

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un sistema de control automático para un banco de pruebas de motores
eléctricos.

INGE-3004

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecatrónico

Presentado por:

Juan Pablo Zamora Guamán

Ricardo Arturo Vanegas Cadena

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

A mi padre y a mi madre, por su inquebrantable confianza en mí. Gracias por ser mi guía y por apostar siempre por mis sueños. Su amor y apoyo constante han sido mi mayor impulso para llegar hasta aquí.

Ricardo Arturo Vanegas

Dedicatoria

A mi mamá, Miryam, a mi tía, Patricia, y a mi abuela, Rupertila, por acompañarme desde el inicio de este camino universitario, por su apoyo incondicional y por darme la fuerza para seguir en cada etapa. Su amor, su guía y su confianza en mí hicieron posible que hoy llegue hasta aquí.

Juan Pablo Zamora

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, por haberme dado la oportunidad de estudiar y por su apoyo incondicional durante toda mi formación. Sin su esfuerzo, este logro no sería posible.

A mis compañeros, gracias por la amistad, la paciencia y el apoyo en cada proyecto y desafío que enfrentamos juntos. Ha sido un honor compartir este camino con ustedes.

Ricardo Arturo Vanegas Cadena

Agradecimientos

Al profesor Efraín Terán, por su apoyo durante este proceso y por ayudarnos a encontrar un tema de proyecto alineado con nuestros intereses.

Al Club de Mecatrónica, por brindarnos un espacio de trabajo y por facilitarnos herramientas y equipos que fueron indispensables durante la realización de este proyecto.

A mis hermanos, Ángel y Abigail, por motivarme y apoyarme en todo lo que estuvo a su alcance. Su compañía y ayuda hicieron que este proceso fuera menos estresante y más llevadero.

Juan Pablo Zamora Guamán

Declaración Expresa


Nosotros Juan Pablo Zamora Guamán y Ricardo Arturo Vanegas Cadena acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

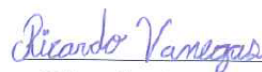
En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 17 de octubre del 2025.



Juan Pablo Zamora

Guamán



Ricardo Arturo Vanegas

Cadena

Evaluadores

Bryan Joao Puruncajas Maza, Ph.D.

Profesor de materia

Efraín Andrés Terán Calle, M.Sc.

Tutor de proyecto

Resumen

Este proyecto plantea la modernización de un banco dinamométrico Hampden MPB-2 (freno de partículas magnéticas) para disponer de ensayos repetibles y trazables. El objetivo es integrar instrumentación electrónica y supervisión remota para ejecutar pruebas, registrar variables eléctricas y mecánicas, y entregar un reporte técnico. Se sostiene la hipótesis de que la automatización de la secuencia y una adquisición de datos adecuada incrementan la consistencia de las mediciones frente al esquema manual, lo que se justifica por la necesidad de reducir errores y tiempos de post-procesamiento. Se diseñó un tablero con protecciones, fuente de 24 VDC, PLC S7-300 y comunicación Ethernet; se integró un analizador SENTRON PAC3220 por Modbus TCP, una celda de carga y un sensor de velocidad; y se implementó una interfaz en Node-RED con post-procesamiento en Python para exportación a CSV y reporte en PDF. Se obtuvieron curvas de desempeño de un motor trifásico Hampden WRM-2, identificando un torque de ruptura de 25.8 Nm en el rango de 900 a 1100 RPM, un factor de potencia superior a 0.93 entre 10 y 18 Nm. Adicionalmente, durante la validación de la maniobra de arranque estrella-triángulo con un motor Siemens, se registró una estabilización cercana a 1720 RPM.

Palabras Clave: Automatización industrial, instrumentación electrónica, Node-RED, comunicaciones industriales, Torque.

Abstract

This project proposes the modernization of a Hampden MPB-2 dynamometer test bench (magnetic particle brake) to enable repeatable and traceable motor testing. The objective is to integrate electronic instrumentation and remote supervision to execute tests, record electrical and mechanical variables, and deliver a technical report. The hypothesis is that automating the test sequence and using an appropriate data acquisition architecture increases measurement consistency compared to manual procedures, which is justified by the need to reduce errors and post-processing time. A control panel including protections, a 24 VDC power supply, an S7-300 PLC, and Ethernet communication was designed and implemented. A SENTRON PAC3220 power analyzer was integrated via Modbus TCP, together with a load cell and a speed sensor, while a Node-RED interface and Python post-processing were developed to export CSV files and generate PDF reports. Performance curves were obtained for a three-phase Hampden WRM-2 motor, identifying a breakdown torque of 25.8 Nm in the range of 900 to 1100 RPM and a power factor greater than 0.93 between 10 and 18 Nm. Additionally, during the validation of the star-delta starting maneuver with a Siemens motor, stabilization close to 1720 RPM was recorded.

Keywords: Industrial automation, Electronic instrumentation, Node-RED, Industrial communications, Torque.

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Abreviaturas	VII
Simbología	VIII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XII
Índice de planos.....	XIII
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Justificación del problema	7
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo general	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 Marco teórico.....	8
1.4.1 Fundamentos sobre motores eléctricos.....	8
1.4.2 Fundamentos de los bancos de prueba (Dinamómetros).....	10
1.4.2.1 Clasificación de dinamómetros	10
1.4.3 Sistemas de adquisición y procesamiento de datos (DAQ).....	13
1.4.3.1 Concepto de adquisición de datos (DAQ).....	13
1.4.3.2 Plataformas de control y adquisición	15
1.4.4 Automatización de bancos de ensayo.....	17
1.4.5 Trabajos y desarrollos relacionados	18
1.4.5.1 Antecedentes y desarrollo industriales.....	19
1.4.5.2 Brecha tecnológica y síntesis	22
Capítulo 2	24

2.	Metodología	25
2.1	Metodología detallada	25
2.2	Requerimientos	26
2.2.1	Requerimientos funcionales	26
2.2.2	Requerimientos no funcionales	27
2.3	Planteamiento de alternativas	28
2.3.1	Descripción de las alternativas	28
2.4	Selección de la alternativa tecnológica.....	30
2.4.1	Criterios de evaluación.....	30
2.4.2	Matriz de decisión	31
2.5	Consideraciones de diseño eléctrico	32
2.6	Selección del controlador lógico programable (PLC)	33
2.7	Selección del sensor de torque.....	35
2.8	Metodología de diseño del tablero de control	36
2.8.1	Consideraciones de la infraestructura de potencia disponible.....	37
2.8.2	Diseño CAD	38
2.8.3	Criterios de dimensionamiento de protecciones y conductores	39
2.8.4	Criterios de integración de la arquitectura de adquisición	40
2.9	Diseño de la lógica de control del PLC	40
2.9.1	Configuración de hardware y direccionamiento	41
2.9.2	Acondicionamiento y escalamiento de señales (FC).....	41
2.9.3	Lógica de control y seguridad	42
2.9.4	Gestión de datos para comunicación	43
2.10	Diseño de la arquitectura de software y supervisión	43
2.10.1	Capa de integración y comunicaciones	44
2.10.2	Procesamiento y acondicionamiento de datos.....	45
2.10.3	Lógica de automatización del ensayo y registro	46

2.10.4	Diseño de la interfaz hombre-máquina (HMI)	47
2.11	Generación automática de reportes y post-procesamiento	48
2.11.1	Arquitectura y automatización del algoritmo	48
2.11.2	Procesamiento de datos y cálculos de ingeniería	48
2.11.3	Caracterización gráfica y visualización.....	49
2.11.4	Estructuración del informe técnico PDF	49
Capítulo 3	50
3.	Resultados y análisis	51
3.1	Especificaciones del motor	51
3.2	Pruebas de caracterización y desempeño.....	52
3.2.1	Gráfica torque contra velocidad	54
3.2.2	Gráfica corrientes de fase contra torque y potencia activa y aparente contra torque	55
3.2.3	Gráfica factor de potencia vs torque.....	57
3.2.4	Gráfica potencia mecánica y eléctrica contra torque.....	57
3.2.5	Gráfica eficiencia contra torque	58
3.3	Implementación del tablero	60
3.3.1	Diseño y distribución del tablero de control	60
3.4	Interfaz de usuario en Node-RED (HMI)	64
3.4.1	Arranque directo.....	65
3.4.2	Arranque estrella-triangulo.....	65
3.4.3	Arrancador suave.....	66
3.4.4	Variador de frecuencia	67
3.5	Integración de la interfaz web y adquisición de datos en arranque estrella-triángulo	68
3.6	Comparativa entre datos de la placa y datos recopilados	77
3.7	Análisis de costos	79
3.7.1	Criterios y alcance del presupuesto	79

3.7.2	Escenarios de costo	83
3.7.3	Resumen de costos por rubro	84
3.7.4	Interpretación de resultados.....	84
Capítulo 4.....		86
4. Conclusiones y recomendaciones		87
4.1 Conclusiones		87
4.2 Recomendaciones		88
Referencias.....		91
Apéndices.....		94

Abreviaturas

AWG	<i>American Wire Gauge</i> (Calibre de Alambre Estadounidense)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Diseño Asistido por Computadora)
CSV	<i>Comma-Separated Values</i> (Valores Separados por Comas)
DAQ	<i>Data Acquisition</i> (Adquisición de Datos)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HMI	<i>Human-Machine Interface</i> (Interfaz Hombre-Máquina)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i> (Internet Industrial de las Cosas)
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
PDF	<i>Portable Document Format</i> (Formato de Documento Portátil)
PLC	Controlador Lógico Programable
RPM	Revoluciones Por Minuto
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
VDC	Voltaje de Corriente Continua
VDF	Variador de Frecuencia
OT	Tecnología operacional (<i>Operational Technology</i>)
IT	Tecnología de la información (<i>Information Technology</i>)

Simbología

η	Eficiencia del motor
ω	Velocidad angular
f	Frecuencia
F	Fuerza
f_s	Frecuencia de muestreo (<i>sampling frequency</i>)
I	Corriente eléctrica
P	Potencia
T	Torque
T_s	Tiempo de muestreo
V	Voltaje o Tensión

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de flujo de potencia y pérdidas [25].	2
Figura 2 Curvas características de desempeño [24].	3
Figura 3 Evolución hacia la industria 4.0 [26].	4
Figura 4 Foto real del banco Hampden MPB-2	5
Figura 5 Instrumentación actual del banco: multímetro y pinza amperimétrica externos para variables eléctricas, junto al indicador de velocidad y la balanza mecánica de torque del equipo original.	6
Figura 6 Vista explosionada de un motor de inducción de jaula de ardilla [23].	9
Figura 7 Dinamómetro de corrientes de Foucault (Eddy-current) serie WB [8].	11
Figura 8 Dinamómetro por histéresis serie HD de Magtrol [9].	12
Figura 9 Dinamómetro de freno de partículas serie PB de Magtrol [10].	12
Figura 10 Arquitectura de un sistema DAQ y evolución de la señal desde el fenómeno físico hasta su procesamiento digital [27].	14
Figura 11 Interfaz de monitoreo (Dashboard) desarrollada en Node-RED para aplicaciones de IIoT [28].	16
Figura 12 Interfaz de usuario del software comercial Magtrol M-TEST 7 para la caracterización de motores [22].	18
Figura 13 Arquitectura de control y adquisición distribuida para bancos de prueba de bajo costo [2].	19
Figura 14 Curvas características del motor de inducción obtenidas mediante simulación: velocidad, eficiencia, factor de potencia, corriente y torque vs. potencia de salida [19].	20
Figura 15 Resultados experimentales del motor en el banco de ensayos: eficiencia, factor de potencia, corriente y torque vs. potencia de salida [19].	21
Figura 16 Plataforma de automatización de ensayos DynoLAB, configurada para pruebas de eficiencia bajo la norma IEEE 112B [21].	22
Figura 17 Diagrama de flujo de diseño del proyecto.	25
Figura 18 Alternativa con implementación de microcontrolador	29
Figura 19 Alternativa con diseño con celda de carga.	30
Figura 20 Siemens LOGO!	34
Figura 21 Siemens S7-200	34
Figura 22 Siemens S7-300	34
Figura 23 Sensor de torque rotativo	35

Figura 24 Celda de carga tipo viga.....	36
Figura 25 Celda de carga tipo S	36
Figura 26 Tablero de potencia trifásico, identificación de sus principales componentes para la ejecución de pruebas (arranque directo, arrancador suave y variador de frecuencia).....	37
Figura 27 Identificación de elementos principales para arranque estrella-triángulo (Y- Δ): contactor general, contactor estrella (Y) y contactor triángulo (Δ), temporizador cambio estrella-triángulo (Y- Δ).	38
Figura 28 Modelo tridimensional (CAD) de la distribución interna y soportes del tablero de control	39
Figura 29 Esquema del acondicionamiento de señal analógica para la medición de torque.	42
Figura 30 Arquitectura de flujo de datos desde sensores hacia la interfaz Node-RED	43
Figura 31 Topología de red industrial y protocolos de comunicación del sistema SCADA	44
Figura 32 Configuración física del brazo de palanca y celda de carga en el banco Hampden	45
Figura 33 Diagrama de flujo de la secuencia lógica y estados del sistema de ensayo.....	47
Figura 34 Motor caracterizado Hampden WRM-2	53
Figura 35 Placa de motor Hampden WRM-2.....	53
Figura 36 Curva característica de torque vs. velocidad obtenida mediante el sistema de frenado y control por puntos.....	55
Figura 37 Curvas de corriente de fase (L1, L2, L3) frente al torque, evidenciando el pico de corriente en el punto de bloqueo de 19 Nm.	56
Figura 38 Comparativa de potencia activa (W) y aparente (VA) frente al torque mecánico.....	56
Figura 39 Evolución del factor de potencia frente al torque, destacando la zona de máxima eficiencia y la caída en el punto de ruptura.	57
Figura 40 Comparativa de potencia mecánica y eléctrica (activa) frente al torque, evidenciando el punto de ruptura y la degradación de la eficiencia por sobrecarga.	58
Figura 41 Curva de eficiencia energética (%) en función del torque mecánico, identificando el punto de máximo rendimiento y el desempeño en condiciones de ruptura.	59
Figura 42 Diseño y distribución interna de componentes	61
Figura 43 Vista lateral del diseño del gabinete	62
Figura 44 Montaje y cableado interno del sistema.....	63
Figura 45 Implementación física exterior del tablero	64
Figura 46 Interfaz de control en Node-RED configurada para arranque directo.	65
Figura 47 Panel de control con indicadores de estado estrella-triángulo.....	66
Figura 48 Interfaz de control del arrancador suave de estado "Bypassed" activo.	67

Figura 49 Interfaz de control configurada en modo VDF con ajuste dinámico de velocidad y monitoreo de corriente.	68
Figura 50 Banco de pruebas para la validación del sistema de control usando el motor SIEMENS ILE0142-0DB36-4JA4-Z	69
Figura 51 Placa del motor SIEMENS 1LE0142-0DB36-4JA4-Z.....	70
Figura 52 Panel de supervisión en Node-RED durante la validación del arranque.	71
Figura 53 Gráfica de velocidad (RPM) vs tiempo.	72
Figura 54 Gráfica de par motor (Nm) vs. tiempo.....	72
Figura 55 Gráfica de corriente L1(A) vs tiempo.....	73
Figura 56 Gráfica de torque contra velocidad de motor siemens.....	74
Figura 57 Gráfica de corriente contra torque de motor siemens	75
Figura 58 Gráfica de potencia activa y aparente contra torque de motor siemens.....	75
Figura 59 Gráfica de potencia mecánica y eléctrica contra torque de motor siemens	76
Figura 60 Gráfica de eficiencia contra torque de motor siemens.....	76
Figura 61 Gráfica de factor de potencia contra torque de motor siemens.....	77
Figura 62 Comunicación con PLC S7-300 (Protocolo S7).....	94
Figura 63 Adquisición de energía con Sentron PAC3220 (Modbus TCP)	95
Figura 64 Automatización y generación de reportes.....	95
Figura 65 Control de freno	96
Figura 66 Visualización y monitoreo (Dashboard)	96

Índice de tablas

Tabla 1 Ponderación de criterios	31
Tabla 2 Matriz de decisión para selección de alternativa.....	31
Tabla 3 Comparativa técnica de controladores	33
Tabla 4 Comparativa técnica de sensores de torque	35
Tabla 5 Datos de placa del motor Hampden WRM-2	51
Tabla 6 Placa de motor SIEMENS ILE0142-0DB36-4JA4-Z	70
Tabla 7 Comparativa de parámetros nominales vs. reales en condición de sobrecarga.....	78
Tabla 8 Costos de instrumentación y sensores (USD).	80
Tabla 9 Costos referenciales de automatización y control (USD).	81
Tabla 10 Costos del tablero eléctrico (USD).	82
Tabla 11 Costos del control manual del freno (USD).	83
Tabla 12 Resumen de costos	84

Índice de planos

PLANO 1	Portada
PLANO 2	Índice de páginas
PLANO 3	Vista 3D
PLANO 4	Vista 2D
PLANO 5	Bandeja portaelementos
PLANO 6	Medidas bandeja portaelementos
PLANO 7	Esquema unifilar general
PLANO 8	Esquema de comunicación
PLANO 9	Alimentación principal
PLANO 10	Distribución de 24 VDC
PLANO 11	PLC Layout
PLANO 12	SLOT 01 – CPU PLC
PLANO 13	SLOT 02 – Entradas digitales
PLANO 14	SLOT 02 – Salidas digitales
PLANO 15	SLOT 03 – Módulo AI/AO
PLANO 16	Sentron PAC3220
PLANO 17	Switch Ethernet
PLANO 18	Lista de artículos

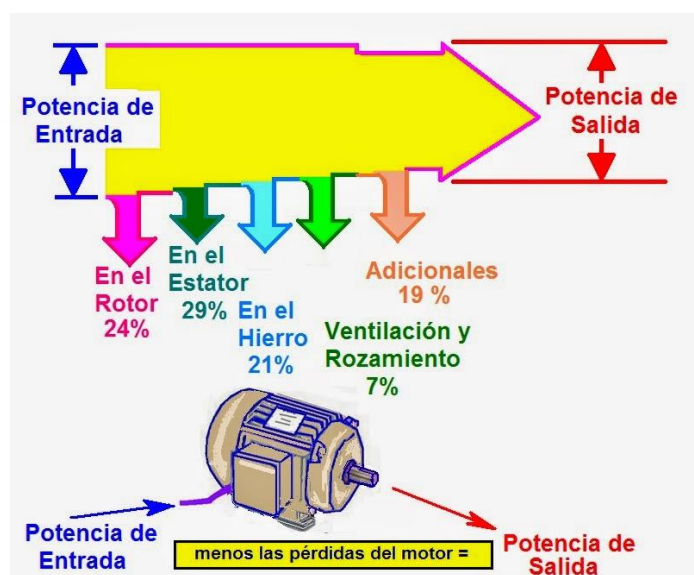
Capítulo 1

1. Introducción

La evaluación del desempeño de las máquinas eléctricas constituye un proceso fundamental en la ingeniería, al combinar mediciones mecánicas y eléctricas para analizar cómo un motor convierte la energía eléctrica en trabajo mecánico. En la Figura 1 se ilustra este proceso de conversión, detallando cómo la potencia de entrada se ve afectada por diversas pérdidas internas antes de transformarse en energía útil.

Figura 1

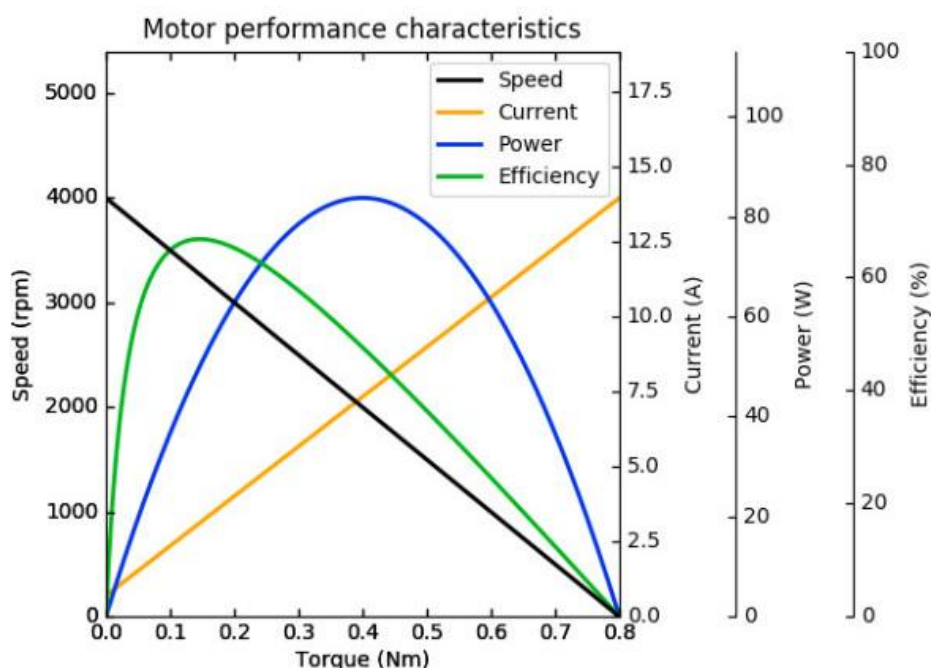
Diagrama de flujo de potencia y pérdidas [25].



El objetivo principal de esta evaluación es establecer la relación entre el par de torsión, la velocidad y la potencia consumida, generando las curvas características que describen el comportamiento de la máquina [5], [6], tal como se representa en la Figura 2. Esta evaluación es esencial tanto en el ámbito industrial como académico, en la industria, proporciona información clave para validar la eficiencia operativa y diagnosticar el estado del equipo [1].

Figura 2

Curvas características de desempeño [24].



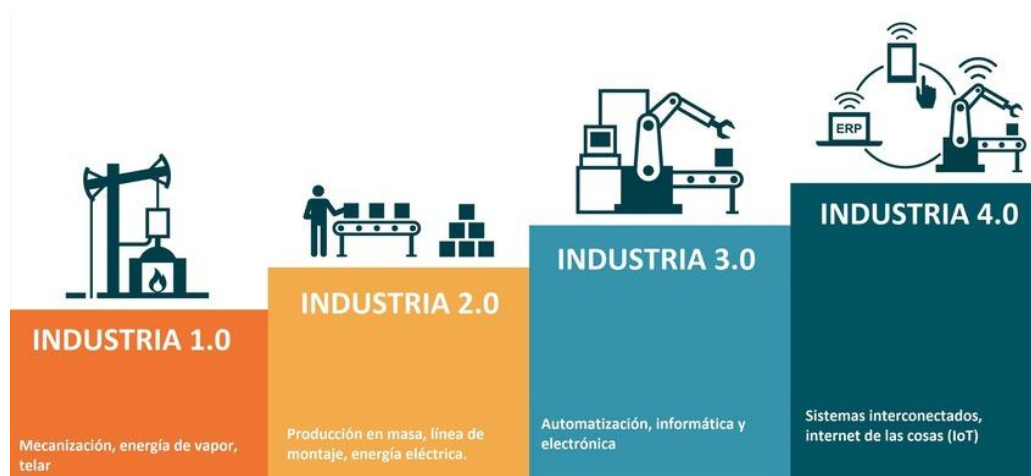
Asimismo, las curvas características son fundamentales para realizar la correcta selección de un motor eléctrico según la carga mecánica requerida. En el contexto educativo, estas pruebas permiten vincular la teoría de máquinas eléctricas con la experimentación práctica, fortaleciendo la formación de los futuros ingenieros [4].

En un entorno donde la eficiencia energética se ha vuelto una exigencia esencial, conocer el rendimiento real de los motores representa un requisito técnico y económico ineludible. No obstante, las metodologías tradicionales presentan limitaciones significativas, ya que muchos laboratorios aún operan con equipos que dependen de la intervención manual y de indicadores analógicos. Esta descoordinación de datos impide obtener una medición simultánea de las variables eléctricas y mecánicas, comprometiendo la confiabilidad de los cálculos de rendimiento. Ante este escenario, la automatización de ensayos se plantea como una solución tecnológica eficaz, alineada con la evolución de la industria ilustrada en la Figura 3, la cual describe la evolución

desde la mecanización por vapor hasta el procesamiento de señales en tiempo real propio de la Industria 4.0.

Figura 3

Evolución hacia la industria 4.0 [26].



Mediante el uso de sensores, sistemas de adquisición y plataformas digitales, es posible registrar y analizar las variables de manera sincronizada y precisa [11], [13].

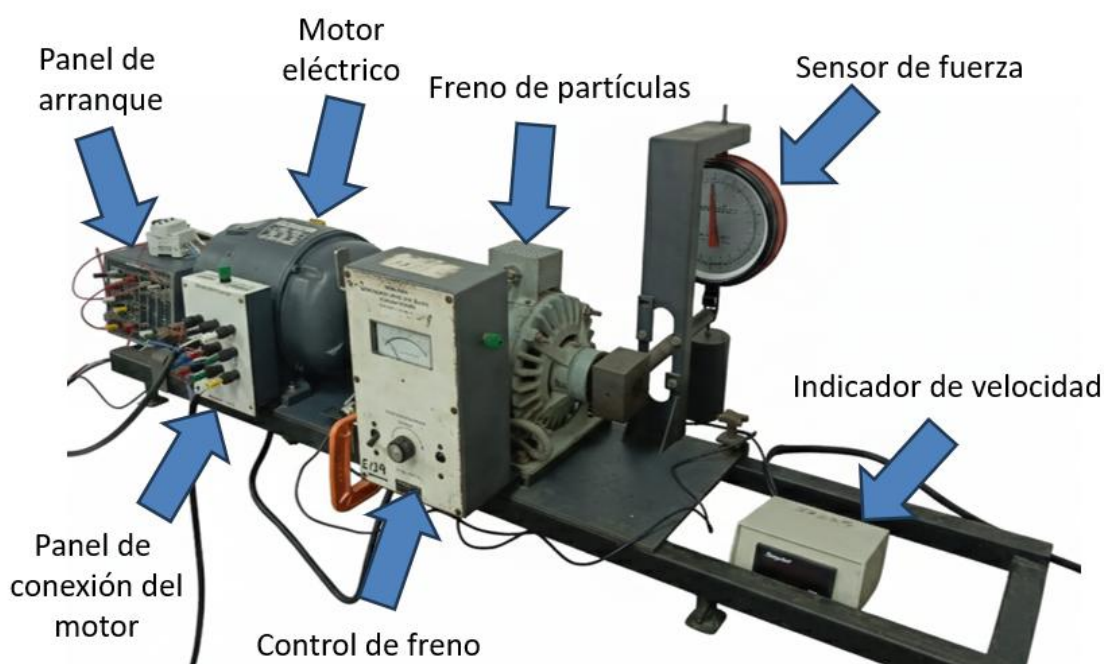
Un caso de aplicación relevante se encuentra en laboratorios universitarios con equipos operativos, pero tecnológicamente desactualizados. Tal es el caso del Laboratorio de Control y Mecatrónica de la Facultad de Mecánica y Ciencias de la Producción de la ESPOL, que dispone de un banco de pruebas Hampden de la década de 1990 que, aunque mantiene su operatividad y ha recibido mantenimiento, carece de medios para registrar o exportar datos digitalmente. Por ello, este proyecto propone el diseño e implementación de un sistema de adquisición y procesamiento de datos para dicho banco. El objetivo es desarrollar la instrumentación y el *software* necesarios para capturar digitalmente el torque y la velocidad, integrarlos con las mediciones eléctricas y procesarlos para su visualización en tiempo real y generación automática de informes. El trabajo se desarrolla en dos fases: diseño e integración del sistema, y validación experimental para comprobar su precisión y funcionalidad.

1.1 Descripción del problema

El Laboratorio de Control y Mecatrónica dispone de un banco de pruebas Hampden Engineering, con un motor de inducción WRM-2 acoplado a un freno de partículas magnéticas MPB-2. Aunque funcional, su funcionamiento es totalmente manual y analógico, basado en procedimientos que han quedado obsoletos frente a los modernos sistemas de registro y análisis automatizado de datos [1]. En la Figura 4 se puede observar la configuración física de este equipo y su instrumentación original.

Figura 4

Foto real del banco Hampden MPB-2



Nota: Banco de pruebas Hampden Engineering del Laboratorio de Control y Mecatrónica.

Actualmente, el banco opera bajo mediciones tradicionales que dependen de la observación de indicadores analógicos. Para la carga mecánica se usa una balanza para medir torque y para la velocidad un tacómetro óptico con un indicador de velocidad independiente. Esta disparidad en la instrumentación se evidencia en la Figura 5, que muestra el conjunto de dispositivos heterogéneos utilizados para capturar las variables clave.

Figura 5

Instrumentación actual del banco: multímetro y pinza amperimétrica externos para variables eléctricas, junto al indicador de velocidad y la balanza mecánica de torque del equipo original.



Además, cuenta con un panel de control para el dinamómetro, donde se regula la carga mecánica que el motor debe vencer mediante el uso de la perilla; un panel de conexión del motor, para realizar las respectivas conexiones; y un panel de arranque, que se utiliza para conectar el motor y realizar la respectiva marcha y paro. El sistema carece de interfaces digitales, lo que impide registrar variables en tiempo real y dificulta obtener curvas de rendimiento. En el ámbito eléctrico, las mediciones con instrumentos externos restan precisión e impiden la continuidad de las pruebas. Esta metodología obliga a un procedimiento secuencial donde se debe esperar la estabilización para anotar valores manualmente. Esta dependencia genera problemas críticos, principalmente la falta de sincronización entre variables mecánicas y eléctricas. Al registrar torque, velocidad, voltaje y corriente de forma desacoplada, se introducen discrepancias que conducen a cálculos de rendimiento erróneos, lentitud y susceptibilidad a errores humanos [1].

Estas limitaciones evidencian una brecha notable frente a las exigencias académicas e industriales actuales [1]. El rendimiento de un motor cambia con el uso [3], por lo que es indispensable contar con datos experimentales precisos para conocer su estado real. En su condición actual, el banco es incapaz de realizar esta caracterización de forma fiable.

Por tanto, se propone diseñar un sistema automatizado para transformar el banco en una herramienta moderna de caracterización, optimizando los tiempos de ensayo [1] y centralizando la operación en una interfaz de usuario.

1.2 Justificación del problema

La adquisición de maquinaria eléctrica conlleva riesgos técnicos significativos debido a la incertidumbre sobre la calidad de fabricación, donde la diferencia entre las especificaciones de placa y el rendimiento real en motores de bajo costo genera pérdidas operativas. Investigaciones de Kopyrin et al. sostienen que el error entre el comportamiento teórico y el experimental no debería exceder el 10% para garantizar la confiabilidad operativa [19]. Una caída no detectada de apenas un 5% en la eficiencia se traduce en sobrecostos acumulativos que pueden superar la inversión inicial, motivando la implementación de sistemas que filtren activos ineficientes antes de su instalación.

La automatización de ensayos permite capturar la dinámica del motor con una resolución temporal del orden de cientos de milisegundos, eliminando la subjetividad de la inspección manual. Esta capacidad facilita generar una "huella digital" cuantitativa indispensable para la economía circular, permitiendo distinguir científicamente entre motores con eficiencia superior al 85-90 % (aptos para reúso) y aquellos cuya degradación justifica el reciclaje inmediato [1], [6]. La medición precisa es, por tanto, la única vía para evitar tanto el desecho prematuro de maquinaria funcional como la operación de equipos ineficientes [11].

Actualmente, la infraestructura del Laboratorio de Control y Mecatrónica basada en el banco Hampden MPB-2 carece de la tecnología necesaria para estos diagnósticos. Aunque su mecánica es robusta, la operación manual y la falta de sincronización limitan su uso en procesos de certificación de calidad. Debido al alto costo de las plataformas comerciales modernas, modernizar este activo legado representa una solución viable para validar modelos de simulación o auditar proveedores bajo normas estandarizadas [18]. Transformar este banco en una plataforma

automatizada permitirá diagnosticar el estado de salud de los motores, extendiendo su vida útil mediante instrumentación de alta fidelidad sin sustituir la infraestructura física existente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de automatización y adquisición de datos mediante la integración de instrumentación electrónica y una interfaz de supervisión, que ejecute las pruebas en el dinamómetro y capture las variables para generar un informe de resultados útil para el cliente.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Seleccionar sensores y un sistema de adquisición de datos para capturar las variables de interés durante las pruebas.
2. Diseñar un tablero de control que integre fuente de alimentación, sistemas de protección, dispositivos de adquisición y control, y botones con funciones básicas para la operación del dinamómetro.
3. Diseñar una interfaz de usuario que permita configurar el sistema, visualizar datos en tiempo real y generar un informe de resultados del desempeño del motor.

1.4 Marco teórico

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos y antecedentes que sustentan el desarrollo del sistema de automatización para el banco de pruebas de motores eléctricos. Se abordan conceptos generales sobre la caracterización del rendimiento de motores, los principios de medición de variables eléctricas y mecánicas y las tecnologías utilizadas en la automatización y adquisición de datos industriales.

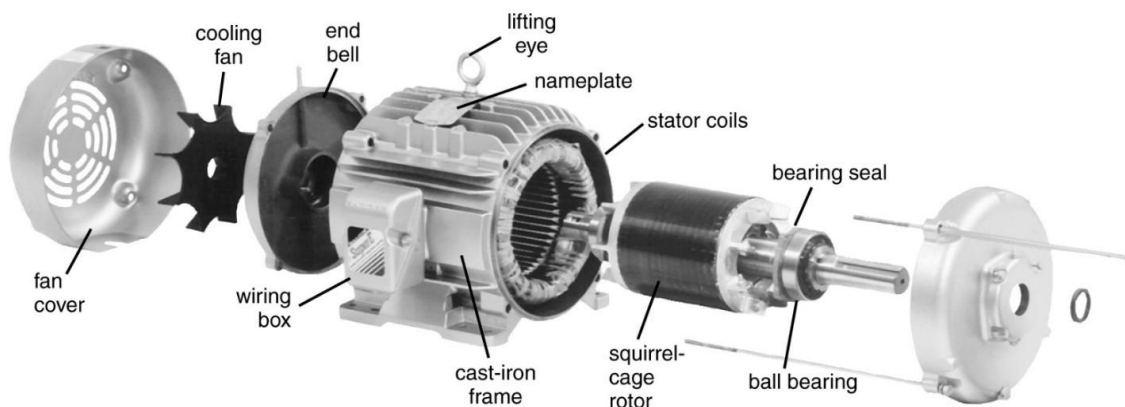
1.4.1 Fundamentos sobre motores eléctricos

Los motores eléctricos constituyen el elemento esencial en la conversión de energía eléctrica en energía mecánica. En particular, el motor de inducción trifásico es el más utilizado en la industria debido a su robustez, bajo costo y reducido mantenimiento. En la Figura 6 se ilustra la constitución

mecánica y los componentes principales que permiten esta operación, destacando la disposición del estator y el rotor.

Figura 6

Vista explosionada de un motor de inducción de jaula de ardilla [23].



Su funcionamiento se basa en la interacción electromagnética entre el estator y el rotor, generando un momento de torsión en la dirección del campo magnético giratorio [5]. Este proceso depende intrínsecamente del deslizamiento, la diferencia necesaria entre la velocidad síncrona y la real, variable que influye directamente en el torque desarrollado y la eficiencia. El análisis de rendimiento vincula estas magnitudes mecánicas con la potencia de salida para determinar la eficiencia operativa de la máquina.

La potencia de entrada, a su vez, depende del voltaje, corriente y factor de potencia, variables que pueden medirse experimentalmente mediante sensores eléctricos sincronizados. El estudio de estas relaciones permite obtener las curvas características del motor, entre las cuales destacan: torque-velocidad, potencia-velocidad y eficiencia-velocidad, indispensables para su caracterización en un banco de pruebas [6].

El rendimiento global del motor disminuye debido a diversas pérdidas internas. Las pérdidas eléctricas se calculan mediante la resistencia de los devanados y la corriente eficaz, mientras que las pérdidas magnéticas dependen del flujo y la frecuencia de operación. Según Wildi [6], la eficiencia aumenta con la carga hasta alcanzar su máximo en el rango de potencia nominal.

La determinación experimental de estas variables es esencial para validar las especificaciones de fábrica. En la práctica, la automatización permite capturar torque, velocidad y potencia en tiempo real, construyendo curvas de desempeño precisas que facilitan el análisis de la eficiencia y la estabilidad operativa frente a los modelos teóricos.

1.4.2 Fundamentos de los bancos de prueba (Dinamómetros)

Los bancos de prueba, o bancos dinamométricos, son equipos empleados para medir el rendimiento de máquinas rotativas bajo condiciones controladas. En motores eléctricos, permiten determinar el comportamiento del torque, la velocidad y la potencia, variables indispensables para obtener las curvas características de desempeño.

Su principio de operación consiste en acoplar el motor en estudio a un freno controlado, que aplica un torque resistente medible. La potencia mecánica entregada se calcula mediante la relación [5]:

$$P = T \cdot \omega$$

donde P es la potencia (W), T el torque (N·m) y ω la velocidad angular (rad/s).

Un banco dinamométrico está formado por tres subsistemas principales, el motor bajo ensayo, el freno dinamométrico o carga variable, y el sistema de medición y adquisición de datos. De acuerdo con Wildi [6], el freno disipa la energía mecánica suministrada por el motor transformándola, usualmente, en calor; la medición simultánea del torque y la velocidad permite determinar la potencia y, junto con las mediciones eléctricas de voltaje y corriente, calcular la eficiencia:

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100\%$$

1.4.2.1 Clasificación de dinamómetros

Los dinamómetros se clasifican según el principio físico con el que generan la resistencia al giro.

- **Frenos de corrientes de Foucault (o eddy-current dynamometers)**

Los frenos de corrientes de Foucault o *eddy-current dynamometers*, como los de la serie WB de Magtrol [8] como se observa en la Figura 7, funcionan mediante la inducción electromagnética.

Figura 7

Dinamómetro de corrientes de Foucault (Eddy-current) serie WB [8].



Un rotor metálico gira dentro de un campo magnético generado por un electroimán; las corrientes inducidas en el rotor producen un torque de frenado controlable por la intensidad del campo. Ofrecen buena repetibilidad y respuesta rápida, aunque su eficacia disminuye a bajas velocidades.

- **Frenos por histéresis**

Los frenos por histéresis también operan mediante un campo magnético, pero en este caso el torque se origina por las pérdidas por histéresis en un material ferromagnético que se magnetiza y desmagnetiza cíclicamente.

Los dinamómetros por histéresis de la serie HD de Magtrol [9] como se observa en la Figura 8, permiten un control de torque extremadamente estable, sin necesidad de contacto mecánico, y son adecuados para pruebas de baja potencia o aplicaciones de precisión.

Figura 8

Dinamómetro por histéresis serie HD de Magtrol [9].



- **Dinamómetros de freno de partículas**

Los dinamómetros de freno de partículas (serie PB), como se muestra en la Figura 9, emplean partículas magnéticas y se caracterizan por su capacidad de generar torque desde el estado de reposo

Figura 9

Dinamómetro de freno de partículas serie PB de Magtrol [10].



Una corriente eléctrica que pasa a través de una bobina genera un campo magnético, el cual cambia la propiedad de las partículas. Este proceso produce un torque de frenado suave a través de la fricción entre el rotor y el estator. Estos dinamómetros de partículas (PB) producen su torque nominal completo incluso a velocidad cero, permitiendo cargar el elemento a prueba desde el reposo para determinar el torque de arranque [10].

- **Dinamómetro del laboratorio**

El modelo Hampden MPB-2 utilizado en el Laboratorio de Mecatrónica de la ESPOL pertenece a esta última categoría, aunque su control analógico limita actualmente la digitalización y sincronización de las mediciones, motivo por el cual su automatización resulta necesaria.

1.4.3 Sistemas de adquisición y procesamiento de datos (DAQ)

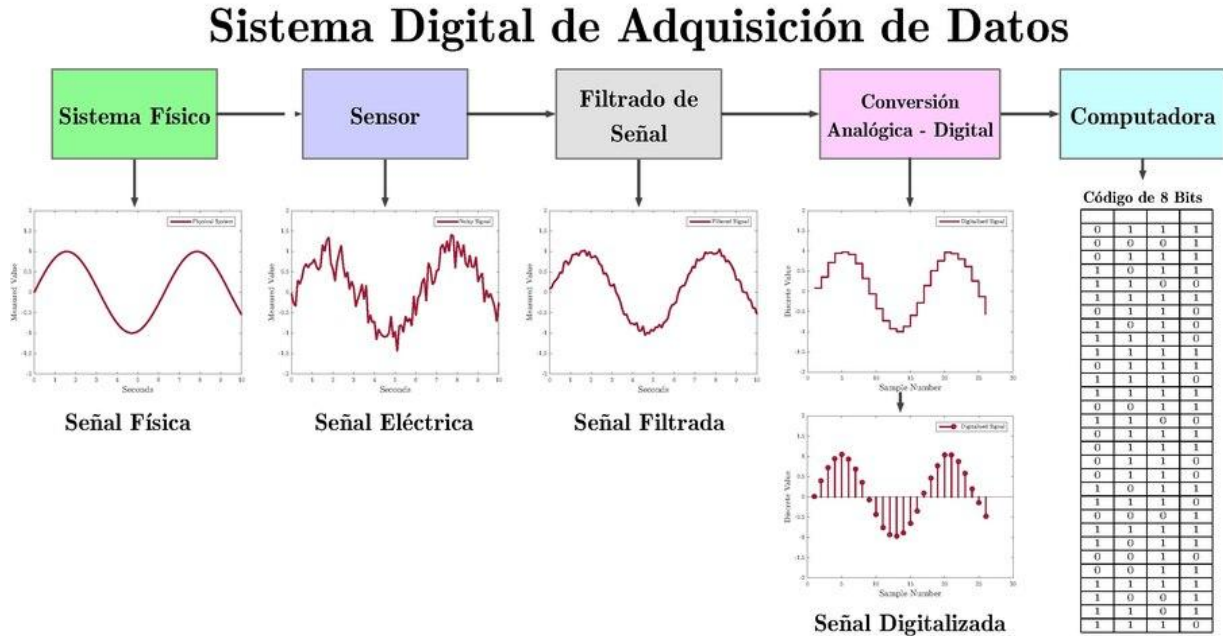
La adquisición y procesamiento de datos constituyen funciones esenciales en los sistemas automatizados de medición. En un banco de ensayos, el sistema DAQ capta las magnitudes físicas del proceso, las convierte en señales eléctricas y las transmite a un sistema de control o supervisión. Según Morris y Langari [11], un sistema de medición eficaz debe asegurar fidelidad en la transducción, mínima distorsión en el acondicionamiento y sincronización temporal entre canales. En entornos industriales, la adquisición de datos no solo registra información, sino que habilita el control retroalimentado que mantiene estable el sistema bajo prueba.

1.4.3.1 Concepto de adquisición de datos (DAQ)

Un sistema de adquisición de datos se define como el conjunto de dispositivos que transforman variables físicas continuas en información digital que describe el comportamiento dinámico del proceso. En la Figura 10 se detalla la arquitectura funcional de este sistema y cómo se transforma la señal en cada etapa.

Figura 10

Arquitectura de un sistema DAQ y evolución de la señal desde el fenómeno físico hasta su procesamiento digital [27].



Su estructura funcional incluye cuatro bloques principales [14]:

- **Sensor o transductor:** convierte la magnitud física (torque, temperatura, corriente) en una señal eléctrica proporcional.
- **Acondicionador de señal:** amplifica, filtra y aísla la señal.
- **Convertor analógico-digital (A/D):** discretiza la señal continua.
- **Unidad de procesamiento:** interpreta, almacena y calcula variables derivadas, como potencia o eficiencia.

El desempeño del sistema depende del tiempo de muestreo (T_s) y de la frecuencia de muestreo ($f_s = 1/T_s$). Según el teorema de Nyquist, para evitar aliasing debe cumplirse $f_s \geq 2f_{max}$. En sistemas multicanal, la sincronización entre señales mecánicas y eléctricas es esencial para obtener correlaciones válidas [13]. En instrumentación industrial se emplean rangos estándar de 0–10 V o 4–20 mA, este último preferido por su inmunidad al ruido y detección automática de fallos.

1.4.3.2 Plataformas de control y adquisición

a) Controladores lógicos programables (PLC)

Los PLC son controladores diseñados para ejecutar operaciones secuenciales y continuas con alta fiabilidad y resistencia a condiciones industriales. Un PLC está compuesto por módulos de entrada/salida, CPU y memoria de programa estructurada en ciclos de escaneo: lectura de entradas, ejecución del programa y actualización de salidas. Este proceso determinístico asegura sincronización temporal [14]. Familias como Siemens S7, Allen-Bradley CompactLogix u Omron CJ2 son estándares por su compatibilidad con protocolos Modbus, Profibus y OPC UA. En entornos académicos, los PLC reproducen procesos industriales reales y facilitan el diseño de sistemas robustos y repetibles.

b) Sistemas basados en microcontroladores

Los microcontroladores integran CPU, memoria y periféricos analógicos/digitales en un solo chip. Ofrecen flexibilidad, bajo costo y conectividad mediante interfaces seriales o inalámbricas (UART, SPI, I2C, Wi-Fi, Bluetooth). Plataformas como Arduino, Raspberry Pi o ESP32 son ampliamente usadas para adquisición distribuida y desarrollo de sistemas híbridos PLC-microcontrolador. Aunque menos robustos, destacan por su bajo consumo y facilidad de integración [16].

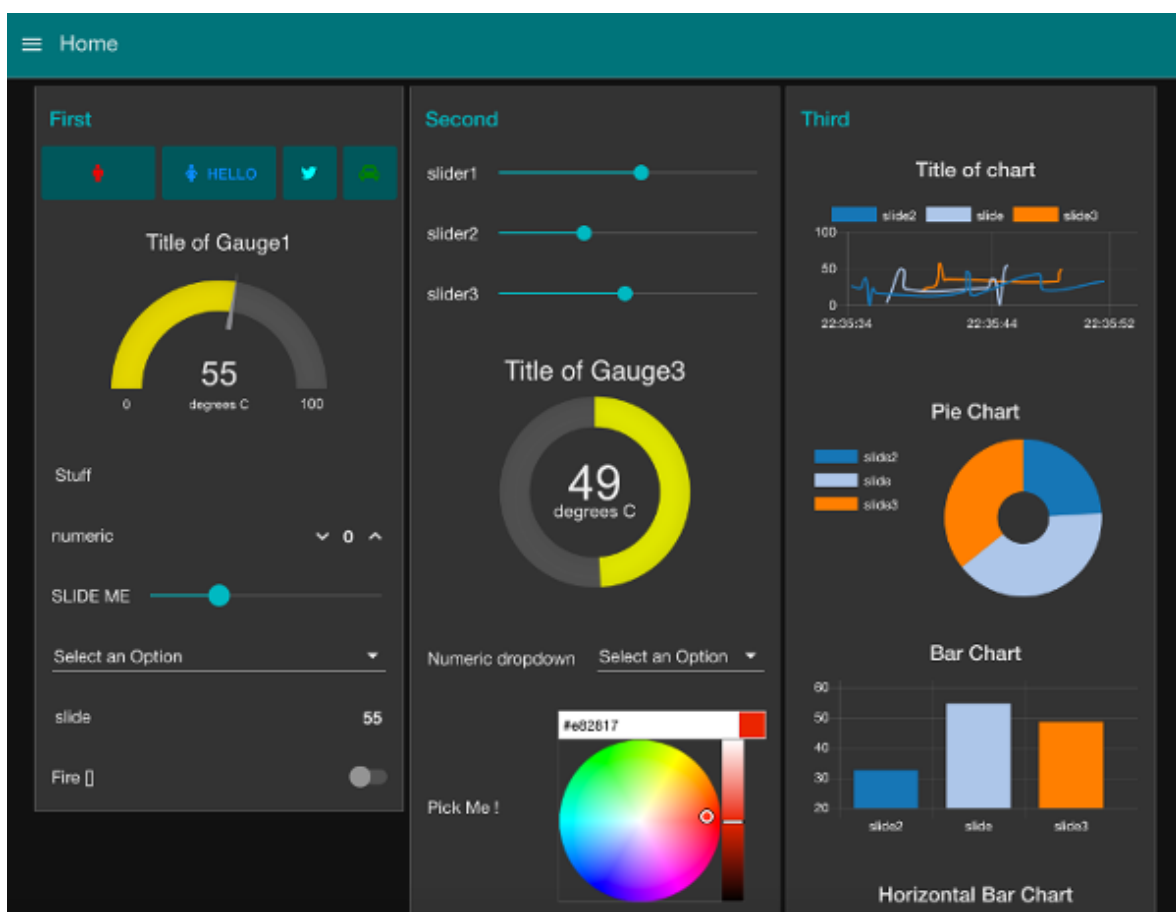
c) Sistemas SCADA e IIoT (HMI)

Los SCADA constituyen la capa superior de la automatización: supervisan, registran y visualizan el proceso a través de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI). Recolectan datos de PLC o DAQ, los almacenan y permiten la interacción del operador. Las plataformas modernas, basadas en Ethernet/IP, Modbus TCP y OPC UA, admiten comunicación distribuida entre dispositivos [14]. Con el avance del *Industrial Internet of Things* (IIoT), herramientas como Ignition o ThingWorx permiten integrar sensores y controladores sin programación compleja. En esta misma línea, Node-RED se presenta como una potente alternativa de código abierto para la programación visual basada en flujos.

Desarrollada originalmente por IBM y ahora mantenida por la OpenJS Foundation, esta plataforma permite conectar dispositivos de *hardware*, APIs y servicios en línea de manera intuitiva [17]. Como se ilustra en la Figura 11, Node-RED facilita la creación de tableros de control (*dashboards*) dinámicos que integran medidores analógicos, gráficas de tendencias y controles interactivos para la supervisión de procesos en tiempo real.

Figura 11

Interfaz de monitoreo (Dashboard) desarrollada en Node-RED para aplicaciones de IIoT [28].



Por su arquitectura ligera, su modelo de ejecución basado en eventos y su compatibilidad nativa con protocolos clave como MQTT, Node-RED se ha consolidado como una solución estándar de bajo costo para el prototipado rápido, la visualización de datos y el registro en tiempo real en aplicaciones industriales y académicas.

1.4.4 Automatización de bancos de ensayo

La automatización de bancos de ensayo constituye una tendencia clave en la modernización de laboratorios y procesos industriales de medición. A diferencia de los sistemas de control convencionales, cuyo propósito primordial es la regulación de variables en tiempo real, la automatización de ensayos se orienta específicamente a digitalizar, sincronizar y gestionar integralmente el proceso de adquisición y análisis de datos. En este contexto, el sistema permite que la captura y procesamiento de información ocurra de manera autónoma y precisa, eliminando la intervención manual del operador en la lectura de magnitudes.

Según Morris y Langari [11], la automatización de mediciones debe cumplir con tres objetivos fundamentales: la reducción de la intervención humana, el incremento de la repetibilidad de los ensayos y la garantía de trazabilidad de los datos obtenidos. Estos principios resultan críticos en los bancos de pruebas de motores eléctricos, donde la precisión y la sincronización temporal entre las variables mecánicas (torque, velocidad) y eléctricas (voltaje, corriente) son esenciales para obtener resultados de caracterización confiables.

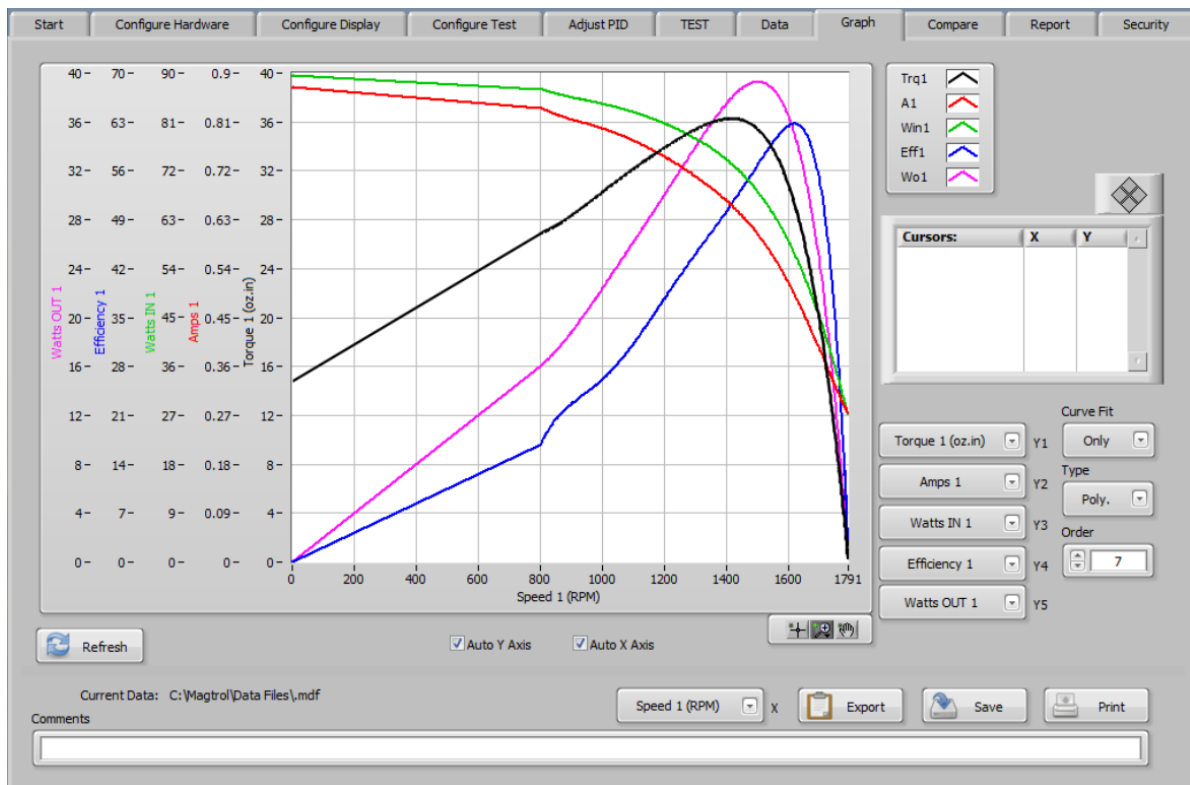
Arquitectónicamente, un banco automatizado integra dispositivos de medición y módulos de adquisición bajo una misma estructura funcional. El proceso inicia en los sensores, que transforman las magnitudes físicas en señales eléctricas. Posteriormente, el sistema DAQ acondiciona y digitaliza estas señales para enviarlas a una unidad de procesamiento, donde se ejecutan operaciones matemáticas para derivar parámetros como la potencia y la eficiencia [6], [14]. Finalmente, una interfaz HMI o SCADA permite visualizar los datos en tiempo real, almacenar históricos y generar reportes automáticos.

En el marco de la Industria 4.0, se emplean arquitecturas distribuidas basadas en controladores industriales (PLC) y plataformas IIoT, utilizando protocolos como Modbus TCP o MQTT para centralizar la información [14]. Aunque existen soluciones comerciales avanzadas como Magtrol M-Test 7 o DynoLab, su elevado costo y naturaleza propietaria justifican el desarrollo de

soluciones académicas personalizadas y de libre acceso, adaptadas a los recursos específicos del laboratorio [21], [22]. Como se observa en la Figura 12, el *software* comercial M-TEST 7 permite una visualización integral de las curvas de desempeño, integrando torque, potencia y eficiencia en un solo entorno gráfico.

Figura 12

Interfaz de usuario del software comercial Magtrol M-TEST 7 para la caracterización de motores [22].



1.4.5 Trabajos y desarrollos relacionados

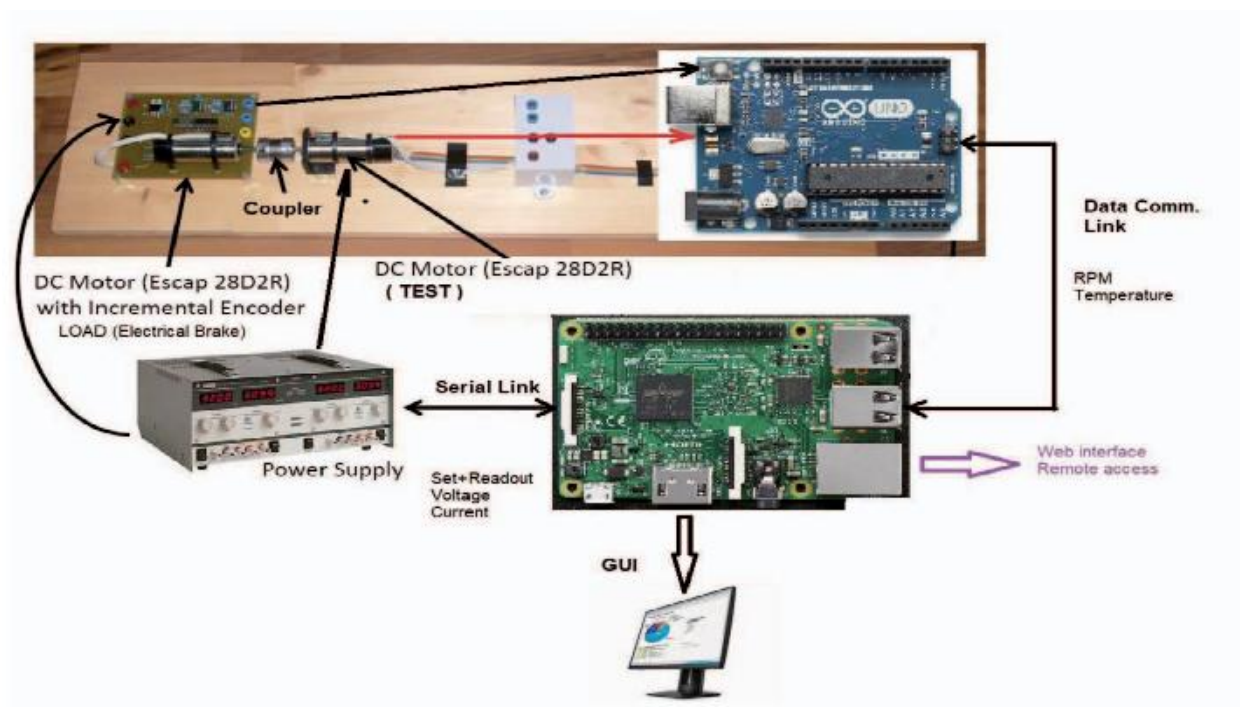
La automatización de bancos de ensayo para motores eléctricos constituye un campo de investigación activo en las últimas décadas, impulsado por la necesidad de obtener mediciones sincronizadas y precisas de las variables eléctricas y mecánicas. Este capítulo presenta una revisión de los principales desarrollos internacionales y aplicaciones industriales que sirven de base para el presente proyecto.

1.4.5.1 Antecedentes y desarrollo industriales

Diversos trabajos académicos han abordado el diseño de bancos de prueba orientados a la caracterización de motores de inducción. *Baltayan et al.* [2] desarrollaron un banco en línea para motores de corriente continua, integrando una arquitectura distribuida basada en Raspberry Pi y Arduino, lo que permitió controlar el sistema y registrar datos de manera remota. Este enfoque demuestra la viabilidad de soluciones de bajo costo para entornos educativos y experimentales. Como se observa en la Figura 13, este tipo de esquemas facilita la conexión entre el *hardware* de potencia, los sensores y la interfaz de usuario mediante enlaces de comunicación serial y de red.

Figura 13

Arquitectura de control y adquisición distribuida para bancos de prueba de bajo costo [2].



De manera más avanzada, *Ádámkó et al.* [3] diseñaron un banco de pruebas automatizado utilizando LabVIEW, una base de datos MySQL y comunicación en red con Java. El sistema permite configurar ensayos, adquirir datos eléctricos y mecánicos en tiempo real y generar reportes automatizados, mostrando la convergencia entre control, adquisición y análisis.

Resultados similares se observan en *Bielaczyc et al.* [18], quienes establecieron una metodología de ensayo conforme a la normativa UN-ECE R85 para bancos híbridos, asegurando reproducibilidad y trazabilidad en mediciones de potencia eléctrica y eficiencia. Por su parte, *Kopyrin et al.* [19] propusieron un modelo de validación de motores de inducción sumergibles mediante simulación en MATLAB/Simulink, verificando que el error entre resultados experimentales y simulados no excediera el 10 %. Este trabajo destaca la importancia de la correlación entre simulación y medición experimental en la caracterización de motores eléctricos. en la Figura 14 se presentan las curvas características obtenidas mediante la simulación del motor, mientras que en la Figura 15 se muestran los datos recolectados experimentalmente en el banco de ensayos para un punto de operación nominal de 70 kW.

Figura 14

Curvas características del motor de inducción obtenidas mediante simulación: velocidad, eficiencia, factor de potencia, corriente y torque vs. potencia de salida [19].

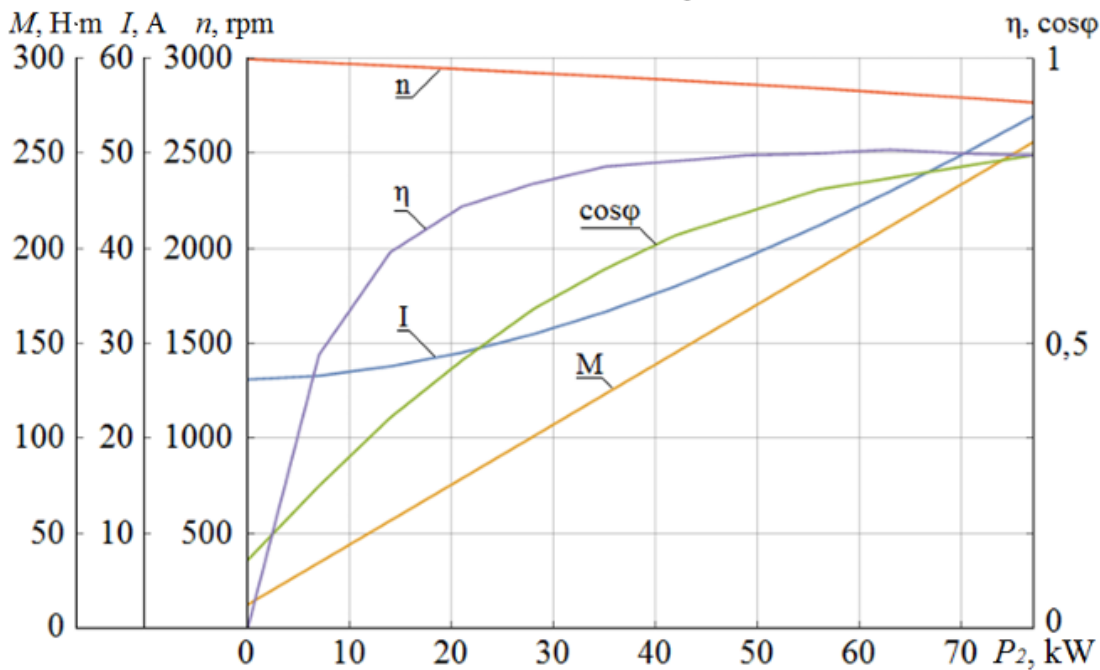
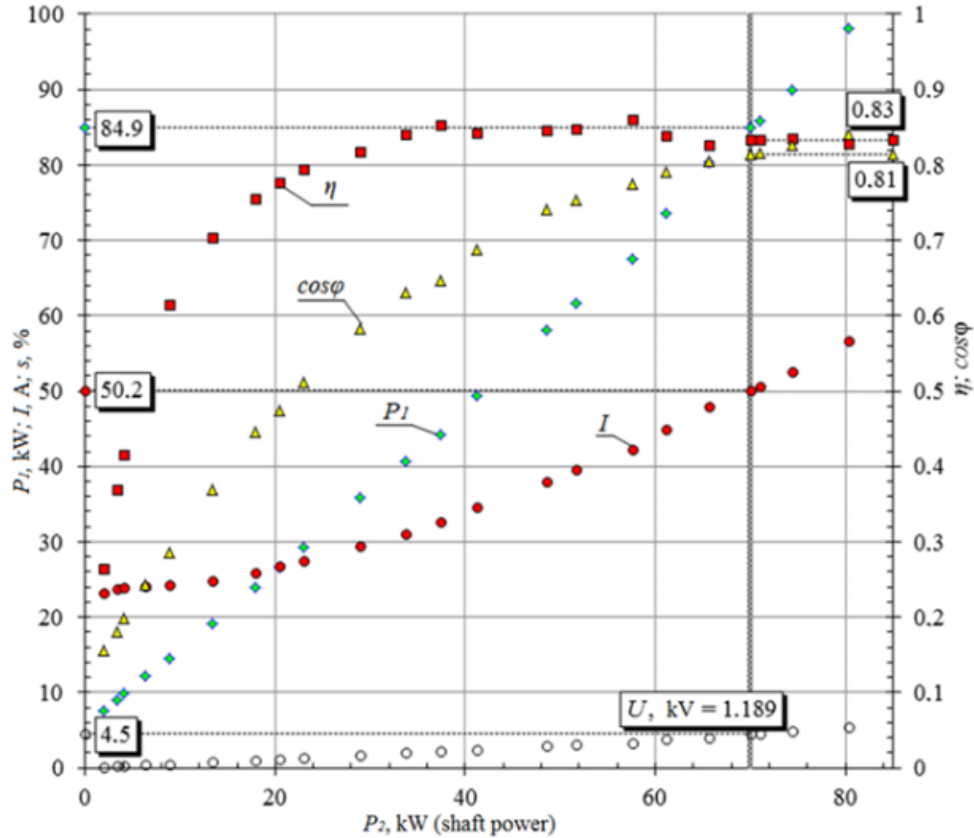


Figura 15

Resultados experimentales del motor en el banco de ensayos: eficiencia, factor de potencia, corriente y torque vs. potencia de salida [19].

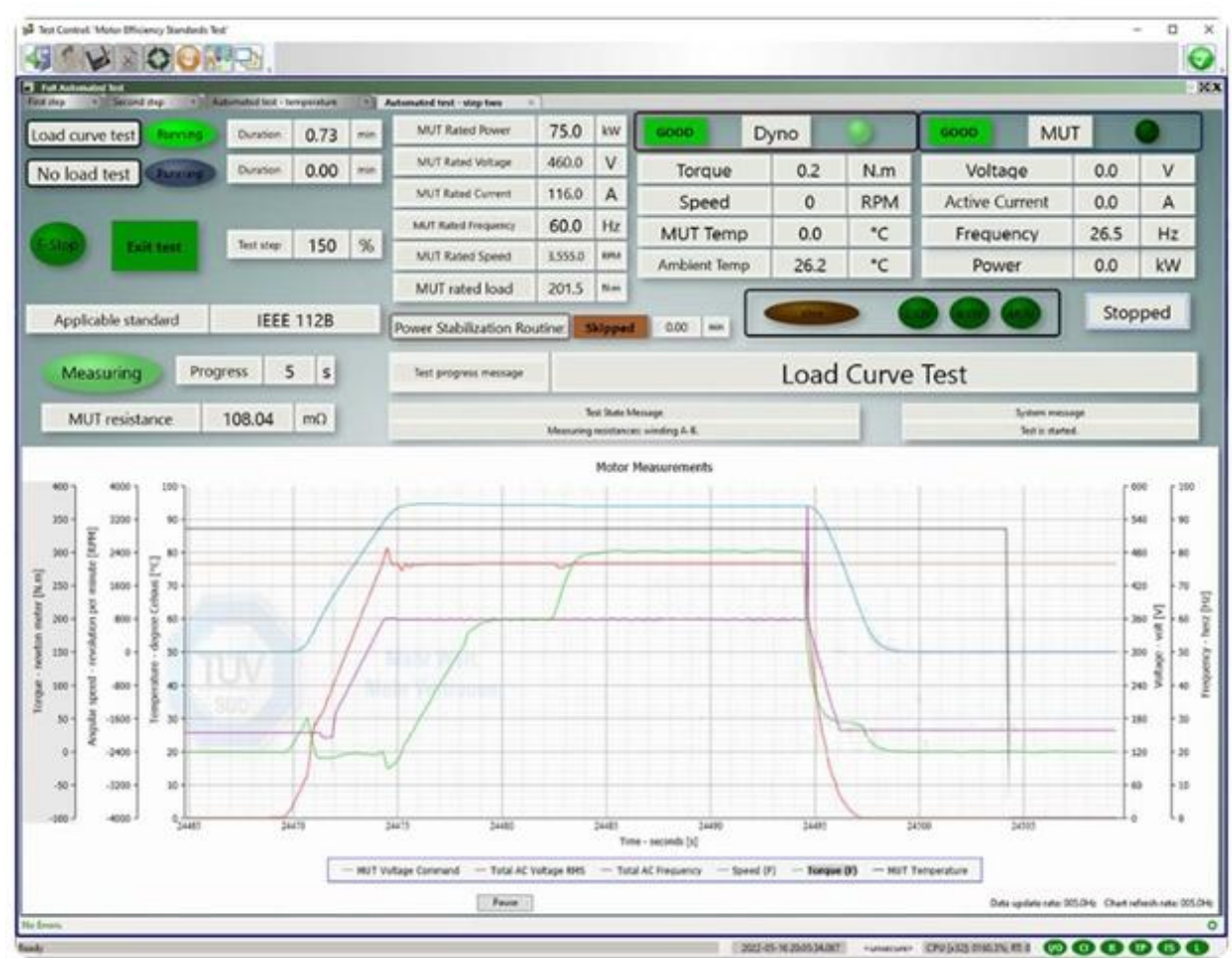


Finalmente, *Sánchez-Herrera et al.* [20] desarrollaron un banco de entrenamiento remoto con visualización tridimensional y realidad aumentada, demostrando el potencial de los entornos virtuales para la enseñanza de máquinas eléctricas y control.

A nivel industrial, los fabricantes de equipos de prueba han evolucionado hacia plataformas completamente automatizadas. El sistema DynoLAB Test Automation Controller de Dyno-One [21] ofrece una solución modular para bancos de motores que integra adquisición multicanal, control dinámico de carga y ejecución automática de protocolos de ensayo. Como se aprecia en la Figura 16, la interfaz de DynoLAB permite una gestión exhaustiva de parámetros de potencia y eficiencia bajo estándares internacionales, facilitando la visualización de curvas de carga en tiempo real.

Figura 16

Plataforma de automatización de ensayos DynoLAB, configurada para pruebas de eficiencia bajo la norma IEEE 112B [21].



De forma similar, Magtrol M-TEST 7 [22] representa el estado del arte en *software* para pruebas de motores eléctricos, proporcionando control de dinamómetros, registro de datos, generación automática de curvas $T-\omega$ y análisis de eficiencia bajo normas IEC y IEEE. Estas soluciones demuestran el avance hacia la integración total entre *hardware*, *software* y bases de datos, alineado con el paradigma de la Industria 4.0.

1.4.5.2 Brecha tecnológica y síntesis

Si bien los sistemas académicos revisados han alcanzado distintos niveles de automatización, la mayoría presenta limitaciones en la sincronización entre variables mecánicas y eléctricas, en la escalabilidad de los módulos de adquisición o en la flexibilidad de la interfaz de usuario. Por otro

lado, las soluciones industriales comerciales son altamente eficientes, pero de alto costo y escasa adaptabilidad a contextos educativos o de investigación aplicada.

En este sentido, el proyecto de automatización propuesto busca reducir esa brecha tecnológica, combinando la precisión y robustez de los entornos industriales con la flexibilidad y accesibilidad de las plataformas académicas. Al integrar sensores, módulos de adquisición, controladores industriales y *software* de supervisión en una arquitectura abierta, se establece una base experimental moderna que contribuye a la docencia y la validación de modelos en motores eléctricos.

Capítulo 2

2. Metodología

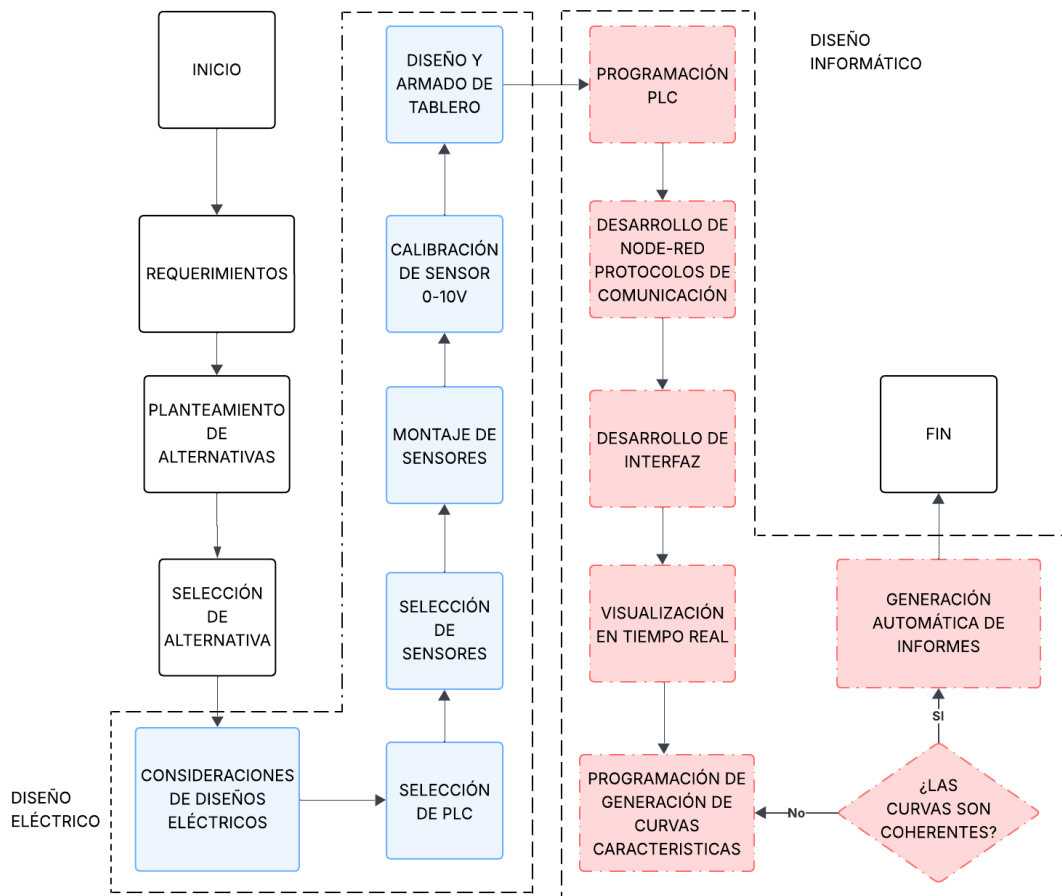
Este capítulo describe el proceso de diseño eléctrico e informático del banco de pruebas, desde la identificación de necesidades técnicas hasta la evaluación y selección de la propuesta final.

2.1 Metodología detallada

En la Figura 17 se detallan las fases ejecutadas para el desarrollo del diseño eléctrico e informático del banco de pruebas. Este enfoque permitió cumplir con los requerimientos técnicos establecidos, garantizando una comunicación efectiva entre el PLC, la interfaz de usuario y la generación automática de informes.

Figura 17

Diagrama de flujo de diseño del proyecto.



2.2 Requerimientos

Los requerimientos presentados a continuación constituyen las necesidades que sirvieron como guía para el desarrollo de la solución. Estas definiciones aseguran que la solución técnica final satisfaga las condiciones operativas y de control establecidas para el laboratorio.

2.2.1 Requerimientos funcionales

- **Control y supervisión del proceso**
 - El sistema debe permitir el monitoreo y control automatizado de las pruebas del dinamómetro.
 - El control lógico debe ejecutarse mediante controladores programables disponibles en el inventario del laboratorio, asegurando la gestión de señales digitales y analógicas.
- **Adquisición de variables mecánicas**
 - El sistema debe ser capaz de medir y registrar la fuerza mecánica generada por el freno del dinamómetro para determinar el torque desarrollado por el motor durante la prueba.
 - El sistema debe monitorear la velocidad angular del eje del motor en tiempo real, garantizando una resolución suficiente para la construcción de las curvas características.
- **Adquisición de variables eléctricas**
 - El sistema debe medir y registrar los parámetros eléctricos de alimentación trifásica del motor (voltaje de línea, corriente de fase, potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia).
 - La adquisición de estos datos debe realizarse de forma centralizada y digital para minimizar el error y facilitar el cálculo de la eficiencia eléctrica.
- **Visualización en tiempo real (HMI)**
 - El sistema debe contar con una interfaz gráfica que visualice simultáneamente los valores numéricos y tendencias de las variables mecánicas y eléctricas.

- El sistema debe generar y graficar las curvas características del motor:
 - Torque vs. Velocidad.
 - Torque vs. Corriente.
 - Torque vs. Potencias
- **Gestión y generación de reportes**
 - El sistema debe recopilar los datos de la prueba y generar automáticamente un informe técnico detallado.
 - El informe debe incluir: gráficas de las curvas características y un resumen de resultados.

2.2.2 Requerimientos no funcionales

- **Restricción de hardware (Aprovechamiento de Recursos)**
 - El diseño debe priorizar el uso de equipos, controladores (PLC) e instrumentos de medición ya existentes en el Laboratorio de Control y Mecatrónica.
- **Usabilidad e interfaz**
 - La interfaz gráfica debe ser intuitiva, permitiendo al usuario iniciar, detener y reiniciar pruebas mediante controles virtuales y botones sin necesidad de acceder al código fuente o tener conocimientos de programación.
 - Todas las variables deben visualizarse utilizando el Sistema Internacional de Unidades (SI).
- **Interoperabilidad y comunicación**
 - La comunicación entre dispositivos debe emplear protocolos Modbus TCP y S7-Communication sobre red cableada, garantizando la integridad de los datos.
 - Los datos adquiridos deben ser exportables a formatos abiertos y manipulables, específicamente CSV (para hojas de cálculo) y PDF (para reportes finales).

- **Seguridad eléctrica y operativa**
 - El tablero de control debe incluir protecciones eléctricas físicas (interruptores termomagnéticos) contra sobrecorriente y cortocircuitos.
 - El sistema debe incorporar una lógica de parada de emergencia con prioridad que detenga el motor en caso de emergencia.
- **Documentación**
 - El código fuente (PLC y Node-RED) debe estar debidamente documentado y comentado para facilitar futuras modificaciones académicas.
 - El sistema debe ser compatible con las computadoras estándar con sistema operativo Windows disponibles en el laboratorio.

2.3 Planteamiento de alternativas

El proyecto moderniza el banco Hampden MPB-2 mediante un sistema de automatización y adquisición de datos. Se evaluaron arquitecturas comparando microcontroladores y PLC y protocolos de comunicación inalámbricos frente a comunicación cableada industrial. La selección se definió mediante una matriz basada en cinco criterios: compatibilidad, latencia, fidelidad de digitalización, robustez y costo.

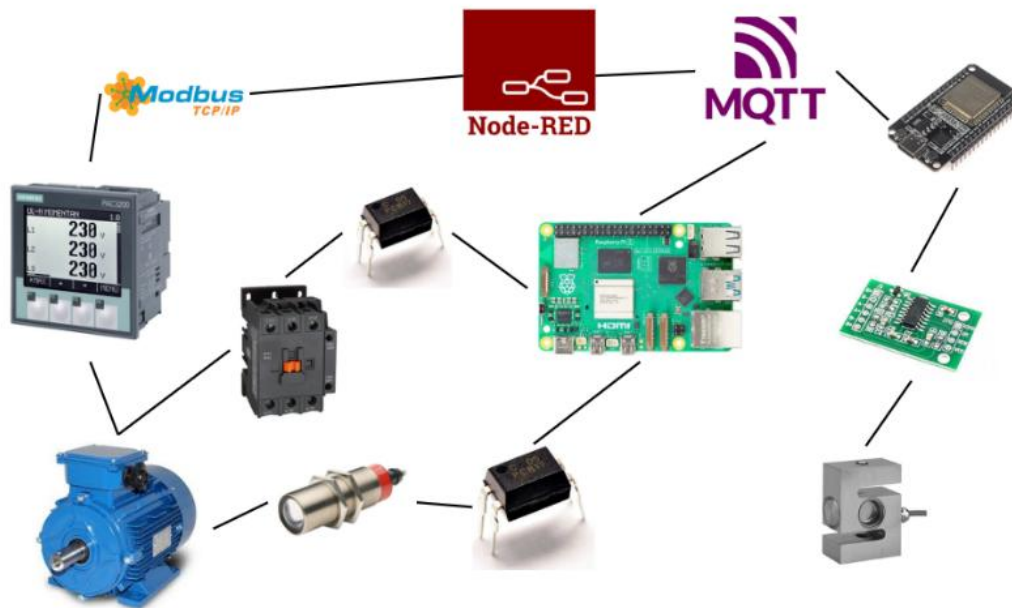
2.3.1 Descripción de las alternativas

Alternativa A: Sistemas Embebidos IoT

Esta propuesta emplea una Raspberry Pi como servidor central y *gateway IoT*, ejecutando Node-RED para integrar la lectura de sensores ESP32 mediante el protocolo MQTT a través de la red Wi-Fi y la adquisición de datos industriales vía Modbus TCP/IP. Además, el dispositivo gestiona el control del motor y sensores mediante sus pines GPIO aislados con optoacopladores, centralizando toda la información para su monitoreo y análisis automatizado.

Figura 18

Alternativa con implementación de microcontrolador

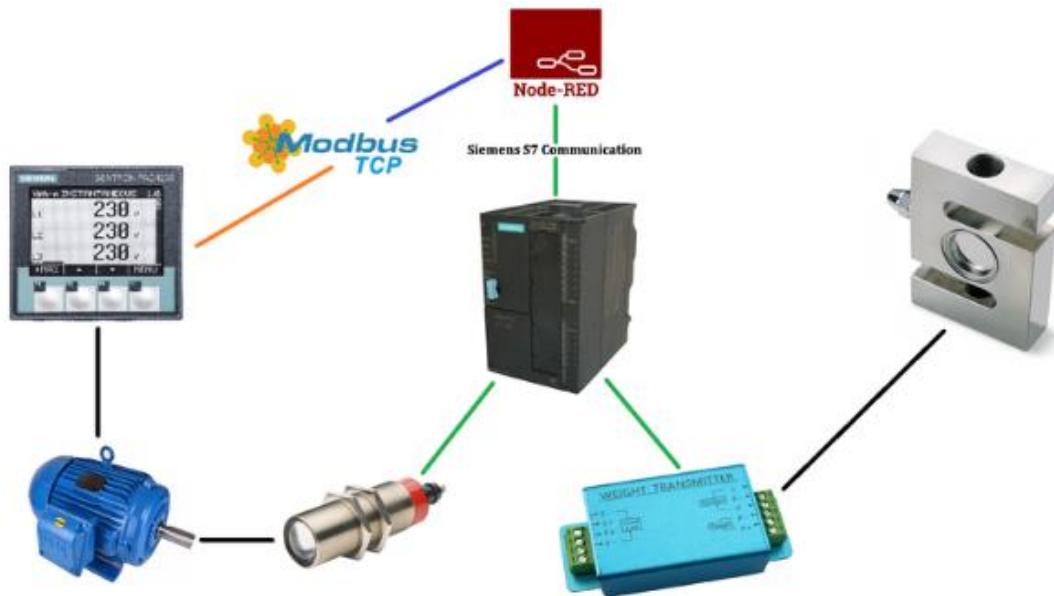


Alternativa B: Arquitectura Industrial Abierta

Esta estrategia plantea una integración basada en componentes de automatización industrial estándar. Utiliza un Controlador Lógico Programable (PLC) como núcleo de procesamiento y control del sistema. La comunicación se establece mediante protocolos industriales robustos (Modbus TCP y S7-Communication) a través de conexiones cableadas (Ethernet). Para la gestión y visualización de datos, se propone integrar la plataforma Node-RED como puente entre el entorno operativo (OT) y la visualización de datos (IT).

Figura 19

Alternativa con diseño con celda de carga.



2.4 Selección de la alternativa tecnológica

Para seleccionar la arquitectura más adecuada, se definieron criterios de evaluación ponderados según los requisitos críticos del laboratorio y las restricciones institucionales.

2.4.1 Criterios de evaluación

Compatibilidad de Infraestructura: Capacidad del sistema para operar dentro de las políticas de seguridad de la red institucional y disponibilidad de conexión.

Determinismo y Latencia: Capacidad para mantener una tasa de actualización constante, del orden de milisegundos, que permita sincronizar torque y velocidad sin desfases temporales.

Fidelidad de Digitalización: Capacidad de discriminación de la señal analógica medida por el controlador, determinada por la profundidad de bits (resolución) de sus entradas.

Robustez Industrial: Inmunidad al ruido eléctrico típico de motores y resistencia mecánica.

Costo de Implementación: Inversión económica requerida para la puesta en marcha.

En la Tabla 1 se muestran los criterios de evaluación con sus respectivos pesos como factor de ponderación.

Tabla 1*Ponderación de criterios*

Criterio	Peso
Compatibilidad de Infraestructura	25%
Determinismo y Latencia	25%
Digitalización	20%
Robustez Industrial	15%
Costo	15%

2.4.2 Matriz de decisión

A continuación, en la Tabla 2, se evalúan las alternativas con una escala del 1 al 5 (5 siendo la mejor puntuación).

Tabla 2*Matriz de decisión para selección de alternativa*

Criterio	Alternativa A	Alternativa B
Compatibilidad	1	5
Latencia	2	5
Digitalización	2	5
Robustez Industrial	2	5
Costo	5	4
Puntaje	2.8	4.85

Se seleccionó la Alternativa B debido a que la opción A resultó inviable por restricciones de seguridad institucional (bloqueo de MQTT) y por la latencia asociada a la comunicación inalámbrica, lo que impedía alcanzar la sincronización temporal requerida entre las variables mecánicas y eléctricas. La arquitectura elegida asegura inmunidad al ruido y muestreo determinístico mediante comunicación cableada, facilitando el aprendizaje con protocolos industriales (Modbus/S7) y optimizando el uso de equipos existentes en el laboratorio.

2.5 Consideraciones de diseño eléctrico

El desarrollo del sistema de caracterización se basa en la implementación de un nuevo tablero de control que debe integrarse con la infraestructura de potencia existente en el laboratorio. El diseño electrónico sigue los siguientes lineamientos técnicos:

- Integración con tablero de arranques: El sistema de caracterización se acoplará de forma modular al tablero de arranques preexistente, el cual ya dispone de las protecciones físicas necesarias (guarda motores) y los métodos de control para arranque directo, estrella-triángulo, suave y variador.
- Dimensionamiento de la protección: El nuevo tablero incluirá un interruptor termomagnético (*breaker*) principal independiente, dimensionado para proteger el circuito de control. Este cálculo se basa en el consumo nominal de la fuente de alimentación, el PLC Siemens S7-300 y los transmisores de señales, asegurando la integridad de los componentes electrónicos ante fallas internas.
- Selección de calibres y Conductores: Se definirán calibres de cableado normalizados según la norma AWG para diferenciar las etapas del sistema:
 - Uso de cables de mayor calibre para la alimentación general de AC hacia la fuente del PLC.
 - Uso de cables de calibre fino para la lógica de control y señales digitales (sensores de velocidad).

- Uso de cable apantallado para la señal analógica de 0-10V proveniente de la celda de carga para minimizar interferencias electromagnéticas.
- Interfaz de conexión: La comunicación entre el tablero de caracterización y el tablero de arranques se realizará a través de borneras de paso, permitiendo un intercambio seguro de señales de mando y estados operativos sin modificar la estructura original de potencia.

2.6 Selección del controlador lógico programable (PLC)

Primero, se comparan las características técnicas de los controladores disponibles en el inventario del laboratorio.

Tabla 3

Comparativa técnica de controladores

Características Técnicas	Siemens LOGO!	Siemens S7-200	Siemens S7-300
Arquitectura	Relé Programable	PLC Compacto	Modular Industrial
Resolución Analógica	10 bits	12 bits	13-16 bits
Comunicación	Propietaria	Serial RS-485	Ethernet Industrial
Protocolos Soportado	Ninguno estándar	Modbus	S7-Communication

Para la automatización del dinamómetro, se evaluaron tres controladores lógicos programables (PLC) disponibles en los laboratorios de la facultad, analizando su capacidad de procesamiento y puertos de comunicación. En la Figura 20 se presenta el Siemens LOGO!, una solución compacta para aplicaciones sencillas. Por otro lado, las Figuras 21 y 22 muestran los controladores S7-200

y el S7-300. Este último se seleccionó por tener mayor resolución y el protocolo industrial que integran una mayor facilidad con la industria 4.0.

Figura 20

Siemens LOGO!



Figura 21

Siemens S7-200



Figura 22

Siemens S7-300



2.7 Selección del sensor de torque

Para la medición de torque, se comparan tres tecnologías de sensores en función de su principio físico y montaje mecánico. Las especificaciones y diferencias operativas de estas tecnologías se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4

Comparativa técnica de sensores de torque

Características Técnicas	Sensor Rotativo	Celda tipo viga	Celda Tipo S
Principio de Medición	Torsión en eje	Flexión de viga	Tracción/Compresión
Instalación Mecánica	Acoplar eje	Base fija	Brazo de palanca
Direccionalidad	Bidireccional	Unidireccional	Bidireccional
Modificación	Alta	Media	Baja

A partir de los criterios establecidos en la tabla, se evaluaron físicamente las opciones disponibles. En la Figura 23 se observa un sensor de torque rotativo, el cual requiere una alineación de ejes. Por otro lado, las Figuras 24 y 25 muestran celdas de carga de tipo viga y tipo S, respectivamente, que miden el torque de forma indirecta mediante la fuerza ejercida en un brazo de palanca.

Figura 23

Sensor de torque rotativo



Figura 24

Celda de carga tipo viga

**Figura 25**

Celda de carga tipo S



Tras el análisis, se seleccionó la celda de carga tipo S (Figura 25). Aunque todas las opciones requieren una inversión económica, la Tipo S destaca por su facilidad de integración, ya que permite la instalación directa en el brazo de freno existente. Esto evita modificaciones costosas y complejas en el eje del motor.

2.8 Metodología de diseño del tablero de control

El diseño del tablero se desarrolló como una extensión técnica de la infraestructura de potencia ya existente en el laboratorio. El procedimiento se orientó a habilitar la adquisición de datos sin intervenir el tablero de arranques actual, el cual ya incorpora las protecciones de potencia

mediante guardamotores. En consecuencia, el tablero propuesto se dimensionó exclusivamente para el circuito de control y procesamiento, definiendo criterios de integración física, protecciones y cableado.

2.8.1 Consideraciones de la infraestructura de potencia disponible

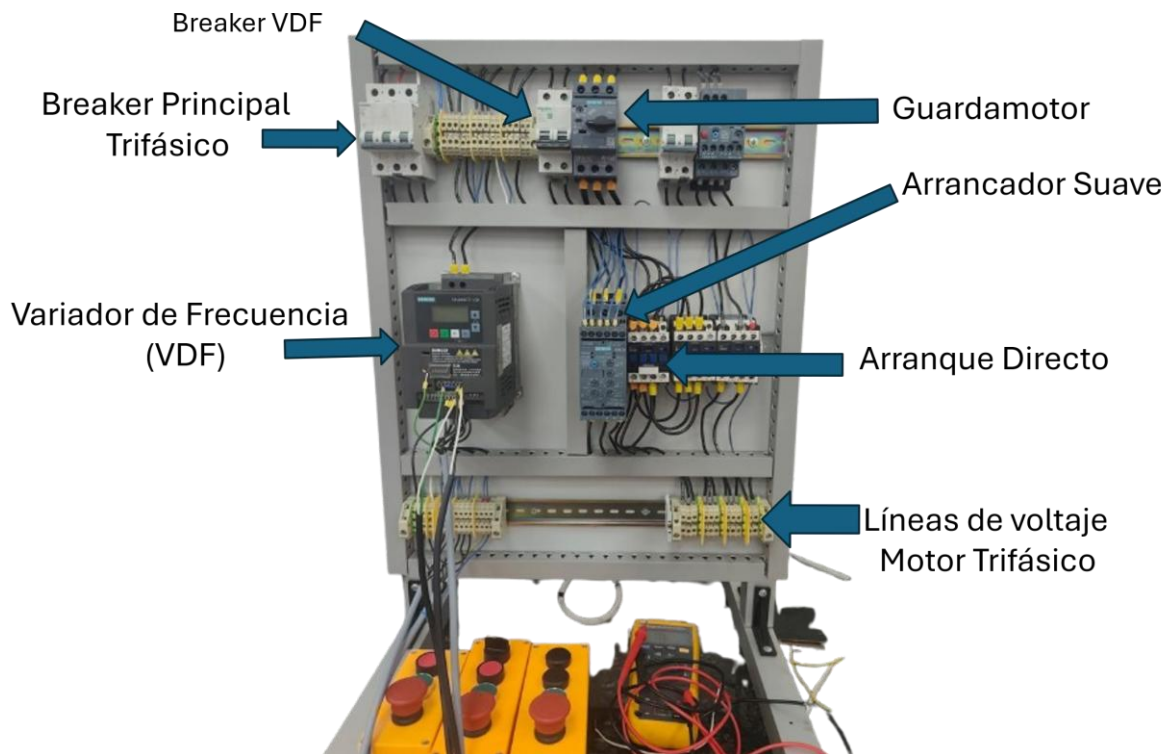
Como base para el diseño, se consideraron dos tableros de potencia disponibles en el laboratorio para su interacción con el nuevo tablero de control:

1. **Tablero de arranque directo, suave y VDF:** Este tablero trifásico integra la capacidad de realizar arranques directos, progresivos y controlados por variador de frecuencia (VDF).

La Figura 26 identifica sus componentes, incluyendo el guardamotor y las líneas de salida hacia el motor.

Figura 26

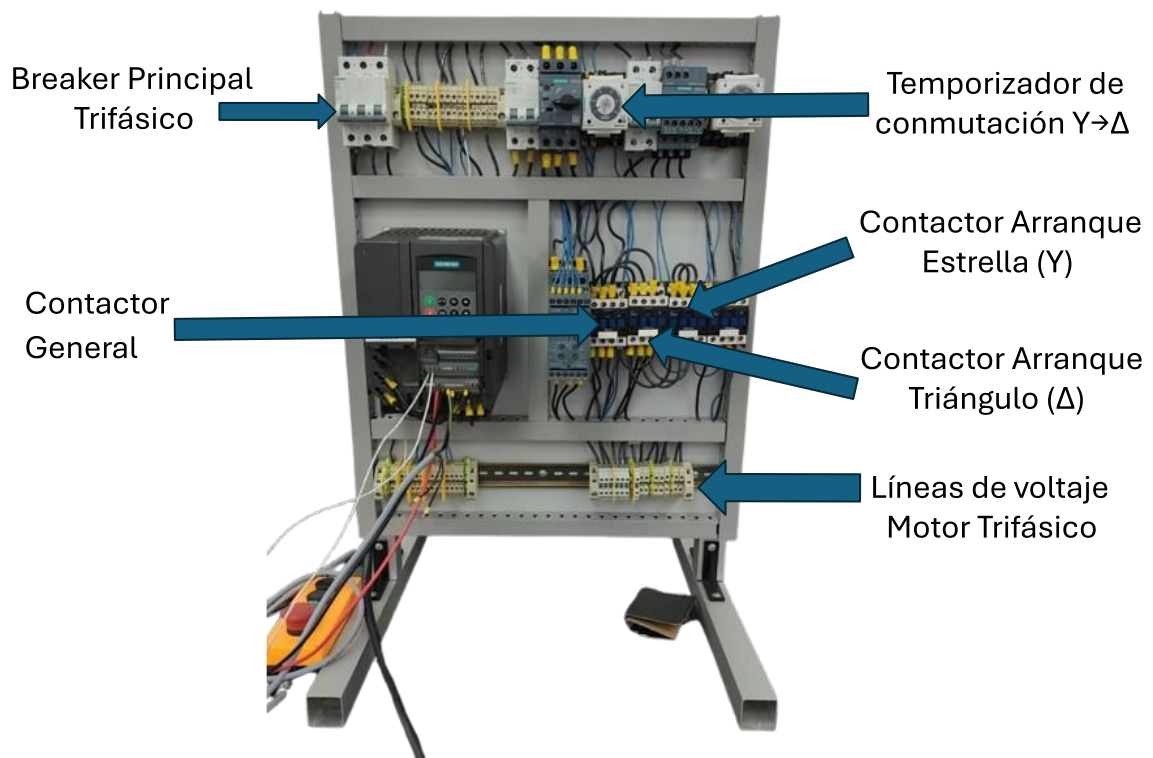
Tablero de potencia trifásico, identificación de sus principales componentes para la ejecución de pruebas (arranque directo, arrancador suave y variador de frecuencia).



2. **Tablero de arranque estrella-triángulo (Y-Delta):** Utilizado para reducir la corriente de arranque mediante una secuencia de maniobra temporizada. Este sistema cuenta con una lógica de enclavamiento entre los contactores de estrella y triángulo para garantizar una transición segura.

Figura 27

Identificación de elementos principales para arranque estrella-triángulo (Y- Δ): contactor general, contactor estrella (Y) y contactor triángulo (Δ), temporizador cambio estrella-triángulo (Y- Δ).



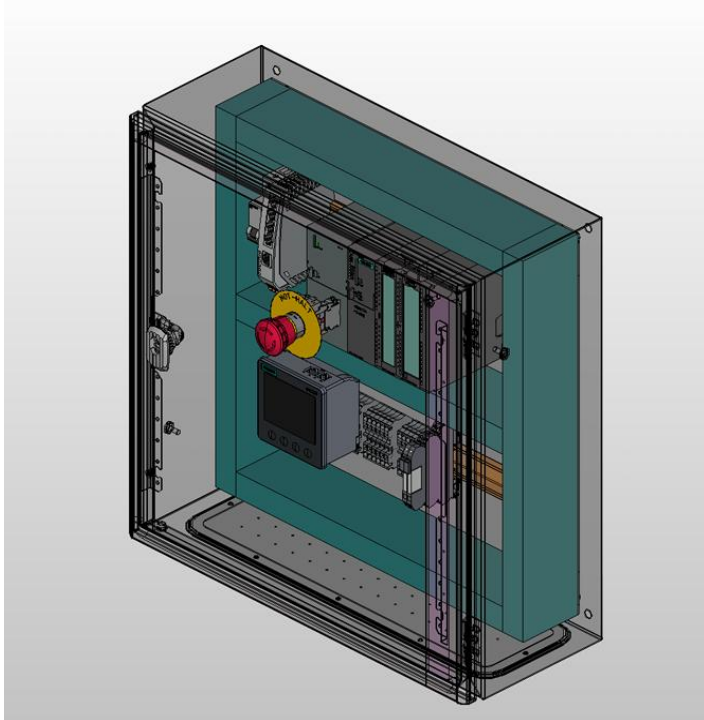
2.8.2 Diseño CAD

La fase inicial consistió en la elaboración de planos mediante el uso de herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), como se muestra en Figura 28. En este entorno virtual, se definieron los planos de distribución interna, permitiendo optimizar el espacio físico y asegurar el cumplimiento de las normativas de seguridad eléctrica. Esta documentación técnica sirvió de base para el cableado de conductores y la ubicación estratégica de los componentes en sus respectivos

soportes de montaje, utilizando el riel de perfil específico para el automático y riel DIN estándar para los elementos de protección y conexión. Asimismo, se contempló el uso de canaletas para el ordenamiento y conducción de los cables.

Figura 28

Modelo tridimensional (CAD) de la distribución interna y soportes del tablero de control



2.8.3 Criterios de dimensionamiento de protecciones y conductores

A diferencia del sistema de arranque que maneja corrientes de carga, este nuevo tablero fue dimensionado específicamente para la etapa de control y procesamiento.

- Protección termomagnética: Se seleccionó un interruptor automático de 6 A con curva característica C, siguiendo los requerimientos de la fuente SIMATIC PS307. Esta protección corresponde exclusivamente al circuito de 24 VDC de control y a la alimentación del analizador de energía SENTRON PAC3220; no se encuentra en el circuito de potencia de los motores y no afecta la medición de sus corrientes. La selección se justifica por la corriente de conexión de 20 A durante 3 ms, dado que un

interruptor C6 tiene un umbral de disparo magnético a partir de 30 A, se garantiza estabilidad frente al pico de arranque. El uso de este calibre y curva previene disparos fortuitos que ocurrirían con protecciones más sensibles (como una curva B6 con umbral de 18 A) o calibres menores, asegurando la integridad del PLC S7-300 y los transmisores ante sobrecargas y cortocircuitos.

- **Selección de Calibres:** Para la distribución de energía y señales se definieron calibres diferenciados según la función de cada circuito y la corriente esperada. En el tablero de control se empleó cable calibre 18 AWG para la alimentación y el cableado de señales a 24 VDC, debido a que corresponden a cargas de baja potencia asociadas al PLC, relés, transmisores y elementos de mando. En el tablero de potencia se utilizó cable calibre 16 AWG para las conexiones relacionadas con la alimentación y maniobra de equipos de mayor demanda.

2.8.4 Criterios de integración de la arquitectura de adquisición

La integración física se definió bajo una configuración modular, tomando como núcleo el PLC Siemens S7-300 montado sobre su riel de perfil original. A este controlador se integraron los módulos de expansión necesarios para cubrir las necesidades del proyecto: un módulo digital dedicado a la lectura de velocidad y un módulo analógico para la señal del transmisor de la celda de carga. Para la interfaz con los instrumentos externos, se dispuso de borneras de paso sobre riel DIN que facilitan una conexión segura y ordenada del cableado de campo. Finalmente, la organización perimetral mediante canaletas ranuradas asegura una disposición estética y funcional, permitiendo futuras intervenciones de mantenimiento de forma eficiente.

2.9 Diseño de la lógica de control del PLC

Con las conexiones físicas establecidas, se desarrolló la lógica de control del PLC Siemens S7-300 utilizando TIA Portal. La programación se implementó en lenguaje de contactos LADDER

conforme a la norma IEC 61131-3, estructurando el código en bloques funcionales que separan el escalamiento de señales, el control de marcha/paro y la gestión de comunicaciones.

2.9.1 Configuración de hardware y direccionamiento

Se incorporó el CPU S7-300 junto con sus módulos, estableciendo una tabla con las direcciones físicas del sistema asociadas a sus variables:

- Entradas Analógicas IW: Canales asignados a la señal de la celda de carga que es adaptada por el transmisor de peso a una señal de 0 a 10V
- Entradas Digitales I: Direcciones para pulsadores físicos de Inicio, Parada y Emergencia, señal de pulsos del sensor óptico y otras entradas
- Salidas Digitales Q: Configuración para el accionamiento de contactores del motor

2.9.2 Acondicionamiento y escalamiento de señales (FC)

El PLC recibe señales eléctricas que requieren conversión a unidades de ingeniería. Para esto se desarrollaron bloques de función específicos:

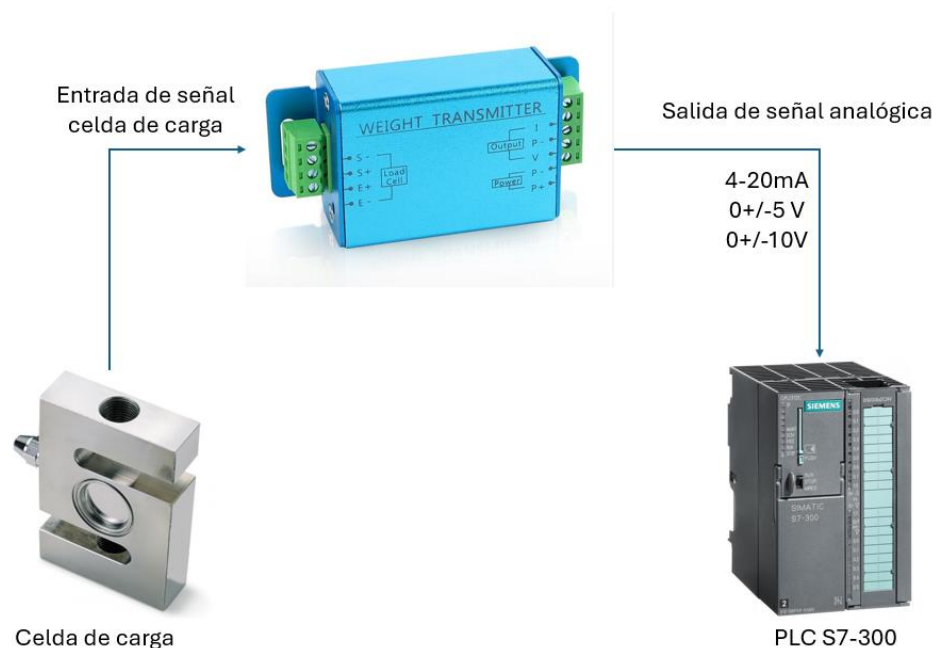
Torque: Para optimizar la medición del par mecánico, se implementó una fórmula de escalamiento y calibración en el PLC:

$$X = \left(\frac{RAW - RAW_{min}}{RAW_{max} - RAW_{min}} \right) (X_{max} - X_{min}) + X_{min}$$

Que permite la maximización de la resolución digital, logrando que el sistema procese el rango de 0-1 V en la salida del transmisor (correspondiente a la carga real de 10 kg sobre una celda de 100 kg) como si fuera la escala completa de entrada. Al aplicar esta operación matemática, el PLC Siemens S7-300 utiliza su resolución de 16 bits, con valores entre 0 y 27648, para incrementar el rango de trabajo útil de la señal; de lo contrario, el sistema solo trabajaría con el 10% de su capacidad, lo que generaría saltos analógicos muy bruscos y lecturas inestables. En la Figura 29 se muestra la conexión de la celda de carga con el transmisor y el PLC.

Figura 29

Esquema del acondicionamiento de señal analógica para la medición de torque.



Velocidad: La medición de velocidad se realizó mediante un sensor óptico infrarrojo, instalando marcas de alto contraste sobre el eje del motor con el fin de incrementar la resolución de lectura. Dado que el PLC empleado no dispone de entradas tipo contador de alta velocidad, el procesamiento se implementó mediante lógica en LADDER, contabilizando el número de pulsos detectados dentro de una ventana de tiempo de un segundo. A partir de dicho conteo y del número de marcas por revolución, la programación convierte la frecuencia medida en velocidad de giro expresada en RPM, almacenando el valor para su visualización y registro.

2.9.3 Lógica de control y seguridad

El Bloque de Organización principal contiene la lógica operativa del dinamómetro:

- **Marcha/Paro:** Se implementó un circuito de enclavamiento *Set/Reset* que habilita el motor.

- Modos de Operación: La lógica permite el control tanto desde pulsadores físicos como desde comandos enviados por Node-RED. Mediante compuertas OR, ambas fuentes de mando pueden activar el sistema indistintamente.

2.9.4 Gestión de datos para comunicación

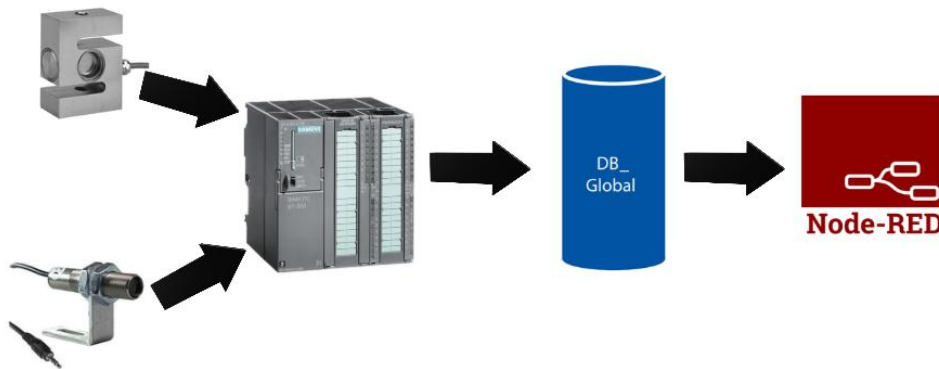
Para el intercambio de información con el sistema SCADA, se creó un Bloque de Datos que funciona como interfaz de memoria compartida. El PLC actualiza continuamente:

- Valores escalados de Torque y Velocidad
- Estados booleanos del motor: Encendido, Apagado o Falla

Esta centralización facilita la lectura desde Node-RED mediante el protocolo S7-Communication, garantizando acceso a datos actualizados y estructurados.

Figura 30

Arquitectura de flujo de datos desde sensores hacia la interfaz Node-RED



2.10 Diseño de la arquitectura de software y supervisión

El sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) se fundamentó en la plataforma Node-RED, empleando una arquitectura modular basada en eventos. Este entorno actúa como una puerta técnica que integra las tecnologías operativas (OT) con protocolos de información (IT), permitiendo una gestión centralizada de los datos. La implementación se estructuró en cuatro

capas funcionales: integración de protocolos, procesamiento de señales, lógica de automatización y visualización.

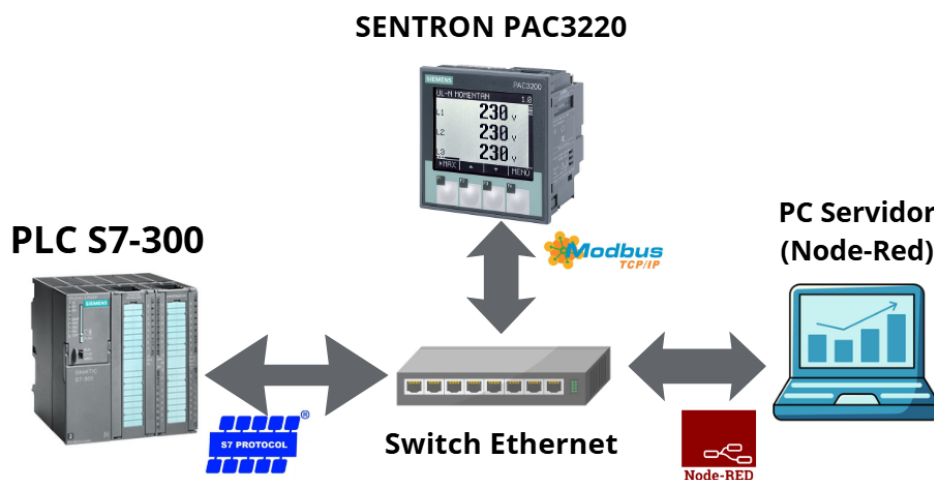
2.10.1 Capa de integración y comunicaciones

Para garantizar la consolidación de la información proveniente de los dispositivos de campo, se configuraron canales de comunicación paralelos que operan bajo protocolos industriales estándar, cuya arquitectura física se detalla en la Figura 31:

- Enlace con el PLC (Protocolo S7): Se estableció una conexión mediante el protocolo ISO-on-TCP con el controlador Siemens S7-300. Este enlace permite el mapeo bidireccional de variables, facilitando la lectura en tiempo real del estado del motor, la velocidad angular y la masa registrada por la celda de carga, así como el envío de comandos de marcha y paro.
- Instrumentación Eléctrica (Modbus TCP): Se implementó un cliente Modbus TCP para la comunicación con el analizador de energía SENTRON PAC3220. A través de nodos de lectura cíclica, se extraen de forma continua los vectores de corrientes de línea, potencias y factor de potencia.

Figura 31

Topología de red industrial y protocolos de comunicación del sistema SCADA



2.10.2 Procesamiento y acondicionamiento de datos

Los datos en bruto adquiridos requieren una etapa de normalización y decodificación antes de ser procesados por la lógica superior o visualizados por el usuario:

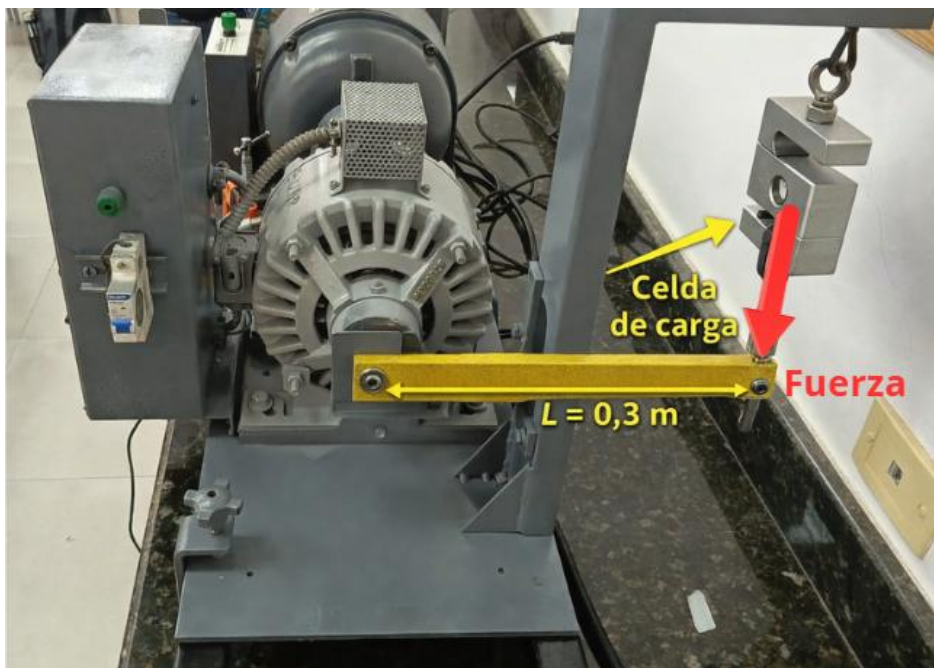
Decodificación modbus: Se desarrollaron funciones específicas en JavaScript para procesar los buffers del analizador PAC3220. Mediante una conversión Big-Endian, los pares de palabras de 16 bits se transforman en valores de punto flotante (Float 32), permitiendo lecturas exactas de potencia activa, aparente y factor de potencia.

Conversión de torque mecánico: La señal de masa entregada por la celda de carga se convierte a par motor aplicando la relación física del dinamómetro. Como se observa en la Figura 32, esta operación considera la constante de gravedad y la longitud del brazo de palanca de 0.3 m, mediante la siguiente ecuación:

$$T[Nm] = F[N] * L[m]$$

Figura 32

Configuración física del brazo de palanca y celda de carga en el banco Hampden



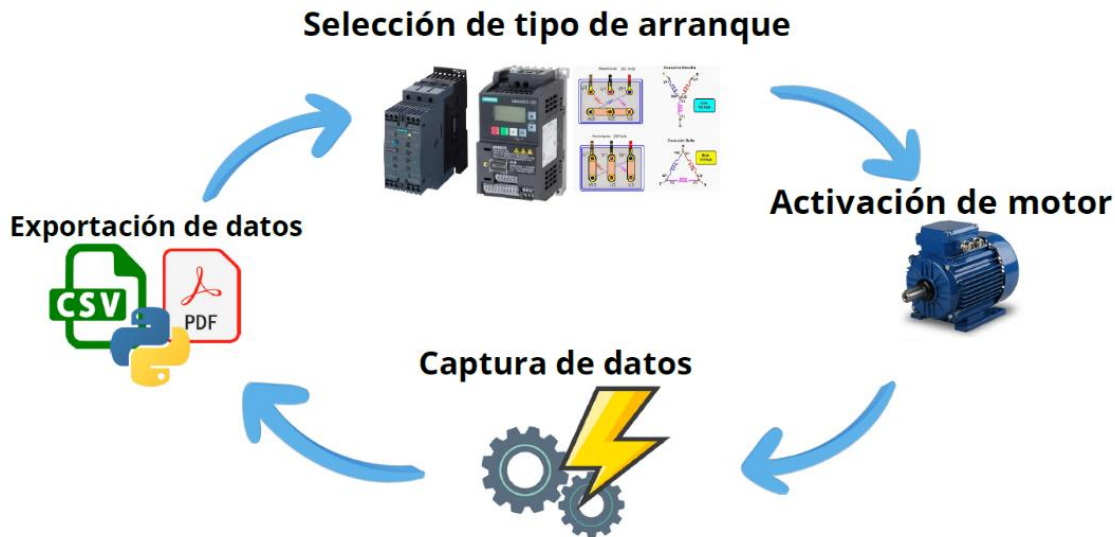
2.10.3 Lógica de automatización del ensayo y registro

El proceso de caracterización se gestionó mediante una secuencia lógica secuencial que aseguró la integridad y sincronización de las variables capturadas. Como se ilustra en el ciclo operativo de la Figura 33, el ensayo se estructuró en cuatro etapas principales:

- **Configuración del arranque:** El usuario seleccionó previamente el método de inicio (Estrella-Triángulo, Directo, Arranque Suave o Variador de Frecuencia) desde la interfaz de Node-RED.
- **Activación y marcha:** Mediante un control virtual de "Comenzar Prueba", el sistema habilitó el motor bajo el régimen seleccionado, estableciendo una comunicación bidireccional con el PLC.
- **Adquisición de datos:** Durante la operación, el sistema registró simultáneamente los parámetros eléctricos (voltaje y corriente) y mecánicos (torque y velocidad), centralizando la información en un bloque de memoria compartida.
- **Finalización y reporte:** Al presionar "Detener Prueba", se desactivó el motor y el sistema exportó automáticamente los datos acumulados a un archivo CSV. Inmediatamente, se ejecutó un *script* de Python para procesar la información y generar el informe técnico final en formato PDF

Figura 33

Diagrama de flujo de la secuencia lógica y estados del sistema de ensayo



2.10.4 Diseño de la interfaz hombre-máquina (HMI)

La interfaz gráfica se desarrolló mediante Node-RED Dashboard, priorizando la usabilidad operativa a través de una cuadrícula responsiva organizada en tres paneles principales:

- Panel de Control y Estado: Centraliza el mando del sistema mediante botones virtuales de inicio y detención, complementados con indicadores LED que muestran el estado operativo y posibles fallas del motor en tiempo real.
- Gestión de Parámetros: Permite la configuración dinámica de la prueba, permitiendo al usuario seleccionar el tipo de arranque (Directo, Estrella-Triángulo, Suave o Variador) y definir las constantes físicas del eje.
- Monitoreo en Tiempo Real: Las variables se segmentan en grupos mecánicos (RPM, masa y torque) y eléctricos (corrientes de línea L1, L2 y L3). Se emplean indicadores analógicos con escalas predefinidas y botones de acceso rápido a gráficas de tendencia histórica.

2.11 Generación automática de reportes y post-procesamiento

El sistema cuenta con un módulo de gestión de información diseñado para recopilar los datos de la prueba y generar de forma automática un informe técnico detallado. Este proceso elimina la intervención manual en la documentación de resultados, garantizando la integridad y estandarización de los reportes finales en formatos abiertos como PDF y CSV.

2.11.1 Arquitectura y automatización del algoritmo

La ejecución de la etapa de post-procesamiento se automatiza mediante un flujo de Node-RED que, al detectar el fin del ciclo de ensayo, invoca un *script* externo en lenguaje Python a través de un nodo exec. Este algoritmo se divide en cuatro bloques operativos que gestionan desde la depuración de datos hasta la renderización del documento final.

2.11.2 Procesamiento de datos y cálculos de ingeniería

Para el cálculo de los parámetros de desempeño, el *script* de Python toma los vectores de datos filtrados y aplica las conversiones de unidades necesarias para el procesamiento digital.

Específicamente, para la potencia mecánica, el algoritmo convierte la velocidad capturada en RPM a radianes por segundo y realiza el producto con el torque medido, implementando la siguiente expresión en el código:

$$P[W] = T[Nm] * \omega[rpm] * \frac{2\pi}{60}$$

Finalmente, el algoritmo determina la eficiencia operativa relacionando los resultados previos.

Para ello, toma el valor de la potencia mecánica calculado en el paso anterior y lo divide para la potencia activa real que fue importada desde los registros del analizador de redes PAC3220, multiplicando el resultado por 100 para expresarlo en porcentaje.

2.11.3 Caracterización gráfica y visualización

El sistema genera automáticamente siete gráficas fundamentales en el Sistema Internacional de Unidades (SI) para caracterizar integralmente el desempeño del motor. El *script* procesa los datos adquiridos para construir perfiles de Torque vs. Velocidad, Corrientes vs. Torque y Potencias vs. Torque, permitiendo identificar la firma mecánica y el comportamiento eléctrico del sistema bajo carga.

Adicionalmente, se grafican el factor de potencia y la eficiencia frente al torque y la velocidad, proporcionando información crítica para localizar los puntos de operación óptima y evaluar la calidad energética en entornos industriales. Este proceso de visualización incluye el filtrado previo de ruido y el ajuste automático de escalas, garantizando una interpretación técnica inmediata y precisa sin requerir procesamiento manual de datos.

2.11.4 Estructuración del informe técnico PDF

La fase final utiliza la librería ReportLab para personalizar el informe técnico mediante el uso de Canvas, permitiendo una disposición profesional de los elementos. El documento incluye:

- **Resumen numérico:** El *script* genera automáticamente una tabla de resumen de las métricas principales del ensayo, incluyendo rangos de velocidad, valores mínimo y máximo de torque, corrientes máximas y medias por línea, y potencias máximas con su velocidad asociada.
- **Inserción de Curvas:** El reporte integra secuencialmente las gráficas generadas, cumpliendo con los estándares de documentación técnica del laboratorio sin intervención manual.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

En el presente capítulo se exponen los resultados de la puesta en marcha del sistema de automatización integrado al banco de pruebas Hampden MPB-2. El análisis funcional abarca la secuencia completa de caracterización: desde la verificación del estado inicial y el arranque controlado, hasta la aplicación escalonada de carga con el freno de partículas para la captura integrada de variables. Finalmente, la validación se contrasta con la capacidad del sistema para generar curvas coherentes y reportes técnicos automáticos frente a los métodos manuales.

3.1 Especificaciones del motor

Las pruebas experimentales se ejecutaron sobre un motor de inducción trifásico de rotor devanado, configurado en modo de arranque directo. La caracterización de este equipo parte de los datos de placa suministrados por el fabricante que se muestra en la Tabla 5, los cuales establecen los límites operativos seguros y sirven como referencia para el cálculo de los parámetros de desempeño.

Tabla 5

Datos de placa del motor Hampden WRM-2

Parámetro	Valor Nominal	Unidad
Potencia Nominal	2.0	HP
Tensión Nominal	208	V (Trifásico)
Corriente Nominal	6.8	A
Velocidad Sincrónica	1800	RPM
Frecuencia	60	Hz
Factor de Servicio	1.15	-
Tipo de Rotor	Devanado	(Secundario:208V/7)

Cálculo de Referencia Nominales

Potencia Mecánica:

$$P_{nom} = 2HP \times 745.7 \frac{W}{HP} = 1491.4W$$

Torque Nominal Teórico

Utilizando la velocidad síncrona de placa, el par nominal de referencia se calcula mediante la relación:

$$T_{nom} = \frac{P_{nom} \times 9.55}{n_{sincrona}} = \frac{1491.4 \times 9.55}{1800} = 7.91 Nm$$

Estos valores calculados constituyen la línea base contra la cual se contrastarán los fenómenos de ruptura y sobrecarga observados en las curvas características presentadas a continuación.

3.2 Pruebas de caracterización y desempeño

A continuación, se presenta y analiza los perfiles obtenidos por medio de la adquisición de datos del analizador de energía SENTRON PAC3220 para las variables eléctricas, la celda de carga para el torque y el sensor óptico para la velocidad de giro. Estos resultados no solo validan la precisión de la instrumentación electrónica instalada, sino que permiten identificar fenómenos críticos como la corriente de arranque, la zona de máxima eficiencia y el comportamiento del motor en régimen de sobrecarga y ruptura. Las condiciones nominales del motor que se muestra en la Figura 34 Hampden WRM-2 empleado en los ensayos, tales como tensión, corriente, potencia, velocidad y factor de servicio, se verificaron a partir de su placa de características, la cual se presenta en la Figura 35. La capacidad del sistema para generar estas gráficas de manera automática, procesadas mediante el flujo integrado de Node-RED y Python, permite garantizar la repetibilidad de las pruebas.

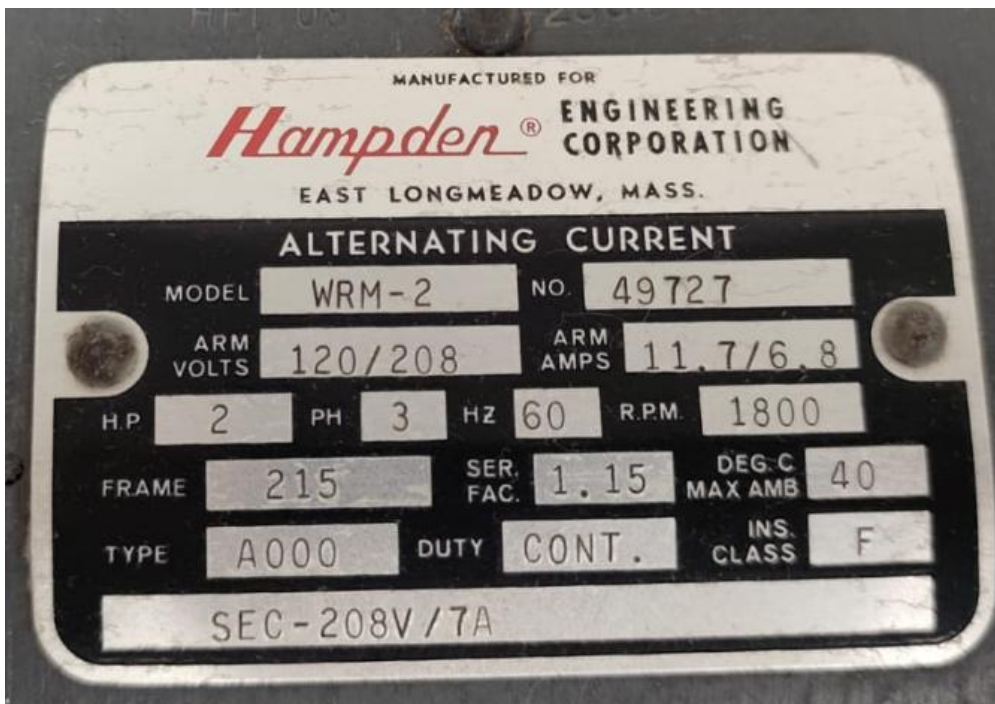
Figura 34

Motor caracterizado Hampden WRM-2



Figura 35

Placa de motor Hampden WRM-2



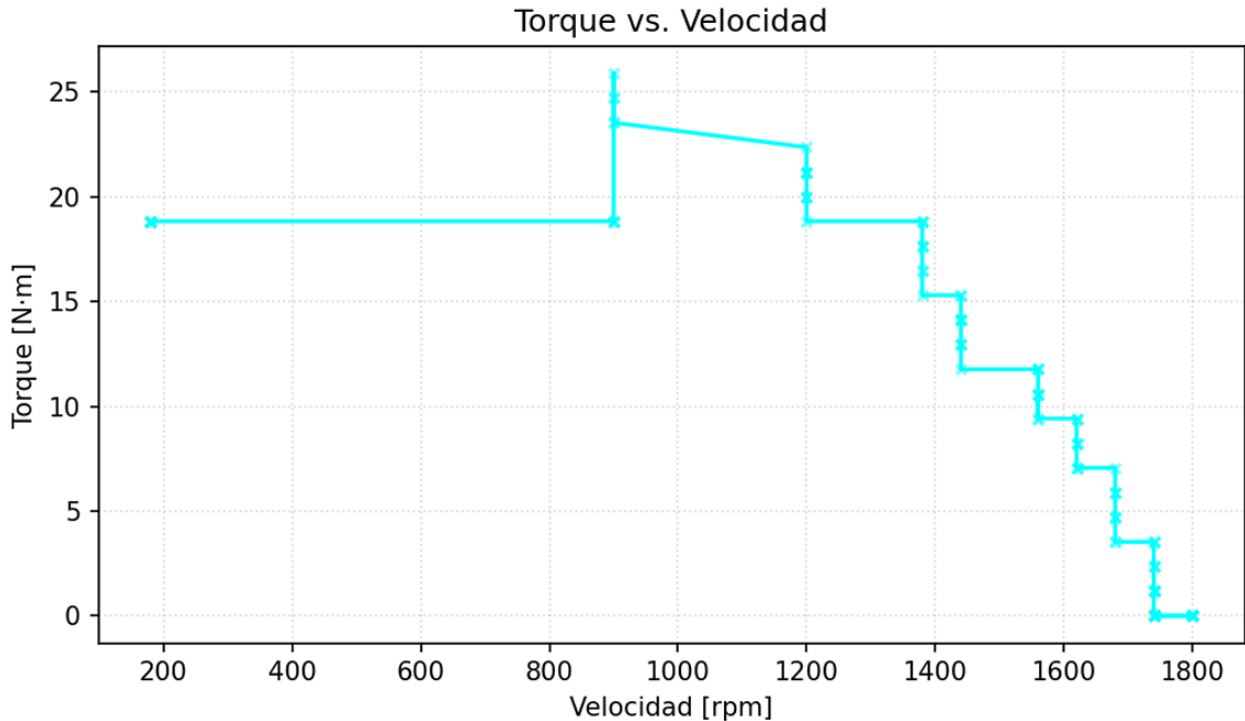
3.2.1 Gráfica torque contra velocidad

Como se observa en la Figura 36, durante la aplicación escalonada de carga mecánica externa usando el freno de partículas, la traza torque–velocidad presenta tramos verticales en los que se registran distintos valores de torque para un mismo valor de velocidad. Este comportamiento se debe al esquema de adquisición y sincronización de señales. La velocidad se calcula a partir del conteo de pulsos del sensor óptico infrarrojo en un intervalo de un segundo, por lo que cada valor de velocidad corresponde a un valor medio dentro de dicha ventana temporal. Para este experimento, el torque se registró con una frecuencia de muestreo mayor, cercana a 250 ms; por ello, se obtuvieron varias muestras dentro del mismo intervalo usado para calcular la velocidad. Al representarse directamente los datos adquiridos, dichas muestras quedan asociadas al mismo valor de velocidad, generando los segmentos verticales observados. Adicionalmente, la estimación de velocidad se realizó con una resolución de un pulso por revolución, lo que limita el detalle con el que se detectan variaciones de velocidad y contribuye a que la disminución de velocidad se represente en forma escalonada. Con un mayor número de pulsos por revolución, el cálculo de velocidad tendría mayor resolución y las variaciones de velocidad se representarían de forma más continua, reduciendo el escalonamiento observado en la curva.

Aclarado el efecto asociado al muestreo y a la resolución de la medición de velocidad, la Figura 36 permite describir el comportamiento torque–velocidad general obtenido durante el ensayo. A medida que se incrementó el torque de frenado, el motor redujo su velocidad hasta alcanzar velocidades próximas a cero, registrándose un torque cercano a 19 Nm en condición de velocidad prácticamente nula, correspondiente a la etapa final de detención del eje. Asimismo, al aumentar la carga se identificó un punto de ruptura máximo de 25.8 Nm en el rango de 900 a 1100 RPM, lo que evidencia el comportamiento característico del motor en la zona de mayor exigencia de carga.

Figura 36

Curva característica de torque vs. velocidad obtenida mediante el sistema de frenado y control por puntos.

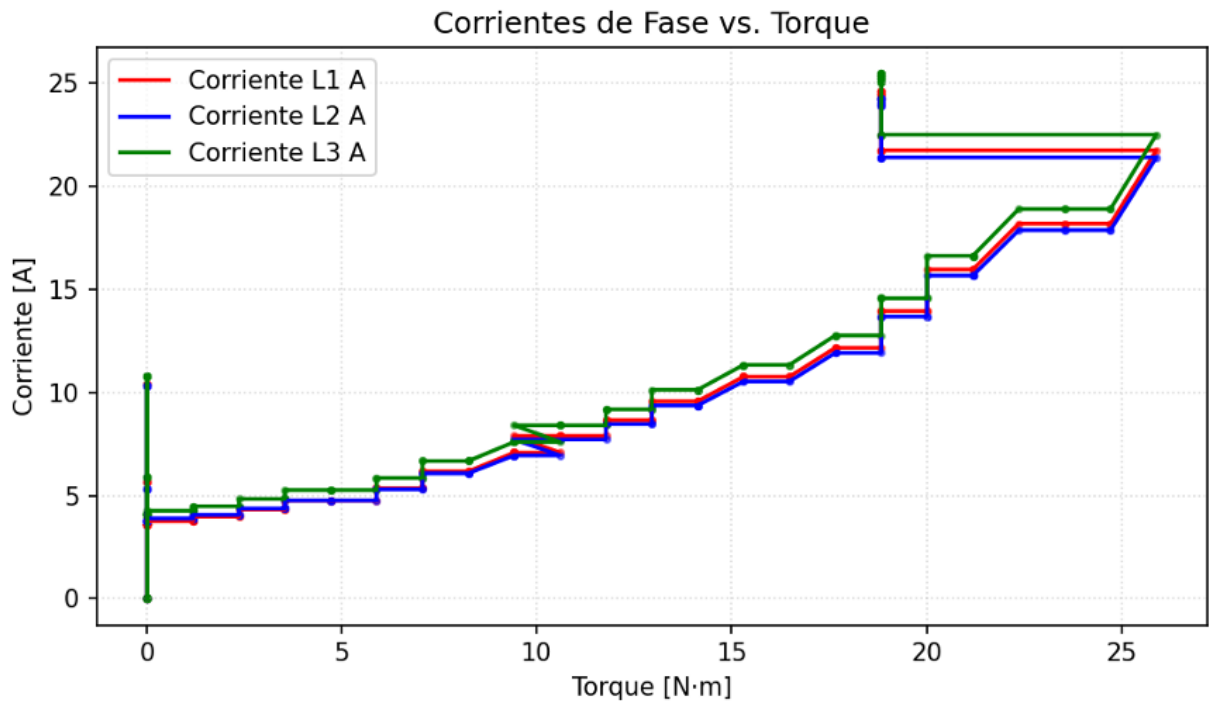


3.2.2 Gráfica corrientes de fase contra torque y potencia activa y aparente contra torque

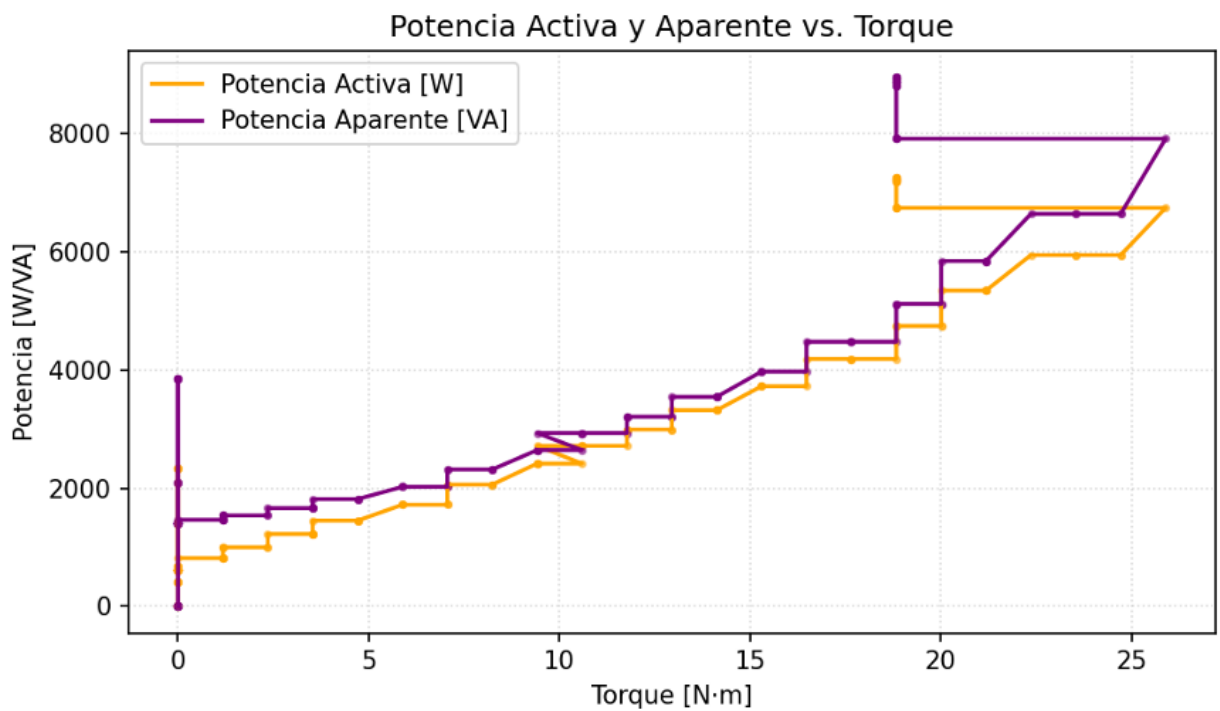
La relación entre el consumo eléctrico y la carga mecánica se detalla en la Figura 37, donde se evidencia un crecimiento lineal de la corriente de fase a medida que aumenta el torque. Se registró una corriente de vacío inicial de entre 4 y 5 A, manteniendo una simetría notable entre las tres fases, lo que confirma el buen estado de los devanados del motor. Al alcanzar el punto correspondiente al par de arranque de 19 Nm (medido a velocidad próxima a cero), la corriente experimentó un incremento abrupto superior a los 22 A. Este comportamiento se correlaciona con la entrada en la zona de rotor bloqueado tras superar el torque máximo de la máquina, donde la impedancia disminuye drásticamente. Paralelamente, en la Figura 38, se analiza la evolución de las potencias activa y aparente; en condiciones de vacío, predomina la componente reactiva necesaria para establecer el campo magnético del estator, mientras que en el estado de arranque o bloqueo de 19 Nm, la potencia aparente se dispara por encima de los 8000 VA debido al pico de corriente identificado.

Figura 37

Curvas de corriente de fase (L1, L2, L3) frente al torque, evidenciando el pico de corriente en el punto de bloqueo de 19 Nm.

**Figura 38**

Comparativa de potencia activa (W) y aparente (VA) frente al torque mecánico.

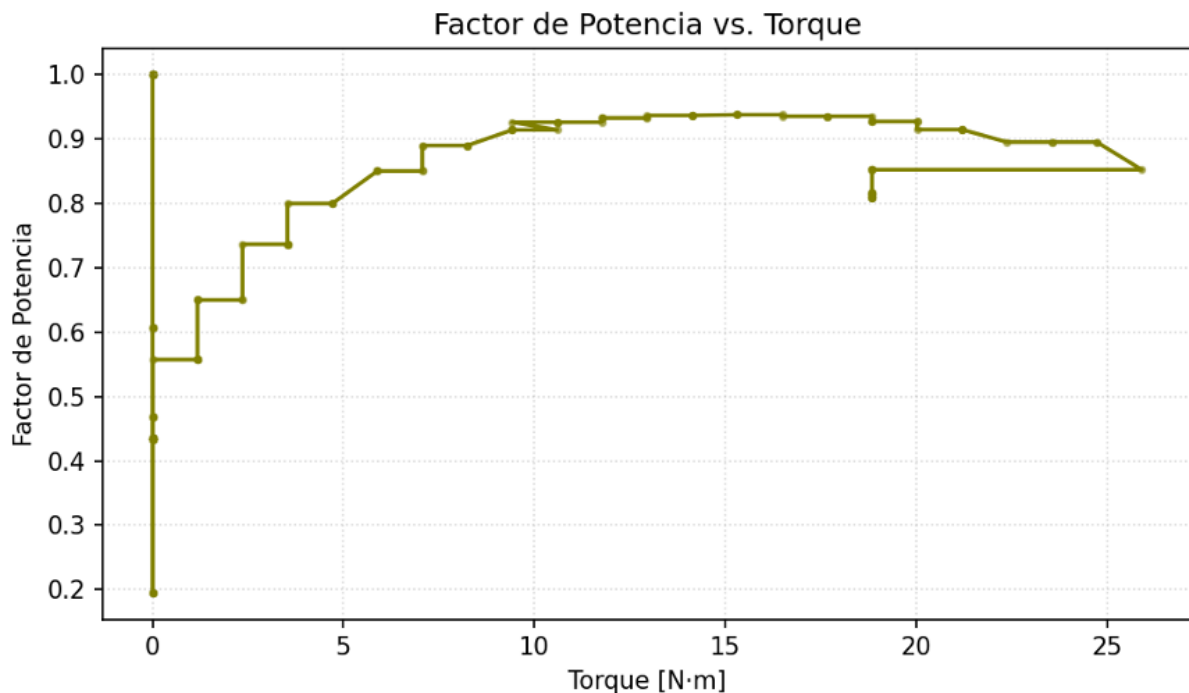


3.2.3 Gráfica factor de potencia vs torque

La Figura 39 muestra la variación del factor de potencia en función del torque aplicado. En condiciones de vacío se registró un factor de potencia cercano a 0.2, mientras que, con la aplicación de carga, el factor de potencia se incrementó hasta estabilizarse en valores superiores a 0.93 en el rango de 10 a 18 Nm, correspondiente a la zona de operación más favorable del motor. Posteriormente, al aproximarse al punto de ruptura, se observó una disminución hacia valores cercanos a 0.85, asociada al incremento de corriente y a la condición de sobrecarga en la región de inestabilidad.

Figura 39

Evolución del factor de potencia frente al torque, destacando la zona de máxima eficiencia y la caída en el punto de ruptura.



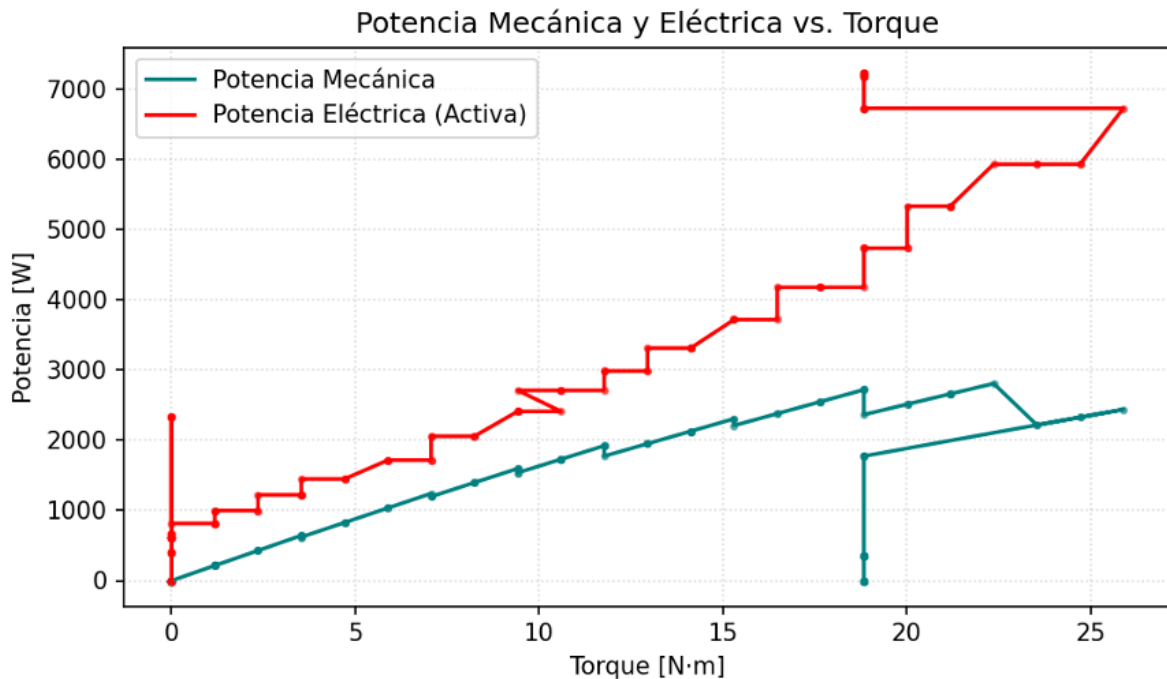
3.2.4 Gráfica potencia mecánica y eléctrica contra torque

La Figura 40 valida que el banco de pruebas logró llevar el motor hasta su límite físico, identificando el torque de ruptura en torno a 25.8 Nm. Observándose que la potencia mecánica

decae a 2100 W y la eléctrica se dispara a 6900 W, confirmando que el sistema registra fielmente las condiciones de falla por sobrecarga.

Figura 40

Comparativa de potencia mecánica y eléctrica (activa) frente al torque, evidenciando el punto de ruptura y la degradación de la eficiencia por sobrecarga.

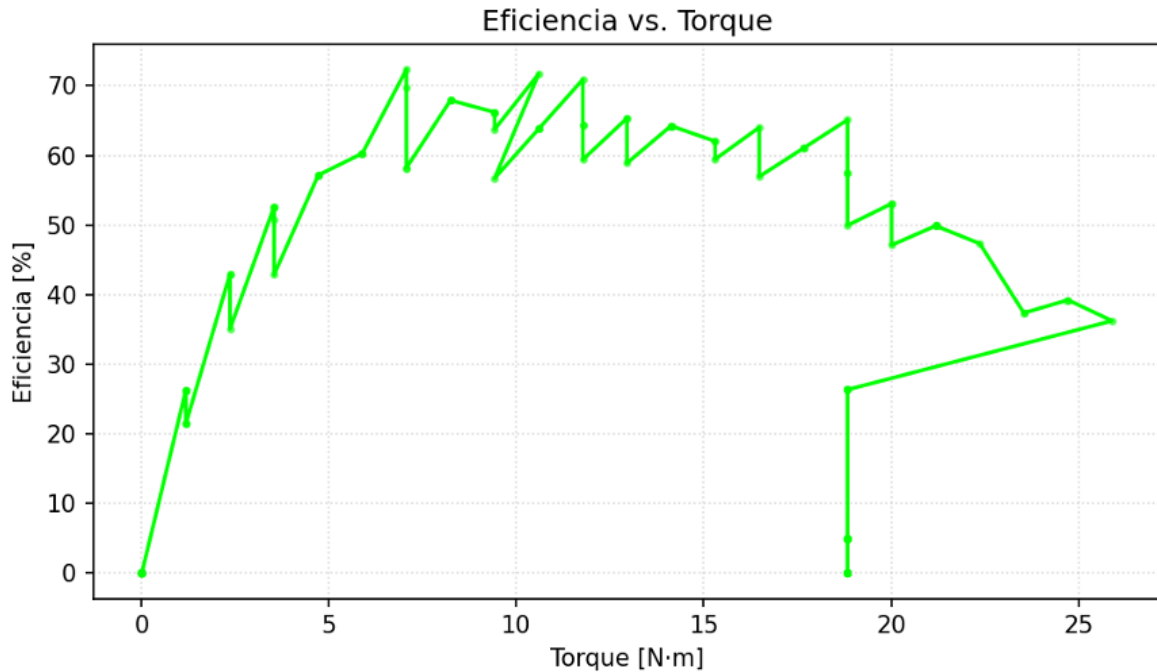


3.2.5 Gráfica eficiencia contra torque

Finalmente, la Figura 41 resume el desempeño energético, mostrando un ascenso rápido hasta alcanzar una zona óptima entre 7 y 12 Nm con valores máximos cercanos al 72%. Este comportamiento valida que el diseño electromecánico logra su mejor balance de pérdidas a cargas medias. Además, se muestra la eficiencia en el torque de arranque es inferior al torque de ruptura siendo 27% y 36% respectivamente.

Figura 41

Curva de eficiencia energética (%) en función del torque mecánico, identificando el punto de máximo rendimiento y el desempeño en condiciones de ruptura.



A modo de síntesis, la caracterización experimental permite contrastar la capacidad máxima de la máquina frente a su zona de operación real. Si bien se identificó un torque de ruptura de 25.8 Nm como límite mecánico, el análisis de eficiencia energética (Figura 41) reveló que el torque nominal experimental, entendido como el punto de máximo aprovechamiento energético se sitúa en el rango de 7 a 12 Nm.

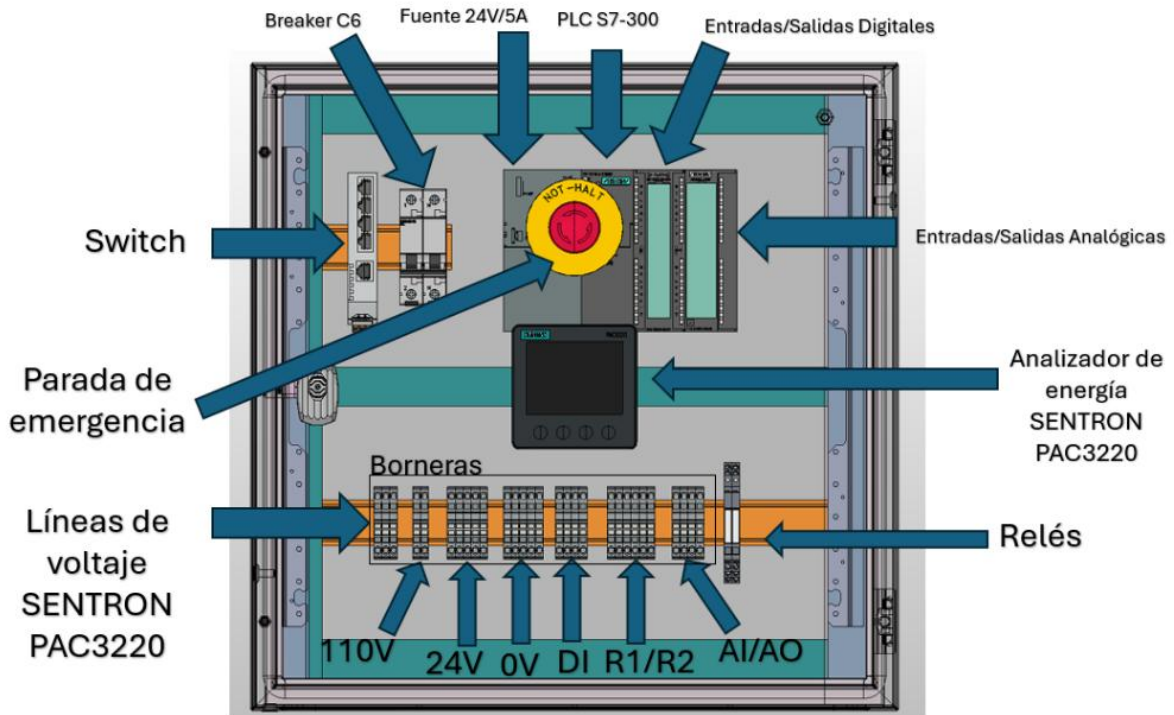
Esta comparación evidencia que el motor dispone de una reserva de torque significativa, superior al doble de su capacidad nominal operativa, antes de ingresar a la zona inestable. En este análisis, la zona inestable corresponde al tramo posterior al torque máximo, donde pequeñas variaciones de carga generan cambios abruptos de velocidad y el motor tiende a desacelerar rápidamente, lo que dificulta mantener un régimen estacionario. Esto valida experimentalmente el cálculo teórico de 7.91 Nm presentado en la sección 3.1, confirmando que el punto de diseño del fabricante coincide con la región de mayor eficiencia encontrada en las pruebas dinámicas.

3.3 Implementación del tablero

Una vez validado el comportamiento dinámico del motor a través de las curvas de desempeño, esta sección presenta la materialización física de la infraestructura de control diseñada. La implementación del tablero constituye el núcleo de *hardware* del proyecto, donde convergen los sistemas de protección, la lógica de automatización y los módulos de adquisición de datos. A continuación, se describe el resultado del montaje de los componentes, la ejecución del cableado estructurado y la integración final de los dispositivos, verificando el cumplimiento de los criterios de organización, seguridad y accesibilidad operativa planteados en la etapa de diseño.

3.3.1 Diseño y distribución del tablero de control

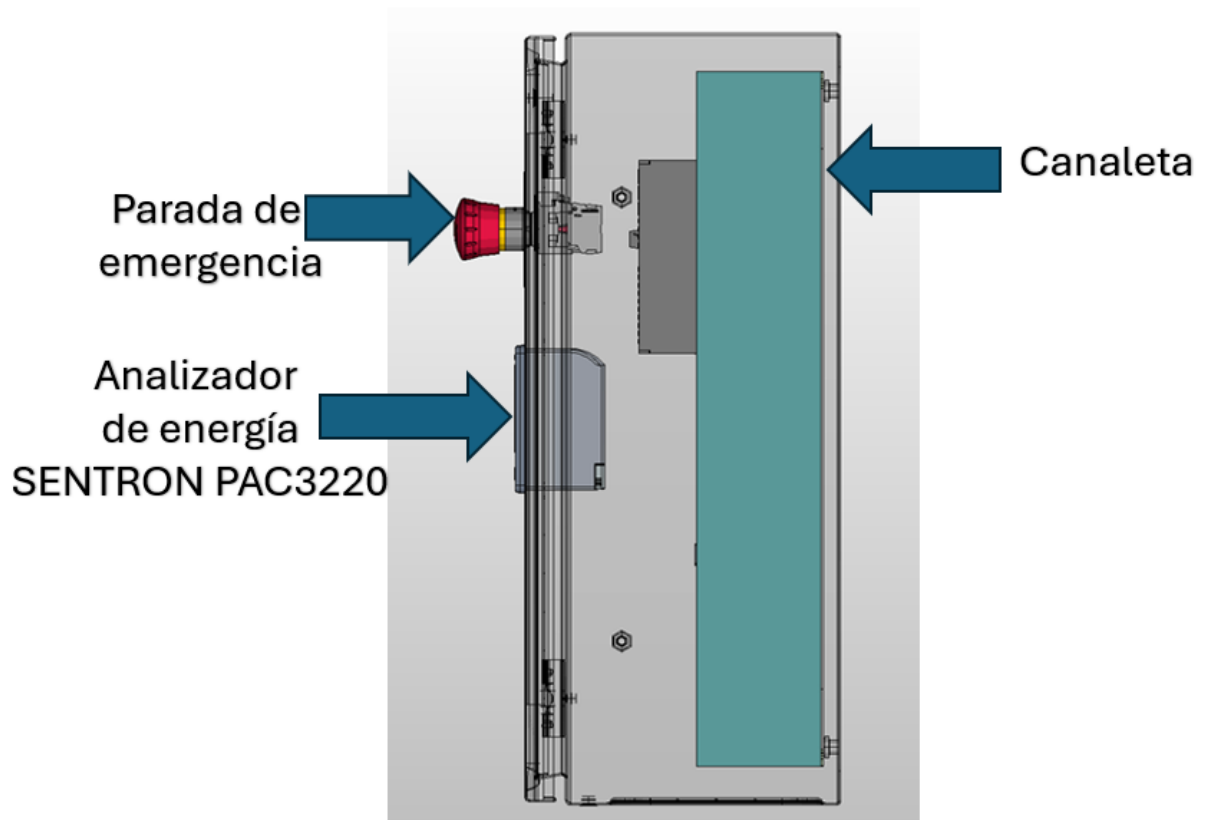
La implementación del tablero tiene como objetivo centralizar el procesamiento lógico, la gestión de energía y la protección eléctrica del sistema. La disposición de los componentes responde a un esquema organizado diseñado para facilitar la adquisición de datos y las pruebas operativas, tal como se muestra en el diseño conceptual de la Figura 42.

Figura 42*Diseño y distribución interna de componentes*

En la sección superior izquierda de la placa de montaje, se ubica el *switch* Ethernet industrial, encargado de la comunicación vía Ethernet entre los distintos dispositivos, junto a un interruptor termomagnético C6 que actúa como protección general de la alimentación y el analizador de energía SENTRON PAC3220. En el costado derecho, se agrupan los componentes del sistema de control: la fuente de poder de 24V/5A, la unidad central del PLC S7-300 y sus respectivos módulos de entradas y salidas digitales y analógicas. Como se observa en la Figura 43, el diseño contempla la profundidad necesaria para el montaje de estos equipos sobre rieles DIN estándar. Además, en la puerta se instaló el paro de emergencia para eliminar la alimentación en caso de cualquier accidente y el analizador de energía SENTRON PAC3220.

Figura 43

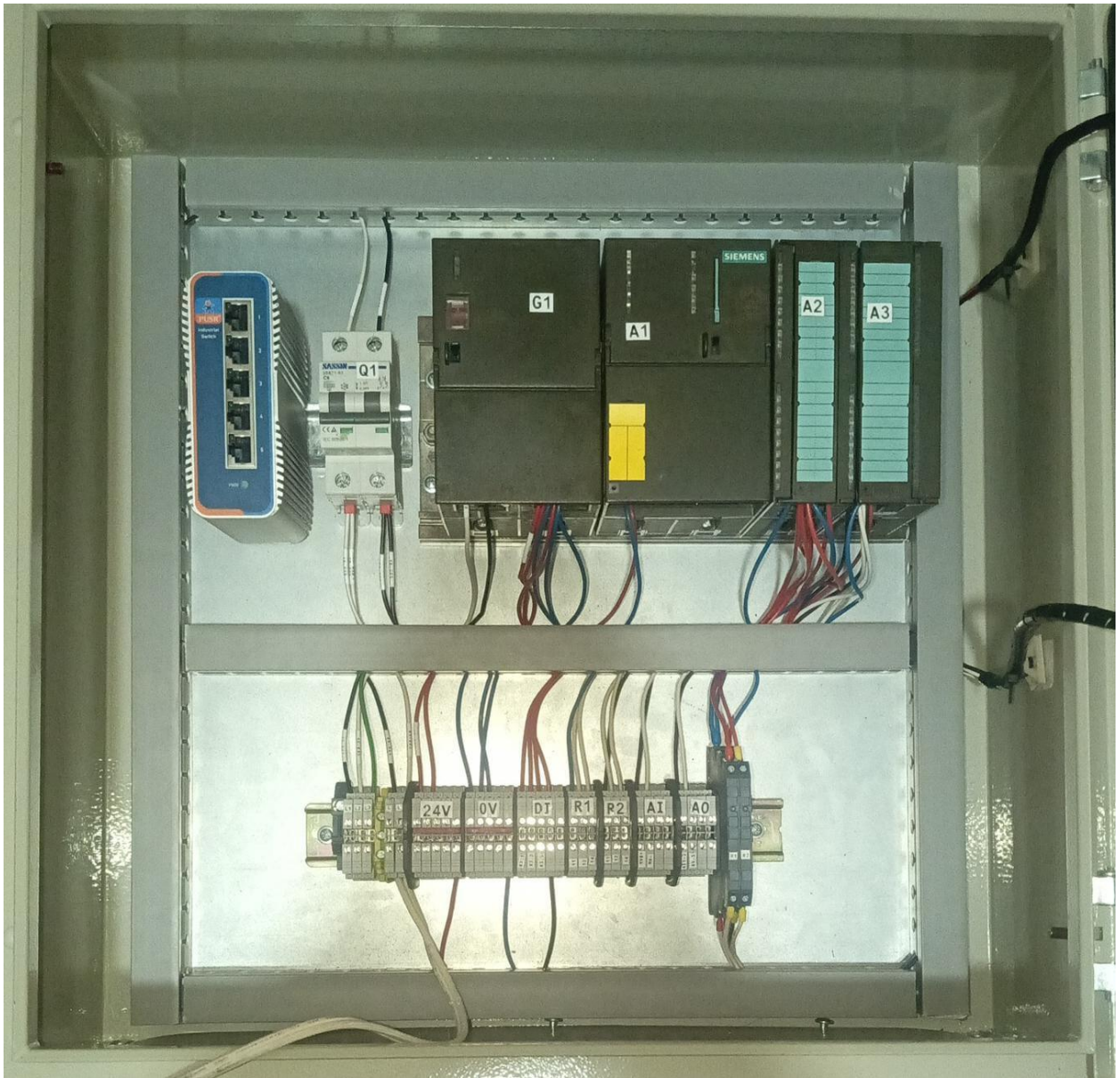
Vista lateral del diseño del gabinete



En la zona inferior se encuentran las borneras de conexión, para facilitar el cableado de sensores y actuadores directamente hacia el PLC, la fuente y el analizador de energía. En esta área también se encuentran los relés, los cuales permiten que el PLC (operando a 24V) controle cargas de mayor potencia (220V), proporcionando aislamiento y protegiendo al controlador de posibles fallas en la etapa de potencia. La Figura 44 ilustra la ejecución real de este cableado, donde se priorizó el uso de canaletas ranuradas para mantener la organización y seguridad de los conductores.

Figura 44

Montaje y cableado interno del sistema



Finalmente, en la puerta del tablero se instalaron el paro de emergencia y el analizador SENTRON PAC3220, como se muestra en la Figura 45, con el fin de permitir una intervención inmediata ante condiciones inseguras y el monitoreo local de las variables eléctricas en tiempo real sin necesidad de abrir el gabinete.

Figura 45

Implementación física exterior del tablero



3.4 Interfaz de usuario en Node-RED (HMI)

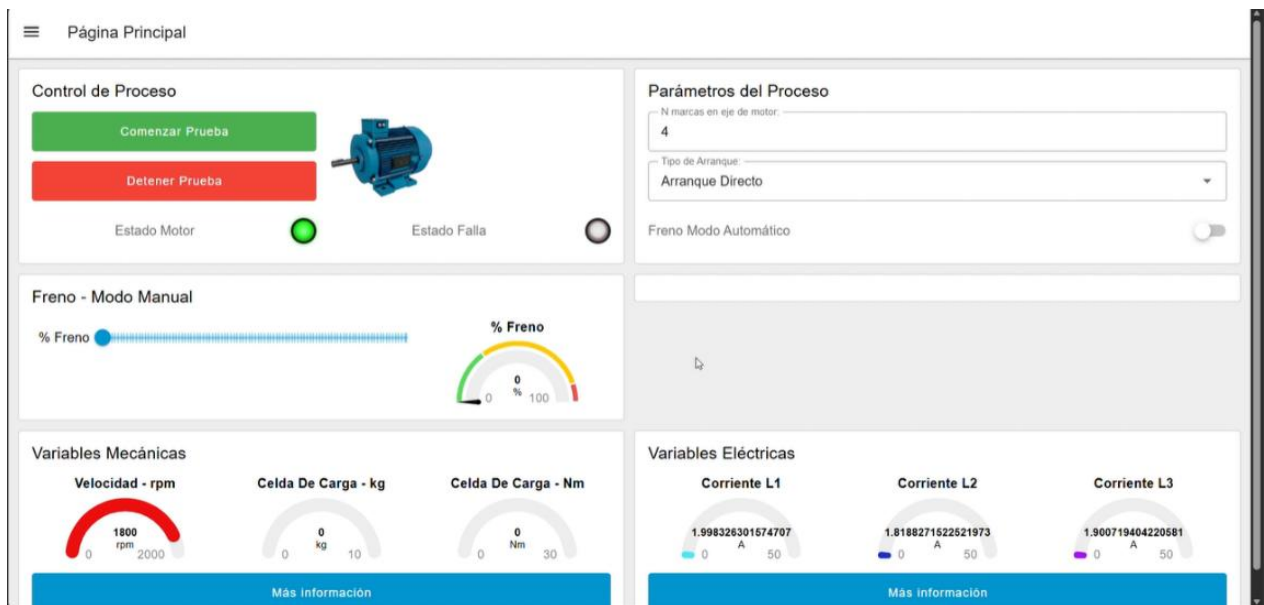
La interfaz de monitoreo y control ha sido desarrollada en Node-RED Dashboard, permitiendo la visualización en tiempo real de las variables críticas del motor. El panel se divide en secciones fijas (Control de Proceso, Freno y Variables) y una sección dinámica que cambia según el método de arranque seleccionado en el menú desplegable.

3.4.1 Arranque directo

En la modalidad de arranque directo, la configuración de la interfaz de usuario se ha diseñado con un enfoque de control simplificado, limitándose a un mando de activación básica (On/Off) como se detalla en la Figura 46. Al operar el sistema bajo este esquema, no existe una gestión sobre la rampa de aceleración inicial, lo que provoca de manera intrínseca que el motor demande picos de corriente sumamente pronunciados y abruptos antes de alcanzar su estabilidad nominal. Asimismo, esta falta de control en el *dashboard* se traduce en una respuesta de velocidad con transiciones instantáneas hacia las 1800 RPM, sometiendo al sistema a un elevado estrés mecánico que es monitoreado por el sistema de adquisición de datos para su posterior análisis.

Figura 46

Interfaz de control en Node-RED configurada para arranque directo.

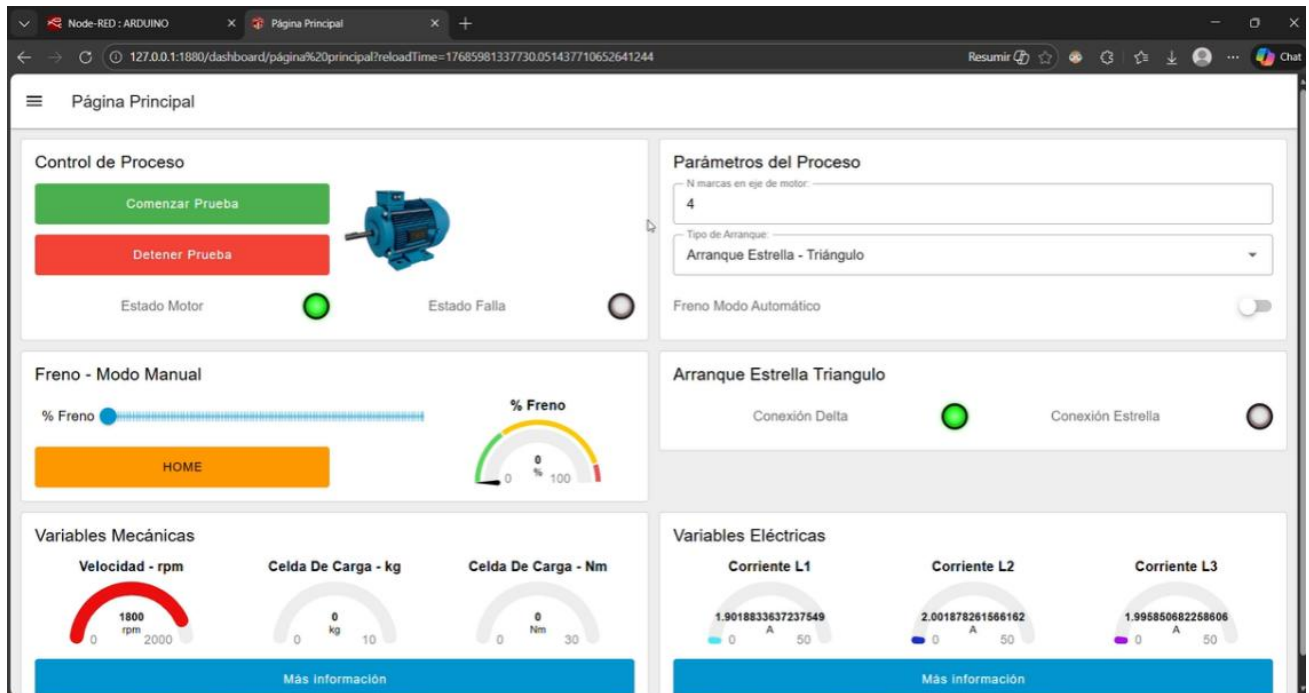


3.4.2 Arranque estrella-triángulo

Para el Arranque Estrella-Triángulo, el *dashboard* integra un sistema de monitoreo basado en indicadores de estado que permiten supervisar la secuencia de conmutación en tiempo real. Como se observa en la Figura 47, el sistema confirma la transición exitosa al activarse el indicador de conexión delta.

Figura 47

Panel de control con indicadores de estado estrella-triángulo

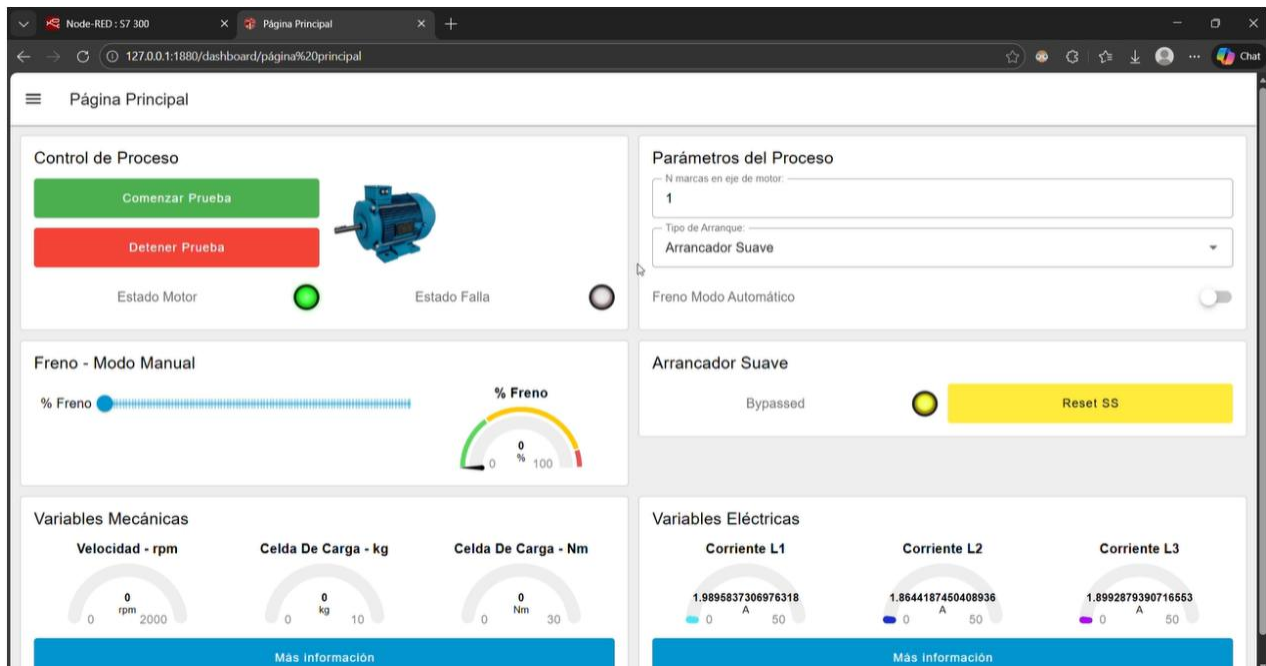


3.4.3 Arrancador suave

El control mediante el Arrancador Suave se gestiona desde una interfaz diseñada para el monitoreo preciso de la rampa de tensión. En la Figura 48, se destaca el indicador de 'Bypassed' iluminado, una señal crítica que confirma que el motor ha completado su fase de aceleración y el arrancador ha puentado sus tiristores mediante un contactor interno para optimizar la eficiencia energética. A diferencia de los métodos a tensión plena, esta configuración permite una curva de aceleración lineal y fluida que elimina los transitorios bruscos de corriente y los impactos de torque.

Figura 48

Interfaz de control del arrancador suave de estado "Bypassed" activo.

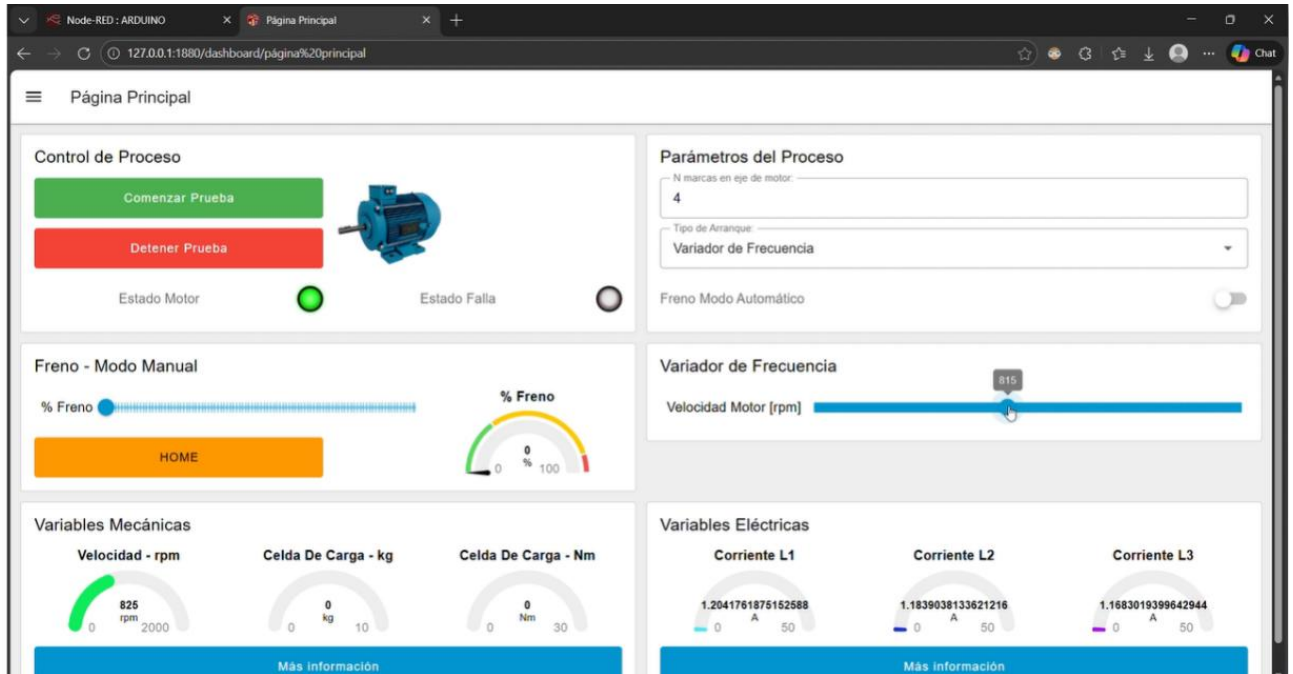


3.4.4 Variador de frecuencia

Finalmente, mediante el Variador de Frecuencia (VDF), el *dashboard* habilita un control de precisión que permite definir la consigna de velocidad de forma continua, como se ilustra en el control deslizante de la Figura 49.

Figura 49

Interfaz de control configurada en modo VDF con ajuste dinámico de velocidad y monitoreo de corriente.



3.5 Integración de la interfaz web y adquisición de datos en arranque estrella-triángulo

Se validó la integración física y lógica del sistema de control mediante la ejecución de la maniobra de arranque estrella-triángulo en el motor de inducción. Para las pruebas, se utilizó un banco de trabajo compuesto por un motor Siemens acoplado a un dinamómetro de partículas magnéticas Hampden, lo que permitió aplicar carga mecánica durante los ensayos como se muestra en la Figura 50.

Figura 50

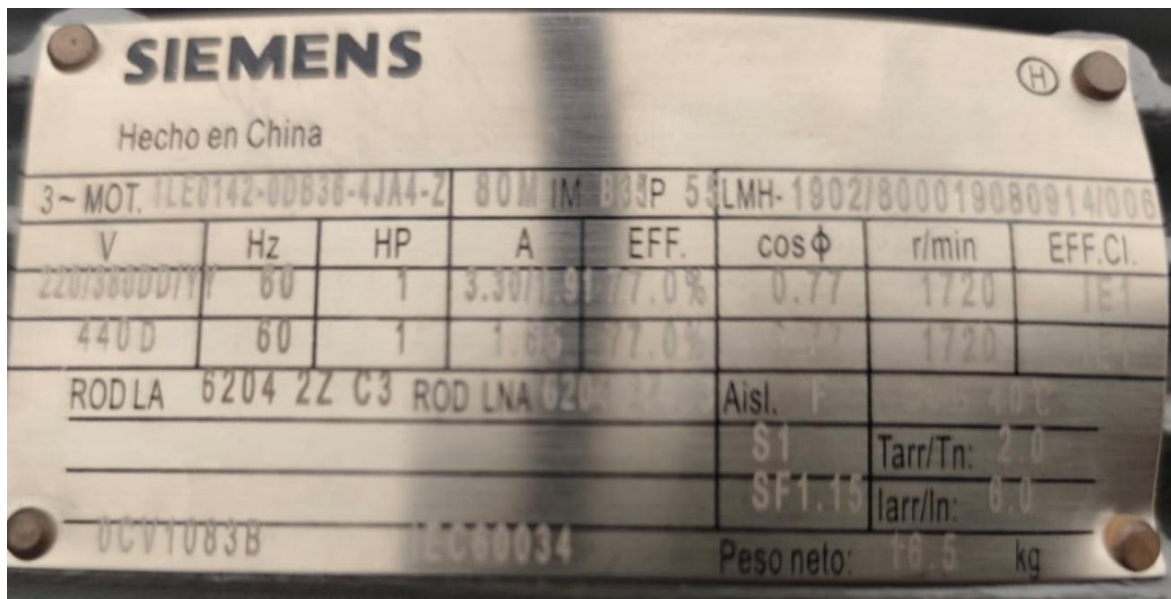
Banco de pruebas para la validación del sistema de control usando el motor SIEMENS ILE0142-0DB36-4JA4-Z



El PLC Siemens S7-300 gestionó la secuencia de enclavamiento y temporización de los contactores, asegurando una transición correcta entre las configuraciones de los devanados. La caracterización técnica del motor utilizado en esta prueba se detalla en la placa de identificación mostrada en la Figura 51, cuyos parámetros nominales para la configuración de las protecciones se resumen en la Tabla 6.

Figura 51

Placa del motor SIEMENS ILE0142-0DB36-4JA4-Z

**Tabla 6**

Placa de motor SIEMENS ILE0142-0DB36-4JA4-Z

Parámetro	Valor Nominal	Unidad
Potencia Nominal	1.0	HP
Tensión Nominal	220	V (Trifásico)
Corriente Nominal	3.30	A
Velocidad Nominal	1720	RPM
Frecuencia	60	Hz
Factor de Servicio	1.15	-

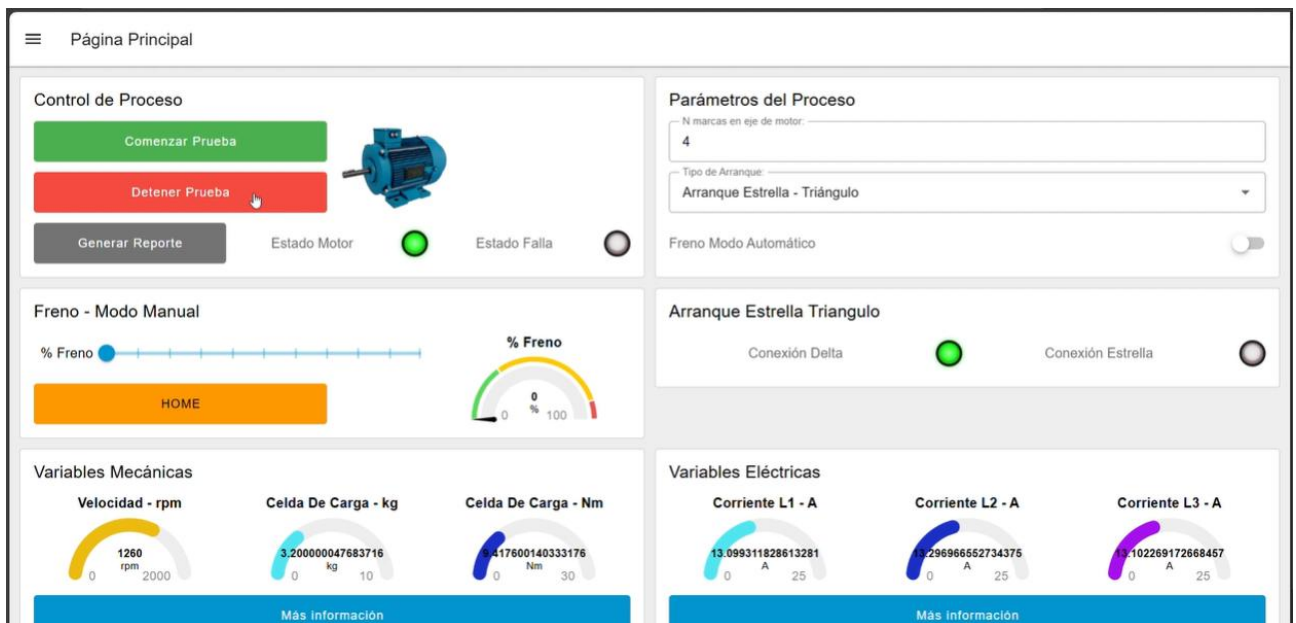
Supervisión mediante interfaz web

La interfaz desarrollada en Node-RED permitió la gestión integral de la prueba de arranque estrella-triángulo como se observa en la Figura 52. Se validó la funcionalidad de los indicadores luminosos (LEDs), los cuales reflejaron en tiempo real la secuencia de conmutación gestionada

por el PLC. Como se observó en la plataforma, al iniciar la prueba, el sistema habilitó primeramente la "Conexión Estrella" y, tras el tiempo de temporización configurado, realizó la transición automática a "Conexión Delta", momento en el cual el indicador correspondiente cambió de estado para informar al operador la finalización de la maniobra.

Figura 52

Panel de supervisión en Node-RED durante la validación del arranque.



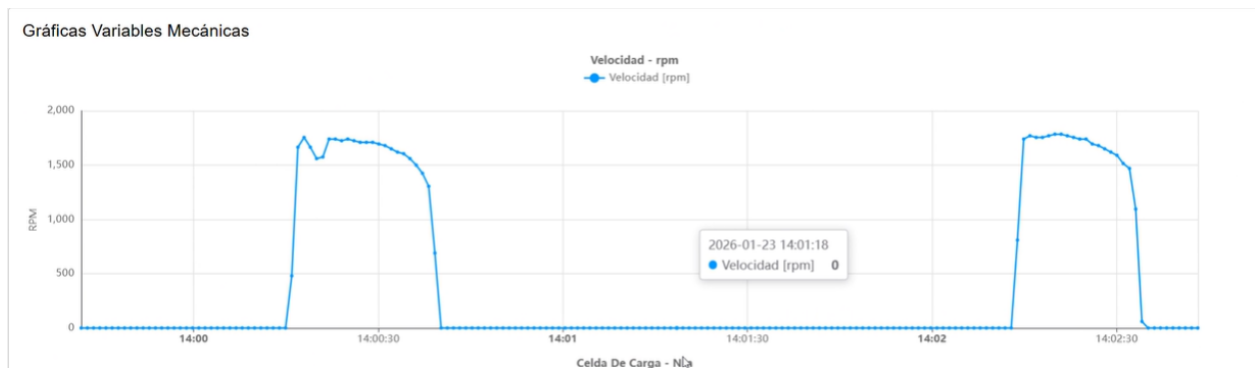
Comportamiento de la velocidad y torque

El análisis de las variables mecánicas confirmó la efectividad del arranque a tensión reducida para proteger la integridad del motor.

En la Figura 53 se muestra la gráfica de Velocidad vs. Tiempo, se registró una aceleración controlada. Durante la etapa de conexión en estrella, el motor alcanzó una velocidad intermedia estable; posteriormente, al realizarse la conmutación a triángulo, la velocidad ascendió de manera fluida hasta estabilizarse en el valor nominal de 1720 RPM.

Figura 53

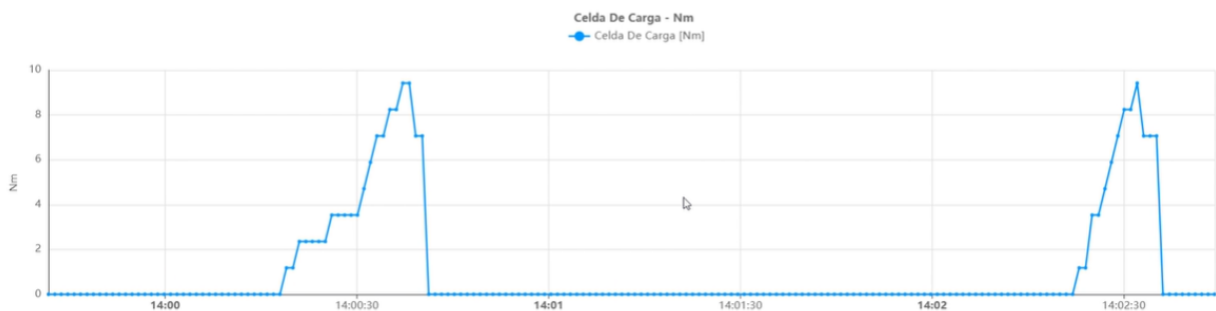
Gráfica de velocidad (RPM) vs tiempo.



Los medidores de la celda de carga integrados en la interfaz como se observa la Figura 54, permitieron visualizar el torque motor desarrollado durante la aceleración, asegurando que la carga impuesta por el freno de partículas fuera compatible con la capacidad del motor en cada configuración de los devanados.

Figura 54

Gráfica de par motor (Nm) vs. tiempo

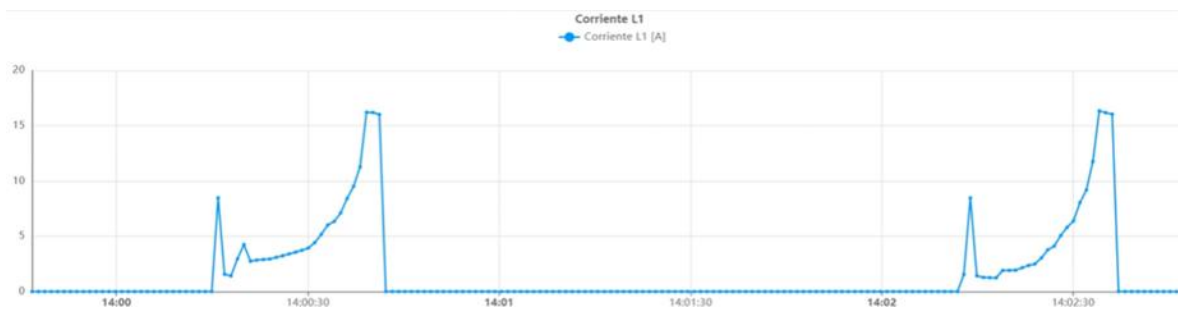


Comportamiento dinámico de las variables eléctricas

Durante la prueba, el analizador SENTRON PAC3220 capturó la corriente mediante el protocolo Modbus TCP. En la fase inicial de conexión estrella, se registró el comportamiento eléctrico propio de esta configuración. Al producirse la conmutación a la conexión triángulo (Delta), el sistema detectó el transitorio de corriente característico como se visualiza en la Figura 55, visualizándose en el *dashboard* de Node-RED la transición hacia el régimen nominal una vez completada la maniobra.

Figura 55

Gráfica de corriente $L1(A)$ vs tiempo



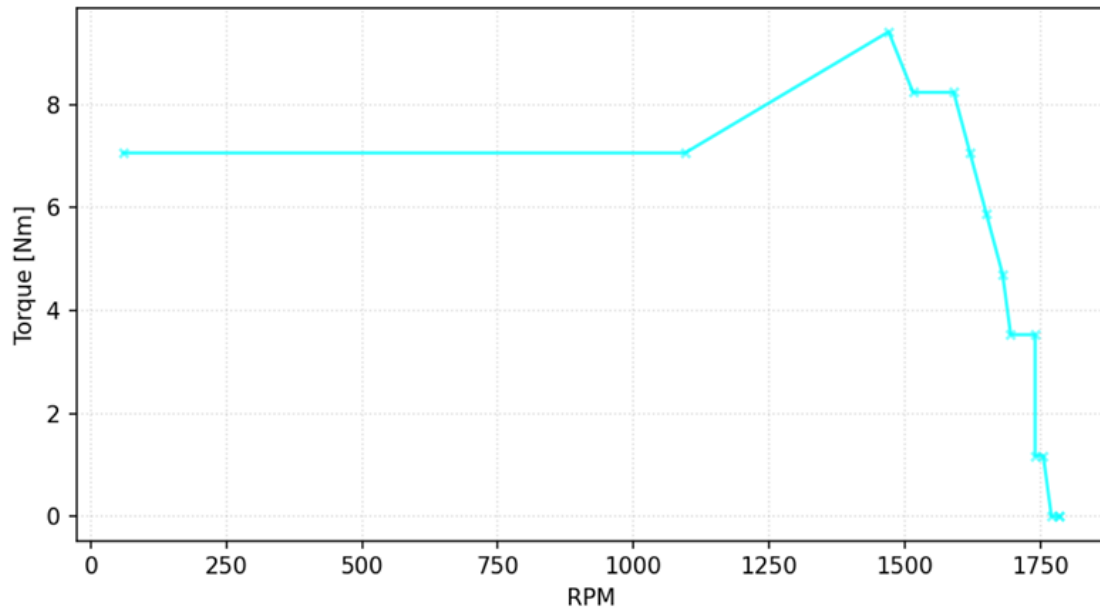
Resumen de Resultados de la Maniobra

Una vez finalizada la maniobra mediante el mando virtual “Detener Prueba”, el sistema queda en condición de cierre y habilita la generación del informe. Posteriormente, al presionar el botón “Generar Reporte”, se ejecuta automáticamente un flujo de post-procesamiento basado en Python, el cual genera los archivos CSV y un reporte técnico en PDF sobre el comportamiento del motor ensayado.

En primera instancia, el análisis del desempeño mecánico se centra en la relación entre el torque del motor y la velocidad. Como se observa en la Figura 56, la curva obtenida refleja una notable estabilidad del sistema, manteniendo el torque dentro de los rangos nominales incluso durante las transiciones de carga.

Figura 56

Gráfica de torque contra velocidad de motor siemens

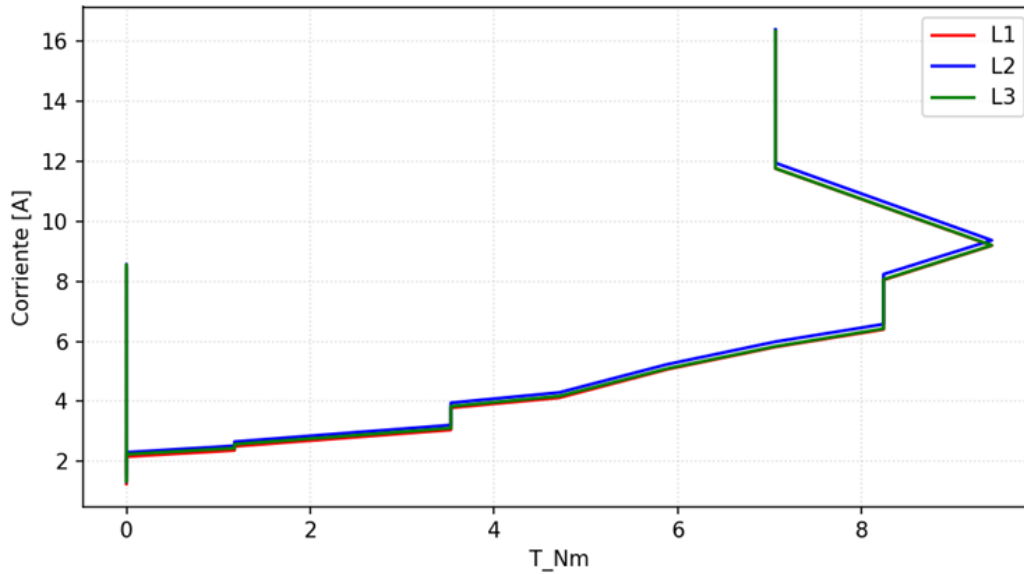
Torque vs. Velocidad

Esta respuesta mecánica tiene una relación con el comportamiento eléctrico del equipo. Al contrastar las Figuras 57 y 58, se evidencia cómo tanto la corriente de línea como la potencia activa escalan de forma proporcional al torque aplicado por el freno de partículas. Este incremento controlado de la demanda energética valida la precisión de la instrumentación y la linealidad de la carga aplicada durante la prueba.

Figura 57

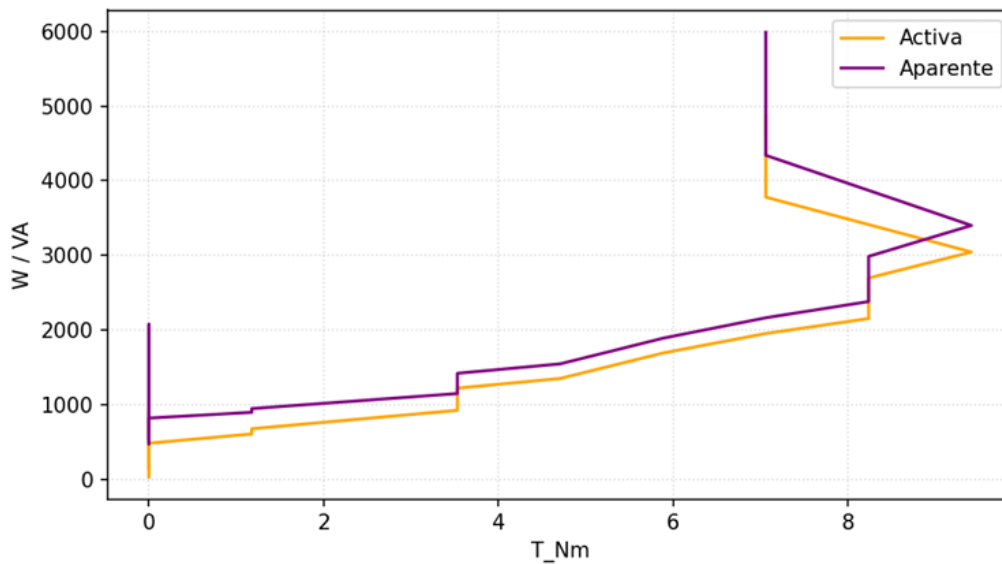
Gráfica de corriente contra torque de motor siemens

Corrientes vs. Torque

**Figura 58**

Gráfica de potencia activa y aparente contra torque de motor siemens

Potencia Activa y Aparente vs. Torque



Posteriormente, la integración de estas variables permite determinar la eficiencia energética del conjunto. Al relacionar la potencia mecánica de salida frente a la eléctrica de entrada, las Figuras 59 y 60 confirman que el motor opera en su zona de máximo rendimiento. Este análisis permite

identificar con exactitud las pérdidas y el aprovechamiento energético en cada punto de la curva de carga, consolidando la utilidad del sistema para la caracterización de máquinas.

Figura 59

Gráfica de potencia mecánica y eléctrica contra torque de motor siemens

Potencia Mecánica y Eléctrica vs. Torque

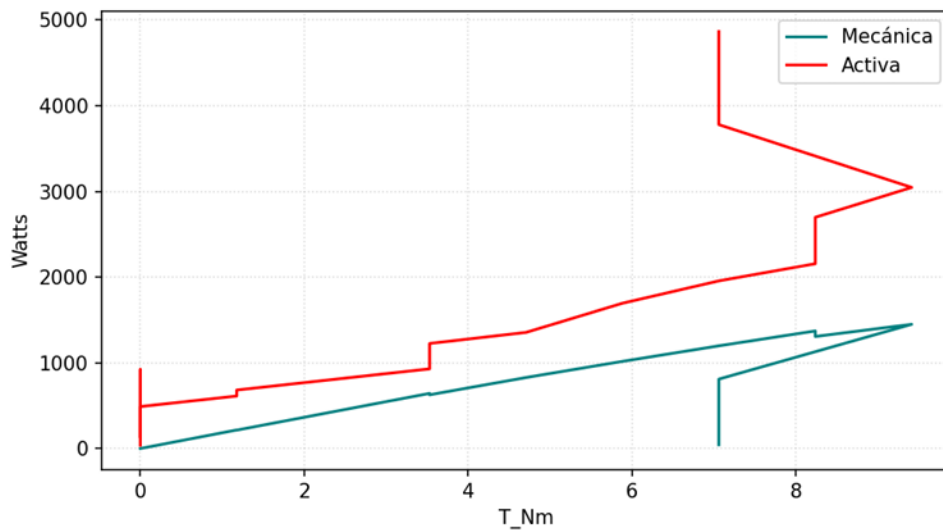
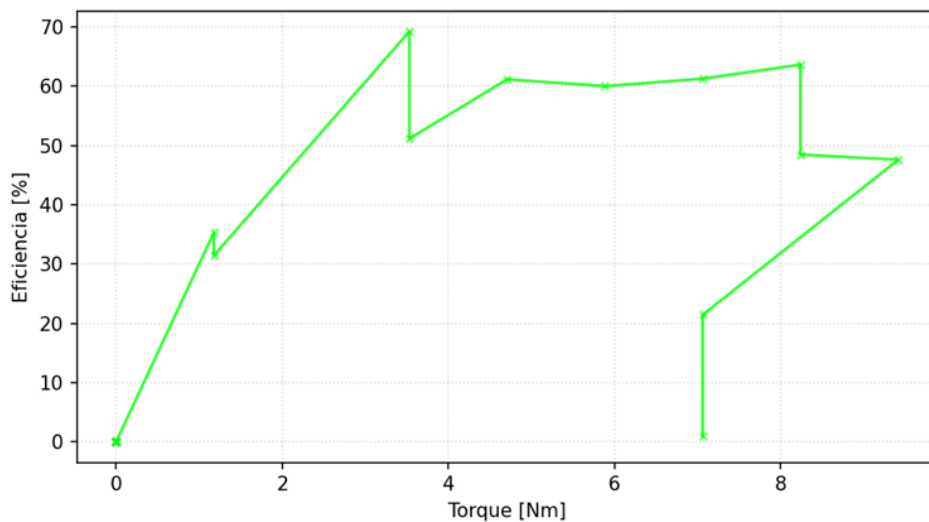


Figura 60

Gráfica de eficiencia contra torque de motor siemens

Eficiencia vs. Torque



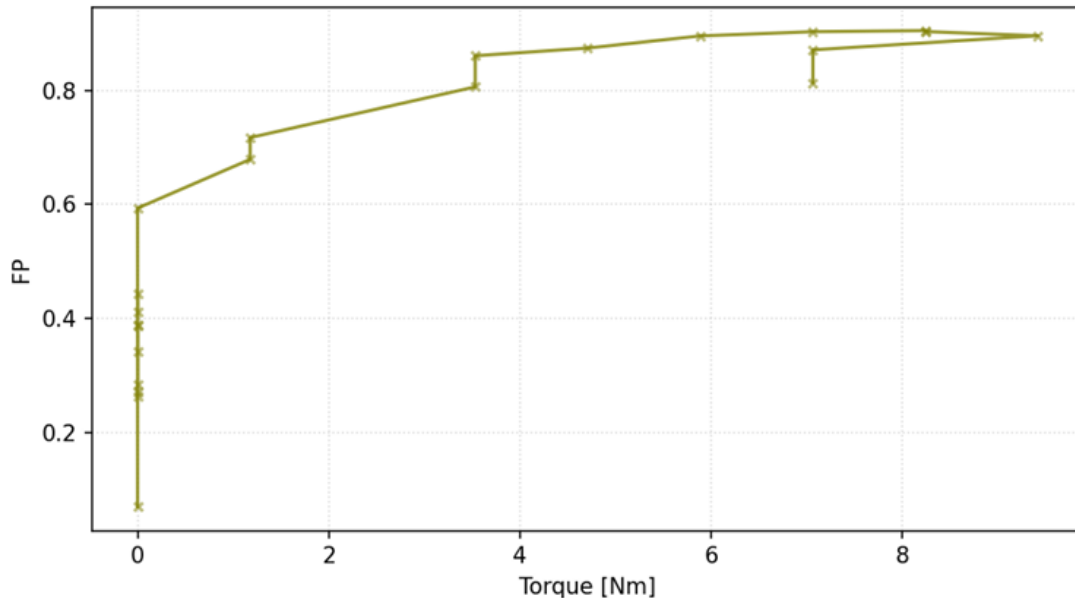
Finalmente, se evalúa el factor de potencia durante el ensayo. Como se detalla en la Figura 61, el factor de potencia se mantiene en niveles óptimos según el régimen de carga, lo que completa el

perfil técnico del motor y asegura que el sistema de adquisición de datos captura todas las variables necesarias para un diagnóstico eléctrico completo.

Figura 61

Gráfica de factor de potencia contra torque de motor siemens

Factor de Potencia vs. Torque



3.6 Comparativa entre datos de la placa y datos recopilados

Como parte del diagnóstico de la problemática actual en el Laboratorio de Control y Mecatrónica, se ejecutó una prueba de carga para contrastar el comportamiento del motor de inducción trifásico Siemens 1LE0142-0DB36-4JA4-Z frente a sus especificaciones técnicas de fábrica. Esta comparación es fundamental, ya que una desviación superior al 10% entre los valores teóricos y experimentales puede comprometer la confiabilidad operativa del sistema.

En la Tabla 6 se detallan los resultados obtenidos durante un ensayo de sobrecarga controlada, en el cual se registraron variables eléctricas y mecánicas mediante el sistema de adquisición implementado en el banco. Las variables eléctricas se obtuvieron con el analizador SENTRON PAC3220 y las variables mecánicas se registraron con los sensores instalados e integrados al PLC.

Tabla 7

Comparativa de parámetros nominales vs. reales en condición de sobrecarga.

Parámetro	Valor Nominal	Medición Real	% Error
Velocidad	1720 RPM	1680 RPM	2.32%
Torque	4.14 Nm	4.71 Nm	13.76%
Corriente	3.30 A	4.19 A	26.97%
Factor de Potencia	0.77	0.87	12.98%
Eficiencia	77%	60%	22.07%
Potencia Activa	968 W	1355 W	39.97%

Los resultados evidenciaron diferencias respecto a los valores nominales indicados en la placa, destacando una desviación del 13.8% en el torque nominal, al registrarse 4.71 Nm frente a 4.14 Nm, y del 27% en la corriente nominal, al registrarse 4.19 A frente a 3.30 A. Esta comparación se realizó bajo la consideración de que el motor se encontraba en condiciones óptimas de funcionamiento, al no presentar uso previo, y asumiendo la validez de las especificaciones técnicas suministradas por el fabricante. En esta condición, el contraste estuvo influenciado por la capacidad de sostener el punto de operación nominal durante el ensayo. En el canal de torque se utilizó una celda de carga de 100 kg con transmisor de salida estandarizada 0 a 10 V; sin embargo, debido a que el rango de carga aplicado fue menor a 10 kg, la señal de salida se mantuvo en una fracción reducida de la escala, alrededor de 0 a 1 V. Al trabajar con un nivel de señal bajo respecto al rango completo de la entrada analógica, se reduce la resolución efectiva de lectura y se dificulta ajustar y mantener el torque nominal exactamente en 4.14 Nm. En consecuencia, al operar en un torque superior al nominal, es consistente que variables asociadas como la corriente y la potencia activa presenten incrementos.

3.7 Análisis de costos

El análisis de costos del sistema propuesto se realizó con base en un desglose por subsistemas, con el objetivo de mantener trazabilidad entre los componentes seleccionados y el presupuesto estimado. Para cada rubro se consideraron precios unitarios y cantidades asociadas a la lista de materiales, expresados en USD.

Con fines de replicabilidad, los valores presentados corresponden a precios sin incluir IVA y sin aplicar descuentos comerciales, debido a que estos dependen del proveedor, condiciones de compra y fecha de cotización, por lo que no constituyen un criterio uniforme para reproducir el proyecto en otros contextos.

3.7.1 Criterios y alcance del presupuesto

El presupuesto contempla costos directos de materiales y equipos necesarios para la implementación del prototipo, agrupados en los siguientes subsistemas:

- **Instrumentación y sensores:** elementos de medición y acondicionamiento (analizador de energía, celda de carga, transmisor, sensor óptico).
- **Automatización y control:** PLC, módulos de E/S, fuente de 24 VDC y accesorios asociados.
- **Tablero eléctrico:** borneras, canaletas, protecciones, relés, riel DIN y consumibles de montaje/cableado.
- **Control manual del freno:** Arduino, shield Ethernet, driver, motor paso a paso, componentes auxiliares y material de prototipado.

Tabla 8*Costos de instrumentación y sensores (USD).*

Descripción	Unidades	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
SentronPAC 3220	1	\$710,00	\$710,00
Celda de carga tipo S	1	\$100,00	\$100,00
Transmisor de celda	1	\$37,00	\$37,00
Sensor óptico	1	\$30,00	\$30,00
Total			\$877,00

Tabla 9*Costos referenciales de automatización y control (USD).*

Descripción	Unidades	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
PLC S7 300	1	\$6.169,00	\$6.169,00
Fuente 24 VDC	1	\$393,00	\$393,00
Módulo DI/DO SM323	1	\$728,00	\$728,00
Módulo AI/AO SM334	1	\$1.045,00	\$1.045,00
Switch Ethernet	1	\$50,00	\$50,00
Riel DIN para S7 300	1	\$106,00	\$106,00
Conector frontal 20 pin	1	\$70,00	\$70,00
Conector frontal 40 pin	1	\$104,00	\$104,00
Micro Memory Card	1	\$469,00	\$469,00
Total			\$9.134,00

Nota: Los equipos del rubro de automatización y control se encuentran disponibles en el laboratorio, por lo que no representan un costo incremental para la implementación del prototipo.

Tabla 10*Costos del tablero eléctrico (USD).*

Descripción	Unidades	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Borneras	30	\$1,77	\$53,10
Separadores	4	\$1,48	\$5,92
Tapas para bornera	4	\$0,75	\$3,00
Topes de borneras	6	\$2,92	\$17,52
Puentes de borneras	3	\$7,64	\$22,92
Canaleta 25x25mm	3	\$4,88	\$14,64
Tablero Metálico	1	\$94,57	\$94,57
Breaker C6	1	\$11,32	\$11,32
Parada de Emergencia	1	\$16,13	\$16,13
Riel DIN	2	\$2,14	\$4,28
Relays acopladores	2	\$34,45	\$68,90
Consumibles	1	\$50,00	\$50,00
Total			\$362,30

Tabla 11

Costos del control manual del freno (USD).

Descripción	Unidades	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Arduino Uno	1	\$18,00	\$18,00
Ethernet Shield	1	\$23,00	\$23,00
DRV8825	1	\$3,00	\$3,00
Motor a pasos Nema17	1	\$17,00	\$17,00
Material impresión 3D	1	\$28,00	\$28,00
Potenciómetro	1	\$0,60	\$0,60
Final de Carrera	1	\$1,00	\$1,00
Total			\$90,60

3.7.2 Escenarios de costo

Con el fin de reflejar de manera fiel el contexto de implementación y, a la vez, conservar un referente para reproducción del proyecto, se presentan dos escenarios:

- **Costo referencial de adquisición:** considera la compra de todos los componentes, incluyendo el sistema de automatización (PLC y módulos).
- **Costo incremental de implementación:** considera únicamente los componentes que representarían un gasto efectivo para el proyecto, excluyendo el equipamiento disponible en el laboratorio.

En este caso, el PLC S7-300, sus módulos y la fuente de 24 VDC se encuentran disponibles en el laboratorio, por lo que el costo incremental de dicho rubro es 0,00 USD, manteniéndose únicamente como referencia para escenarios donde no exista disponibilidad previa.

3.7.3 Resumen de costos por rubro

A partir de las tablas detalladas de cada subsistema, se obtiene el siguiente consolidado en la Tabla 12.

Tabla 12

Resumen de costos

Rubro	Costo Referencial (\$)	Costo incremental (\$)
Instrumentación	\$877,00	\$877,00
Tablero eléctrico	\$362,30	\$362,30
Control manual freno	\$83,60	\$83,60
Automatización	\$9.119,00	\$0,00
Total	\$10.441,90	\$1.322,90

3.7.4 Interpretación de resultados

Del consolidado se observa que, en un escenario de adquisición completa, el rubro de automatización y control concentra la mayor proporción del costo total, debido al precio del PLC y módulos asociados. Sin embargo, en el contexto real de implementación (equipamiento disponible en laboratorio), el costo incremental se concentra principalmente en instrumentación y sensores y en los elementos del tablero eléctrico, que son indispensables para la instalación, operación y seguridad del sistema.

Este enfoque permite presentar un presupuesto coherente con la ejecución del proyecto y, simultáneamente, proporcionar un marco de referencia para su replicación en instituciones o entornos donde el equipamiento de automatización no esté disponible.

Es fundamental destacar que no es estrictamente necesario hacer uso de un PLC para la captura de información. Existen opciones más económicas y técnicamente optimizadas para esta tarea, como

tarjetas de adquisición de datos o microcontroladores. En caso de mantener la solución dentro del rubro de PLC, la arquitectura también puede simplificarse mediante la selección de equipos de menores prestaciones, adecuados para una máquina individual. Por ejemplo, un PLC de la familia S7-1200, al incorporar entradas y salidas digitales integradas y disponer de canales analógicos, permitiría reemplazar al PLC y los módulos externos empleados, reduciendo el costo asociado a automatización y control sin afectar las funciones principales de adquisición, control y comunicaciones. En este proyecto se utilizó un PLC S7-300 debido a la disponibilidad del equipo en el laboratorio y a su compatibilidad con la infraestructura existente.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Tras ejecutar las fases de diseño, integración, puesta en marcha y validación del sistema propuesto en el banco de pruebas Hampden MPB-2, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se desarrolló e implementó un sistema integrado de automatización y adquisición de datos que permitió ejecutar pruebas del dinamómetro de forma controlada y generar resultados técnicos útiles. En la Figura 36 se identificó un punto de ruptura máximo de 25.8 Nm en el rango de 900 a 1100 RPM, y se registraron condiciones límite durante la detención del motor. Al finalizar cada maniobra, los datos se exportaron y procesaron para generar automáticamente las curvas e informes correspondientes, evidenciando una mejora frente a métodos manuales.
- Se seleccionó e integró instrumentación capaz de capturar variables eléctricas y mecánicas con consistencia durante los ensayos. En la Figura 37 se evidenció una corriente de vacío del orden de 4 a 5 A con simetría entre fases, y un aumento marcado de corriente en condiciones de alta carga. En la Figura 38 se observó la evolución de la potencia activa y aparente con el incremento de torque, y en la Figura 39 se registró la variación del factor de potencia, alcanzando valores superiores a 0.93 en el rango intermedio de carga, lo que respalda la utilidad de la instrumentación para la caracterización dinámica.
- Se diseñó e implementó un tablero de control que integra alimentación, protecciones, adquisición, control y elementos de mando y seguridad para la operación del dinamómetro. Como se mostró en las Figuras 42 a 45, la distribución incorpora comunicación Ethernet, protección general, fuente de 24 VDC, PLC S7-300 con módulos de E/S, borneras, relés de aislamiento, paro de emergencia y el analizador SENTRON PAC3220 en la puerta del tablero, logrando una instalación ordenada y segura para operación y mantenimiento.

- Se desarrolló una interfaz en Node-RED que permitió configurar el sistema, supervisar variables en tiempo real y operar distintos métodos de arranque con resultados verificables. En el arranque estrella-triángulo se registró una aceleración controlada con estabilización cercana a 1720 RPM y una reducción del esfuerzo eléctrico inicial frente al arranque directo, según las Figuras 53 a 55. En el modo con variador se obtuvo seguimiento adecuado de la consigna y corrientes más estables, como se observa en las Figura 48. La detención desde la interfaz activó el post-procesamiento automático y la generación de curvas de desempeño, confirmando la integración entre supervisión, adquisición y reporte.

4.2 Recomendaciones

Tras validar el funcionamiento general del sistema de automatización, adquisición y generación de reportes, se identificaron mejoras que no se abordaron por alcance y factibilidad. A continuación, se presentan las recomendaciones más relevantes para una siguiente etapa de desarrollo e investigación:

- **Separar la operación del sistema y la adquisición de datos para mejorar la robustez:** En pruebas con frecuencias de muestreo elevadas se observó pérdida de fluidez en la interfaz de Node-RED. Se recomienda incorporar un HMI integrado al PLC para el mando y ajuste de parámetros, de modo que la operación se mantenga aún con pérdida de comunicación. Node-RED debería enfocarse en adquisición, almacenamiento y reporte.
- **Mejorar la resolución y confiabilidad de la medición de velocidad:** La medición con sensor óptico y pocos pulsos por vuelta limita la precisión, sobre todo a bajas RPM y en transitorios. Se recomienda integrar un *encoder* incremental de mayor resolución para obtener estimaciones más precisas y mejor sincronización con el registro de datos.
- **Mejorar la resolución de la medición de torque mediante la selección adecuada de la celda de carga o transmisor:** En el sistema actual se emplea una celda de 100 kg para mediciones bajas, por lo que la salida del transmisor utiliza solo una fracción del rango, por

ejemplo 0 a 1 V, mientras la entrada del PLC admite 0 a 10 V, reduciendo la resolución del torque. No se recomienda resolverlo únicamente con un amplificador externo, ya que este también incrementa el efecto del ruido, el *offset* y pequeñas variaciones de la señal, afectando la estabilidad de la lectura. Se recomienda utilizar una celda acorde al rango real, preferiblemente 20 kg por margen de seguridad, o un transmisor con escalamiento y precisión adecuados.

- **Implementar control electrónico del porcentaje de frenado del dinamómetro.** Aunque no fue parte del alcance, se intentó el control por accionamiento mecánico del mando, presentándose limitaciones por acoples, deslizamientos, desgaste y baja resolución debido a la maniobrabilidad reducida de la perilla. Se recomienda un prototipo electrónico que regule el frenado actuando sobre la variable eléctrica correspondiente (variación controlada de la corriente asociada al Variac), logrando mayor precisión y repetibilidad.
- **Incorporar la simulación de perfiles de carga como funcionalidad del banco de pruebas.** Para aproximar los ensayos a condiciones reales, se recomienda programar perfiles representativos: torque variable (bombas centrífugas, ventiladores), torque aproximadamente constante (transportadores) y alta inercia/arranque pesado (molinos). Esto permitiría evaluar transitorios y régimen permanente y comparar mejor distintos métodos de arranque u operación.
- **Ampliar el estudio energético incluyendo calidad de energía y armónicos.** El análisis se centró en variables eléctricas y mecánicas básicas. Se recomienda añadir mediciones de armónicos, distorsión y calidad de energía con instrumentación más avanzada, y a partir de ello proponer medidas de mitigación según corresponda (filtros, compensación reactiva, entre otros).
- **Extender la instrumentación hacia variables de condición:** temperatura y vibración. Se recomienda integrar sensores de temperatura y vibración en puntos representativos (carcasa

del motor, rodamientos y estructura), ya que el estudio actual no cubre completamente el estado mecánico-térmico. Estas variables mejorarían la trazabilidad de los ensayos y enriquecerían la base de datos.

- **Planificar campañas de adquisición prolongada orientadas a modelos predictivos.** Para habilitar mantenimiento predictivo se requiere operación continua y estable durante periodos extensos, con perfiles de carga definidos. Se recomienda ejecutar campañas de larga duración y aplicar analítica para tendencias y detección de anomalías.
- **Migrar el sistema de control a una plataforma de PLC vigente.** Para asegurar disponibilidad de repuestos y continuidad del proyecto, se recomienda migrar a un PLC en producción. Esto reduce el riesgo de indisponibilidad ante fallas en CPU o módulos por obsolescencia o tiempos de reposición.
- **Desarrollar soluciones mecánicas modulares para montaje de distintos motores.** Se recomienda diseñar una base ajustable, elementos de alineación y acoples intercambiables para diferentes motores. Esto facilita el montaje, reduce errores por desalineación y mejora la repetibilidad entre ensayos.

Referencias

- [1] K. B. Chavhan and R. T. Ugale, "Automated Test Bench for an Induction Motor using LabVIEW," en *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016.
- [2] S. Baltayan, C. Kreiter, y A. Pester, "An Online DC-Motor Test Bench for Engineering Education," en *2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2018.
- [3] É. Ádámkó, A. Szántó, y G. Á. Sziki, "Software developments for an electric motor test bench developed at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1237, p. 012012, 2022.
- [4] M. Marjanen, "Design and implementation of an induction motor drive test bench," M.S. thesis, Dept. Electr. Eng., Tampere Univ. Technol., Tampere, Finland, 2015.
- [5] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 5ª ed., México: McGraw-Hill, 2012.
- [6] T. Wildi, *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*, 6ª ed., México: Pearson Educación, 2007.
- [7] Froude Hofmann, "Standard Hydraulic Dynamometers (F-Type)," Froude Dyno, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.froudedyno.com/products/dynamometers/standard-hydraulic-dynamometers-f-type>
- [8] Magtrol Inc., "Eddy-Current Dynamometers – WB Series," 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.magtrol.com/product/eddy-current-dynamometers-wb-series/>
- [9] Magtrol Inc., "Hysteresis Dynamometers – HD Series," 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.magtrol.com/product/hysteresis-dynamometers-hd-series/>
- [10] Magtrol Inc., "Powder Brake Dynamometers – PB Series," 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.magtrol.com/product/powder-brake-dynamometers-pb-series/>

- [11] A. S. Morris and R. Langari, *Measurement and Instrumentation: Theory and Application*, 2nd ed., Elsevier, 2012.
- [12] A. Creus Solé, *Instrumentación Industrial*, 8ª ed., Marcombo, 2010.
- [13] T. Kuphaldt, *Lessons in Industrial Instrumentation*, Open Book Project, 2019.
- [14] S. Manesis and G. Nikolakopoulos, *Introduction to Industrial Automation*, CRC Press, 2018.
- [15] Siemens AG, *SENTRON Multímetro 7KM PAC3120 y PAC3220 Manual de producto*. Regensburg, Alemania: Siemens AG, Manual L1V30519172D-01, Oct. 2019.
- [16] P. Marwedel, *Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things*, 3.ª ed. Springer, 2017.
- [17] OpenJS Foundation, "Node-RED: Low-code programming for event-driven applications". Accedido el 2 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible: <https://nodered.org/>.
- [18] P. Bielaczyc et al., *Methodology of Electric Motor Testing on the Hybrid Engine Test Bench*, SAE Tech Paper, 2018.
- [19] V. Kopyrin et al., "Performance Characteristics' Study of a Submersible Electric Motor Based on the Bench Tests Results," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1546, 2020.
- [20] E. Sánchez-Herrera et al., "Testing Bench for Remote Practical Training in Electric Machines," *IEEE Global Engineering Education Conf.*, 2013.
- [21] Dyno-One, *DynoLAB Test Automation Controller*, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.dyno-one.com/products/dynolab-test-automation-controller/>
- [22] Magtrol Inc., *M-TEST 7 Motor Testing Software*, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.magtrol.com/product/m-test-7-motor-testing-software/>

- [23] R. Palazzetti, “Exploded view diagram of a three-phase induction motor”, *ResearchGate*. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/figure/Exploded-view-diagram-of-a-three-phase-induction-motor-https-electricala2zcom_fig2_386733974.
- [24] N. R. Syed, “How to read a DC motor datasheet”, *Najam R. Syed*, 21 de enero de 2018. [En línea]. Disponible: <https://nrsyed.com/2018/01/21/how-to-read-a-dc-motor-datasheet/>.
- [25] “Eficiencia de un motor eléctrico”, *Coparoman*, 14 de septiembre de 2014. [En línea]. Disponible: <https://coparoman.blogspot.com/2014/09/>. [Accedido: 4-feb-2026].
- [26] Rebold, “Industria 4.0: el gran reto de la transformación digital”, *Rebold*, 5 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://letsrebold.com/es/blog/industria-4-0-transformacion/>.
- [27] Stability, “Customized & configurable data acquisition system”, *Stability*. [En línea]. Disponible: <https://www.stability.co/customized-configurable-data-acquisition-system/>.
- [28] Node-RED, “node-red-dashboard”, *Node-RED Library*. [En línea]. Disponible: <https://flows.nodered.org/node/node-red-dashboard>.

Apéndices

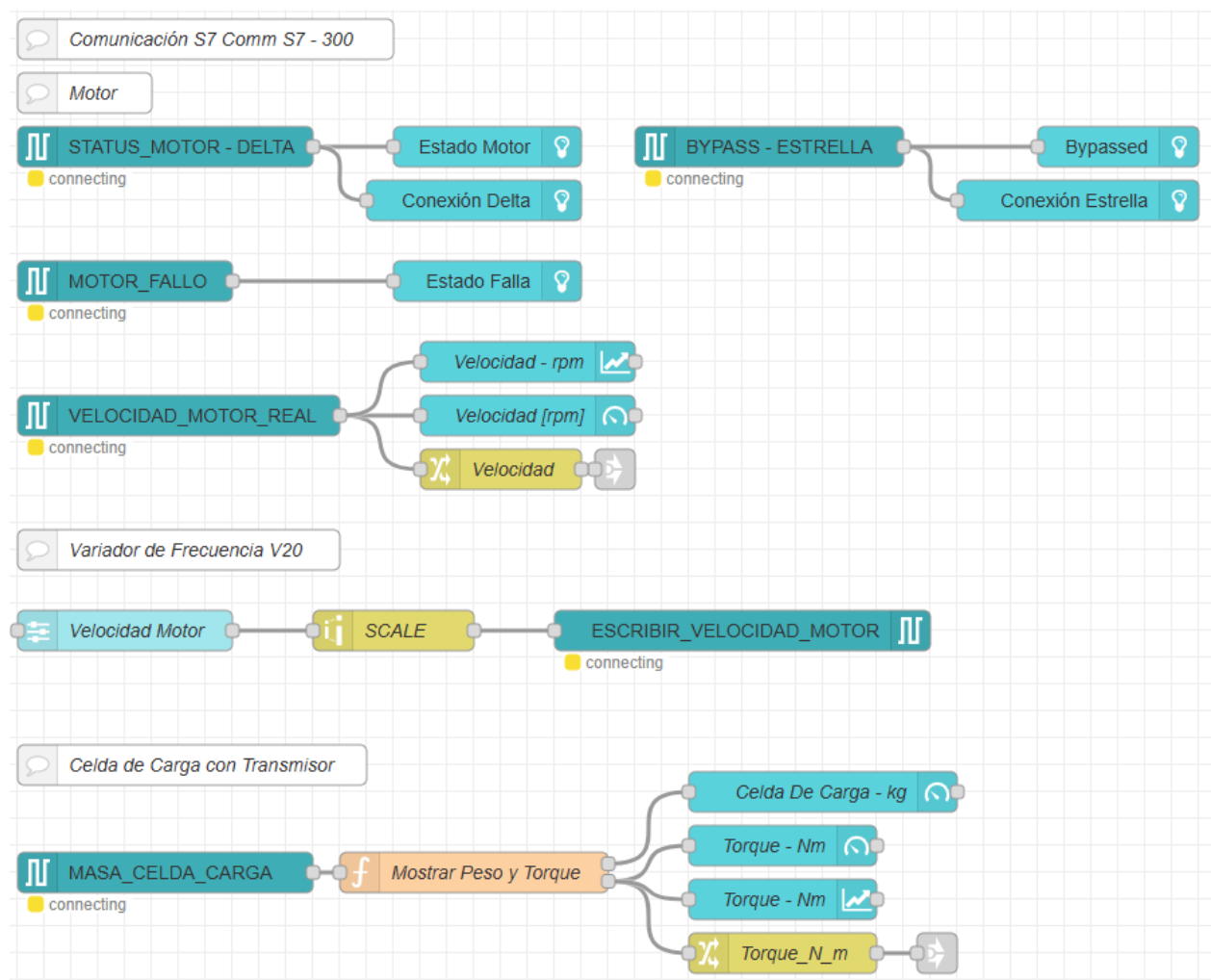
A. Flujos de Programación y Comunicación en Node-RED

En este apéndice se documenta la arquitectura de *software* implementada en Node-RED. Se presentan los flujos de nodos (flows) encargados de la adquisición de datos, la comunicación con los periféricos (PLC, Analizador de Redes, Microcontrolador) y la gestión de la interfaz gráfica y reportes.

Flujo encargado de la lectura cíclica de las variables de estado, velocidad y torque desde el bloque de datos del PLC, así como el envío de comandos de control.

Figura 62

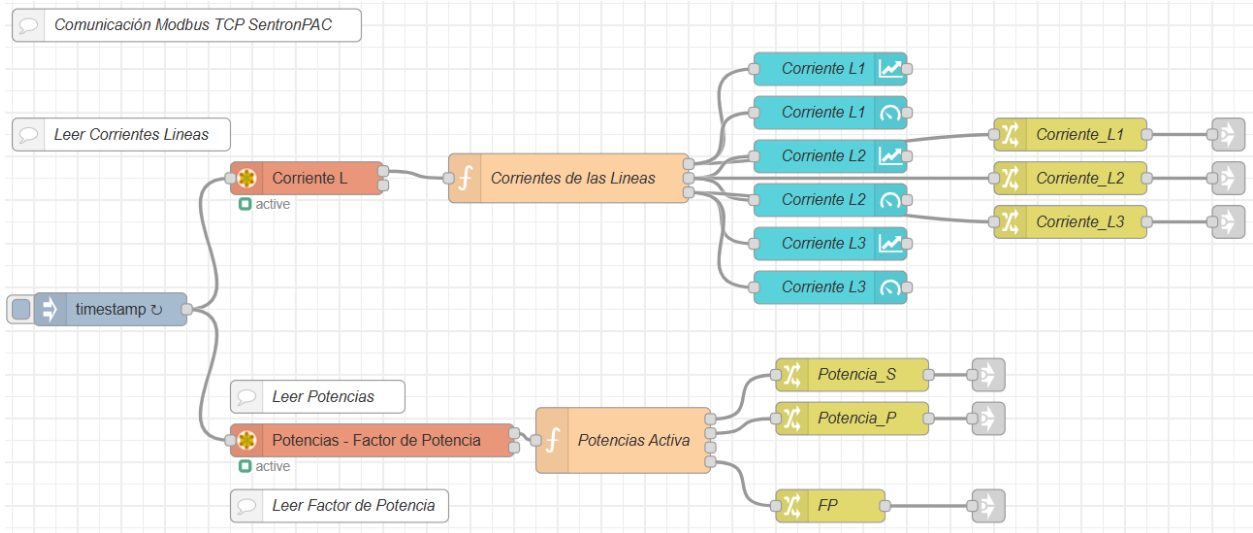
Comunicación con PLC S7-300 (Protocolo S7)



Flujo configurado para la lectura de registros Modbus, incluyendo la decodificación de datos para obtener las corrientes, potencias y factor de potencia en formato de punto flotante.

Figura 63

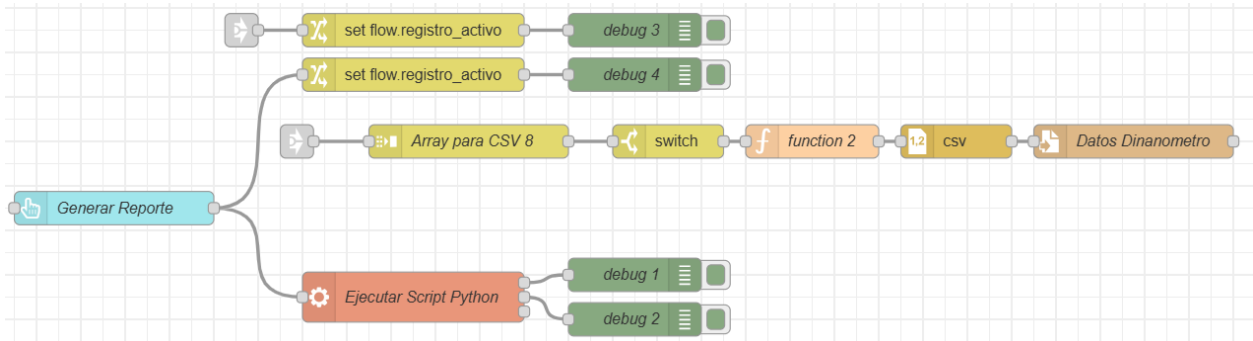
Adquisición de energía con Sentron PAC3220 (Modbus TCP)



Secuencia lógica que recopila los datos del ensayo, los exporta a formato CSV y ejecuta el *script* de Python para la creación del reporte PDF.

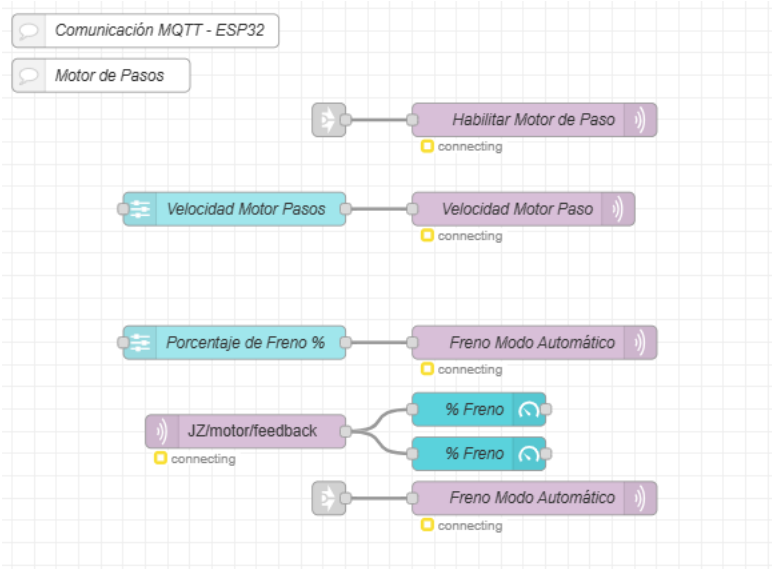
Figura 64

Automatización y generación de reportes



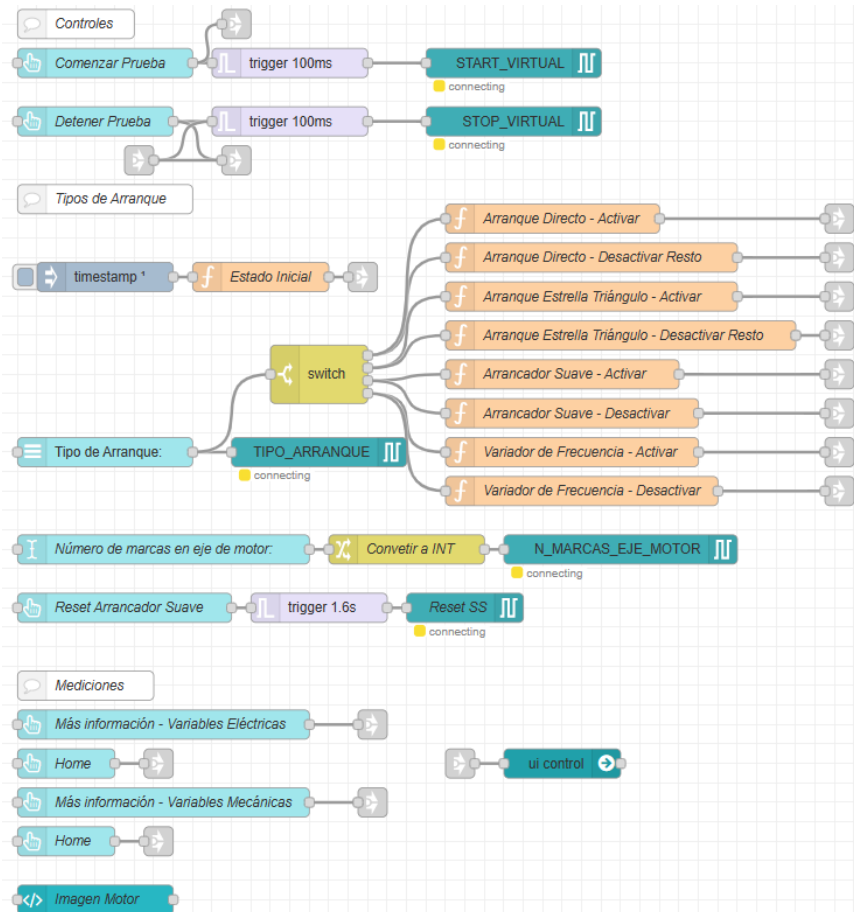
Lógica de comunicación serial para el control manual del freno de partículas mediante el microcontrolador Arduino.

Figura 65
Control de freno



Bloques de nodos que representan la visualización de los datos en la página del servidor local, agrupando los indicadores (gauges), gráficas (charts) y controles de usuario.

Figura 66
Visualización y monitoreo (Dashboard)





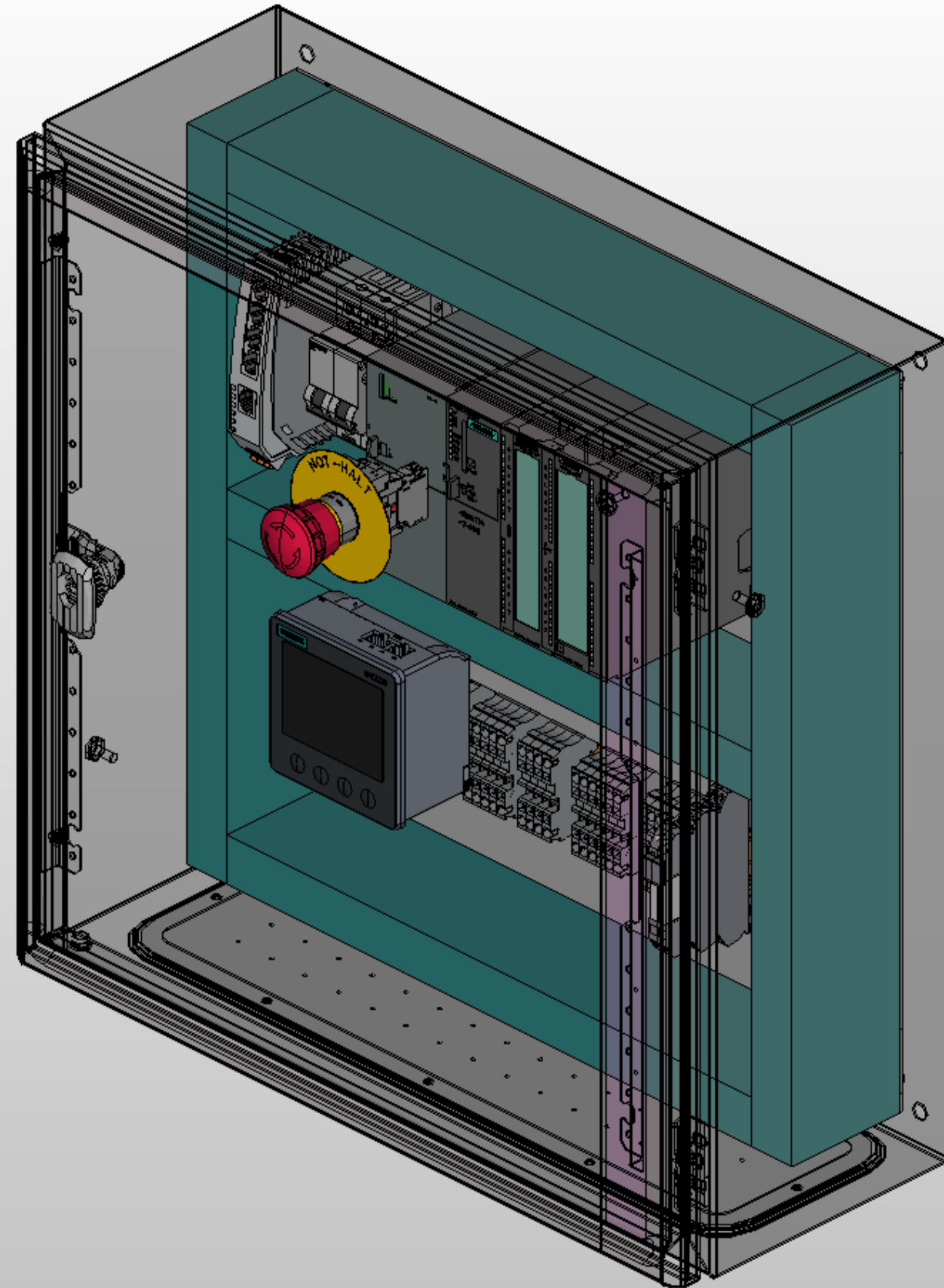
ESPOL
Dirección: V22P+J6R, Guayaquil
Teléfono: 099 482 6808

Empresa/cliente	Escuela Superior Politécnica del Litoral
Descripción de proyecto	Tablero de Control Banco Dinanometrico
Número de proyecto	INGE-PR-002

N° de documento	INGE-ELE-002
Título del documento	Topográfico y funcional
Revisión	A
Fecha	15/01/2026

Número de páginas 18

Revisión	Fecha	Nombre	Fecha	09/01/2026
			Resp.	EPLAN
			Probado Original	



Revisión	Fecha	Nombre	Fecha	05/02/2026
			Resp.	EPLAN
			Probado Original	



Proyecto
Tablero de Control Banco Dinametrico

Vista 3D

N# de plano	= DIN + TC	Hoja	03
Cliente	INGE-PR-002	Página	3 / 18
Escuela Superior Politécnica del Litoral	INGE-PR-002		

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

A

A

B

B

C

C

D

D

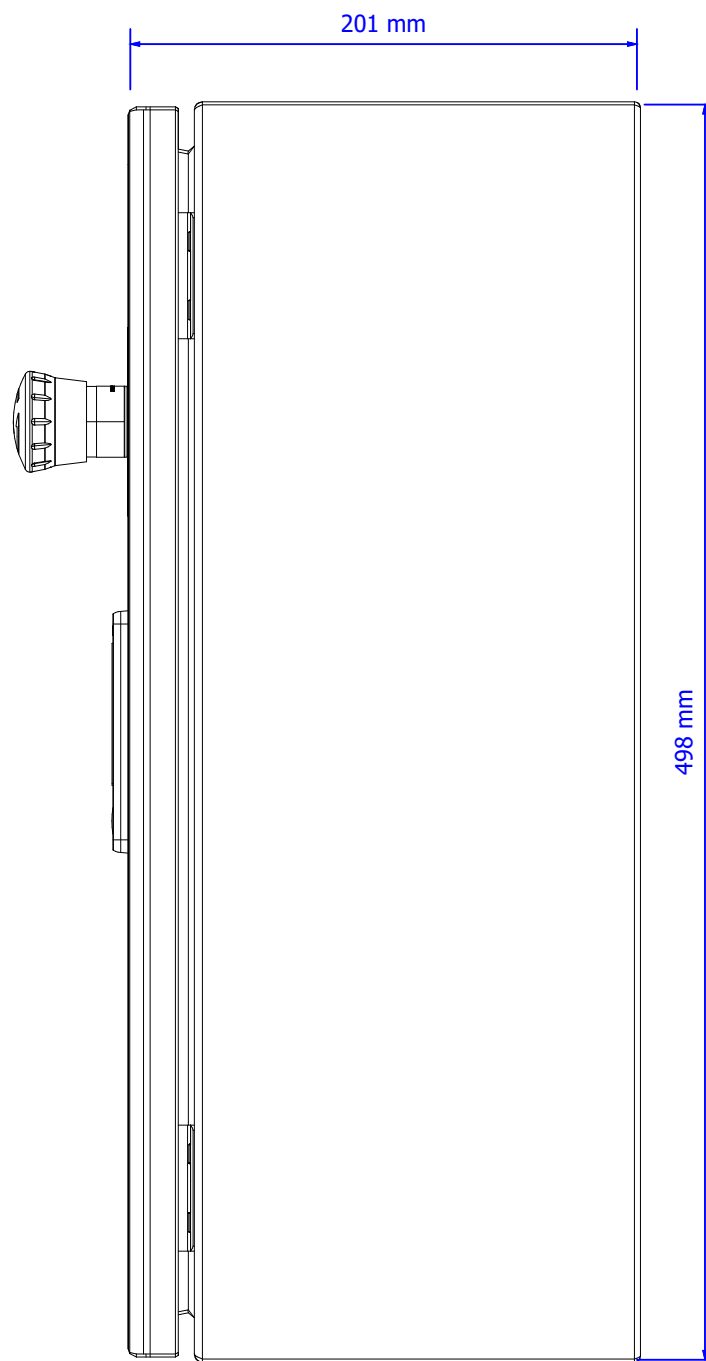
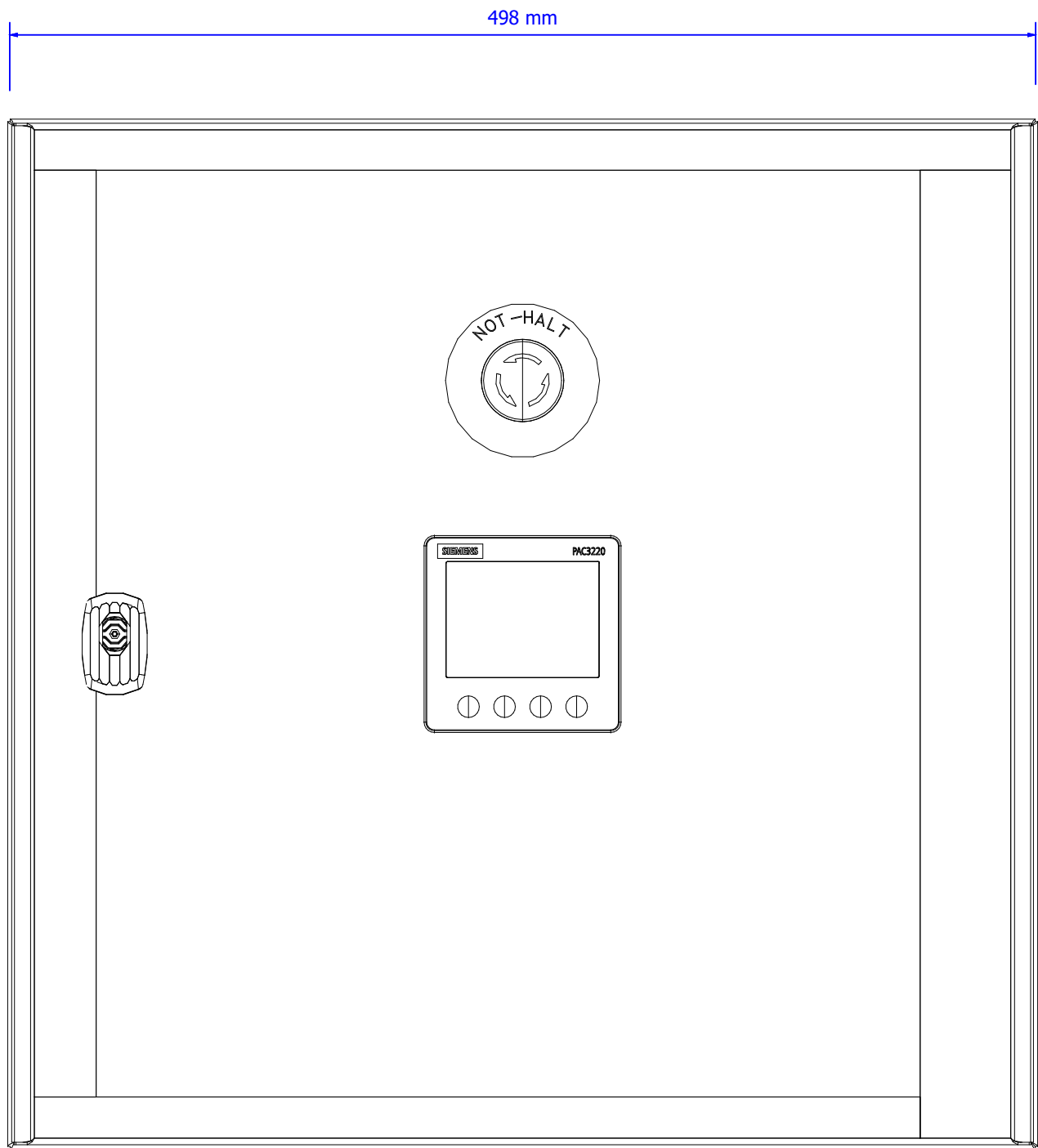
E

E

F

F

05



Fecha	15/01/2026
Resp.	EPLAN
Probado Original	

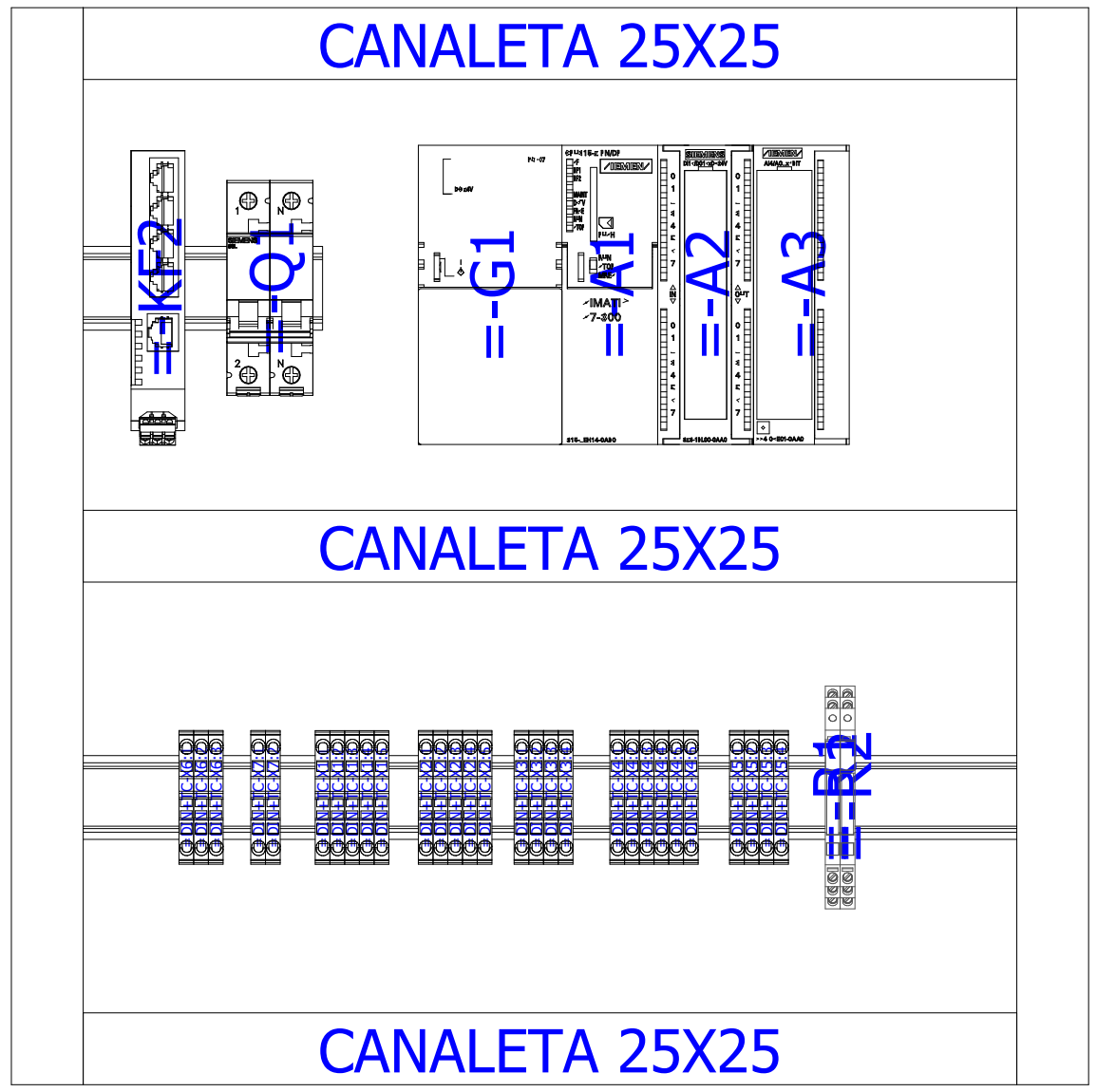
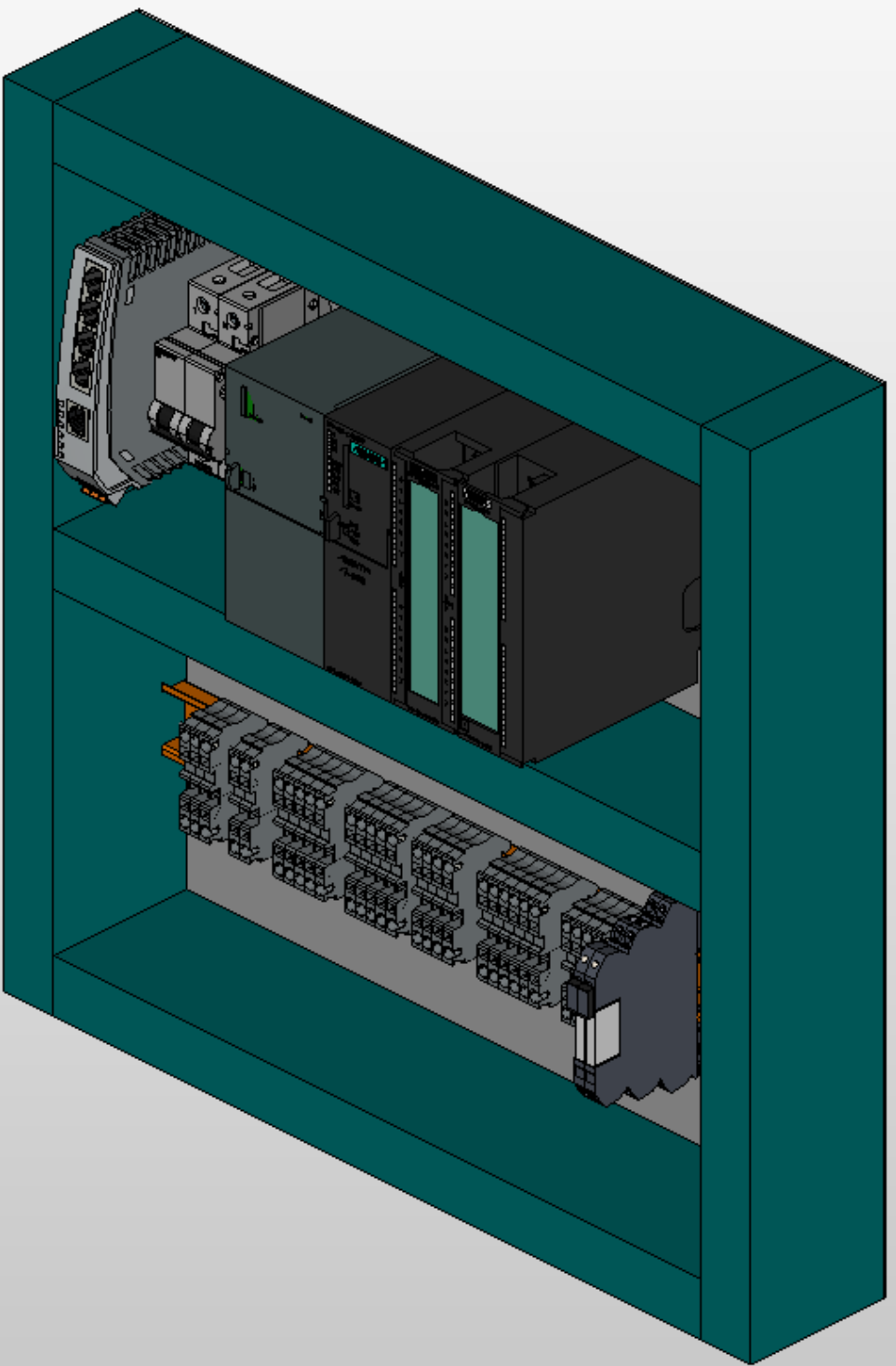
espol Escuela Superior Politécnica del Litoral

Proyecto
Tablero de Control Banco Dinametrico

Vista 2D

N# de plano = DIN
+ TC

Cliente	INGE-PR-002	Hoja	04
Escuela Superior Politécnica del Litoral	INGE-PR-002	Página	4 / 18



Revisión	Fecha	Nombre	Fecha	05/02/2026
			Resp.	EPLAN
			Probado	
			Original	



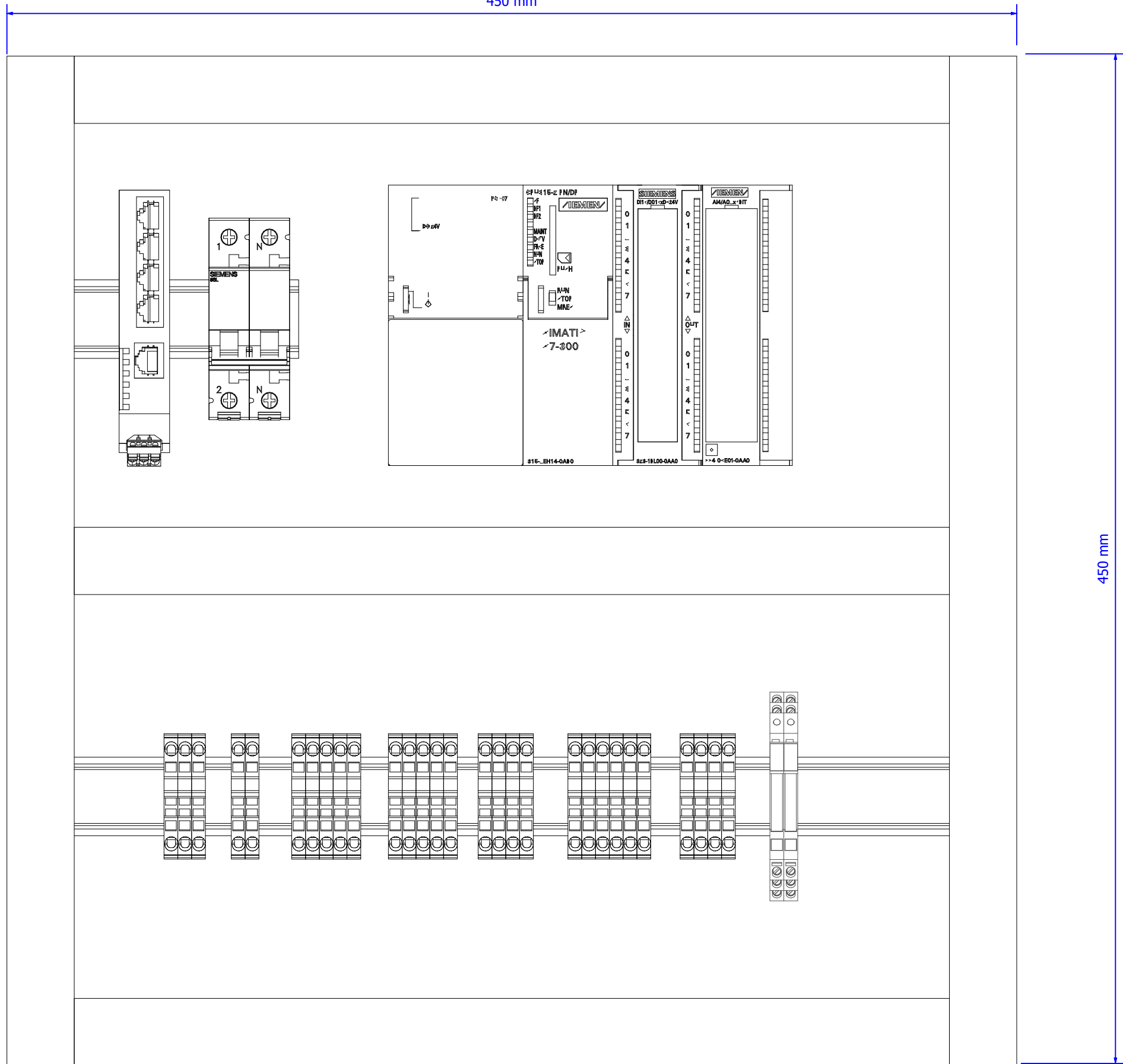
Proyecto
Tablero de Control Banco Dinametrico

Bandeja portaelementos

N# de plano	= DIN	Hoja	05
	+ TC	Página	5 / 18
Cliente	INGE-PR-002		
Escuela Superior Politécnica del Litoral	INGE-PR-002		

450 mm

450 mm



Fecha	24/01/2026
Resp.	EPLAN
Probado Original	

espol Escuela Superior Politécnica del Litoral

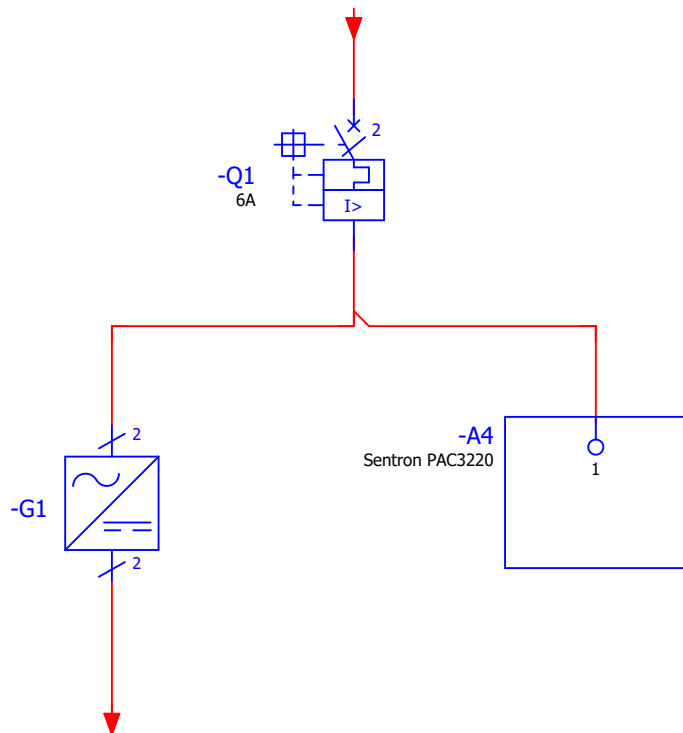
Proyecto
Tablero de Control Banco Dinametrico

Medidas bandeja portaelementos

N# de plano	= DIN + TC	Hoja	06
Cliente	INGE-PR-002	Página	6 / 18
Escuela Superior Politécnica del Litoral	INGE-PR-002		

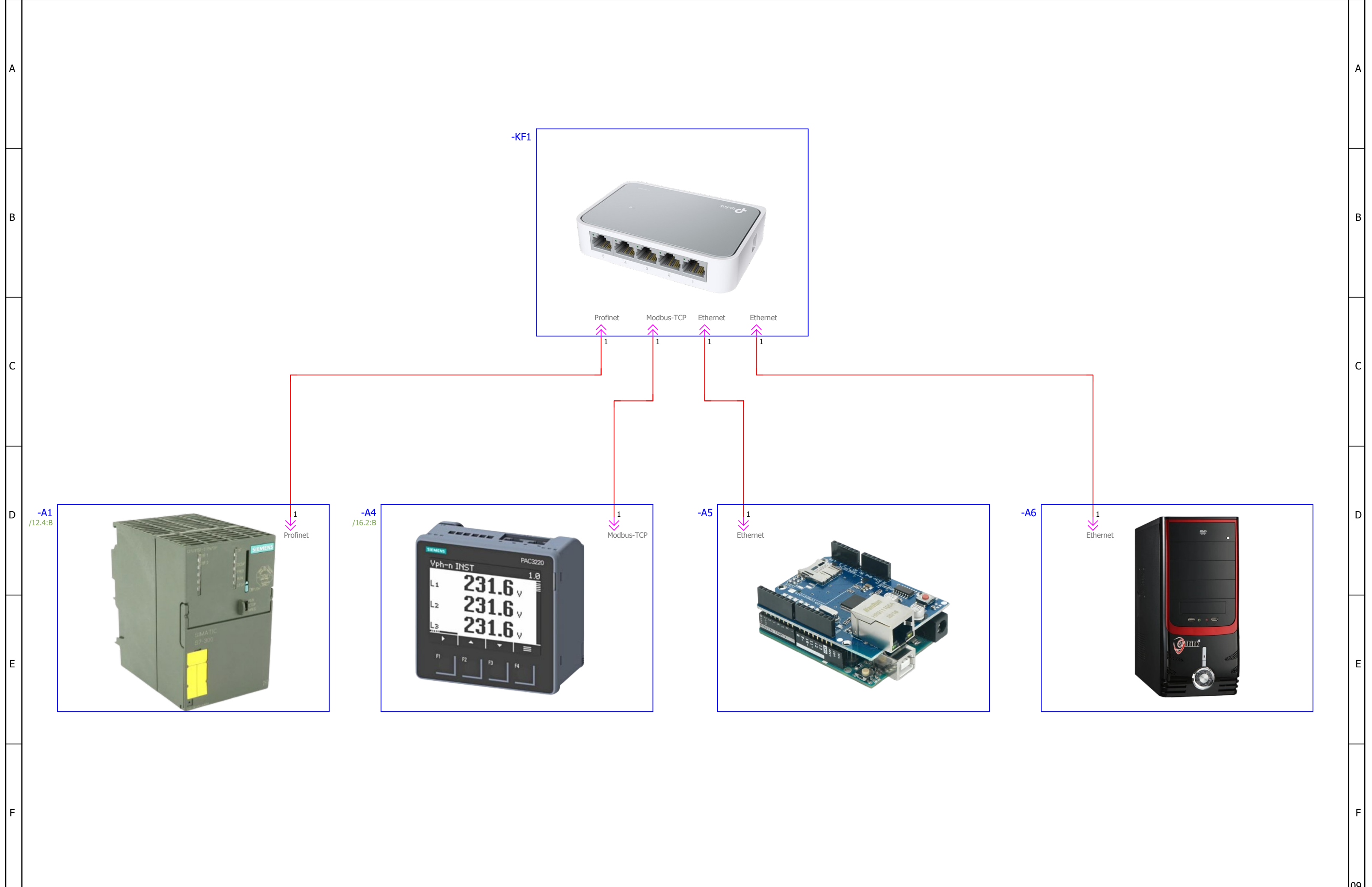
Revisión	Fecha	Nombre

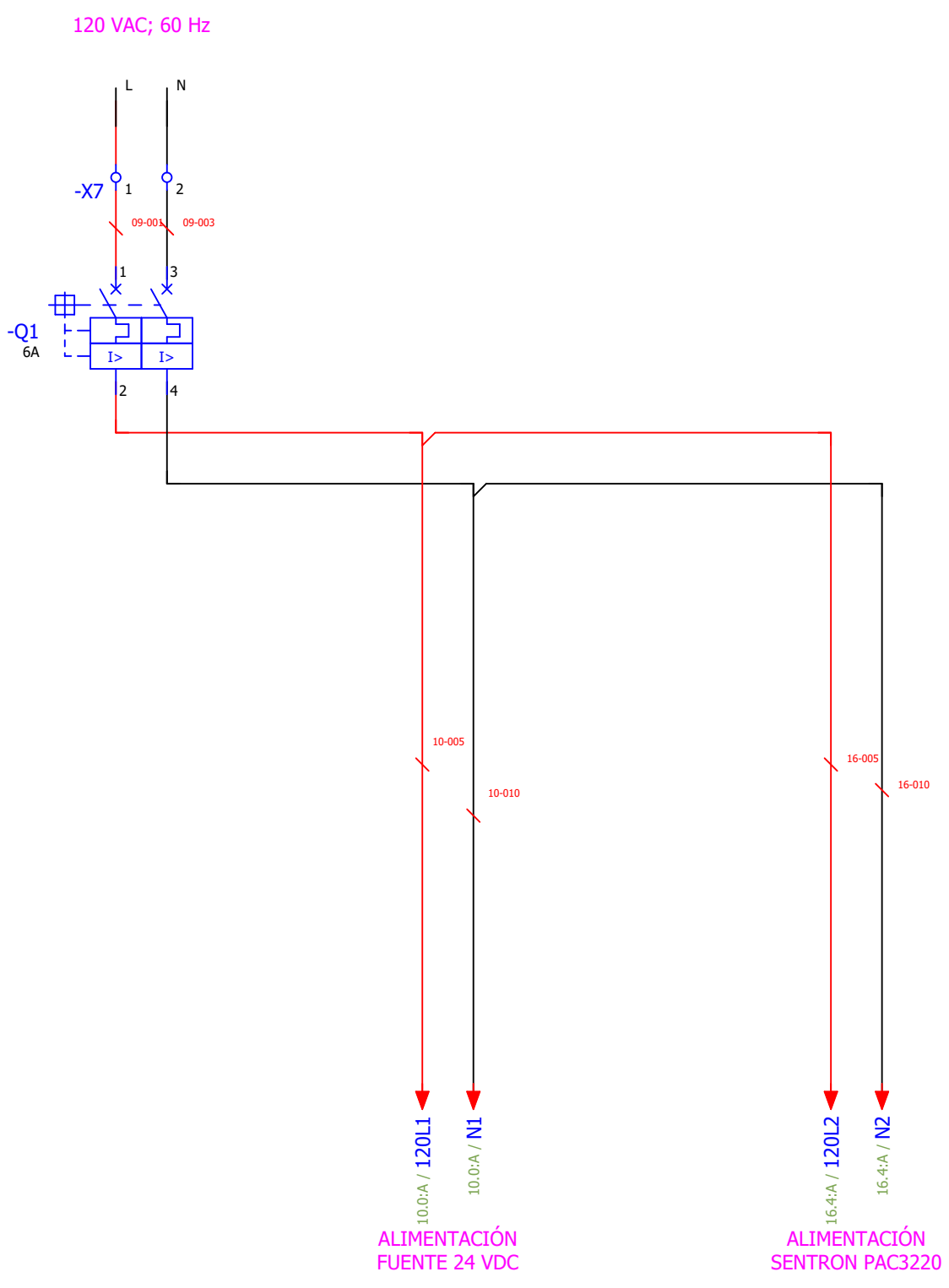
SUMINISTRO DE ENERGÍA
120 VAC; 60 Hz



DISTRIBUCIÓN
24 VDC

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A									A
B									B
C									C
D									D
E									E
F									F





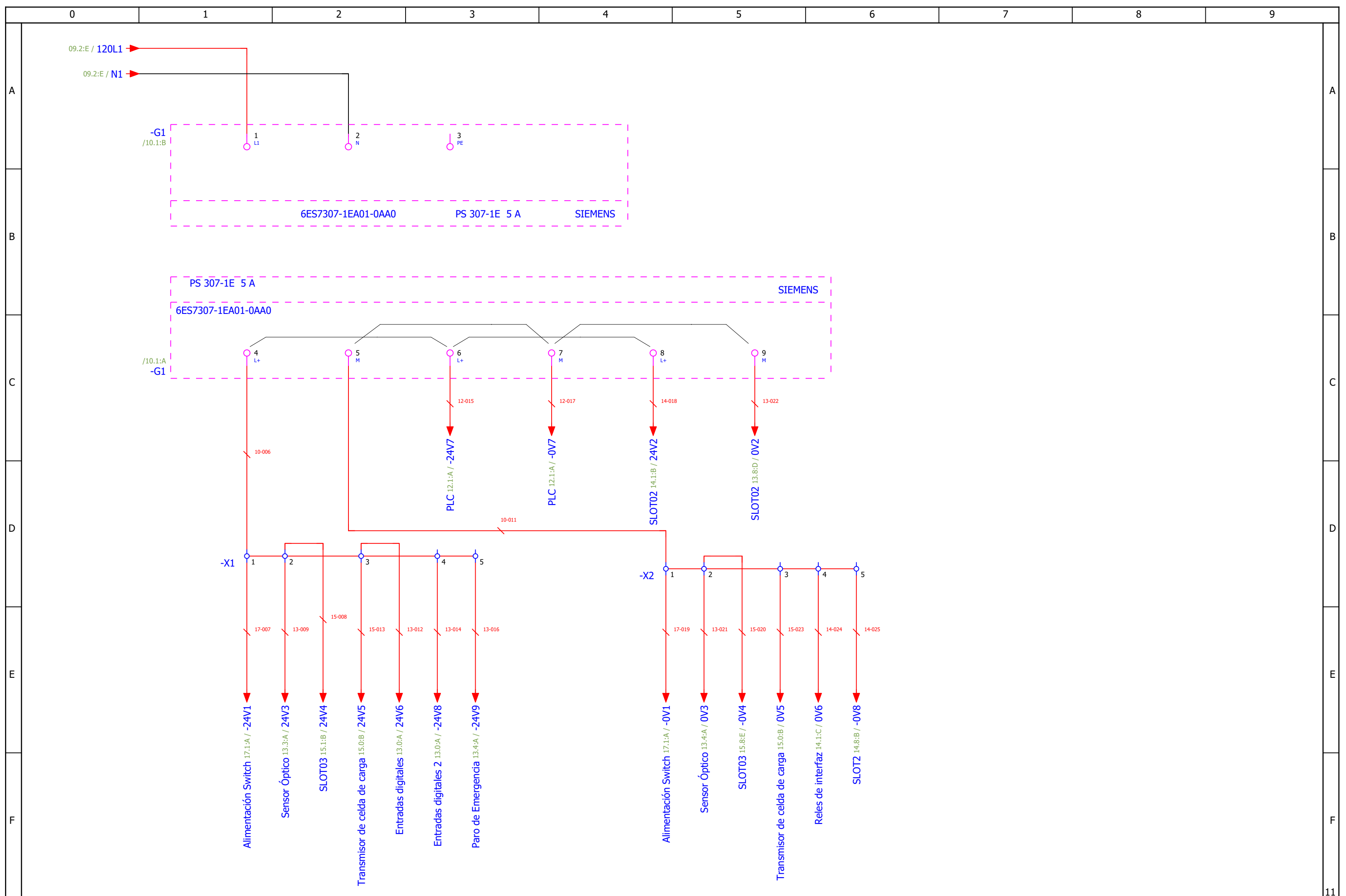
Revisión	Fecha	Nombre	Fecha	26/01/2026
			Resp.	EPLAN
			Probado Original	



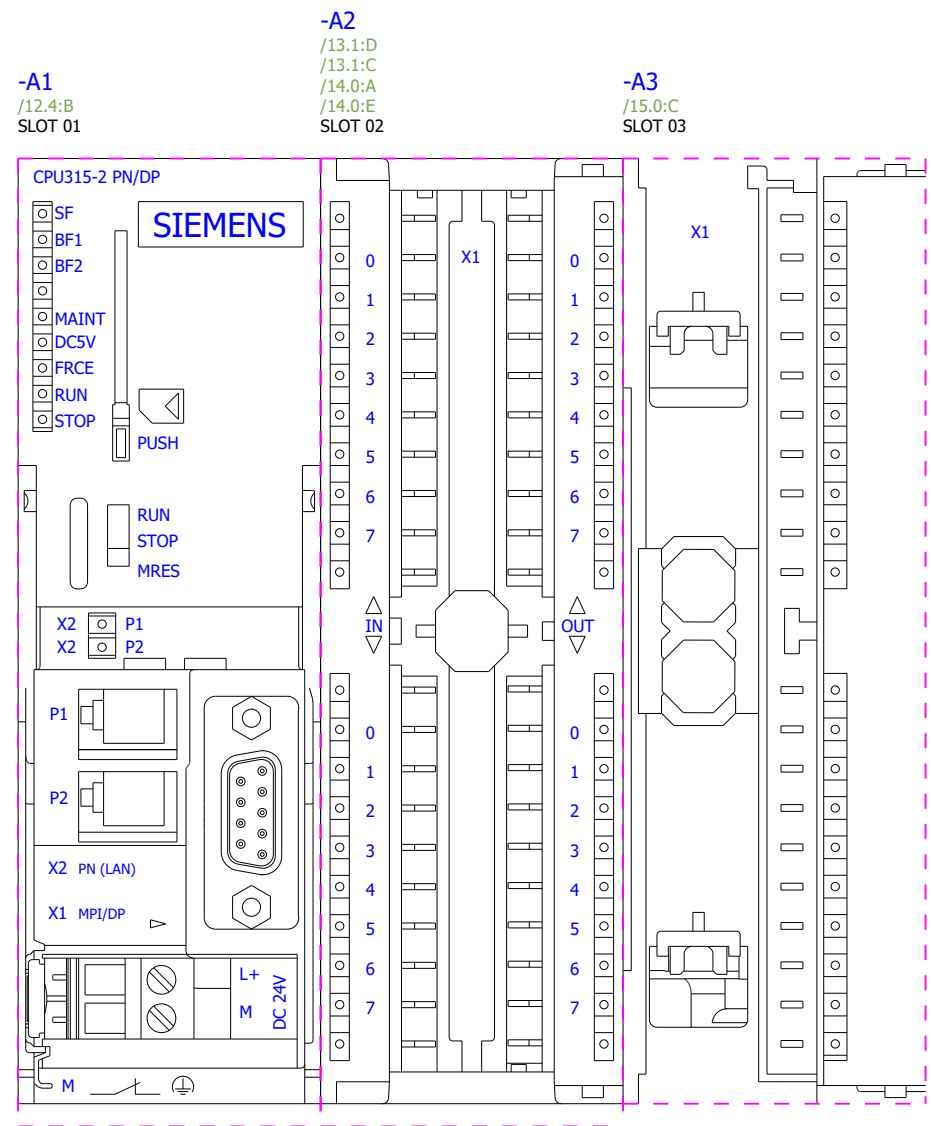
Proyecto
Tablero de Control Banco Dinametrico

Alimentación principal

N# de plano	= DIN	Hoja	09
	+ TC	Página	9 / 18
Cliente	INGE-PR-002		
Escuela Superior Politécnica del Litoral	INGE-PR-002		



			Fecha	26/01/2026		Proyecto	Distribución de 24 VDC	N# de plano		= DIN
			Resp.	EPLAN		Tablero de Control Banco Dinametrico				+ TC
Revisión	Fecha	Nombre	Probado Original					Cliente	INGE-PR-002	Hoja
							Escuela Superior Politécnica del Litoral	INGE-PR-002	Página	10 / 18



Revisión	Fecha	Nombre	Fecha	05/01/2026
			Resp.	EPLAN
			Probado Original	



Proyecto
Tablero de Control Banco Dinanometrico

PLC Layout

N# de plano	= DIN + TC	Hoja	11
Cliente	INGE-PR-002	Página	11 / 18
Escuela Superior Politécnica del Litoral	INGE-PR-002		

