, R: Parámetro de observación).

La configuración PROFINET del MCV que utiliza un CU240E-2, se visualiza en la Fig. 4.3. En esta se modificaron los siguientes parámetros: El bit 0 del p840[0] conectándolo mediante tecnología BICO(Binector/Conector) al bit 10 del r2090[10] (Perfil de Bus: PROFIdrive). El p922 Seleccionando la opción [999] (Free Telegram). El p1000[0] Seleccionando la opción [6] (Set Point desde Bus). Y finalmente el p2030 Seleccionando la opción [7] (PROFINET).

p15	Macro drive unit	[7] Fieldbus with data set changeover
► r50	Command Data Set CDS effective	OH
p170	Number of Command Data Sets (CDS)	2
► p854[0]	BI: Control by PLC/no control by PLC	r2090.10 CO/BO: PROFIdrive PZD1 receive bit-seri...
p922	PROFIdrive PZD telegram selection	[999] Free telegram configuration with BICO
r965	PROFIdrive profile number	0x3, 0x29
► p1000[0]	Speed setpoint selection	[6] No supplementary setpoint + Fieldbus
p2030	Field bus interface protocol selection	[7] PROFINET

Fig. 4.3: Configuración PROFINET MCV

La configuración PROFINET del MCT que utiliza un CU250S-2, se visualiza en la Fig 4.4. En esta se sigue la misma configuración mencionada anteriormente.

p15	Macro drive unit	[7] Fieldbus with data set changeover
▶ r50	Command Data Set CDS effective	0H
p170	Number of Command Data Sets (CDS)	2
▶ p854[0]	BI: Control by PLC/no control by PLC	r2090.10 CO/BO: PROFIdrive PZD1 receive bit-seri...
p922	PROFIdrive PZD telegram selection	[999] Free telegram configuration with BICO
p925	PROFIdrive clock synchronous sign-of-life tolerance	1
r930	PROFIdrive operating mode	1
r965	PROFIdrive profile number	0x3, 0x29
▶ r979[0]	PROFIdrive encoder format, Header	21266
▶ p1000[0]	Speed setpoint selection	[6] No supplementary setpoint + Fieldbus
p2030	Field bus interface protocol selection	[7] PROFINET

Fig. 4.4: Configuración PROFINET MCT

Finalmente se configuran los reportes que irán al PLC. Estos se sitúan mediante las PZD en los bits del parámetro p2051 para ambas CU's.

La configuración de reportes del MCV se visualiza en la Fig. 4.5. En esta se asignaron los siguientes parámetros: El r2089[0] (Palabra de Estado 1) al bit 0. El r2089[1] (Palabra de Estado 2) al bit 1. El r63[0] (Velocidad Actual) al bit 2. El r27[0] (Corriente Absoluta) al bit 3. El r76[0] (Corriente Generadora de Campo) al bit 4. El r78[0] (Corriente Generadora de Torque) al bit 5. El r80[0] (Torque Actual) al bit 6. El r72 (Voltaje del Motor) al bit 7. El r70 (Voltaje del DC-LINK) al bit 8. El r1114 (Set Point) al bit 9.

▼ p2051	CI: PROFIdrive PZD send word	
p2051[... PZD 1		r2089[0] CO: Send binector-connector converter ...
p2051[... PZD 2		r2089[1] CO: Send binector-connector converter ...
p2051[... PZD 3		r63[0] CO: Actual speed, Unsmoothed
p2051[... PZD 4		r27 CO: Absolute actual current smoothed
p2051[... PZD 5		r76 CO: Current actual value field-generating
p2051[... PZD 6		r78 CO: Current actual value torque-generating
p2051[... PZD 7		r80[0] CO: Torque actual value, Unsmoothed
p2051[... PZD 8		r72 CO: Output voltage
p2051[... PZD 9		r70 CO: Actual DC link voltage
p2051[... PZD 10		r1114 CO: Setpoint after the direction limiting

Fig. 4.5: Configuración de Reportes al PLC al MCV

La configuración de reportes del MCT se visualiza en la Fig. 4.6. En esta se asignaron los siguientes parámetros: El r2089[0] (Palabra de Estado 1) al bit 0. El r2089[1] (Palabra de Estado 2) al bit 1. El r80[0] (Torque Actual) al bit 2. El r27[0] (Corriente Absoluta) al bit 3. El r76[0] (Corriente Generadora de Campo) al bit 4. El r78[0] (Corriente Generadora de Torque) al bit 5. El al r63[0] (Velocidad Actual) bit 6. El r72 (Voltaje del Motor) al bit 7. El r70 (Voltaje del DC-LINK) al bit 8. El r1508 (Set Point) al bit 9.

▼ p2051	CI: PROFIdrive PZD send word	
p2051[0]	PZD 1	r2089[0] CO: Send binector-connector converter ...
p2051[1]	PZD 2	r2089[1] CO: Send binector-connector converter ...
p2051[2]	PZD 3	r80[0] CO: Torque actual value, Unsmoothed
p2051[3]	PZD 4	r27 CO: Absolute actual current smoothed
p2051[4]	PZD 5	r76 CO: Current actual value field-generating
p2051[5]	PZD 6	r78 CO: Current actual value torque-generating
p2051[6]	PZD 7	r63[0] CO: Actual speed, Unsmoothed
p2051[7]	PZD 8	r72 CO: Output voltage
p2051[8]	PZD 9	r70 CO: Actual DC link voltage
p2051[9]	PZD 10	r1508 CO: Torque setpoint before supplementary ...

Fig. 4.6: Configuración de Reportes al PLC al MCT

4.3.1 Controladores

Para los valores de ganancia y tiempo integrativo de los controlados de los dos accionamientos se utilizaron los obtenidos desde el comisionamiento (comisionamiento en parada). Sin previo diseño de estos.

Los principales controladores como el de corriente y de velocidad. Están categorizados como parámetros de nivel 4 (Servicio). Por lo tanto, no se tiene acceso a estos, ya que Siemens restringe estos valores y se debe solicitar con la compañía el acceso a estos [40]. Por lo tanto, solo se tuvo acceso a los parámetros hasta nivel 3 (Extendido).

El MCV tiene un CU que no cuenta con retroalimentación. Al no existir retroalimentación los controladores son limitados. Por lo cual, no se encontraron sus respectivos valores en el nivel 3.

Por el lado del MCT, se encontraron valores de los siguientes controladores: V_{DC} (Control V/f), I_{max} (Control Max Frecuencia), I_{max} (Control Max Voltaje) y Velocidad (con encoder).

El valor de estos controladores se visualiza en las Fig. 4.7 a la Fig. 4.10.

p1290[0]	Vdc controller proportional gain (U/f)	0.35	
p1291[0]	Vdc controller integral time (U/f)	40	ms

Fig. 4.7: Valor de Controlador V_{DC} (Control V/f)

p1340[0]	I_max frequency controller proportional gain	0.000	
p1341[0]	I_max frequency controller integral time	0.040	s

Fig. 4.8: Valor de Controlador I_{max} (Control Max Frecuencia)

p1345[0]	I_max voltage controller proportional gain	0.091	
p1346[0]	I_max voltage controller integral time	0.040	s

Fig. 4.9: Valor de Controlador I_{max} (Control Max Voltaje)

p1760[0]	Motor model with encoder speed adaptation Kp	0.182	
p1761[0]	Motor model with encoder speed adaptation Tn	50	ms

Fig. 4.10: Valor de Controlador Velocidad (con encoder)

4.4. Implementación TIA PORTAL

Ya con el diagrama de comunicación del sistema y el diseño de este, se configura la plataforma experimental dentro del Programa Tía Portal.

En este se establece la conexión de comunicación de los elementos de la plataforma experimental.

En la topología dentro del programa visto en la Fig. 4.11, estos se dejan desconectados, debido a que los puertos de conexión dentro del programa son literales. Y como se estableció una topología en estrella, todas las conexiones se centralizan en el Switch de comunicación.

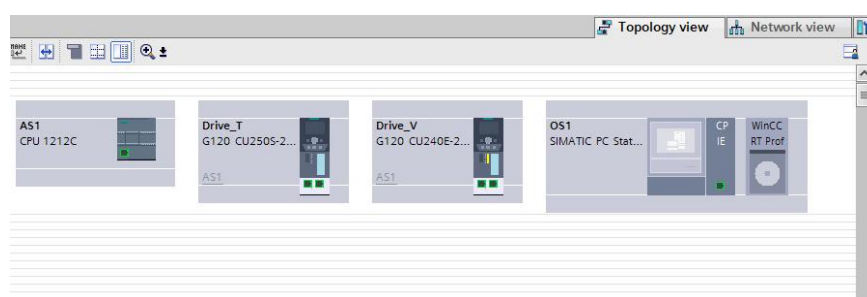


Fig. 4.11: Topología en Tía Portal

4.4.1 Configuración PROFINET

Para que los distintos elementos de la plataforma experimental se puedan identificar y comunicar, se les asigna un nombre PROFINET y una dirección IP, vista en la Tabla 3.1 y en las Fig. 4.12 a la Fig. 4.15.

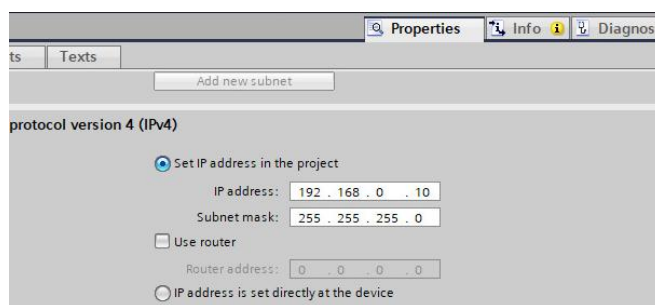


Fig. 4.12: Asignación PROFINET PLC S7-1200

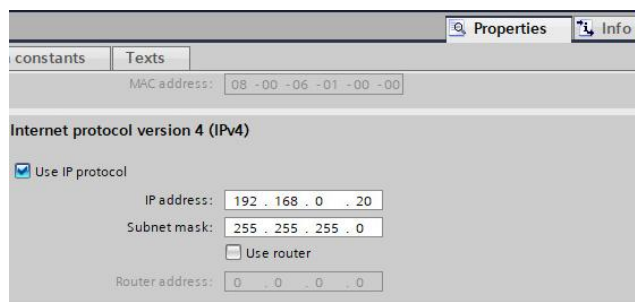


Fig. 4.13: Asignación PROFINET Estacion HMI

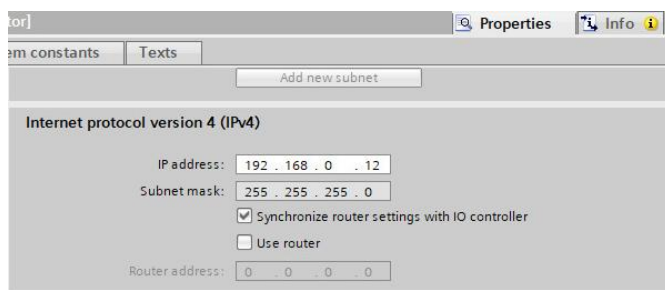


Fig. 4.14: Asignación PROFINET CU250S-2 PN

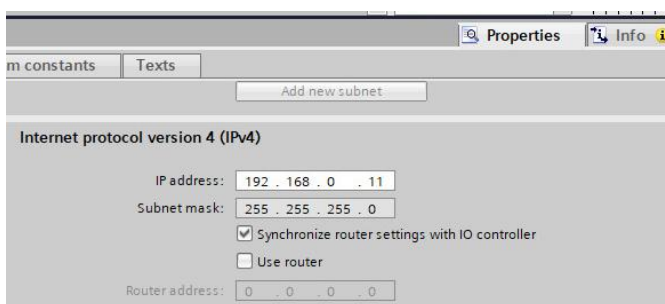


Fig. 4.15: Asignación PROFINET CU240E-2 PN

Con la asignación de comunicación de los equipos realizada, se crea la conexión PROFINET con conexión en la subred PN/IE_1 dentro del programa Tía Portal visto en la Fig. 4.16.

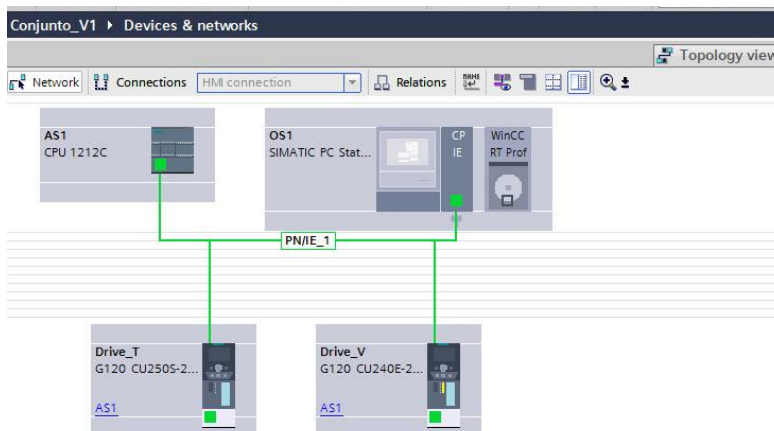


Fig. 4.16: Esquema de conexión Tía Portal

Por consiguiente, se crean espacios dentro del PLC para el intercambio de PZD de la plataforma experimental. Estos se asignan en las direcciones de QW (salida) y IW (entrada), teniendo una longitud de 12 espacios en cada CU como se visualiza en la Fig. 4.17 y la Fig. 4.18.

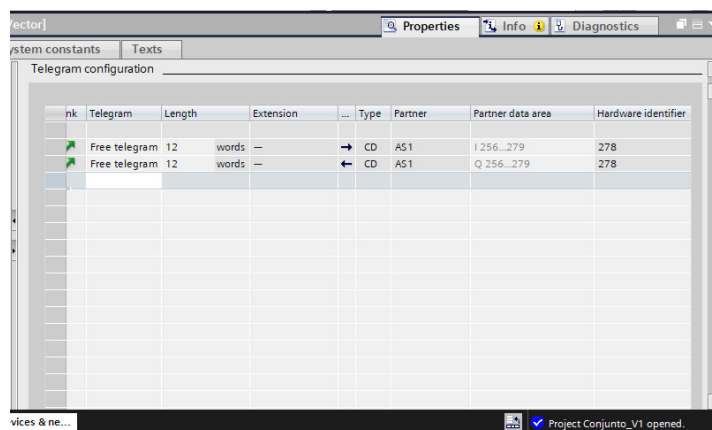


Fig. 4.17: Asignación de Espacios PZD CU250

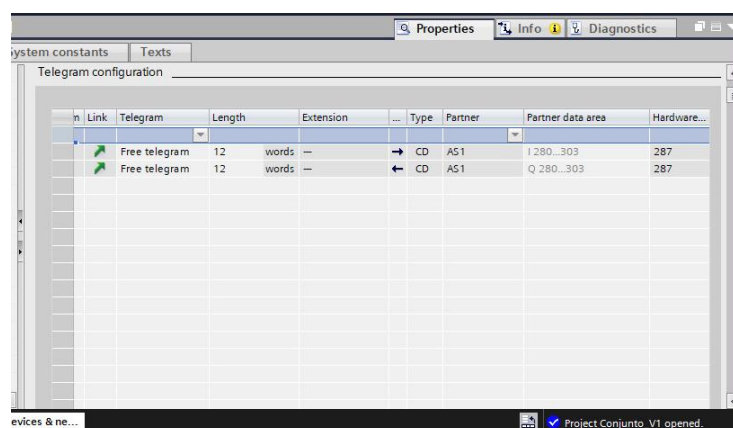


Fig. 4.18: Asignación de Espacios PZD CU240

4.4.2 Programación PLC

Ya con el diseño de la programación en el PLC, se procede a aplicarlo en el programa, obteniendo los distintos bloques de la Fig. 3.7. El detalle de la programación de cada bloque se encuentra en el “Anexo A. Desarrollo de la Aplicación de Control”. El direccionamiento se hace en base al diseño del sistema de comunicación de la plataforma experimental de la Fig. 3.7.

En primer lugar, se le asigna las direcciones al MCV empezando por el FB SP_Generador que funciona con su propio tiempo de ciclo. Estas se visualizan en la Fig. 4.19. En la entrada por la izquierda, se encuentran los comandos provenientes del HMI, a la derecha esta la salida del Set Point y los estados que se visualizan desde el HMI.

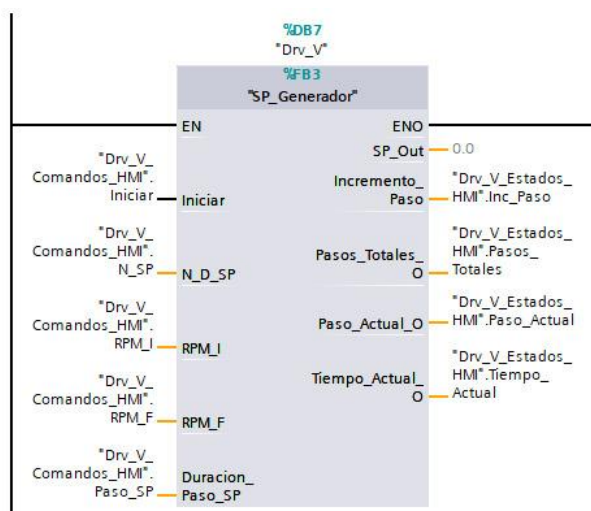


Fig. 4.19: FB SP_Generador

Luego, se estipulan en el FB Sel_Vel, que utiliza la variable Out_V_SP, que se almacena en la variable MD20 del PLC. Esto para usarlo como enlace con el bloque principal del Motor. Las asignaciones se visualizan en la Fig. 4.20. En la entrada por la izquierda, se encuentran los comandos provenientes del HMI y el Set Point desde el bloque 'SP_Generador', a la derecha esta la salida del Set Point.

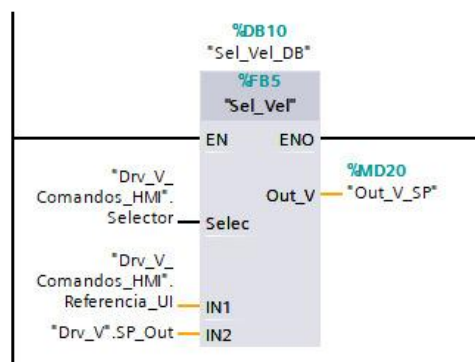


Fig. 4.20: FB Sel_Vel

Por consiguiente, se asignan en el FB ControlDrive del MCV siguiendo la funcionalidad de la Fig. 3.8. En la Fig. 4.21 se visualiza a la izquierda los bits pertenecientes a la palabra de mando del MCV enviada desde el DB Drive_V_Comandos_HMI. A la derecha se visualiza los bits pertenecientes a la palabra de estado del MCV enviada desde el DB Drive_V_Estados_HMI.

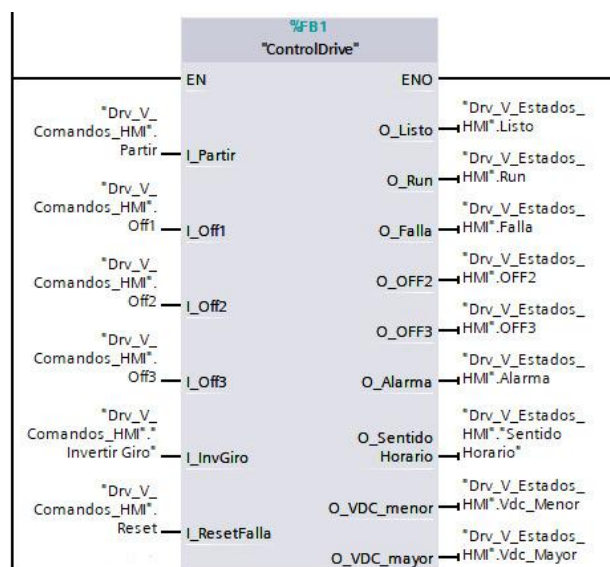


Fig. 4.21: Función Block ControlDrive Superior MCV

En las Fig. 4.22 y Fig. 4.23 se visualiza la continuación del bloque. En la izquierda esta la recepción de los PZD provenientes desde el CU del MCV con asignación de espacio del IW280 al IW298. Además, de la recepción del Set Point mediante la variable MD20.

Por la derecha se visualiza la palabra de mando y el Set Point que van hacia el CU con asignación en los espacios QW280 y QW282 en el PLC. También, se visualizan la salida de las variables procesadas.



Fig. 4.22: Función Block ControlDrive Intermedio MCV

(a) Intermedio Superior (b) Intermedio Inferior

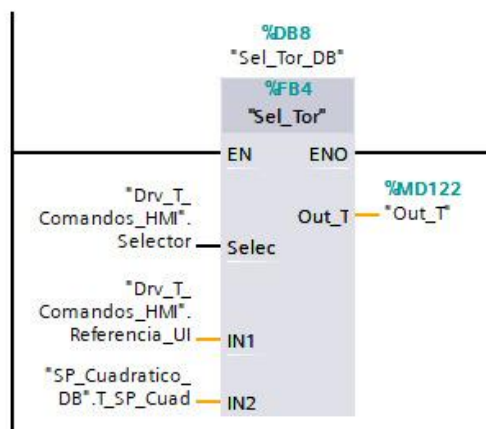


Fig. 4.25: FB Sel_Tor

Finalmente, se le asignan al FB ControlDrive del MCT siguiendo la funcionalidad de la Fig. 3.8. En la Fig. 4.26 se visualiza a la izquierda los bits pertenecientes a la palabra de mando del MCT enviada desde el DB Drive_T_Comandos_HMI. A la derecha se visualizan los bits pertenecientes a la palabra de estado del MCT enviada desde el DB Drive_T_Estados_HMI.

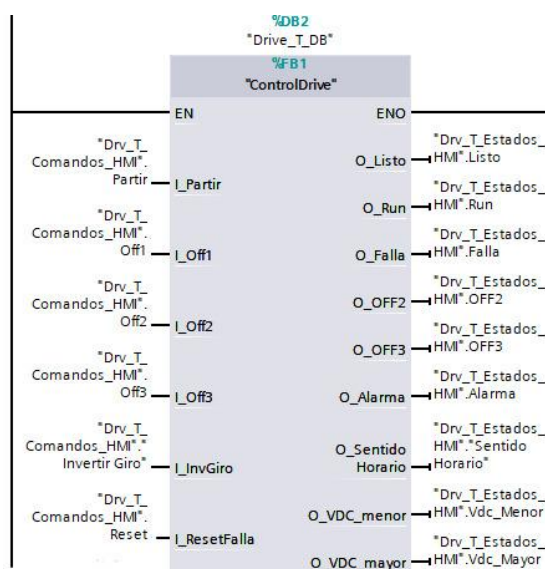


Fig. 4.26: Función Block ControlDrive Superior MCT

En las Fig. 4.27 y Fig. 4.27 se visualiza en la izquierda la recepción de los PZD provenientes desde el CU del MCT con asignación de espacio del IW256 al IW274. Además, de la recepción del Set Point mediante la variable MD122. Por la derecha se visualiza la palabra de mando y Set Point que van hacia el CU con asignación en los espacios QW256 y QW258 en el PLC. También, se visualizan la salida de las variables procesadas.

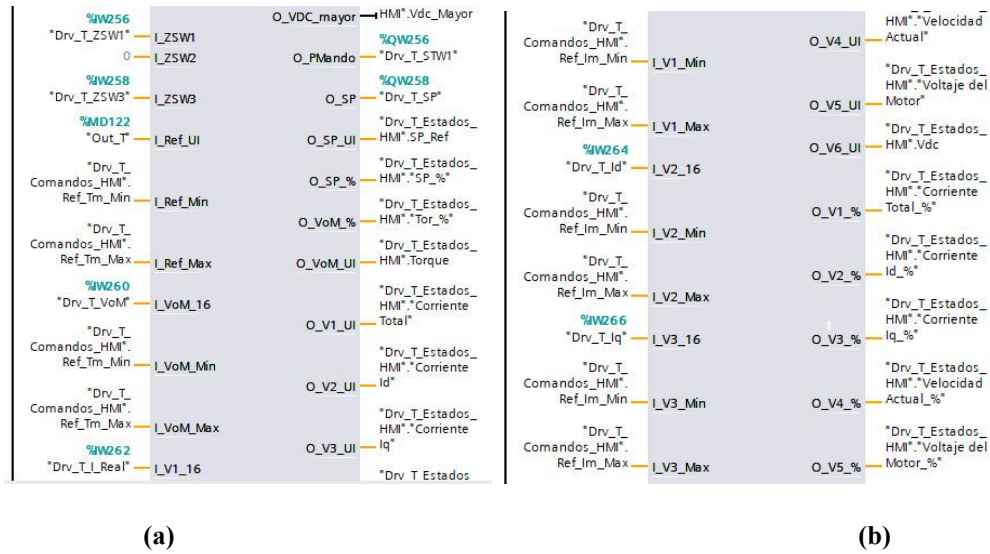


Fig. 4.27: Función Block ControlDrive Intermedio MCT

(a) Intermedio Superior (b) Intermedio Inferior

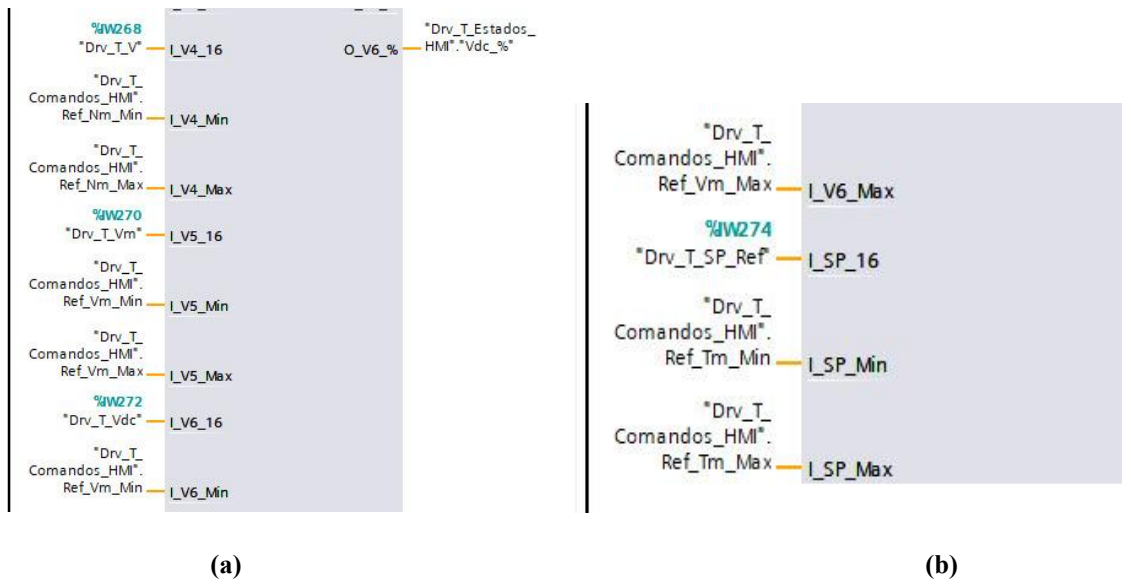


Fig. 4.28: Función Block ControlDrive Inferior MCT

(a) Inferior Superior (b) Inferior Inferior

4.5. Desarrollo de HMI

En el programa TIA PORTAL se decidió tener 9 pantallas en total. El detalle del desarrollo está en el “Anexo B. Detalle del Desarrollo del HMI”.

La primera pantalla se visualiza en la Fig. 4.29. En esta se tiene la parte estática con el logo de la empresa, el título del programa y dos motores acoplados ilustrando el conjunto experimental. Por otro lado, de la parte dinámica se tiene dos botones: Iniciar y Salir.

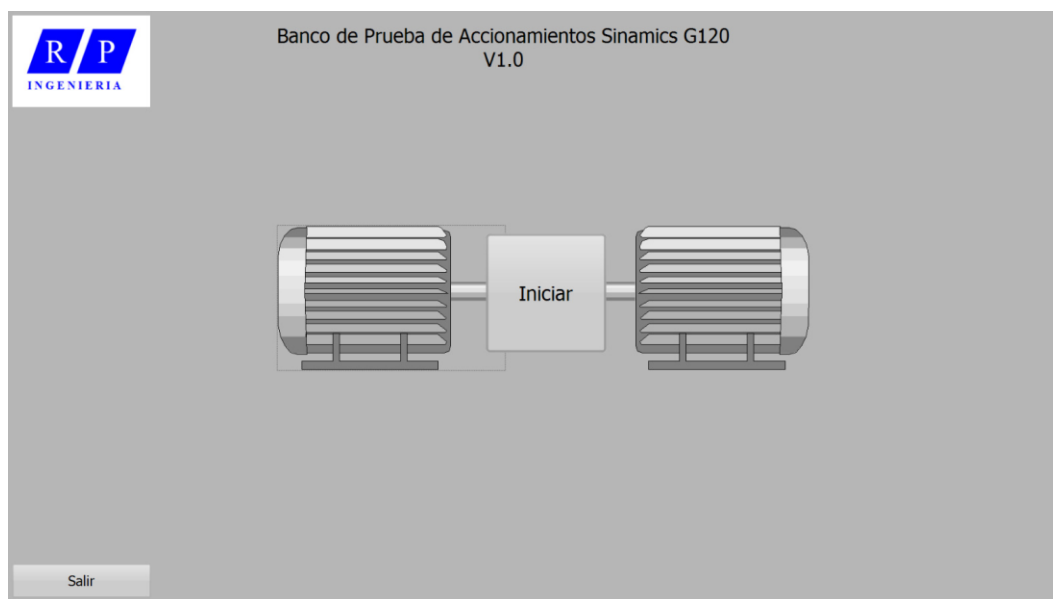


Fig. 4.30: Pantalla de Inicio

La segunda pantalla se visualiza en la Fig. 4.31. En esta se tiene una barra lateral con las pantallas principales del programa. Además, tiene un botón que activa la quinta pantalla que contiene el panel con el control del MCV vista en la Fig. 4.32. También, se cuenta con un gráfico que contiene las variables de este último. Por último, se puede ver el despliegue del panel de control en la Fig. 4.33.



Fig. 4.31: Pantalla del Accionamiento con Control de Velocidad

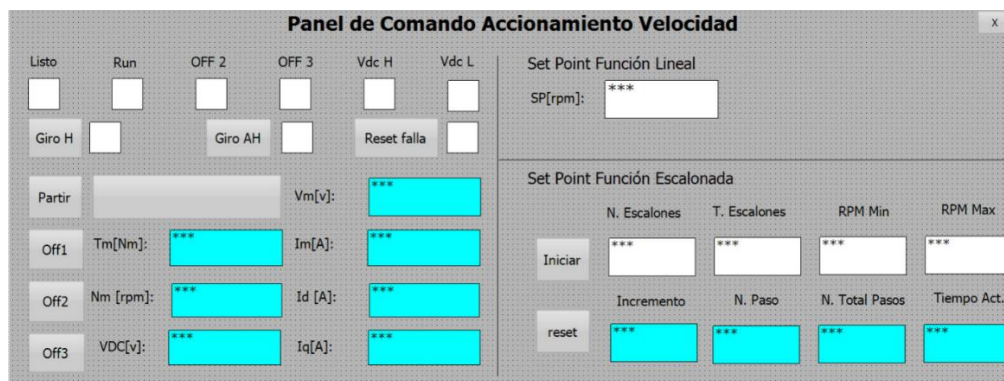


Fig. 4.32: Pantalla del Panel de Comando del MCV

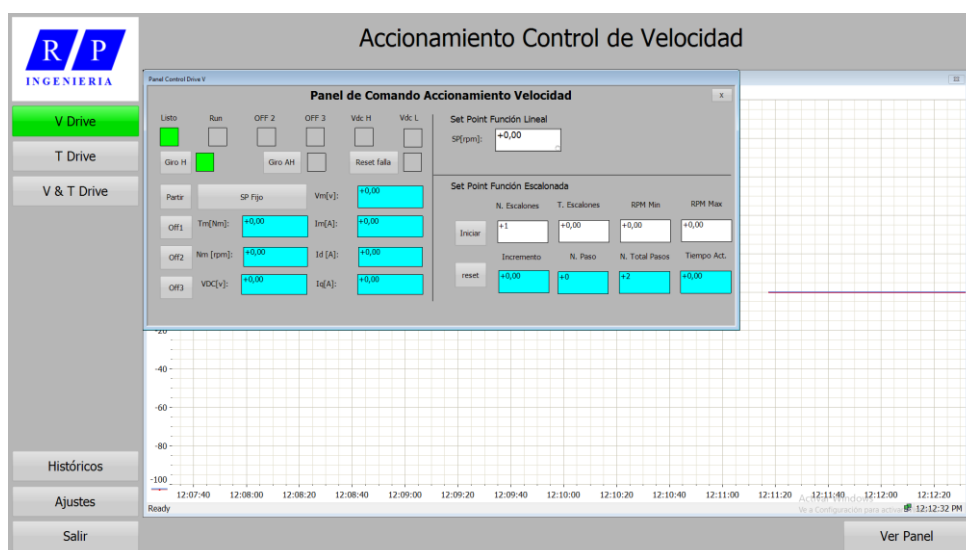


Fig. 4.33: Pantalla del Accionamiento con Control de Velocidad con Panel Desplegado

La tercera pantalla se visualiza en la Fig. 4.34. En esta se tiene una barra lateral con las pantallas principales del programa. Además, tiene un botón que activa la sexta pantalla que contiene el panel con el control del MCT vista en la Fig. 4.35. También, cuenta con un gráfico que contiene las variables de este último. Por último, se puede ver el despliegue del panel de control en la Fig. 4.36.

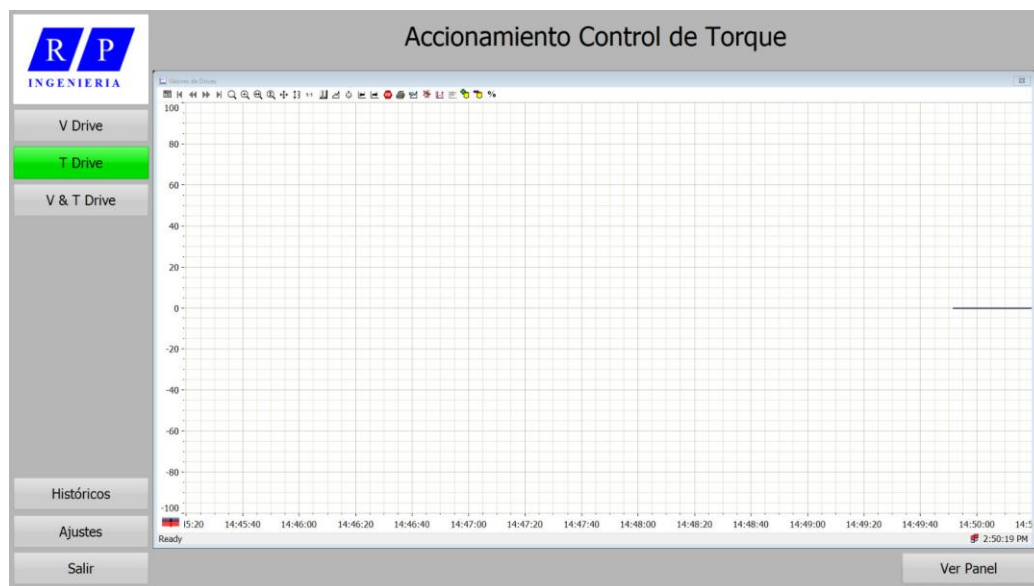


Fig. 4.34: Pantalla del Accionamiento con Control de Torque

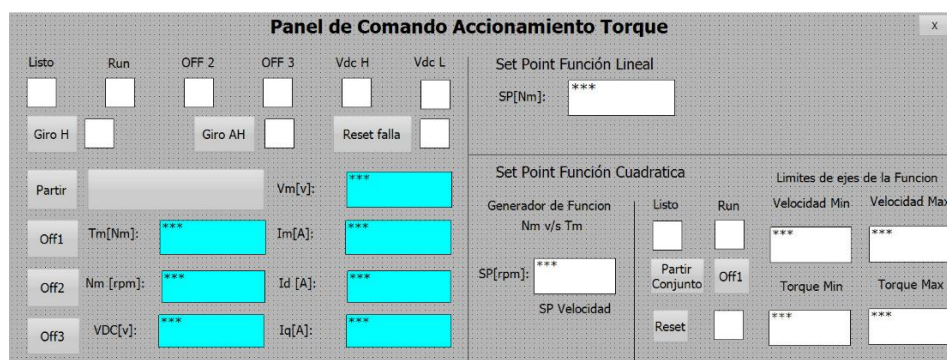


Fig. 4.35: Pantalla del Panel de Comando del MCT

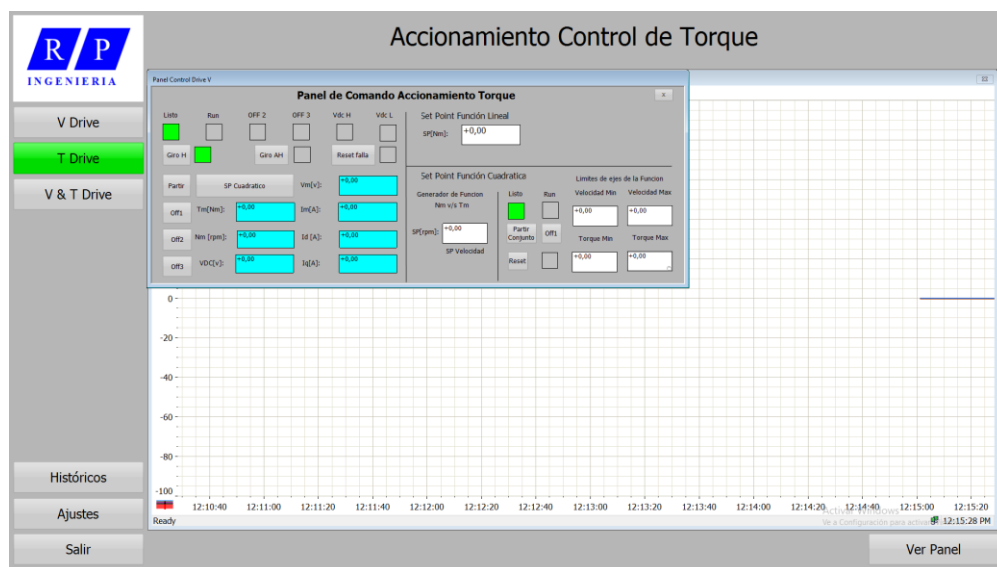


Fig. 4.36: Pantalla del Accionamiento con Control de Torque con Panel Desplegado

La cuarta pantalla se visualiza en la Fig. 4.37. En esta se tiene una barra lateral con las pantallas principales del programa. Además, tiene dos botones que activa la quinta y sexta pantalla que contiene los paneles con el control del MCV y del MCT. El tercer botón despliega la séptima pantalla que contiene el gráfico de velocidad v/s torque vista en la Fig. 4.38. También, cuenta con un gráfico que contiene las variables de este último. Por último, se puede ver el despliegue del panel de control en la Fig. 4.39.

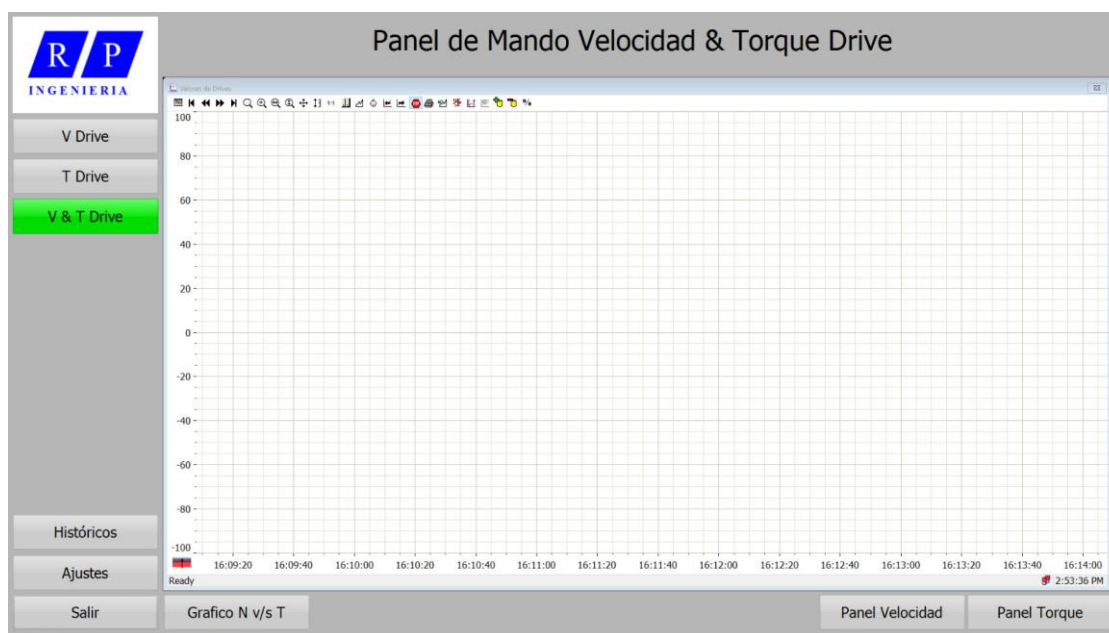


Fig. 4.37: Pantalla Panel de Mando Velocidad & Torque Drive

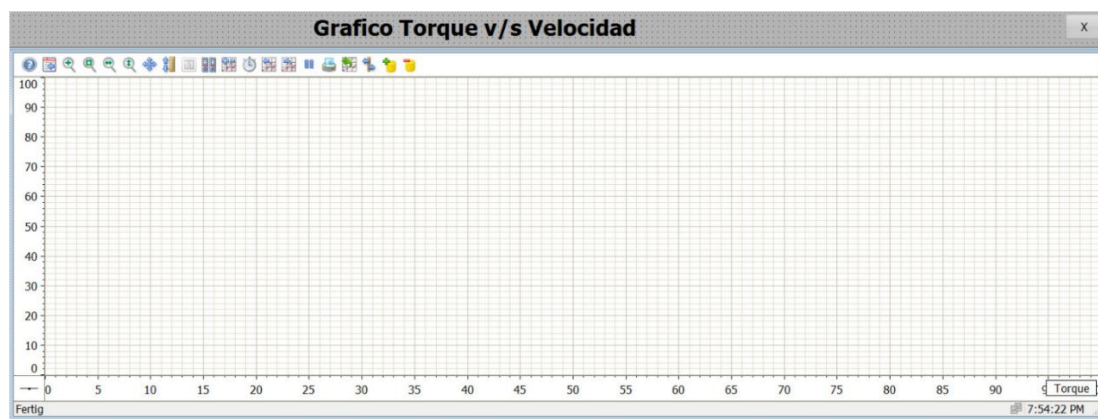


Fig. 4.38: Pantalla del Panel Gráfico Torque v/s Velocidad

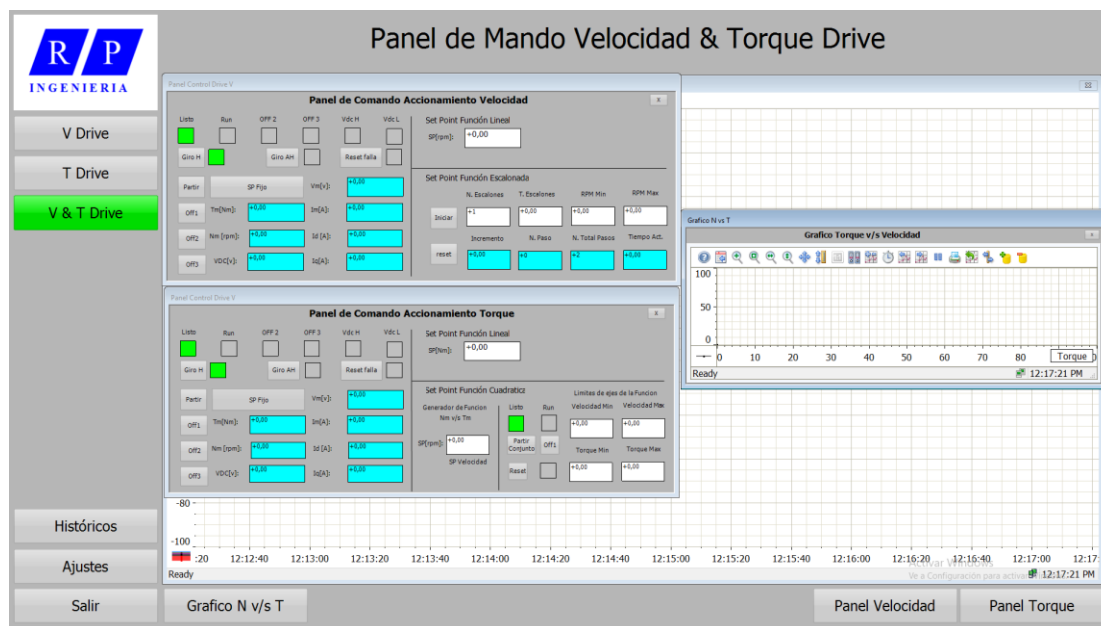


Fig. 4.39: Pantalla Panel de Mando Velocidad & Torque Drive con Panel Desplegado

Por el lado de la Octava pantalla que se visualiza en la Fig. 4.40. Esta cuenta con el registro histórico de las variables de la plataforma experimental. A su vez contiene dos gráficos uno con valores porcentuales y otro con valores en unidad de ingeniería.

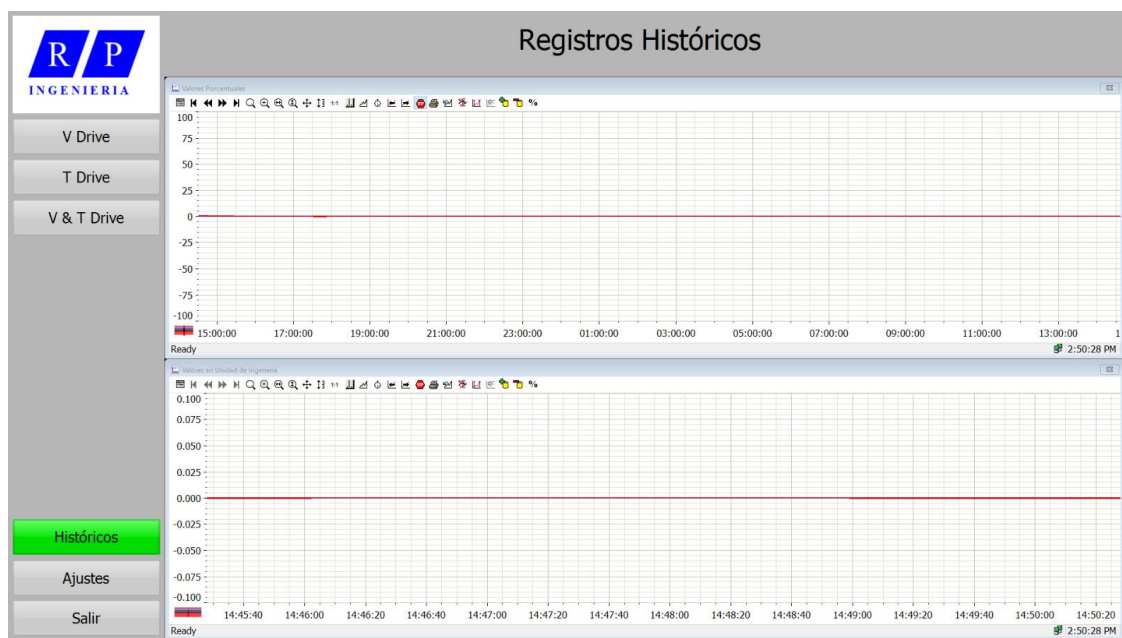


Fig. 4.40: Pantalla de Registros Históricos

Por el lado de la Novena pantalla que se visualiza en la Fig 4.41. Esta cuenta con ajuste de las referencias de las variables que ingresan al bloque desde la plataforma experimental.

The screenshot displays the 'Panel de Mando Ajustes' (Adjustment Control Panel) for an industrial drive system. The interface is divided into two main sections: 'Accionamiento Velocidad' (Speed Drive) and 'Accionamiento Torque' (Torque Drive). Each section contains four reference parameters with input fields for minimum and maximum values.

Accionamiento Velocidad		Accionamiento Torque			
	Min	Max			
Referencia SP[rpm]:	+0,00	+1370,00	Referencia SP[Nm]:	+0,00	+2,58
Referencia I[A]:	+0,00	+1,57	Referencia I[A]:	+0,00	+1,57
Referencia V[v]:	+0,00	+1000,00	Referencia V[v]:	+0,00	+1000,00
Referencia T[Nm]:	+0,00	+2,58	Referencia N[rpm]:	+0,00	+1370,00

On the left side, there is a vertical menu with buttons for 'V Drive', 'T Drive', and 'V & T Drive'. At the bottom left, there are buttons for 'Históricos', 'Ajustes' (highlighted in green), and 'Salir'. The top left corner features the 'R P INGENIERIA' logo. The bottom right corner has a small 'Activar Windows' watermark.

Fig. 4.41: Pantalla de Ajuste

4.6. Discusión

Este capítulo cumple con el segundo objetivo específico del proyecto al mostrar cómo se construyó y configuró la plataforma experimental instrumentada. Primeramente, realizando la implementación física de la plataforma mediante los diagramas de fuerza y comunicación. Posteriormente se configuró ambos accionamientos eléctricos en STARDRIVE, tanto en su configuración de comisionamiento como en parámetros de comunicación. Por otra parte, se desarrolló la programación del PLC, que integra la comunicación de los distintos equipos de la plataforma, mediante el direccionamiento de los bloques de función. Finalmente se desarrolló el sistema de comunicación HMI, mediante 9 pantallas que incorporan los comandos y visualización de estados de la plataforma experimental.

Capítulo 5. Pruebas y Evaluación de Resultados

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas y evaluaciones de la plataforma experimental.

5.2. Pruebas Experimentales

Ya que el último objetivo solicita realizar pruebas experimentales para evaluar el desempeño dinámico y en estado estable del conjunto bajo diferentes condiciones, se realizaron las siguientes pruebas:

Se realizó un total de 4 pruebas en distintas condiciones. En el primer par de pruebas que se realizó se tendrá en consideración una simulación de torque lineal (Cintas o Correas). Por otro lado, En el segundo par de pruebas que se realizó se tendrá en consideración una simulación de torque Cuadrático (Bombas o Ventiladores). La diferencia entre estos pares de pruebas está en que un par de pruebas utiliza el lazo de control del MCV de V/F y el otro par de pruebas el control vectorial, lo cual permite demostrar las diferencias entre estos lazos de control.

TABLA 5.1 Pruebas Experimentales.

Prueba	Lazo de Control MCV	Lazo de Control MCT	Set Point MCV	Perfil de Torque MCT
1	V/F	Torque (VC)	Escalonado (100%)	Lineal (50%)
2	SLVC	Torque (VC)	Escalonado (100%)	Lineal (50%)
3	V/F	Torque (VC)	Escalonado (50%)	Cuadrático (N_m)
4	SLVC	Torque (VC)	Escalonado (50%)	Cuadrático (N_m)

Cabe mencionar que en el Set Point escalonado se escogió de manera arbitraria con 5 escalones de 5 [s] de duración para todas las pruebas. También cada prueba se repitió un total de 4 veces (a, b, c, d) para el posterior análisis de desempeño de la plataforma experimental.

5.3. Requerimientos de Evaluación de Desempeño

La empresa mandante solicitó los siguientes requerimientos de evaluación de desempeño en la plataforma experimental.

- **Estabilidad del Consigna**

El valor medido debe mantenerse dentro de un margen de $\pm 5\%$ respecto al Set Point.

- **Tiempo de Establecimiento de Consigna**

Tiempo requerido para alcanzar y estabilizar el torque tras un cambio de referencia con un margen de 1[s].

- **Robustes Frente a Perturbaciones**

Capacidad de mantener el Set Point al variar en su magnitud con un sobrepaso no mayor al 5%.

- **Reproducibilidad**

El sistema debe repetir el mismo comportamiento en distintas pruebas bajo las mismas condiciones. Esto dentro de un margen de tolerancia no mayor al 5%.

5.4. Configuración de Pruebas en la Plataforma Experimental

Para las diferentes pruebas se realizó la siguiente configuración en el sistema de comunicación HMI y STARTDRIVE. El detalle de la configuración está en el “Anexo C. Configuración de las Pruebas”.

5.5. Resultados

5.5.1 Prueba 1

En la Fig 5.1 se muestra el resultado de la primera prueba experimental vista desde la perspectiva del sistema de supervisión.

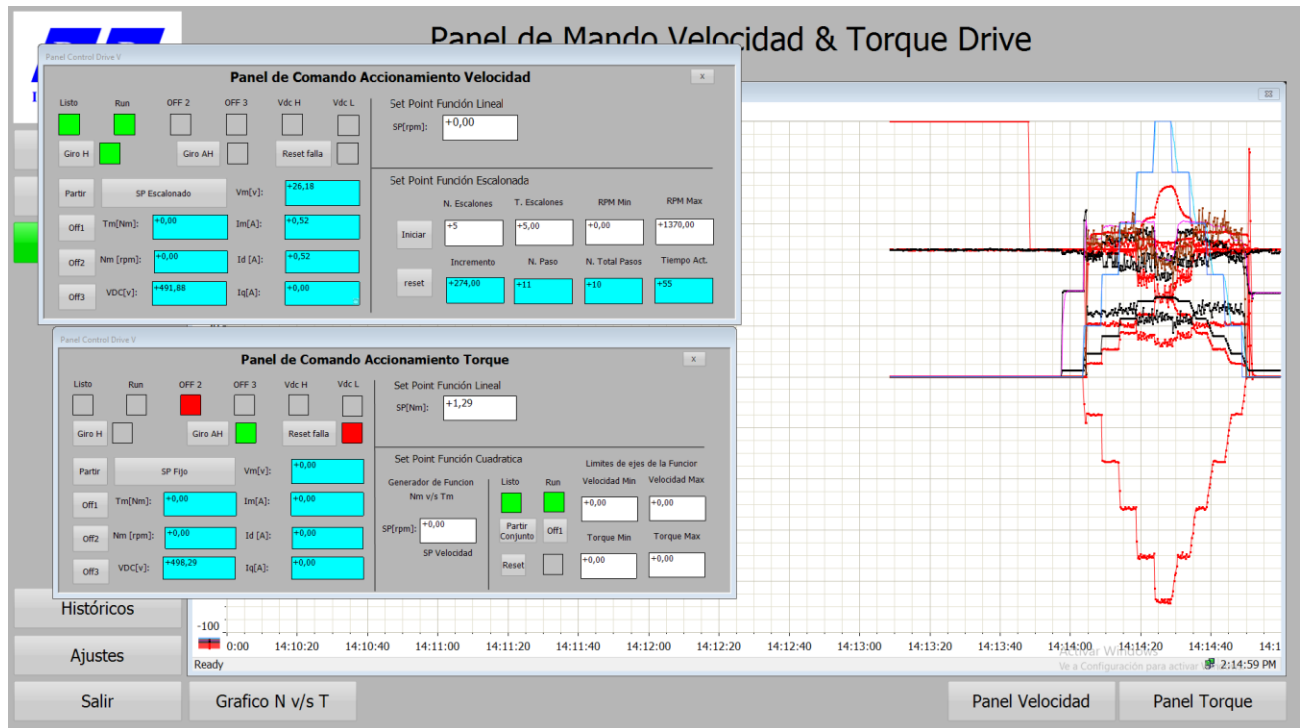


Fig. 5.1: Prueba 1 HMI

En la Fig. 5.1 se visualiza la primera prueba de la tabla realizada, en esta se realizó una función escalonada con 5 escalones de subida, 5 de bajada con un incremento de 274 [rpm] y un torque de función lineal de 1,29 [Nm]. Se visualiza que las alarmas responden de manera correcta al detectar una falla y también los botones para su ejecución, al igual que el gráfico.

Cabe destacar que en la prueba realizada salto una falla por sobre velocidad, ya que el control V/f no es capaz de mantener el torque en frecuencia igual a 0.

En las Fig 5.2 y Fig 5.3 se observan los Set Point de la plataforma experimental, tanto del accionamiento que lleva el control de velocidad como el accionamiento que simula una función de torque en el eje de los motores.

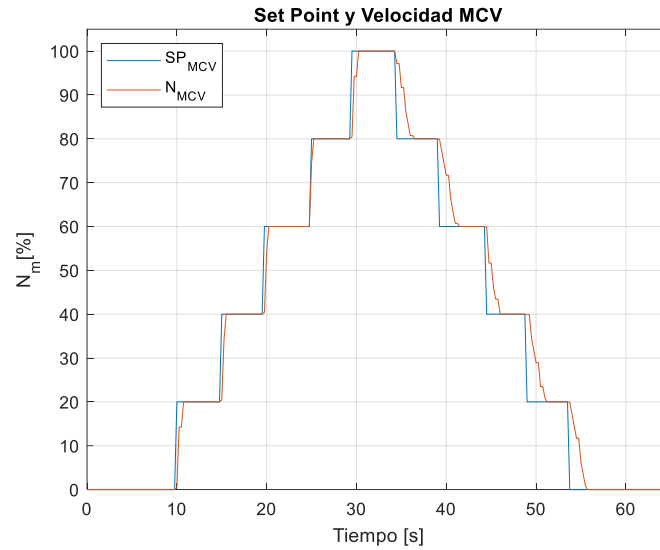


Fig. 5.2: Prueba 1: Set Point y Velocidad MCV

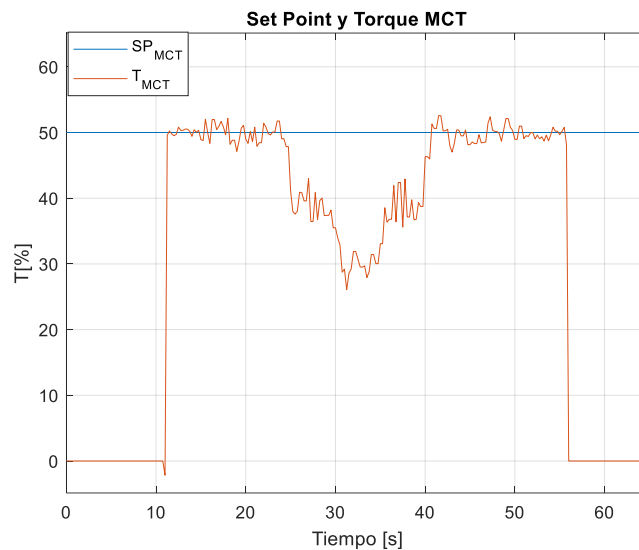


Fig. 5.3: Prueba 1: Set Point y Torque MCT

En el MCV de la Fig 5.2 se visualiza que se lleva a cabo la función escalonada estipulada para la prueba 1. El primer escalón del Set Point se realiza en el instante de 10 [s] en cambio la velocidad estimada del MCV le toma un tiempo de diferencia de 0.5 [s] llegar a la velocidad requerida en el instante de 10.5 [s], repitiéndose este mismo comportamiento en el segundo y tercer escalón. En el cuarto escalón se reduce el tiempo a 0.25 [s] de retraso. En el quinto escalón el Set Point llega 0.5 [s] antes, llegando la velocidad estimada a este valor en el instante de 29.5 [s].

Por el lado del descenso de los escalones el sexto escalón se ejecuta de manera correcta llegando en el instante de 35 [s]. Por el lado de la velocidad estimada, esta tiene mayor variación en el descenso llegando en todos los escalones con 2 [s] de diferencia respecto al Set Point. Por el lado

de este último se ejecuta de manera correcta en los escalones de descenso, menos en el octavo escalón que llega con una diferencia de 1 [s] respecto a lo esperado.

En el MCT de la Fig 5.3 se visualiza que se lleva a cabo la función lineal estipulada para la prueba 1. El Set Point se ejecuta en el instante de 10.75 [s], ya que, si el motor no lleva velocidad, no es capaz de controlar el torque haciendo que se acelere sin control el MCT.

Primeramente, se tiene un torque negativo por la fuerza realizada desde el MCV, al lazo de control le toma 0.75 [s] llevar el torque al Set Point requerido en el instante 11.25 [s].

Hasta el tercer escalón que dura hasta el instante de 25 [s] la simulación de carga lineal se lleva a cabo de manera correcta, no superando el 3% de diferencia respecto al Set Point. Para el cuarto escalón, ya se supera el 60% de velocidad respecto al nominal, en este instante el torque del MCT disminuye hasta casi el 26%, manteniendo una gran diferencia hasta el séptimo escalón.

Luego cuando se alcanza nuevamente el 60% de la velocidad nominal en el séptimo escalón, el MCT nuevamente puede llevar a cabo el Set Point requerido teniendo una diferencia máxima del 3%.

En las Fig 5.4 y Fig 5.5 se observan la interacción mecánica de la plataforma experimental basada en la ecuación (2.4).

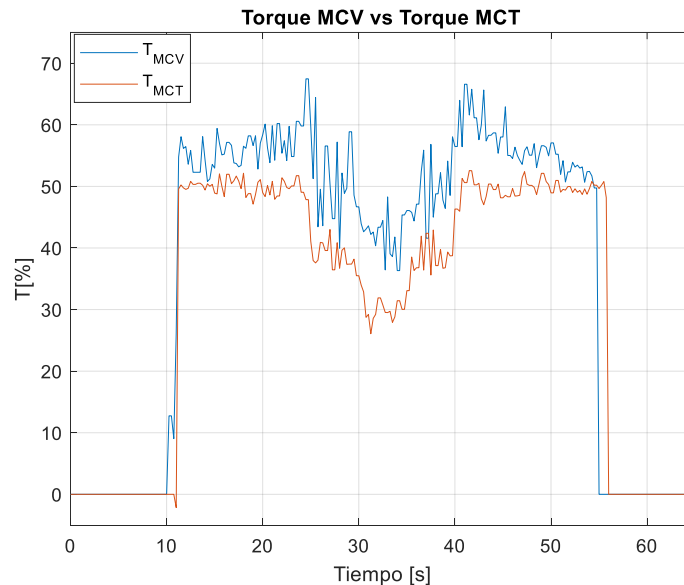


Fig. 5.4: Prueba 1: Torques de la Plataforma Experimental

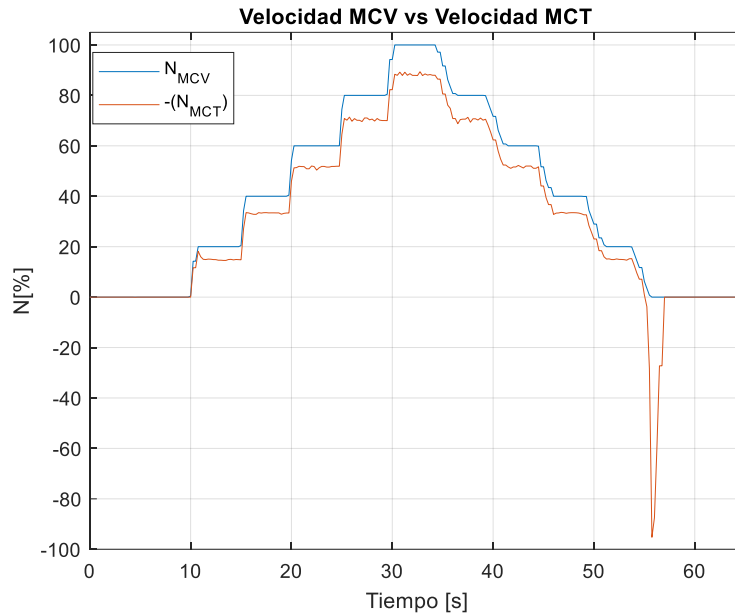


Fig. 5.5: Prueba 1: Velocidades de la Plataforma Experimental

En la Fig 5.4 se visualiza la interacción de los torques de la plataforma experimental. Por el lado del MCV este se ejecuta 1 [s] antes que el torque del MCT provocando un torque negativo en este último. En el instante de 11.25 [s] el MCT llega al torque requerido, siendo superado por todo momento hasta el instante de 55 [s] por el torque del MCV teniendo una diferencia del 20% en promedio durante este periodo de tiempo, aumentando y disminuyendo el torque del MCV en razón al ejecutado desde el MCT. Pasado el instante de 56 [s] el torque del MCV disminuye a 0, ya que el control V/f solo inyecta voltaje y frecuencia en razón a la velocidad requerida, por lo cual el torque del MCT pasa a ser mayor hasta el instante de 58 [s] donde se produce la falla vista en el la Fig 3.1.

En la Fig 5.5 se visualiza las velocidades de la plataforma experimental, estas difieren en el cómo se miden. Ya que el MCV estima la velocidad a partir de las variables del motor, en cambio el MCT visualiza la posición del rotor mediante el Encoder. Cabe destacar que este último toma valor de velocidad negativa, ya que, desde su perspectiva, el rotor gira en sentido antihorario. Por lo cual se invirtió su polaridad.

En el instante de 11 [s] hasta el 56 [s] la plataforma experimental acelera en sentido horario desde la perspectiva del MCV debido a que el torque del MCV es mayor que el del MCT. Luego en el instante 57 [s] el torque del MCT al superar el torque del MCV la plataforma experimental comienza a acelerar en sentido horario desde el punto de vista del MCT hasta el instante 58 [s] que es cuando se provoca la falla.

Por el lado de la diferencia de la velocidad medida y la velocidad estimada, esta presenta una diferencia a velocidades bajas (menor al 60%) del 7% en promedio, difiriendo siempre en una menor velocidad desde la tomada en el Encoder. Además, Teniendo una diferencia del 10% a una velocidad del 70% respecto a la nominal y llegando a una diferencia del 12% en el escalón más alto. Por lo cual se llegó a una velocidad máxima en la plataforma del 88% respecto a la nominal.

En las Fig 5.6 y Fig 5.7 se observan las corrientes de la plataforma experimental.

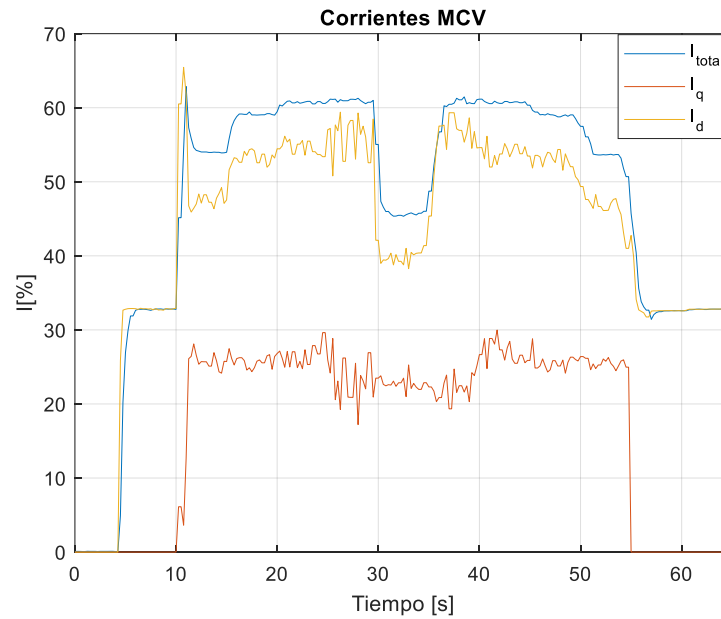


Fig. 5.6: Prueba 1: Corrientes MCV

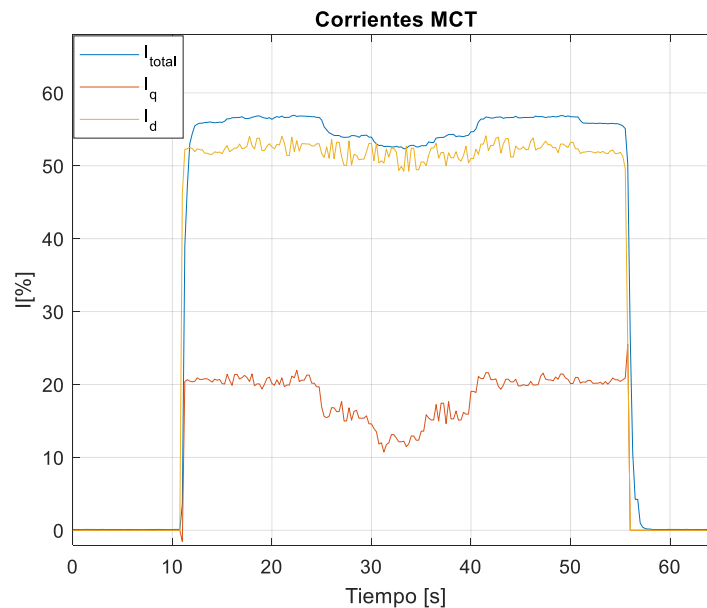


Fig. 5.7: Prueba 1: Corrientes MCT

En la Fig 5.6 se visualiza las corrientes del MCV. En el instante de 5 [s] se enciende el motor mediante el botón iniciar, por lo cual se magnetiza el motor teniendo una corriente de eje directo que llega a un valor 32% y una corriente de alimentación la cual llega a este valor 0.5 [s] después. En el instante de 10.75 [s] (La corriente de alimentación llega 0.25 [s] después) existe un peak de corriente debido a que el motor empieza a acelerar, induciendo la corriente de cuadratura con un valor del 6% generando un torque que hace que el eje comience a girar, luego en el instante 12 [s] al detectar la carga en el eje proveniente del MCT aumenta la corriente de cuadratura a un 28% para poder mantener la velocidad del Set Point, manteniendo esta corriente en un valor de 27% aproximándose mientras el eje se encuentra girando, encontrando su valor más bajo (23%) que es cuando el torque disminuye en la Fig 5.4. Por el lado de la corriente del eje directo esta tiene una variación del 20% en velocidades más bajas (menor al 60%), y encuentra su valor más bajo del 38% debido a la disminución de torque en la Fig 5.4.

En la Fig 5.7 se visualiza las corrientes del MCT. En el instante de 11 [s] se enciende el motor mediante el botón iniciar y se ejecuta el Set Point al mismo tiempo. Por lo cual se magnetiza el motor teniendo una corriente de alimentación que llega a un valor 3%, la corriente de eje directo llega al 46% y un pequeño valor negativo en la corriente de cuadratura, que se está inyectando energía. En el instante de 12 [s], la corriente de cuadratura llega a un valor de 20% ejerciendo un torque en el eje, la corriente de alimentación llega a un 54% y la de eje directo llega a un 52%. A velocidades bajas la corriente de cuadratura se mantiene en un 20%, la corriente de alimentación en un 56% y la corriente de eje directo en un 52%. A velocidades altas que es cuando el torque disminuye, la corriente de cuadratura disminuye hasta un 10%, la corriente de alimentación en un 2% y la corriente de eje directo se mantiene estable.

En las Fig 5.8 y Fig 5.9 se observan los voltajes de la plataforma experimental.

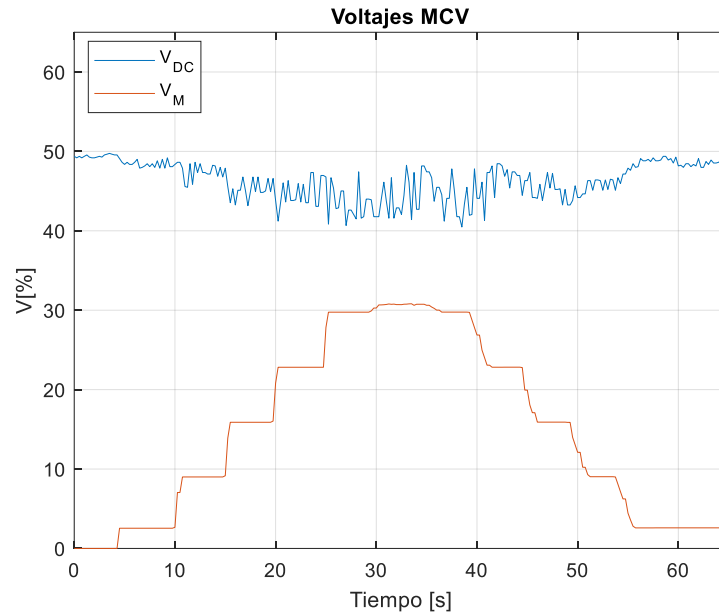


Fig. 5.8: Prueba 1: Voltajes MCV

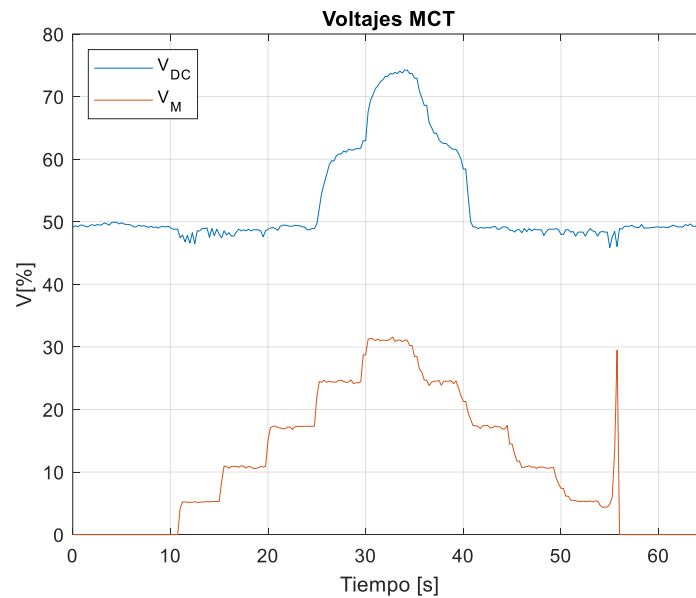


Fig. 5.9: Prueba 1: Voltajes MCT

En la Fig. 5.8 se visualiza el voltaje en el MCV. Por el lado de la fuente de voltaje del DC-Link este disminuye proporcionalmente a medida que se le inyecta voltaje al motor. Por el lado del voltaje de alimentación, en el instante de 5 [s] se enciende el motor por lo cual se inyecta voltaje al estator, que aumenta su índice de modulación de la PWM a medida que la velocidad va aumentando. Teniendo limite en el cuarto escalón (60% de la velocidad nominal), que en este periodo de tiempo se mantiene el nivel de voltaje, disminuyendo a medida que la velocidad disminuye.

En la Fig 5.9 se visualiza el voltaje en el MCV. Por el lado de la fuente de voltaje del DC-Link este disminuye en un 2% en velocidades bajas (bajo el 60% de velocidad nominal), cuando se supera el 60% de velocidad, se empieza a inyectar energía en el motor, llegando la fuente de voltaje a un valor del 73%, disminuyendo a medida que la velocidad baja. Por el lado del voltaje de alimentación, en el instante de 11 [s] se enciende el motor por lo cual se inyecta voltaje al estator, que aumenta su índice de modulación de la PWM a medida que la velocidad va aumentando. Cuando la velocidad del motor llega a 0, se inyecta voltaje proporcional a la aceleración sin control del motor, lo cual provoca la falla vista en la Fig 5.1.

5.5.2 Prueba 2

En la Fig. 5.10 se visualiza la segunda prueba de la tabla realizada. En esta se realizó una función escalonada con: 5 escalones de subida, 5 de bajada con un incremento de 274 [rpm] y un torque de función lineal de 1,29 [Nm]. Se visualiza que las alarmas responden de manera correcta y también los botones para su ejecución, al igual que el gráfico.

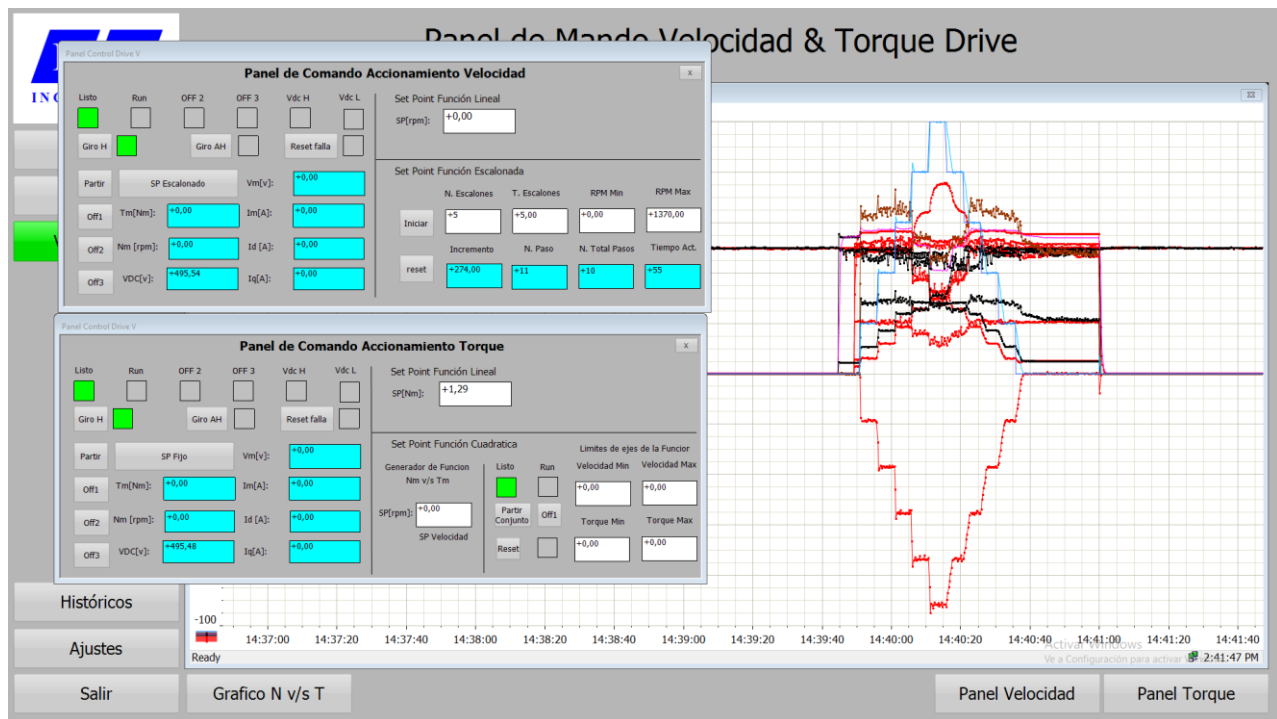


Fig. 5.10: Prueba 2 HMI

En las Fig 5.11 y Fig 5.12 se observan los Set Point de la plataforma experimental, tanto del accionamiento que lleva el control de velocidad como el accionamiento que simula una función de torque en el eje de los motores.

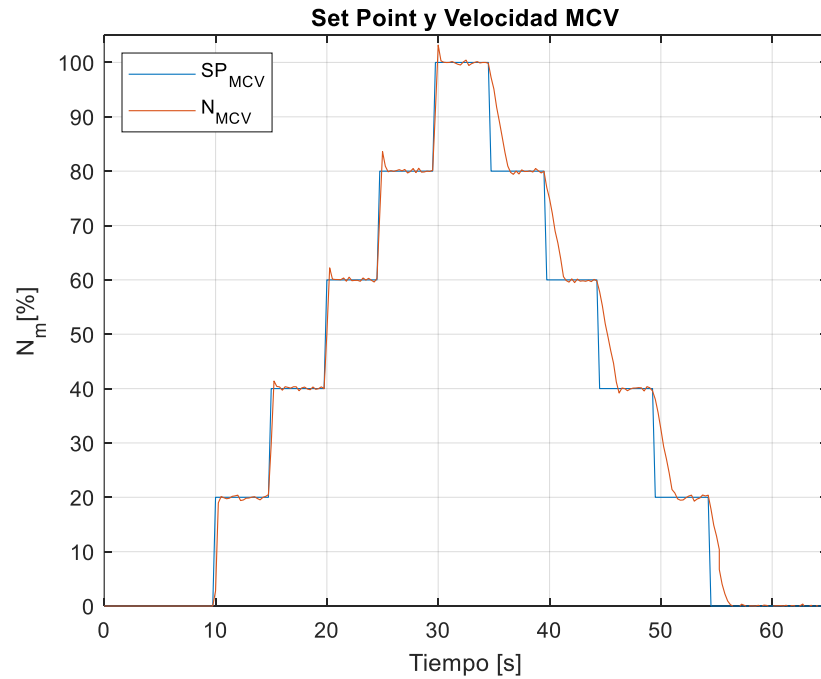


Fig. 5.11: Prueba 2: Set Point y Velocidad MCV

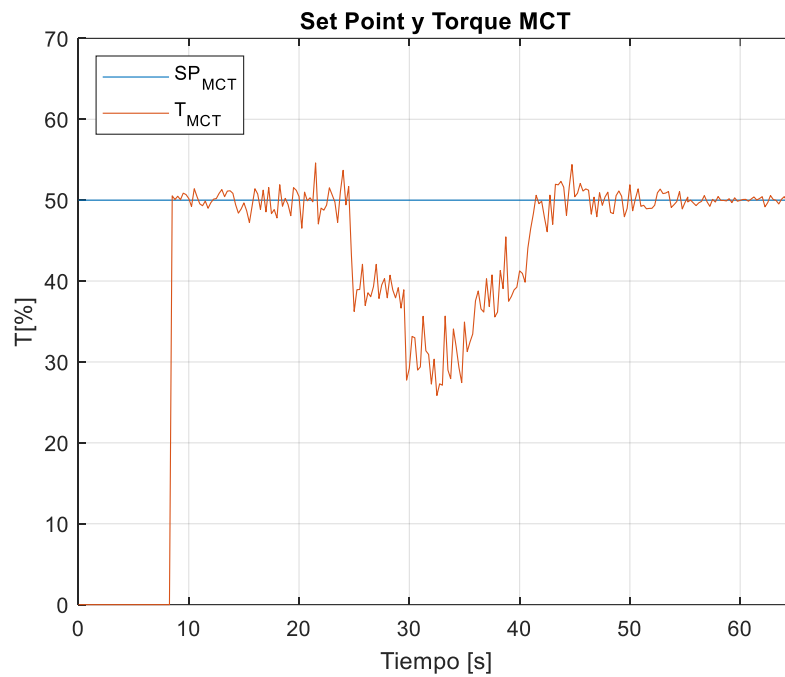


Fig. 5.12: Prueba 2: Set Point y Torque MCT

En la Fig 5.11 se visualiza el Set Point de la función escalonada, en el instante de 10 [s] se ejecuta el primer escalón produciendo de manera correcta todos los escalones de ascenso. En el descenso de la función escalonada este se ejecuta de manera correcta.

Por el lado de la velocidad estimada, en el ascenso de los escalones esta se ejecuta en los tiempos correctos, teniendo una pequeña sobre velocidad por un instante al llegar al escalón de no más del 3%. En el descenso la velocidad estimada llega en todos los escalones 2 [s] de retardo.

En la Fig 5.12 se visualiza el Set Point del MCT y su torque, este último se activa en el instante de 8.5 [s] logrando el MCV con lazo de SLCV mantener el torque en $f \approx 0$ [Hz] (funcionando a esta frecuencia en lazo abierto [12]), luego cuando se activa la función escalonada, el MCT mantiene un torque estable que varía en un máximo del 4% con velocidades bajo el 60% respecto a la nominal. Cuando se supera la velocidad del 60%, el torque del motor baja en un máximo del 25% respecto al Set Point. Manteniendo de mejor manera la referencia de Set Point cuando la plataforma experimental vuelve a funcionar con el eje en $f \approx 0$ [Hz].

En las Fig 5.13 y Fig 5.14 se observan la interacción mecánica de la plataforma experimental basada en la ecuación (2.4).

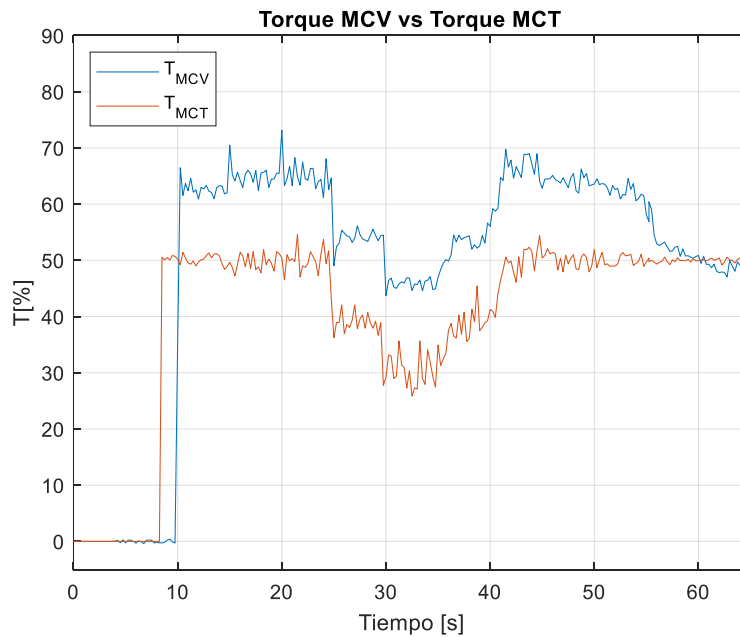


Fig. 5.13: Prueba 2: Torques de la Plataforma Experimental

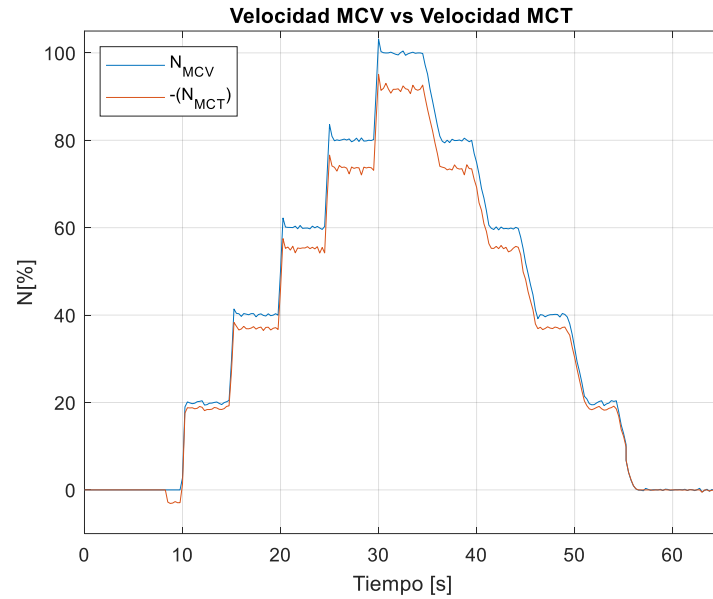


Fig. 5.14: Prueba 2: Velocidades de la Plataforma Experimental

En la Fig 5.13 se observa la interacción de los torques de la plataforma experimental. En el instante de los 8.5 [s] se ejecuta el torque del MCT, a pesar de no registrarse torque en el MCV este es capaz de sostener este torque con $f = 0$ [Hz] hasta el instante de 10 [s] que es cuando el motor empieza a acelerar. Luego entre los instantes de 10 [s] al 60 [s] el torque del MCV es mayor que el torque del MCT (haciendo que acelere en sentido horario respecto al MCV), manteniendo una diferencia promedio del 10% a velocidades menores al 60% respecto a la velocidad nominal. Cuando esta velocidad es superada la diferencia aumenta a un promedio del 15%. Cuando la plataforma experimental vuelve a $f = 0$ [Hz] existe una diferencia del 3% entre los torques (pasando a ser menor el torque del MCV), lo que es suficiente para mantener el torque del MCT a esta frecuencia.

En la Fig 5.14 se observa la interacción de las velocidades medidas de la plataforma experimental. En el instante de los 8 [s] se ejecuta el torque del MCT por lo cual existe una pequeña velocidad del 2% medida por el Encoder (que no se apreció físicamente), que no es detectada por la estimación de velocidad del MCV. Cuando se ejecuta la función escalón a velocidades menores al 60% se tiene una diferencia promedio del 3%, sobre velocidades del 60% el error aumenta a un 8% llegando a una velocidad máxima del 95% respecto a la nominal. Cuando la plataforma experimental vuelve a $f = 0$ [Hz] no existe una diferencia entre las velocidades medidas.

En las Fig 5.15 y Fig 5.16 se observan las corrientes de la plataforma experimental.

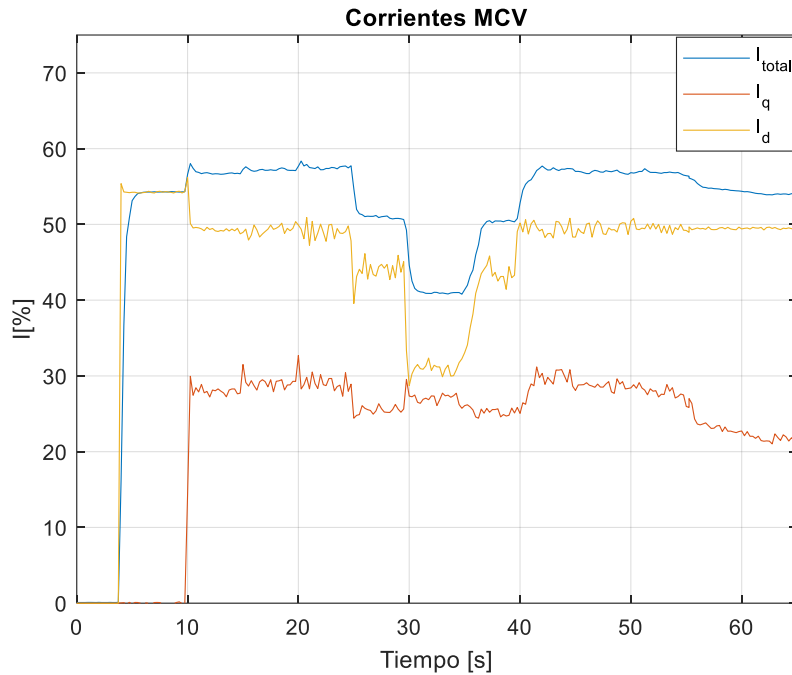


Fig. 5.15: Prueba 2: Corrientes MCV

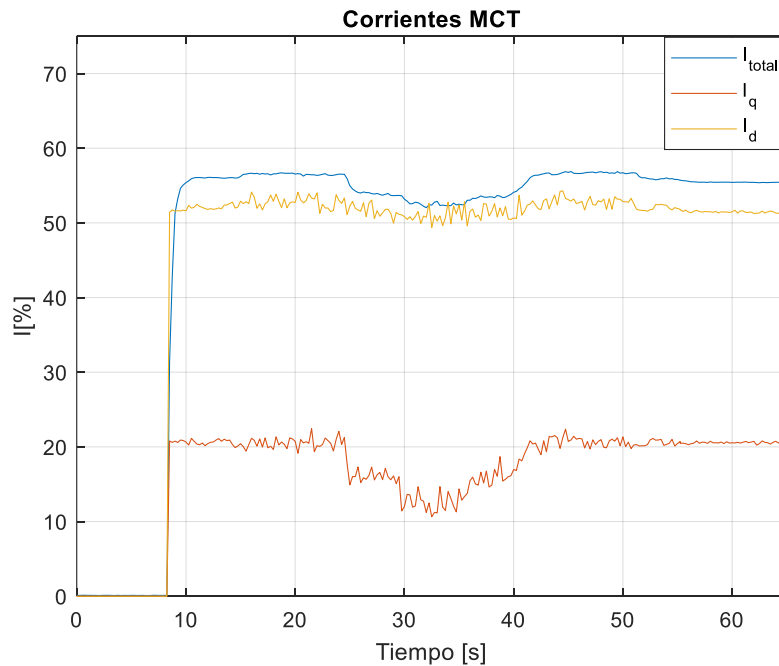


Fig. 5.16: Prueba 2: Corrientes MCT

En la Fig 5.15 se visualiza las corrientes del MCV. En el instante de 3 [s] se enciende el motor mediante el botón iniciar, por lo cual se magnetiza el motor teniendo una corriente de eje directo que llega a un valor 54% y una corriente de alimentación la cual llega a este valor 1.25 [s] después. El MCV es capaz de mantener el torque en $f = 0 [Hz]$ solo manteniendo esta corriente de

magnetización. En el instante de 10 [s] cuando se activa el primer escalón hay un peak de corriente que llega 58% de valor tanto para la corriente de alimentación como la de eje de directo. Además, la corriente se induce mediante la corriente de cuadratura generando un torque llegando al valor del 29%. Esta última corriente mantiene en promedio su valor hasta llegar a frecuencia de 0 [Hz], a diferencia de la corriente de alimentación y la de eje directo que disminuyen su valor a velocidades mayores al 60%, y manteniéndolo a velocidades menores a esta última.

En la Fig 5.16 se visualiza las corrientes del MCT. En el instante de 8 [s] se ejecuta el torque por lo cual se inyecta corriente de alimentación que llega a un valor del 42%, una corriente que magnetiza al motor siendo la corriente de eje directo que llega al 51% y una corriente inducida que genera torque que llega a un valor del 20%. Luego, cuando se ejecuta la función escalonada a velocidades menores al 60% las corrientes se mantienen en su mismo valor. Cuando la velocidad supera el 60% existe una disminución de la corriente de alimentación que varía en un 3% y de la corriente de cuadratura que disminuye hasta en un 9% a la velocidad más alta. Luego cuando se vuelve a $f = 0$ [Hz] las corrientes mantienen sus valores.

En las Fig 5.17 y Fig 5.18 se observan los voltajes de la plataforma experimental.

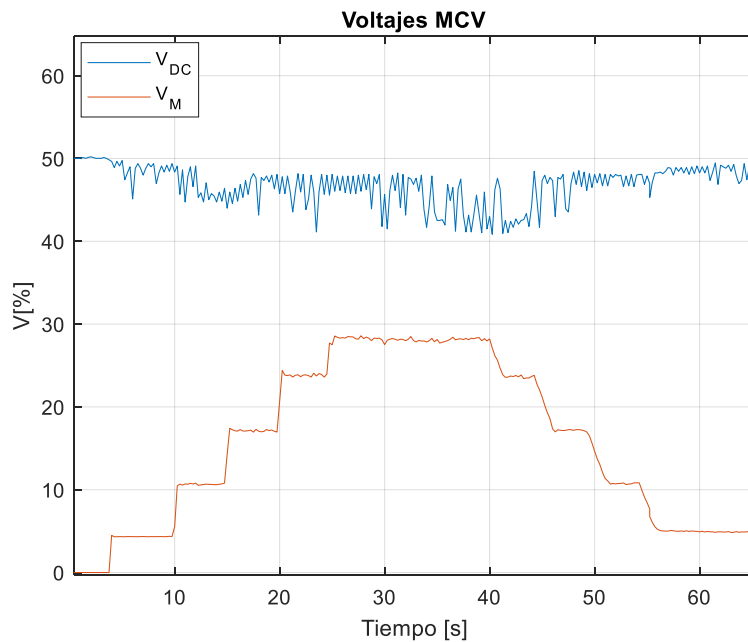


Fig. 5.17: Prueba 2: Voltajes MCV

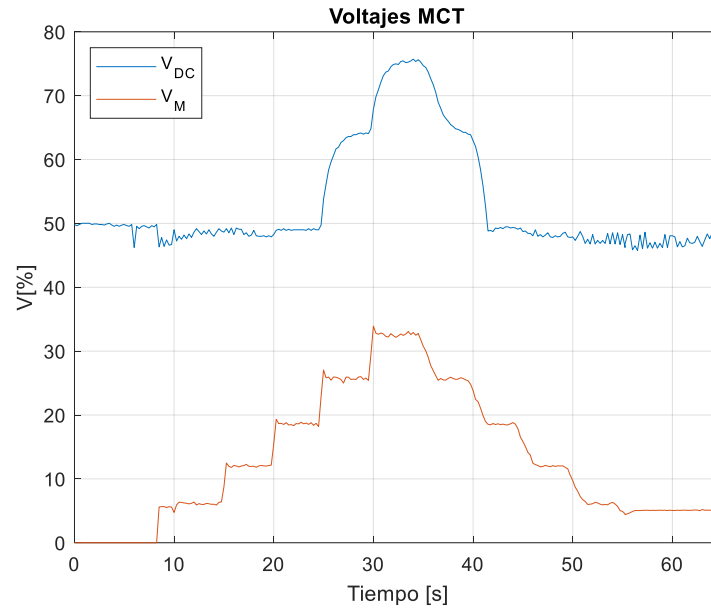


Fig. 5.18: Prueba 2: Voltajes MCT

En la Fig 5.17 se visualiza el voltaje en el MCV. Por el lado de la fuente de voltaje del DC-Link este disminuye proporcionalmente a medida que se le inyecta voltaje al motor. Por el lado del voltaje de alimentación, en el instante de 3 [s] se enciende el motor por lo cual se inyecta voltaje al estator, que aumenta su índice de modulación de la PWM a medida que la velocidad va aumentando. Hasta que se llega a 60% de la velocidad nominal, en este periodo de tiempo se mantiene el nivel de voltaje, disminuyendo a medida que la velocidad disminuye y manteniendo un voltaje cuando se llega a $f = 0$ [Hz] manteniendo magnetizado el motor.

En la Fig 5.18 se visualiza el voltaje en el MCV. Por el lado de la fuente de voltaje del DC-Link este disminuye en un 2% en velocidades bajo el 60% de velocidad nominal, cuando se supera el 60% de velocidad, se empieza a inyectar energía en el motor, llegando la fuente de voltaje a un valor del 75%, disminuyendo a medida que la velocidad baja. Por el lado del voltaje de alimentación, en el instante de 8 [s] se enciende el motor por lo cual se inyecta voltaje al estator, que aumenta su índice de modulación de la PWM a medida que la velocidad va aumentando. Cuando la velocidad del motor llega a 0 se sigue inyectando la misma energía que en el primer escalón (5%), manteniendo el torque requerido.

5.5.3 Prueba 3

En la Fig. 5.19 se visualiza la tercera prueba de la tabla realizada. En esta se realizó una función escalonada con 5 escalones de subida, 5 de bajada con un incremento de 137 [rpm] y un torque función cuadrática que depende de esta función escalonada. Se visualiza que las alarmas responden de manera correcta y también los botones para su ejecución, al igual que los gráficos.

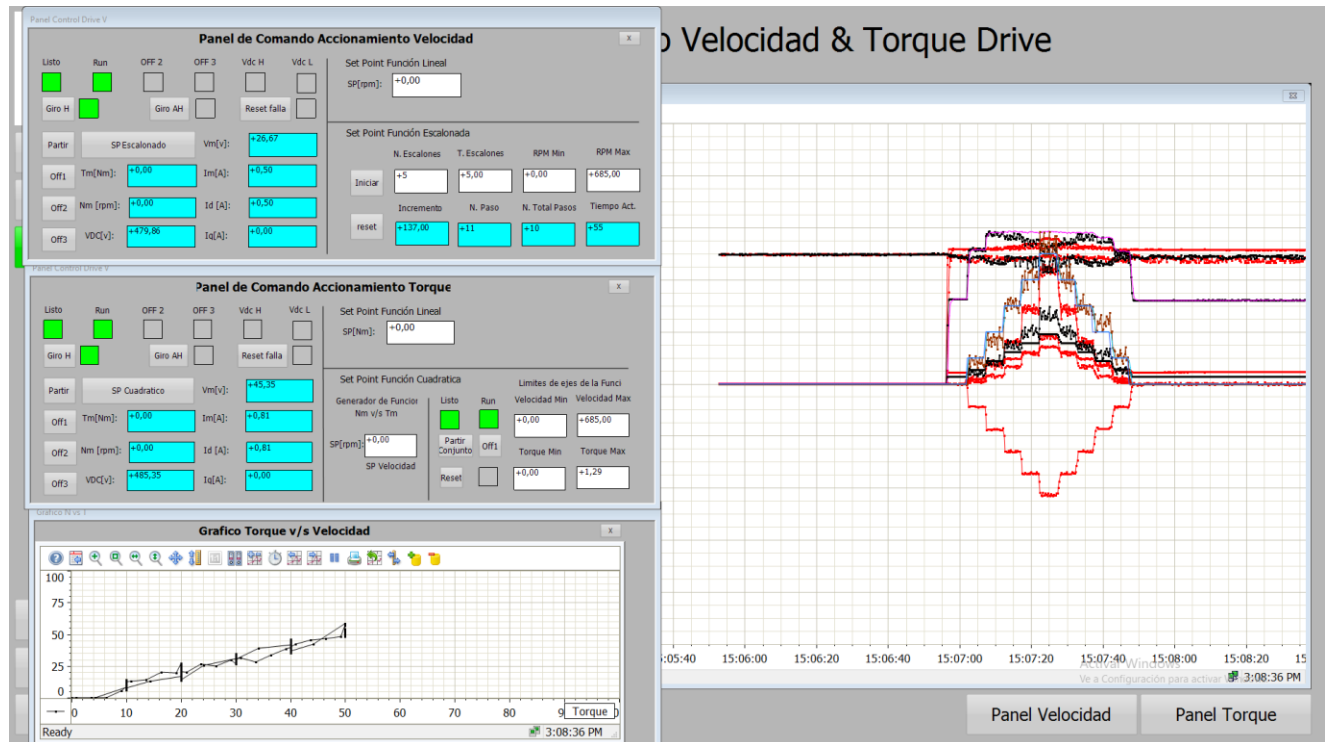


Fig. 5.19: Prueba 3 HMI

En la Fig 5.20 se visualiza la función cuadrática generada de Velocidad v/s Torque. En esta a medida que aumenta la velocidad se forma la curva cuadrática. Lo que permite simular cargas como bombas centrífugas o ventiladores.

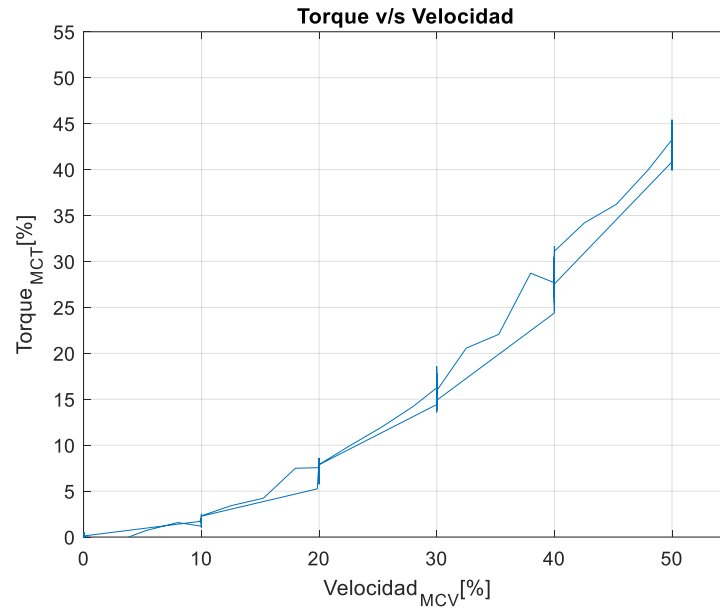


Fig. 5.20: Prueba 3: Velocidad v/s Torque de la Plataforma Experimental

En las Fig 5.21 y Fig 5.22 se observan los Set Point de la plataforma experimental, tanto del accionamiento que lleva el control de velocidad como el accionamiento que simula una función de torque en el eje de los motores.

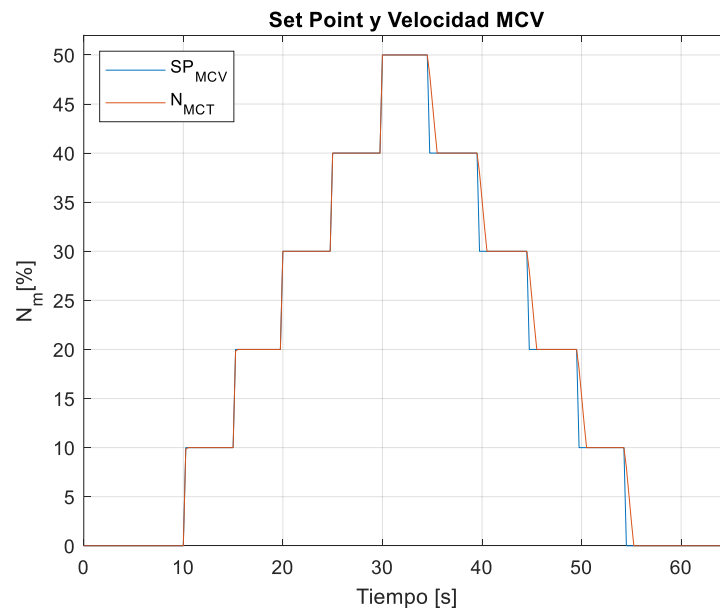


Fig. 5.21: Prueba 3: Set Point y Velocidad MCV

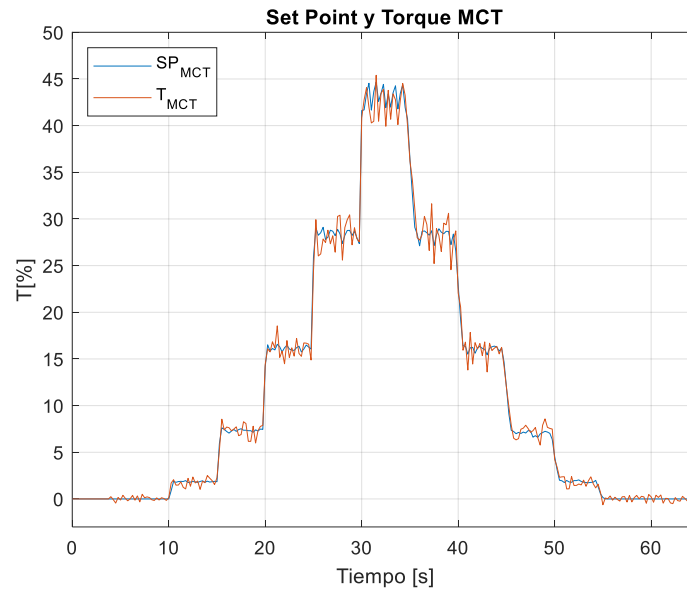


Fig. 5.22: Prueba 3: Set Point y Torque MCT

En la Fig 5.21 se visualiza el Set Point del MCV este se ejecuta de manera correcta con los tiempos esperados. Por el lado de la velocidad estimada, en los escalones de ascenso sigue de manera perfecta el Set Point, por otro lado, en los escalones de descenso estos llegan 1 [s] en retraso respecto al Set Point.

En la Fig 5.22 se visualiza el Set Point generado a partir de la velocidad estimada del MCV, este aumenta y disminuye dependiendo de la velocidad del MCV. El torque generado por el MCT sigue de buena manera el Set Point generado, teniendo una variación máxima del 3% respecto a este último.

En las Fig 5.23 y Fig 5.24 se observan la interacción mecánica de la plataforma experimental basada en la ecuación (2.4).

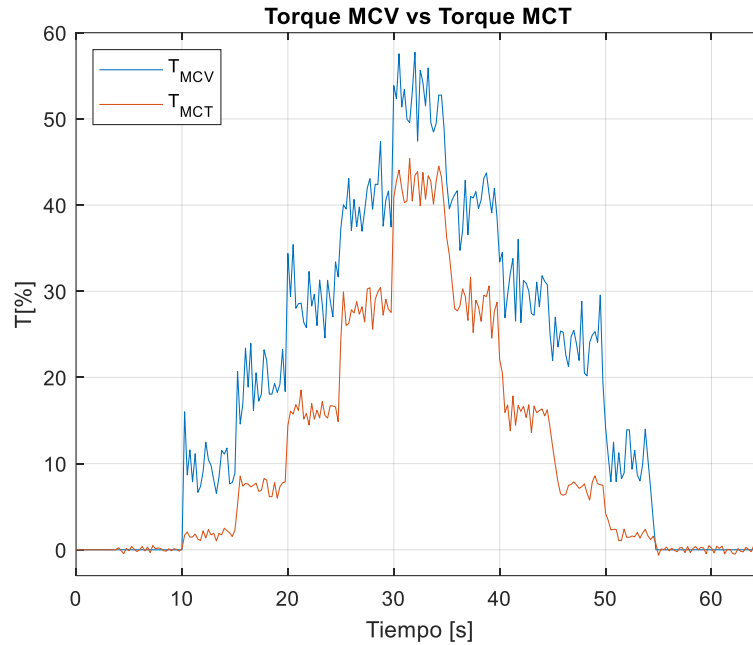


Fig. 5.23: Prueba 3: Torques de la Plataforma Experimental

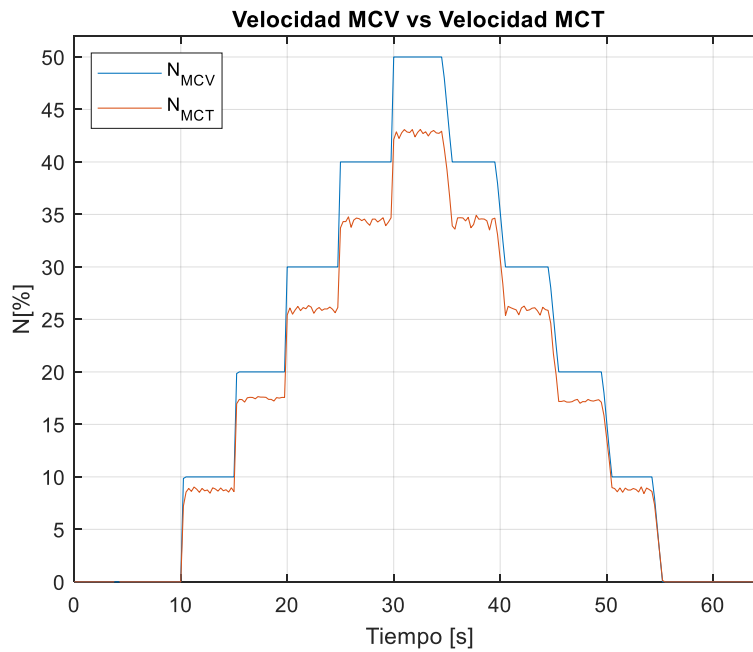


Fig. 5.24: Prueba 3: Velocidades de la Plataforma Experimental

En la Fig 5.23 se visualiza la interacción de los torques de la plataforma experimental. En el instante de 10 [s] ambos accionamientos comienzan a generar torque. El torque del MCV se mantiene sobre el torque del MCT por toda la prueba, teniendo un valor promedio del 12%. Esto hace que la plataforma acelere en sentido horario respecto al MCV.

En la Fig 5.24 se visualiza la diferencia entre la velocidad estimada del MCV con la velocidad medida mediante el Encoder del MCT. En velocidades menor al 30% se obtuvo una diferencia del 3% respecto a la medida en el Encoder, sobre esta velocidad se obtuvo una diferencia del 8%.

En las Fig 5.25 y Fig 5.26 se observan las corrientes de la plataforma experimental.

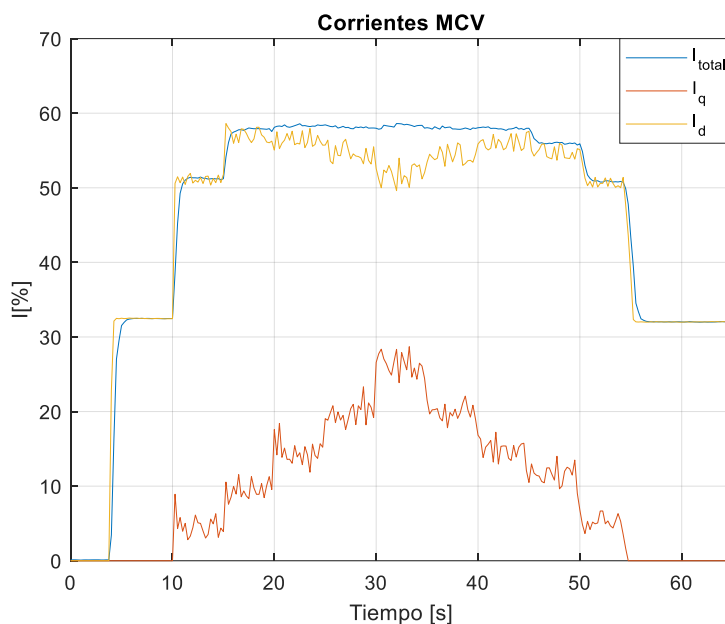


Fig. 5.25: Prueba 3: Corrientes MCV

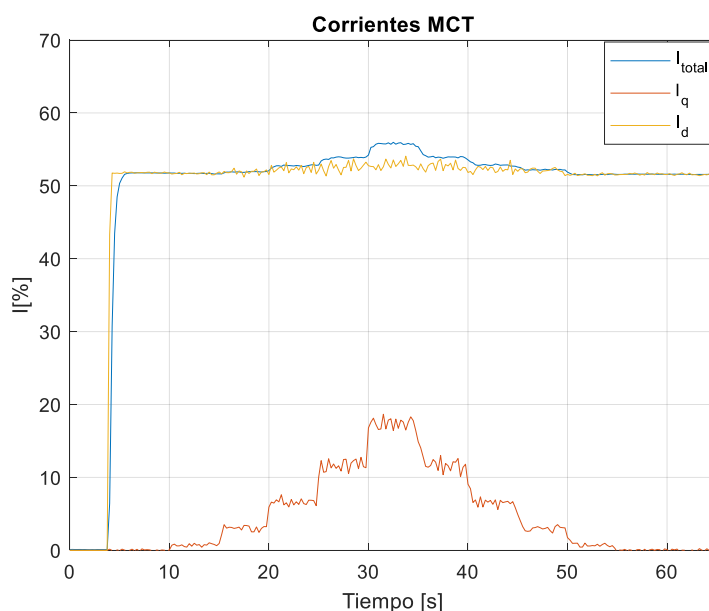


Fig. 5.26: Prueba 3: Corrientes MCT

En la Fig 5.25 se visualiza las corrientes del MCV. En el instante de 5 [s] se enciende el motor mediante el botón iniciar, por lo cual se magnetiza el motor teniendo una corriente de eje directo que

llega a un valor 32% y una corriente de alimentación, la cual llega a este valor 1 [s] después. En el instante de 10 [s] se comienza a generar la función escalón en el MCV generando una mayor corriente, llegando a tener una corriente de alimentación y de eje directo del 51%, induciendo una corriente de cuadratura del 8%. Luego a medida que la velocidad aumenta las corrientes también, pero pasado el tercer escalón solo aumenta la corriente total y la corriente de cuadratura la cual llega a un máximo del 28%.

En la Fig 5.26 se visualizan las corrientes del MCT. En el instante de 5 [s] se enciende el motor mediante el botón iniciar, por lo cual se magnetiza el motor teniendo una corriente de eje directo que llega a un valor 51% y una corriente de alimentación, la cual llega a este valor 1 [s] después. En el instante de 10 [s] se comienza a generar la función exponencial en el MCT, por lo cual se induce corriente de cuadratura para generar un pequeño torque, que aumenta a media que el torque lo hace de igual manera. Por el lado de la corriente de eje directo aumenta levemente (3%) a medida que aumenta la velocidad. Al igual que la corriente de alimentación que aumenta un poco más sobre esta última en el quinto escalón llegando a un valor del 55%.

En las Fig 5.27 y Fig 5.28 se observan los voltajes de la plataforma experimental.

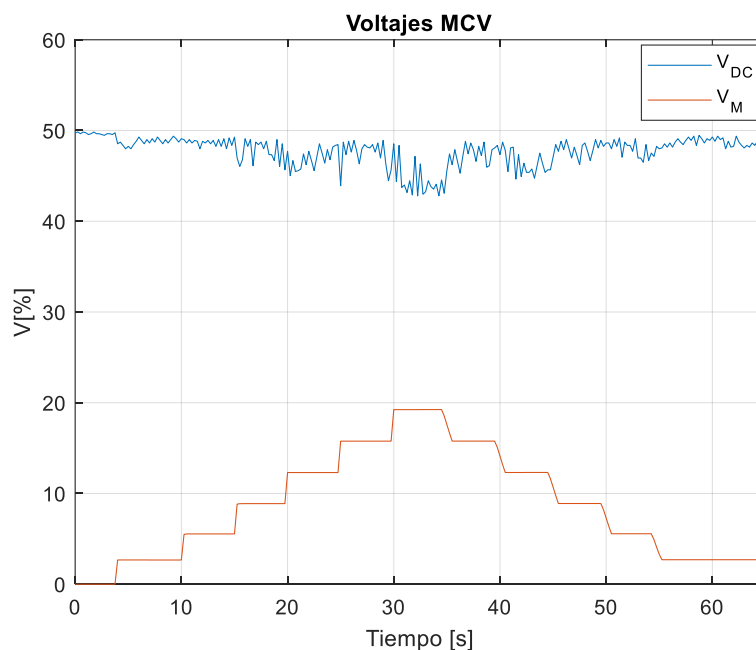


Fig. 5.27: Prueba 3: Voltajes MCV

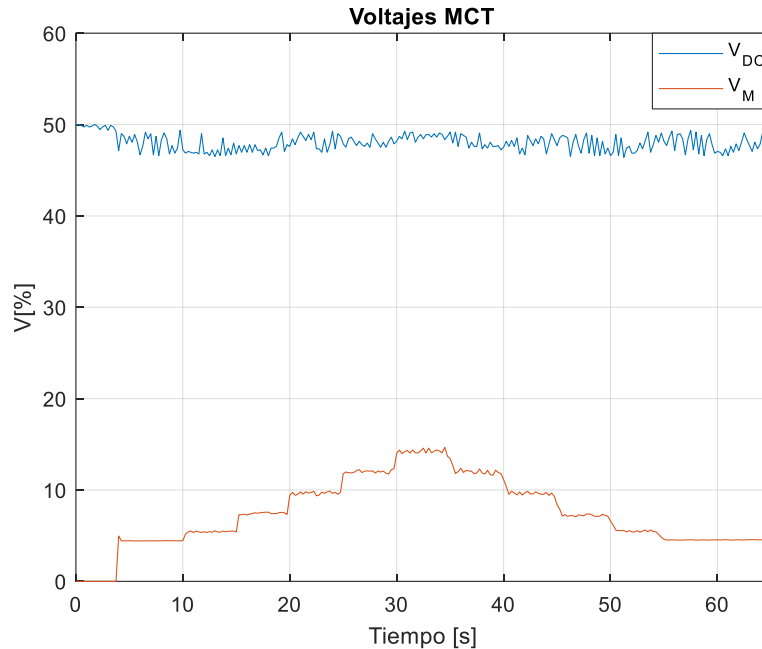


Fig. 5.28: Prueba 3: Voltajes MCT

En la Fig 5.27 se visualiza el voltaje en el MCV. Por el lado de la fuente de voltaje del DC-Link este disminuye proporcionalmente a medida que se le inyecta voltaje al motor. Por el lado del voltaje de alimentación, en el instante de 5 [s] se enciende el motor por lo cual se inyecta voltaje al estator, que aumenta su índice de modulación de la PWM a medida que la velocidad va aumentando. Manteniendo un pequeño voltaje luego de que la función escalón vuelva a una velocidad 0, ya que el motor sigue encendido.

En la Fig 5.28 se visualiza el voltaje en el MCT. Por el lado de la fuente de voltaje del DC-Link este disminuye proporcionalmente a medida que se le inyecta voltaje al motor. Por el lado del voltaje de alimentación, en el instante de 5 [s] se enciende el motor por lo cual se inyecta voltaje al estator, que aumenta su índice de modulación de la PWM a medida que la velocidad va aumentando. Manteniendo un pequeño voltaje luego de que la función exponencial vuelva a una velocidad 0, ya que el motor sigue encendido.

5.5.4 Prueba 4

En la Fig. 5.29 se visualiza la cuarta prueba de la tabla realizada, en esta se realizó una función escalonada con 5 escalones de subida, 5 de bajada con un incremento de 137 [rpm] y un torque función cuadrática que depende de esta función escalonada. Se visualiza que las alarmas responden de manera correcta y también los botones para su ejecución, al igual que los gráficos.

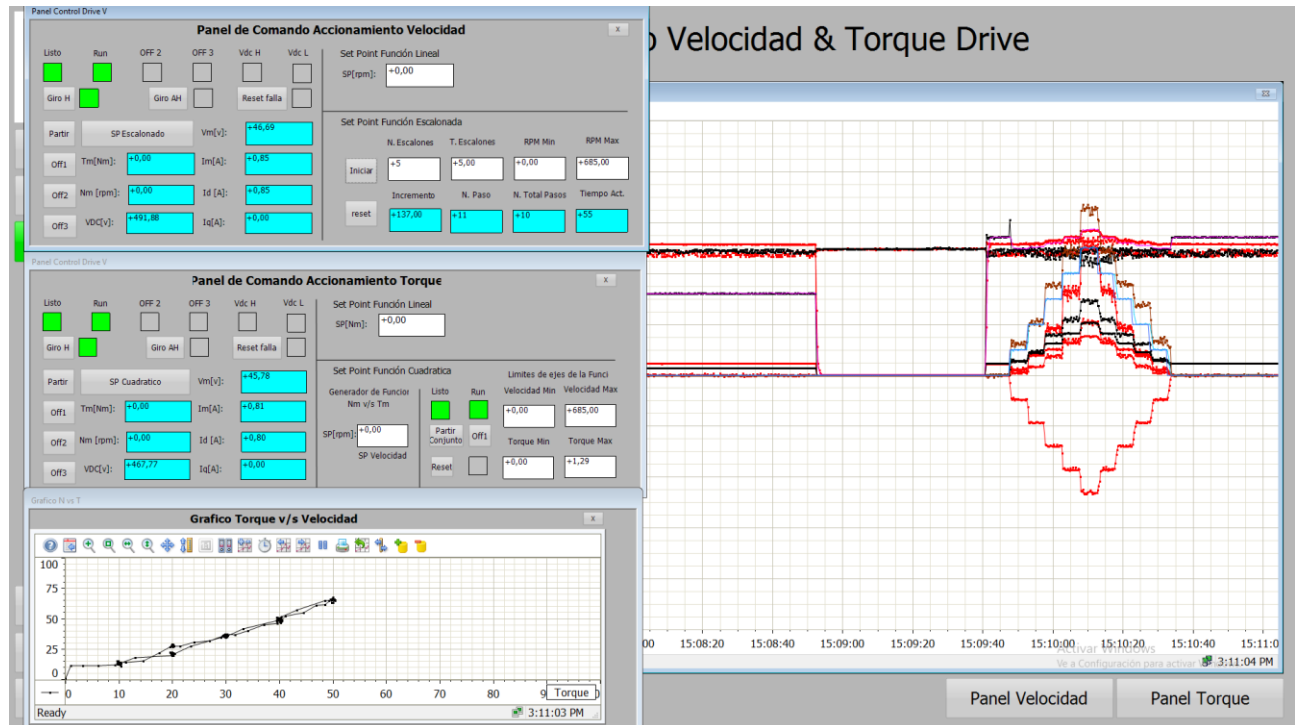


Fig. 5.29: Prueba 4 HMI

Ya obtenidos los resultados en la plataforma experimental se extraen los datos en archivo .csv y se grafican mediante código para su posterior análisis y evaluación de estos.

En la Fig 5.30 se visualiza la función cuadrática generada de Velocidad v/s Torque. En esta a medida que aumenta la velocidad el torque también aumenta en proporción de esta, de esta manera generando una función su forma cuadrática. Lo que permite simular cargas cuadráticas como bombas centrífugas o ventiladores.

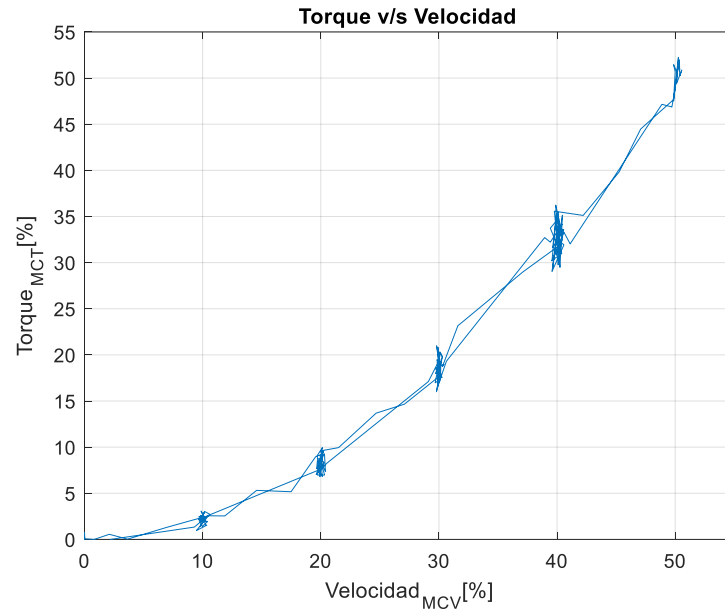


Fig. 5.30: Prueba 4: Velocidad v/s Torque de la Plataforma Experimental

En las Fig 5.31 y Fig 5.32 se observan los Set Point de la plataforma experimental, tanto del accionamiento que lleva el control de velocidad como el accionamiento que simula una función de torque en el eje de los motores.

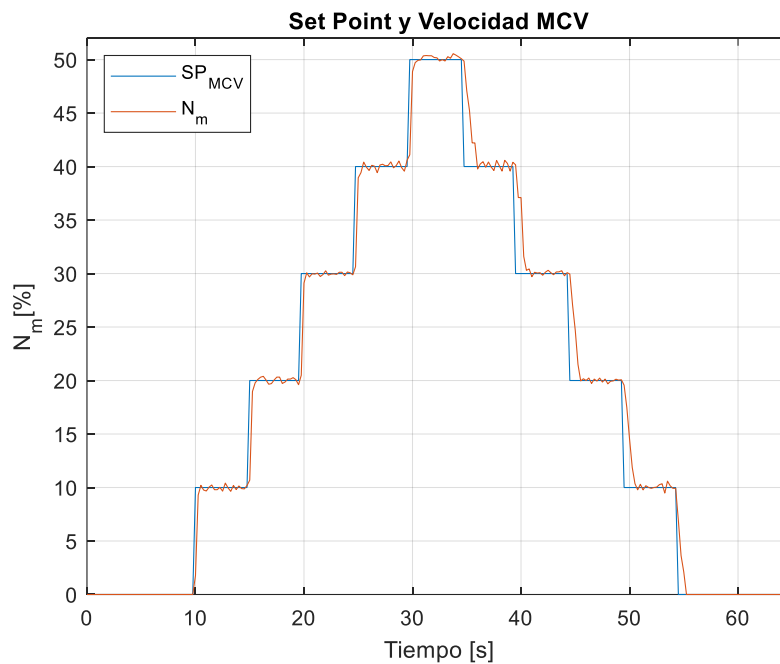


Fig. 5.31: Prueba 4: Set Point y Velocidad MCV

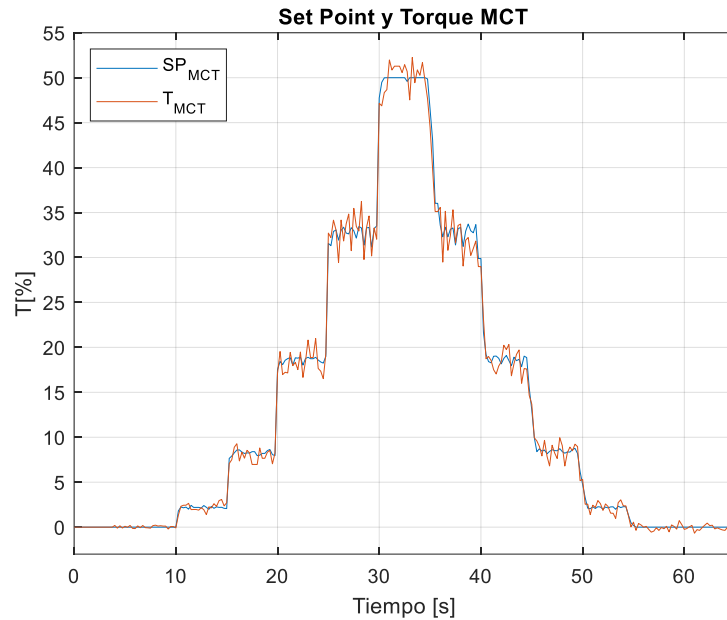


Fig. 5.32: Prueba 4: Set Point y Torque MCT

En el MCV de la Fig 5.31 se visualiza que se lleva a cabo la función escalonada. El primer escalón del Set Point se realiza en el instante de 10 [s], ejecutándose de manera correcta.

Por el lado del descenso de los escalones el sexto escalón se ejecuta de manera incorrecta llegando 1 [s] después, repitiéndose en los siguientes escalones a excepción del séptimo. Por el lado de la velocidad estimada, esta tiene mayor variación en el descenso llegando en todos los escalones con 2 [s] de diferencia respecto al Set Point.

En la Fig 5.32 se visualiza el Set Point generado a partir de la velocidad estimada del MCV, este aumenta y disminuye dependiendo de la velocidad del MCV. El torque generado por el MCT sigue de buena manera el Set Point generado, teniendo una variación máxima del 3% respecto a este último.

En las Fig 5.33 y Fig 5.34 se observan la interacción mecánica de la plataforma experimental basada en la ecuación (2.4).

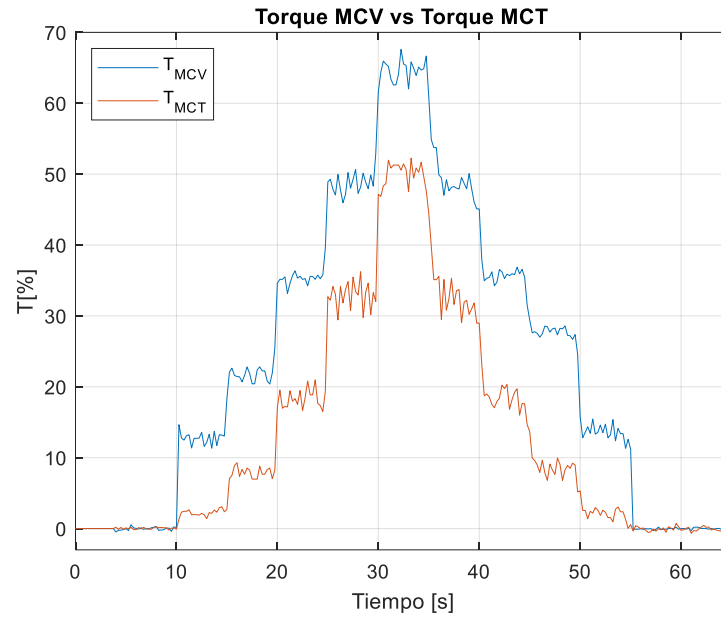


Fig. 5.33: Prueba 4: Torques de la Plataforma Experimental

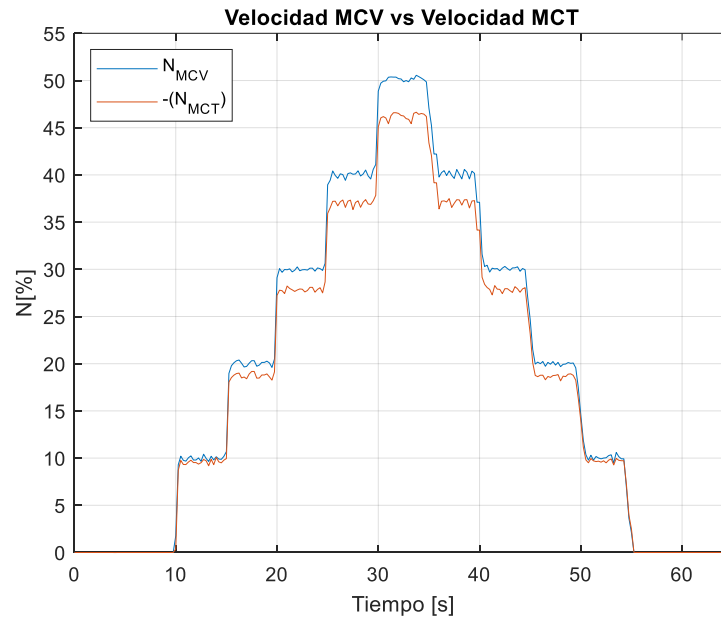


Fig. 5.34: Prueba 4: Velocidades de la Plataforma Experimental

En la Fig 3.33 se visualiza la interacción de los torques de la plataforma experimental. En el instante de 10 [s] ambos accionamientos comienzan a generar torque. El torque del MCV se mantiene sobre el torque del MCT por toda la prueba, teniendo un valor promedio del 14%. Esto hace que la plataforma acelere en sentido horario respecto al MCV.

En la Fig 3.34 se visualiza la diferencia entre la velocidad estimada del MCV con la velocidad medida mediante el Encoder del MCT. En velocidades menor al 30% se obtuvo una diferencia del 2% respecto a la medida en el Encoder, sobre esta velocidad se obtuvo una diferencia del 3%.

En las Fig 5.35 y Fig 5.36 se observan las corrientes de la plataforma experimental.

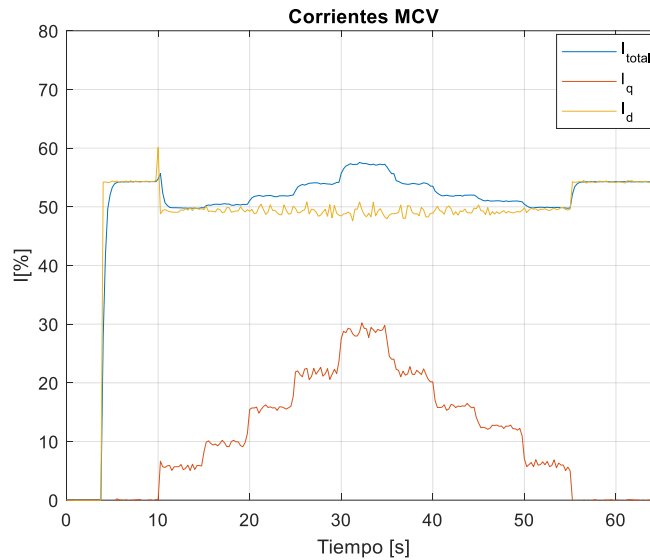


Fig. 5.35: Prueba 4: Corrientes MCV

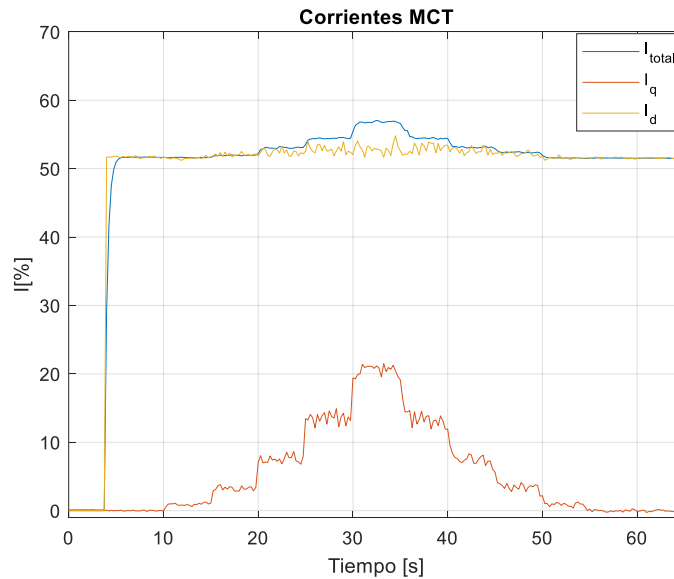


Fig. 5.36: Prueba 4: Corrientes MCT

En la Fig 3.35 se visualiza las corrientes del MCV. En el instante de 5 [s] se enciende el motor mediante el botón iniciar, por lo cual se magnetiza el motor teniendo una corriente de eje directo que llega a un valor 54% y una corriente de alimentación, la cual llega a este valor 1.5 [s] después. En el instante de 10 [s] se comienza a generar la función escalón en el MCV generando una mayor corriente

de eje directo con un peak del 60% y una corriente de alimentación que se mantiene en su valor, induciendo una corriente de cuadratura del 6%. Luego a medida que la velocidad aumenta las corrientes también, pero pasado el tercer escalón solo aumenta la corriente total y la corriente de cuadratura la cual llega a un máximo del 30%.

En la Fig 5.36 se visualizan las corrientes del MCT. En el instante de 5[s] se enciende el motor mediante el botón iniciar, por lo cual se magnetiza el motor teniendo una corriente de eje directo que llega a un valor 51% y una corriente de alimentación, la cual llega a este valor 1 [s] después. En el instante de 10 [s] se comienza a generar la función exponencial en el MCT, por lo cual se induce corriente de cuadratura para generar un pequeño torque, que aumenta a media que el torque lo hace de igual manera. Por el lado de la corriente de eje directo aumenta levemente (2%) a medida que aumenta la velocidad. Al igual que la corriente de alimentación que aumenta un poco más sobre esta última en el quinto escalón llegando a un valor del 57%.

En las Fig 5.37 y Fig 5.38 se observan los voltajes de la plataforma experimental.

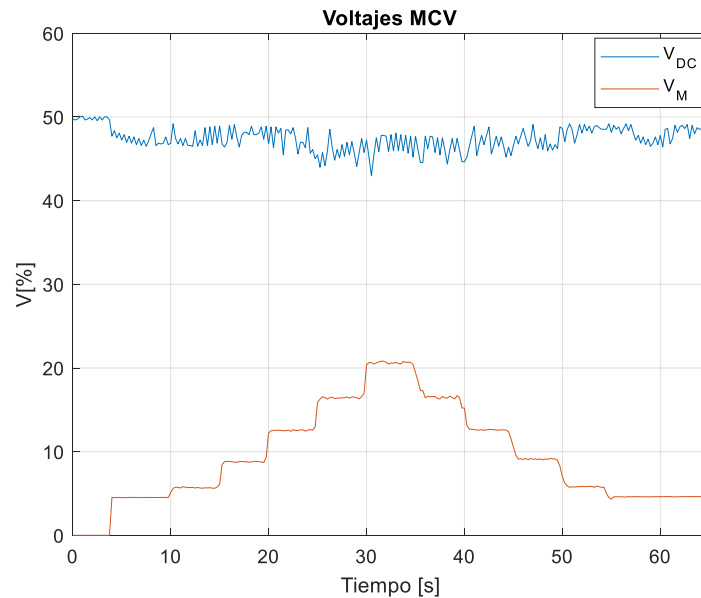


Fig. 5.37: Prueba 4: Voltajes MCV

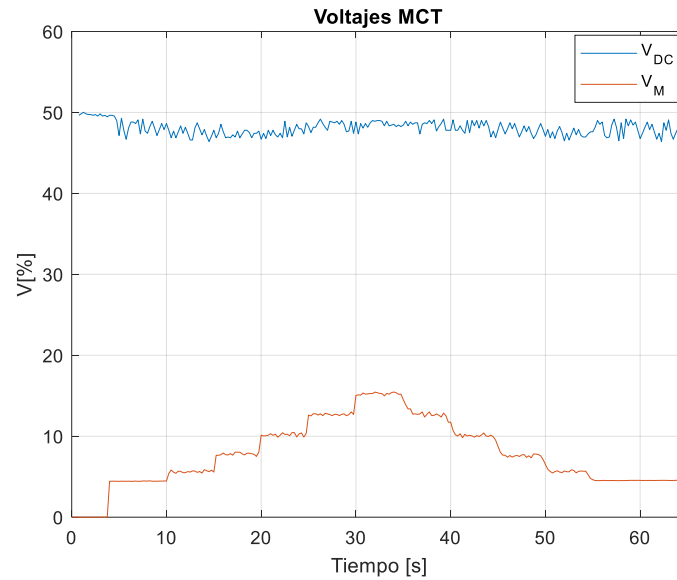


Fig. 5.38: Prueba 4: Voltajes MCT

En la Fig 5.37 se visualiza el voltaje en el MCV. Por el lado de la fuente de voltaje del DC-Link este disminuye proporcionalmente a medida que se le inyecta voltaje al motor. Por el lado del voltaje de alimentación, en el instante de 5[s] se enciende el motor por lo cual se inyecta voltaje al estator, que aumenta su índice de modulación de la PWM a medida que la velocidad va aumentando. Manteniendo un pequeño voltaje luego de que la función escalón vuelva a una velocidad 0, ya que el motor sigue encendido.

En la Fig 5.38 se visualiza el voltaje en el MCT. Por el lado de la fuente de voltaje del DC-Link este disminuye proporcionalmente a medida que se le inyecta voltaje al motor. Por el lado del voltaje de alimentación, en el instante de 5 [s] se enciende el motor por lo cual se inyecta voltaje al estator, que aumenta su índice de modulación de la PWM a medida que la velocidad va aumentando. Manteniendo un pequeño voltaje luego de que la función exponencial vuelva a una velocidad 0, ya que el motor sigue encendido.

5.6. Evaluación de Desempeño

La evaluación de desempeño se realizará de manera individual para cada accionamiento, analizando su capacidad para seguir el respectivo Set Point.

Inicialmente se evaluaron los primeros 3 requerimientos del desempeño, posteriormente se evaluó de manera individual la reproducibilidad del sistema.

5.6.1 Accionamiento con Control de Velocidad

Para la evaluación de desempeño del accionamiento que opera en control de velocidad, se utilizaron las dos primeras pruebas, tomando el primer escalón como referencia. Esto permitió no solo analizar el rendimiento del equipo, sino también comparar los distintos lazos de control.

En la Fig. 5.39 se ilustra el primer escalón de las pruebas 1 y 2 con la referencia del Set Point. Esto permitirá observar 3 elementos claves para evaluar el desempeño del accionamiento dentro de la plataforma experimental.

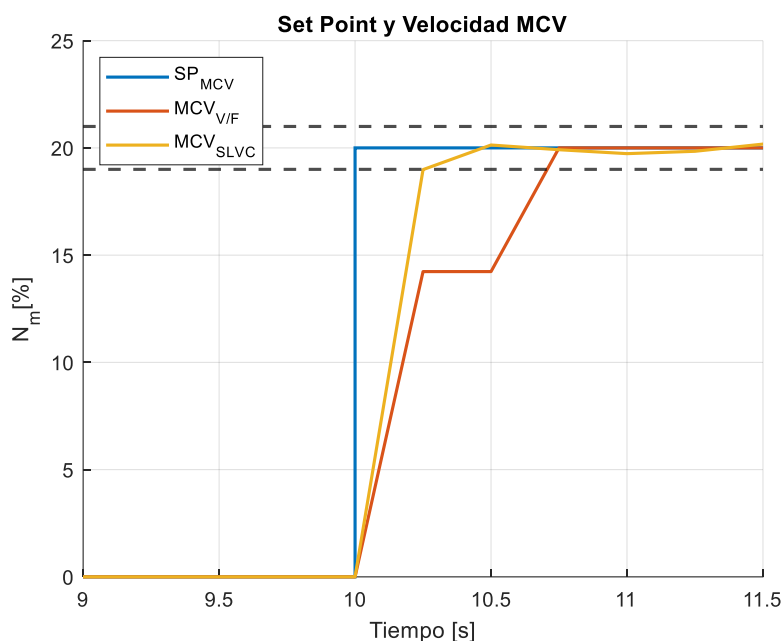


Fig. 5.39: Desempeño del MCV

TABLA 5.2 Desempeño del MCV.

Parámetro	V/F	SLVC	Margen
Error Absoluto	0	0.3%	5%
Sobrepaso	0	0.2%	5%
Tiempo de Asentamiento	0.75 [s]	0.5 [s]	1 [s]

El desempeño del MCV con el modo de control V/f, se mantiene en los márgenes establecidos, demostrando una evaluación de desempeño positiva. Teniendo una estabilidad de carga que se representó mediante el error absoluto del 0%, un tiempo de estabilidad de consigna del 0.75 [s] que se estableció mediante el tiempo de asentamiento y una robustez del sistema que se instauro mediante el sobrepaso del 0%.

Por otro lado, el desempeño del MCV con el modo de control SLVC, se mantiene en los márgenes establecidos, demostrando una evaluación de desempeño positiva. Teniendo una estabilidad de carga que se representó mediante el error absoluto del 0.3%, un tiempo de estabilidad de consigna del 0.5 [s] que se estableció mediante el tiempo de asentamiento y una robustez del sistema del 0.2% que se instauro mediante el sobrepaso.

Por último, se realiza la prueba de desempeño de reproducibilidad. Esta se utilizó las dos primeras pruebas, para el análisis de cada modo de control del MCV, estas se visualizan en la Fig. 5.40 y Fig. 5.41.

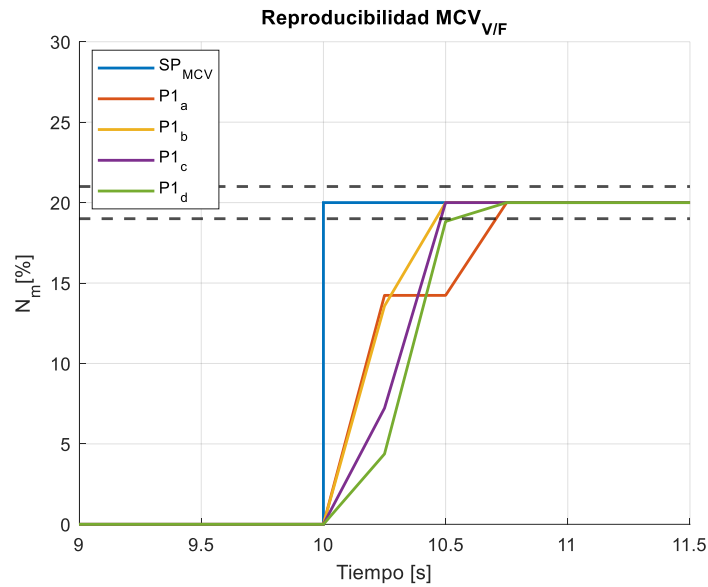


Fig. 5.40: Reproducibilidad Control V/f

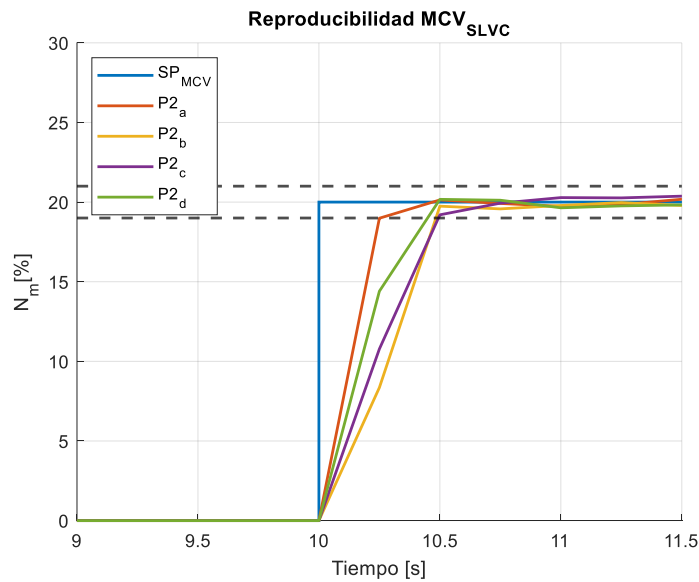


Fig. 5.41: Reproducibilidad Control SLVC

En la evaluación de desempeño de reproducibilidad del MCV, se obtuvo una estabilidad dentro del margen del 5%, tanto para el modo de control del V/f como el modo de control del SLVC. Teniendo diferencia entre pruebas en los tiempos de asentamiento.

5.6.2 Accionamiento con Control de Torque

Para la evaluación de desempeño del accionamiento que opera en control de torque, se utilizó la segunda prueba arbitrariamente.

En la Fig. 5.42 se ilustra el primer escalón de la prueba 2 con la referencia del Set Point. Esto permitirá observar 3 elementos claves para evaluar el desempeño del accionamiento dentro de la plataforma experimental.

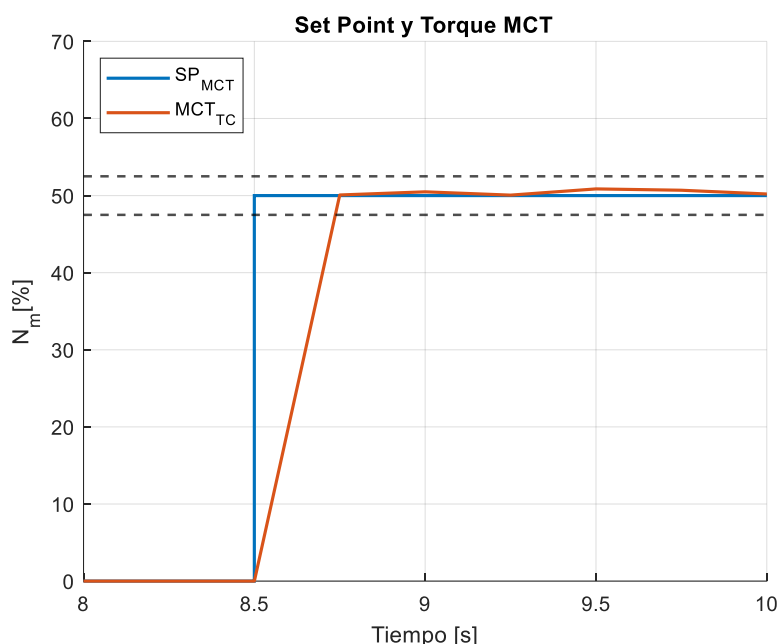


Fig. 5.42: Desempeño del MCT

TABLA 5.3 Desempeño del MCT.

Parámetro	Control Torque	Margen
Error Absoluto	0.85%	5%
Sobrepaso	0.01%	5%
Tiempo de Asentamiento	0.25 [s]	1 [s]

El desempeño del MCT con el modo de control TC, se mantiene en los márgenes establecidos, demostrando una evaluación de desempeño positiva. Teniendo una estabilidad de carga que se representó mediante el error absoluto del 0.85%, un tiempo de estabilidad de consigna del 0.25 [s]

que se estableció mediante el tiempo de asentamiento y una robustez del sistema que se instauró mediante el sobrepaso del 0.01%

Por último, se realiza la prueba de desempeño de reproducibilidad. En esta se utilizó nuevamente la segunda prueba, para el análisis de cada modo de control del MCV, esta se visualiza en la Fig. 5.43.

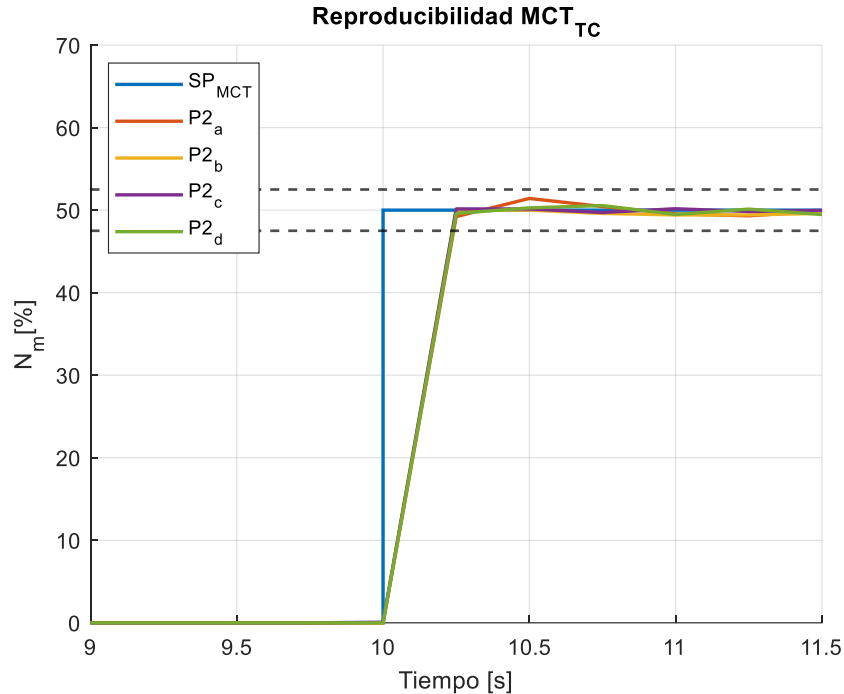


Fig. 5.43: Reproducibilidad Control TC

En la evaluación de desempeño de reproducibilidad del MCT, se obtuvo una estabilidad dentro del margen del 5%. Manteniendo el mismo tiempo de asentamiento en las pruebas posteriores.

5.7. Discusión

En el presente capítulo se cumple con el ultimo objetivo específico de evaluar el desempeño dinámico y en estado estable del conjunto bajo diferentes condiciones. En este se realizaron pruebas que permitieron visualizar el comportamiento de los dos modos de control (Control V/f y SLVC) y de ambos perfiles de torque (Constante y Cuadrático). A su vez, se estipularon requerimientos de desempeño de la plataforma experimental.

En primer lugar, se ilustro el resultado de las pruebas en el entorno de la plataforma experimental y luego se exportaron las variables para distinguir si estas están siendo procesadas de la manera correcta.

El sistema de supervisión HMI funciona de manera correcta. En este se comprobó que los comandos interconectados con los botones de la pantalla funcionan de buena forma, ya que, se pudieron realizar las distintas pruebas sin tener inconvenientes con estos. Por el lado de los estados que se conectan a las variables de motor y las alarmas de este, se comprobó que funcionan de manera correcta, ya que respondieron de manera requerida en los instantes que debieron actuar, ejemplo de esto es la Fig 5.1 en la que al existir fallas en el motor se encendieron las alarmas correspondientes a esto (OFF1 y Alarma de Falla en rojo).

En el procesamiento de las variables solo se observó una anomalía, ya que, la corriente I_d en unos instantes era mayor que la corriente de alimentación, lo cual es incorrecto. Esto sucedió debido a que la corriente de alimentación es una variable medida con un filtro (27) y la corriente I_d es un valor que se calcula instantáneamente (r76), por lo cual este último toma valores de sobre corrientes que no se visualizan en la señal filtrada.

Las pruebas que se realizaron permitieron ver la diferencia entre el control V/f y Control Vectorial, completando el objetivo principal que la plataforma experimental debe demostrar el desempeño de las estrategias de control de velocidad de motores de inducción V/F y Sensorless Vector Control (SLVC). La principal diferencia entre estos lazos de control se encuentra en $f \approx 0$ [Hz] donde el control V/f no fue capaz de operar en estas condiciones, ya que este solo asigna voltajes a cierta frecuencia sin importar lo que suceda en el motor. A pesar de que el SLCV funciona en lazo abierto a esta frecuencia, este fue capaz de operar en estas condiciones.

También cabe destacar que el MCT limita su torque al superar velocidades mayores al 60% sobre la velocidad nominal. Por lo tanto, para las velocidades sobre el 60% se debe revisar la parametrización de la regulación y seguridad del accionamiento, ya que, puede estar influyendo en la limitación del torque, para la protección del conjunto del accionamiento (Mecánica + Control). Esta mejora esta fuera del alcance del presente trabajo, pero queda planteado como un potencial trabajo futuro.

Por el lado de evaluación de desempeño de la plataforma experimental, en este se aisló una parte de las pruebas para poder evaluar en detalle la respuesta de la plataforma. Obteniendo resultados positivos, esto debido a que se mantienen los valores requeridos dentro de los márgenes establecidos para ambos accionamientos.

Por último, se cumple el indicador de logro, debido a que se pudo evidenciar el desempeño de los tipos de control V/F y el Vectorial sin Sensor (SLVC) en el accionamiento G120.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Sumario

El presente trabajo de titulación tuvo como propósito principal el diseño y la construcción de un sistema experimental de carga programable, destinado a la demostración y análisis de distintas estrategias de control de velocidad. Para cumplir este objetivo, se abordó el proyecto mediante un desarrollo estructurado en fases consecutivas de ingeniería. En primer lugar, se estableció la arquitectura electromecánica y de control, integrando un PLC S7-1200 y accionamientos SINAMICS G120 bajo el estándar de comunicaciones industriales PROFINET. Posteriormente, se ejecutó la implementación física de los equipos y el desarrollo del software de supervisión mediante WinCC TIA Portal.

Finalmente, la plataforma fue sometida a una serie de pruebas experimentales que permitieron evaluar el desempeño de los equipos frente a distintos perfiles de consigna (constante y escalonada) y bajo diferentes lazos de control. De este modo, el trabajo se desarrolló exitosamente desde su fundamentación teórica y diseño conceptual hasta la consolidación de un banco de pruebas instrumentado para el análisis dinámico de motores.

6.2. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió diseñar, construir y validar con éxito un sistema experimental de carga programable funcional. A través de la integración de tecnologías Siemens de automatización y accionamientos industriales, se logró consolidar un banco de pruebas instrumentado que permite demostrar, analizar y registrar el comportamiento estable y dinámico de motores eléctricos bajo diferentes estrategias de control de velocidad y perfiles de carga. De este modo, la plataforma se constituye como una herramienta de valor técnico y pedagógico.

6.3. Trabajo Futuro

Ya con la plataforma experimental realizada, se plantearon los siguientes puntos como trabajo futuro:

- Establecer nuevos tipos de Set Point que permitan simular más tipos de carga en el eje.
- Estudiar los aspectos de sintonía de los PI, tanto para el lazo de regulación de velocidad como para el del torque.
- Desarrollar un estudio de la implementación del Control Vectorial en los accionamientos

comerciales.

- Desarrollar aplicaciones en python de comunicación. Debido a que el PLC ya está instalando. Dejando posibilidad a una respuesta más rápida que un HMI comercial ($<250[\text{ms}]$). E implementar otras funciones a estimar, como el gasto energético o monitoreo de distintas condiciones.
- El estudio de la eficiencia energética de los distintos lazos de control (V/f o VC) bajo distintas situaciones de carga.

Bibliografía

- [1] HVH Industrial Solutions, "*Tipos de acoplamientos de eje*", HVH Industrial, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hvhindustrial.com/es/blog/tipos-de-acoplamientos-de-eje>. [Accedido: 12-mar-2026].
- [2] KTR Systems GmbH, "Acoplamientos elásticos de garra / acoplamientos elásticos de pernos", KTR Chile, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/zpykp6>. [Accedido: 10-mar-2026].
- [3] J. Fraile Mora, "Máquinas Eléctricas", 5ta ed. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2003.
- [4] Siemens AG, "SINAMICS G120 Power Modules PM240" Hardware Installation Manual, Edición 07/2016, 2016.
- [5] Siemens AG, "SINAMICS G120 Convertidor de frecuencia con las Control Units CU240B-2 y CU240E-2" Instrucciones de servicio, Edición 01/2013, FW v4.6, 2013.
- [6] Siemens AG, "*SINAMICS G120 Convertidores con las Control Units CU250S-2*", Instrucciones de servicio, Edición 10/2020, FW V4.7 SP13, A5E31759476E AJ, 2020. [En línea].
- [7] Autonics, "Rotary Encoder Technical Overview," Manual técnico, 2025.
- [8] Siemens AG, "Braking Resistors MICROMASTER 440 / SINAMICS G120," Instruction Sheet, Edición 05/2009, A5E02533602A, 2009.
- [9] S. J. Chapman, Máquinas eléctricas, 5ta ed. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2012.
- [10] Mitsubishi Electric, "Miniature Circuit Breakers, Residual Current Circuit Breakers & Isolating Switches DIN Series," Catálogo técnico, 2013.
- [11] Siemens AG, "SINAMICS Control Unit Adapter CUA20," Catálogo técnico, 6SL3255-0BW01-0NA0, s.f.
- [12] Siemens AG, "SINAMICS G120, SINAMICS G120D Frequency converter," Function Manual, Edición 08/2011, FW V3.2, A5E01137279B AD, 2011.

- [13] Asociación PROFIBUS PROFINET, "PROFINET: qué es y cómo funciona," *PROFIBUS Argentina*. [En línea]. Disponible en: <https://profibus.com.ar/profinet-que-es-y-como-funciona/>. [Accedido: 01-mar-2026].
- [14] PROFIBUS & PROFINET International (PI), "PROFINET Cabling and Interconnection Technology Guideline," Guía técnica, Versión 5.3, Orden 2.252, 2023.
- [15] N. Ayllon, "PROFINET Cables: Requirements, Specifications, and Types," *PI North America*, 26 de agosto de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://us.profinet.com/profinet-cables-requirements-specifications-and-types/>. [Accedido: 02-mar-2026].
- [16] N. Ayllon, "Cómo elegir una topología de red PROFINET," *PI Norte América*, 17 de julio de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://us.profinet.com/como-elegir-una-topologia-de-red/>. [Accedido: 03-mar-2026].
- [17] N. Ayllon, "PROFINET Conformance Classes," *PI North America*, 12 de febrero de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://us.profinet.com/profinet-conformance-classes/>. [Accedido: 01-mar-2026].
- [18] Siemens AG, "SIMATIC S7-1200 Programmable controller," System Manual, Edición 11/2019, V4.4, A5E02486680-AN, 2019. [En línea].
- [19] Siemens AG, "Software and hardware requirements (RT Professional) - WinCC WebNavigator," *Siemens TIA Portal Documentation*, nov. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/7kjcrh>. [Accedido: 01-mar-2026].
- [20] Siemens AG, "SINAMICS - Low Voltage Engineering Manual," Engineering Manual, Versión 4.0, 2008.
- [21] B. Wu, *High-Power Converters and AC Drives*. Hoboken, NJ, EE. UU.: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [22] LG Electronics, "Monitor FHD de 22" 22MP410-B", *LG Chile*, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://www.lg.com/cl/monitores/fhd-y-qhd/22mp410-b/>. [Accedido: 01-mar-2026].
- [23] D-Link, "DGS-105/108 5/8-Port 10/100/1000 Mbps Unmanaged Switches," Hoja de datos, s.f.
- [24] Siemens AG, "SITOP power supply SITOP PSU100L," Manual, Edición 08/2016, C98130-A7603-A1-2-7629, 2016.

- [25] Sabin Ingeniería Civil, "como funciona un motor de inducción ?," *YouTube*, 28 de nov. de 2013. [Video en línea]. Disponible en: <https://acortar.link/v7ODe>. [Accedido: 01-mar-2026].
- [26] Engineering with Prof. Kim, "Three-Phase Inverter Switch States," *YouTube*, 6 de ene. de 2021. [Video en línea]. Disponible en: <https://acortar.link/p2Tf71>. [Accedido: 16-mar-2026].
- [27] Siemens, "IEC Electrical Schematics Symbols," *Capital X Panel Designer*, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://symbols.radिकासoftware.com/225/iec-symbols>. [Accedido: 01-mar-2026].
- [27] Siemens, "IEC Electrical Schematics Symbols," *Capital X Panel Designer*, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://symbols.radिकासoftware.com/225/iec-symbols>. [Accedido: 01-mar-2026].
- [28] Siemens AG, "SINAMICS G120", *Siemens*, 2026. [En línea]. Disponible: <https://www.siemens.com/es-es/products/sinamics/g120/>. [Accedido: 01-mar-2026].
- [29] RS Components, "Unidad de control Siemens serie SINAMICS G120, 250 kW, 1 fases 29 V, 650Hz 0.5 A, IP20," *RS Chile*, 2026. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/IBs43y> [Accedido: 01-mar-2026].
- [30] Motores Eléctricos, "¿Qué son los PLC?," *Motores Eléctricos*, s.f. [En línea]. Disponible: <https://motores-electricos.com.ar/que-son-los-plc/>. [Accedido: 01-mar-2026].
- [31] Siemens AG, "SINAMICS Startdrive," *Siemens*, 2026. [En línea]. Disponible: <https://www.siemens.com/es-es/products/selection-engineering-tools/sinamics-startdrive/>. [Accedido: 01-mar-2026].
- [32] Programación Multidisciplinar, "¿Qué es TIA Portal y para qué sirve?," *Programación Multidisciplinar*, s.f. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/gLvPmK> . [Accedido: 01-mar-2026].
- [33] SICMA21, "¿Qué es un HMI y cómo funciona?," *SICMA21*, s.f. [En línea]. Disponible: <https://www.sicma21.com/que-es-un-hmi-y-como-funciona/> . [Accedido: 01-mar-2026].
- [34] Olin, "¿Qué es un switch y para qué sirve?," *Olin*, s.f. [En línea]. Disponible: <https://olin.es/es/blog/que-es-un-switch/> . [Accedido: 01-mar-2026].
- [35] StudySmarter, "Torque," *StudySmarter*, s.f. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/sLTp7e> .[Accedido:01-mar-2026].

- [36] R. Pinto Cárdenas, "Accionamientos SINAMICS G120", Universidad Católica de la Santísima Concepción, s.f.
- [37] G. Ramírez Arias, "Características de las cargas", Universidad Católica de la Santísima Concepción, 2023.
- [38] G. Ramírez Arias, "Introducción", Universidad Católica de la Santísima Concepción, 2023.
- [39] R. Lizana, "Inversores - Capítulo 4", Universidad Católica de la Santísima Concepción, 2023.
- [40] Siemens AG, "Foro de soporte técnico," *SiePortal*, s.f. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/6gy5Vp>. [Accedido: 01-mar-2026].

Anexo A. Desarrollo de la Aplicación de Control

Ya dentro del programa TIA PORTAL se crea el bloque principal FB_CONTROL_DRIVE. Primeramente, se crean las variables que se utilizarán dentro del bloque que se visualizan en la Fig. A.1 a la Fig. A.5.

ControlDrive								
	Name	Data type	Default value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint
1	Input							
2	I_Partir	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
3	I_Off1	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
4	I_Off2	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
5	I_Off3	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
6	I_InvGiro	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
7	I_ResetFalla	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
8	I_ZSW1	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
9	I_ZSW2	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
10	I_ZSW3	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
11	I_Ref_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
12	I_Ref_Min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
13	I_Ref_Max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
14	I_VoM_16	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
15	I_VoM_Min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
16	I_VoM_Max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
17	I_V1_16	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
18	I_V1_Min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
19	I_V1_Max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐

Fig. A.1: Parte Superior de Variables de Entrada de Bloque CONTROL DRIVE

ControlDrive								
	Name	Data type	Default value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint
20	I_V2_16	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
21	I_V2_Min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
22	I_V2_Max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
23	I_V3_16	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
24	I_V3_Min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
25	I_V3_Max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
26	I_V4_16	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
27	I_V4_Min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
28	I_V4_Max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
29	I_V5_16	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
30	I_V5_Min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
31	I_V5_Max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
32	I_V6_16	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
33	I_V6_Min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
34	I_V6_Max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
35	I_SP_16	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
36	I_SP_Min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
37	I_SP_Max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐

Fig. A.2: Parte Inferior de Variables de Entrada de Bloque CONTROL DRIVE

ControlDrive								
	Name	Data type	Default value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint
38	▼ Output				☐	☐	☐	☐
39	■ O_Listo	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
40	■ O_Run	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
41	■ O_Falla	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
42	■ O_OFF2	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
43	■ O_OFF3	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
44	■ O_Alarma	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
45	■ O_SentidoHorario	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
46	■ O_VDC_menor	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
47	■ O_VDC_mayor	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
48	■ O_PMando	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
49	■ O_SP	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
50	■ O_SP_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
51	■ O_SP_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
52	■ O_VoM_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
53	■ O_VoM_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
54	■ O_V1_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
55	■ O_V2_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
56	■ O_V3_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐

Fig. A.3: Parte Superior de Variables de Salida de Bloque CONTROL DRIVE

ControlDrive								
	Name	Data type	Default value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint
47	■ O_VDC_mayor	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
48	■ O_PMando	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
49	■ O_SP	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
50	■ O_SP_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
51	■ O_SP_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
52	■ O_VoM_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
53	■ O_VoM_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
54	■ O_V1_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
55	■ O_V2_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
56	■ O_V3_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
57	■ O_V4_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
58	■ O_V5_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
59	■ O_V6_UI	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
60	■ O_V1_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
61	■ O_V2_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
62	■ O_V3_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
63	■ O_V4_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
64	■ O_V5_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
65	■ O_V6_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐

Fig. A.4: Parte Inferior de Variables de Salida de Bloque CONTROL DRIVE

66	▼ InOut				☐	☐	☐	☐
67	■ <Add new>				☐	☐	☐	☐
68	▼ Static				☐	☐	☐	☐
69	■ Palabra_Mando	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
70	■ Referencia_Drive	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
71	■ Referencia_Drive_exp	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
72	■ Referencia_Drive_ex	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
73	■ Referencia_Drive_e_	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
74	■ Referencia_%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
75	▼ Temp				☐	☐	☐	☐
76	■ <Add new>				☐	☐	☐	☐
77	▼ Constant				☐	☐	☐	☐
78	■ UnoSiempre	Bool	true		☐	☐	☐	☐

Fig. A.5: Variables Internas de Bloque CONTROL DRIVE

Ya con las variables asignadas, se crea la programación para la subrutina FB_CONTROL_DRIVE. Inicialmente se crea la palabra de mando propia que ira al CU mediante la variable estática Palabra_Mando del tipo int de 16 bits. Con la primera variable de entrada I_Partir se da partida al motor modificando el bit 0 de la palabra de mando de la Fig. 2.22, con la operación lógica vista en la Fig. A.6. En esta se deja un normalmente abierto la variable I_Partir con una retroalimentación de la variable Palabra_Mando con su bit 0, al modificar la variable I_Partir de 0 a 1 seguirá el comando lógico de la Fig. 2.101 y posteriormente se deja en un normalmente cerrado a las variables I_Off1, I_Off2 y I_Off3, y si estas están en este estado, se modificará el bit 0 de la palabra de mando anclándolo en 1.

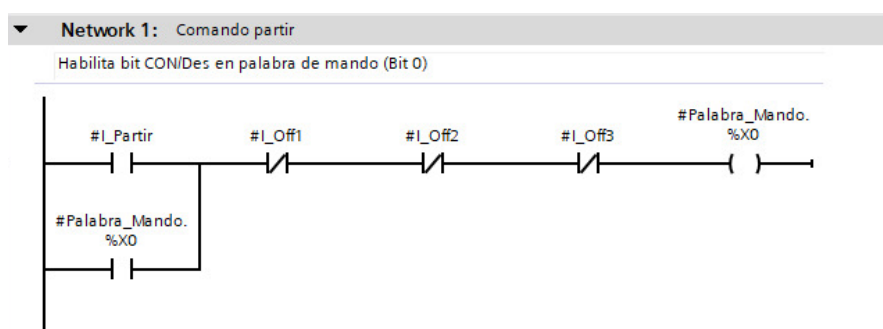


Fig. A.6: Comando de Partir

Por el lado de las variables I_Off1, I_Off2 y I_Off3 que dan la detención del motor. La variable I_Off1 interactúa directamente con el bit 0 de la palabra de mando, mediante la operación lógica de la Fig. A.6 vista anteriormente. Por el lado del I_Off2 y I_Off3 se crean sus operaciones lógicas vista en la Fig. A.7. En estas las variables están normalmente cerradas para continuar con la lógica de la programación y si se modifica uno de estos, cambiara los bits 1 o 2 de la palabra de mando, ejecutando el tipo de detención del motor accionado.

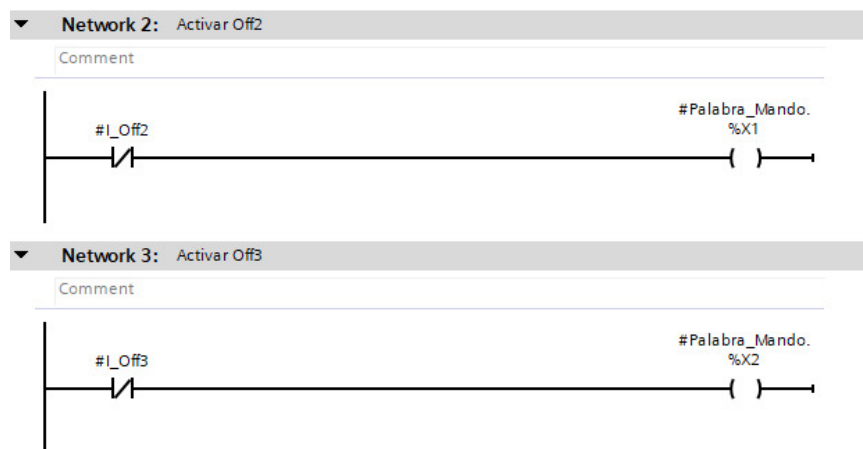


Fig. A.7: Comandos de Paradas OFF 2 y OFF 3

Otras operaciones que se realizó desde la palabra de mando es la de Invertir el sentido de giro y confirmar algún fallo producido en la CU mediante las variables I_InvGiro y I_ResetFalla modificando los bits 11 y 7 respectivamente. Con la programación de lo anterior realizado en la Fig. A.8.

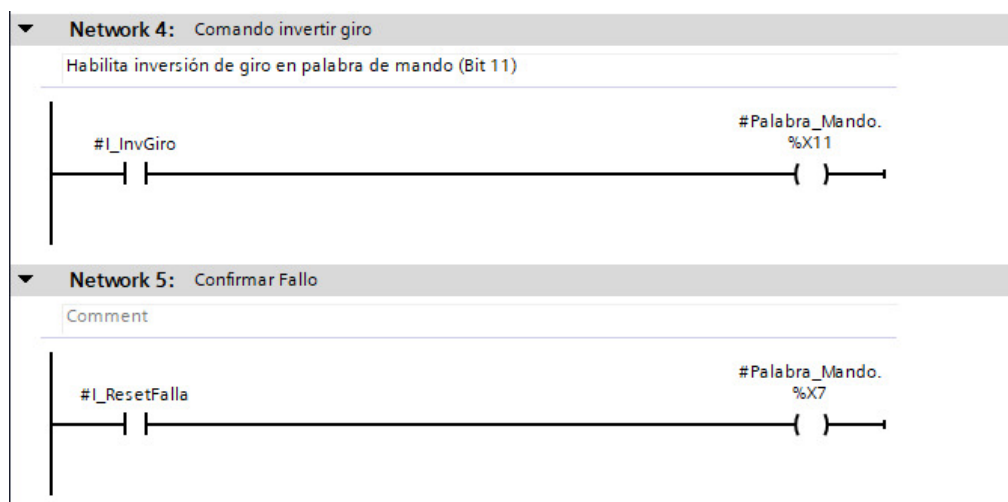


Fig. A.8: Comandos de Invertir Giro y Confirmar Fallo

El resto de los bits faltantes de la palabra de mando se deja permanentemente en 1 menos el bit 15 en el que se utiliza un normalmente cerrado, esto para poder ejecutar el comando partir el motor directamente ejecutando el bit 0. Esta programación lógica se visualiza en la Fig. A.9.

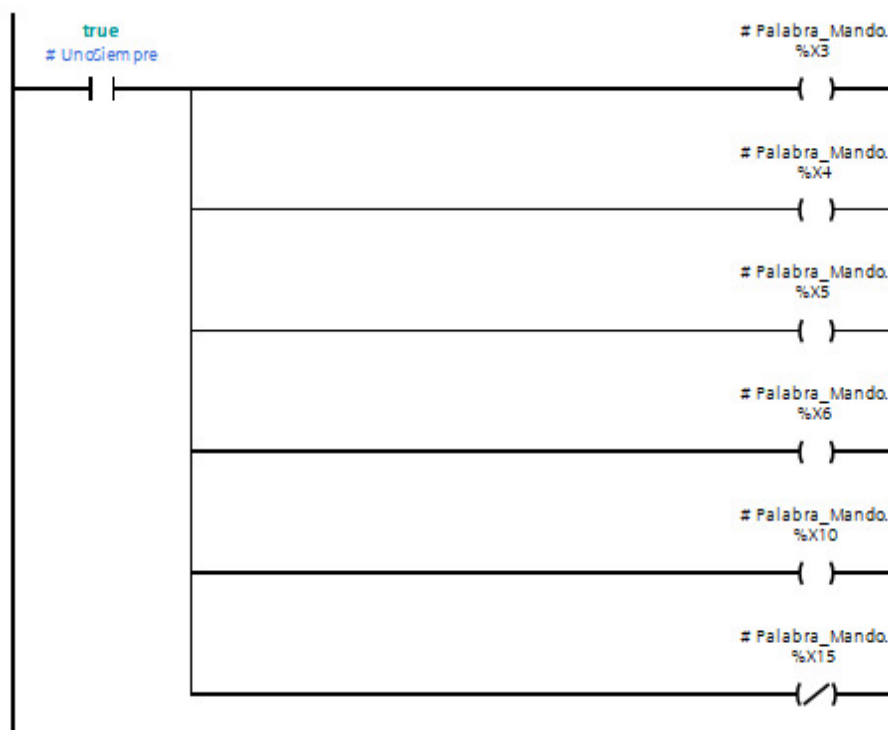


Fig. A.9: Programación de Bits Restantes de la Palabra de Mando

Ya con la palabra de mando formada, se transfiere al CU mediante un bloque MOVE y a la variable de salida O_PMando que se visualiza en la Fig. A.10.



Fig. A.10: Transferencia de Palabra de Mando al CU

El Set Point recibido desde el HMI es un valor decimal, este se traduce a una variable de 16 bits para poder ser transferido mediante PZD al CU mediante la ecuación (2.23). Toda esta transformación de variable se visualiza en la Fig. A.11.

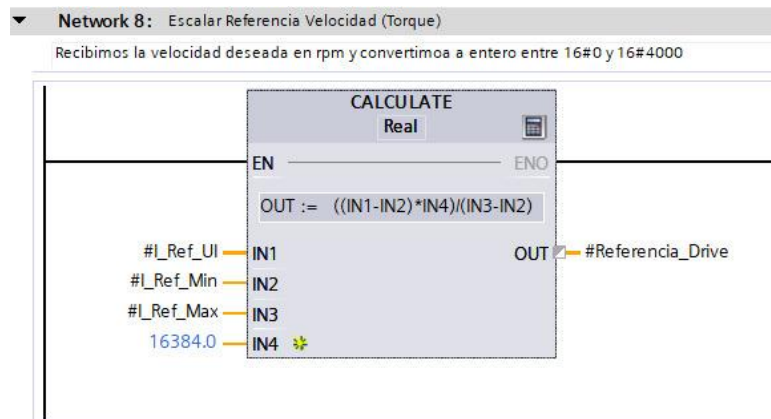


Fig. A.11: Traducción de Valor Decimal a 16 Bits

En la Fig. A.11 llega la referencia desde el HMI mediante la variable I_Ref_UI, además los valores de referencia I_Ref_Min y I_Ref_Max son configurables desde el HMI. Dando un resultado en palabra de 16 bits que se guarda en la variable Referencia_Drive. Este valor se transmite mediante el bloque MOVE que transfiere el valor a la variable O_SP como se observa en la Fig. A.12.

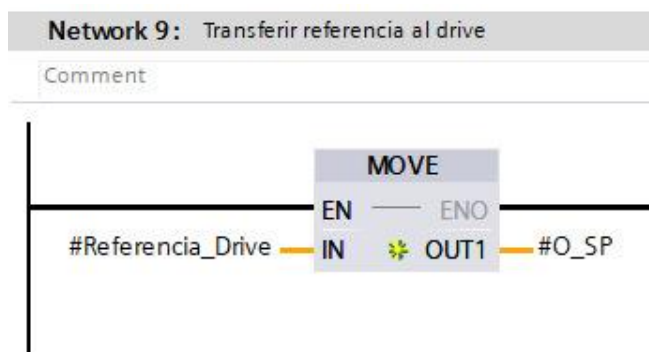


Fig. A.12: Transferencia de Set Point al CU

El siguiente segmento de la programación del bloque está centrado en el procesamiento de las PZD recibidos desde el CU para su posterior visualización en el HMI.

La Palabra de Estado 1 y 3 recibida se utiliza para las alarmas que se visualizan en el HMI mediante sus bits.

En la Palabra de Estado 1 el bit 0 se utiliza para la alarma de estado listo del motor y su programación lógica utiliza un normalmente abierto que se conecta a un anclaje en la variable de salida 0_Listo. Todo esto visto en la Fig. A.13.

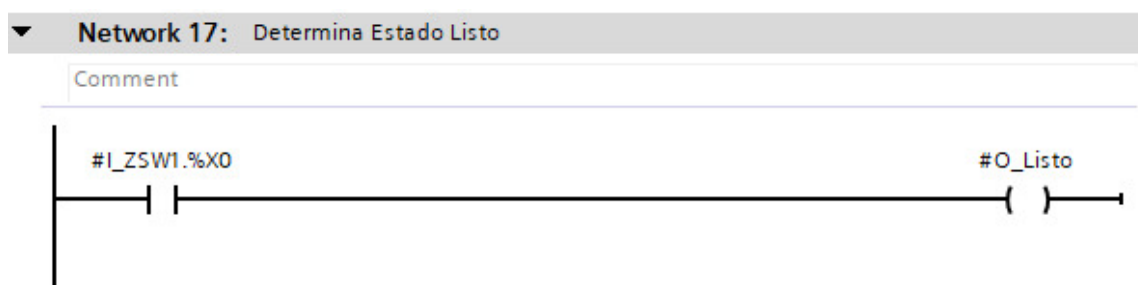


Fig. A.13: Programación de Alarma de Estado Listo

En la Palabra de Estado 1 el bit 2 se utiliza para la alarma de estado en marcha del motor y su programación lógica utiliza un normalmente abierto que se conecta a un anclaje en la variable de salida 0_Run. Todo esto visto en la Fig. A.14.

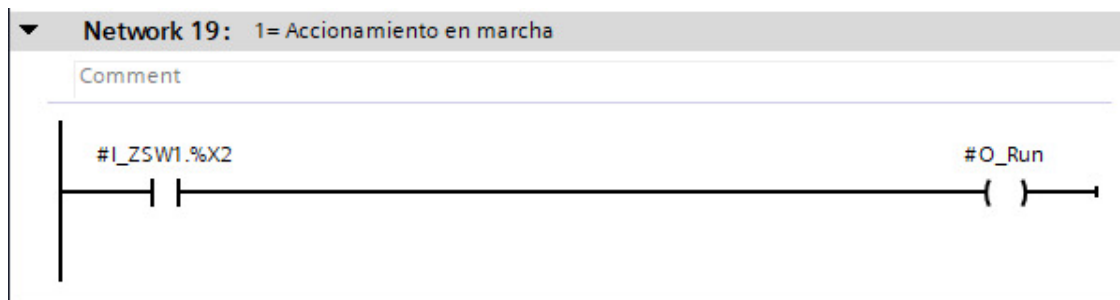


Fig. A.14: Programación de Alarma de Estado en Marcha

En la Palabra de Estado 1 el bit 3 se utiliza para la alarma de estado de falla del motor y su programación lógica utiliza un normalmente abierto que se conecta a un anclaje en la variable de salida 0_Falla. Todo esto visto en la Fig. A.15.

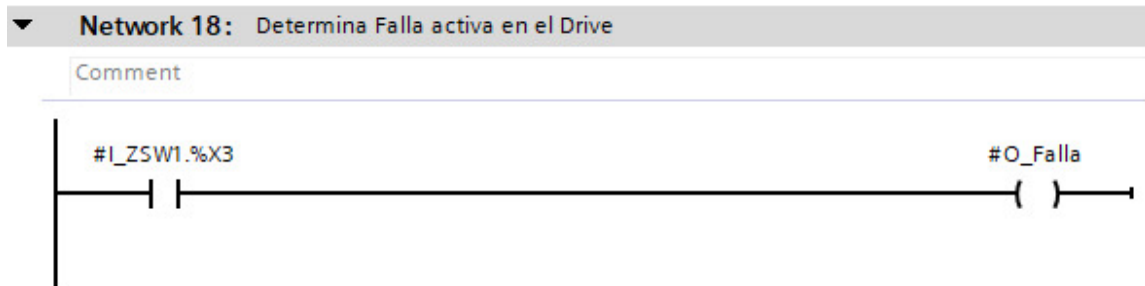


Fig. A.15: Programación de Alarma de Estado de Falla

En la Palabra de Estado 1 el bit 4 se utiliza para la alarma de activación de parada con OFF2 y su programación lógica utiliza un normalmente cerrado (siguiendo la lógica de la palabra de estado) que se conecta a un anclaje en la variable de salida 0_OFF2. Todo esto visto en la Fig. A.16.

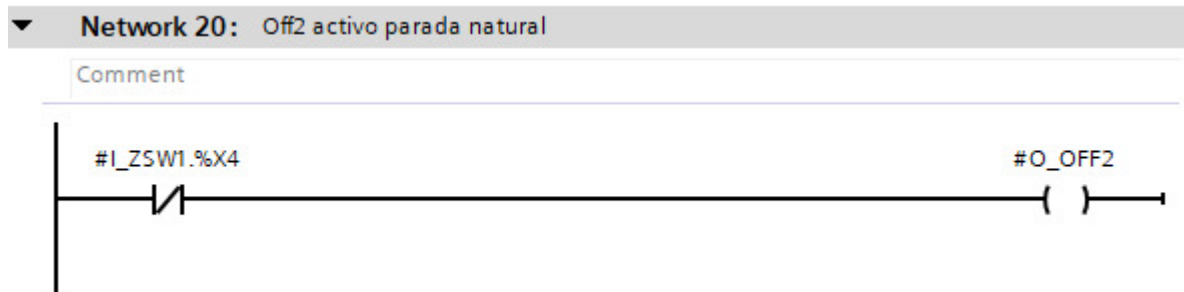


Fig. A.16: Programación de Alarma de Activación de Parada OFF 2

En la Palabra de Estado 1 el bit 5 se utiliza para la alarma de activación de parada con OFF3 y su programación lógica utiliza un normalmente cerrado (siguiendo la lógica de la palabra de estado) que se conecta a un anclaje en la variable de salida 0_OFF3. Todo esto visto en la Fig. A.17.

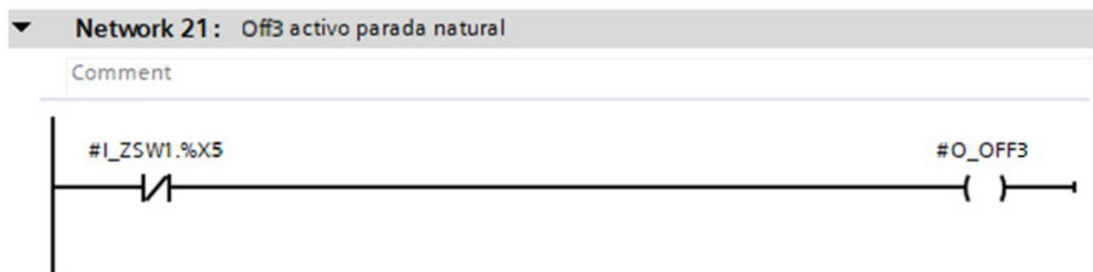


Fig. A.17: Programación de Alarma de Activación de Parada OFF 3

En la Palabra de Estado 1 el bit 7 se utiliza para la alarma de estado alarma en la CU y su programación lógica utiliza un normalmente abierto que se conecta a un anclaje en la variable de salida 0_Alarma. Todo esto visto en la Fig. A.18.

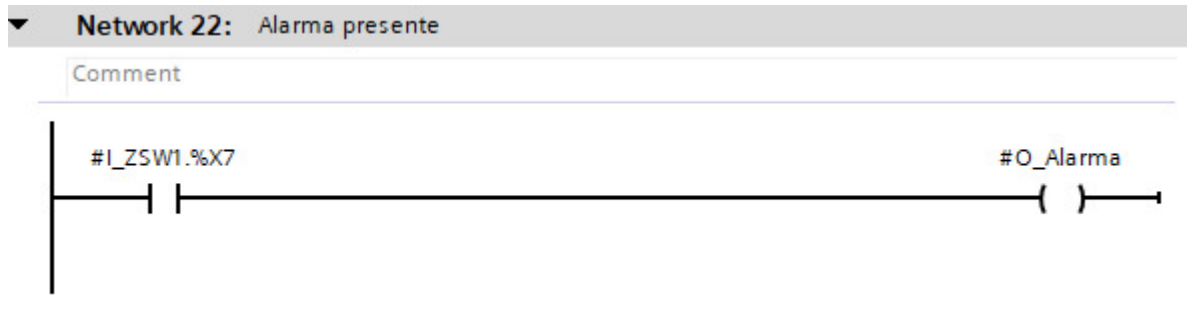


Fig. A.18: Programación de Alarma de Estado de Alarma en la CU

En la Palabra de Estado 1 el bit 14 se utiliza para la alarma de estado sentido de giro en el motor y su programación lógica utiliza un normalmente abierto que se conecta a un anclaje en la variable de salida 0_SentidoHorario. Todo esto visto en la Fig. A.19.

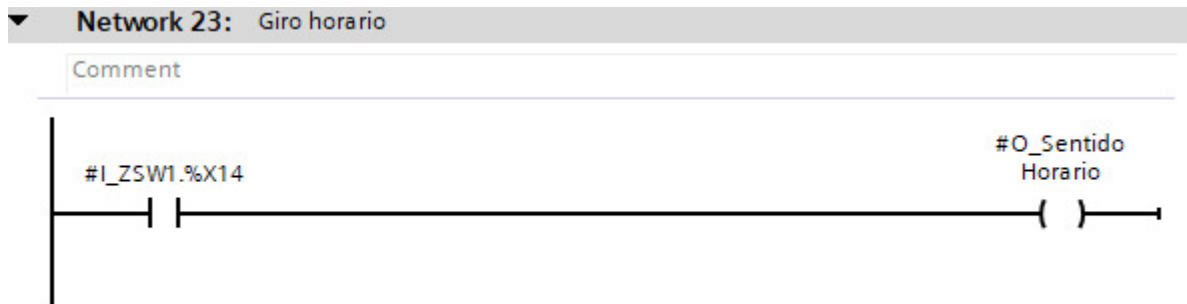


Fig. A.19: Programación de Alarma de Estado Sentido de Giro

En la Palabra de Estado 3 el bit 7 se utiliza para la alarma de estado voltaje menor al umbral del DC-Link y su programación lógica utiliza un normalmente abierto que se conecta a un anclaje en la variable de salida 0_VDC_menor. Todo esto visto en la Fig. A.20.

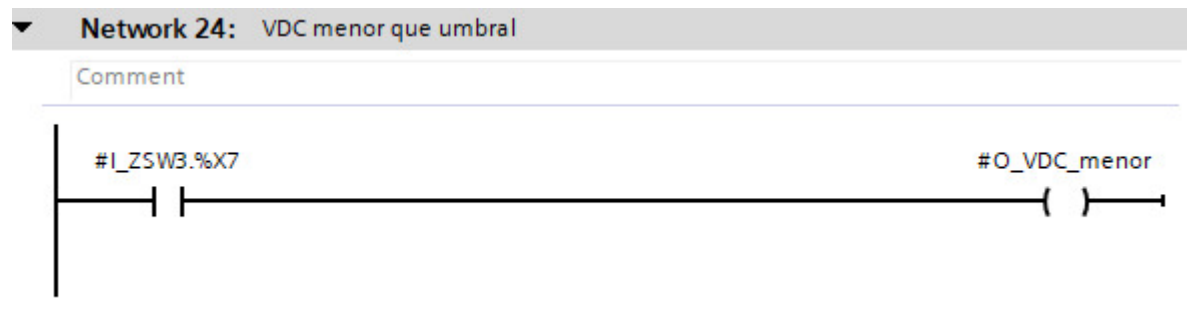


Fig. A.20: Programación de Alarma de Estado Vdc Menor

En la Palabra de Estado 3 el bit 8 se utiliza para la alarma de estado voltaje mayor al umbral del DC-Link y su programación lógica utiliza un normalmente abierto que se conecta a un anclaje en la variable de salida 0_VDC_mayor. Todo esto visto en la Fig. A.21.

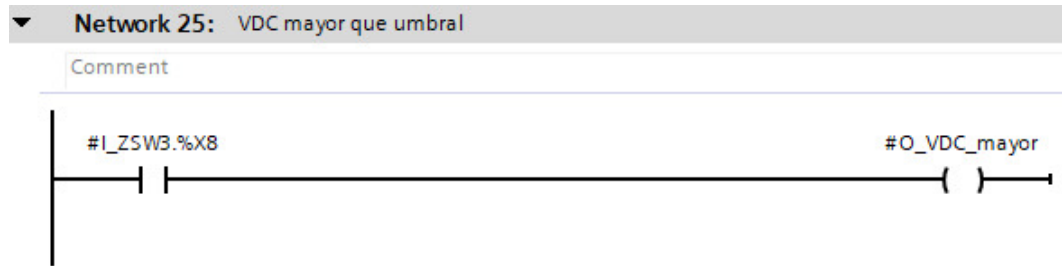


Fig. A.21: Programación de Alarma de Estado Vdc Mayor

Las variables recibidas desde el CU mediante PZD se procesan para la visualización en el HMI con valores de ingeniería y valores porcentuales.

Con las ecuaciones definidas, se realizó la programación lógica de recepción de variables. Como se observa en la Fig. A.22 (misma para todas), en estas las variables recepcionadas se procesan por las dos ecuaciones mencionadas y luego se guardan en su respectiva variable de unidad de ingeniería y variable porcentual.

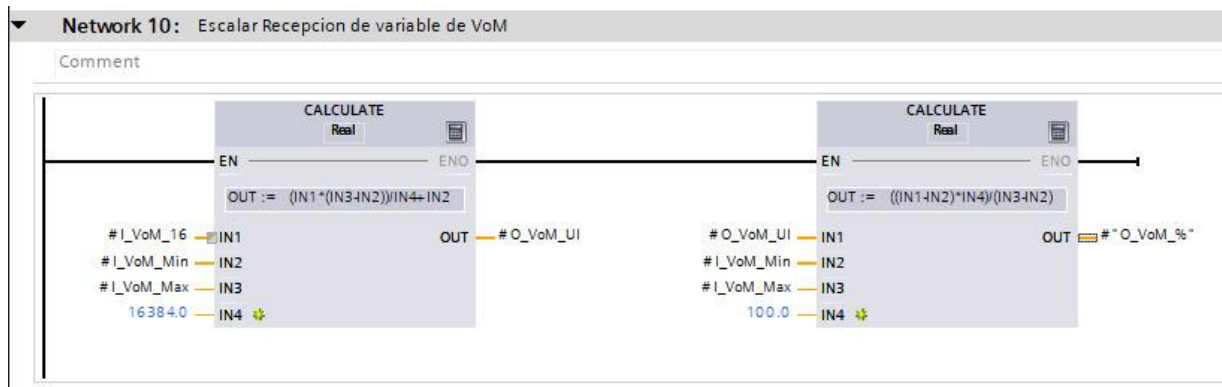


Fig. A.22: Recepción de y proceso de Variable VoM

Ya con la programación realizada queda el bloque 'ControlDrive' en la Fig. A.23.

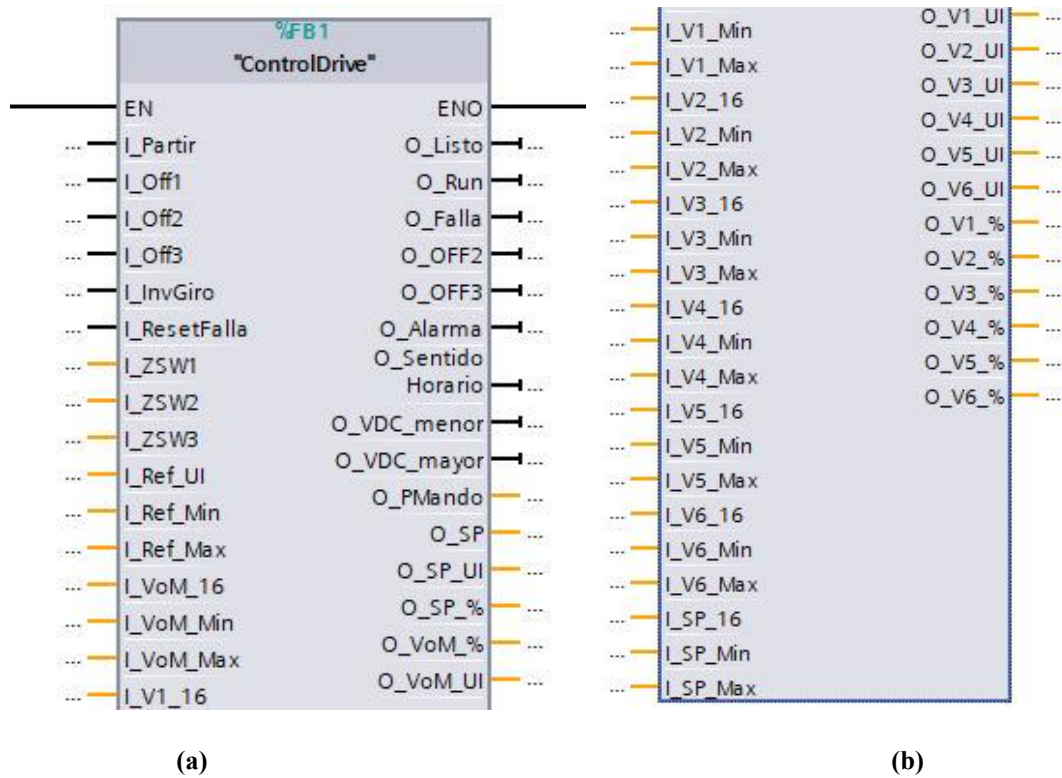


Fig. A.23: Bloque FB ControlDrive

(a) Parte Superior (b) Parte Inferior

Para la creación del bloque FB de selección de Set Point del accionamiento de velocidad. Primero, se crean las variables dentro del bloque vistas en la Fig. A.24.

Sel_Vel								
	Name	Data type	Default value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint
1	Input							
2	Sele	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
3	IN1	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
4	IN2	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
5	Output							
6	Out_V	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
7	InOut							
8	<Add new>				☐	☐	☐	☐
9	Static				☐	☐	☐	☐
10	<Add new>				☐	☐	☐	☐
11	Temp				☐	☐	☐	☐
12	<Add new>				☐	☐	☐	☐
13	Constant				☐	☐	☐	☐
14	Siempre_1	Bool	True		☐	☐	☐	☐

Fig. A.24: Variables Bloque Sel_Vel

En el siguiente paso se creó la programación lógica del bloque FB de selección de Set Point del accionamiento de velocidad. En esta se utiliza una la variable Siempre_1 para que se opere

constantemente esta programación. Luego con la variable de entrada Selec se deja un normalmente cerrado que accionara la entrada de la variable IN1 moviéndola a la variable de salida Out_V. Mas abajo se coloca un normalmente abierto que al cambiar el bit de la variable Selec mueve el valor de entrada de la variable IN2 a la variable de salida del bloque Out_V vistas en la Fig. A.25.

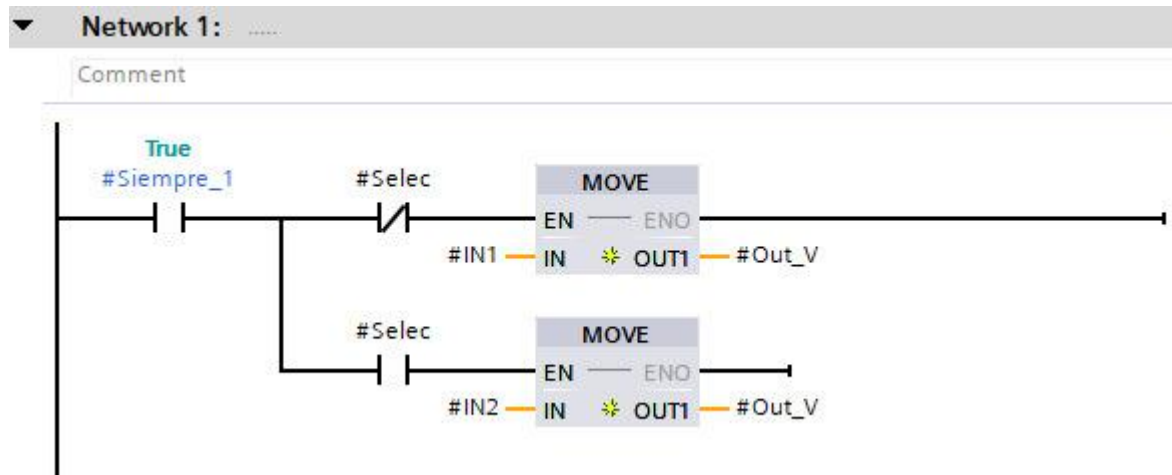


Fig. A.25: Programación Bloque Sel_Vel

Dejando el bloque programado FB Sel_Vel en la Fig. A.26.

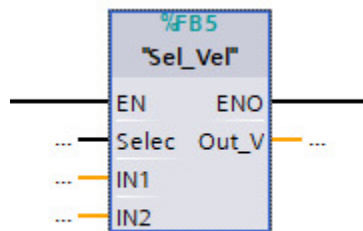


Fig. A.26: Bloque FB Sel_Vel

Para la creación del bloque FB de selección de Set Point del accionamiento de torque. Primero, se crean las variables dentro del bloque vistas en la Fig. A.26.

Sel_Tor									
	Name	Data type	Default value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	
1	▼ Input				☐	☐	☐	☐	
2	Selec	Bool	false	Non-ret...	☒	☒	☒	☐	
3	IN1	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐	
4	IN2	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐	
5	▼ Output				☐	☐	☐	☐	
6	Out_T	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐	
7	▼ InOut				☐	☐	☐	☐	
8	<Add new>				☐	☐	☐	☐	
9	▼ Static				☐	☐	☐	☐	
10	<Add new>				☐	☐	☐	☐	
11	▼ Temp				☐	☐	☐	☐	
12	<Add new>				☐	☐	☐	☐	
13	▼ Constant				☐	☐	☐	☐	
14	Siempre_1	Bool	true		☐	☐	☐	☐	

Fig. A.26: Variables Bloque Sel_Tor

Se creó la programación lógica del bloque FB de selección de Set Point del accionamiento de velocidad. En esta se utiliza una la variable Siempre_1 para que se opere constantemente esta programación. Luego con la variable de entrada Selec se deja un normalmente cerrado que accionara la entrada de la variable IN1 moviéndola a la variable de salida Out_T, también se coloca un normalmente abierto que al cambiar el bit de la variable Selec mueve el valor de entrada de la variable IN2 a la variable de salida del bloque Out_T vistas en la Fig. A.27.

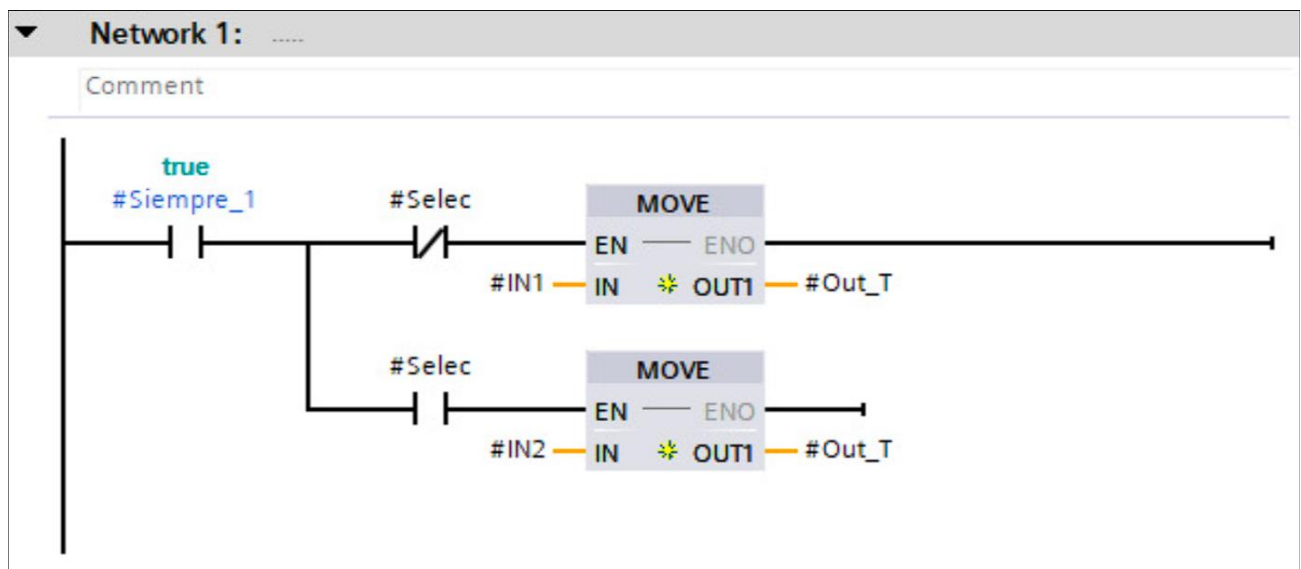


Fig. A.27: Programación Bloque Sel_Tor

Dejando el bloque programado FB Sel_Tor en la Fig. A.28.

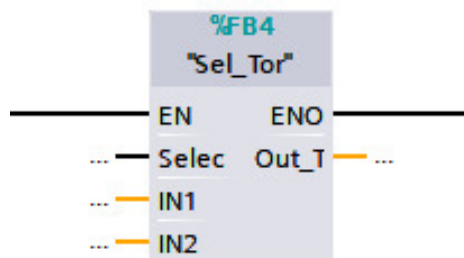


Fig. A.28: Bloque FB Sel_Tor

Ahora se crean los bloques FB que generarán el Set Point de función cuadrática y escalonada que se podrán seleccionar desde los bloques Sel desde el HMI.

Para la creación del bloque FB que generara el Set Point con función cuadrática. Primeramente, se definen las variables que estarán dentro de los bloques, como se visualiza en la Fig. A.29.

SP_Cuadratico								
	Name	Data type	Default value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint
1	▼ Input				☐	☐	☐	☐
2	N_real	Real	0.0	Non-ret...	☒	☒	☒	☐
3	T_min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
4	T_max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
5	N_min	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
6	N_max	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
7	▼ Output				☐	☐	☐	☐
8	T_SP_Cuad	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
9	▼ InOut				☐	☐	☐	☐
10	<Add new>				☐	☐	☐	☐
11	▼ Static				☐	☐	☐	☐
12	M%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
13	N%	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
14	T_SP	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐

Fig. A.29: Variable de Bloque FB SP_Cuadratico

Para la programación lógica de la función cuadrática. Esta se genera a partir de la velocidad medida en el accionamiento de velocidad, por lo cual se ingresa mediante la variable N_real. Luego se calcula su valor porcentual mediante la ecuación (3.6) con limitantes estipuladas desde el HMI desde las variables N_min y N_max, como se visualiza en la Fig. A.30.

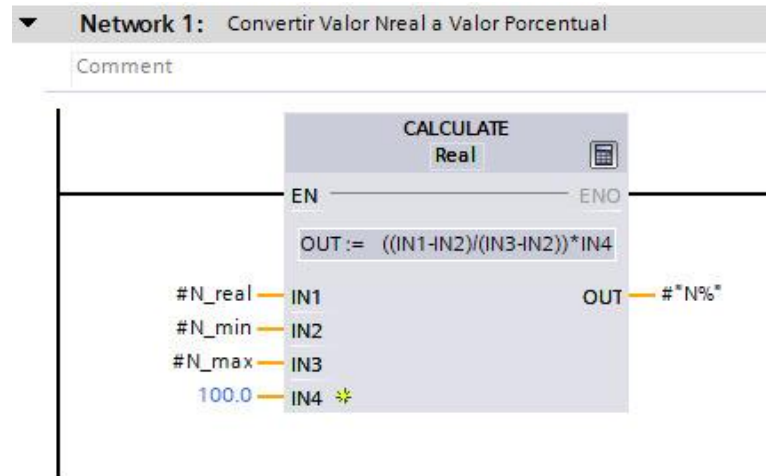


Fig. A.30: Cálculo de Variable N_real a su Valor Porcentual

Consiguientemente se marcan los límites superior e inferior de la variable N%, mediante un mayor o igual sea el caso dado, y con un bloque MOVE para que se mueva al valor limite si este es superado, como se visualiza en la Fig. A.31.

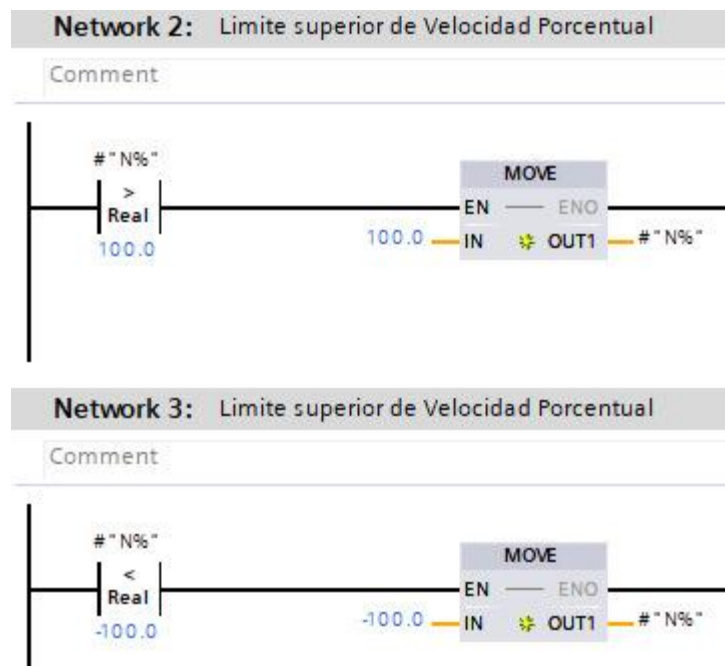


Fig. A.31: Limitación de Variable N%

Para la creación de la función cuadrática. Esta se basa en la ecuación (3.1). Con esto se crea la programación lógica de la función cuadrática, mediante un bloque CALCULATE visto en la Fig. A.32.

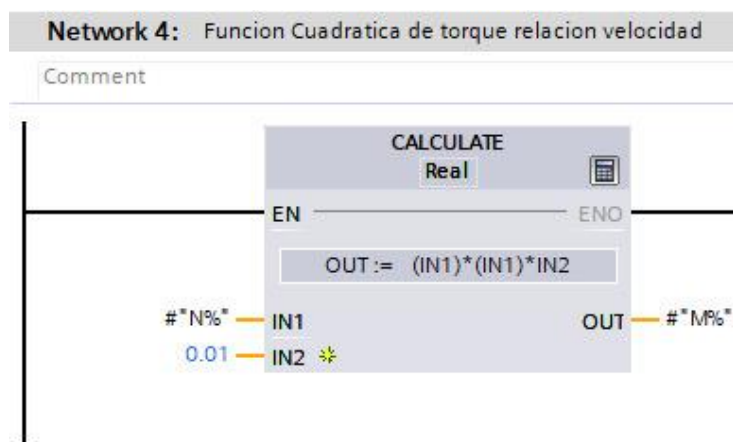


Fig. A.32: Cálculo de Función Cuadrática

Finalmente, el valor porcentual obtenido de la función cuadrática se transfiere a valor decimal, mediante la ecuación (3.7). Con esto se realizó la programación lógica con un bloque CALCULATE y luego se limitó la variable en su valor porcentual entre 0 y 100 mediante un bloque LIMIT, como se visualiza en la Fig. A.33.

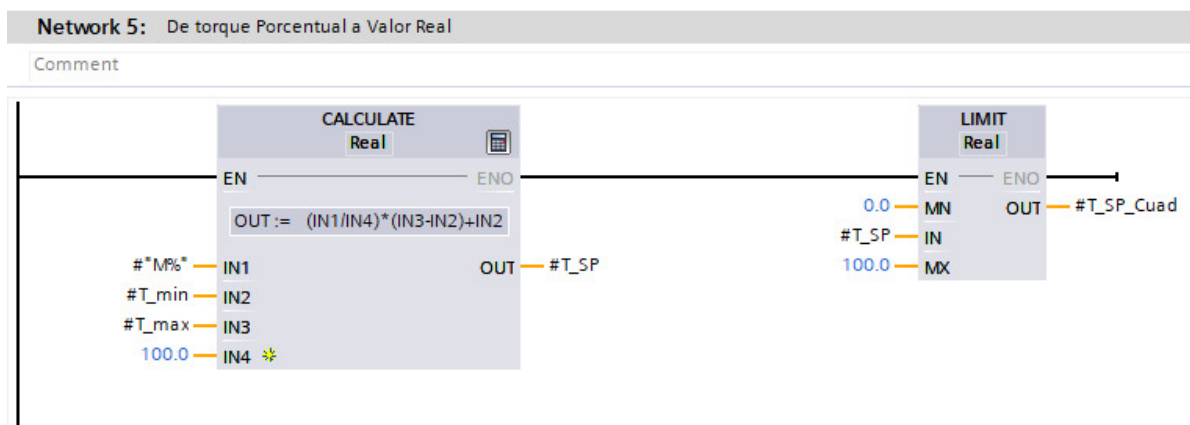


Fig. A.33: Cálculo de Función Cuadrática a Valor Decimal

Dejando de esta manera el bloque programado FB SP_Cuadratico en la Fig. A.34.



Fig. A.34: Bloque FB SP_Cuadratico

Ahora para la programación de la Función Escalonada se utiliza un reloj que se ejecutara internamente mediante el bloque de interrupción de Alarma Cíclica como se observa en la Fig. 3.7, que se ejecuta por fuera del bloque principal Main 0B1.

Para la programación de este bloque se definen las variables internas, vistas en las Fig. A.35 y Fig. A.36.

SP_Generador								
	Name	Data type	Default value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint
1	▼ Input							
2	Iniciar	Bool	false	Non-retain	☒	☒	☒	☐
3	N_D_SP	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
4	RPM_I	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
5	RPM_F	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
6	Duracion_Paso_SP	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
7	▼ Output							
8	SP_Out	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
9	Incremento_Paso	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
10	Pasos_Totales_O	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
11	Paso_Actual_O	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
12	Tiempo_Actual_O	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐

Fig. A.35: Variables de Entrada y Salida Bloque FB SP_Generador

15	▼ Static				☐	☐	☐	☐
16	DeltaSP	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
17	SP_Acum	Real	0.0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
18	Cont_de_Pasos	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
19	Cont_iteraciones	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
20	Ite_por_pasos	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
21	Pasos_Totales	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
22	Paso_Sig	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
23	Paso_INT	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐
24	Iteraciones_Totales	Int	0	Non-retain	☒	☒	☒	☐

Fig. A.36: Variables Estáticas Bloque FB SP_Generador

Para la programación que crea la función escalonada, inicialmente se calcula la velocidad en la cual se irá aumentando cada escalón, mediante la ecuación (A.1).

$$SP_{\Delta} = \frac{(Ref_{max} - Ref_{min})}{(N_{SP})} \quad (A.1)$$

Con N_{SP} siendo la cantidad de escalones que tendrá la función y SP_{Δ} el valor con el cual ira aumentando la función escalonada. La programación lógica de la ecuación (2.31) se visualiza en la Fig. 2.140.

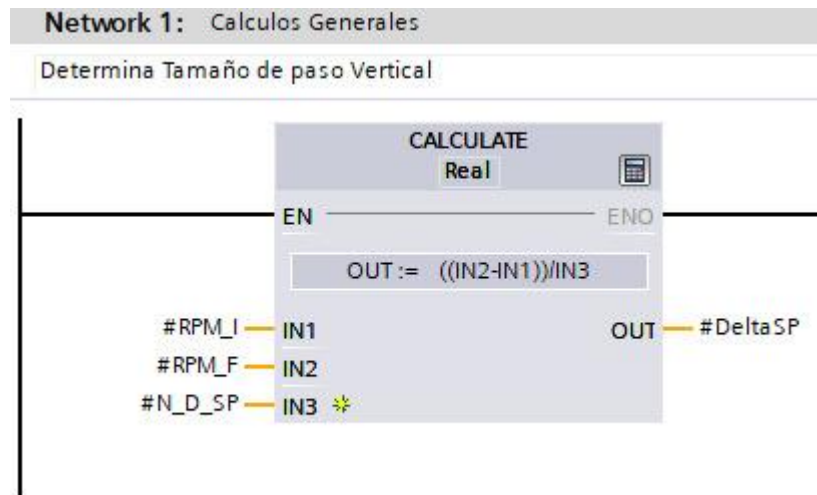


Fig. A.37: Cálculo de Valor de Aumento de Función Escalonada

Luego se programa la ejecución inicial de la función escalonada vista en las Fig A.38 y Fig. A.39. En la primera parte de la programación se coloca un normalmente cerrado con la variable Iniciar, que, al cambiar su bit, hará que la velocidad inicial ingresada en RPM_I se mueva a la variable SP_Acum, la cual llevara el Set Point que se ira sumando o restando sea la situación dada. Luego mediante un bloque MOVE se mueve el valor 1 a la variable Paso_Sig. Mas abajo se deja en 0 la variable Cont_de_Pasos mediante un bloque MOVE. Consiguientemente el tiempo ingresado mediante la variable Duracion_Paso_SP se divide en el tiempo en el cual se ejecuta el reloj propio de 100 [ms] para llevar la duración que dura cada escalón a segundos, guardándolo en la variable Ite_por_pasos como se visualiza en la Fig. A.38.

Luego en la Fig. A.39 se dobla el número de pasos ingresados mediante un bloque CALCULATE para considerar el escalón en ascenso y descenso guardándolo en la variable Pasos_Totales. Después se utilizó el bloque TRUNC para cambiar la variable N_D_SP que ingresa de Real a Int guardándolo en la variable Paso_INT. Mas abajo se da valor 0 a la variable Iteraciones_Totales mediante un bloque MOVE reiniciando su valor. Finalmente se utiliza una operación de control de programa en particular el JMP que salta a un bloque denominado 'Fin' cambiando la programación enlazada a 1 activándola.

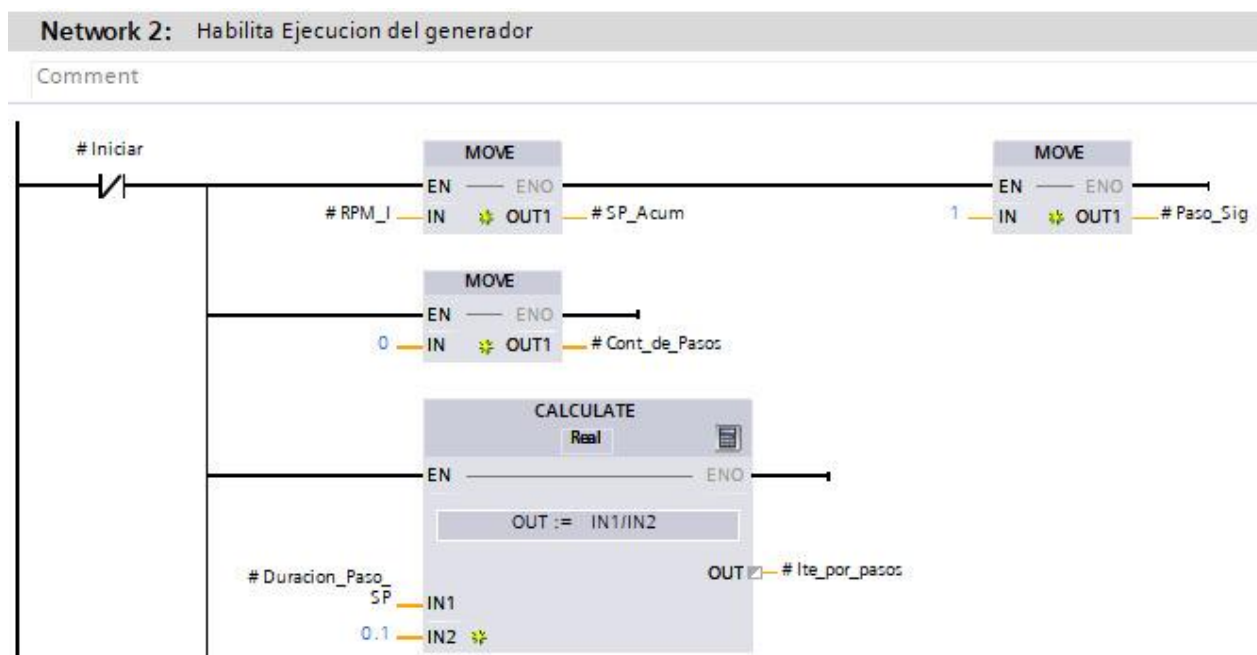


Fig. A.38: Programación de Ejecución de Función Escalonada Superior

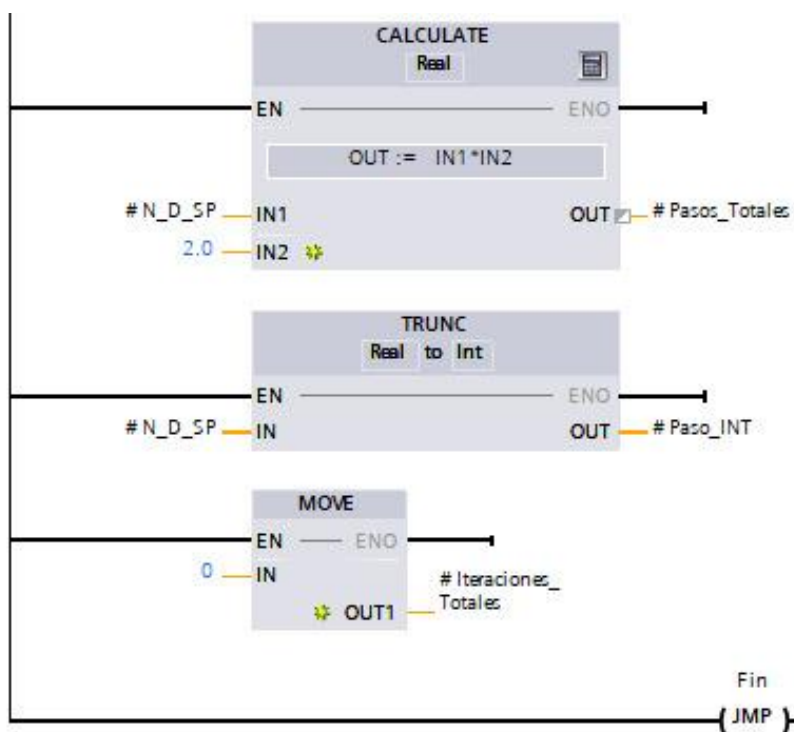


Fig. A.39: Programación de Ejecución de Función Escalonada Inferior

Cabe destacar que la duración de los pasos a partir de las iteraciones calculada se guarda en la variable `Ite_por_pasos`.

Siguiendo la programación del bloque, primeramente, se utiliza un normalmente abierto con la variable `Siempre_1` para mantener ejecutada la programación. Luego se limita la ejecución de la programación mediante las variables `Cont_de_Pasos` y `Pasos_Totales` con un menor o igual, consiguientemente se abren dos posibilidades mediante las variables `Cont_Iteraciones` y `Ite_por_Pasos` si la primera variable es mayor o igual que la segunda mencionada se sumará 1 a la variable `Cont_de_Pasos` mediante un bloque `ADD` y también se moverá el valor 0 a la variable `Cont_Iteraciones`. En el caso contrario, se le sumará 1 a la variable `Cont_Iteraciones` mediante un bloque `ADD`. Adicionalmente, se le sumará 1 a la variable `Iteraciones_Totales` mediante un bloque `ADD`. Todo lo anteriormente descrito se percibe en la Fig. A.40.

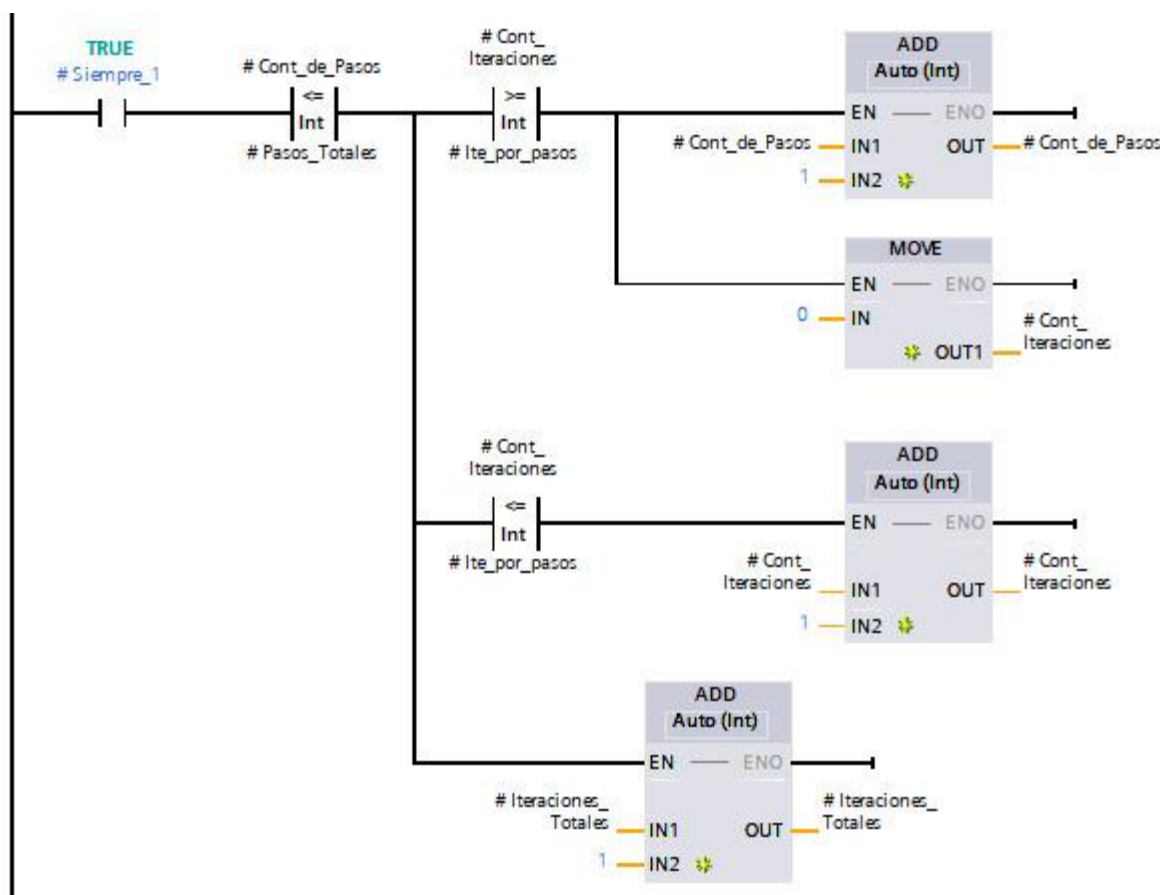


Fig. A.40: Programación de Duración de los Pasos a Partir de las Iteraciones

La programación de generación de escalones vista en la Fig. A.41, se crea mediante operaciones lógicas considerando 4 variables de pasos. Primero se deja un normalmente abierto con la variable `Siempre_1` para que se ejecute constantemente la programación. Luego esta limita su

ejecución mediante un menor e igual mediante las variables Cont_de_Pasos y Pasos_Totales, consiguientemente existen dos posibilidades dadas desde la variable Paso_INT que marca el paso limite que alcanza la función escalonada, adicionalmente a esto se utiliza una operación lógica (en ambas posibilidades) llamada ‘Es igual’ a las variables Cont_de_Pasos y Paso_Sig, así relacionando las iteraciones con la cantidad de pasos. En caso de que el Cont_de_Pasos sea menor o igual que el Paso_INT se sumara a la variable SP_Acum el DeltaSP mediante un bloque ADD y se le sumara 1 a la variable Paso_Sig mediante un bloque ADD. En caso contrario, se le restara a la variable SP_Acum el DeltaSP mediante un bloque SUB y se le sumara 1 a la variable Paso_Sig mediante un bloque ADD.

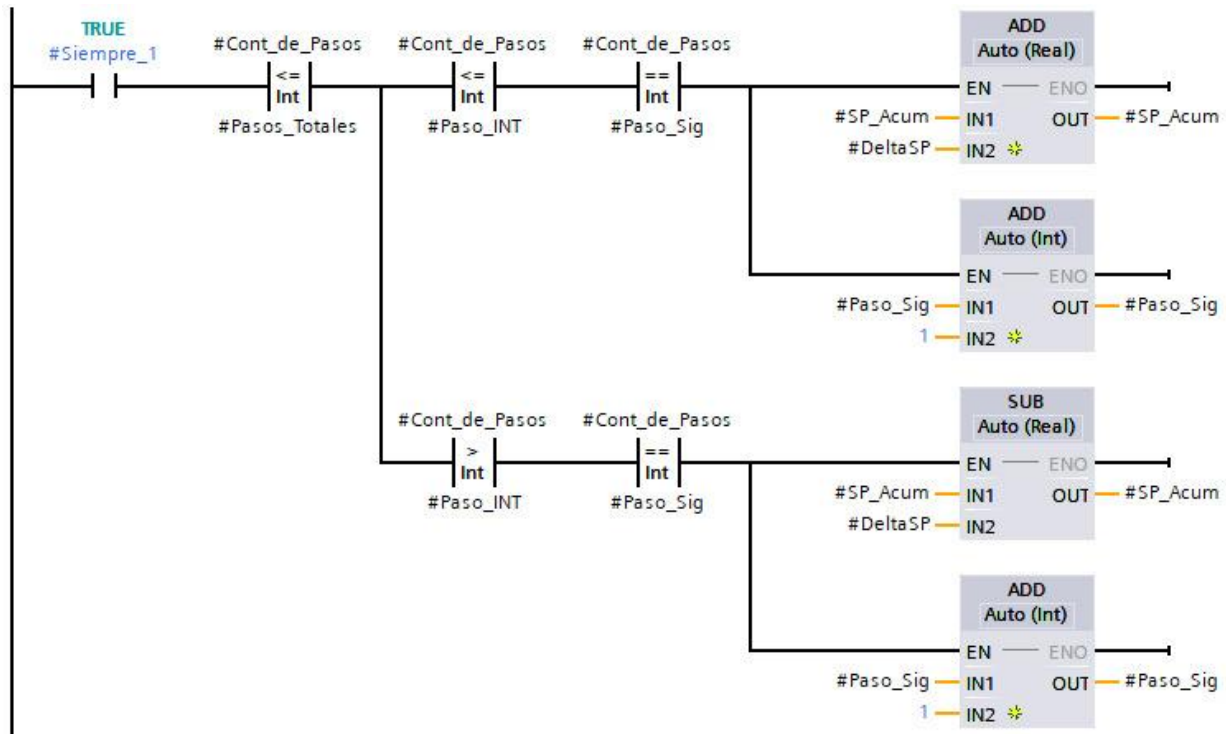


Fig. A.41: Programación de Generación de Escalones

Adicionalmente se programan limites mediante las velocidades de referencias ingresadas y se asigna el valor a la variable que contiene el Set Point asignado al motor, esto visto en la Fig. A.42. Primeramente, se ejecuta el bloque Fin enlazado a la operación de control de programa, además se utilizó un normalmente abierto con la variable Siempre_1 para que se ejecute constantemente la programación, luego de esto existen 3 posibilidades. En la primera posibilidad es que la variable SP_Acum sea mayor que la variable RPM_F en este caso se mueve el valor de este último al SP_Acum mediante un bloque MOVE y se mueve el valor de SP_Acum a la variable de salida SP_Out. En la segunda posibilidad el valor del SP_Acum es menor que la variable RPM_I por lo cual se mueve el valor de este último al SP_Acum mediante un bloque MOVE y se mueve el valor de SP_Acum a la

variable de salida SP_Out. En la última posibilidad el SP_Acum se encuentra entre los rangos de RPM_I y RPM_F por lo cual se mueve directamente el valor de SP_Acum a SP_Out.

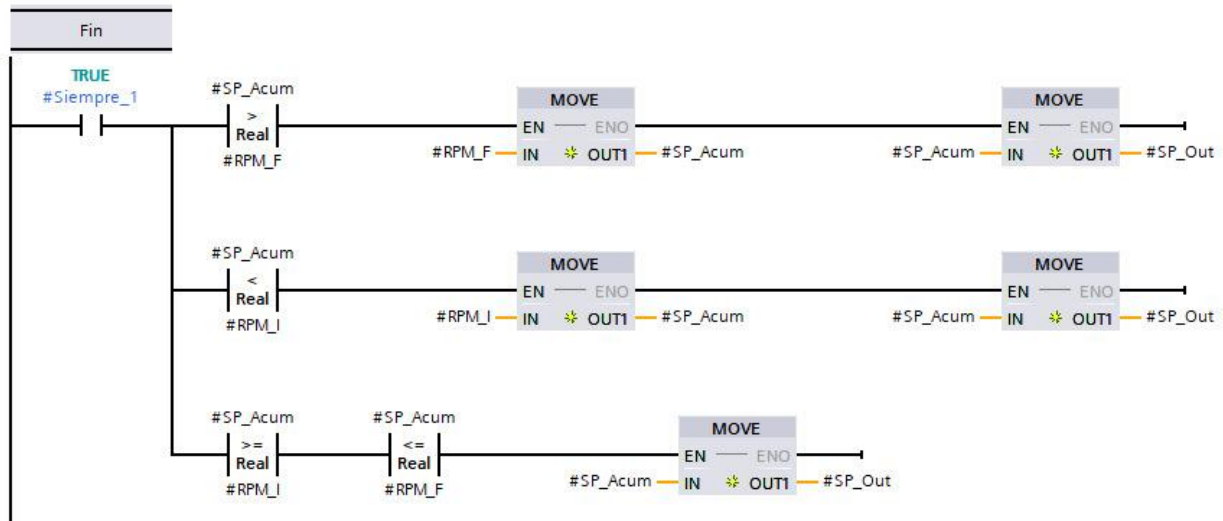


Fig. A.42: Programación de Set Point de Salida

Finalmente se programan los estados que se visualizará en el HMI de la generación de la función escalonada vista en la Fig. A.43. En esta se utilizó un normalmente abierto con la variable Siempre_1 para que se ejecute constantemente la programación. Luego mediante un bloque MOVE se asigna la variable Pasos_Totales a Pasos_Totales_O, también la variable Cont_de_Pasos a Paso_Actual_O y la variable DeltaSP a la Incremento_Paso. Por último, se divide la Iteraciones_Totales por el tiempo del reloj interno (0.1[s]) mediante un bloque CALCULATE para su visualización en segundos mediante la variable Tiempo_Actual_O.

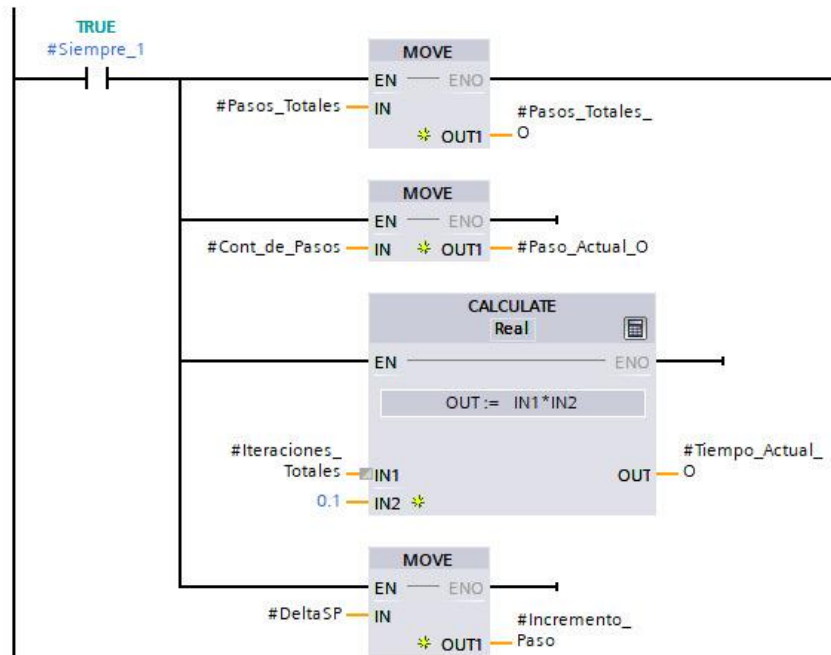


Fig. A.43: Programación de Estados de Función Escalonada

Dejando de esta manera el bloque programado FB SP_Generador en la Fig A.44.



Fig. A.44: Bloque FB SP_Generador

Ya con los bloques FB programados, se crean los DB que funcionaran en conjunto con el sistema de comunicación HMI.

Para el MCT estos bloques se denominan Drive_T_Estados_HMI y Drive_T_Comandos_HMI. Las variables creadas en estos bloques para su posterior asignación en los bloques FB y HMI se visualiza en la Fig. A.45 a la Fig. A.47 respectivamente.

Drv_T_Estados_HMI								
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint
1	Static			☐	☐	☐	☐	☐
2	Listo	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
3	Run	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
4	Falla	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
5	OFF2	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
6	OFF3	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
7	Alarma	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
8	Sentido Horario	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
9	Vdc_Menor	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
10	Vdc_Mayor	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
11	ZSW1	Int	0	☐	☒	☒	☒	☐
12	Velocidad Actual	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
13	Corriente Total	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
14	Corriente Id	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
15	Corriente Iq	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
16	Torque	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
17	Voltaje del Motor	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
18	Vdc	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
19	Tor_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐

Fig. A.45: Data Block Drive_T_Estados_HMI Superior

20	SP_Ref	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
21	SP_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
22	Corriente Total_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
23	Corriente Id_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
24	Corriente Iq_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
25	Velocidad Actual_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
26	Voltaje del Motor_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
27	Vdc_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐

Fig. A.46: Data Block Drive_T_Estados_HMI Inferior

Drv_T_Comandos_HMI								
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint
1	Static			☐	☐	☐	☐	☐
2	Partir	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
3	Off1	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
4	Off2	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
5	Off3	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
6	Referencia_UI	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
7	Reset	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
8	Invertir Giro	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
9	Ref_Nm_Max	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
10	Ref_Nm_Min	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
11	Ref_Im_Max	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
12	Ref_Im_Min	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
13	Ref_Tm_Max	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
14	Ref_Tm_Min	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
15	Ref_Vm_Max	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
16	Ref_Vm_Min	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
17	Selector	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
18	SP_V_T	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
19	T_min	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
20	T_max	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
21	N_min	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
22	N_max	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐

Fig. A.47: Data Block Drive_T_Comandos_HMI

Para el MCV estos bloques se denominan Drive_V_Estados_HMI y Drive_V_Comandos_HMI. Las variables creadas en estos bloques para su posterior asignación en los bloques FB y HMI se visualiza en la Fig. A.48 a la Fig. A.50 respectivamente.

Drv_V_Estados_HMI								
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint
1	Static			☐	☐	☐	☐	☐
2	Listo	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
3	Run	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
4	Falla	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
5	OFF2	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
6	OFF3	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
7	Alarma	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
8	Sentido Horario	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
9	Vdc_Menor	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
10	Vdc_Mayor	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐
11	ZSW1	Int	0	☐	☒	☒	☒	☐
12	Velocidad Actual	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
13	Corriente Total	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
14	Corriente Id	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
15	Corriente Iq	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
16	Torque	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
17	Voltaje del Motor	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
18	Vdc	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
19	Vel_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐

Fig. A.48: Data Block Drive_V_Estados_HMI Superior

20	Inc_Paso	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
21	Pasos_Totales	Int	0	☐	☒	☒	☒	☐
22	Paso_Actual	Int	0	☐	☒	☒	☒	☐
23	Tiempo_Actual	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
24	SP_Ref	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
25	SP_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
26	Corriente Total_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
27	Corriente Id_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
28	Corriente Iq_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
29	Torque_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
30	Voltaje del Motor_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐
31	Vdc_%	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐

Fig. A.49.: Data Block Drive_V_Estados_HMI Inferior

Drv_V_Comandos_HMI									
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	
1	Static			☐	☐	☐	☐	☐	
2	Partir	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐	
3	Off1	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐	
4	Off2	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐	
5	Off3	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐	
6	Referencia_UI	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
7	Invertir Giro	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐	
8	Reset	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐	
9	Ref_Nm_Max	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
10	Ref_Nm_Min	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
11	Ref_Im_Max	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
12	Ref_Im_Min	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
13	Ref_Tm_Max	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
14	Ref_Tm_Min	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
15	Ref_Vm_Max	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
16	Ref_Vm_Min	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
17	Selector	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐	
18	Iniciar	Bool	false	☐	☒	☒	☒	☐	
19	N_SP	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
20	RPM_I	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
21	RPM_F	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	
22	Paso_SP	Real	0.0	☐	☒	☒	☒	☐	

Fig. A.50: Data Block Drive_V_Comandos_HMI

Cabe destacar que cada bloque DB de los MCV y MCT, contienen sus respectivos datos de función de Set Point (función escalonada y función cuadrática respectivamente).

Finalmente se visualiza en la Fig. A.51 el listado de bloques OB, FB y DB utilizados para la comunicación de la plataforma experimental.



Fig. A.51: Listado de Bloques FB y DB de la Plataforma Experimental

- **Tiempos de Ejecución de Programa Esperados**

La programación establecida mediante TIA Portal funciona mediante el escaneo de ciclo, cuando el PLC está en modo RUN el ciclo OB1 principal funciona sobre el reloj IO [18]. Asignando un tiempo de ejecución de 1 [ms], por el lado del bloque OB30 funciona con un ciclo propio de 100 [ms] visto en la Fig A.52.

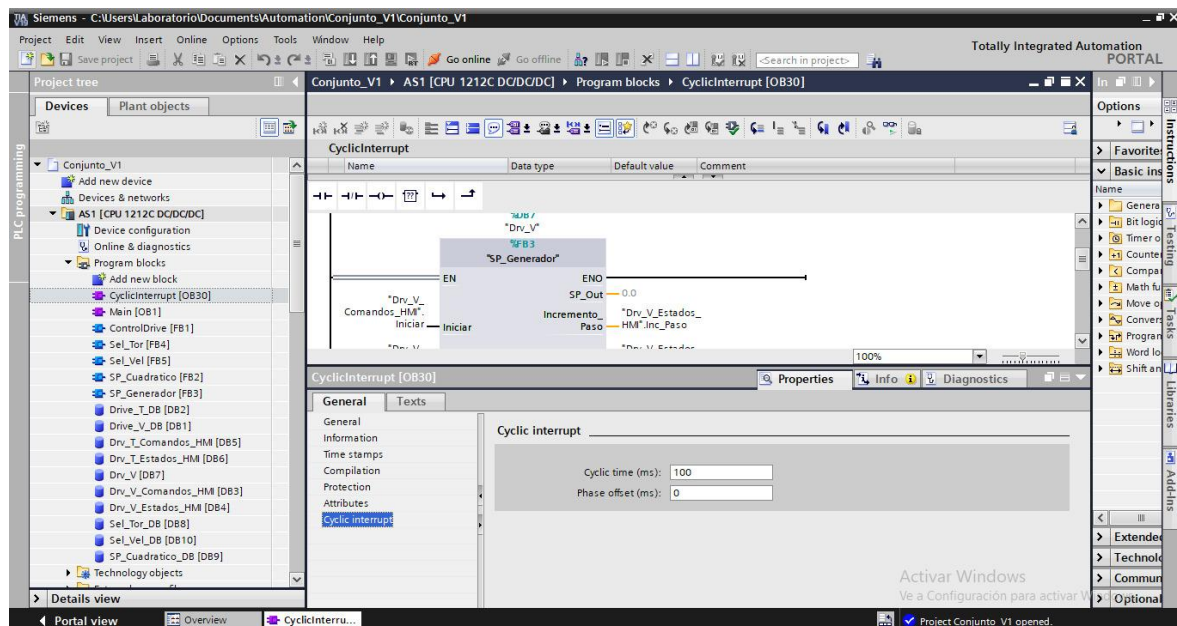


Fig. A.52: Asignación de Ciclo de Actualización de Subred

- **Definición de Tiempo de Actualización de Red**

El tiempo de actualización de la red de la programación en Tía Portal depende de la asignada en la Subred en este caso, el tiempo de la subred PN/IE_1, el tiempo depende del IO Controller y su configuración asignada en el IO comunicación, siendo de 1 [ms].

Anexo B. Detalle del Desarrollo del HMI

Características de WinCC Professional

- **Hardware requerido para su operación RT**

Los requisitos del programa WinCC Professional para operación con RT se encuentra en la Tabla B.1 [19].

TABLA B.1 Requisitos WinCC Professional.

Hardware	Mínimo
CPU	Dual Core; 2.5 Ghz
Memoria Ram	3 GB

- **Sistema Operativo y Dependencias de Software para Operación RT**

Los sistemas operativos compatibles con el programa WinCC Professional para operación con RT se encuentra en la Tabla B.2 [19].

TABLA B.2 S.O Compatibles con WinCC Professional.

Sistema Operativo
Windows 10 (Professional, Enterprise)
Windows 11 (Professional, Enterprise)

El software debe contener las licencias requeridas desde Sinamics para la utilización del programa, además de contar con el Protocolo S7 para poder compatibilizar con el PLC, también se utiliza WinCC RT para la ejecución del sistema HMI programado.

- **Cumplimiento Requisitos de Sistema de Supervisión**

Las características del computador utilizado se visualizan en la Tabla B.3. Este cumple con los requerimientos de las Tablas B.1 y B.2.

TABLA B.3 S.O Compatibles con WinCC Professional.

Hardware	Mínimo
Windows	10 Professional
CPU	Dual Core: 3 Ghz
Memoria Ram	4 GB

El cumplimiento de requisito de estructura de la interfaz gráfica cambia a lo requerido, ya que se decidió tener 9 pantallas en total. En la primera pantalla se dará la bienvenida al programa con una pantalla de inicio sobre la plataforma experimental, desde la segunda pantalla a la cuarta se optó por

tener tres páginas individuales dinámicas para la visualización de las curvas y operación de los accionamientos, con dos pantallas para cada accionamiento y otra con la visualización de ambos accionamientos. También se creó una pantalla para cada panel de control de cada accionamiento siendo las pantallas quinta y sexta, además en la pantalla de visualización de ambos accionamientos está disponible una pantalla con la curva de torque v/s velocidad siendo la séptima pantalla. Al igual se crearon una pantalla con los datos históricos de la plataforma experimental, una pantalla de ajustes del motor siendo la octava y novena pantalla.

Esta estructura descrita cumple con el requerimiento de funcionalidad de escritura y lectura de variables en el PLC, y el WinCC Professional cumple con la conexión vía Ethernet y cuenta con el protocolo S7.

Por el lado de las Tasas de actualización requeridas, la tasa de actualización de imágenes requerida de todas las pantallas es de 250 [ms] vista en la Fig. B.1.

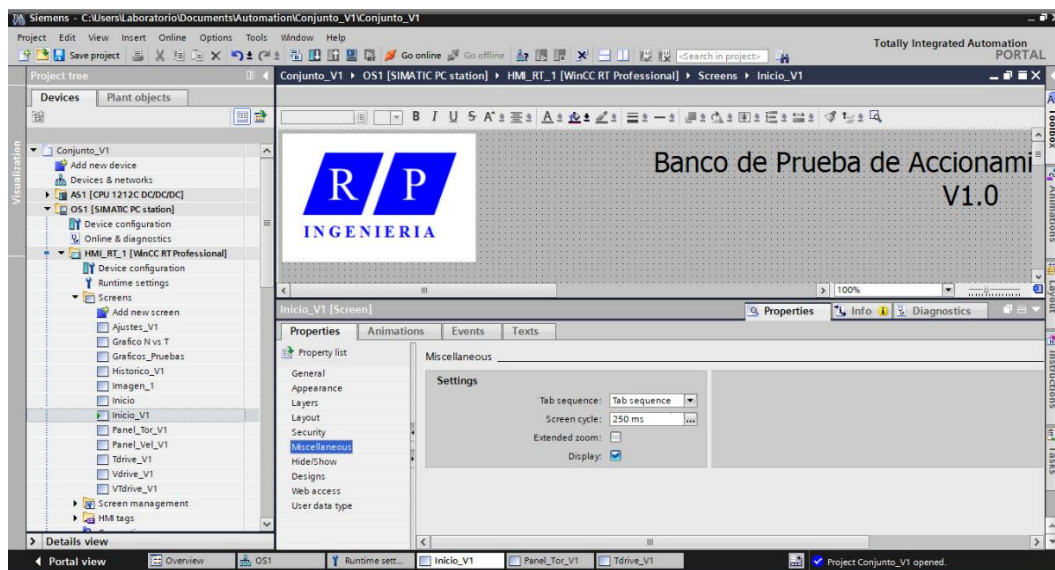


Fig. B.1: Tasa de Actualización de Imágenes

La tasa de actualización de variables en campos requerida de todas las variables es de 250 [ms] vista en la Fig. B.2.

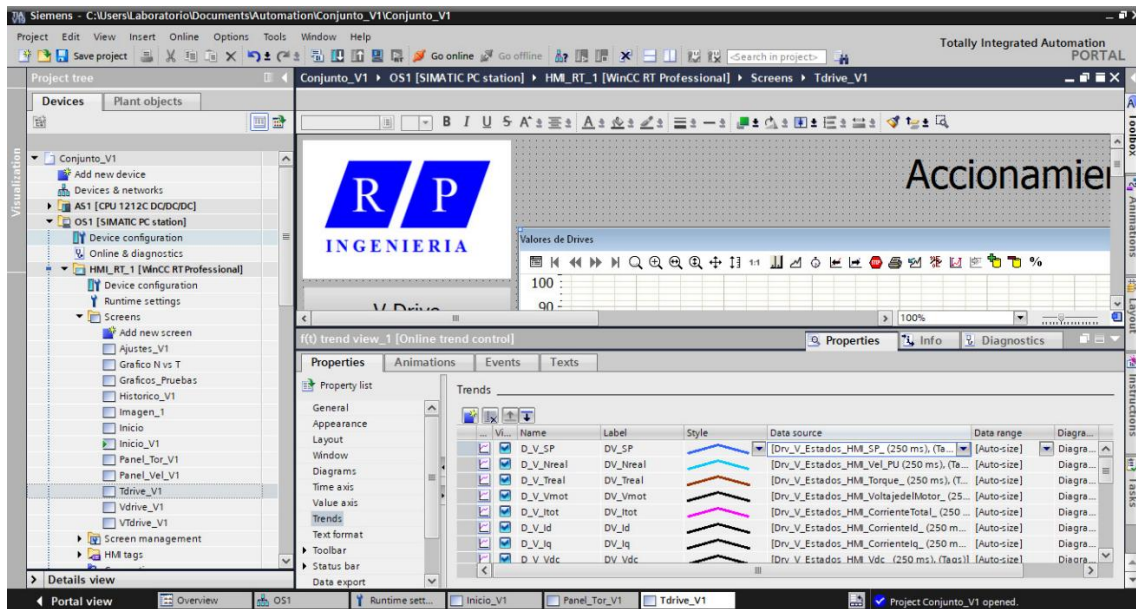


Fig. B.2: Tasa de Variables en Campos

Como todos los objetos impuestos en el HMI no tienen animación, la tasa de actualización de comandos y dinimizaciones depende de la actualización de imágenes de la pantalla, por lo tanto, es de 250 [ms] vista en la Fig. 2.166.

La tasa de registro permanente de variables requerida de todas las variables es de 500 [ms] vista en la Fig. 2.168.

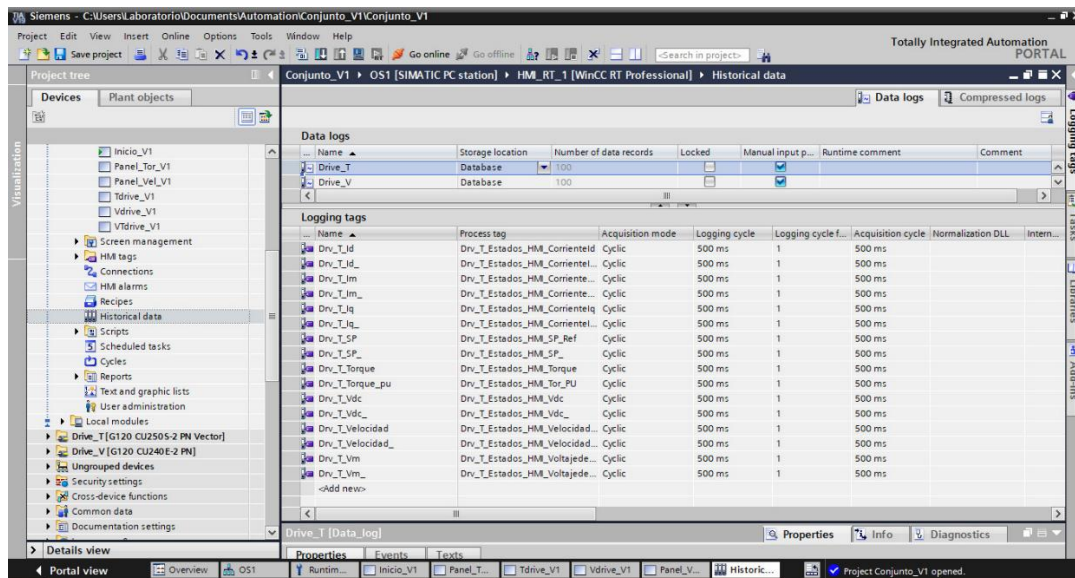


Fig. B.3: Tasa de Registro Permanente de Variables Requerida

- **Limitaciones del Sistema de Supervisión**

Una limitación del sistema de supervisión es que el condicionamiento inicial del motor se debe hacer desde el programa STARTDRIVE o STARTER. Al igual que el cambio de modo de lazo de control tampoco se puede realizar desde este medio.

Otra limitación está en el sistema de alerta que está basado en la palabra de estado de la Fig. 2.22, por lo cual solo se tendrá la información disponible de esta palabra de 16 bits del estado del motor y no todas las disponibles en los parámetros del G120 mediante sus propias CU.

- **Conectividad de Comunicaciones**

La conectividad de la comunicación del sistema de supervisión HMI mediante el programa Tía Portal se realiza colocando una SIMATIC PC station para utilizar el computador como HMI, a este se le adhiere un módulo de comunicación PROFINET IE general (Que se conecta a la subred) y este a su vez se le adhiere el programa WinCC RT Prof, para poder ejecutarlo mediante el Tía Portal. Todo esto visto en la Fig. B.4.

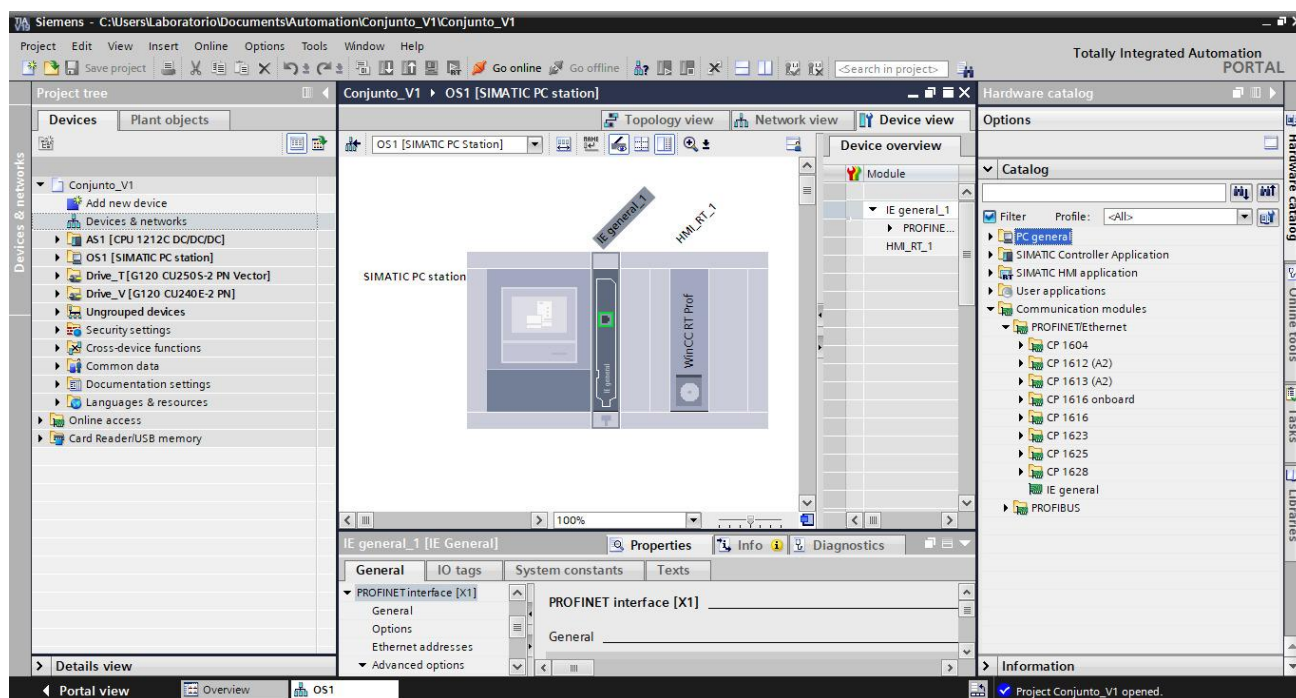


Fig. B.4: Conectividad del HMI Mediante TIA PORTAL

- **Cálculo de Capacidad de Disco para Almacenamiento de Archivos RT**

Para el cálculo de capacidad de disco se tomó en cuenta el tamaño de la data log histórica que se crea mediante el HMI. En este se tiene un máximo de 1 [GB] creado por semana tanto para las

alarmas y eventos, los registros rápidos y los registros lentos de datos visto en la Fig. B.5. Por lo cual, si se requiere utilizar la capacidad máxima de datos disponibles, se requiere una capacidad del disco duro de almacenamiento de 3 [GB·semana].

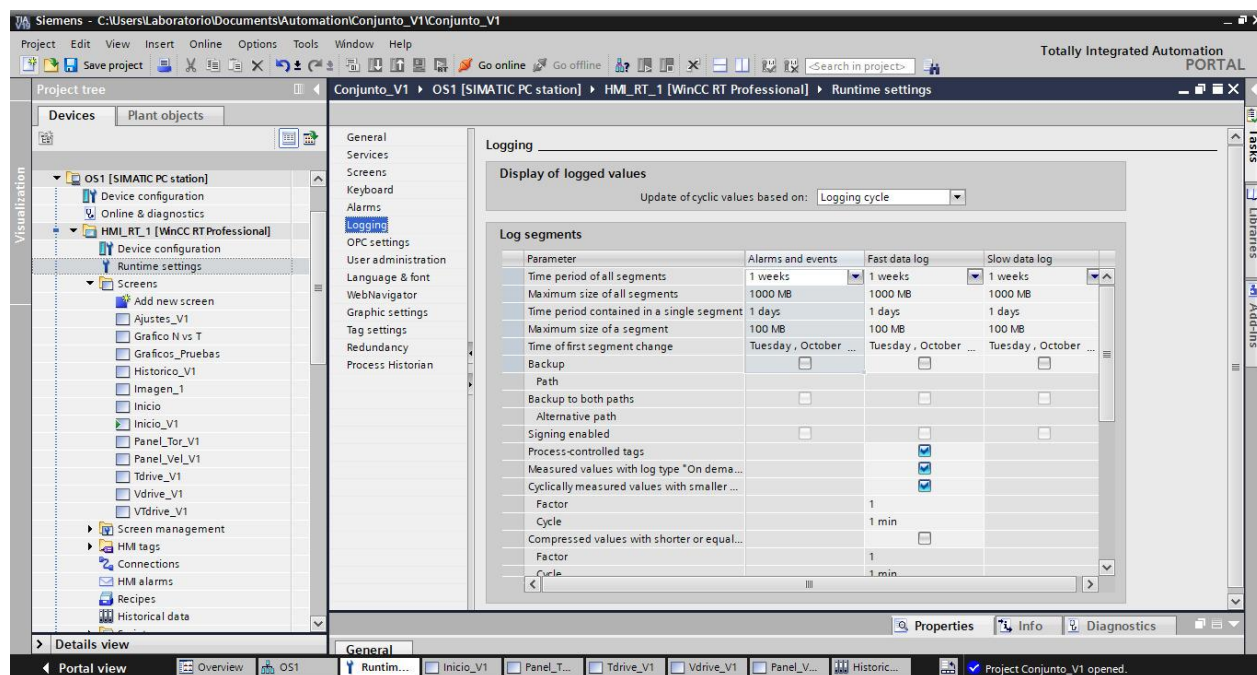


Fig. B.5: Tamaño Máximo de Datos Creados por el HMI por Día o Semana

- **Solución de Supervisión Propuesta**

La solución de supervisión propuesta sigue la estructura descrita en el cumplimiento de los requerimientos.

La primera pantalla se visualiza en la Fig. 4.30. En esta se tiene la parte estática con el logo de la empresa, el título del programa y dos motores acoplados ilustrando el conjunto experimental. Por el lado de la parte dinámica se tiene dos botones: Iniciar y Salir.

Por el lado de botón Iniciar se le añade un evento, que al hacer clic sobre este activa la segunda pantalla llamada 'Vdrive_V1', todo esto visto en la Fig A.6. Por el lado del botón Salir a este se le añade un evento, que al hacer clic sobre este activa el modo Runtime cerrando el programa, visto en la Fig. A.7.

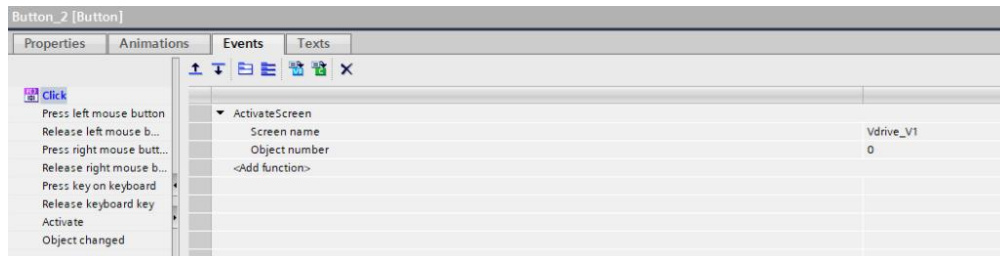


Fig. A.6: Configuración Botón Iniciar

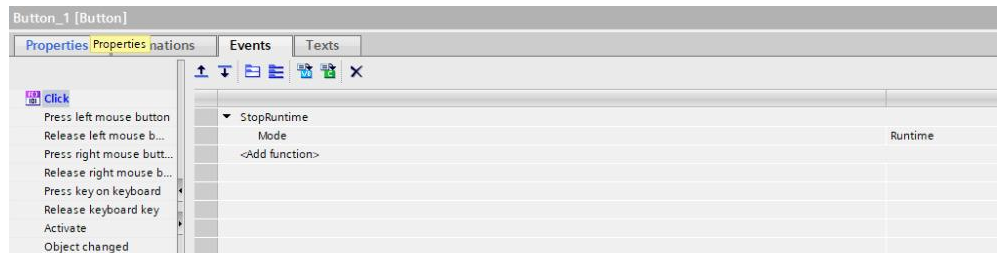


Fig. A.7: Configuración Botón Salir

La segunda pantalla se visualiza en la Fig. 4.31. En esta se tiene una barra lateral con las pantallas principales del programa. Además, tiene un botón que activa la quinta pantalla que contiene el panel con el control del MCV vista en la Fig. 4.32. También se cuenta con un gráfico que contiene las variables de este último. Por último, se puede ver el despliegue del panel de control en la Fig. 4.33.

La configuración de botones de la segunda pantalla se visualiza de la Fig. A.8. En las laterales se utiliza un evento y la dirección a la pantalla que se quiere visualizar. El botón que visualiza el panel funciona en relación con que la pantalla se encuentra invisible sobre la segunda pantalla y esta se visualiza mediante el bit visto en la Fig. A.9, que se modifica mediante la función set bit de la Fig. A.10 enlazado al botón Ver Panel.

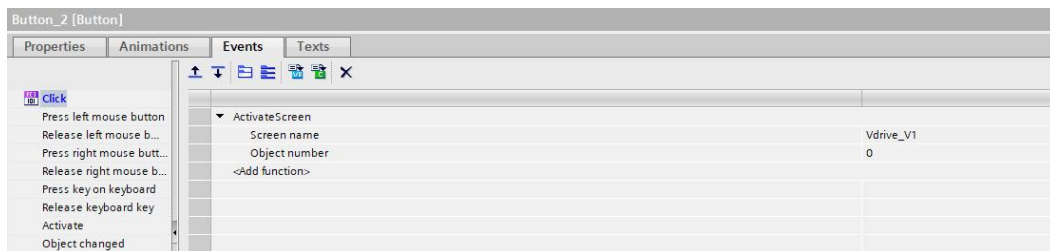


Fig. A.8: Configuración Botón V Drive

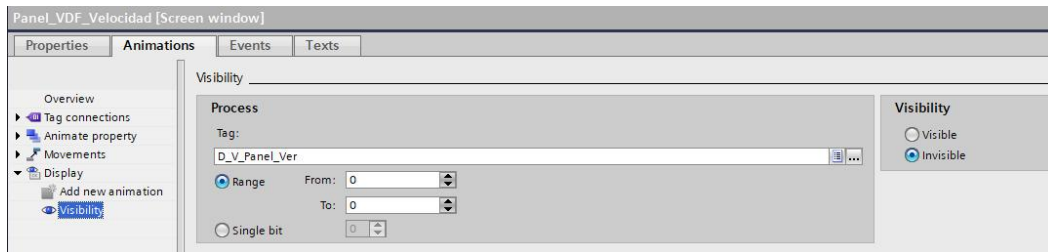


Fig. A.9: Configuración de Pantalla Panel de MCV



Fig. A.10: Configuración Botón Ver Panel

La configuración del gráfico con las variables procesadas de la segunda pantalla se visualiza en la Fig. A.11.

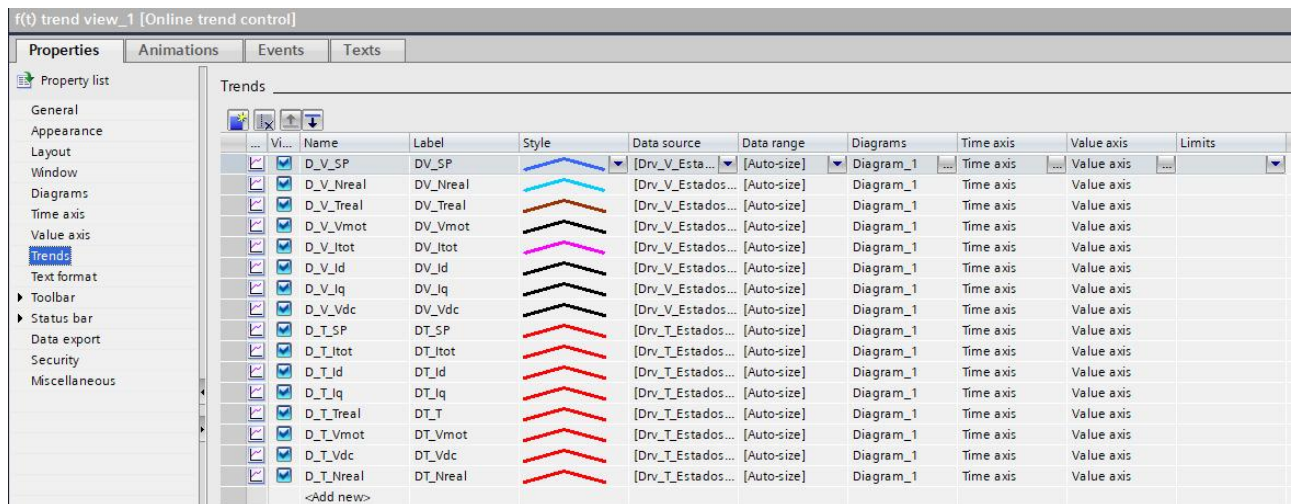


Fig. A.11: Configuración de Grafico de Pantalla Accionamiento Control Velocidad

La configuración de botones de la tercera pantalla se visualiza de la Fig. A.8. En los laterales se utiliza un evento y la dirección a la pantalla que se quiere visualizar. El botón que visualiza el panel funciona en relación con que la pantalla se encuentra invisible sobre la tercera pantalla y esta se visualiza mediante el bit visto en la Fig. A.12, que se modifica mediante la función set bit de la Fig. A.13 enlazado al botón Ver Panel.

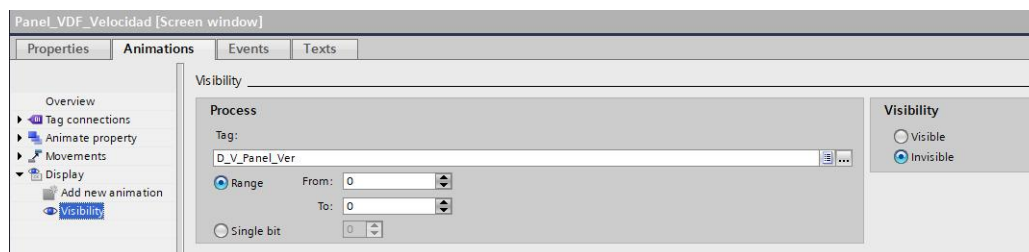


Fig. A.12: Configuración de Pantalla Panel de MCT



Fig. A.13: Configuración Botón Ver Panel

La configuración del grafico con las variables procesadas de la tercera pantalla se hizo de la misma manera que en la Fig. 2.11.

La configuración de botones de la cuarta pantalla se sigue los mencionados anteriormente. En las laterales se utiliza un evento y la dirección a la pantalla que se quiere visualizar. El botón que visualiza el panel funciona en relación con que la pantalla se encuentra invisible sobre la tercera pantalla y esta se visualiza mediante el bit visto en la Fig. A.14, que se modifica mediante la función set bit de la Fig. A.15 enlazado al botón Grafico N v/s T.

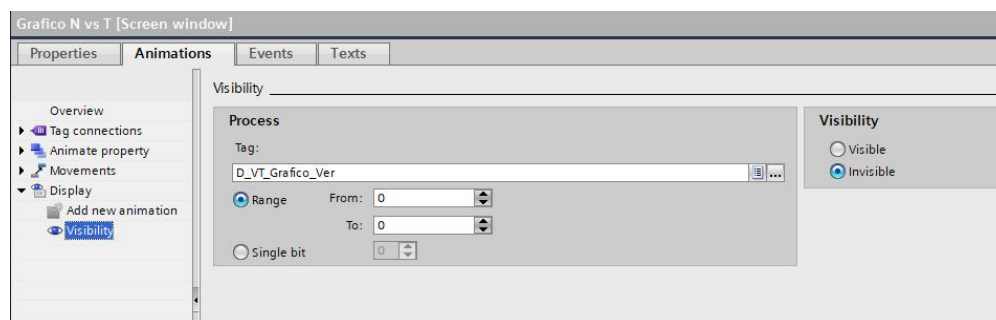


Fig. A.14: Configuración de Pantalla Grafico N vs T



Fig. A.15: Configuración Botón Ver Panel

La configuración del grafico con las variables procesadas de la cuarta pantalla se hizo de la misma manera que en la Fig. 2.11.

Las pantallas quinta y sexta (Panel de Comando Velocidad y Torque) vistas en las Fig. 4.34 y Fig. 4.35. Cuentan en su izquierda el panel propio de cada accionamiento y a su derecha los comandos de los Set Point propios que pueden ser ejecutados desde cada accionamiento.

A la izquierda ambas pantallas cuentan con alarmas de cada accionamiento en la parte superior, por otro lado, en la parte inferior cuenta con comandos y la visualización de las variables.

La configuración de este segmento de ambas pantallas se describe en conjunto, visualizándose primeramente la configuración de las alarmas de los accionamientos vistos de la Fig. A.16 y Fig. A.17. En esta configuración se agrega una animación de Apariencia con la dirección al bit requerido (de la Palabra de Mando) y se asigna el color que se requiere dependiendo del estado del bit (Sea 0 o 1). Cabe destacar que para las visualizaciones de valores se optó por un color celeste y para el ingreso de valores por un color blanco para ambos paneles.

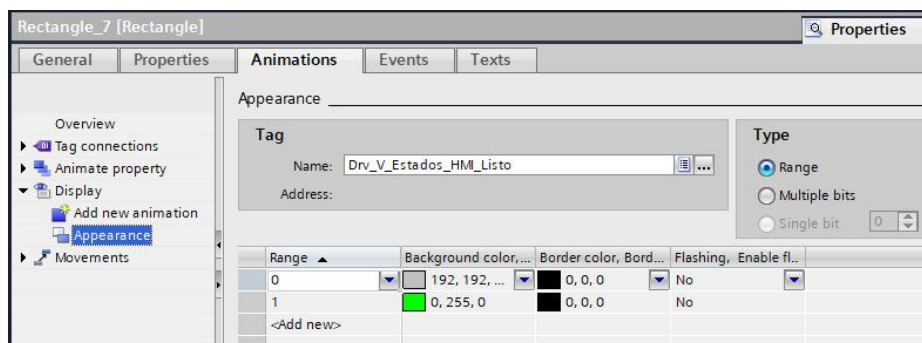


Fig. A.16: Configuración Alarma Listo MCV

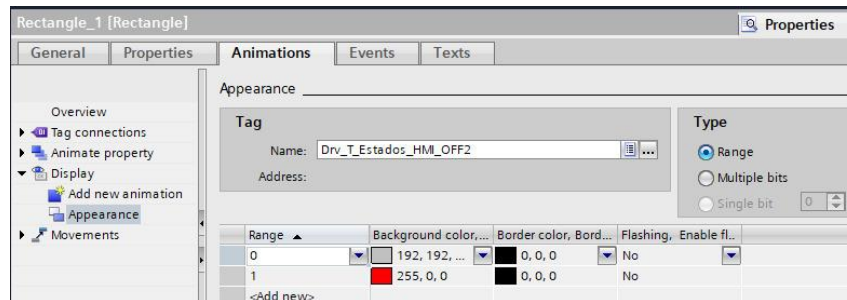


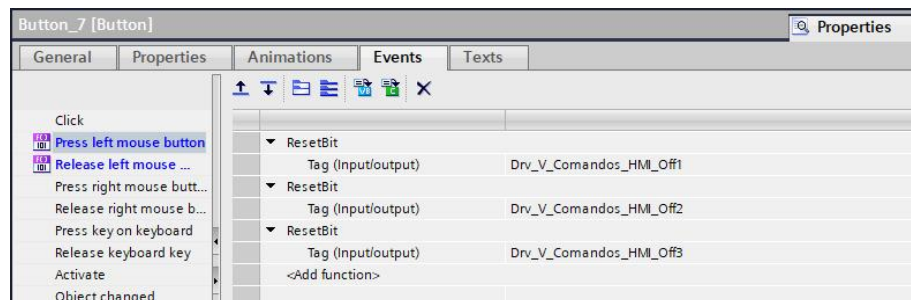
Fig. A.17: Configuración Alarma OFF2 MCT

Mas abajo hay un combinado de comando y visualización del estado de este mismo. Estos 3 Comandos/Alarmas se configuran de la misma manera ya descritas anteriormente.

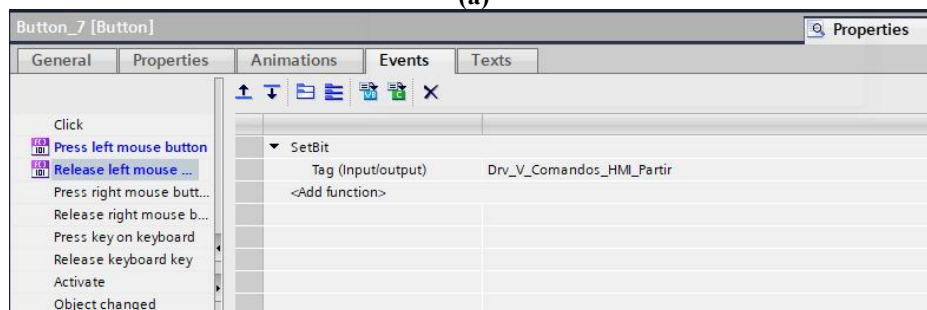
Cabe mencionar que el bit de la Palabra de Mando que se utiliza en el botón Reset tiene doble configuración. Esto para que el bit no quede anclado en 1 provocando una falla en la CU.

Mas abajo se encuentran los botones con los comandos principales del motor y un botón a su costado que cambia el Set Pont requerido.

La configuración del botón Iniciar, requiere que al pulsar el botón todos los bits asociados a las paradas del motor se sitúen en 0 y al soltar el botón el bit del comando partir se sitúe en 1. Esta configuración se visualiza en las Fig. A.18 y Fig. A.19.



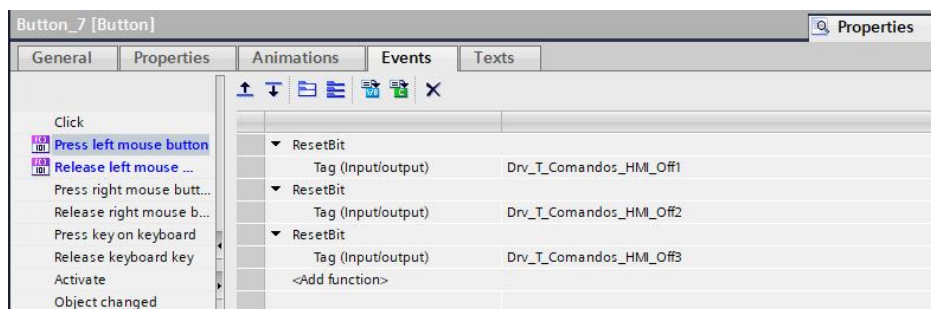
(a)



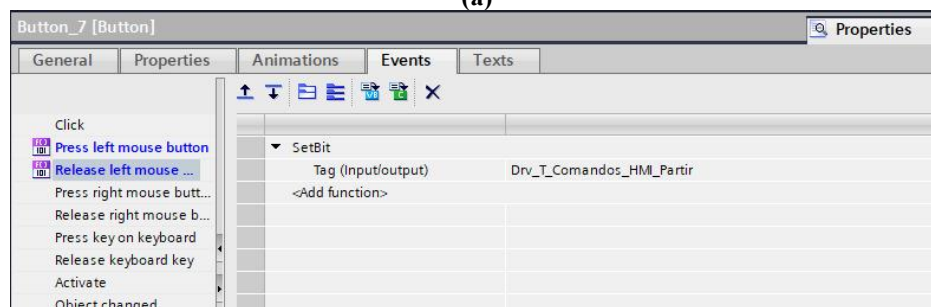
(b)

Fig. A.18: Configuración de Comando Partir MCV

(a) Al Pulsar el Botón (b) Al Soltar el Botón



(a)

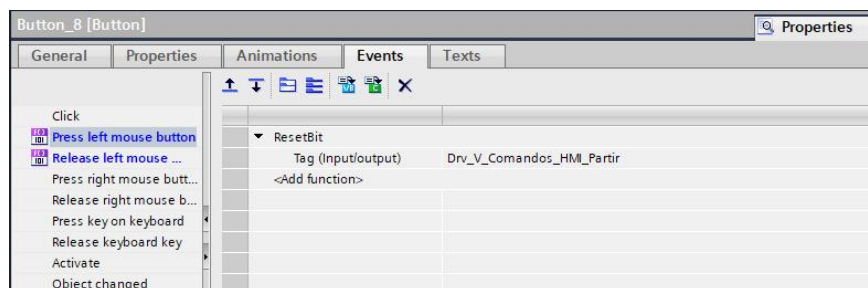


(b)

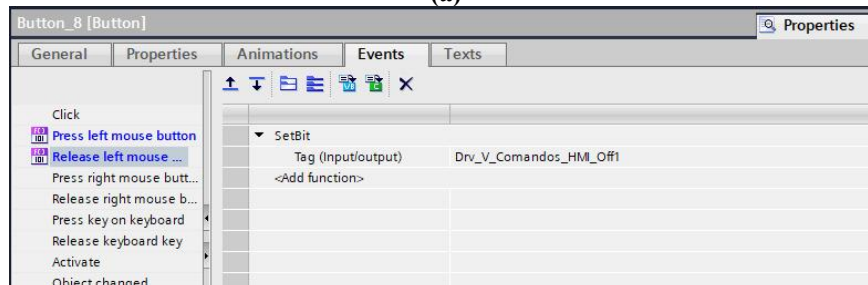
Fig. A.19: Configuración de Comando Partir MCT

(a) Al Pulsar el Botón (b) Al Soltar el Botón

Para la configuración de los botones OFF, estos al pulsar el botón el bit del comando partir se sitúa en 0 y al soltar el botón la parada con el comando OFF correspondiente se situará en 1. Esta configuración se visualiza en las Fig. A.20 y Fig. A.21.



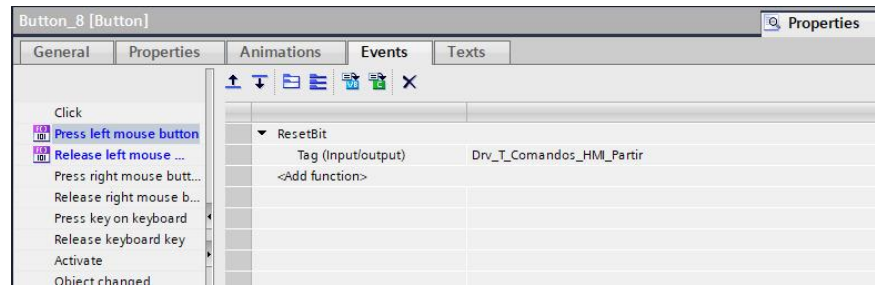
(a)



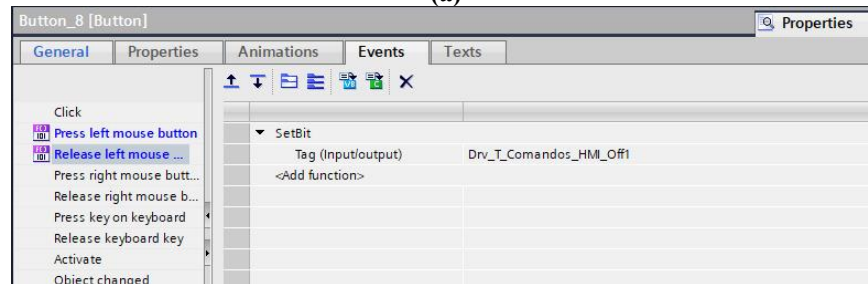
(b)

Fig. A.20: Configuración de Comandos OFF 1, 2 y 3 MCV

(a) Al Pulsar el Botón (b) Al Soltar el Botón



(a)

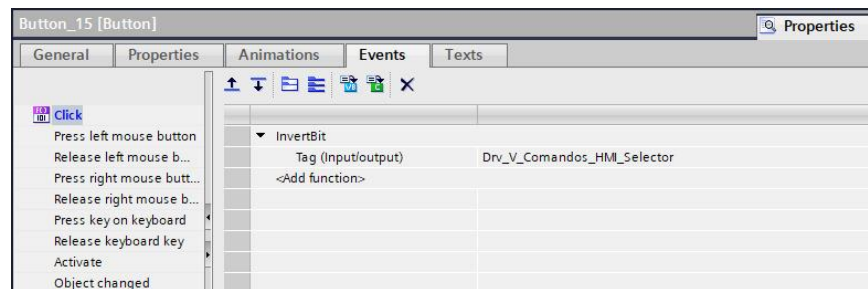
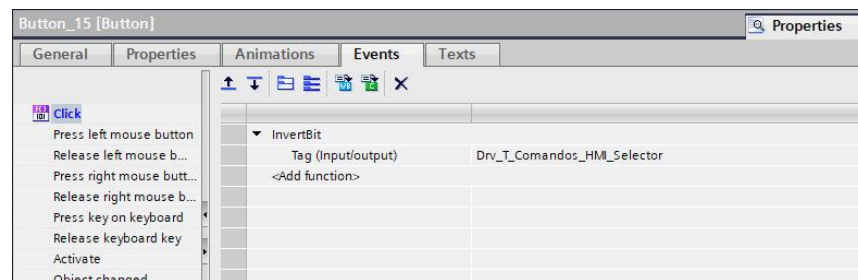


(b)

Fig. A.21: Configuración de Comandos OFF 1, 2 y 3 MCT

(a) Al Pulsar el Botón (b) Al Soltar el Botón

Para la configuración del botón que cambia el Set Point, este invierte el bit de 0 a 1 o viceversa de los bloques. Esta configuración se visualiza en las Fig. A.22 y Fig. A.23.

**Fig. A.22: Configuración Comando Selector de Set Point MCV****Fig. A.23: Configuración Comando Selector de Set Point MCT**

Al costado de los botones con los comandos principales del motor, se visualizan las variables de interés procesadas a unidades de ingeniería. Esta utiliza un bloque I/O field conectado a un tag con el valor que se visualizara. La configuración que se utilizó en cada bloque de cada pantalla se visualiza

en la Fig. A.24 y la Fig. A.25.

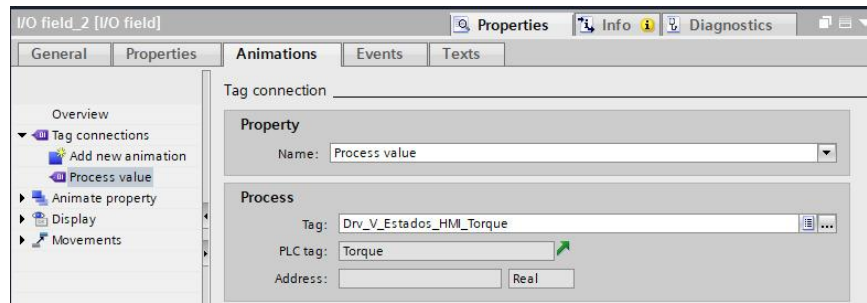


Fig. A.24: Configuración de Visualización de Variable de Torque MCV

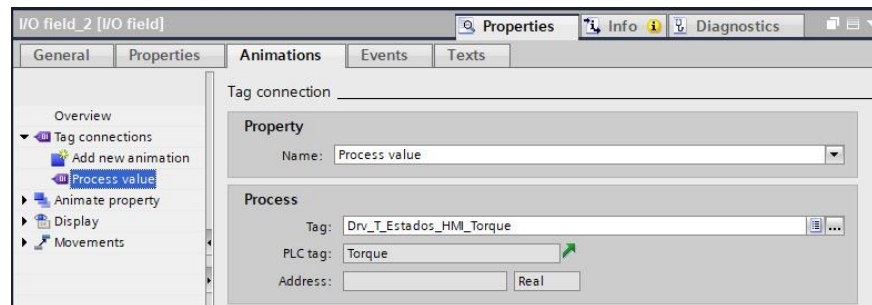


Fig. A.25: Configuración de Visualización de Variable de Torque MCT

Ahora por el lado derecho de las pantallas se sitúan los respectivos Set Point que se pueden mandar a cada accionamiento.

En la parte superior se utiliza un Set Point Lineal en ambas pantallas y se configuran de la misma manera. En esta se utiliza un bloque I/O field y se utiliza un tag con la dirección requerida. La configuración de cada pantalla se visualiza en la Fig. A.26 y la Fig. A.27.

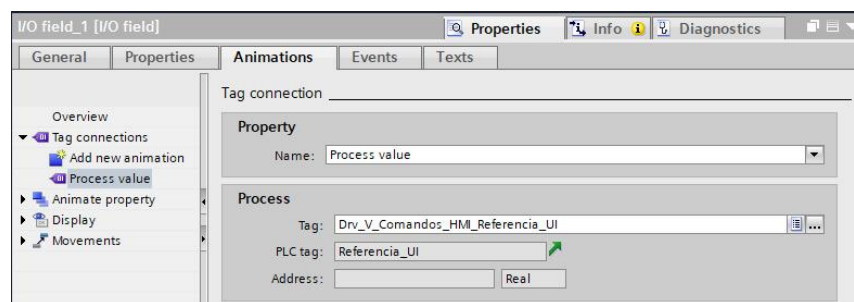


Fig. A.26: Configuración de Set Point Lineal MCV

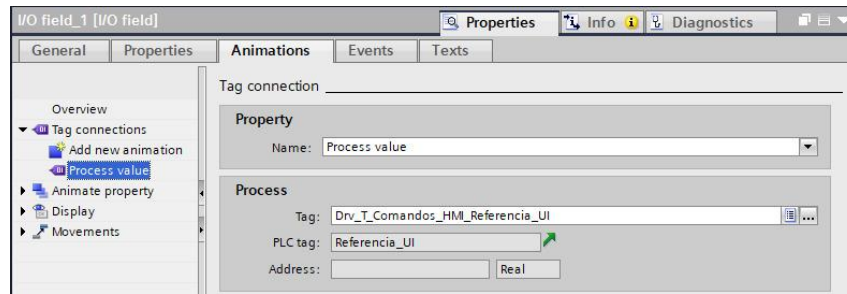


Fig. A.27: Configuración de Set Point Lineal MCT

Por la parte inferior derecha de ambas pantallas estas difieren entre ellas, ya que, hay distintas funciones matemáticas que se pueden utilizar en cada accionamiento.

Por el lado de la quinta pantalla vista en la Fig. 4.36 que contiene el panel de mando del MCV cuenta con la Función Escalonada. Por el lado izquierdo se dispone de dos botones, uno que crea la función escalonada y otro que reinicia los valores de esta. Sus configuraciones se ven en la Fig. A.28 y Fig. A.29 respectivamente.

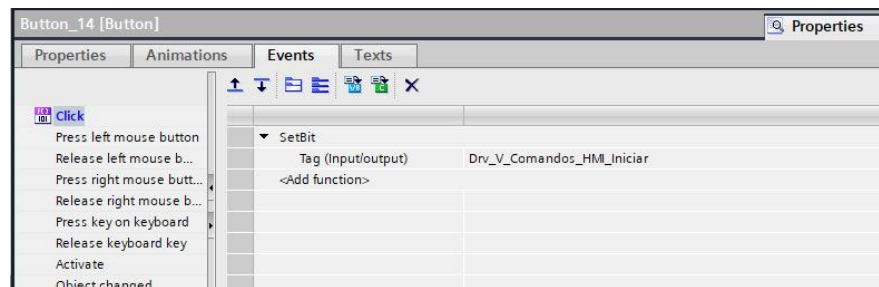


Fig. A.28: Configuración Botón Iniciar

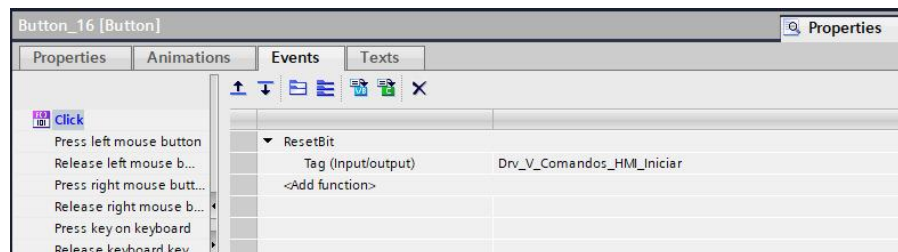


Fig. A.29: Configuración de Botón Reset

Al costado de estos botones se utiliza bloques I/O field para los comandos que configuran la Función Escalonada y los estados de esta misma (Que se sitúan debajo). La configuración de los comandos y estados de la Función Escalona se visualizan en la Fig. A.30, siendo igual para todas.

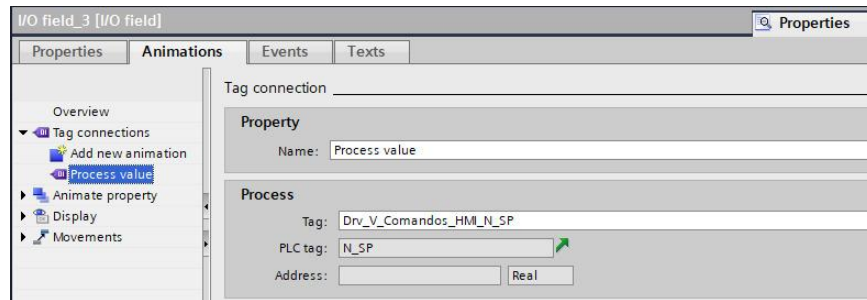


Fig. A.30: Configuración de Comando N° de Escalones

Por el lado de la sexta pantalla vista en la Fig. 4.37 que contiene el panel de mando del MCT cuenta con la Función Cuadrática. Por el lado izquierdo se dispone de un bloque I/O Field que enviara el Set Point al MCV de velocidad que generara el torque en el MCT a partir de esta misma. Su configuración se ve en la Fig. A.31.

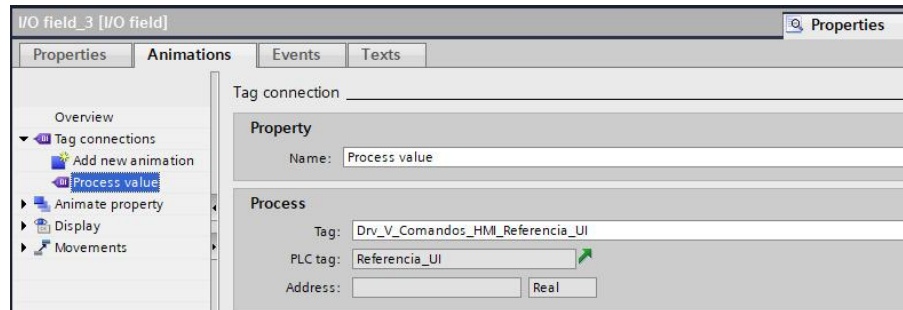
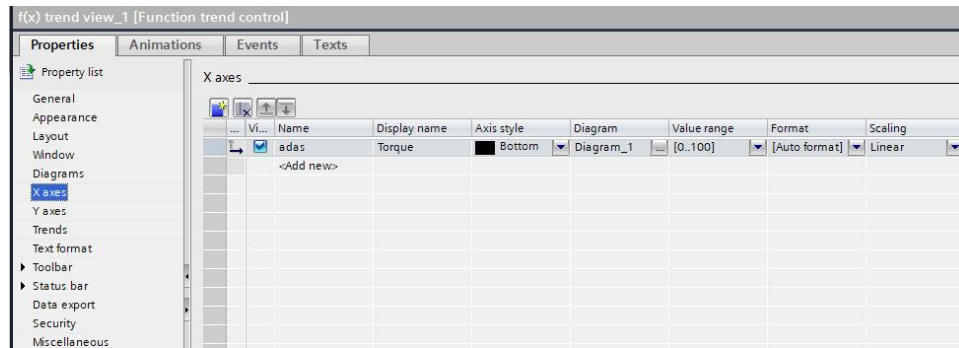


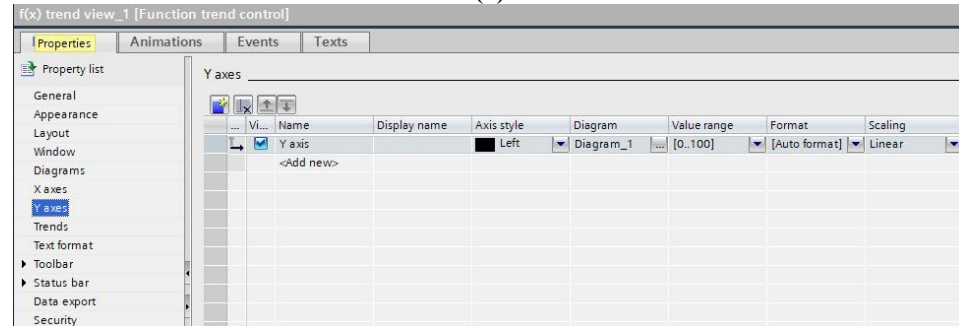
Fig. A.31: Configuración de Comando Set Point MCV

Al costado del bloque I/O Field están los comandos y los estados de visualización en la Función Escalonada. Por la derecha superior se dispone del estado Listo y estado Run del MCV, debajo esta 3 botones que puede hacer Partir, Detener y Reiniciar Falla de la plataforma experimental en su conjunto. A su costado se fijan los límites de velocidad y torque de la Función Escalonada mediante bloques I/O Field. La configuración de todo el conjunto se realiza de la manera anteriormente mencionada.

La configuración del grafico de la séptima pantalla (Panel Grafico Torque v/s Velocidad) es vista en la Fig. 3.32.



(a)

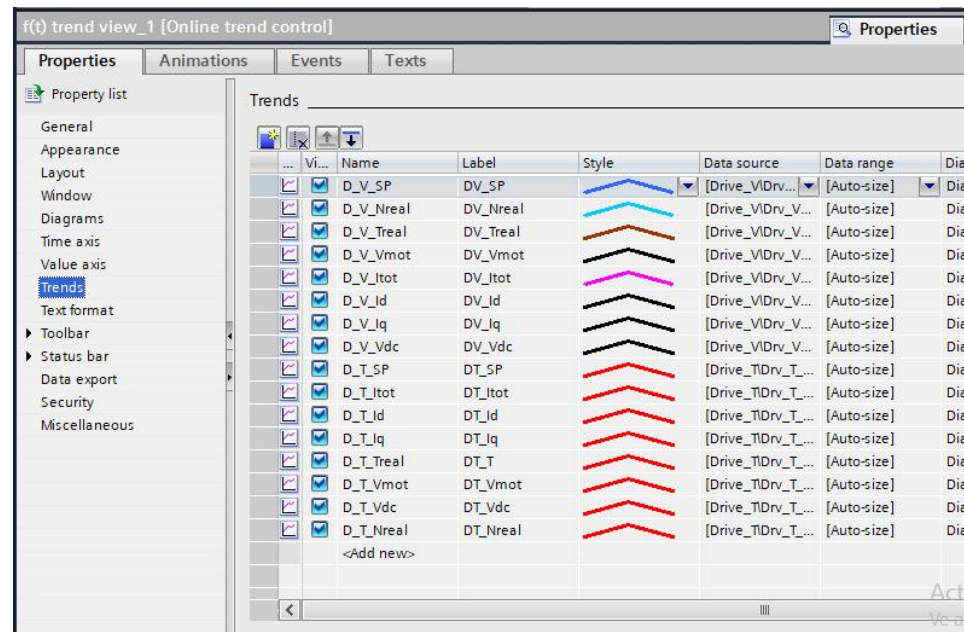


(b)

Fig. A.32: Configuración de Grafico de Pantalla N vs T

(a) Eje X (b) Eje Y

Por el lado de la Octava pantalla que se visualiza en la Fig. 4.39, cuenta con el registro histórico de las variables de la plataforma experimental. Esta contiene dos gráficos uno con valores porcentuales y otro con valores en unidad de ingeniería. La configuración de estos gráficos se visualiza en la Fig A.34 y Fig A.35.

**Fig. A.34: Configuración de Grafico con Valores Porcentuales**

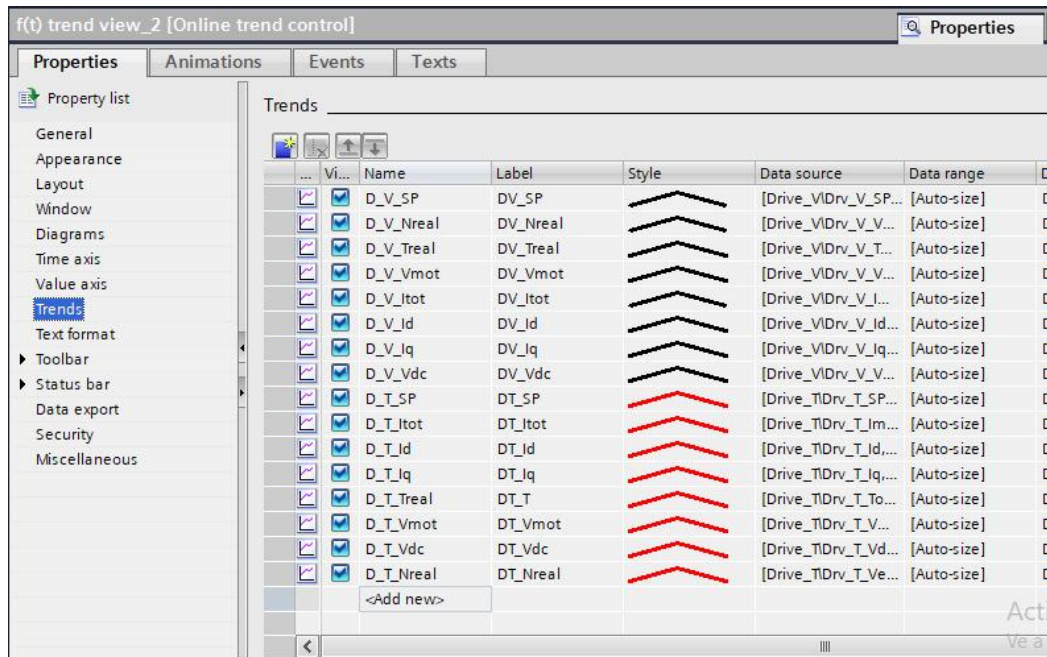


Fig. A.35: Configuración de Grafico con Valores en Unidades de Ingeniera

Por el lado de la Novena pantalla que se visualiza en la Fig 2.256, cuenta ajuste de las referencias de las variables que ingresan al bloque desde la plataforma experimental. Esta utiliza bloques I/O Field con dirección a cada referencia. La configuración de estos bloques se ilustra en la Fig. A.36 y la Fig. A.37 que se utiliza en ambos accionamientos. Siendo igual para todas las referencias.

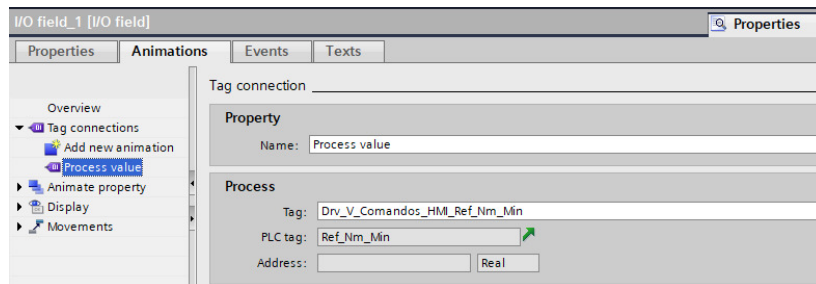


Fig. A.36: Configuración de Referencia Mínima de Set Point

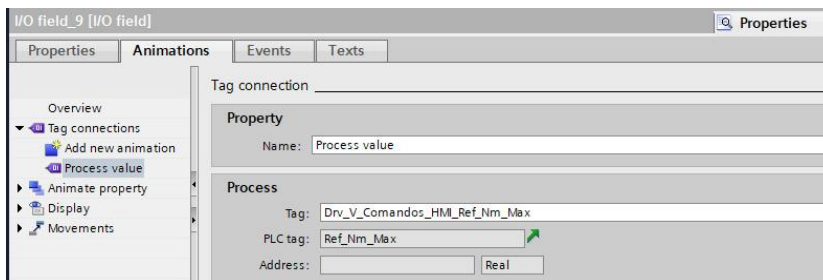


Fig. A.37: Configuración de Referencia Maxima de Set Point

Finalmente se visualiza en la Fig. A.38 el listado pantallas utilizadas para el sistema de visualización la plataforma experimental.

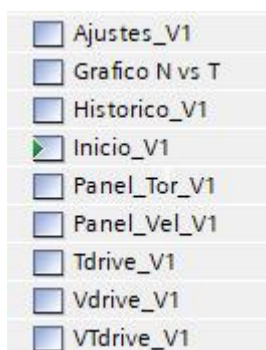


Fig. A.38: Listado de Pantallas de la Plataforma Experimental

Anexo C. Configuración de las Pruebas

• Prueba 1

Primeramente, se realiza la configuración de los lazos de control de cada accionamiento EN STARDRIVE. Para el lazo de control V/F del MCV se configura en la Fig. D.1 mediante el bit [0]. Para el lazo de control Torque (VC) del MCT se configura en la Fig. D.2 mediante el bit [23] y se activa colocando en 1 el Speed/torque Control en la Fig. D.3.

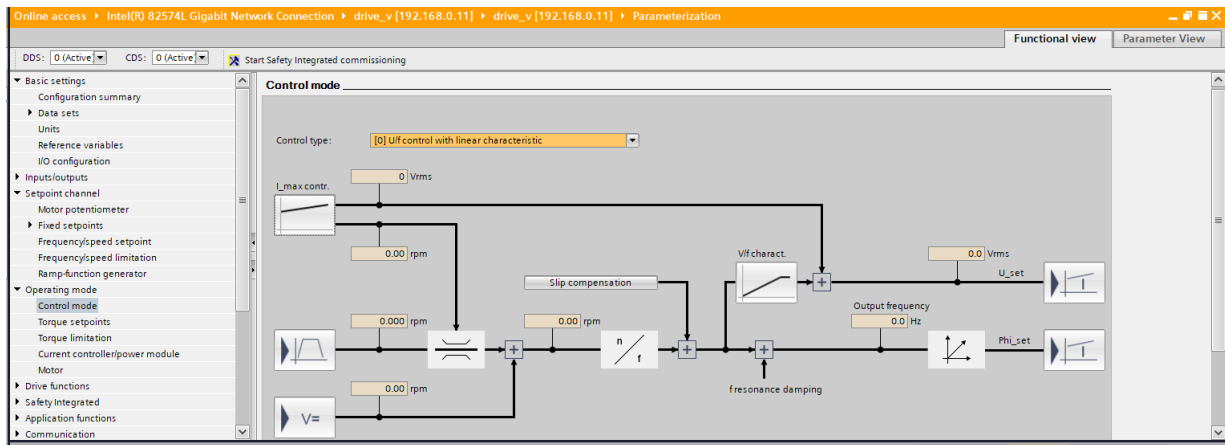


Fig. D.1: Configuración de Lazo de Control V/F STARTDRIVE

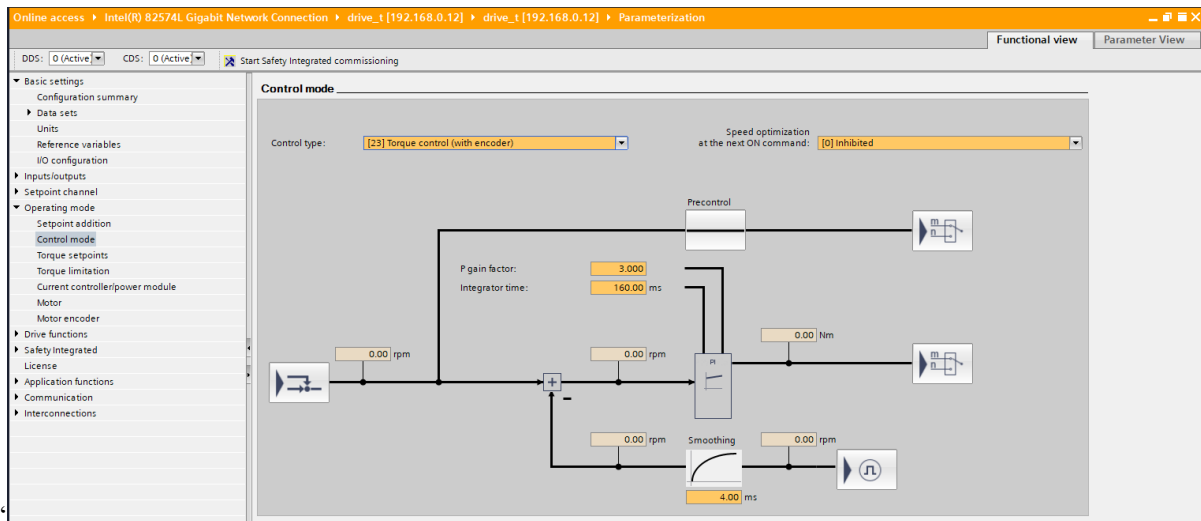


Fig. D.2: Configuración de Lazo de Control Torque (VC) STARTDRIVE

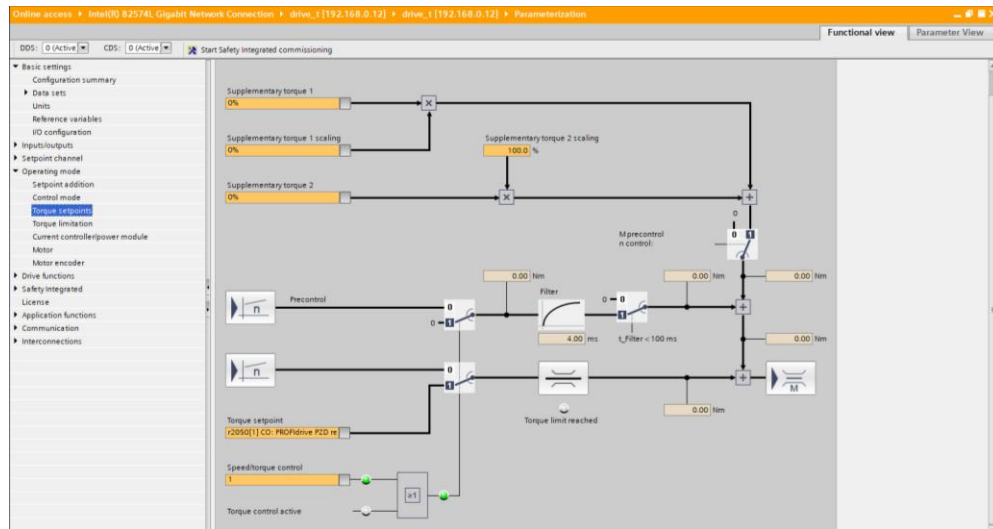


Fig. D.3: Activación de Lazo de Control Torque (VC) STARTDRIVE

Consecuentemente se configuran los Set Point en los paneles respectivos de cada accionamiento en la Fig. D.4.

Para el accionamiento con MCV se configura en el panel de velocidad. En este se fija el botón de selección de Set Point en SP Escalonado y se configura el Set Point escalonado con: 5 Escalones, 5 [s] de tiempo de escalón, 0[rpm] mínimo y 1370 [rpm] máximo.

Para el accionamiento con MCT se configura en el panel de Torque. En este se fija el botón de selección de Set Point en SP Fijo y se configura el Set Point con un valor de 1.29[Nm].

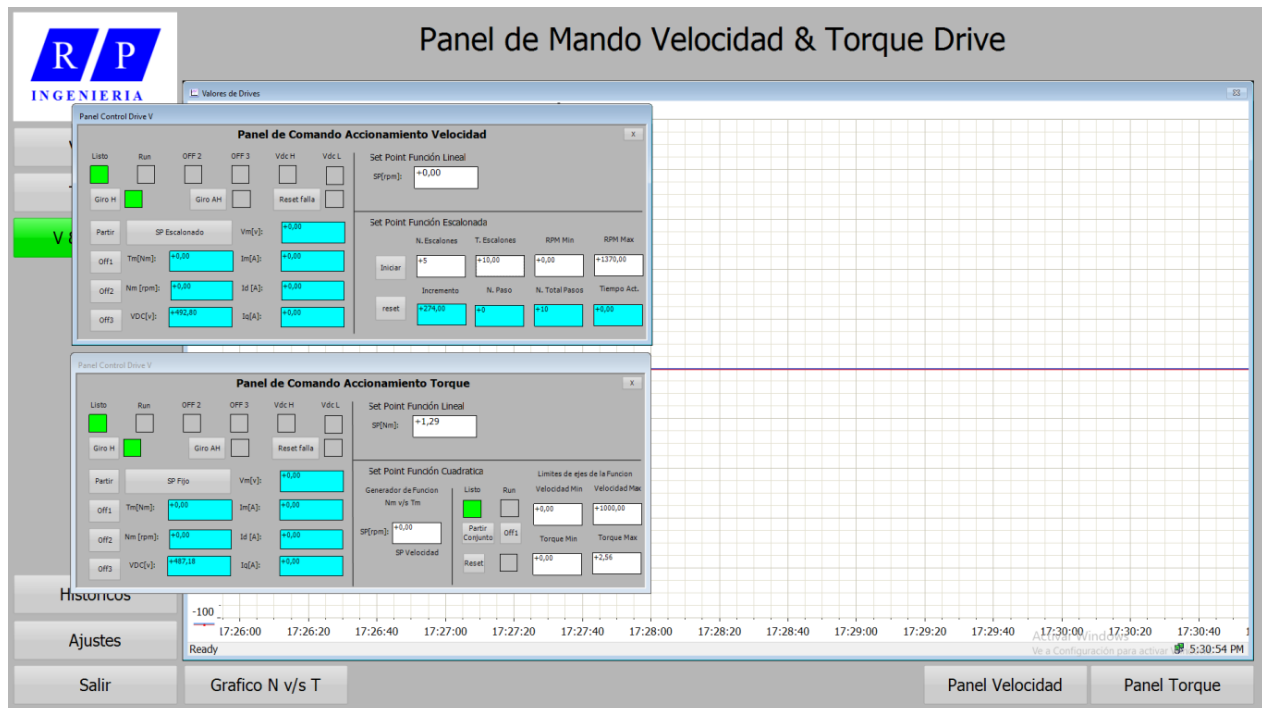


Fig. D.4: Configuración Prueba 1

• Prueba 2

Primeramente, se realiza la configuración de los lazos de control de cada accionamiento en STARDRIVE. Para el lazo de control SLCV del MCV se configura en la Fig. D.5 mediante el bit [20]. Para el lazo de control Torque (VC) del MCT se configura en la Fig. D.2 mediante el bit [23] y se activa colocando en 1 el Speed/torque Control en la Fig. D.3.

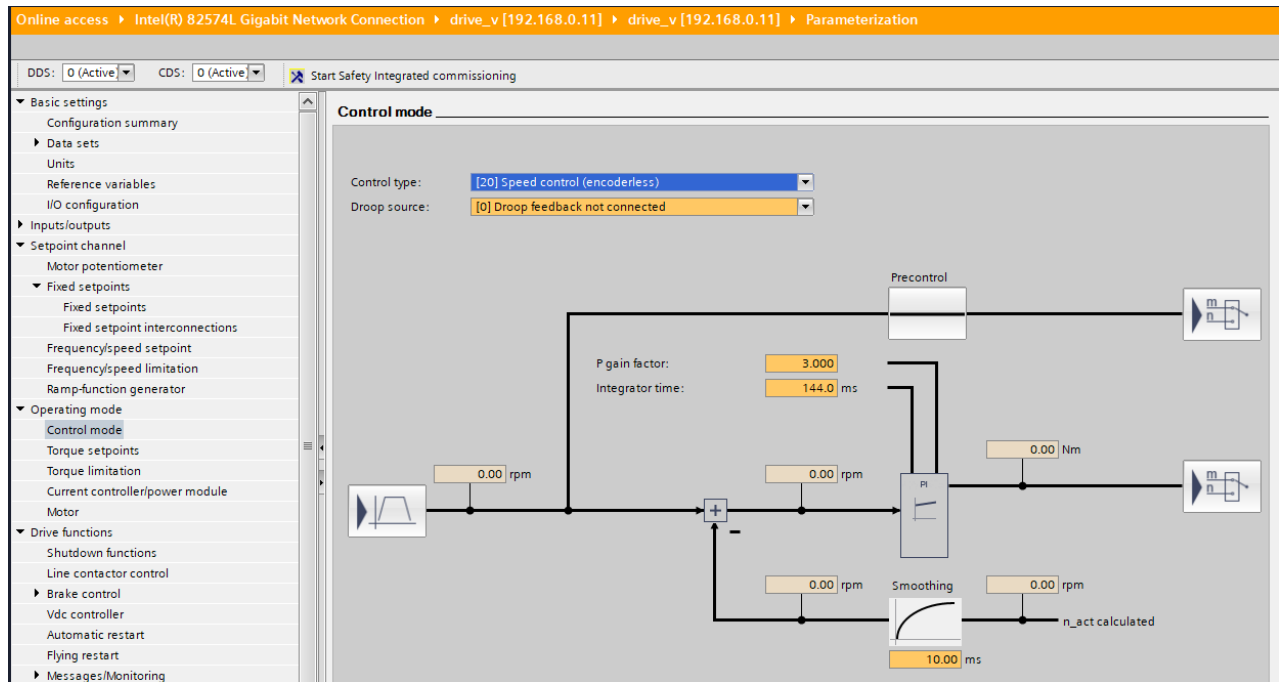


Fig. D.5: Configuración de Lazo de Control SLCV STARDRIVE

Consiguientemente se configuran los Set Point en los paneles respectivos de cada accionamiento en la Fig. D.6.

Para el accionamiento con MCV se configura en el panel de velocidad. En este se fija el botón de selección de Set Point en SP Escalonado y se configura el Set Point escalonado con: 5 Escalones, 5 [s] de tiempo de escalón, 0[rpm] mínimo y 1370 [rpm] máximo.

Para el accionamiento con MCT se configura en el panel de Torque. En este se fija el botón de selección de Set Point en SP Fijo y se configura el Set Point con un valor de 1.29[Nm].

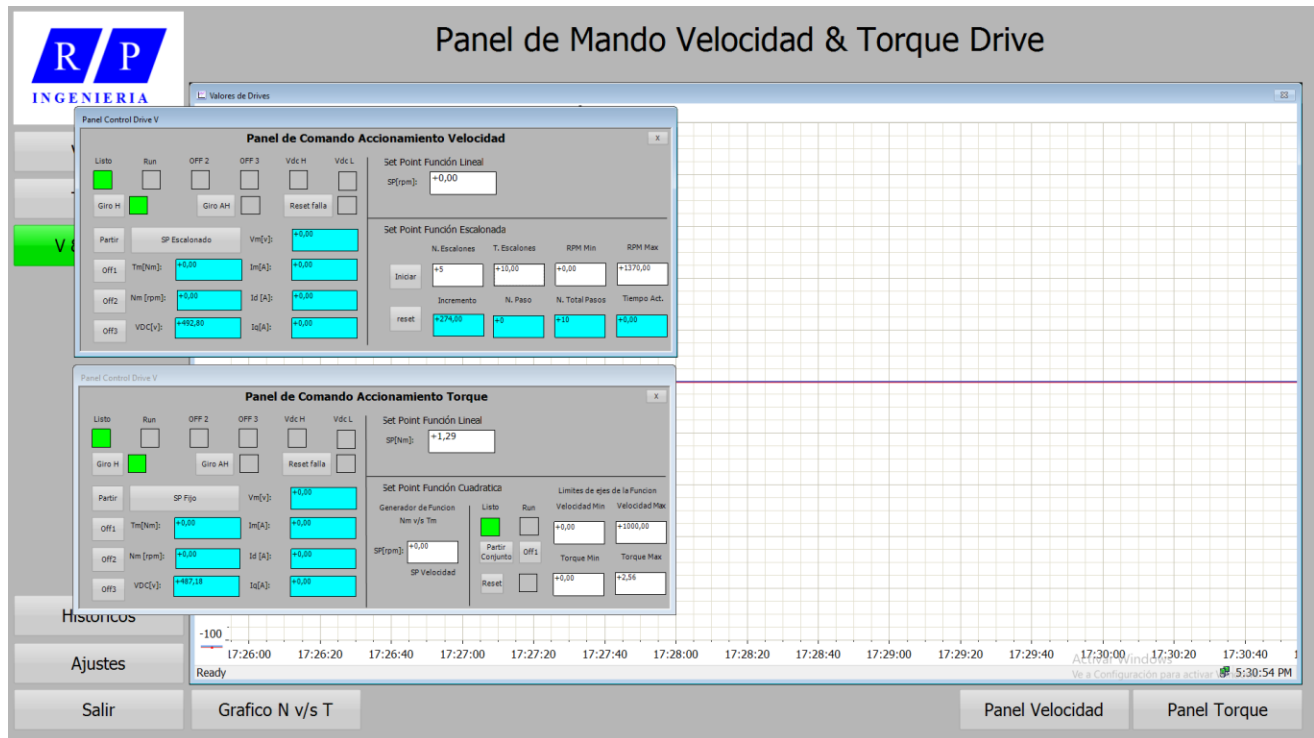


Fig. D.6: Configuración Prueba 2

- **Prueba 3**

Primeramente, se realiza la configuración de los lazos de control de cada accionamiento EN STARTDRIVE. Para el lazo de control V/F del MCV se configura en la Fig. D.1 mediante el bit [0]. Para el lazo de control Torque (VC) del MCT se configura en la Fig. D.2 mediante el bit [23] y se activa colocando en 1 el Speed/torque Control en la Fig D.3.

Consignientemente se configuran los Set Point en los paneles respectivos de cada accionamiento en la Fig. D.7.

Para el accionamiento con MCV se configura en el panel de velocidad. En este se fija el botón de selección de Set Point en SP Escalonado y se configura el Set Point escalonado con: 5 Escalones, 5 [s] de tiempo de escalón, 0[rpm] mínimo y 685 [rpm] máximo.

Para el accionamiento con MCT se configura en el panel de Torque. En este se fija el botón de selección de Set Point en SP Cuadrático.

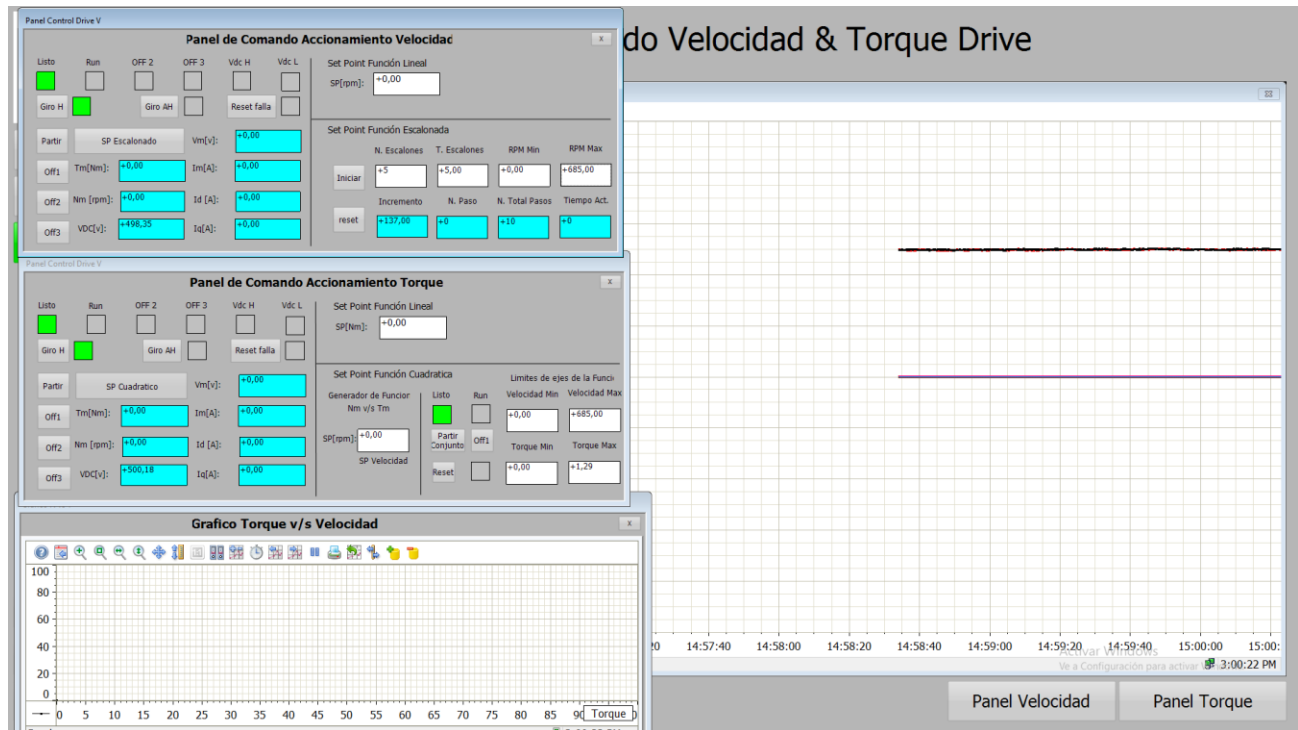


Fig. D.7: Configuración Prueba 3

- Prueba 4**

Primeramente, se realiza la configuración de los lazos de control de cada accionamiento EN STARTDRIVE. Para el lazo de control SLCV del MCV se configura en la Fig. D.5 mediante el bit [20]. Para el lazo de control Torque (VC) del MCT se configura en la Fig. D.2 mediante el bit [23] y se activa colocando en 1 el Speed/torque Control en la Fig. D.3.

Consiguientemente se configuran los Set Point en los paneles respectivos de cada accionamiento en la Fig. D.8.

Para el accionamiento con MCV se configura en el panel de velocidad. En este se fija el botón de selección de Set Point en SP Escalonado y se configura el Set Point escalonado con: 5 Escalones, 5 [s] de tiempo de escalón, 0[rpm] mínimo y 1370 [rpm] máximo.

Para el accionamiento con MCT se configura en el panel de Torque. En este se fija el botón de selección de Set Point en SP Fijo y se configura el Set Point con un valor de 1.29[Nm].

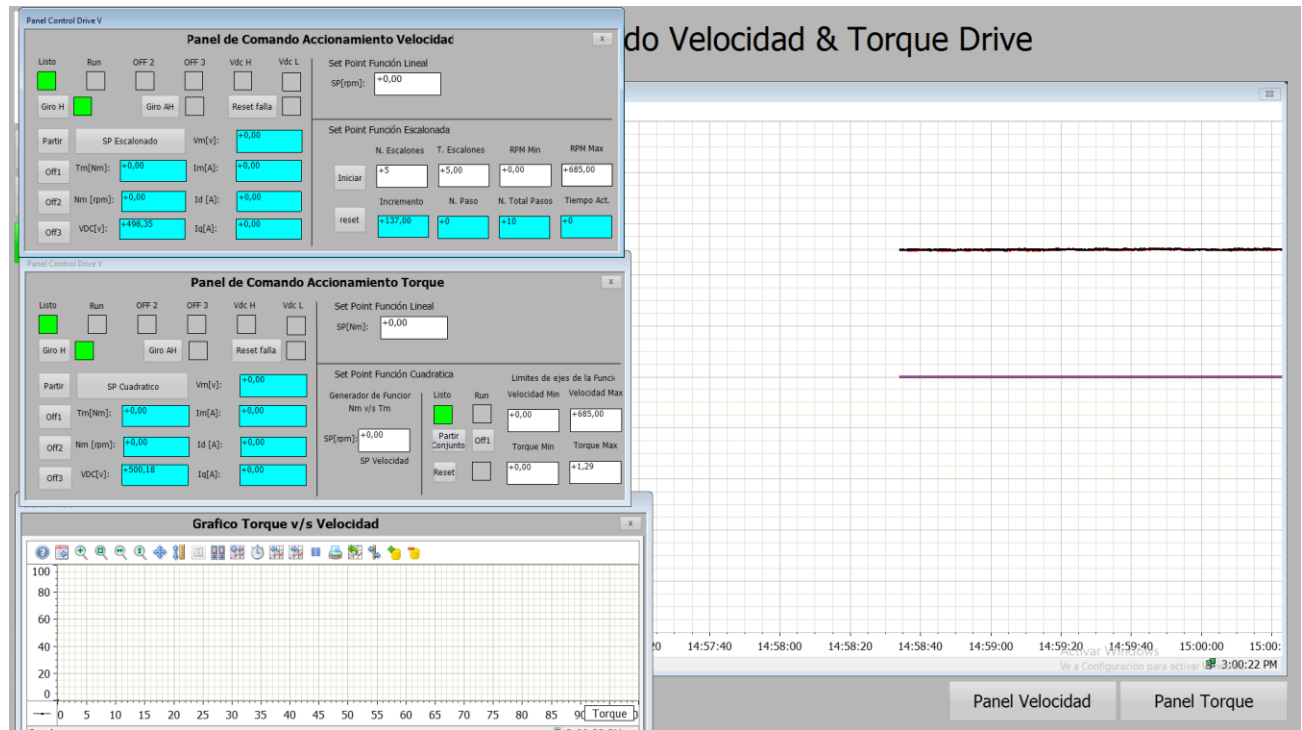


Fig. D.8: Configuración Prueba 4

Anexo D. Códigos

```
%Procesamiento Datos
%% 1. Configuración e Importación
nombreArchivo = 'Prueba2.csv';

opts = detectImportOptions(nombreArchivo);
opts.Delimiter = ',';
% Leemos todo como texto ('string') para procesarlo con seguridad
opts = setvartype(opts, 'string');
tablaTexto = readtable(nombreArchivo, opts);

nombresColumnas = tablaTexto.Properties.VariableNames;

%% 2. Procesamiento de datos
for i = 1:width(tablaTexto)
    columnaActual = tablaTexto{:, i};
    nombreVar = matlab.lang.makeValidName(nombresColumnas{i});

    % CONVERSIÓN DE DATOS (Reemplazando coma decimal por punto)
    % Como el tiempo ya está en segundos, se procesa igual que los demás datos numéricos
    columnaLimpia = strrep(columnaActual, ',', '.');
    datosFinales = str2double(columnaLimpia);

    fprintf('Variable guardada en Workspace: %s\n', nombreVar);

    % Guardamos la variable final en el Workspace
    assignin('base', nombreVar, datosFinales);
end
```

```

%Procesamiento Datos Desempeño
%% 1. Configuración de Archivos
nombreBase = 'Prueba';
indices = [1, 2, 3, 4]; % Los números de tus archivos (Prueba1, Prueba2...)

% Configuramos las opciones usando el primer archivo como referencia
archivoReferencia = sprintf('%s%d.csv', nombreBase, indices(1));
opts = detectImportOptions(archivoReferencia);
opts.Delimiter = ',';
opts = setvartype(opts, 'string'); % Leer como texto para manejar las comas decimales

%% 2. Bucle principal: Leer cada archivo (Prueba1, Prueba2...)
for k = 1:length(indices)
    % Construimos el nombre del archivo actual (ej: Prueba1.csv)
    nombreArchivo = sprintf('%s%d.csv', nombreBase, indices(k));

    if exist(nombreArchivo, 'file')
        fprintf('\n--- Procesando archivo: %s ---\n', nombreArchivo);

        % Leemos la tabla
        tablaTexto = readtable(nombreArchivo, opts);
        nombresColumnas = tablaTexto.Properties.VariableNames;

        %% 3. Procesamiento de columnas
        for i = 1:width(tablaTexto)
            columnaActual = tablaTexto{:, i};

            % Limpiamos el nombre original (ej: D_T_IdTime)
            nombreLimpio = matlab.lang.makeValidName(nombresColumnas{i});

            % CREAMOS EL NOMBRE FINAL AÑADIENDO EL NÚMERO (ej: D_T_IdTime_1)
            nombreVar = sprintf('%s_%d', nombreLimpio, indices(k));

            % PROCESAMIENTO NUMÉRICO DIRECTO
            % Reemplazamos coma por punto y convertimos a número (incluye el tiempo)
            columnaLimpia = strrep(columnaActual, ',', '.');
            datosFinales = str2double(columnaLimpia);

            fprintf(' Guardado: %s\n', nombreVar);

            % Asignamos al Workspace
            assignin('base', nombreVar, datosFinales);
        end
    else
        warning('El archivo %s no existe.', nombreArchivo);
    end
end
end

```

```

% Procesamiento De Datos en Conjunto (Repro)
%% 1. Configuración de Archivos
nombreBase = 'Prueba 2';
sufijos = ['a', 'b', 'c', 'd']; % Las letras que diferencian tus archivos

% Configuramos las opciones usando el primer archivo como referencia
archivoPrueba = sprintf('%s%c.csv', nombreBase, sufijos(1));
opts = detectImportOptions(archivoPrueba);
opts.Delimiter = ',';
opts = setvartype(opts, 'string'); % Leer como texto por seguridad

%% 2. Bucle principal: Leer cada archivo
for k = 1:length(sufijos)
    % Construimos el nombre del archivo actual (ej: Prueba 1a.csv)
    nombreArchivo = sprintf('%s%c.csv', nombreBase, sufijos(k));

    fprintf('\n--- Procesando archivo: %s ---\n', nombreArchivo);

    % Leemos la tabla
    tablaTexto = readtable(nombreArchivo, opts);
    nombresColumnas = tablaTexto.Properties.VariableNames;

    %% 3. Procesamiento de columnas del archivo actual
    for i = 1:width(tablaTexto)
        columnaActual = tablaTexto{:, i};

        % Limpiamos el nombre original (ej: D_T_IdTime)
        nombreLimpio = matlab.lang.makeValidName(nombresColumnas{i});

        % CREAMOS EL NOMBRE FINAL AÑADIENDO EL SUFIJO (ej: D_T_IdTime_a)
        nombreVar = sprintf('%s_%c', nombreLimpio, sufijos(k));

        % CONVERSIÓN DIRECTA A NÚMEROS (Toma el valor original del tiempo en
segundos)
        columnaLimpia = strep(columnaActual, ',', '.');
        datosFinales = str2double(columnaLimpia);

        fprintf(' Guardado: %s\n', nombreVar);

        % Asignamos al Workspace
        assignin('base', nombreVar, datosFinales);
    end
end
end

```

```
%% Graficos P1
```

```
figure(1)
```

```
plot(D_V_SPTIME,D_V_SPValueY,D_V_NrealTime,D_V_NrealValueY)
```

```
legend('SP_M_C_V','N_M_C_V','Location','northwest')
```

```
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([0 105])
```

```
xlim([0 65])
```

```
title('Set Point y Velocidad MCV')
```

```
grid
```

```
figure(2)
```

```
plot(D_T_SPTIME,D_T_SPValueY,D_T_TrealTime,D_T_TrealValueY)
```

```
legend('SP_M_C_T','T_M_C_T','Location','northwest')
```

```
ylabel('T[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-5 65])
```

```
xlim([0 65])
```

```
title('Set Point y Torque MCT')
```

```
grid
```

```
figure(3)
```

```
plot(D_V_TrealTime,D_V_TrealValueY,D_T_TrealTime,D_T_TrealValueY)
```

```
legend('T_M_C_V','T_M_C_T','Location','northwest')
```

```
ylabel('T[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-5 75])
```

```
xlim([0 65])
```

```
title('Torque MCV vs Torque MCT')
```

```
grid
```

```
figure(4)
```

```
plot(D_V_NrealTime,D_V_NrealValueY,D_T_NrealTime,D_T_NrealValueY*-1)
```

```
legend('N_M_C_V','-(N_M_C_T)','Location','northwest')
```

```
ylabel('N[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-100 105])
```

```
xlim([0 65])
```

```
title('Velocidad MCV vs Velocidad MCT')
```

```
grid
```

figure(5)

```
plot(D_V_ItotTime,D_V_ItotValueY,D_V_IqTime,D_V_IqValueY,D_V_IdTime,D_V_IdValueY)
```

```
    legend('I_t_o_t_a_l','I_q','I_d','Location','northwest')
    ylabel('I[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
    ylim([0 75])
    xlim([0 65])
    title('Corrientes MCV')
    grid
```

figure(6)

```
plot(D_T_ItotTime,D_T_ItotValueY,D_T_IqTime,D_T_IqValueY,D_T_IdTime,D_T_IdValueY)
```

```
    legend('I_t_o_t_a_l','I_q','I_d','Location','northwest')
    ylabel('I[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
    ylim([0 75])
    xlim([0 65])
    title('Corrientes MCT')
    grid
```

figure(7)

```
plot(D_V_VdcTime,D_V_VdcValueY,D_V_VmotTime,D_V_VmotValueY)
```

```
    legend('V_D_C','V_M','Location','northwest')
    ylabel('V[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
    ylim([0 65])
    xlim([0 65])
    title('Voltajes MCV')
    grid
```

figure(8)

```
plot(D_T_VdcTime,D_T_VdcValueY,D_T_VmotTime,D_T_VmotValueY)
```

```
    legend('V_D_C','V_M','Location','northwest')
    ylabel('V[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
    %ylim([-23 23])
    xlim([0 65])
    title('Voltajes MCT')
    grid
```

```
%% Graficos P2
```

```
figure(1)
```

```
plot(D_V_SPTIME,D_V_SPValueY,D_V_NrealTime,D_V_NrealValueY)
```

```
legend('SP_M_C_V','N_M_C_V','Location','northwest')
```

```
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([0 105])
```

```
xlim([0 65])
```

```
title('Set Point y Velocidad MCV')
```

```
grid
```

```
figure(2)
```

```
plot(D_T_SPTIME,D_T_SPValueY,D_T_TrealTime,D_T_TrealValueY)
```

```
legend('SP_M_C_T','T_M_C_T','Location','northwest')
```

```
ylabel('T[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-5 65])
```

```
xlim([0 65])
```

```
title('Set Point y Torque MCT')
```

```
grid
```

```
figure(3)
```

```
plot(D_V_TrealTime,D_V_TrealValueY,D_T_TrealTime,D_T_TrealValueY)
```

```
legend('T_M_C_V','T_M_C_T','Location','northwest')
```

```
ylabel('T[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-5 75])
```

```
xlim([0 65])
```

```
title('Torque MCV vs Torque MCT')
```

```
grid
```

```
figure(4)
```

```
plot(D_V_NrealTime,D_V_NrealValueY,D_T_NrealTime,D_T_NrealValueY*-1)
```

```
legend('N_M_C_V','-(N_M_C_T)','Location','northwest')
```

```
ylabel('N[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-100 105])
```

```
xlim([0 65])
```

```
title('Velocidad MCV vs Velocidad MCT')
```

```
grid
```

```

figure(5)
plot(D_V_ItotTime,D_V_ItotValueY,D_V_IqTime,D_V_IqValueY,D_V_IdTime,D_V_IdValueY)
legend('I_t_o_t_a_l','I_q','I_d','Location','northwest')
ylabel('I[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
ylim([0 70])
xlim([0 70])
title('Corrientes MCV')
grid

figure(6)
plot(D_T_ItotTime,D_T_ItotValueY,D_T_IqTime,D_T_IqValueY,D_T_IdTime,D_T_IdValueY)

legend('I_t_o_t_a_l','I_q','I_d','Location','northwest')
ylabel('I[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
ylim([0 70])
xlim([0 70])
title('Corrientes MCT')
grid

figure(7)

plot(D_V_VdcTime,D_V_VdcValueY,D_V_VmotTime,D_V_VmotValueY)

legend('V_D_C','V_M','Location','northwest')
ylabel('V[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
ylim([0 60])
xlim([0 70])
title('Voltajes MCV')
grid
figure(8)
plot(D_T_VdcTime,D_T_VdcValueY,D_T_VmotTime,D_T_VmotValueY)

legend('V_D_C','V_M','Location','northwest')
ylabel('V[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
ylim([0 60])
xlim([0 70])
title('Voltajes MCT')
grid
figure(9)
plot(D_V_NrealValueY,D_T_TrealValueY)

ylabel('Velocidad_M_C_V[%]'),xlabel('Torque_M_C_T[%]')
ylim([0 55])
xlim([0 55])
title('Velocidad v/s Torque')
grid

```

```
%% Graficos P3
```

```
figure(1)
```

```
plot(D_V_SPTime,D_V_SPValueY,D_V_NrealTime,D_V_NrealValueY)
```

```
legend('SP_M_C_V','N_m','Location','northwest')
```

```
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([0 52])
```

```
xlim([0 70])
```

```
title('Set Point y Velocidad MCV')
```

```
grid
```

```
figure(2)
```

```
plot(D_T_SPTime,D_T_SPValueY,D_T_TrealTime,D_T_TrealValueY)
```

```
legend('SP_M_C_T','T_M_C_T','Location','northwest')
```

```
ylabel('T[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-3 55])
```

```
xlim([0 70])
```

```
title('Set Point y Torque MCT')
```

```
grid
```

```
figure(3)
```

```
plot(D_V_TrealTime,D_V_TrealValueY,D_T_TrealTime,D_T_TrealValueY)
```

```
legend('T_M_C_V','T_M_C_T','Location','northwest')
```

```
ylabel('T[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-3 70])
```

```
xlim([0 70])
```

```
title('Torque MCV vs Torque MCT')
```

```
grid
```

```
figure(4)
```

```
plot(D_V_NrealTime,D_V_NrealValueY,D_T_NrealTime,D_T_NrealValueY)
```

```
legend('N_M_C_V','N_M_C_T','Location','northwest')
```

```
ylabel('N[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-50 55])
```

```
xlim([0 70])
```

```
title('Velocidad MCV vs Velocidad MCT')
```

```
grid
```

```
figure(5)
plot(D_V_ItotTime,D_V_ItotValueY,D_V_IqTime,D_V_IqValueY,D_V_IdTime,D_V_IdValueY)
```

```
    legend('I_t_o_t_a_l','I_q','I_d','Location','northwest')
    ylabel('I[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
    ylim([0 80])
    xlim([0 70])
    title('Corrientes MCV')
    grid
```

```
figure(6)
plot(D_T_ItotTime,D_T_ItotValueY,D_T_IqTime,D_T_IqValueY,D_T_IdTime,D_T_IdValueY)
```

```
    legend('I_t_o_t_a_l','I_q','I_d','Location','northwest')
    ylabel('I[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
    ylim([-1 70])
    xlim([0 70])
    title('Corrientes MCT')
    grid
```

```
figure(7)
plot(D_V_VdcTime,D_V_VdcValueY,D_V_VmotTime,D_V_VmotValueY)
```

```
    legend('V_D_C','V_M','Location','northwest')
    ylabel('V[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
    ylim([0 60])
    xlim([0 70])
    title('Voltajes MCV')
    grid
```

```
figure(8)
plot(D_T_VdcTime,D_T_VdcValueY,D_T_VmotTime,D_T_VmotValueY)
```

```
    legend('V_D_C','V_M','Location','northwest')
    ylabel('V[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
    ylim([0 60])
    xlim([0 70])
    title('Voltajes MCT')
    grid
```

```
figure(9)
plot(D_V_NrealValueY,D_T_TrealValueY)
```

```
    ylabel('Velocidad_M_C_V[%]'),xlabel('Torque_M_C_T[%]')
    ylim([0 55])
    xlim([0 55])
    title('Velocidad v/s Torque')
    grid
```

```
%% Graficos P4
```

```
figure(1)
```

```
plot(D_V_SPTTime,D_V_SPValueY,D_V_NrealTime,D_V_NrealValueY)
```

```
legend('SP_M_C_V','N_m','Location','northwest')
```

```
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([0 52])
```

```
xlim([0 70])
```

```
title('Set Point y Velocidad MCV')
```

```
grid
```

```
figure(2)
```

```
plot(D_T_SPTTime,D_T_SPValueY,D_T_TrealTime,D_T_TrealValueY)
```

```
legend('SP_M_C_T','T_M_C_T','Location','northwest')
```

```
ylabel('T[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-3 55])
```

```
xlim([0 70])
```

```
title('Set Point y Torque MCT')
```

```
grid
```

```
figure(3)
```

```
plot(D_V_TrealTime,D_V_TrealValueY,D_T_TrealTime,D_T_TrealValueY)
```

```
legend('T_M_C_V','T_M_C_T','Location','northwest')
```

```
ylabel('T[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-3 70])
```

```
xlim([0 70])
```

```
title('Torque MCV vs Torque MCT')
```

```
grid
```

```
figure(4)
```

```
plot(D_V_NrealTime,D_V_NrealValueY,D_T_NrealTime,D_T_NrealValueY)
```

```
legend('N_M_C_V','N_M_C_T','Location','northwest')
```

```
ylabel('N[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([-50 55])
```

```
xlim([0 70])
```

```
title('Velocidad MCV vs Velocidad MCT')
```

```
grid
```

```

figure(5)
plot(D_V_ItotTime,D_V_ItotValueY,D_V_IqTime,D_V_IqValueY,D_V_IdTime,D_V_IdValueY)

    legend('I_t o_t a l','I_q','I_d','Location','northwest')
    ylabel('I[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
    ylim([0 80])
    xlim([0 70])
    title('Corrientes MCV')
    grid

    figure(6)
    plot(D_T_ItotTime,D_T_ItotValueY,D_T_IqTime,D_T_IqValueY,D_T_IdTime,D_T_IdValueY)

        legend('I_t o_t a l','I_q','I_d','Location','northwest')
        ylabel('I[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
        ylim([-1 70])
        xlim([0 70])
        title('Corrientes MCT')
        grid

        figure(7)
        plot(D_V_VdcTime,D_V_VdcValueY,D_V_VmotTime,D_V_VmotValueY)

            legend('V_D_C','V_M','Location','northwest')
            ylabel('V[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
            ylim([0 60])
            xlim([0 70])
            title('Voltajes MCV')
            grid

            figure(8)
            plot(D_T_VdcTime,D_T_VdcValueY,D_T_VmotTime,D_T_VmotValueY)

                legend('V_D_C','V_M','Location','northwest')
                ylabel('V[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
                ylim([0 60])
                xlim([0 70])
                title('Voltajes MCT')
                grid

                figure(9)
                plot(D_V_NrealValueY,D_T_TrealValueY)

                    ylabel('Velocidad_M_C_V[%]'),xlabel('Torque_M_C_T[%]')
                    ylim([0 55])
                    xlim([0 55])
                    title('Velocidad v/s Torque')
                    grid

```

```
%% Graficos Desempeno
```

```
figure(1)
```

```
hold on
```

```
stairs(D_V_SPTTime_1, D_V_SPValueY_1, 'LineWidth', 1.5)
```

```
valor_referencia = 20; %
```

```
margen = 1;
```

```
yline(valor_referencia + margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.5, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
yline(valor_referencia - margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.5, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
plot(D_V_NrealTime_1, D_V_NrealValueY_1, 'LineWidth', 1.5)
```

```
plot(D_V_NrealTime_2, D_V_NrealValueY_2, 'LineWidth', 1.5)
```

```
legend('SP_M_C_V','MCV_V/_F','MCV_S_L_V_C','Location','northwest')
```

```
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([0 25])
```

```
xlim([9 11.5])
```

```
title('Set Point y Velocidad MCV')
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```
%% Graficos Desempeno
```

```
figure(2)
```

```
hold on
```

```
stairs(D_T_SPTTime_2, D_T_SPValueY_2, 'LineWidth', 1.5)
```

```
valor_referencia = 50; %
```

```
margen = 2.5;
```

```
yline(valor_referencia + margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.2, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
yline(valor_referencia - margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.2, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
plot(D_T_TrealTime_2, D_T_TrealValueY_2, 'LineWidth', 1.5)
```

```
legend('SP_M_C_T','MCT_T_C','Location','northwest')
```

```
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([0 70])
```

```
xlim([8 11.5])
```

```
title('Set Point y Torque MCT')
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```
%% Graficos Desempeno
```

```
figure(1)
```

```
hold on
```

```
stairs(D_V_SPTTime_1, D_V_SPValueY_1, 'LineWidth', 1.5)
```

```
valor_referencia = 20; %
```

```
margen = 1;
```

```
yline(valor_referencia + margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.5, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
yline(valor_referencia - margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.5, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
plot(D_V_NrealTime_1, D_V_NrealValueY_1, 'LineWidth', 1.5)
```

```
plot(D_V_NrealTime_2, D_V_NrealValueY_2, 'LineWidth', 1.5)
```

```
legend('SP_M_C_V','MCV_V/_F','MCV_S_L_V_C','Location','northwest')
```

```
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([0 25])
```

```
xlim([9 11.5])
```

```
title('Set Point y Velocidad MCV')
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```
%% Graficos Desempeno
```

```
figure(2)
```

```
hold on
```

```
stairs(D_T_SPTTime_2, D_T_SPValueY_2, 'LineWidth', 1.5)
```

```
valor_referencia = 50; %
```

```
margen = 2.5;
```

```
yline(valor_referencia + margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.2, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
yline(valor_referencia - margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.2, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
plot(D_T_TrealTime_2, D_T_TrealValueY_2, 'LineWidth', 1.5)
```

```
legend('SP_M_C_T','MCT_T_C','Location','northwest')
```

```
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([0 70])
```

```
xlim([8 11.5])
```

```
title('Set Point y Torque MCT')
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```
%% Graficos Desempeno
```

```
figure(1)
```

```
hold on
```

```
stairs(D_V_SPTTime_1, D_V_SPValueY_1, 'LineWidth', 1.5)
```

```
valor_referencia = 20; %
```

```
margen = 1;
```

```
yline(valor_referencia + margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.5, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
yline(valor_referencia - margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.5, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
plot(D_V_NrealTime_1, D_V_NrealValueY_1, 'LineWidth', 1.5)
```

```
plot(D_V_NrealTime_2, D_V_NrealValueY_2, 'LineWidth', 1.5)
```

```
legend('SP_M_C_V','MCV_V/_F','MCV_S_L_V_C','Location','northwest')
```

```
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([0 25])
```

```
xlim([9 11.5])
```

```
title('Set Point y Velocidad MCV')
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```
%% Graficos Desempeno
```

```
figure(2)
```

```
hold on
```

```
stairs(D_T_SPTTime_2, D_T_SPValueY_2, 'LineWidth', 1.5)
```

```
valor_referencia = 50; %
```

```
margen = 2.5;
```

```
yline(valor_referencia + margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.2, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
yline(valor_referencia - margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.2, 'HandleVisibility', 'off');
```

```
plot(D_T_TrealTime_2, D_T_TrealValueY_2, 'LineWidth', 1.5)
```

```
legend('SP_M_C_T','MCT_T_C','Location','northwest')
```

```
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylim([0 70])
```

```
xlim([8 11.5])
```

```
title('Set Point y Torque MCT')
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```

%%

figure(3)
hold on
stairs(D_T_SPTTime_a,D_T_SPValueY_a,'LineWidth', 1.5)

plot(D_T_TrealTime_a,D_T_TrealValueY_a,D_T_TrealTime_b,D_T_TrealValueY_b,D_T_TrealTime_c,D_T_TrealValueY_c,D_T_TrealTime_d,D_T_TrealValueY_d, 'LineWidth', 1.5)

valor_referencia = 50; %
margen = 2.5;
yline(valor_referencia + margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.2, 'HandleVisibility', 'off');
yline(valor_referencia - margen, '--', 'Color', 'black', 'LineWidth', 1.2, 'HandleVisibility', 'off');

legend('SP_M_C_T','P2_a','P2_b','P2_c','P2_d','Location','northwest')
ylabel('N_m[%]'),xlabel('Tiempo [s]')
ylim([0 70])
xlim([9 11.5])
title('Reproducibilidad MCT_T_C')
grid
hold off

```

Anexo E. Detalle Técnico

Listado de Componentes

- SITOP PSU100L/1AC/24VDC/5A**

El SITOP PSU100L de la Fig. F.1 es una fuente de alimentación industrial de Siemens que convierte la tensión de red AC (110–230 [V]) en 24 [V] DC estables, en su interior cuenta con un transformador y un rectificador para realizar esta conversión de energía [24].



Fig. E.1: SITOP PSU100L

TABLA E.1 Datos de SITOP PSU100L.

Parámetro	Valor
Tipo de Red de Suministro	Monofásica Alterna
Tensión de Alimentación	120/230 V
Frecuencia de Alimentación	50/60 Hz
Tensión de Salida	24 V
Ripple de Salida	150 mV
Eficiencia	86 %

- PLC Siemens S7-1200 CPU 1212C DC/DC/DC**

El PLC Siemens S7-1200 CPU 1212C de la Fig. E.2 cumple el rol de controlador central en la plataforma experimental, administrando el intercambio de datos vía PROFINET con los variadores G120, ejecutando la lógica para perfiles de par y velocidad, y coordinando el monitoreo en el HMI [18].



Fig. E.2: S7-1200

- **Siemens G120**

Los SINAMICS G120 de la Fig E.3 son variadores de frecuencia modulares formados por un Power Module (PM) en conjunto de un Control Unit (CU).



Fig. E.3: G120

- **Power Module PM240 (6SL3224-0BE13-7UA0)**

El PM240 de la Fig. E.4 contiene un circuito que se compone de un rectificador, un DC-LINK e inversor. Este a su vez, cuenta con un circuito de frenado situado entre el DC-LINK y el inversor de salida. Este circuito consume la energía que proviene desde el motor, conduciéndola mediante un chopper hacia una resistencia de frenado [4].



Fig. E.4: PM240

- **Control Unit CU240E-2 PN**

La CU240E-2 de la Fig. E.5 controlara tanto el variador de frecuencia dependiendo del tipo de regulación establecido, como la comunicación con el PLC S7-1200 mediante intercambio de telegramas cíclicos con palabras de datos de proceso PZD de 16 bits [5].



Fig. E.5: CU240E-2 PN

- **Control Unit CU250S-2 PN**

La CU250S-2 PN de la Fig. E.6 controlara tanto el variador de frecuencia dependiendo del tipo de regulación establecido, como la comunicación con el PLC S7-1200 mediante intercambio de telegramas cíclicos con palabras de datos de proceso PZD de 16 bits [6].



Fig. E.6: CU250S-2 PN

- **Motor de Inducción (1LA7073-4AB10)**

El motor de inducción jaula de ardilla de la Fig. E.7 es una máquina que convierte energía eléctrica en energía mecánica mediante inducción electromagnética, el campo magnético giratorio del estator “corta” las barras del rotor, generando un flujo variable que induce una corriente en el rotor. Esa corriente crea un campo que tiende a seguir al campo del estator, produciendo el giro del rotor [9].



Fig. E.7: Motor de Inducción

- **Acoplamiento de Estrella EKC**

El acople de la Fig E.8 que proporcionó la empresa utiliza elastómero del tipo estrella son acoplamientos flexibles a la torsión y son adecuados para compensar grandes desalineaciones axiales, radiales y angulares, así como para amortiguar vibraciones y picos de par [2].



Fig. E.8: Acople Flexible de Eje

- **Encoder E40S**

El encoder E40s de la Fig. E.9 mide la posición angular y el sentido de giro del eje del motor, generando pulsos eléctricos proporcionales al movimiento. Mediante los canales A y B (desfasado 90° respecto a A) se genera una serie de pulsos cuadrados cuando el eje gira, en la comparación de los canales A y B se puede obtener el sentido de giro (Primer canal que detecta el pulso eléctrico), además con el canal Z se emite un solo pulso por vuelta del eje, indicando la posición angular exacta [10].



Fig. E.9: E40S

TABLA 2.2 Datos de Encoder.

Parámetro	Valor
Tipo	Incremental
Resolución (PPR)	1024
Fases de Salida	A, B, Z

- **Transformador de Alimentación**

El transformador de control de la Fig. E.10 es un transformador monofásico. Su función principal es adaptar la energía eléctrica disponible en la red para que sea compatible con los equipos que se van a conectar, transfiriendo la energía por inducción electromagnética, mediante los devanados del lado primario y secundario [9].

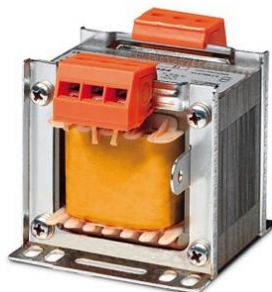


Fig. E.10: Transformador de alimentación 300VA

TABLA 2.3 Datos Transformador de Alimentación.

Parámetro	Valor
Potencia	300 VA
Voltaje Lado Primario	110-220 V
Voltaje Lado Secundario	220-380 V
Grado de protección	IP 20

- Resistencia de Frenado**

La resistencia de frenado MLFB 6SE6400 de la Fig. E.11 es una resistencia de frenado diseñada específicamente para los variadores de frecuencia MICROMASTER 440 y SINAMICS G120 de Siemens [9].



Fig. E.11: Resistencia de Frenado

TABLA E.4 Datos Resistencia de Frenado.

Parámetro	Valor
Código Modelo	4BD11-0AA0
Tamaño	A
Resistencia	390±10% Ω
Peak Power 5% Duty Cycle	2000 W
Máxima Potencia de Inversor (PM)	1.5 kW

- **Disyuntor**

El disyuntor de la Fig. E.12 es un interruptor magnetotérmico diseñado para proteger circuitos eléctricos residenciales y terciarios. Su mecanismo dual combina un disparador térmico que actúa ante sobrecargas sostenidas para evitar el calentamiento del cableado, y un disparador magnético que corta instantáneamente el suministro ante cortocircuitos [10].



Fig. E.12: Disyuntor DIN Series

TABLA E.5 Datos Disyuntor DIN Series.

Parámetro	Valor
Polos	2
Tipo de Curva	B
Corriente Nominal	6 A

- **Monitor**

El LG 22MP410 de la Fig. E.13 lanzado el año 2021 es un monitor con un panel del tipo VA y una tasa de refresco máxima de 75[hz][22].



Fig. E.13: Monitor LG

TABLA E.6 Datos Monitor.

Parámetro	Valor
Pulgadas	21.45 "
Resolución	1920x1080
Tiempo de repuesta	5 ms

- **Switch D-Link DGS-108**

El D-Link DGS-108 de la Fig. E.14 es un switch de sobremesa no gestionado que proporciona múltiples puntos de conexión para transferencias de datos. Su diseño Plug & Play permite una instalación inmediata sin necesidad de configuración de software, además, cuenta con indicadores LED en cada puerto que comunican la velocidad de transferencia en operación mediante su color [23].

**Fig. E.14: Switch de Comunicación**

Montaje e Identificación de Componentes de la Plataforma Experimental

Tanto el PLC (con su fuente) y los G120 fueron facilitados por la empresa dentro de maletas, ya que están destinados para capacitaciones que realiza empresa.

En la integración de componentes primero se realizó una identificación de las conexiones eléctricas de las maletas, luego la implementación del conjunto de motores y finalmente la integración de conexión de comunicación del conjunto.

La maleta que contiene el PLC en conjunto del SITOP se visualiza en la Fig. E.15. De esta maleta nos centraremos en el diferencial de 1P, el SITOP que alimenta el PLC S7-1200 que se visualizan en la tanto esquina izquierda superior como en el centro de la maleta, ya que estos serán los componentes de esta maleta utilizados.



Fig. E.15: S7-1200 TK1

En el Fig. E.16 se visualiza la conexión del disyuntor con el borne L1, en el cual el retorno y la tierra van conectadas directamente a la alimentación de la maleta, a la salida del SITOP + y - está conectado en los bornes superiores del S7-1200 con conexión directa a tierra en la alimentación de la maleta.

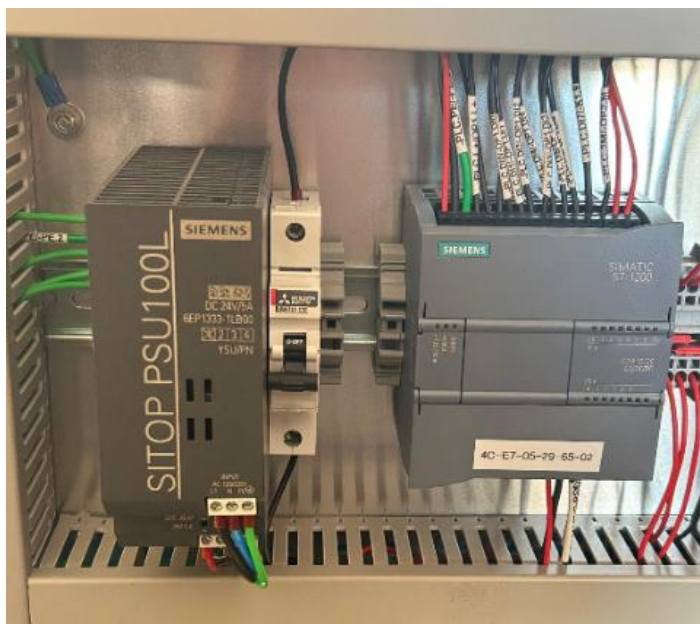


Fig. E.16: Conexión S7-1200

Las maletas que contienen los convertidores G120 se visualizan en la Fig. E.17, el SINAMICS G-120 01 incluye el diferencial de 2P, un riel de conexión con la salida del PM240, el transformador

(dentro de una caja a la izquierda), la resistencia de frenado en el centro y el G120 con una unidad de control CU250S-2, por lo tanto este convertidor es el encargado del control de torque, por el lado del SINAMICS G-120 02 incluye los mismo, pero con un CU240P-2 que se encargara del control de velocidad.



(b)

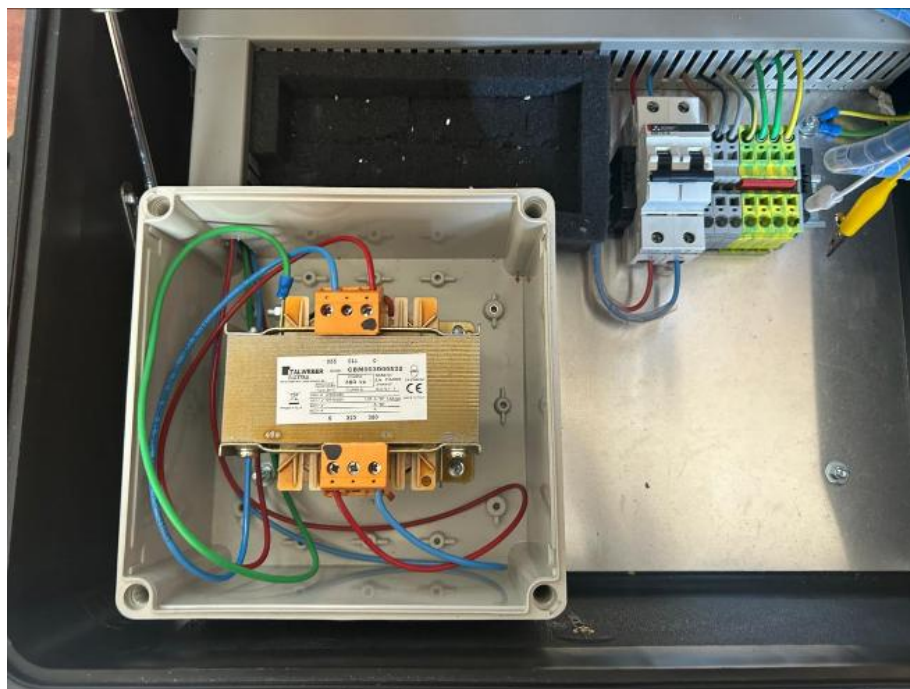


(b)

Fig. E.17: Convertidores Facilitados por la Empresa

(b) G120 01 (b) G120 02

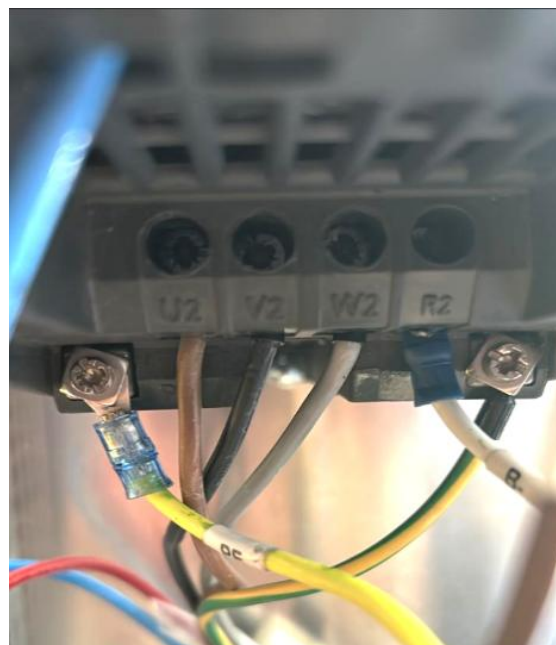
En la Fig. 2.18 se visualiza la conexión de alimentación de ambos G120. En esta se conecta el disyuntor de 2P al lado primario del transformador en los bornes de 0[V] y 220[V], este a su vez tiene conexión directa con la tierra de alimentación de la maleta. Desde el lado secundario se conectan los bornes de 0[V] y 380[V] a los bornes delanteros del PM-240 L y N, que a su vez contiene la conexión mediante el borne R1 con la resistencia de frenado. En los bornes traseros del PM se sitúa la conexión de la salida del inversor que se enlaza al riel que se sitúa al costado del disyuntor, además se visualiza la conexión R2 con la resistencia de frenado. También se visualiza las conexiones de tierra en la que una va conectada al motor y la otra a la tierra de alimentación de la maleta, tal como se ilustra en el diagrama de fuerza de la Fig. 2.44. De esta manera se identificó la misma conexión en las maletas G120 01 y G120 02.



(a)



(b)

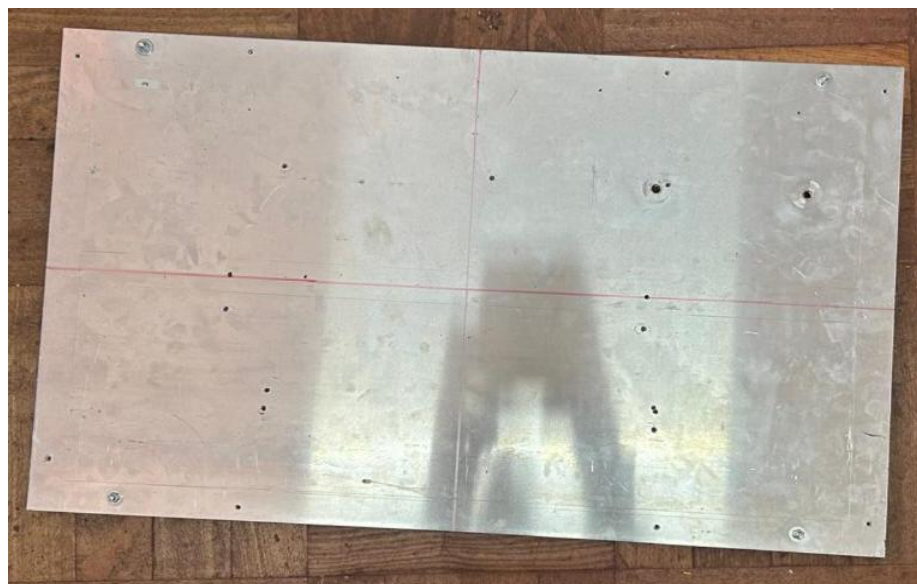


(c)

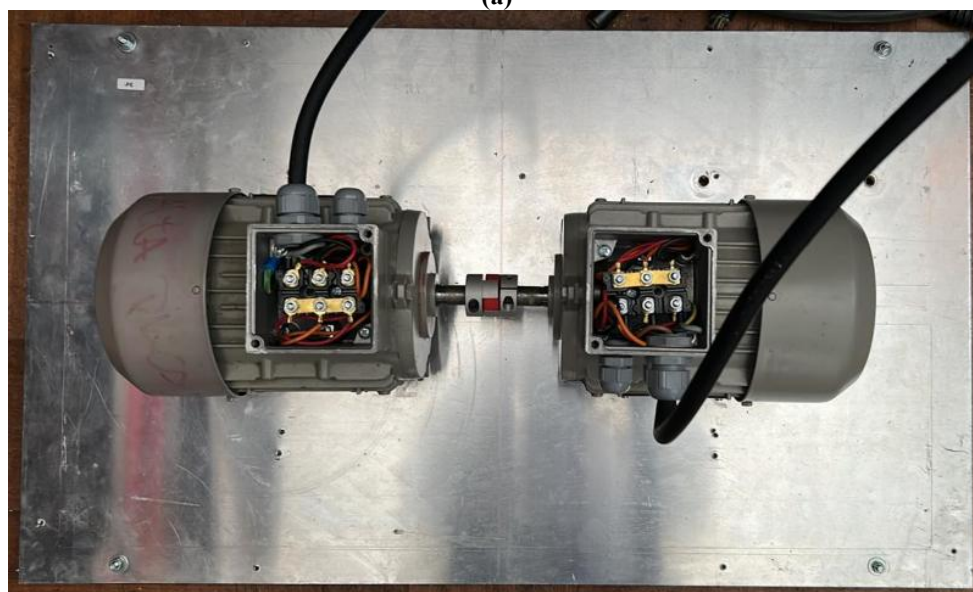
Fig. E.18: Conexión de los Power Module

(a) Conexión disyuntor-transformador (b) Bornes Delanteros PM-240 (c) Bornes Traseros PM-240

Por el lado del conjunto de motores, estos se montaron sobre una tabla en la que se atornilló una placa de aluminio. Se dibujó dos líneas marcando el centro y se perforaron orificios para acoplar los motores con el acople de la Fig. E.8, además conecta los motores en estrella.



(a)



(b)

Fig. E.19: Acople de Motores

(a) Placa (b) Acople y Conexión Motores

El Encoder de la Fig. E.9 se monta sobre el motor de la derecha de la Fig. E.19 el cual a su vez ira conectado al SINAMICS G-120 01, dejando al motor de la izquierda conectándose al SINAMICS G-120 02, visualizándose las conexiones a cada maleta en la Fig. E.21.

En la Fig. E.20 se visualiza el montaje del Encoder sobre el motor y el CU. En el CU250S-2 se conecta el cable café de alimentación que va al pin 33, el azul de referencia de potencial va al pin 79 en un puente conectado al cable SHIELD (protector de interferencias magnéticas), el cable negro del canal A al pin 70, el cable blanco del canal B al pin 72 y el cable naranja del canal Z al pin 74.



(a)



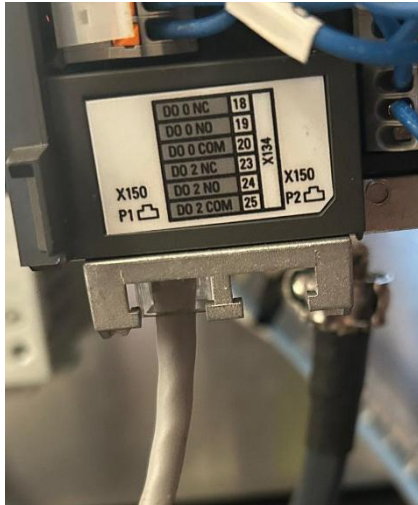
(b)

Fig. E.20: Montaje Encoder

(a) Montaje sobre motor (b) Conexión CU250S-2

**Fig. E.21: Conexión de motores a G120 01 y G120 02**

El montaje de conexión PROFINET, se realizó mediante la conexión de cada CU en el puerto X150 de la visualiza en la Fig. E.22. Por el lado del PLC y del HMI, esta conexión se realizó por el puerto X1P1 de la Fig. E.16 que se ubica por la parte inferior del PLC y el conector Ethernet que se sitúa al costado derecho del PC, como se visualiza en la Fig. E.23.



(a)



(b)

Fig. E.22: Conexión de Comunicación en las Unidades de Control

(a) CU240P-2 (b) CU250S-2



(a)



(b)

Fig. E.23: Conexión de Comunicación

(a) PLC S7-1200 (b) HMI

Por último, se montó la topología en estrella sobre el Switch D-Link DGS-108 de la Fig. E.14 como se visualiza en la Fig. E.24. En el primer puerto va conectado el PLC, en el segundo el CU240P-2, en el tercero el CU250S-2 y en el cuarto el HMI. Gracias a las luces LED se puede identificar que tanto las CU's como el PLC tiene una velocidad de transferencia de 10/100 [Mbps], por otro lado, el HMI presenta una velocidad de transferencia de 1000[Mbps].



Fig. 2.24: Conexión Switch

En la Fig. E.25 se ilustra el equipo experimental montado. En la parte superior izquierda se encuentra el PLC, a su costado el Switch y el HMI que se visualiza mediante el monitor de la Fig. E.13, por la parte inferior se visualiza los G120 conectados a los motores, con el G120 de la izquierda con el CU240P-2 y el de la derecha con el CU250S-2 con conexión al Encoder.



Fig. E.25: Equipo Experimental

Acoplamiento de los Motores

El acople de motores se hace mediante acoplamientos de eje. Estos son dispositivos mecánicos que se utilizan para conectar dos ejes para transferir potencia desde un eje impulsor a un eje impulsado [1].

- **Tipos de Acoplamiento**

Existen diferentes tipos de acoplamientos de eje para diferentes condiciones de funcionamiento [1]. Se presentan los principales tipos de acoplamiento:

Acoplamientos de Brida

Este tipo de acople consta de dos bridas separadas que se unen mediante pernos y tuercas. Cada eje está conectado a su respectivo cubo de brida. Los ejes se alinean a través de una sección proyectada en una brida y una porción empotrada correspondiente en la otra [1], vista en la Fig. E.26.



Fig. E.26: Acople de Brida

Acoplamientos de Engranajes

Este tipo de acople es una variación del acoplamiento de brida. En los acoplamientos de engranajes, la brida y su cubo son partes separadas, con dientes de engranaje en el diámetro externo del cubo que engranan con los dientes de engranaje internos de la brida. Esto crea una relación de transmisión de 1:1, lo que permite la transmisión de alto torque a altas velocidades [1], vista en la Fig. E.27.



Fig. E.27: Acople de Engranajes

Acoplamiento de Rejilla

Este tipo de acople consta de dos cubos con ranuras radiales que están conectados mediante una tira serpenteante de acero para resortes. Este diseño permite flexibilidad torsional, lo que los hace adecuados para una amplia gama de torsión, velocidad y desalineaciones [1], vista en la Fig. E.28.



Fig. E.28: Acople de Rejilla

Acoplamiento de Neumáticos

Este tipo de acople utilizan un elemento de caucho, poliuretano o poliéter para transmitir torsión bajo esfuerzo cortante. Pueden soportar altos niveles de desalineación y reducir los golpes y la vibración, lo que los hace adecuados para una amplia gama de torque y velocidades [1], vista en la Fig. E.29.



Fig. E.29: Acople de Neumáticos

Acoplamiento de Fuelle

Este tipo de acople son acoplamiento flexibles de alto rendimiento diseñados para una rotación precisa, altas velocidades y transmisión de movimiento dinámico. Presentan un juego cero y una rigidez torsional excepcional, lo que garantiza una velocidad precisa, una posición angular y una transferencia de torque [1], vista en la Fig. E.30.



Fig. E.30: Acople de Fuelle

Acoplamiento Flexibles

Este tipo de acople son dispositivos mecánicos diseñados para conectar dos ejes permitiendo una ligera desalineación, movimiento o flexibilidad. Esta adaptabilidad ayuda a acomodar factores operativos como vibración, expansión térmica y desalineación causados por tolerancias de fabricación o errores de instalación. [1], vista en la Fig. E.31.



Fig. E.31: Acople Flexible

Acoplamiento Rígidos

Este tipo de acople son dispositivos mecánicos que se utilizan para conectar dos ejes perfectamente alineados, garantizando que giren juntos mientras transmiten torque y movimiento. A diferencia de los acoplamiento flexibles, no compensan la desalineación, pero pueden soportar una mayor transmisión de torque [1], vista en la Fig. E.32.



Fig. E.32: Acople Rígido

- **Selección de Tipos de Acoplamiento**

El acoplamiento seleccionado y dispuesto desde la empresa RP ingeniería es el acople de tipo flexible visto en la Fig. E.8. Este proporciona una mayor estabilidad debido a que absorbe los posibles deslizamientos del conjunto.

TABLA E.7 Datos de Acople.

Parámetro	Valor
Par Nominal	16 Nm
Momento de inercia	0,00058 Kg·m ²
Desalineación lateral máxima	0,7 mm

El acople que proporcionó la empresa utiliza elastómero del tipo estrella, son acoplamientos flexibles a la torsión y son adecuados para compensar grandes desalineaciones axiales, radiales y angulares, así como para amortiguar vibraciones y picos de par [2]. Acoplando los accionamientos vistos en la Fig. E.19.

Requisitos de Instalación Eléctrica de los Accionamientos

Se establecieron requisitos específicos para la instalación eléctrica de los accionamientos y el sistema de comunicación (SITOP y PLC): se exige que el convertidor opere bajo un sistema de puesta a tierra tipo TNS y funcione mediante una alimentación de red domiciliaria monofásica alterna. Asimismo, se debe contar con movilidad de los equipos para propósitos pedagógicos, además de una conexión de alto voltaje para ambos motores.

- **Plano de Instalación de Fuerza Propuesto**

El plano de instalación de fuerza propuesto se representa mediante un esquema de integración electromecánico. El diseño de este diagrama se fundamenta en la información técnica recopilada en el Capítulo 1, utilizando para su representación gráfica la simbología estandarizada bajo la norma IEC 60617 [27]. Además, se tiene en consideración que, para que la red eléctrica monofásica pueda satisfacer el voltaje del PM, se cuenta con un transformador de alimentación provisto por la empresa mandante de la Fig. E.10. También se consideran disyuntores de la Fig. E.12, los cuales son interruptores magnetotérmicos diseñados para proteger circuitos eléctricos residenciales y terciarios [10].

Para el diseño del diagrama, en primer lugar, se subdivide la integración electromecánica en tres segmentos: el primero corresponde a la conexión a la red; el segundo, a la instalación electromecánica de los dos accionamientos; y el tercero contempla la instalación eléctrica del sistema de comunicación, incluyendo la HMI. Finalmente, todo se condensa en el diagrama de fuerza.

- Conexión Red

La empresa mandante exige un esquema de conexión con tipo de red TN-S, que se visualiza en la Fig. E.33. En este, se tiene un esquema de conexión a tierra donde el conductor neutro (N) y el conductor de protección (PE o CPE) están físicamente separados en toda la instalación, a pesar de estar conectados al mismo punto de tierra en la fuente de alimentación.

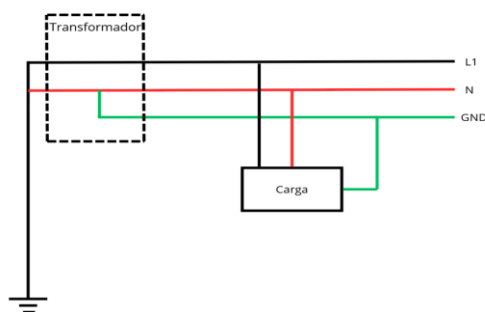


Fig. E.33: Red TN-S

- Conexión Electromecánica de los Accionamientos

El circuito de los convertidores G120 se visualiza en la Fig. E.34. Estos se integran sobre una maleta, visualizada en la Fig. E.17, que incluye un disyuntor y un transformador que opera como elevador para satisfacer el voltaje requerido por el PM. En cuanto al conexionado eléctrico, aguas arriba se encuentra el disyuntor de 2P; este se conecta al transformador, el cual, a su vez, se conecta a tierra y al PM en las líneas L1 y L2 de la Fig. 2.40. Por su parte, la resistencia de frenado (habilitada por los IGBT de la Fig. 2.40) se conecta a los bornes R1 y R2 (sin la utilización del Voltage Peak Limiter opcional). Finalmente, se conecta el motor (en conexión estrella) a la salida del inversor en los bornes W2, V2 y U2.

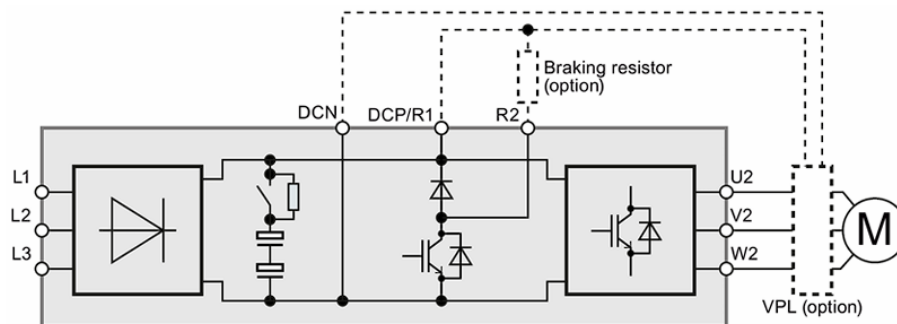


Fig. E.34: Diagrama de Bloques del Convertidor, Tamaño FSA

La alimentación de las CU se realiza de la misma manera para ambos, conectando la CU en la ranura Power Module Interface (PM-IF) [11].

La diferencia entre los accionamientos eléctricos de control de velocidad y control de torque es la unidad de control (CU). Dado que se busca simular de la manera más eficaz la carga programable, el accionamiento con control de torque lleva la CU 250S-2 PN, que tiene la posibilidad de integrar un encoder mediante los bornes de la Fig. E.35. En cambio, el accionamiento con control de velocidad cuenta con una CU 240E-2, que no tiene retroalimentación de encoder.

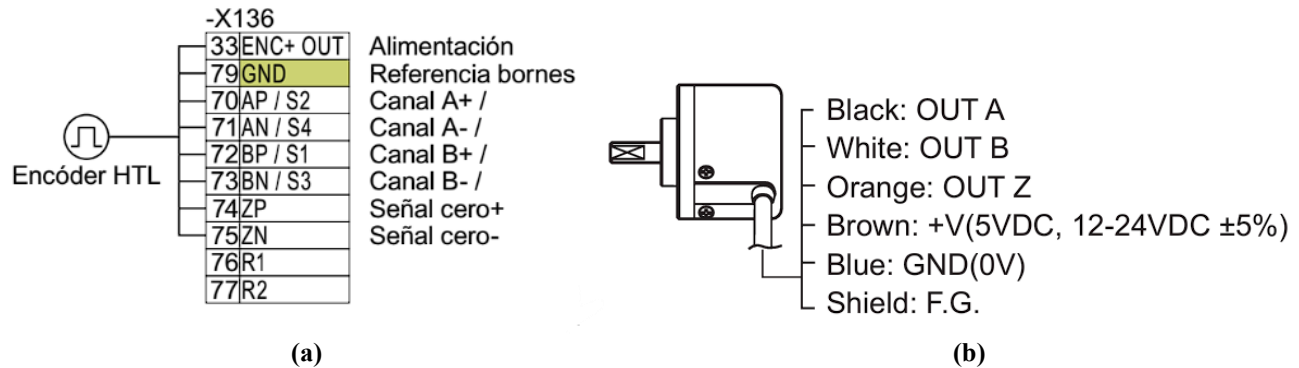


Fig. E.35: Conexión Encoder

(a) Regleta de Bornes CU250S-2 PN (b) Conexión Encoder E40

La conexión mecánica de los motores de cada accionamiento se realizó mediante un acople flexible de la Fig. E.19. Este enlace se representó mediante una línea punteada y el símbolo de acople mecánico ilustrado en la Fig. E.36.



Fig. E.36: Acoplamiento Mecánico

- Conexión Sistema de Comunicación

La alimentación del sistema de comunicación se integró en una maleta que incluye, a su vez, un disyuntor. En el diagrama se representó la conexión desde la red hacia el disyuntor de 1P, el cual alimenta al dispositivo SITOP mediante los bornes L1, N y PE de la Fig. E.37. Posteriormente, se realiza el enlace hacia el PLC, desde los bornes de salida de la fuente (+ y -) hasta los terminales L+, M y tierra del controlador, tal como se observa en la Fig. E.37.

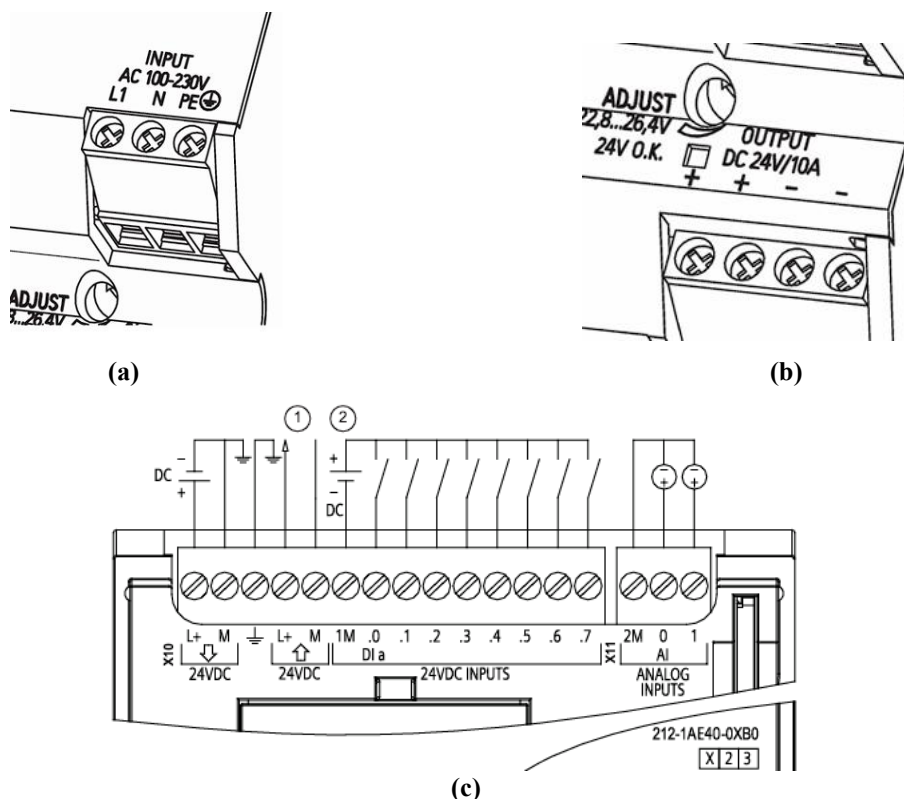


Fig. E.37: Borne Sistema de Comunicación

(a) Borne de Entrada SITOP (b) Borne de Salida SITOP (c) Borne Superiores CPU 1212C DC/DC/DC

El HMI se visualizará en el monitor de la Fig. E.13, este es energizado por un cable de alimentación que contiene una fase, neutro y tierra, al igual que el switch de comunicación de la Fig. 2.14.

Características de las Unidades de Control Sinamics G120

- Tiempos de Resolución de Algoritmos de Control

El tiempo de resolución de los Algoritmos de control tiene un ciclo de control de 250 μ s, ya sea en lazo abierto o cerrado y sus tiempos de respuesta se encuentran en la Tabla E.8 [20].

TABLA E.8 Tiempos de Resolución de Algoritmos de Control

Parámetro	Valor
V/f Control	No especifica
SLCV (Tiempo de respuesta+ Muerto)	3 (2+1) ms
CV (Tiempo de respuesta+ Muerto)	2.2 (1.2+1) ms

- Comparativa de la precisión de los Algoritmos

La principal diferencia entre los algoritmos de control radica en la comparación entre el control V/f y el control vectorial, presentando mayores ventajas este último. El control vectorial destaca por

ser más estable frente a cambios de carga y de consigna. Además, permite acelerar y frenar con un par máximo ajustable; protege el motor y la máquina motriz mediante límites de par configurables, tanto al accionar como al regenerar; controla el torque del motor y de frenado de manera independiente de la velocidad, y hace posible mantener un torque de retención completo a velocidad cero [12].

Por el lado del encoder, este añade la ventaja de no tener que operar en lazo abierto a frecuencias bajas, como ocurre en el control vectorial sin sensor (SLVC), ya que el dispositivo mide directamente la posición del rotor.

- Selección de Modo de Control Accionamiento Torque.

Como se mencionó anteriormente, la plataforma experimental cuenta con dos accionamientos: uno con MCV y otro con MCT. Debido a que este último incorpora el encoder entregado por la empresa mandante, se determinó utilizar un lazo de control VC (además del control de torque), ya que la retroalimentación de velocidad genera una simulación de torque más precisa.

• Comunicación PROFINET

Las características de comunicación PROFINET de los accionamientos depende de sus CU. Estas se visualizan en la Tablas E.9 a la Tabla E.12, correspondiendo al MCV y MCT respectivamente.

TABLA E.9 Bus de Campo CU240E-2.

Perfil
PROFIdrive
PROFIsafe
PROFIenergy

TABLA E.10 Telegramas CU240E-2.

Telegrama	Código
Telegrama estándar 1, PZD-2/2	1
Telegrama estándar 20, PZD-2/6	20
Telegrama SIEMENS 350, PZD-4/4	350
Telegrama SIEMENS 352, PZD-6/6	352
Telegrama SIEMENS 353, PZD-2/2, PKW-4/4	353
Configuración libre de telegramas	999

TABLA E.11 Bus de Campo CU250S-2 PN.

Perfil
PROFIdrive
PROFIsafe
PROFIenergy

TABLA E.12 Telegramas CU250S-2 PN.

Telegrama	Código
Telegrama estándar 1, PZD-2/2	1
Telegrama estándar 2, PZD-4/4	2
Telegrama estándar 3, PZD-5/9	3
Telegrama estándar 4, PZD-6/14	4
Telegrama estándar 7, PZD-2/2	7
Telegrama estándar 9, PZD-10/5	9
Telegrama estándar 20, PZD-2/6	20
Telegrama SIEMENS 110, PZD-12/7	110
Telegrama SIEMENS 111, PZD-12/12	111
Telegrama SIEMENS 350, PZD-4/4	350
Telegrama SIEMENS 352, PZD-6/6	352
Telegrama SIEMENS 353, PZD-2/2, PKW-4/4	353
Telegrama SIEMENS 354, PZD-6/6, PKW-4/4	354
Configuración libre de telegramas	999

Limitaciones Impuestas por la Tecnología

Los accionamientos solo podrán simular el comportamiento de motores de baja tensión debido a los tipos de PM y CU utilizados en estos. Asimismo, el accionamiento con MCV solo podrá realizar los lazos de control cerrado con la estimación de velocidad a partir de los modelos del motor, ya que, a diferencia del MCT, no cuenta con encoder.

Análisis del Sistema de Comunicación

El sistema de comunicación de la plataforma experimental se basa en la interconexión entre los accionamientos G120 con el PLC que a su vez se comunica con el HMI vía PROFINET.

Características PROFINET

- **Capa Física**

La capa física PROFINET se basa en el hardware que permite la interconexión de los equipos de la plataforma experimental.

- **Interfase**

La interfaz PROFINET es una tecnología de red de campo para la comunicación entre equipos industriales y controladores. Está basado en Ethernet y se usa para interconectar dispositivos dentro de sistemas automatizados para el ahorro de tiempo, reducción de costes y mejora del rendimiento. Además, proporciona alta velocidad de comunicación a partir de 100 Mbps, lo que permite realizar

múltiples tareas simultáneamente al mismo tiempo. También admite protocolos flexibles para permitir a los dispositivos compartir información sin conflictos [13].

- Conectores

PROFINET cuenta con ocho tipos de conectores, estos se clasifican según el manual ‘PROFINET Cabling and Interconnection Technology’ [14].

En el primer conector se tiene el cable Type C visto en la Fig. E.38.



Fig. E.38: Conector tipo C

En la segunda categoría se encuentra el conector de Fibre Optic, en esta categoría existen 3 tipos diferentes de conectores físicos vistos en las Fig E.39 a la Fig E.41.

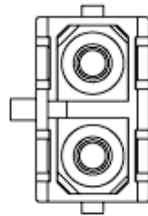


Fig. E.39: PROFINET General Passive Component (GPC)

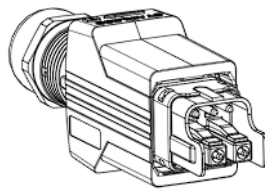


Fig. E.40: Fibre optic connector LC Push-Pull according to 61076- 3-123

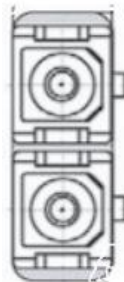


Fig. E.41: PROFINET Legacy Passive Component (LPC)

En la tercera categoría se encuentra el conector Balanced Cable, en esta categoría existen 7 tipos diferentes de conectores físicos vistos en las Fig. E.42 a la Fig. E.48.

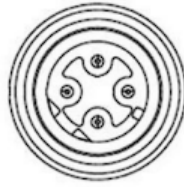


Fig. E.42: PROFINET General Passive Component (GPC) M12-D

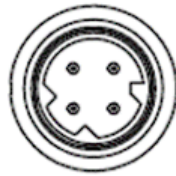


Fig. E.43: PROFINET Specific Passive Component (SPC) M8-D

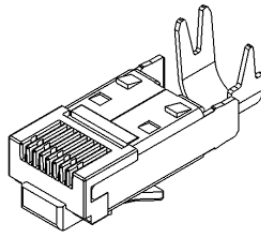


Fig. E.44: PROFINET General Passive Components (GPC) RJ45 IP20

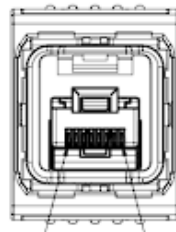


Fig. E.45: PROFINET Specific Passive Components (SPC) RJ45 IP65/67



Fig. E.46: PROFINET General Passive Component (GPC) M12-X

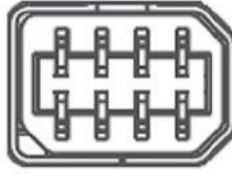


Fig. E.47: PROFINET Specific Passive Components (SPC) M2M

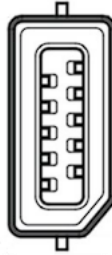


Fig. E.48: PROFINET Specific Passive Components (SPC)

En la cuarta categoría se encuentra el conector Hybrid Cabling, en esta categoría existen 2 tipos diferentes de conectores físicos vistos en las Fig. E.49 y Fig. E.50.

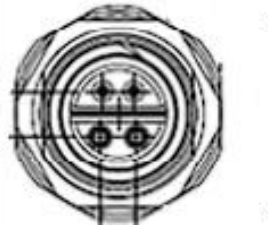


Fig. E.49: PROFINET Specific Passive Components (SPC)

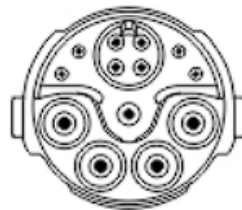


Fig. E.50: PROFINET Specific Passive Components (SPC) Hybrid connectivity

En la quinta categoría se encuentra el conector 24[V] Power Supply, en esta categoría existen 1 de conector físico visto en la Fig. E.51.

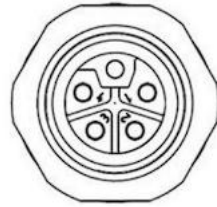


Fig. E.51: PROFINET General Passive Component (GPC) M12-L

En la sexta categoría se encuentra el conector Signal, en esta categoría existe 1 de conector físico visto en la Fig. E.52.

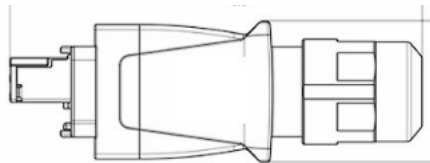


Fig. E.52: PROFINET Push Pull Signal connector

En la séptima categoría se encuentra el conector Bulkhead, en esta categoría existe 1 de conector físico visto en la Fig. E.53.



Fig. E.53: Bulkhead for PROFINET

En la octava categoría se encuentra la conexión Terminal PROFINET, en esta categoría existe 1 de conector físico visto en la Fig. E.54.

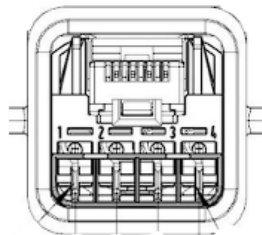


Fig. E.54: PROFINET Legacy Passive Component (LPC) Hybrid connectivity

- Cables

PROFINET cuenta con 2 tipos de cables en redes PROFINET, estos dependen del tipo de cable conductor, dividiéndose en cables de Cobre y cables de Fibra Óptica [15].

El cable de Cobre PROFINET más común es un cable blindado de 4 hilos, de color verde, que admite Fast Ethernet de 100 Mbps a una distancia de 100 metros [15], visto en la Fig. E.55.

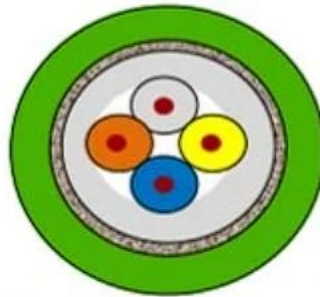


Fig. E.55: Cable de Cobre PROFINET

Hay cuatro tipos de cables de cobre PROFINET: A, B, R y C: Tipo A que son para instalaciones fijas, Tipo B que son para instalaciones donde puede haber flexión, Tipo R que son para aplicaciones robóticas además de usos específicos y Tipo C que son para otras aplicaciones especializadas, pueden soportar entornos dinámicos y de movimiento, por ejemplo, máquinas rotativas [15].

El cable de Fibra Óptica visto en la Fig. E.56, consta de dos cables paralelos con velocidades de hasta 100 Mbit/s y comunicación full duplex a través estos, también pueden cubrir distancias de kilómetros y proporcionan aislamiento eléctrico total entre áreas de planta. Además, los cables de fibra son inmunes a las interferencias electromagnéticas [15].



Fig. E.56: Cable de Fibra Óptica PROFINET

Hay dos tipos de cables de fibra óptica PROFINET: Tipo B y Tipo C. Los cables Tipo B están diseñados para uso estacionario o flexible. Los cables tipo C están diseñados para aplicaciones especiales como, por ejemplo, movimiento permanente, vibración o torsión [15].

- Switches

PROFINET cuenta con 2 tipos de Switches, los switches gestionados y no gestionados, estos son dispositivos de conmutación que se utilizan para la comunicación, el mantenimiento y el control

en el sistema. Ambos permiten una conexión directa a la red de una manera sencilla. [13], visto en la Fig. E.57.

La diferencia principal entre los dos tipos es que los switches gestionados se pueden configurar para cumplir con diversas necesidades del sistema, mientras que los no gestionados sólo se pueden usar para un nivel básico de funcionalidad [13].



Fig. E.57: Switch

Configuración, Data Exchange y Diagnósticos

- **Requisitos operacionales estaciones IO Devices**

Los requisitos operacionales para las estaciones IO Devices de la plataforma experimental establecen que cada variador Sinamics G120 debe tener asignado un Nombre de Dispositivo (Device Name) y una dirección IP única, al igual que el IO Controller PLC S7-1200. Además, el Ciclo de Actualización debe ser consistente con los tiempos de resolución de los algoritmos de control de velocidad y torque del motor, garantizando que el intercambio de palabras de proceso (PZD).

- **Modos de Comunicación**

Para PROFINET IO se gestiona el intercambio de información mediante dos modos de operación que coexisten en el mismo canal físico:

- **Comunicación Cíclica**

Este modo se dedica exclusivamente al intercambio de Datos de Proceso (PZD) críticos para el lazo de control de los motores. El PLC (IO-Controller) y los variadores (IO-Devices) intercambian telegramas en intervalos de tiempo predefinidos y determinísticos, enviando consignas de velocidad y torque mientras reciben retroalimentación de estado en tiempo real.

- **Comunicación Acíclica**

Este modo opera en paralelo a la comunicación cíclica y se activa únicamente bajo demanda del sistema o del operador. Se utiliza principalmente para dos funciones:

Como Canal de Parámetro que permite la lectura y modificación de tipo de Set Point de los Sinamics G120 desde la estación de supervisión. Y como Canal de Diagnósticos en el que se reportan los estados del motor.

- **Canal de Configuración**

En PROFINET IO el canal de comunicación es capaz de establecer los valores máximos y mínimos de los parámetros del motor, enviar y recibir las palabras de mando y de estado de cada accionamiento. Enviar Set Point para cada accionamiento, configurar los modos de Set Point disponibles para cada accionamiento y gestionar el intercambio de PZD entre todos los dispositivos de la plataforma experimental para su posterior monitoreo.

- **Canal de Diagnostico**

En PROFINET IO mediante el canal de diagnóstico se visualizará los estados del motor de cada accionamiento mediante el HMI, en este se encontrará el estado operativo del motor, el sentido de giro de este, el modo el cual se detiene dependiendo de la palabra de mando de la Fig. A.52 y los límites del DC-LINK interno del PM-240.

- **Conformance Classes**

En PROFINET existen 3 tipos de Conformance Classes vistos en la Fig. E.58 [17]. La plataforma experimental cuenta con un Conformance Classes más básico de clase A.

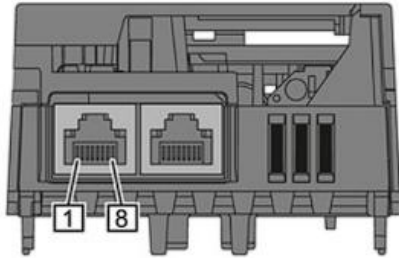
	A	B	C
Real-Time Data Exchange – cycle times down to 1ms	☒	☒	☒
Alarms and Diagnostics	☒	☒	☒
Network Topology Support	☒	☒	☒
SNMP Support		☒	☒
Real-Time Data Exchange - cycle times down to 31.25µs			☒

Fig. E.58: PROFINET Conformance Classes

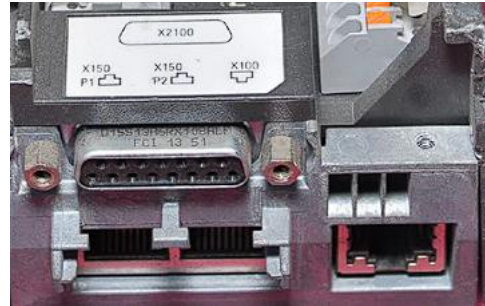
Definición de Cables y Conectores

Los conectores escogidos dependen de los zócalos de los componentes de la plataforma experimental, por el lado de los accionamientos se tiene un zócalo RJ45 visto en la Fig. E.59 y por el lado del PLC se tiene un zócalo de conector RJ45.

Zócalo de conector RJ45 para
PROFINET IO (X150 P1, X150 P2)



(a)



(b)

Fig. E.59: Conector PROFINET, CU240 Y CU250

(a) CU240 (b) CU250

Al tener zócalo conector RJ45 en todos los elementos de la plataforma experimental se define un conector RJ45.

El cable definido es de Cobre con categoría 6e, blindado visto en la Fig. E.60, teniendo una velocidad de transferencia de 100 [Mbps] [15].



Fig. E.60: Cable de Cobre Definido

- **Definición de Switches**

El switch definido es el D-Link DGS-108 visto en la Fig. A.14, perteneciente a la categoría no gestionado.

TABLA E.13 Datos de D-Link DGS-108

Parámetro	Valor
Puertos	8
Capacidad de Conmutación	16 Gigabits
Velocidad de Conexión (Naranja/Verde)	100/1000 Mbps

6.3.1 Definición de Ciclos de Red

- **Definición del Ciclo de Actualización de IO Devices**

La estación IO queda definida por el PLC S7-1200 que cumple el rol de IO controller y los accionamientos que cumplen el rol de IO Devices. La velocidad ciclo de actualización de la red queda dada por el IO controller sobre toda la subred PN/IE_1 con la única opción disponible de velocidad en el Tía Portal de 1[ms] visto en la Fig E.61.

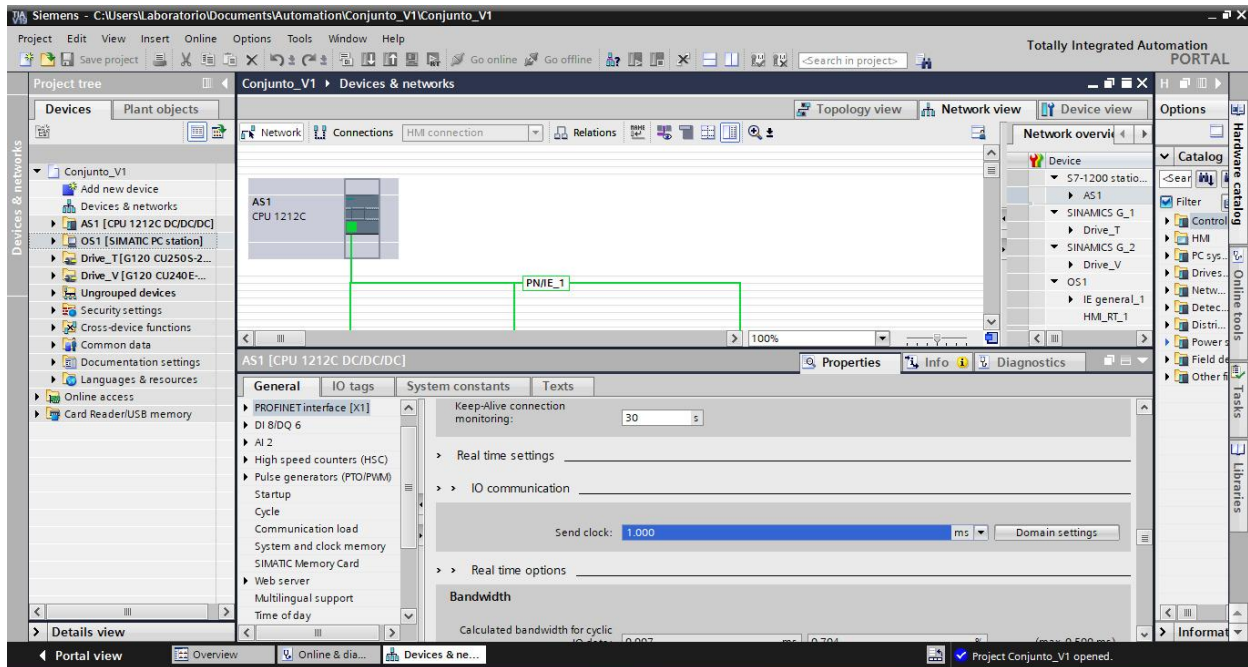


Fig. E.61: Asignación de Ciclo de Actualización de Subred

Análisis del Sistema de Control PLC

Requisitos del sistema de control Estructura de las funciones como subrutinas

La estructura del código dentro del tía Portal como subrutina debe estructurarse en Bloques de Función (FC) independientes para mantener el orden lógico.

- **Drive Velocidad**

Subrutina encargada de enviar la palabra de mando y la consigna de velocidad al convertidor, y de leer las variables de interés establecidas.

- **Drive Torque**

Subrutina encargada de enviar la palabra de mando y la consigna de velocidad al convertidor, y de leer las variables de interés establecidas.

- **Calculo Perfiles**

Subrutina matemática que contiene las fórmulas de las curvas de Set Point (Lineal, Cuadrática y escalonada) y genera el valor de consigna para el control de torque y velocidad.

Características del PLC

- **Tamaño de Memoria de Carga/Trabajo**

El PLC Siemens S7-1200 cuenta con una Memoria de Trabajo de 100 kB y una memoria de Carga de 2 [MB] [18].

- **Tamaño Máximo de Bloques OB-FC-FB-DB**

Para el PLC Siemens S7-1200 CPU 1212C, el tamaño máximo de cualquier bloque individual (ya sea un OB, FC, FB o DB) es de 30 KB. [18].

- **Capacidades de Comunicación PROFINET**

Las capacidades de comunicación del PLC Siemens S7-1200 CPU 1212C se encuentran en la Tabla E.14.

TABLA E.14 Datos PROFINET PLC S7-1200.

Parámetro	Valor
Velocidad de transferencia IO Max	100 Mbit/s
Puertos	PROFINET(1x)
Dispositivos PROFINET	8 Max
Paquete de programación	STEP 7 V20 o superior