



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA
COMUNICACIÓN ENTRE UN PLC S7-1200 Y UN
VARIADOR DE FRECUENCIA SINAMICS G120C,
MEDIANTE LOS BLOQUES SINA_SPEED TLG20 Y
COMPACT PID EN TIA PORTAL**

Trabajo de titulación para optar al título de
Ingeniero de Ejecución en Control e
Instrumentación Industrial

Alumno:

Antonio Eladio Vera Larenas

Profesor Guía:

Ricardo Vera González



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Diseño de un sistema de control para la comunicación entre un PLC S7-1200 y un variador de frecuencia SINAMICS G120C, mediante los bloques SINA_SPEED TLG20 y Compact PID en TIA Portal.

Nombre del candidato(a): Antonio Eladio Vera Larenas

Carrera / Grado: Ingeniería de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial

Campus: Concepcion ; **Departamento:** Electrónica e Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Ricardo Ignacio Vera González, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 9/10/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 9/10/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

DEDICATORIA

“Si eres perseverante aun que te sea difícil aprender, aprenderás.

Y aun que seas débil te harás fuerte”

RESUMEN

KEYWORDS: CONTROL PID, PROGRAMACION, AUTOMATIZACION

En la ingeniería de control, el uso de variadores de frecuencia es fundamental para la regulación de velocidad en motores eléctricos. Sin embargo, su implementación en entornos académicos suele ser limitada, dificultando la formación práctica de los estudiantes en el diseño y configuración de estos sistemas.

Este proyecto tiene como objetivo el diseño de un sistema de control para la comunicación entre los bloques SINA_SPEED TLG20 y Compact PID en TIA Portal, utilizando un PLC Siemens S7-1200 y un variador SINAMICS G120C. Se establecerá la comunicación mediante PROFINET, configurando el variador en STARTDRIVE y verificando la transmisión de consignas de velocidad a través del bloque Compact PID.

El alcance del proyecto abarca la configuración y prueba de la comunicación entre los bloques funcionales, incluyendo un análisis empírico del control PID mediante la variación de rpm del motor. Además, se realizará un análisis de costos para evaluar la viabilidad de una futura implementación en entornos y educativos.

Los resultados obtenidos permiten demostrar la posibilidad de establecer una comunicación eficiente entre el PLC S7-1200 y el variador G120C utilizando los bloques mencionados, sentando las bases para futuras investigaciones y aplicaciones en automatización industrial.

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCION..... 1

DESCRIPCION DEL PROBLEMA..... 2

PROPUESTA DE SOLUCION..... 2

OBJETIVO GENERAL..... 3

OBJETIVOS ESPECIFICOS..... 3

ALCANCE..... 3

RESTRICCION..... 3

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO 4

1.1. VARIADORES DE FRECUENCIA (VFD) 5

1.1.1. DEFINICIÓN 5

1.1.2. FUNCIONAMIENTO Y PRINCIPIOS BÁSICOS. 5

1.1.3. MÉTODOS DE CONTROL DE VELOCIDAD (V/F Y CONTROL VECTORIAL)..... 6

1.1.4. APLICACIONES INDUSTRIALES DE VFD. 7

1.2. MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN 7

1.2.1. DEFINICION 7

1.2.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO..... 8

1.2.3. RELACIÓN ENTRE FRECUENCIA, VOLTAJE Y VELOCIDAD..... 8

1.3. CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES (PLC) 9

1.3.1. DEFINICIÓN 9

1.3.2. CONCEPTO Y ESTRUCTURA DE FUNCIONAMIENTO..... 9

1.3.3. APLICACIONES EN LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL. 10

1.4. TELEGRAMAS DE COMUNICACIÓN EN PROFINET 11

1.4.1. DEFINICIÓN DE PROFINET Y SU ROL EN LA COMUNICACIÓN INDUSTRIAL 11

1.4.2. USO DEL TELEGRAMA 20 (SINA_SPEED TLG20) EN EL CONTROL DE VELOCIDAD. 11

1.4.3. ESTRUCTURA DE TELEGRAMAS. 12

1.4.4. TIPOS DE VARIABLES EN TLG20 13

1.5. CONTROL PID EN SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN..... 16

1.5.1. DEFINICIÓN 16

1.5.2. CONCEPTO DE CONTROL EN LAZO CERRADO. 16

1.5.3. FUNCIONAMIENTO DEL CONTROL PID (P, I Y D)..... 16

1.5.4. DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL PID 17

CAPITULO 2 DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL..... 18

2.1. INTRODUCCIÓN:..... 19

2.2. CARACTERIZTICAS DE LOS DISPOSITIVOS FISICOS 20

2.2.1. VARIADOR SINAMICS G120C (6SL3210-1KE12-3UF2). 21

2.2.2. MOTOR TRIFÁSICO VEM KPER 71 K2. 22

2.2.3. PLC SIEMENS S7-1200 (1214C AC/DC/RLY) 23

2.3.	CONEXIÓN FÍSICA DEL SISTEMA	24
2.3.1.	RED DE COMUNICACIÓN PROFINET	24
2.3.2.	ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA	25
2.3.3.	CONSIDERACIONES DE PUESTA EN MARCHA.....	25
2.4.	CONFIGURACIÓN DEL VARIADOR G120C EN TIA PORTAL.....	26
2.4.1.	PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y CONFIGURACIÓN MEDIANTE STARTDRIVE.....	27
2.5.	SELECCIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL PLC Y HMI.....	33
2.6.	CONFIGURACION DE LA COMUNICACIÓN PROFINET	35
2.7.	CONFIGURACION DE LA PROGRMACION.....	36
2.7.1.	DEFINICION DE VARIABLES EN TIA PORTAL	36
2.7.2.	BLOQUE SINA SPED TLG 20.....	37
2.7.3.	PARÁMETROS DEL VARIADOR PARA EL BLOQUE SINA_SPEED TLG20.....	38
2.7.4.	CONFIGURACIÓN DEL BLOQUE COMPACT PID EN EL PLC.	39
2.8.	NORMALIZACION Y ESCALADO DE VARIABLES	40

CAPITULO 3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y VALIDACIÓN

EMPÍRICA	DEL CONTROL PID	41
3.1.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	42
3.2.	PRUEBAS EMPÍRICAS DE RESPUESTAS DEL SISTEMA	47
3.2.1.	PRUEBA 1 – PUNTO DE REFERENCIA CON $T_i = 2.0$ S.....	48
3.2.2.	PRUEBA 2 – RESPUESTA CON $T_i = 4.0$ S	49
3.2.3.	PRUEBA 3 – RESPUESTA CON $T_i = 1.5$ S	50
3.2.4.	SINTESIS DE PRUEBAS Y VALIDACION EMPIRICA	51

CAPITULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COSTOS DE

IMPLEMENTACIÓN CON CARGA.....	52
4.1. INTRODUCCIÓN CAPITULO 4.....	53
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESPERADOS	54
4.2.1. PRUEBA 1 (TI = 2.0 S) – CASO DE REFERENCIA	54
4.2.2. PRUEBA 2 (TI = 4.0 S) – RESPUESTA MÁS LENTA Y ESTABLE	54
4.2.3. PRUEBA 3 (TI = 1.5 S) – RESPUESTA MÁS RÁPIDA PERO MENOS ESTABLE	55
4.2.4. SÍNTESIS COMPARATIVA	55
4.3. CONSIDERACIONES SOBRE LA APLICACIÓN DE CARGA COMO PERTURBACIÓN	56
4.4. ANÁLISIS DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	58
4.5. COMPONENTES DEL SISTEMA	59
4.6. COSTOS ESTIMADOS	62
CONCLUSION GENERAL.....	63
BIBLIOGRAFIA.....	64
ANEXOS.....	65

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 _ Bloque Sina Speed Telegrama 20 13

FIGURA 2 _ Diagrama de control PID 17

FIGURA 3 _ Conexión General de Sistema de Control 20

FIGURA 4 _ VFD Sinamics G120C..... 21

FIGURA 5 _ Motor trifásico KPER 71 K2..... 22

FIGURA 6 _ PLC S7 1200 24

FIGURA 7 _ Versión VFD 27

FIGURA 8 _ Tipo de aplicación 28

FIGURA 9 _ Selección de unidad de Comando 29

FIGURA 10 _ Selección Telegrama 20 30

FIGURA 11 _ Configuración parámetros Motor 31

FIGURA 12 _ Identificación de datos del Motor..... 32

FIGURA 13 _ Incorporación PLC 33

FIGURA 14 _ Estación PC 34

FIGURA 15 _ Topología de red..... 35

FIGURA 16 _ Variables PLC 36

FIGURA 17 _ Configuración bloque SINA SPEED TLG 20..... 37

FIGURA 18 _ Parámetros de referencia VFD 38

FIGURA 19 _ Configuración PID Compact..... 39

FIGURA 20 _ Normalización Entrada a Compact PID 40

FIGURA 21 _ Normalización salida de Compact PID 40

FIGURA 22 _ Verificación comunicación Profinet..... 42

FIGURA 23 _ Verificación Variables..... 43

FIGURA 24 _ Verificación SINA SPEED 44

FIGURA 25 _ Verificación PID Compact..... 45

FIGURA 26 _ Verificación Normalización Entrada PID 46

FIGURA 27 _ Verificación normalización salida PID 46

FIGURA 28 _ Primer Prueba empírica..... 48

FIGURA 29 _ Segunda Prueba Empírica 49

FIGURA 30 _ Tercer Prueba Empírica..... 50

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 _ Tabla de telegrama 20..... 12

TABLA 2 _ Variables de Entrada bloque Sina Speed TLG 20 14

TABLA 3 _ Variables de salida Bloque Sina Speed TLG 20..... 15

TABLA 4 _ Costos estimados..... 62

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

AC_Corriente Alterna (Alternating Current)

DC_Corriente Continua (Direct Current)

HMI_Interfaz Hombre-Máquina (Human Machine Interface)

PID_Control Proporcional–Integral–Derivativo

PLC_Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller)

PROFINET (Process Field Net)

PZD_Palabra de datos de proceso (Prozessdatenwort)

RT_Tiempo Real (Real Time)

TIA_Totally Integrated Automation

V/f_Relación Voltaje/Frecuencia (Voltage/Frequency)

WinCC_Windows Control Center (plataforma de visualización de Siemens)

Kp_Ganancia proporcional (–)

Ti_Tiempo integral (s)

Td_Tiempo derivativo (s)

RPM_Revoluciones por Minuto

f_Frecuencia de alimentación (Hz)

V_Tensión eléctrica (V)

I_Corriente eléctrica (A)

P_Potencia (W)

τ _Torque (N·m)

INTRODUCCIÓN GENERAL

El control de velocidad en motores eléctricos constituye un aspecto fundamental dentro de los procesos industriales modernos, en los cuales la eficiencia energética, la precisión y la adaptabilidad a distintas condiciones de operación resultan determinantes. En este contexto, los variadores de frecuencia se han consolidado como dispositivos esenciales, al permitir un control flexible y seguro de la velocidad de motores de corriente alterna.

Durante la formación académica en el área de Ingeniería en Control, se identificó la ausencia de un proyecto orientado específicamente al diseño e implementación de un sistema de control de velocidad basado en variadores de frecuencia. Esta carencia motivó el presente trabajo de titulación, cuyo propósito principal consiste en diseñar y validar un sistema de control de velocidad empleando un variador SINAMICS G120C y un controlador lógico programable Siemens S7-1200, gestionados mediante el entorno de programación TIA Portal y su herramienta complementaria StartDrive.

La metodología desarrollada contempla inicialmente un marco teórico que fundamenta los principios de comunicación en PROFINET y la estructura de los telegramas utilizados por el variador. Posteriormente, se aborda el diseño del sistema de control y la integración de los bloques de software requeridos. Una vez implementada la lógica, se realizarán pruebas experimentales orientadas a la validación empírica del control PID, analizando la respuesta del motor frente a diferentes configuraciones de los parámetros de sintonía. Finalmente, se evaluarán los componentes del sistema, así como el costo estimado de su implementación, considerando la posible incorporación de un generador de corriente continua como carga.

El presente documento se organiza en cuatro capítulos. El Capítulo 1 desarrolla el marco teórico que sustenta la investigación, con énfasis en la comunicación en PROFINET y los telegramas aplicados en el control de velocidad. El Capítulo 2 describe el diseño e implementación del sistema de control en TIA Portal. En el Capítulo 3 se presentan las pruebas experimentales y la validación empírica del controlador PID. Finalmente, el Capítulo 4 expone el análisis de resultados, así como la estimación de costos de implementación del sistema.

De este modo, la investigación busca no solo aportar a la comprensión académica de los sistemas de control aplicados a variadores de frecuencia, sino también establecer una base práctica que pueda servir de referencia para futuras implementaciones en el ámbito educativo.

DESCRIPCION DEL PROBLEMA

En la carrera de Ingeniería en Control y Automatización, no se abordó de manera práctica la implementación de sistemas de control en variadores de frecuencia, a pesar de su importancia en la industria. Esto representa una limitación en la formación de los estudiantes, quienes pueden enfrentar dificultades al diseñar y programar estos sistemas en entornos reales.

Los variadores de frecuencia (VFD) son ampliamente utilizados en la industria para el control eficiente de motores eléctricos, permitiendo mejorar la eficiencia energética y la vida útil de los equipos. Sin embargo, la falta de experiencia en su configuración y control puede afectar la capacidad de los ingenieros para integrarlos en sistemas automatizados de manera óptima.

PROPUESTA DE SOLUCION

Este proyecto propone el diseño de un sistema de control PID para la regulación de velocidad en un variador SINAMICS G120C, utilizando los bloques funcionales Compact PID y SINA_SPEED TLG20 en TIA Portal.

El sistema se diseñará con un PLC Siemens S7-1200, enfocándose en la respuesta dinámica del motor ante variaciones en la consigna de velocidad, sin considerar cambios en la carga. Con este enfoque, se busca generar un aporte práctico que pueda servir como referencia para futuras implementaciones y mejorar la enseñanza del control de variadores de frecuencia en el ámbito académico.

OBJETIVO GENERAL

Diseño de un sistema de control PID en TIA Portal, para la regulación de velocidad de un variador SINAMICS G120C, utilizando los bloques SINA_SPEED TLG20 y Compact PID, facilitando su aplicación en futuros proyectos de automatización industrial.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Configurar y operar el variador SINAMICS G120C desde el TIA Portal, mediante el protocolo industrial PROFINET.
- II. Establecer la comunicación entre los bloques SINA_SPEED TLG20 y Compact PID para el control de velocidad de la unidad motriz.
- III. Análisis de costos del sistema de control de velocidad, para ser implementado en la universidad.

ALCANCE

- Establecer la comunicación entre los bloques Compact PID y SINA_SPEED TLG20 en TIA Portal para el control de velocidad de un motor trifásico.
- Realizar un análisis de costos de los componentes del sistema de control de velocidad, para una futura implementación en la universidad.

RESTRICCION

- Debido a la falta de disponibilidad de equipos en la universidad, no se cuenta con una carga eléctrica que pueda ser incorporada al motor. Por lo tanto, el estudio se centrará en la comunicación y respuesta del sistema sin la influencia de variaciones de carga.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1. VARIADORES DE FRECUENCIA (VFD)

1.1.1. DEFINICIÓN

Los variadores de frecuencia (VFD, Variable Frequency Drives) son dispositivos electrónicos diseñados para controlar la velocidad y el torque de motores eléctricos de corriente alterna (CA). Su uso es fundamental en la automatización industrial, ya que permiten un control preciso de la velocidad sin necesidad de métodos mecánicos como reductores o poleas variables.

Los VFD ajustan la velocidad del motor modificando la frecuencia y el voltaje de la alimentación, permitiendo así una operación eficiente y flexible en comparación con métodos tradicionales de control de motores.

1.1.2. FUNCIONAMIENTO Y PRINCIPIOS BÁSICOS.

El principio fundamental de un VFD radica en su capacidad para transformar la corriente alterna de la red en una señal de frecuencia y voltaje variable. Este proceso se realiza en tres etapas principal

I. Rectificación

- Convierte la corriente alterna (CA) de la red en corriente continua (CC).
- Se usa un puente rectificador de diodos o tiristores.

II. Filtrado y Almacenamiento

- Un condensador suaviza la señal de corriente continua para eliminar fluctuaciones e interferencias eléctricas.
- Se obtiene una señal continua estable, que servirá de base para la generación de la nueva corriente alterna.

III. Inversor de la señal

- Un inversor de transistores IGBT genera una nueva corriente alterna modulada.
- Se ajusta la frecuencia y el voltaje de salida según la necesidad del motor.

Gracias a este proceso, un variador puede controlar la velocidad del motor sin afectar su eficiencia ni generar pérdidas excesivas de energía.

1.1.3. MÉTODOS DE CONTROL DE VELOCIDAD (V/F Y CONTROL VECTORIAL)

Los variadores de frecuencia (VFD) utilizan principalmente dos métodos para el control de velocidad en motores eléctricos:

I. Control V/F (Voltaje/Frecuencia o Escalar)

- Se mantiene una relación constante entre el voltaje y la frecuencia aplicada al motor.
- Es un método simple y estable, adecuado para aplicaciones de baja precisión.
- No tiene en cuenta las variaciones de carga o las condiciones del motor en tiempo real.
- Se usa principalmente en bombas y ventiladores, donde la velocidad no requiere ajustes rápidos.

II. Control Vectorial (FOC, Field-Oriented Control)

- También llamado control de flujo orientado al campo permite un control más preciso del torque y la velocidad.
- Se basa en la modelización matemática del motor, separando la corriente en componentes de flujo y torque.
- Requiere sensores de corriente y algoritmos avanzados para calcular la respuesta en tiempo real.
- Se usa en aplicaciones que demandan alta precisión, como robots, grúas y máquinas CNC.

1.1.4. APLICACIONES INDUSTRIALES DE VFD.

Los variadores de frecuencia tienen una amplia aplicación en la industria, incluyendo:

- Sistemas de bombeo y ventilación: Controlan la velocidad de motores en bombas y ventiladores para ahorrar energía.
- Bandas transportadoras: Permiten variaciones de velocidad en procesos industriales.
- Máquinas CNC y robótica: Usan control vectorial para un posicionamiento preciso.
- Grúas y montacargas: Ajustan el torque y la velocidad en tiempo real.

En todos estos casos, los variadores de frecuencia mejoran la eficiencia energética y reducen el desgaste mecánico de los motores.

1.2. MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN

1.2.1. DEFINICION

Los motores trifásicos de inducción son los más utilizados en la industria debido a su robustez, bajo mantenimiento y alta eficiencia. Estos motores funcionan mediante el principio de inducción electromagnética, donde un campo magnético giratorio en el estator induce una corriente en el rotor, generando movimiento.

Su velocidad depende directamente de la frecuencia de alimentación, lo que los hace ideales para ser controlados mediante variadores de frecuencia (VFD).

1.2.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO.

El motor de inducción consta de dos partes principales:

- I. Estator: Compuesto por bobinas trifásicas que generan un campo magnético giratorio al ser alimentadas con corriente alterna.
- II. Rotor: Normalmente tipo jaula de ardilla, donde la variación del campo magnético induce corrientes que generan un torque en el motor.

El motor no necesita contacto eléctrico directo entre el estator y el rotor, lo que reduce el desgaste y el mantenimiento.

1.2.3. RELACIÓN ENTRE FRECUENCIA, VOLTAJE Y VELOCIDAD.

Los motores de inducción AC funcionan a una velocidad determinada por la frecuencia de la alimentación y el número de polos del motor, según la ecuación:

$$N_s = \frac{120 * f}{P}$$

Tal que:

- N_s = Velocidad síncrona en revoluciones por minuto (rpm)
- f = Frecuencia de la alimentación en Hz
- P = Número de polos del motor

Dado que la frecuencia de la red es fija (por ejemplo, 50 Hz o 60 Hz), la única forma de ajustar la velocidad del motor es modificando la frecuencia de alimentación, lo cual se logra mediante un variador de frecuencia.

1.3. CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES (PLC)

1.3.1. DEFINICIÓN

Los Controladores Lógicos Programables (PLC, por sus siglas en inglés: Programmable Logic Controllers) son dispositivos electrónicos utilizados en la automatización industrial para controlar procesos secuenciales y continuos. Estos equipos han reemplazado en gran medida los sistemas de control basados en relevadores y temporizadores, ofreciendo mayor flexibilidad, eficiencia y facilidad.

1.3.2. CONCEPTO Y ESTRUCTURA DE FUNCIONAMIENTO

Un PLC es un sistema computarizado especializado en la ejecución de tareas de control industrial. Su estructura básica está compuesta por los siguientes elementos:

- I. Unidad Central de Procesamiento (CPU): Es el cerebro del PLC, encargado de ejecutar el programa de control almacenado en su memoria. Realiza operaciones lógicas, matemáticas y de comunicación con otros dispositivos.
- II. Módulos de Entrada y Salida (I/O): Permiten la interacción del PLC con el proceso industrial. Las entradas reciben señales de sensores y dispositivos de campo, mientras que las salidas envían comandos a actuadores, motores y válvulas.
- III. Memoria: Almacena el programa de control y los datos del proceso.
- IV. Fuente de Alimentación: Proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del PLC y sus componentes.
- V. Interfaces de Comunicación: Permiten la integración con otros dispositivos, como variadores de velocidad, sensores avanzados, sistemas SCADA, entre otros.

El PLC opera cíclicamente en tres fases: lectura de entradas, ejecución del programa y actualización de salidas. Este ciclo de escaneo ocurre en milisegundos, asegurando una respuesta rápida en sistemas automatizados.

1.3.3. APLICACIONES EN LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL.

Los PLCs se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones industriales, destacándose en:

- I. Control de máquinas y procesos: Permiten gestionar de manera automática sistemas de producción, embotellado, empaque, entre otros.
- II. Control de movimiento: Se emplean para regular motores, servomecanismos y variadores de frecuencia en aplicaciones como bandas transportadoras y máquinas CNC.
- III. Monitoreo y supervisión: Facilitan la recopilación de datos en tiempo real, optimizando el mantenimiento predictivo y la gestión de fallos.
- IV. Sistemas de seguridad: Implementan lógica de protección en procesos críticos, como paradas de emergencia y enclavamientos.
- V. Industria de procesos: Se aplican en la regulación de temperatura, presión, caudal y otros parámetros en plantas químicas, petroquímicas y de energía.

1.4. TELEGRAMAS DE COMUNICACIÓN EN PROFINET

1.4.1. DEFINICIÓN DE PROFINET Y SU ROL EN LA COMUNICACIÓN INDUSTRIAL

PROFINET es un estándar de comunicación industrial basado en Ethernet, diseñado para la transmisión de datos en tiempo real entre dispositivos de automatización, como PLCs, variadores de velocidad y sistemas SCADA.

Sus principales características incluyen:

- I. Alto rendimiento y velocidad de comunicación, permitiendo tiempos de ciclo en el rango de milisegundos.
- II. Compatibilidad con Ethernet estándar, facilitando la integración con redes IT.
- III. Soporte para comunicación en tiempo real (RT) e isócrona en tiempo real (IRT), asegurando sincronización precisa en aplicaciones críticas.
- IV. Flexibilidad en la arquitectura de red, soportando topologías en estrella, línea y anillo.
- V. Facilidad de configuración y diagnóstico, mejorando la detección y solución de fallos en la red.

1.4.2. USO DEL TELEGRAMA 20 (SINA_SPEED TLG20) EN EL CONTROL DE VELOCIDAD.

El Telegrama 20 (SINA_SPEED TLG20) es un bloque de comunicación en S7-1200 utilizado para controlar la velocidad de un variador SINAMICS G120C. Este bloque permite que el controlador de un PLC se comunique directamente con el variador para ajustar la velocidad del motor de manera eficiente.

El uso del TLG20 en control de velocidad implica:

- I. Envío de la consigna de velocidad: El bloque TLG20 envía la consigna de velocidad al variador para ajustarla de acuerdo con los valores que se determinen en el PLC.
- II. Control y monitoreo: El TLG20 no solo establece la velocidad de operación, sino que también permite monitorear el estado del variador, como su rendimiento y posibles errores.
- III. Función principal: La función principal de este telegrama es enviar la información de la velocidad al variador y recibir información sobre la velocidad real del motor. De esta manera, puedes establecer un control de velocidad preciso y dinámico, ideal para el sistema que estás desarrollando con el PID.

1.4.3. ESTRUCTURA DE TELEGRAMAS.

Los telegramas de comunicación son paquetes de datos estandarizados que se utilizan para intercambiar información entre un variador de frecuencia (VFD) y un controlador lógico programable (PLC) o cualquier sistema de control. Estos telegramas definen la estructura y el contenido de los datos transmitidos, permitiendo un control eficiente y seguro del variador a través de protocolos industriales como PROFIBUS o PROFINET.

Los telegramas de comunicación permiten:

- I. Control Remoto del Variador: Enviar comandos como arranque, parada, cambio de velocidad, y ajustes de parámetros.
- II. Supervisión: Recibir información del estado operativo del variador, como velocidad actual, corriente, tensión, o errores.
- III. Establecer Estándares: Garantizar una comunicación uniforme entre dispositivos de diferentes fabricantes que utilicen el mismo protocolo.

El Telegrama estándar 20 utilizado en el proyecto consta de dos palabras de recepción y seis de transmisión, en el cuadro (tabla 1) se pueden detallan los telegramas enviados y recibidos.

	PZD1	PZD2	PZD3	PZD4	PZD5	PZD6
Telegrama recibido	STW1	NSOLL_A				
Telegrama emitido	ZSW1	NIST_A_ GLATT	IASIT_ GLATT	MIST_ GLATT	P_IST_ GLATT	MELD_ NAMUR

TABLA 1 _ Tabla de telegrama 20

A continuación, se detalla la función de cada telegrama siendo PZD (Palabra de datos de proceso) un bloque de 16 bits (una Word) que transmite información de control o de estado entre el PLC y el variador.

- STW1: Palabra de control recibida por el Variador
- NSOLL_A: Consigna de velocidad recibida por el variador
- ZSW1: Palabra de estado transmitida por el variador
- NIST_A_GLATT: Valor real Suavizado de velocidad
- IAIST_GLATT: corriente
- MIST_GLATT: Par
- P_IST_GLATT: Potencia activa
- MELD_NAMUR: Palabra de fallo

1.4.4. TIPOS DE VARIABLES EN TLG20

A continuación, se detallarán los tipos de variables que estarán presentes tanto en la entrada como en la salida del bloque SINA_SPEED_TLG20, las cuales serán fundamentales para establecer la comunicación con el variador de frecuencia SINAMICS G120C y garantizar el correcto intercambio de datos con el bloque Compact PID.

- **BOOL:** Variable lógica que se utilizará para activar o desactivar funciones, tales como el arranque del variador o la habilitación del control PID.
- **REAL:** Valor en punto flotante que se empleará para la consigna de velocidad, la realimentación y los parámetros PID, permitiendo un control con mayor resolución.
- **USINT:** Entero sin signo de 8 bits que podrá representar estados codificados o la selección de funciones dentro del bloque de comunicación.
- **WORD:** Palabra de 16 bits destinada a contener datos de control o estado, siendo especialmente útil dentro de la estructura del telegrama en PROFINET.
- **HW_IO:** Variable vinculada directamente al hardware del PLC, que se utilizará para la asignación de entradas y salidas físicas o virtuales, garantizando la interacción con el variador.
- Estas variables conformarán la base de la comunicación entre el bloque Compact PID, el bloque SINA_SPEED TLG20 y el variador de frecuencia, asegurando la integración del sistema de control.

En la Figura 1 se mostrarán las principales variables utilizadas en la configuración del bloque SINA_SPEED_TLG20 dentro de TIA Portal, lo que permitirá visualizar de manera práctica su implementación en el proyecto.

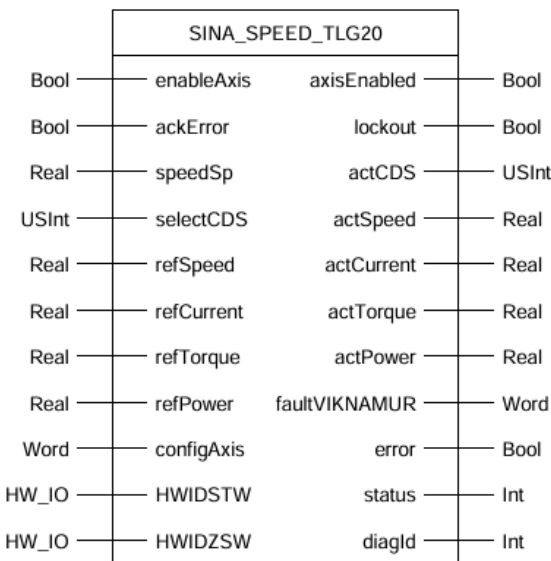


FIGURA 1 _ Bloque Sina Speed Telegrama 20

En las (Tablas 2 y 3) se describirá la función de cada variable de salida y entrada para el bloque SINA_SPEED_TLG20.

NOMBRE	TIPO DE VARIABLE DE ENTRADA	DESCRIPCIÓN
enableAxis	Bool	Bit de activación de la unidad
ackError	Bool	Bit de Reconocimiento de falla
SpeedSp	Real	Set point de velocidad en RPM
selelctCDS	Usint	Selección de conjunto de datos de parámetro 810 del variador de frecuencia
refSpeed	Real	Velocidad de referencia del parámetro 2000 del VFD
RefCurrent	Real	Corriente de Referencia Del variador de frecuencia
RefTorque	Real	Torque de Referencia
RefPower	Real	Potencia de referencia
ConfigAxis	Word	parámetro de entrada codificado en binario para controlar los bits de la palabra de control que no están disponibles como parámetros de entrada
HWIDSTW	HW_IO	Conecta entradas y salidas físicas al programa lógico del PLC. Las entradas y salidas pueden requerir referencias HW_IO para establecer comunicación con módulos de hardware.
HWIDZTW	HW_IO	Conecta entradas y salidas físicas al programa lógico del PLC. Las entradas y salidas pueden requerir referencias HW_IO para establecer comunicación con módulos de hardware.

TABLA 2 _ Variables de Entrada bloque Sina Speed TLG 20

NOMBRE	TIPO DE VARIABLE DE SALIDA	DESCRIPCIÓN
axis enable	Bool	1: Unidad Operando
lockout	Bool	1: Indica que la función de inhibición de encendido está activa, impidiendo el arranque del variador.
actCDS	Usint	Indica cuál de los conjuntos de datos de comando (Command Data Set, CDS) está activo en el variador. Un valor de 0 corresponde a CDS0, y un valor de 1 corresponde a CDS1.
actSpeed	Real	Velocidad real en rpm
actCurrent	Real	valor real de corriente en amperes
actTorque	Real	valor real de torque en NM
actPower	Real	valor real de potencia activa en KW
FaultViknamur	Word	Palabra de fallo según la definición establecida por los estándares VIK-NAMUR, utilizada para representar estados de error en sistemas de automatización."
error	Bool	1= Indica la presencia de un error en el bloque de función o en el variador de frecuencia.
status	Int	Status output 7002 = Fb operando 7xxx = Peligro 8xxx = Error en la descripcion
diagld	Int	Código de error de las funciones del Sistema

TABLA 3 _ Variables de salida Bloque Sina Speed TLG 20

1.5. CONTROL PID EN SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN

1.5.1. DEFINICIÓN

El control PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es una técnica ampliamente utilizada en sistemas de automatización para regular variables como velocidad, temperatura, presión y nivel. Su objetivo es minimizar el error entre la variable medida y la consigna establecida, asegurando un desempeño óptimo del sistema

1.5.2. CONCEPTO DE CONTROL EN LAZO CERRADO.

El control en lazo cerrado es una estrategia en la que la señal de salida del sistema es medida y retroalimentada para compararse con la consigna deseada. Con base en esta diferencia, el controlador ajusta la señal de control para minimizar el error. Este enfoque mejora la estabilidad y precisión en comparación con el control en lazo abierto.

1.5.3. FUNCIONAMIENTO DEL CONTROL PID (P, I Y D).

El controlador PID se compone de tres términos:

- Proporcional (P): Ajusta la señal de control en función de la magnitud del error. Un aumento en la ganancia proporcional mejora la respuesta, pero puede generar oscilaciones.
- Integral (I): Acumula el error a lo largo del tiempo y ajusta la salida para eliminar errores estacionarios.
- Derivativo (D): Predice la tendencia del error y realiza ajustes correctivos para mejorar la estabilidad y reducir la Sobreoscilacion.

Al combinar estos tres términos, se logra un equilibrio entre rapidez de respuesta, precisión y estabilidad.

La ecuación matemática del controlador PID en el dominio del tiempo es:

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + Kd \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Donde:

- $u(t)$: Señal de control (salida del PID)
- $e(t)$: Error entre valor deseado
- Kp : Ganancia proporcional
- Ki : ganancia Integral
- Kd : Ganancia derivativa

1.5.4. DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL PID

A continuación, se presenta un diagrama de bloques que representa la estructura del control PID en un sistema de lazo cerrado:

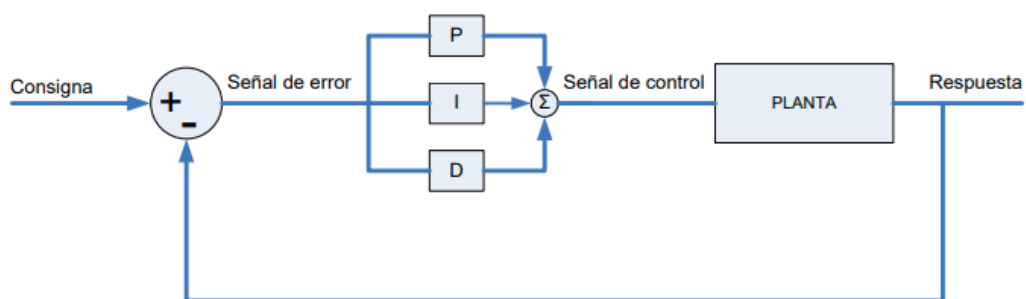


FIGURA 2 _ Diagrama de control PID

El diagrama de la (FIGURA 2) ilustra la interacción entre la consigna, el error, el controlador PID y la salida del sistema, destacando cómo cada componente contribuye a la regulación de la variable de proceso.

CAPITULO 2 DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL

2.1. INTRODUCCIÓN:

En este capítulo se describirá la arquitectura de hardware y software que se empleará para la implementación del sistema de control de velocidad. El objetivo será documentar de manera técnica los elementos que conformarán el montaje, tanto en términos de instrumentación como de infraestructura eléctrica y de comunicaciones, de manera que el lector disponga de un marco de referencia completo para la posterior ejecución de pruebas experimentales.

El sistema estará compuesto por los siguientes elementos principales:

- PC con TIA Portal y WinCC RT Advanced: se utilizará para la programación del PLC, la configuración del variador de frecuencia y la visualización de variables mediante una interfaz HMI. WinCC RT Advanced permitirá generar pantallas gráficas de supervisión, enviar consignas de velocidad al controlador y registrar tendencias en tiempo real de la respuesta del motor.
- PLC Siemens S7-1200: será el encargado de ejecutar la lógica de control y gestionar el bloque Compact PID, además de establecer la comunicación con el variador a través de PROFINET.
- Switch Ethernet industrial: se empleará para la interconexión física y lógica entre el PC, el PLC y el VFD, permitiendo la transmisión de telegramas de control y supervisión en tiempo real.
- Variador de frecuencia (VFD) SINAMICS G120C con motor de inducción trifásico: constituirá el elemento final encargado de recibir la consigna de velocidad desde el PLC y ajustar la frecuencia y tensión entregada al motor.
- Motor de inducción trifásico: actuará como el actuador final del sistema, cuya velocidad será regulada en función de la señal de control PID.

En cuanto a la alimentación eléctrica, el variador se conectará a la red de potencia trifásica de 380 V, desde la cual suministrará energía al motor. Por su parte, el PLC S7-1200 y el switch Ethernet recibirán alimentación a través de una red monofásica de 220 V CA, utilizando fuentes internas de conversión a 24 V CC en el caso del PLC. Esta separación entre el circuito de control y el circuito de potencia permitirá mantener una operación más segura y confiable, evitando interferencias y protegiendo los dispositivos de comunicación frente a sobrecargas.

La disposición que se mostrará en la Figura 3 constituirá la base sobre la cual se desarrollarán las pruebas de control PID. Una vez validada la comunicación mediante telegramas en PROFINET y confirmada la correcta alimentación de todos los equipos, será posible ejecutar variaciones de consigna y observar la respuesta dinámica del sistema frente a cambios en la velocidad del motor.

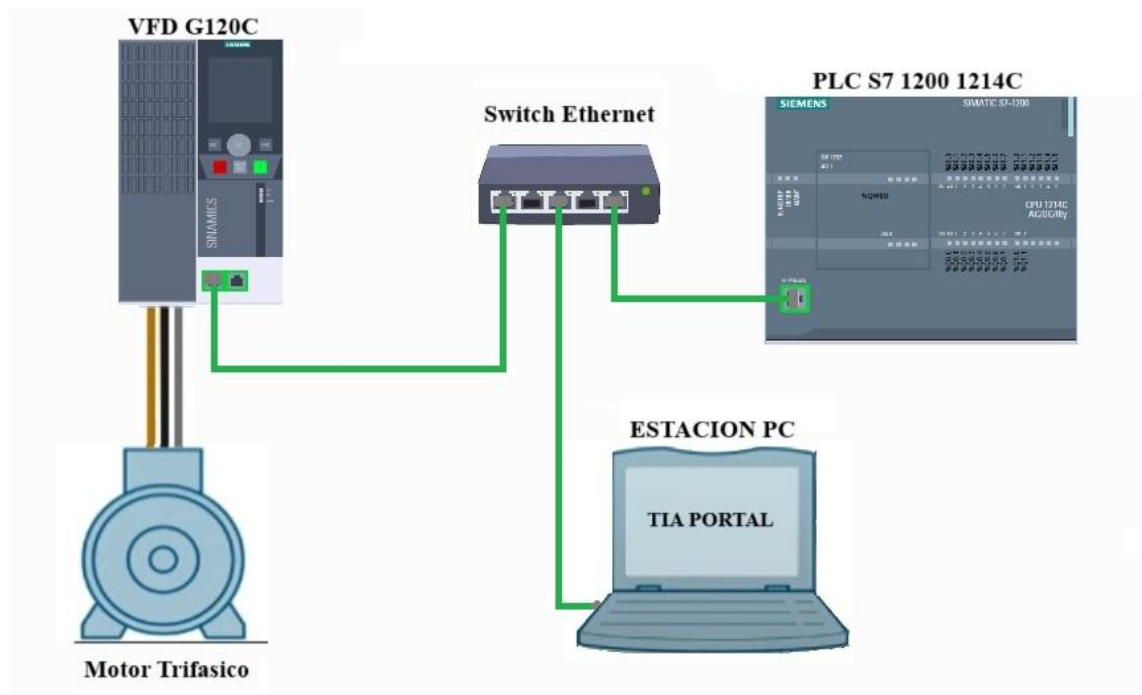


FIGURA 3 _ Conexión General de Sistema de Control

2.2. CARACTERIZTICAS DE LOS DISPOSITIVOS FISICOS

Tal como se presentó en la sección anterior, el sistema de control estará conformado por un conjunto de dispositivos interconectados que permitirán implementar, supervisar y validar el control PID de velocidad. Dentro de estos, tres equipos desempeñarán un papel fundamental: el PLC Siemens S7-1200, el variador de frecuencia SINAMICS G120C y el motor trifásico de inducción. Cada uno de ellos cumplirá una función específica dentro del sistema de automatización, garantizando la comunicación y el control externo desde el PLC hacia el variador.

El PLC S7-1200 se configurará como la unidad de control principal y será programado en el entorno TIA Portal para ejecutar el algoritmo PID y enviar la consigna de velocidad al variador a través de PROFINET. El variador SINAMICS G120C tendrá la tarea de regular la frecuencia de salida hacia el motor, ajustando de esta manera su velocidad de giro de acuerdo con la señal de consigna. Finalmente, el motor trifásico de inducción actuará como el elemento final controlado, operando en vacío y sin aplicación de carga mecánica, en concordancia con las restricciones establecidas en el proyecto.

A continuación, se presentarán las principales características técnicas de estos dispositivos, las cuales fundamentarán su selección y justificarán su integración en la arquitectura del sistema de control que se desarrollará.

2.2.1. VARIADOR SINAMICS G120C (6SL3210-1KE12-3UF2).

El SINAMICS G120C PN (Figura 4) es un variador de frecuencia de Siemens diseñado para aplicaciones de automatización industrial, destacándose por su compacidad, integración con PROFINET y capacidad de control vectorial de motores trifásicos.

Características Técnicas:

- Modelo: 6SL3210-1KE12-3UF2
- Tensión de alimentación: 3AC 380-480V
- Corriente nominal: 12.2 A
- Potencia nominal: 5.5 kW (7.5 HP)
- Frecuencia de salida: 0 - 550 Hz
- Método de control: V/f, Vectorial Sensorless
- Interfaz de comunicación: PROFINET, USS, Modbus RTU
- Protección: IP20
- Modulación PWM para ajuste preciso de velocidad

El variador SINAMICS G120C, es compatible con los métodos de control vectorial y escalar, (Ver capítulo 1.1.3.). A través de la configuración y análisis del sistema, se verificará la posibilidad de utilizar el control vectorial para la regulación de velocidad.



FIGURA 4 _ VFD Sinamics G120C

2.2.2. MOTOR TRIFÁSICO VEM KPER 71 K2.

El VEM KPER 71 K2 (Figura 5) es un motor trifásico de inducción fabricado por VEM Motors, reconocido por su robustez y eficiencia en aplicaciones industriales. A continuación, se detallan sus principales características técnicas:

- Potencia nominal: 0,37 kW (0,5 HP)
- Velocidad nominal: 2740 RPM
- Frecuencia de operación: 50 Hz
- Tensión de alimentación: 230/400 V (conexión Δ/Y)
- Corriente nominal: 1,7 A (en conexión estrella)
- Eficiencia: 67,0%
- Factor de potencia: 0,84
- Clase de protección: IP55, adecuada para entornos industriales con presencia de polvo y humedad.
- Clase de aislamiento: F, permitiendo una temperatura máxima de operación de 155°C.
- Peso aproximado: 14 kg

Este motor es ideal para aplicaciones que requieren un control preciso de velocidad y torque, especialmente cuando se utiliza en conjunto con variadores de frecuencia como el SINAMICS G120C. Su diseño compacto y eficiente lo convierte en una opción confiable para diversas aplicaciones industriales



FIGURA 5 _ Motor trifásico KPER 71 K2.

2.2.3. PLC Siemens S7-1200 (1214C AC/DC/RLY)

El Siemens S7-1200 1214C AC/DC/RLY (Figura 6) es un PLC modular de alto rendimiento diseñado para aplicaciones de automatización industrial. Su capacidad de procesamiento rápido, comunicación mediante PROFINET y compatibilidad con TIA Portal lo hace ideal para la integración con variadores de frecuencia y sistemas de control avanzados.

Características técnicas:

- Modelo: CPU 1214C AC/DC/RLY
- Voltaje de alimentación: 85-264V AC
- Entradas digitales: 14 (24V DC)
- Salidas digitales: 10 (Relé)
- Memoria de programa: 100 KB
- Ciclo de escaneo: ≤ 1 ms para instrucciones básicas
- Puertos de comunicación: PROFINET integrado
- Compatibilidad: Soporta programación en Ladder (LAD), Texto estructurado (ST), FBD y SCL en TIA Portal

El PLC S7-1200 ha sido seleccionado debido a las siguientes características:

- I. Compatibilidad con el variador SINAMICS G120C, permitiendo establecer la comunicación mediante PROFINET.
- II. Capacidad de integración con bloques funcionales en TIA Portal, facilitando la verificación del sistema de control de velocidad.
- III. Facilidad de programación y escalabilidad, permitiendo futuras aplicaciones en entornos industriales.
- IV. Interfaces de comunicación avanzadas, que garantizan una conexión eficiente con el variador y otros dispositivos.

Este enfoque permitirá comprobar la correcta configuración y funcionamiento de la comunicación entre el PLC y el variador, sentando las bases para futuras implementaciones en sistemas de automatización industrial.

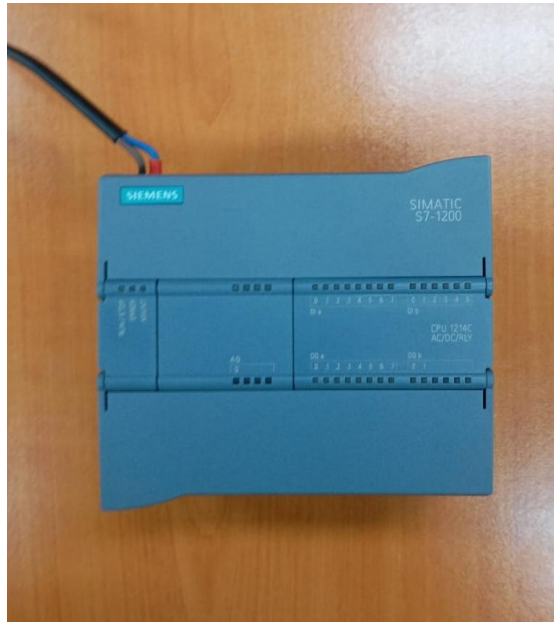


FIGURA 6 _ PLC S7 1200

2.3. CONEXIÓN FÍSICA DEL SISTEMA

Para llevar a cabo la implementación de un sistema de control PID externo sobre un variador de frecuencia, es fundamental establecer una conexión física adecuada entre todos los dispositivos involucrados. Esta conexión debe asegurar tanto la comunicación eficiente de datos como el suministro eléctrico correcto, lo que permite la correcta operación y pruebas del sistema en condiciones reales.

2.3.1. RED DE COMUNICACIÓN PROFINET

Con el fin de garantizar una comunicación estable y rápida entre el PLC Siemens S7-1200, el variador SINAMICS G120C y el computador utilizado para la programación en TIA Portal, se debe conformar una red local industrial bajo el protocolo PROFINET. Para ello, se utiliza un switch Ethernet, que actúa como concentrador de red, permitiendo que los tres dispositivos estén interconectados y puedan intercambiar información en tiempo real.

La elección de PROFINET como protocolo de comunicación se debe a su alta velocidad, bajo tiempo de respuesta y compatibilidad directa con los dispositivos Siemens, lo cual es ideal para sistemas de control industrial. Esta red se construye físicamente mediante cables

Ethernet con conectores RJ45, que permiten el envío y recepción de datos bajo el estándar TCP/IP adaptado a la automatización industrial.

Una vez conectados todos los dispositivos al switch, se debe proceder a la asignación manual de direcciones IP desde el software TIA Portal. Es importante que todas las IP pertenezcan al mismo rango de red (por ejemplo, 192.168.0.X), lo cual asegura que los dispositivos se reconozcan entre sí dentro del entorno de red. La correcta configuración de estas direcciones es esencial para que el bloque SINA_SPEED TLG20 pueda establecer una conexión efectiva entre el PLC y el variador.

2.3.2. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

La alimentación de los equipos debe realizarse de acuerdo con sus requerimientos específicos de tensión y tipo de red:

- El variador de frecuencia SINAMICS G120C requiere conexión a una red trifásica de 380 V, ya que esta es la tensión estándar industrial necesaria tanto para el funcionamiento interno del variador como para el suministro de energía al motor trifásico de inducción conectado a su salida. Esta conexión trifásica le permite al variador generar una señal de salida de frecuencia y voltaje variables, condición necesaria para controlar la velocidad del motor.
- El PLC S7-1200, en cambio, opera con una alimentación monofásica de 220 V. Esta tensión es suficiente para energizar el procesador del PLC, sus módulos de entradas/salidas, así como para mantener activa la ejecución del algoritmo de control PID. Al alimentar el PLC por separado del variador, se mejora la seguridad del sistema, se evita la propagación de perturbaciones eléctricas entre los dispositivos y se facilita el mantenimiento.
- El computador de desarrollo se conecta mediante su propia fuente estándar, pero es recomendable que esté en la misma red física que los dispositivos, para poder acceder a ellos mediante TIA Portal.

2.3.3. CONSIDERACIONES DE PUESTA EN MARCHA

Una vez establecida la conexión física y completada la configuración de red y alimentación, se puede proceder a:

- Probar la comunicación PROFINET, verificando desde el diagnóstico online que el PLC reconoce al variador y viceversa.
- Ejecutar pruebas de control de velocidad, observando el comportamiento del motor.

Este diseño de conexión física, además de cumplir con los requerimientos técnicos, garantiza un entorno seguro y controlado para desarrollar pruebas de automatización, validar el modelo de control y comprobar la viabilidad de establecer un sistema de regulación de velocidad desde el PLC, sin depender del control interno del variador.

2.4. CONFIGURACIÓN DEL VARIADOR G120C EN TIA PORTAL

La integración del variador de frecuencia SINAMICS G120C en el entorno de programación TIA Portal constituye un paso esencial para habilitar la comunicación con el PLC Siemens S7-1200 y establecer las condiciones necesarias para la implementación del sistema de control PID externo. Este proceso se lleva a cabo mediante la herramienta StartDrive, un módulo integrado en TIA Portal específicamente diseñado para la configuración de variadores Siemens. StartDrive proporciona una interfaz gráfica avanzada que permite realizar la parametrización estructurada y visual del variador, simplificando la definición de los parámetros de control, entradas y salidas, así como los modos de operación.

En este apartado se detalla de forma sistemática el procedimiento seguido para la correcta integración del variador al proyecto de automatización. El proceso incluye la incorporación del SINAMICS G120C al hardware del proyecto, la selección precisa de la versión de firmware, la definición del tipo de aplicación industrial, la asignación del PLC como unidad de comando, la selección del telegrama de comunicación (específicamente el Telegrama 20, compatible con el bloque SINA_SPEED TLG20), y la introducción manual de los datos eléctricos del motor trifásico utilizados en el sistema.

Cada una de estas etapas se documenta con imágenes descriptivas numeradas, que permiten visualizar claramente el procedimiento realizado en el entorno de programación. Esto garantiza la trazabilidad técnica de la configuración, la coherencia en la comunicación entre dispositivos, y asegura que el bloque SINA_SPEED TLG20 pueda interactuar correctamente con el variador, tanto para el envío de consignas de velocidad como para la recepción de variables de realimentación necesarias para el control PID implementado en el PLC.

2.4.1. PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y CONFIGURACIÓN MEDIANTE STARTDRIVE.

La correcta configuración del variador de frecuencia SINAMICS G120C en el entorno TIA Portal, utilizando la herramienta StartDrive, es un paso fundamental para garantizar la compatibilidad con el PLC S7-1200 y permitir el desarrollo del sistema de control. Este proceso facilita la parametrización del variador de forma gráfica y estructurada, asegurando la correcta integración con la red PROFINET y el bloque funcional SINA_SPEED TLG20.

El primer paso consiste en incorporar el variador al proyecto de TIA Portal mediante StartDrive. En la imagen (Figura 7) se observa el proceso de selección del modelo y versión del firmware del variador, lo cual es indispensable para asegurar la compatibilidad con el hardware del PLC y el entorno de desarrollo.

Es fundamental seleccionar correctamente la versión del firmware, ya que esta determina la compatibilidad exacta entre el variador y el entorno de desarrollo TIA Portal, así como con el PLC S7-1200. Elegir la versión adecuada garantiza que todas las funciones específicas del variador estén disponibles, que la comunicación PROFINET funcione sin errores y que se eviten incompatibilidades que podrían afectar la estabilidad y el desempeño del sistema de control.

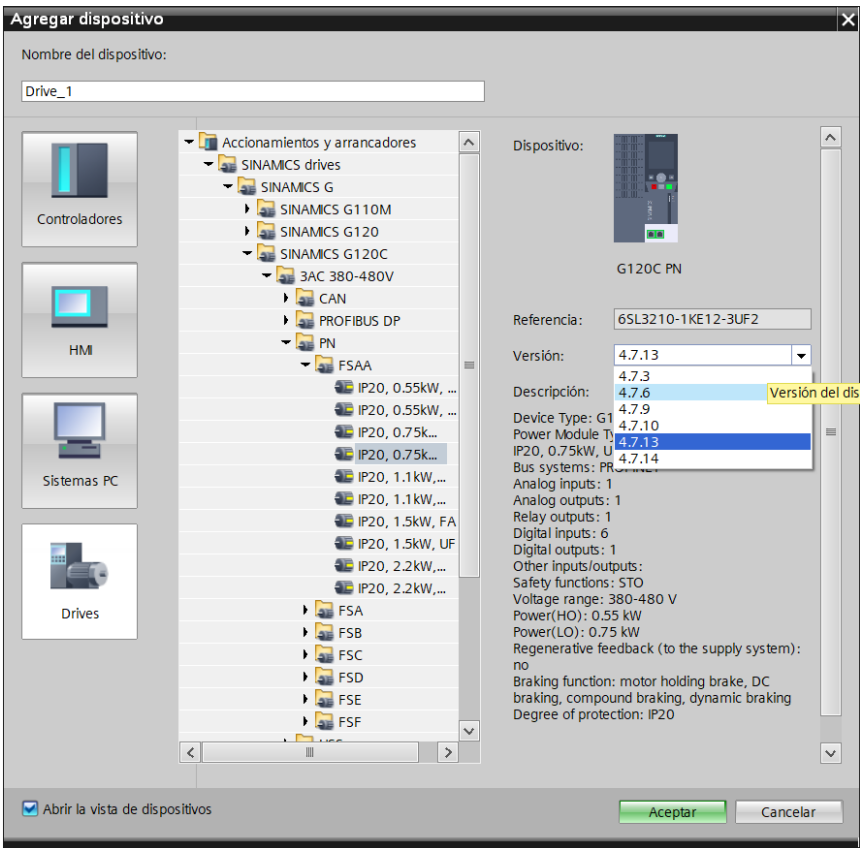


FIGURA 7 _ Versión VFD

A continuación, se comienza la configuración del variador SINAMICS G120C en StartDrive, donde se selecciona el tipo de aplicación. En este caso, se elige la opción Standard, que permite un control básico y eficiente del motor sin requerir configuraciones avanzadas. Esta selección define los parámetros iniciales del variador, estableciendo una base para su integración con el PLC S7-1200 y la comunicación mediante PROFINET.

La selección del modo Standard Drive Control, (ver Figura 8), es necesaria porque proporciona una configuración básica y confiable para el control del variador, adecuada para aplicaciones típicas donde se requiere un manejo eficiente y directo del motor. Este modo simplifica la parametrización inicial y garantiza una operación estable sin necesidad de ajustes avanzados, facilitando la integración con el PLC y asegurando un control efectivo de la velocidad en entornos industriales estándar.

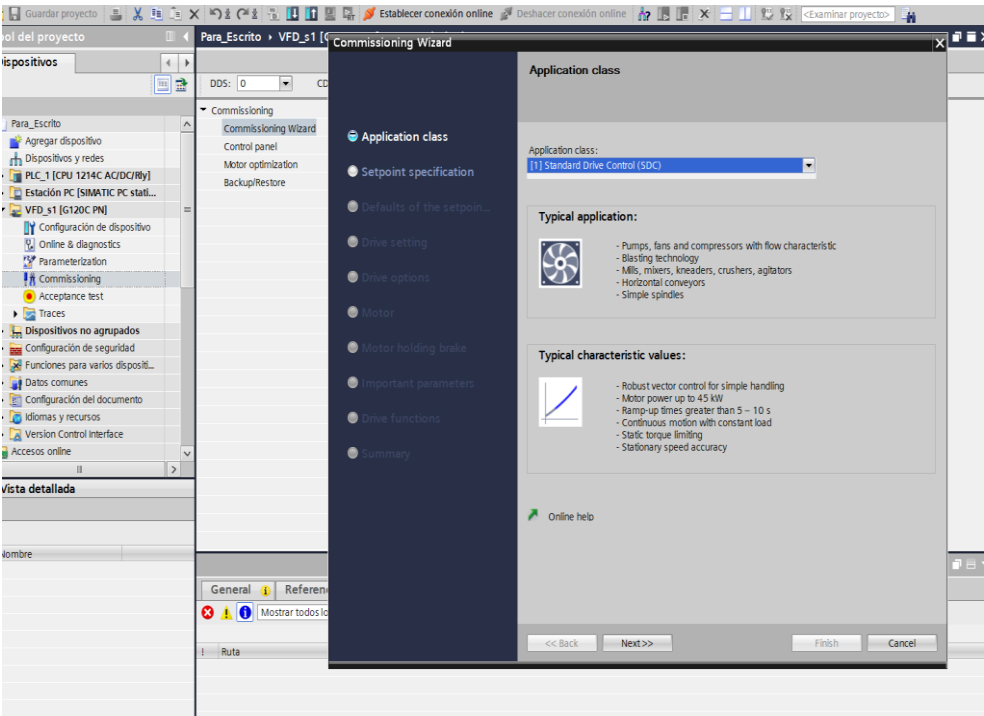


FIGURA 8 _ Tipo de aplicación

El siguiente paso consiste en establecer cuál de los dispositivos será responsable de enviar las órdenes de control. En este caso, se selecciona al PLC Siemens S7-1200 como unidad de comando del variador SINAMICS G120C, decisión fundamental para estructurar un sistema de control centralizado. Esta configuración se lleva a cabo dentro del entorno StartDrive, donde se define que el control de velocidad y la gestión del sistema se ejecuten directamente desde el programa cargado en el PLC, en lugar de utilizar el control interno del variador.

De este modo, el variador recibirá las consignas de velocidad, los comandos de activación y la lógica de control generada desde el PLC. La asignación del PLC S7-1200 como unidad de comando del variador dentro de StartDrive puede apreciarse en la Figura 9, donde se muestra la configuración que habilita este esquema de control centralizado.

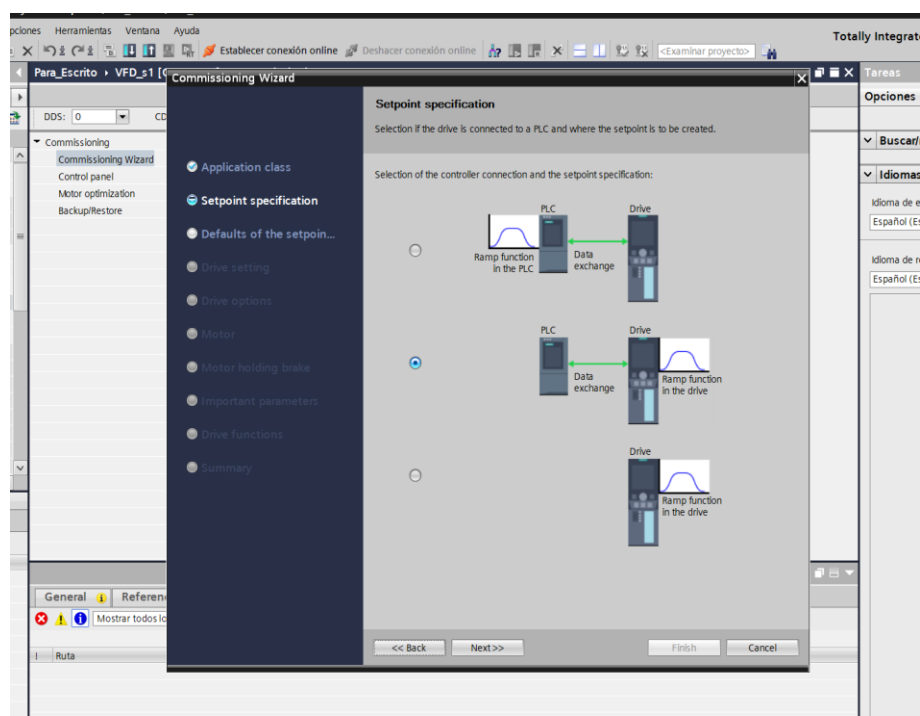


FIGURA 9 _ Selección de unidad de Comando

Una vez establecida la relación jerárquica entre el PLC y el variador, el siguiente paso consiste en configurar la comunicación PROFINET entre ambos dispositivos. Esta se basa en el uso de telegramas de datos cíclicos, que determinan qué señales serán enviadas y recibidas en tiempo real. En este proyecto se selecciona el Telegrama 20 (SINA_SPEED TLG20), diseñado específicamente para aplicaciones de control de velocidad mediante bloques funcionales en TIA Portal, como el Compact PID.

La elección de este telegrama habilita el intercambio de variables esenciales como la consigna de velocidad, el estado operativo del variador y parámetros de diagnóstico. Con ello se garantiza la compatibilidad con el bloque funcional SINA_SPEED TLG20, asegurando una comunicación estable y estandarizada que resulta fundamental para el correcto funcionamiento del sistema de control implementado. La selección del Telegrama 20 en el entorno StartDrive se muestra en la Figura 10, donde se observa cómo se establece este método de intercambio de datos entre el PLC y el variador.

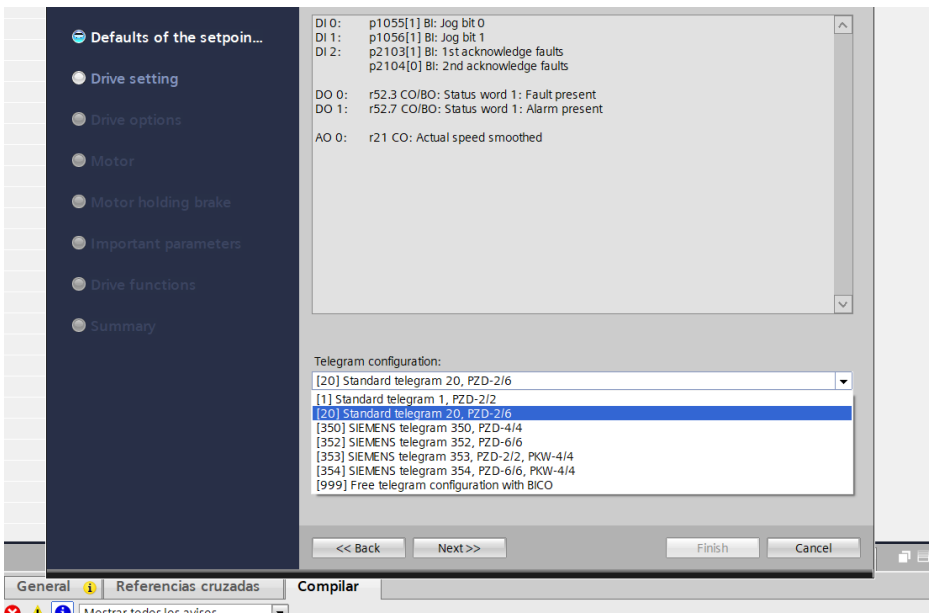


FIGURA 10 _ Selección Telegrama 20

Una vez configurado el Telegrama 20 (SINA_SPEED TLG20) para la comunicación entre el PLC y el variador, el siguiente paso será ingresar en StartDrive las especificaciones del motor. Este proceso es fundamental para garantizar que el variador SINAMICS G120C opere de forma correcta y segura con el motor seleccionado para el proyecto.

En esta etapa se definen parámetros eléctricos como la potencia nominal, corriente, frecuencia, voltaje y velocidad nominal. Estos valores permiten que el variador ajuste de manera óptima su control de velocidad y torque, asegurando un desempeño eficiente del sistema. La precisión en el ingreso de estos datos resulta esencial, ya que constituyen la base de los algoritmos de control del variador.

Un registro inexacto de los parámetros podría generar respuestas inadecuadas, reduciendo la eficiencia energética, afectando la estabilidad en la operación y comprometiendo la precisión de la regulación. Por el contrario, una configuración correcta no solo garantiza un control confiable, sino que también protege tanto al motor como al variador frente a sobrecargas o condiciones de operación inadecuadas, extendiendo la vida útil del equipo. La configuración de estos parámetros eléctricos del motor en StartDrive se observa en la Figura 11.

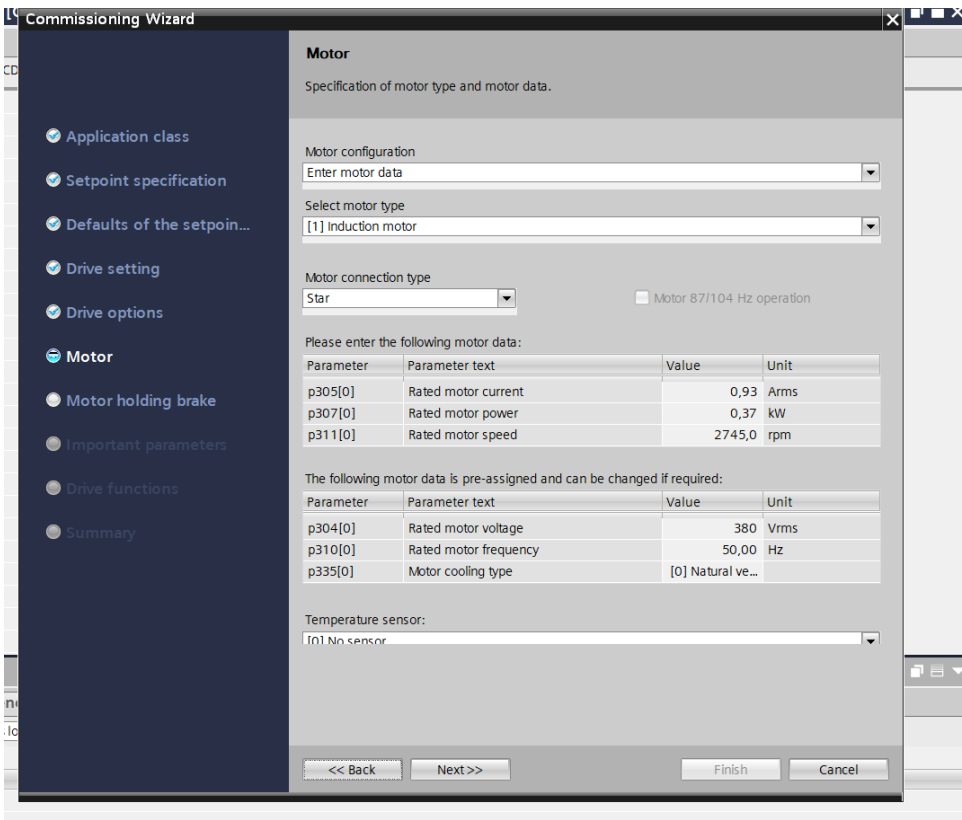


FIGURA 11 _ Configuración parámetros Motor

Tras el ingreso manual de las especificaciones del motor en StartDrive, resulta recomendable llevar a cabo una identificación automática de datos del motor durante la primera puesta en marcha. Este procedimiento permite que el variador ajuste de manera interna ciertos parámetros, con el objetivo de optimizar el control de velocidad y mejorar la precisión en la regulación.

La función de identificación realiza una prueba inicial que mide y registra características propias del motor, como la resistencia del estator y los parámetros de magnetización. Gracias a esta información, el variador puede adaptar sus algoritmos de control, logrando un desempeño más estable, eficiente y confiable. Además, esta práctica reduce la probabilidad de errores en la operación del sistema, asegurando un control de velocidad adecuado desde el inicio de la puesta en marcha.

La activación de este procedimiento se realiza en el entorno StartDrive, tal como se observa en la Figura 12.

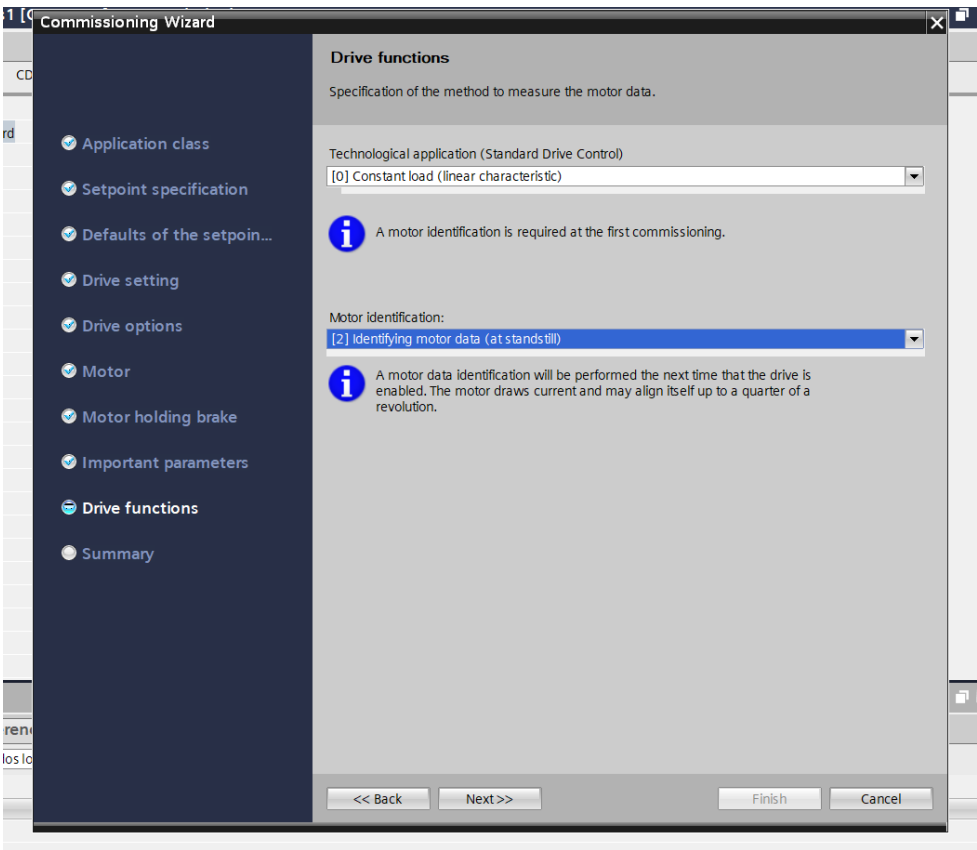


FIGURA 12 _ Identificación de datos del Motor

2.5. SELECCIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL PLC Y HMI

Como parte fundamental en el desarrollo del sistema de control, resulta indispensable incorporar de manera adecuada el PLC Siemens S7-1200 dentro del proyecto en TIA Portal. Esta etapa es determinante para garantizar la compatibilidad con el variador SINAMICS G120C, dado que el PLC cumple la función de enviar la consigna de velocidad y procesar la retroalimentación necesaria para el control PID. La selección del modelo debe realizarse con precisión, considerando tanto la referencia exacta del equipo físico como la versión de firmware disponible, lo cual asegura una comunicación estable mediante PROFINET y una integración confiable con el resto de los componentes del sistema.

En este proceso, es fundamental verificar que la referencia del modelo y la versión de firmware correspondan exactamente al dispositivo físico utilizado en el laboratorio (ver Figura 13). Esta validación garantiza la compatibilidad con los bloques de programación que se aplicarán posteriormente, permitiendo la correcta descarga del programa al hardware y estableciendo la comunicación por PROFINET entre el PLC, el variador y la interfaz HMI del sistema.

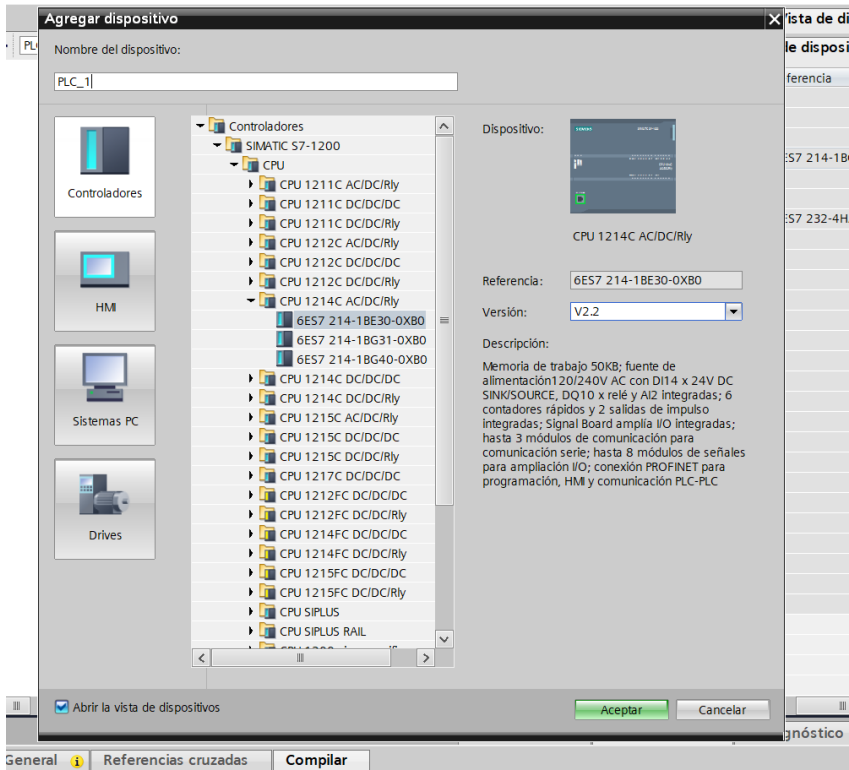


FIGURA 13_ Incorporación PLC

Como parte de la interfaz de supervisión del sistema de control, se deberá incorporar el HMI dentro del proyecto en TIA Portal, utilizando la plataforma WinCC Advanced. Esta configuración permitirá al operador visualizar en tiempo real las variables críticas del proceso, como la velocidad del motor y los parámetros del control PID, además de ajustar manualmente las consignas cuando sea necesario. Para garantizar la comunicación con el PLC S7-1200, se deberá incluir en la estación HMI un módulo de comunicación PROFINET IE General, habilitando así el intercambio de datos dentro de la red industrial.

La incorporación del HMI con el módulo PROFINET IE General, (ver Figura 14), permitirá establecer un canal de comunicación estable con el PLC, asegurando la transferencia bidireccional de datos de proceso y configuraciones. Esta configuración es fundamental para el correcto monitoreo y control del sistema desde la interfaz gráfica, facilitando la validación visual del comportamiento del control PID implementado.

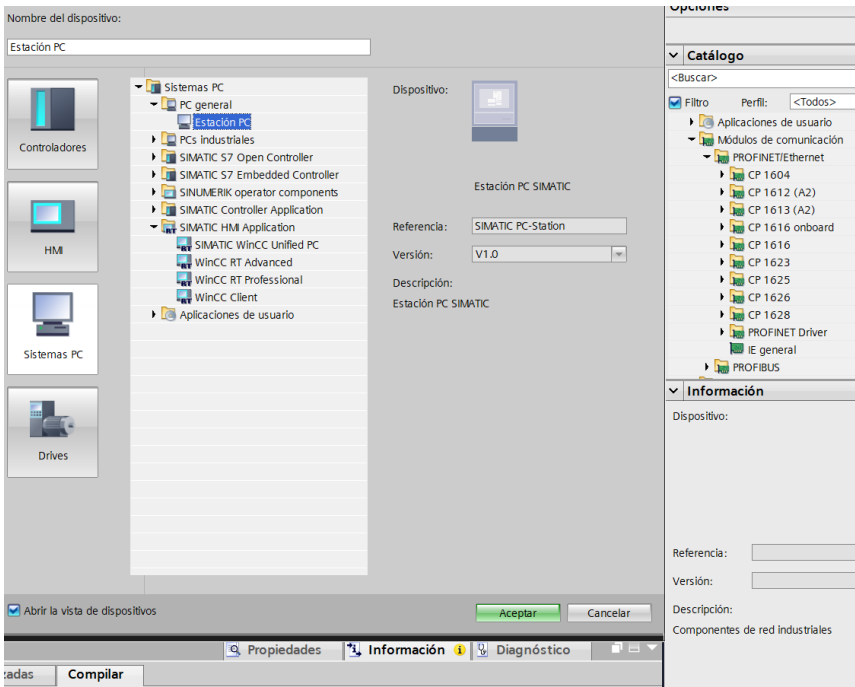


FIGURA 14 _ Estación PC

2.6. CONFIGURACION DE LA COMUNICACIÓN PROFINET

Para establecer la comunicación entre el PLC S7-1200, el variador SINAMICS G120C y la HMI, se deberá configurar la red PROFINET en TIA Portal. Esta configuración permitirá la transmisión eficiente de datos entre los dispositivos, asegurando el correcto funcionamiento del sistema de control de velocidad. Cada equipo deberá contar con una dirección IP única dentro de la red, evitando conflictos y garantizando una comunicación estable.

La topología de la red PROFINET, (ver Figura 15), mostrará la conexión de los dispositivos y la asignación de sus direcciones IP respectivas. Esta disposición permitirá que el PLC S7-1200 actúe como controlador principal, gestionando la comunicación con el variador a través de los bloques SINA_SPEED TLG20 y Compact PID, mientras que la HMI facilitará la visualización y monitoreo en tiempo real de las variables del sistema.

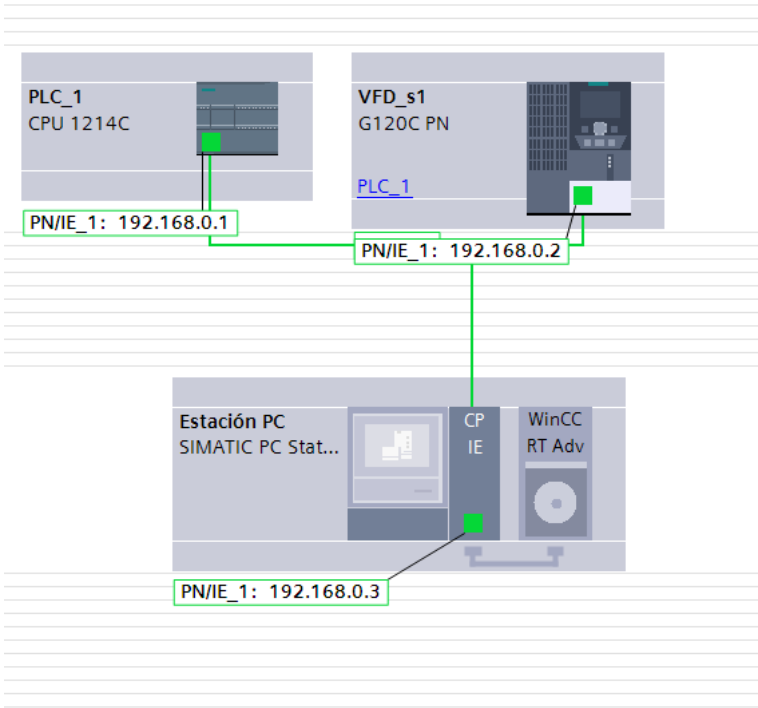


FIGURA 15 _ Topología de red

2.7. CONFIGURACION DE LA PROGRAMACION

En este punto se detalla la configuración de la programación en TIA Portal, incluyendo la definición de variables, la asignación de parámetros en los bloques de control y la normalización de señales para garantizar una correcta comunicación entre el PLC y el variador de frecuencia.

2.7.1. DEFINICION DE VARIABLES EN TIA PORTAL

En el sistema de control se podrá trabajar principalmente con tres variables de velocidad, estas serán deseada, real y controlada. La velocidad deseada corresponderá al setpoint que se ingresará desde el HMI; la velocidad real será la señal de retroalimentación que se obtendrá desde el motor a través del variador; y la velocidad controlada representará la salida generada por el bloque Compact PID para corregir el error entre la consigna y la velocidad medida.

Todas estas variables serán sometidas a procesos de normalización y escalado, de modo que sus valores puedan ser interpretados correctamente tanto por el controlador PID como por el bloque de comunicación SINA_SPEED TLG20, garantizando la coherencia entre las consignas, la realimentación y la señal de control que se aplicará al variador.

En la Figura 16 se puede ver el listado de estas Variables obtenidas directamente de Tía portal.

Variables PLC								
	Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Accesi..	Escrib...	Visibl..
	Velocidad Deseada	Tabla de variables ...	Real	%MD100	☐	☒	☒	☒
	Velocidad Real	Tabla de variables ...	Real	%MD104	☐	☒	☒	☒
	Velocidad Controlada	Tabla de variables ...	Real	%MD108	☐	☒	☒	☒
	Activar VFD	Tabla de variables ...	Bool	%M1.0	☐	☒	☒	☒
	Activar PID	Tabla de variables ...	Bool	%M1.1	☐	☒	☒	☒
	VC_escalada	Tabla de variables ...	Real	%MD112	☐	☒	☒	☒
	VR_Normalizada	Tabla de variables ...	Real	%MD116	☐	☒	☒	☒
	VR_Escalada	Tabla de variables ...	Real	%MD120	☐	☒	☒	☒
	VD_Normalizada	Tabla de variables ...	Real	%MD124	☐	☒	☒	☒
	VD_Escalada	Tabla de variables ...	Real	%MD128	☐	☒	☒	☒
	VC_Normalizada	Tabla de variables ...	Real	%MD132	☐	☒	☒	☒
	<Agregar>				☐	☒	☒	☒

FIGURA 16_ Variables PLC

2.7.2. Bloque SINA SPED TLG 20

Para la comunicación entre el PLC S7-1200 y el variador SINAMICS G120C, se emplea el bloque de función SINA_SPEED TLG20. Este bloque forma parte de la librería extendida de TIA Portal, por lo que es necesario descargarlo previamente desde la página oficial de Siemens.

Se definieran las siguientes configuraciones clave:

- Asignación de los parámetros de referencia de corriente, velocidad, torque y potencia obtenidos directamente del variador. (Ver punto 2.7.3.)
- Enlace con las variables de control del PID para enviar la consigna de velocidad.
- Configuración del telegrama de comunicación.

La configuración del bloque SINA_SPEED TLG20 se realizará definiendo las variables de referencia y control necesarias para la comunicación con el variador de frecuencia, (ver Figura 17). Este paso es fundamental para asegurar la correcta transmisión de datos entre el bloque y el controlador, garantizando que la consigna de velocidad y la retroalimentación del sistema se interpreten de manera precisa.

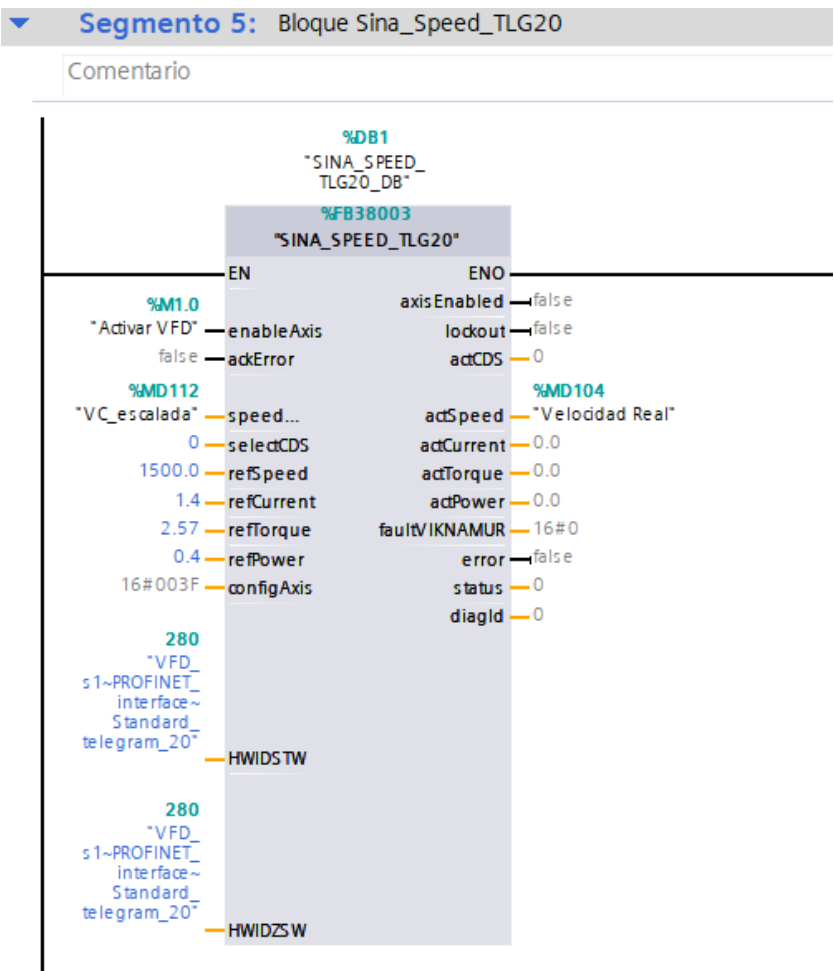


FIGURA 17 _ Configuración bloque SINA SPEED TLG 20

2.7.3. Parámetros del variador para el bloque SINA_SPEED TLG20

Para que el bloque SINA_SPEED TLG20 funcione correctamente, es necesario registrar los parámetros de referencia del variador de frecuencia, incluyendo corriente, velocidad, torque y potencia. Estos valores deben ser obtenidos directamente desde el variador SINAMICS G120C y luego ingresados en el bloque SINA_SPEED TLG20.

Se debe realizar la búsqueda y selección de estos parámetros en el panel táctil del variador enumerados como p2000, p2002, p2003 y p2004, (ver Figura 18) este paso es crucial para la correcta operación del sistema y la transmisión precisa de datos al controlador.

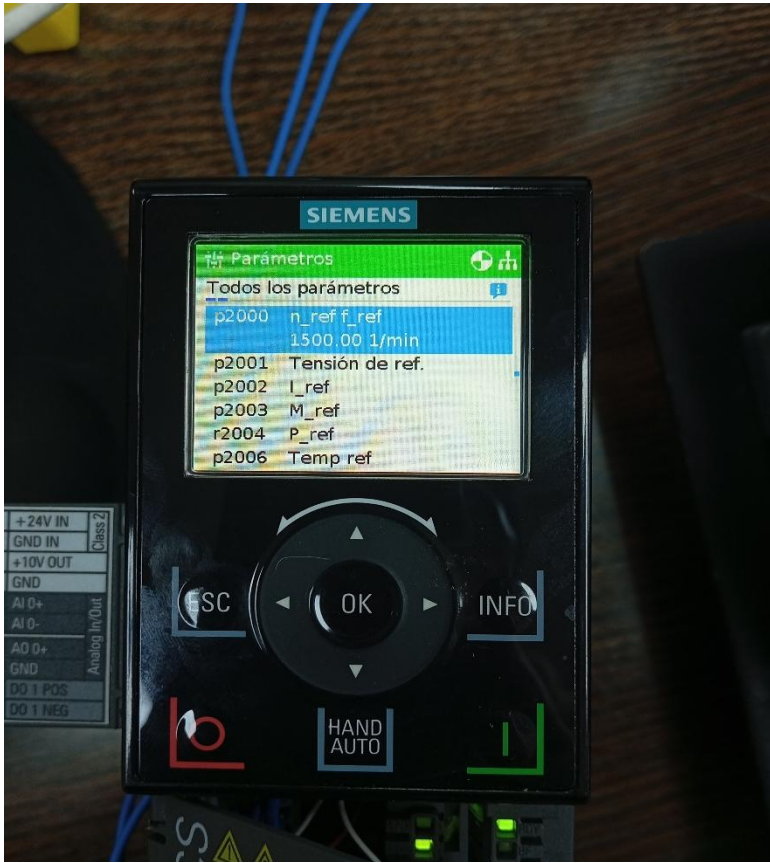


FIGURA 18 _ Parámetros de referencia VFD

2.7.4. Configuración del bloque Compact PID en el PLC.

Para realizar las pruebas de control PID, se utilizará el bloque de función Compact PID en TIA Portal. Los parámetros de proporcionalidad e integración se ajustarán de manera empírica para evaluar la respuesta dinámica del sistema ante cambios en la consigna de velocidad.

Dentro del bloque se configurarán las siguientes variables:

- VD_Escalada: Representa el valor deseado escalado de velocidad del motor, que será modificado directamente desde el HMI para generar variaciones de consigna.
- VR_Escalada: Recibe la velocidad real escalada del motor.
- Velocidad_Controlada: Indica la salida del control PID, que se aplicará al variador para ajustar la velocidad del motor.

Se utilizará la herramienta de control PID interno del bloque Compact PID, desde la cual se obtendrán las variables de control y se podrán modificar directamente mediante el HMI. La correcta configuración de estas variables de entrada y salida asegurará que las consignas de velocidad y la retroalimentación se procesen adecuadamente, permitiendo una ejecución eficiente del algoritmo PID en el proyecto, (ver Figura 19).

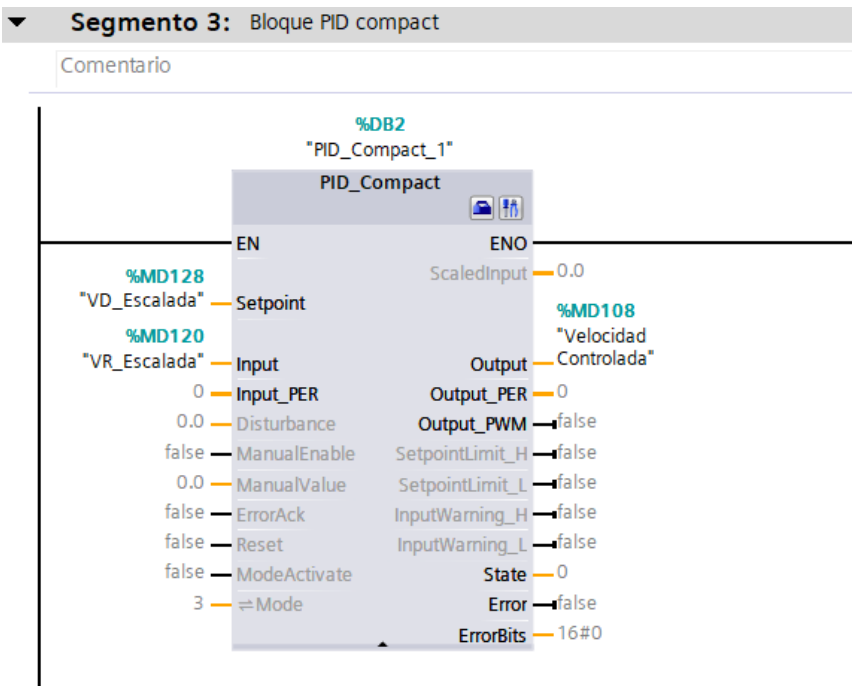


FIGURA 19 _ Configuración PID Compact

2.8. NORMALIZACION Y ESCALADO DE VARIABLES

Para que los bloques de escalado y normalización funcionen correctamente, será necesario configurar los rangos y factores de adaptación de las variables de consigna, velocidad real y velocidad controlada. Estos ajustes se realizarán directamente en TIA Portal, asegurando que los valores de entrada y salida del bloque Compact PID y del variador SINAMICS G120C sean compatibles.

Se deberá definir cuidadosamente cada parámetro de escalado y normalización, (ver Figura 20 y Figura 21), ya que este paso es crucial para garantizar la transmisión precisa de datos y la correcta operación del sistema de control de velocidad.

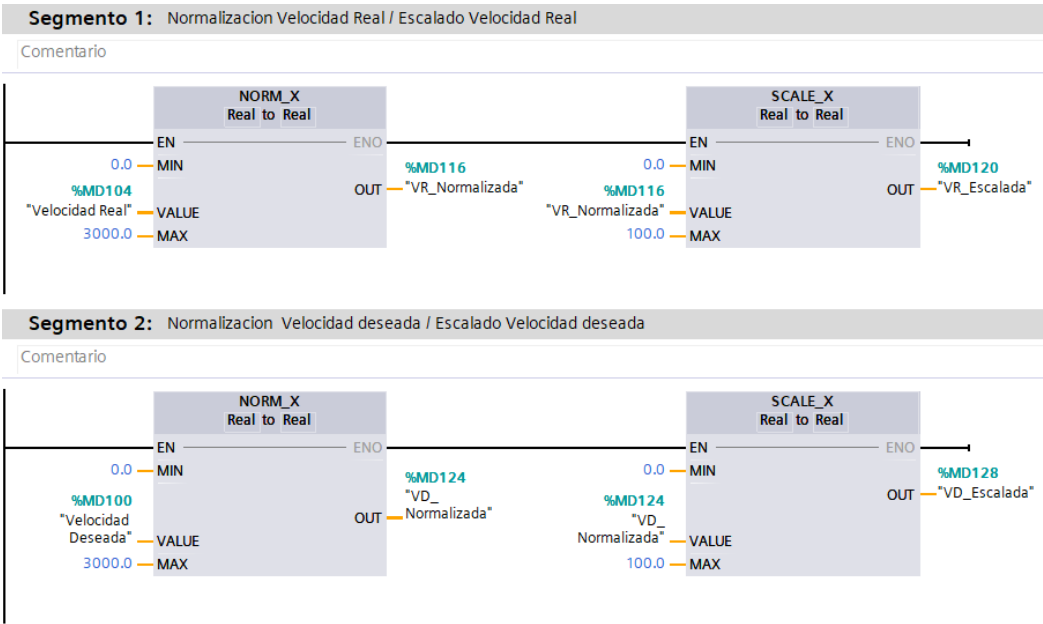


FIGURA 20 _ Normalización Entrada a Compact PID

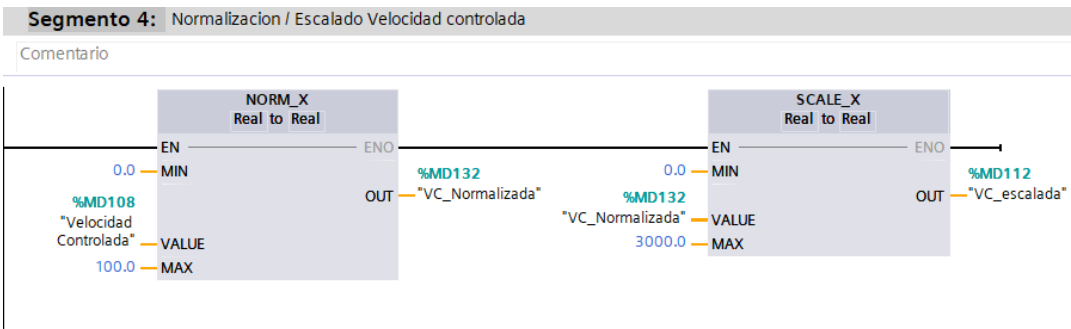


FIGURA 21 _ Normalización salida de Compact PID

**CAPITULO 3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y VALIDACIÓN
EMPÍRICA DEL CONTROL PID**

3.1. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Previo a la ejecución de las pruebas empíricas del control PID, se deberán realizar pruebas de funcionamiento general con el fin de comprobar que cada uno de los componentes del sistema esté operativo y correctamente interconectado. Estas pruebas permitirán validar el estado de la red PROFINET, el intercambio de variables entre el PLC y el variador, y el correcto funcionamiento de los bloques de control programados en TIA Portal.

Se deberá verificar que el PLC S7-1200, el variador SINAMICS G120C y la interfaz HMI se comuniquen dentro de la red PROFINET, (Ver Figura 22). Esta validación es fundamental para garantizar el envío de consignas de velocidad y la lectura de variables de proceso.

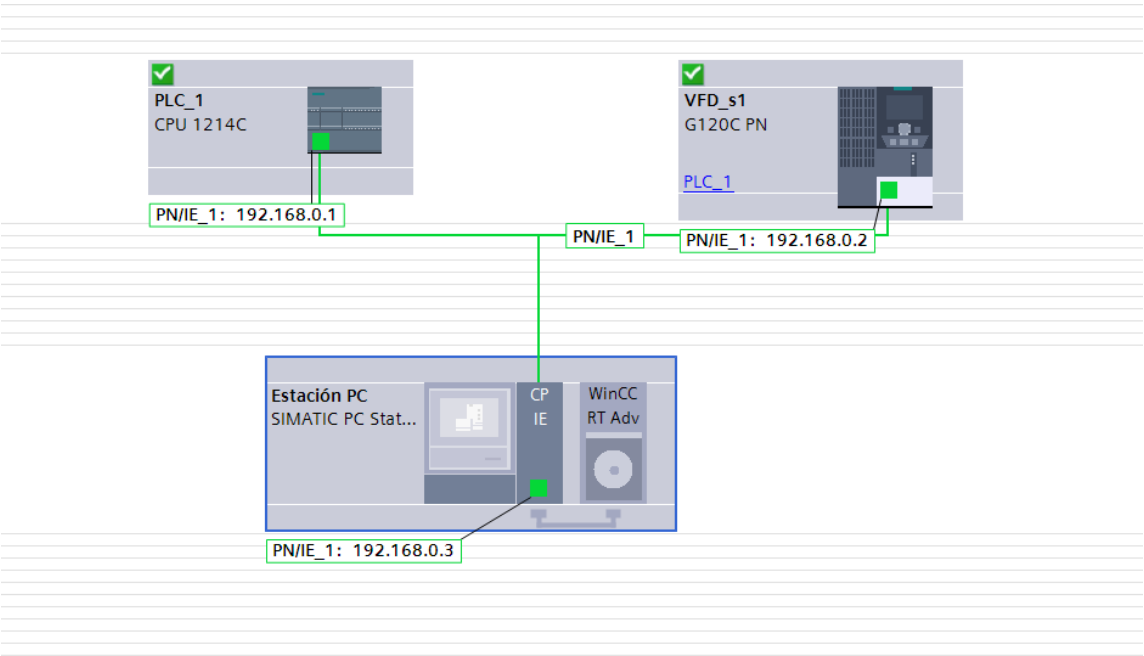


FIGURA 22 _ Verificación comunicación Profinet

Se deberá comprobar que las variables de consigna, velocidad real, velocidad deseada y velocidad controlada se encuentren activas y transferidas correctamente. (Ver Figura 23), esto confirmará que el sistema intercambia información de manera estable y sin pérdidas.

Variables PLC									
	Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Accesi..	Escrib...	Visibl...	Valor de obse
	Velocidad Deseada	Tabla de variables ...	Real	%MD100	☐	☒	☒	☒	1200.0
	Velocidad Real	Tabla de variables ...	Real	%MD104	☐	☒	☒	☒	1199.982
	Velocidad Controlada	Tabla de variables ...	Real	%MD108	☐	☒	☒	☒	40.00374
	Activar VFD	Tabla de variables ...	Bool	%M1.0	☐	☒	☒	☒	TRUE
	Activar PID	Tabla de variables ...	Bool	%M1.1	☐	☒	☒	☒	FALSE
	VC_escalada	Tabla de variables ...	Real	%MD112	☐	☒	☒	☒	1200.112
	VR_Normalizada	Tabla de variables ...	Real	%MD116	☐	☒	☒	☒	0.3999939
	VR_Escalada	Tabla de variables ...	Real	%MD120	☐	☒	☒	☒	39.99939
	VD_Normalizada	Tabla de variables ...	Real	%MD124	☐	☒	☒	☒	0.4
	VD_Escalada	Tabla de variables ...	Real	%MD128	☐	☒	☒	☒	40.0
	VC_Normalizada	Tabla de variables ...	Real	%MD132	☐	☒	☒	☒	0.4000374
	<Agregar>				☐	☒	☒	☒	

FIGURA 23 _ Verificación Variables

Se deberá validar que el bloque de comunicación SINA_SPEED, encargado de enviar comandos al variador y recibir retroalimentación, se encuentre en estado operativo. (Ver Figura 24) Esta verificación confirmará que la estructura del Telegrama 20 está configurada correctamente.

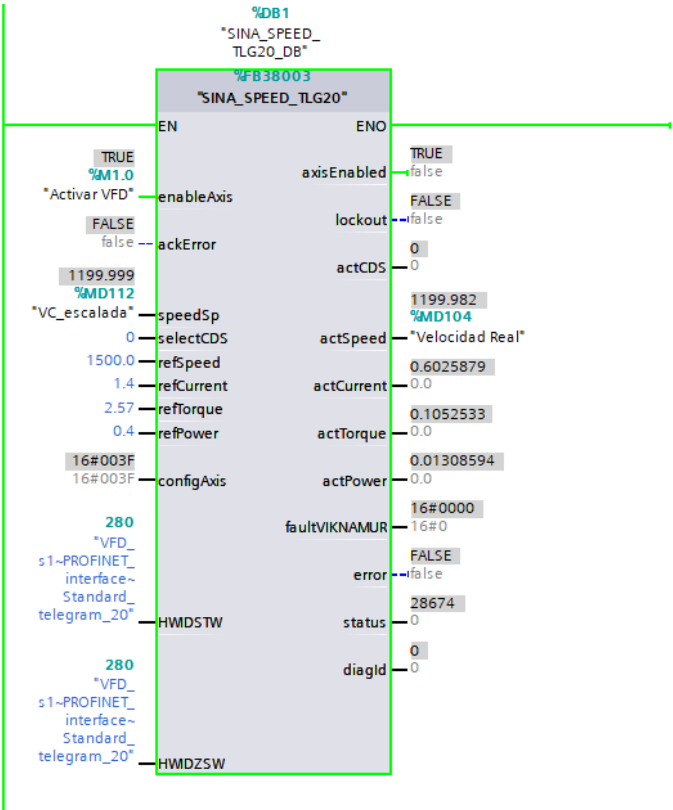


FIGURA 24 _ Verificación SINA SPEED

Se deberá comprobar que el bloque Compact PID se ejecute sin fallos dentro del CPU S7-1200, generando una señal de salida en función del error entre la consigna y la velocidad real, (ver Figura 25) Esto será indispensable para el control externo del variador.

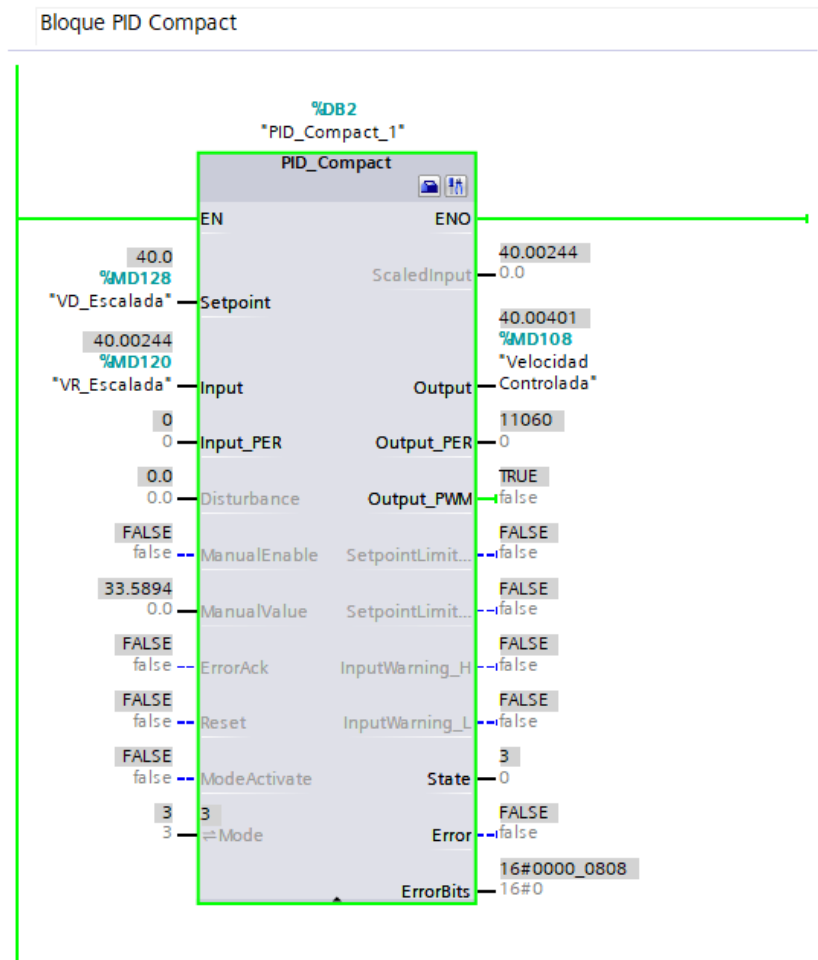


FIGURA 25 _ Verificación PID Compact

Se deberá verificar que los bloques encargados de Normalizar y Escalar las señales de entrada y salida (debido a las diferencias de unidades entre el PID y el variador) estén operativos, (Ver Figura 26 y Figura 27). Esto asegurará que los valores se interpreten correctamente durante la ejecución del control.

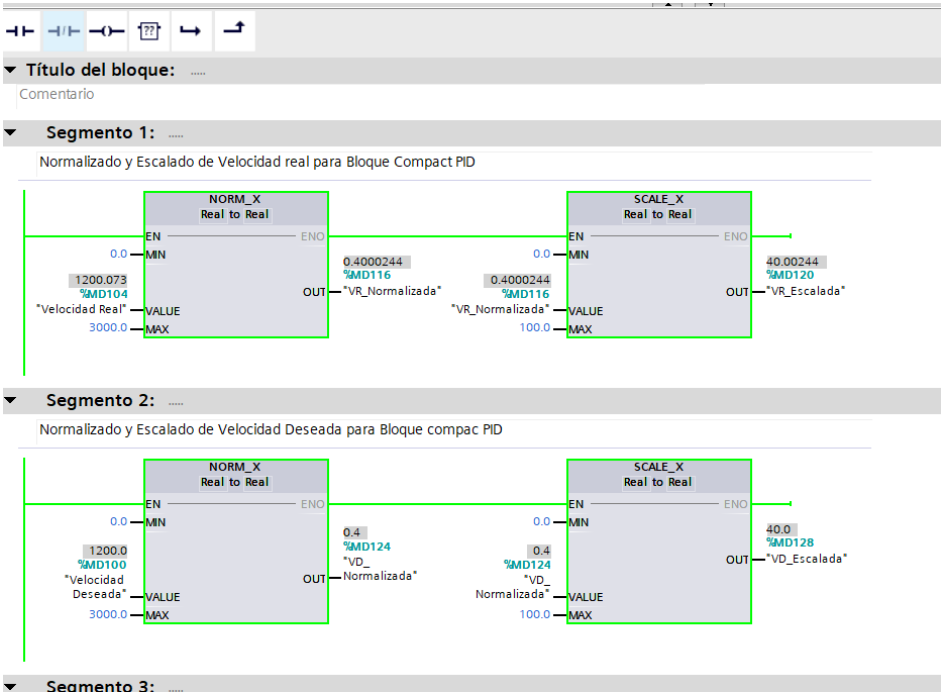


FIGURA 26 _ Verificación Normalización Entrada PID

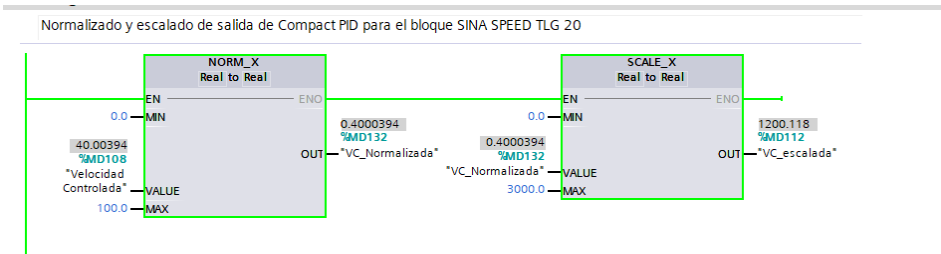


FIGURA 27 _ Verificación normalización salida PID

Una vez completadas estas validaciones y confirmado que todos los elementos del sistema se encuentran operativos, se podrá proceder a la ejecución de las pruebas empíricas de respuesta, en las cuales se aplicarán variaciones de consigna de velocidad para evaluar el comportamiento dinámico del motor bajo el control PID implementado.

3.2. PRUEBAS EMPÍRICAS DE RESPUESTAS DEL SISTEMA

Una vez verificado el correcto funcionamiento de la comunicación y de los bloques de control, se procederá a realizar pruebas empíricas con el fin de evaluar la respuesta dinámica del sistema. El objetivo será determinar la factibilidad del control PID ante cambios bruscos en la consigna de velocidad.

Debido a que no se contará con una carga mecánica durante las pruebas, las variaciones de velocidad se generarán de forma manual, modificando el valor de la consigna (setpoint) desde el HMI para producir incrementos abruptos y observar la reacción del sistema.

A modo de referencia, en todas las pruebas se aplicará un cambio de consigna de 800 rpm a 1200 rpm, manteniendo constante el parámetro proporcional ($K_p = 1$) y variando únicamente el tiempo integral (T_i). Las señales de velocidad real serán registradas y visualizadas mediante el gráfico de tendencias del HMI, lo que permitirá analizar el comportamiento del sistema para cada ajuste de parámetros

3.2.1. Prueba 1 – Punto de referencia con $Ti = 2.0\text{ s}$

Para esta prueba, se configurará el controlador PID con un valor proporcional $Kp = 1$ y un tiempo integral $Ti = 2.0\text{ s}$. Se modificará la consigna de velocidad desde 800 rpm hasta 1200 rpm y se registrará la respuesta del sistema en el gráfico de tendencias del HMI.

Se pretende tomar esta prueba como punto de referencia para las pruebas 2 y 3. El valor de $Ti = 2.0\text{ s}$ dará un equilibrio entre corrección del error y punto de estabilidad, sin provocar oscilaciones significativas (Ver Figura 28).

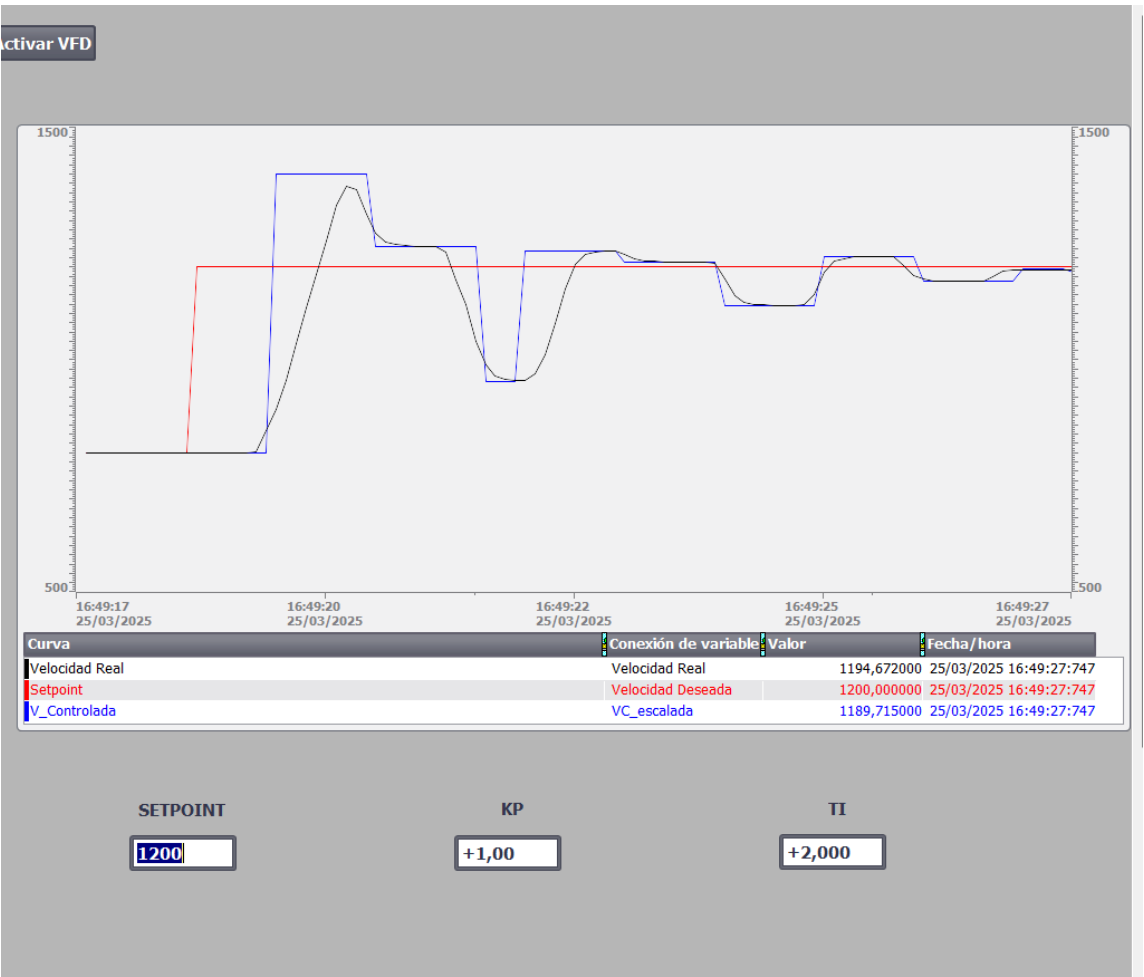


FIGURA 28 _ Primer Prueba empírica

3.2.2. PRUEBA 2 – RESPUESTA CON TI = 4.0 S

En esta configuración se mantendrá $Kp = 1$ y se aumentará el tiempo integral a $Ti = 4.0$ s. Nuevamente, se aplicará un cambio de consigna de 800 rpm a 1200 rpm y se registrará la respuesta en el gráfico del HMI.

Un tiempo integral mayor tiende a disminuir la velocidad de corrección del error acumulado, lo que en esta prueba se reflejará en un aumento del tiempo de estabilización y una pendiente más suave en la subida. Se espera que el sobreimpulso sea reducido, pero con una corrección más lenta hacia la consigna final (Ver Figura 29).

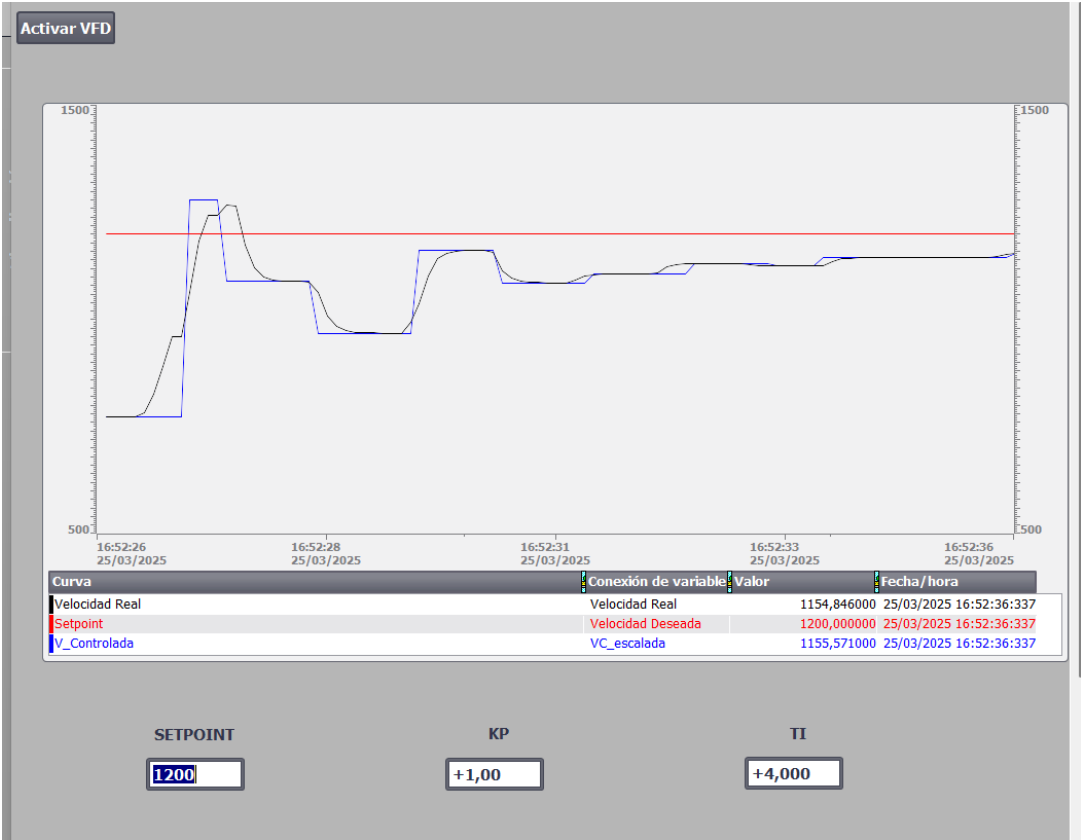


FIGURA 29 _ Segunda Prueba Empírica

3.2.3. PRUEBA 3 – RESPUESTA CON TI = 1.5 S

En esta última prueba, se configurará $Kp = 1$ y se reducirá el tiempo integral a $Ti = 1.5$ s, manteniendo el mismo cambio de consigna de 800 rpm a 1200 rpm.

Una reducción del tiempo integral provocará que el sistema actúe más agresivamente para corregir el error acumulado, aumentando la rapidez de la respuesta, pero también la posibilidad de generar un sobreimpulso mayor. Se prevé que el tiempo de estabilización sea más corto, aunque con mayor riesgo de oscilaciones. (Ver Figura 30)

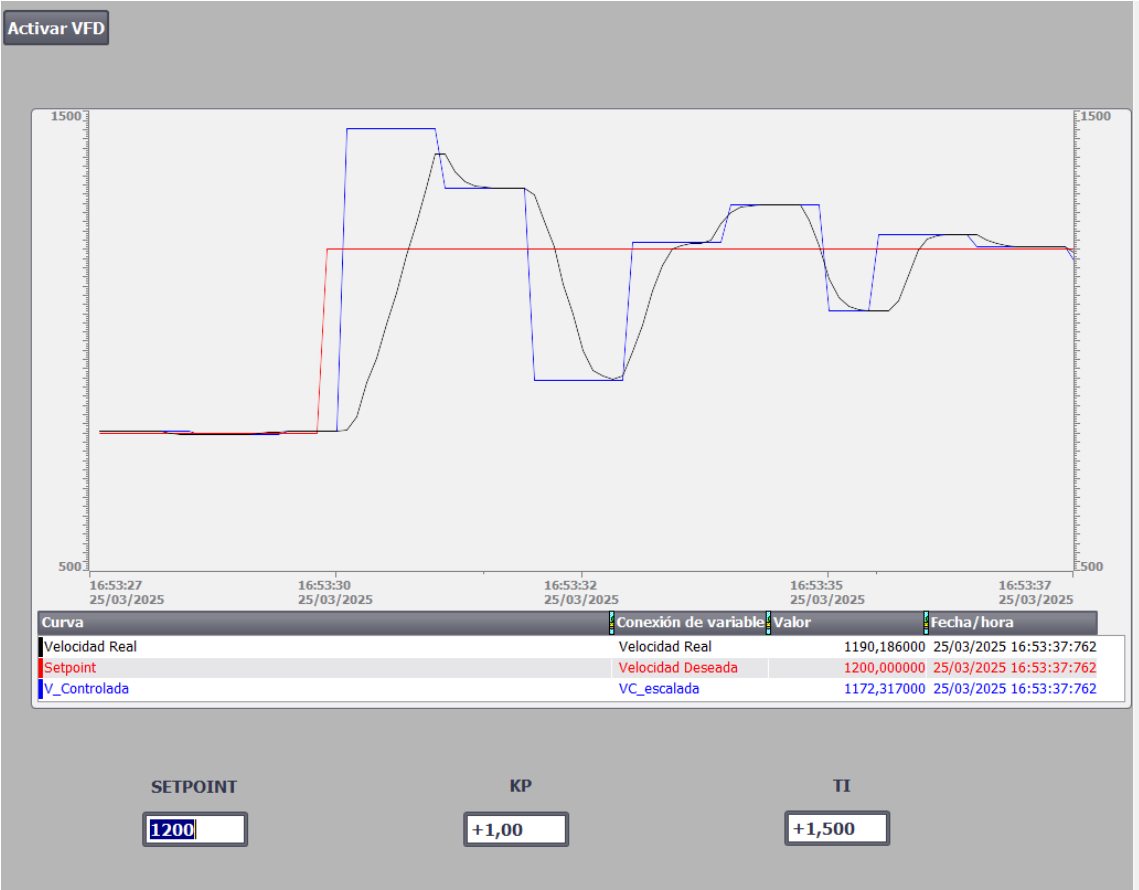


FIGURA 30 _ Tercer Prueba Empírica

3.2.4. SINTESIS DE PRUEBAS Y VALIDACION EMPIRICA

El desarrollo de las pruebas de funcionamiento permitirá validar la correcta comunicación y operación conjunta entre el bloque Compact PID del PLC Siemens S7-1200 y el bloque SINA_SPEED TLG20 del variador SINAMICS G120C. A través de la interfaz HMI configurada en WinCC RT Advanced, se visualizarán en tiempo real las respuestas del sistema frente a cambios de consigna, lo que facilitará el análisis empírico del comportamiento dinámico.

Las pruebas que se realizarán con distintos valores del tiempo integral ($T_i = 2.0\text{ s}$, 4.0 s y 1.5 s) evidenciarán cómo este parámetro influye directamente en la rapidez, el sobreimpulso y la estabilidad del sistema. En particular, la configuración de referencia ($T_i = 2.0\text{ s}$) mostrará un desempeño equilibrado entre velocidad de respuesta y estabilidad, mientras que las variaciones hacia valores mayores o menores permitirán observar el compromiso existente entre robustez y rapidez en el control PID.

Las pruebas desarrolladas confirmarán la factibilidad de implementar un lazo PID externo en TIA Portal para el control de velocidad de un motor trifásico mediante comunicación PROFINET con el variador de frecuencia. Los resultados obtenidos constituirán la base para el análisis comparativo y la discusión presentada en el Capítulo 4, donde se profundizará en la interpretación técnica de las respuestas, la consideración de perturbaciones y el análisis de costos de implementación del sistema.

**CAPITULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COSTOS DE
IMPLEMENTACIÓN CON CARGA**

4.1. **INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se documenta la etapa de implementación y validación del sistema de control de velocidad diseñado en TIA Portal, considerando tanto la comunicación entre los bloques Compact PID y SINA_SPEED TLG20, como el análisis de su desempeño en condiciones prácticas de operación.

En primer lugar, se discuten los resultados obtenidos al aplicar distintas configuraciones de los parámetros proporcional e integral en el controlador PID, evidenciando los efectos sobre la respuesta dinámica del motor. Posteriormente, se presentan consideraciones sobre la aplicación de perturbaciones mediante una carga acoplada, específicamente a través del uso de un generador de corriente continua como alternativa práctica de banco de carga.

De igual forma, se detallan los componentes principales que conforman el sistema, incluyendo hardware, software y elementos auxiliares de interconexión, junto con una estimación de los costos asociados a la implementación. Finalmente, se establece una conclusión que sintetiza los principales hallazgos y proyecciones del trabajo experimental.

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESPERADOS

En este apartado se analizan las respuestas del sistema de control PID que pueden ser obtenidas de manera empírica, utilizando como punto de partida la configuración de la Prueba 1 del punto 3.2.1. (Punto de referencia con $Ti = 2.0\text{ s}$) y contrastando los resultados con las pruebas posteriores del punto 3.2.2. (Prueba 2 – Respuesta con $Ti = 4.0\text{ s}$) y del punto 3.2.3. (Prueba 3- respuesta con $Ti = 1.5\text{ s}$). El objetivo es identificar cómo la variación del tiempo integral (Ti) puede influir en la dinámica del sistema en términos de rapidez, estabilidad y sobreimpulso.

4.2.1. PRUEBA 1 (TI = 2.0 S) – CASO DE REFERENCIA

Con $Ti = 2.0\text{ s}$, el sistema presentara una respuesta relativamente rápida frente al cambio de consigna de 800 rpm a 1200 rpm, mostrando un sobreimpulso moderado y un tiempo de estabilización aceptable (ver imagen 3.2.-1). Esta condición evidencia un equilibrio adecuado entre la corrección del error y la estabilidad general del lazo de control. La acción integral es lo suficientemente activa para eliminar el error en estado estacionario sin inducir oscilaciones notorias, motivo por el cual esta configuración se toma como referencia para los análisis posteriores.

4.2.2. PRUEBA 2 (TI = 4.0 S) – RESPUESTA MÁS LENTA Y ESTABLE

Al incrementar el tiempo integral a $Ti = 4.0\text{ s}$, la corrección del error se vuelve más lenta en comparación con la referencia. El sistema alcanza la consigna con un sobreimpulso menor y una respuesta más suave, aunque con un tiempo de estabilización más prolongado (ver imagen 3.2.-2).

Desde un punto de vista técnico, esto ocurre porque la acción integral acumula el error de forma más gradual, reduciendo la agresividad de la corrección. En consecuencia, el sistema gana estabilidad y reduce el riesgo de oscilaciones, pero sacrifica rapidez. Frente a la configuración de referencia, esta prueba muestra un comportamiento más conservador, lo que sería adecuado en procesos donde se prioriza la estabilidad del sistema sobre la rapidez de ajuste.

4.2.3. Prueba 3 ($T_i = 1.5\text{ s}$) – Respuesta más rápida pero menos estable

Con la reducción del tiempo integral a $T_i = 1.5\text{ s}$, el sistema reacciona de forma más veloz frente a la variación de consigna, alcanzando la consigna en menor tiempo en comparación con la prueba de referencia (ver imagen 3.2.-3). No obstante, esta ganancia en rapidez se ve acompañada por un sobreimpulso más pronunciado e incluso cierta tendencia a oscilar antes de estabilizarse.

Técnicamente, esta situación se explica porque al disminuir T_i , la acción integral acumula error más rápidamente, aplicando una corrección más agresiva. Esto acelera la respuesta del sistema, pero compromete su estabilidad. En relación con la Prueba 1, se obtiene una mejor velocidad de respuesta, pero a costa de un control menos robusto. Asimismo, frente a la Prueba 2, la diferencia es aún más clara: mientras el incremento de T_i suaviza la dinámica, la reducción la vuelve más inestable.

4.2.4. Síntesis comparativa

En conjunto, los resultados muestran cómo la elección del tiempo integral implica un compromiso entre rapidez y estabilidad. La Prueba 1 ($T_i = 2.0\text{ s}$) ofrece un balance aceptable entre ambos aspectos, sirviendo como referencia. La Prueba 2 ($T_i = 4.0\text{ s}$) sacrifica velocidad a favor de mayor suavidad y estabilidad, mientras que la Prueba 3 ($T_i = 1.5\text{ s}$) entrega una respuesta más rápida, pero con menor estabilidad y mayor riesgo de oscilación.

En relación con procesos industriales, la configuración de referencia ($T_i = 2.0\text{ s}$) representa un equilibrio entre rapidez y estabilidad, siendo la opción más versátil. Un tiempo integral mayor ($T_i = 4.0\text{ s}$) prioriza la estabilidad y un control más suave, lo cual resulta adecuado en sistemas con gran inercia mecánica, donde es fundamental evitar oscilaciones. Por el contrario, un tiempo integral menor ($T_i = 1.5\text{ s}$) privilegia la rapidez de ajuste, aunque a costa de estabilidad, lo que puede ser útil en aplicaciones donde la velocidad de respuesta es crítica y las oscilaciones no constituyen un riesgo relevante.

4.3. CONSIDERACIONES SOBRE LA APLICACIÓN DE CARGA COMO PERTURBACIÓN

En condiciones reales de operación, la evaluación de un sistema de control de velocidad es más representativa cuando la perturbación se aplica mediante una variación de carga mecánica y no únicamente mediante cambios en la consigna.

La aplicación de una carga como perturbación tiene varias ventajas técnicas:

- Evaluación directa de la capacidad de rechazo de perturbaciones: Permite observar cómo el controlador PID compensa la caída de velocidad provocada por un incremento repentino de carga.
- Medición de robustez del control: Someter al sistema a variaciones de carga reproduce de manera más fiel las condiciones industriales, donde el par resistente varía con la operación.
- Análisis del tiempo de recuperación: Se obtiene información precisa sobre el tiempo que tarda el sistema en volver a la consigna después de una perturbación real.
- Identificación de estabilidad en condiciones críticas: Al exigir un mayor esfuerzo de corrección al lazo PID, se pueden detectar posibles problemas de oscilaciones o inestabilidad que no serían evidentes con simples cambios de setpoint.

En este proyecto, debido a la ausencia de carga disponible en el laboratorio, no será posible aplicar perturbaciones mecánicas reales. Sin embargo, se recomienda que, para futuros trabajos de título o proyectos educacionales, se realicen pruebas con variación de carga, ya que estas permitirán validar de manera más completa el desempeño del control PID y su capacidad de mantener la velocidad estable ante condiciones variables de trabajo.

Como alternativa práctica y económica para introducir una perturbación mecánica en el eje del motor, se propone el acoplamiento de un generador de corriente continua (generador DC). Este actuará como banco de cargas: al variar la carga eléctrica conectada a su salida (mediante un banco resistivo, reóstato o carga electrónica), se incrementará o disminuirá el torque resistivo aplicado al motor, permitiendo ensayos de rechazo a perturbaciones y la evaluación de la robustez del lazo PID en condiciones cercanas a la operación real.

La implementación consistirá en montar el generador acoplado al eje del motor mediante un acople rígido o flexible, asegurando alineación y soporte adecuados. El generador se conectará eléctricamente a un sistema de carga regulable, de modo que, al aumentar la corriente demandada en su salida, el generador aplicará un mayor par resistente al motor, simulando variaciones de carga.

Entre las ventajas de este enfoque destacan:

- Generación de perturbaciones reales en el eje sin necesidad de un dinamómetro profesional.
- Flexibilidad para variar la magnitud de la perturbación de forma continua y reproducible.
- Coste reducido y posibilidad de implementación con equipos habituales en laboratorios de máquinas eléctricas.

El uso de un generador DC acoplado representa una solución factible y didáctica para introducir perturbaciones controladas en el sistema, lo que permitiría enriquecer el análisis del desempeño del control PID más allá de la simulación de consignas.

Con base en las consideraciones anteriores, se evidencia que la incorporación de una carga mecánicas como perturbación aporta un valor significativo al análisis del desempeño del control PID, al permitir evaluar la estabilidad, robustez y tiempo de recuperación del sistema en condiciones más cercanas a la operación real. Sin embargo, esta mejora en la fidelidad del ensayo implica también un incremento en los recursos y componentes necesarios para su implementación, lo que se traduce en un impacto directo sobre el presupuesto del proyecto.

Por esta razón, el siguiente apartado se centra en el análisis de costos de implementación, donde se detallan los elementos principales del sistema, la infraestructura requerida y la estimación económica de incluir o no una carga mecánica. Este análisis permitirá relacionar la viabilidad técnica del control con los aspectos financieros, facilitando la toma de decisiones respecto a futuras aplicaciones industriales o ampliaciones del proyecto académico.

4.4. ANÁLISIS DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

El análisis de costos constituye un aspecto clave para determinar la viabilidad económica del sistema propuesto, tanto en el ámbito académico como en potenciales aplicaciones industriales. En este proyecto se considerarán los recursos de hardware y software requeridos, junto con los costos adicionales que implicaría una eventual ampliación mediante la incorporación de carga mecánica como perturbación.

En primer lugar, el sistema básico se implementará utilizando el variador SINAMICS G120C, un motor trifásico de inducción, un PLC S7-1200, la plataforma de programación TIA Portal con los complementos Startdrive (para la configuración del variador) y WinCC RT Advanced (para la creación de la interfaz en estación PC). Estos elementos constituyen la base para establecer la comunicación entre el bloque Compact PID y el bloque SINA_SPEED TLG20.

Los costos asociados a estos componentes podrán desglosarse en:

- Variador SINAMICS G120C: equipo fundamental para el control de velocidad; su precio dependerá de la potencia nominal, con un rango estimado de costo medio a alto.
- Motor trifásico de inducción: empleado como planta de prueba; su costo variará según potencia y eficiencia.
- PLC S7-1200: controlador central del sistema, cuyo valor dependerá de la CPU seleccionada y módulos de expansión adicionales.
- TIA Portal con Startdrive: software necesario para la programación del PLC y parametrización del variador.
- WinCC RT Advanced: módulo para el desarrollo y ejecución de la interfaz HMI en el computador, configurado como estación PC.

A estos elementos se suman costos de cableado, protecciones eléctricas, montaje en tablero y mano de obra técnica, que, aunque representan un porcentaje menor, resultan indispensables para un sistema completo.

En caso de integrarse una carga mecánica controlada, los costos aumentarían significativamente, pues se requeriría un banco de ensayos adicional (dinamómetro, freno o sistema de carga variable). Esto permitiría evaluar de manera más realista la robustez del control PID, aunque con un impacto económico considerable.

La configuración proyectada con variador, motor, PLC, TIA Portal con Startdrive y WinCC RT Advanced resulta económicamente viable para fines académicos, enfocándose en la validación de la comunicación y desempeño del control PID. Sin embargo, para un entorno de investigación avanzada, la inversión en sistemas de carga resultará recomendable para lograr un análisis más completo del desempeño del sistema.

4.5. COMPONENTES DEL SISTEMA

A continuación, se detallan los componentes requeridos para la implementación del sistema de control de velocidad, especificando las características técnicas mínimas necesarias para su correcto funcionamiento:

- I. PLC Siemens S7-1200 CPU
 - Con capacidad de comunicación PROFINET.
 - Al menos 14 entradas digitales y 10 salidas digitales expandibles.
 - Memoria de programa ≥ 50 KB.
 - Tiempo de ciclo $< 0,5$ ms para garantizar respuesta en lazo cerrado.
- II. Variador de frecuencia SINAMICS G120C
 - Potencia mínima: 1,5 kW.
 - Tensión de entrada: $3 \times 380\text{--}480$ V AC.
 - Comunicación vía PROFINET con telegrama 20 (SINA_SPEED TLG20).
 - Función de control vectorial para motores de inducción.
- III. Motor trifásico de inducción
 - Potencia nominal: 1,1–1,5 kW.
 - Tensión nominal: 400 V AC.
 - Frecuencia: 50/60 Hz.
 - Velocidad síncrona: 1500 rpm (4 polos).
- IV. TIA Portal (con StartDrive integrado)
 - Versión con licencia que permita configuración de PLC, variador y redes PROFINET.
 - Compatible con WinCC RT Advance.
- V. WinCC RT Advance (estación PC)
 - Licencia para un mínimo de 512 tags.
 - Capacidad de comunicación vía Ethernet/PROFINET con el PLC.

- VI. Generador de corriente continua (carga)
 - Potencia mecánica absorbida ≥ 1 kW.
 - Tensión de salida: 90–110 V DC.
 - Corriente nominal: ≥ 10 A.
 - Preparado para acoplamiento mecánico con el motor.
- VII. Acople mecánico motor–generador
 - Tipo: rígido o flexible, con tolerancia de desalineación.
 - Capacidad de transmisión de par ≥ 10 N·m.
- VIII. Switch de interconexión
 - Velocidad mínima: 10/100 Mbps.
 - Compatible con Industrial Ethernet.
- IX. Cables Ethernet
 - Categoría mínima: Cat 5e blindado (STP).
 - Longitud ≤ 100 m por segmento.
- X. Cableado eléctrico de potencia
 - Conductores de cobre con aislamiento PVC o XLPE.
 - Sección mínima: 2,5 mm² para alimentación del motor y variador.

Además de los componentes principales, se requieren elementos auxiliares destinados a garantizar la seguridad, confiabilidad y correcta instalación del sistema. Las características técnicas mínimas recomendadas son:

- XI. Protecciones eléctricas (disyuntores termomagnéticos y fusibles):
 - Tensión nominal de operación ≥ 400 V AC.
 - Corriente nominal adecuada a la potencia del motor y variador (10–16 A).
 - Capacidad de interrupción mínima: 6 kA.
- XII. Fusibles tipo G para protección de cableado y dispositivos.
 - Bornes de conexión:
 - Capacidad de corriente ≥ 20 A.
 - Sección de conductor admitida hasta 4 mm².

XIII. Montaje en riel DIN.

- Elementos de montaje (canaletas, bandejas, riel DIN):
- Material aislante auto extingible o metálico con protección anticorrosiva.
- Dimensiones adecuadas para organizar el cableado de potencia y control de manera independiente.

Los componentes descritos conforman la infraestructura mínima necesaria para el diseño y validación del sistema de control propuesto, garantizando tanto la funcionalidad de comunicación y procesamiento como la seguridad y confiabilidad en la operación. Una vez definidos los elementos técnicos esenciales, resulta pertinente realizar un análisis de costos estimados que permita dimensionar la inversión asociada a la implementación del sistema, lo cual se desarrolla en el siguiente apartado.

4.6. COSTOS ESTIMADOS

La Tabla 4.1 presenta la estimación de costos de todos los componentes que integran el sistema de control propuesto. Aunque en el laboratorio ya se dispone de la mayoría de estos equipos, se realiza el análisis considerando la adquisición de cada uno de ellos para reflejar el valor real del conjunto y su factibilidad de implementación en un entorno académico o industrial.

Nº	Elemento	Costo estimado (USD)
1	PLC Siemens S7-1200	512,12
2	Variador SINAMICS G120C	1538,11
3	Motor trifásico	132,36
4	Software TIA Portal + StartDrive	3000,50
5	Software WinCC RT Advanced	500,00
6	Generador de corriente Continua	250,00
7	Acople mecánico motor–generador	80,00
8	Switch de red industrial	100,00
9	Cables Ethernet (x3)	20,00
10	Cableado de potencia y control	120,00
11	Protecciones eléctricas (breakers/fusibles)	120,00
12	Bornes y conectores	20,00
13	Canaletas / riel DIN / ferretería de montaje	80,00
	TOTAL	6473,09

TABLA 4 _ Costos estimados

El análisis permite observar que la mayor parte del costo se concentra en el software de automatización y en el variador de frecuencia. En comparación, los costos asociados a la interconexión (cableado, switch) son relativamente bajos, pero indispensables para la correcta operación del sistema. En términos de factibilidad económica, es importante recalcar que el laboratorio ya dispone de la mayoría de los componentes listados, siendo necesario adquirir únicamente el generador de corriente continua y el acople mecánico. Esto reduce el costo real de implementación a aproximadamente 330 USD, monto considerablemente más bajo que la estimación total, lo que demuestra la viabilidad práctica del proyecto en el entorno académico.

CONCLUSION GENERAL

El presente proyecto genera la posibilidad, implementar y validar un sistema de control de velocidad para un motor trifásico utilizando un PLC Siemens S7-1200 y un variador SINAMICS G120C, integrados mediante PROFINET en el entorno de programación TIA Portal con el bloque Compact PID. A través de pruebas empíricas, se comprueba la efectividad del control PID ajustando de manera directa el tiempo integral (T_i), logrando un balance entre rapidez y estabilidad en la respuesta del sistema. Las distintas configuraciones demuestran cómo variaciones en T_i afectan la dinámica del motor, proporcionando criterios claros para la selección de parámetros según los requerimientos de distintos procesos industriales.

El análisis de la aplicación de cargas como perturbaciones resaltó la importancia de someter el sistema a condiciones cercanas a la operación real. Aunque la carga mecánica no estaba disponible en el laboratorio, se propuso el acoplamiento de un generador de corriente continua como alternativa práctica para ensayos futuros, lo que permitiría evaluar la robustez del lazo PID frente a variaciones de torque.

Desde el punto de vista económico, se identificó que la mayor inversión corresponde al software de automatización y al variador, mientras que los costos de interconexión y montaje son menores pero esenciales para el funcionamiento correcto del sistema. Considerando que el laboratorio ya dispone de la mayoría de los componentes, el costo real de implementación se reduce significativamente, demostrando la factibilidad del proyecto en un entorno académico y ofreciendo una referencia para escalaciones industriales.

En términos generales, la tesis cumple con los objetivos planteados: demostrar la viabilidad de un control de velocidad basado en PID en TIA Portal, verificar la comunicación estable entre PLC y variador mediante PROFINET, y analizar tanto el desempeño del sistema como la factibilidad económica de su implementación. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para futuras mejoras, incluyendo la incorporación de cargas mecánicas, optimización de parámetros PID y extensión a aplicaciones educativas de mayor escala.

BIBLIOGRAFIA

- Siemens AG. (s. f.). SINAMICS G120C: Convertidores de frecuencia modulares. Siemens. Recuperado 9 de enero de 2025, de <https://new.siemens.com/global/en/products/drives/sinamics.html>
- Siemens AG. (2019). Control del variador SINAMICS mediante el bloque SINA_SPEED TLG20 (FB38003). Siemens Industry Online Support. Recuperado 9 de enero de 2025, de https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109747655/109747655_LSI_NAExt_DOC_v101_en.pdf
- Siemens AG. (s. f.). Manual de instrucciones de operación del variador SINAMICS G120C. Siemens. Recuperado 9 de enero de 2025, de https://cache.industry.siemens.com/dl/files/995/109782995/att_1036716/v1/G120C_op_instr_1020_es-ES.pdf
- Siemens AG. (s. f.). SIMATIC S7-1200: Controlador lógico programable (PLC). Siemens. Recuperado 9 de enero de 2025, de <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/simatic/s7-1200.html>
- Siemens AG. (s. f.). TIA Portal: Totally Integrated Automation Portal. Siemens. Recuperado 9 de enero de 2025, de <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html>
- PROFIBUS & PROFINET International. (s. f.). PROFINET – The leading Industrial Ethernet standard. Recuperado 9 de enero de 2025, de <https://www.profibus.com/technology/profinet>
- Control Engineering. (2021, 10 de marzo). PID control: fundamentals and applications. CFE Media and Technology. Recuperado de <https://www.controleng.com/articles/pid-control-fundamentals-and-applications/>
- AVEVA. (s. f.). HMI - The Interface Between Process and Operators. Recuperado 9 de enero de 2025, de <https://www.aveva.com/es-es/solutions/operations/hmi/>
- Cisco. (s. f.). Ethernet. Cisco. Recuperado 9 de enero de 2025, de https://www.cisco.com/c/es_mx/tech/lan-switching/ethernet/index.html

ANEXOS

- Siemens Industry Online Support Página de descarga de la librería DriveLib para TIA Portal_ <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109747655/drive-lib-for-tia-portal>
- WiAutomation_ Página de cotizaciones de los productos <https://cl.wiautomation.com/>
- Siemens Industry Online Support_ Manual del bloque SINA_SPEED TLG20 <https://support.industry.siemens.com/cs/document/60161058>