

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



INFORME DE LABORATORIO N° 1

“Identificación de variables y sistemas en procesos”

Docente:

- Ing. Jorge Antonio Nava Amador

Auxiliares de Docencia:

- Aux. Limber Ajnota Cahuaya (ETN 1034)
- Aux. Fabian Plata Vargas (ETN 902)
- Aux. Franz Choque (ETN 1000)

Integrantes del Grupo de Trabajo:

- Univ. López Rodríguez Miguel Ángel — (ETN 1034)
- Univ. Wilson David Huanca Challco — (ETN 1034)
- Univ. Henry Jherson Torrez Patty — (ETN 902)
- Univ. Siñani Canaza Juan Carlos — (ETN 1034)
- Univ. Gandarillas Conde Valeria Erika — (ETN 1000)
- Univ. Quisbert Bautista Paul Fernando — (ETN 1000)
- Univ. Cuevas Perez Mauricio — (ETN 1000)

Fecha de Presentación: 25 de agosto de 2026
La Paz — Bolivia

Índice

1. Introducción General y Objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivo General	1
1.3. Objetivos Específicos por Asignatura	1
1.3.1. Sistemas de Control II (ETN-902)	1
1.3.2. Aplicación de Técnicas de Control (ETN-1034)	1
1.3.3. Bases de Datos (ETN-1000)	1
2. Análisis de Abstracción, Fenomenología y Causalidad de Sistemas	2
2.1. Auditoría Estática y Recorrido de Campo	2
2.2. Mapeo y Clasificación de Variables	6
2.3. Desglose de Hardware por Unidades de la Planta	7
2.3.1. 1. Unidad de Alimentación (Feeding Unit)	7
2.3.2. 2. Unidad de Procesamiento (Processing Unit)	8
2.3.3. 3. Unidad de Ensamblaje (Assembly Unit)	8
2.3.4. 4. Unidad de Transporte (Transmission Unit)	8
2.3.5. 5. Unidad de seleccion (Sorting Unit)	9
2.4. Analisis de causalidad	9
2.5. Mapeo de Direccionamiento de Entradas y Salidas (I/O) de los PLCs	12
2.5.1. Unidad de Alimentación	13
2.5.2. Unidad de Procesamiento	14
2.5.3. Unidad de Ensamblaje	15
2.5.4. Unidad de Transporte (Maestro)	16
2.5.5. Unidad de Selección	17
3. Análisis de Hardware, Redes Industriales y Mantenimiento	18
3.1. Fundamentación Matemática de la Ruptura de Lazo de Control (Pérdida de Causalidad)	18
3.1.1. Definición de Variables del Sistema	18
3.1.2. Modelo en Lazo Cerrado (Condición Normal)	18
3.1.3. Demostración Analítica de la Ruptura de Lazo	19
3.1.4. Consecuencias Operativas en Planta	19
3.2. Arquitectura de Procesamiento y Red de Comunicaciones Industriales	19
3.2.1. Especificaciones Técnicas del Hardware de Procesamiento (Datasheet)	20
3.2.2. Distribución y Asignación de Hardware por Estación	21
3.2.3. Topología y Protocolos de la Red Industrial	22
3.3. Auditoría Física y Diagnóstico de Fallas de Instrumentación	23
3.3.1. Unidad de Alimentación	23
3.3.2. Unidad de Ensamblaje	23
3.3.3. Unidad de Procesamiento	23
3.3.4. Unidad de Transporte	23

3.4. Metodología Kaizen y Plan de Mejora Continua de Activos	23
3.4.1. Matriz Kaizen de Diagnóstico, Causa Raíz e Impacto Dinámico	24
3.4.2. Estandarización y Protocolo de Verificación Operativa	24
4. Diseño conceptual de telemetría y levantamiento de requerimientos de per-	
sistencia	25
4.1. Arquitectura Cliente-Servidor de Telemetría (3 Capas)	25
4.2. Levantamiento de Requerimientos de Persistencia	26
4.3. Modelo Entidad-Relación (E-R) Preliminar	27
4.4. Análisis de Latencia e Infraestructura Local	29
5. Reporte de Discrepancias Kaizen	30
5.1. Reporte de Discrepancias (Auditoría Kaizen)	30
6. Conclusiones y Recomendaciones	31
6.1. Conclusiones	31
6.2. Recomendaciones	32
A. Anexo A: Cuestionario de levantamiento de requerimientos	32

Índice de figuras

1.	Sensores capacitivos y Motor Trifasico.	3
2.	Evidencias del estado de conexión de las unidades de las plantas.	3
3.	Carcasa fracturada en el módulo de entradas/salidas del PLC.	4
4.	Sensores fijados con cinta adhesiva y silicona en la Unidad de procesamiento	4
5.	Desalineación de ejes entre el pistón delgado y la pinza lateral en la Unidad de Procesamiento.	5
6.	Conexión física no documentada entre el PLC y el VFD para el control de sentido de giro de la cinta.	6
7.	Cable de sensor con aislamiento dañado en la Unidad de Ensamblaje.	6
8.	Diagrama de bloques: Unidad de Alimentación (ETN-902).	10
9.	Diagrama de bloques: Unidad de Procesamiento (ETN-902).	10
10.	Diagrama de bloques: Unidad de Ensamblaje (ETN-902).	11
11.	Diagrama de bloques: Unidad de Selección (ETN-902).	11
12.	Diagrama de bloques: Unidad de Transporte (ETN-902).	12
13.	Controlador Siemens S7-200 CN con cable apantallado en los puertos de comunicación RS-485.	20
14.	Topología en cascada del bus serie RS-485 enlazando los puertos Port 0 de las cinco estaciones Siemens S7-200.	22
15.	Arquitectura de 3 capas para la telemetría de la planta (ETN-1000).	25
16.	Modelo entidad-relación en notación Chen.	28

Índice de tablas

1.	Mapeo de sensores de la planta de Manufactura	7
2.	Mapeo de actuadores de la planta de Manufactura (Valores Normalizados) .	7
3.	Inventario de componentes - Unidad de Alimentación.	8
4.	Inventario de componentes - Unidad de Procesamiento.	8
5.	Inventario de componentes - Unidad de Ensamblaje.	8
6.	Inventario de componentes - Unidad de Transporte.	9
7.	Inventario de componentes - Unidad de Clasificación.	9
8.	Mapeo de Entradas y Salidas - Unidad de Alimentación.	13
9.	Mapeo de Entradas y Salidas - Unidad de Procesamiento.	14
10.	Mapeo de Entradas y Salidas - Unidad de Ensamblaje.	15
11.	Mapeo de Entradas y Salidas - Unidad de Transporte.	16
12.	Mapeo de Entradas y Salidas - Unidad de Selección.	17
13.	Especificaciones técnicas comparativas de las CPUs Siemens S7-200 CN.	21
14.	Matriz Kaizen de análisis causa raíz y contramedidas de control.	24
15.	Mapeo de registros del PLC (formato I/Q del S7-200).	26
16.	Clasificación de variables del proceso de la planta de manufactura.	26
17.	Diccionario de datos del modelo entidad-relación (planta de manufactura). .	29
18.	Análisis de latencia e infraestructura local de la planta de manufactura. . . .	30

19. Reporte de discrepancias entre documentación histórica y planta real.	31
---	----

1 Introducción General y Objetivos

1.1 Introducción

El presente laboratorio integrado combina las disciplinas de **Sistemas de Control II (ETN-902)**, **Aplicación de Técnicas de Control (ETN-1034)** y **Bases de Datos (ETN-1000)** para abordar el análisis fenomenológico, instrumental y de arquitectura de información en las plantas físicas del laboratorio. Se aplica un enfoque de ingeniería inversa y auditoría Kaizen sobre el equipamiento disponible.

1.2 Objetivo General

Objetivo del Laboratorio Integrado

Desarrollar la capacidad de identificar, clasificar y analizar las variables fundamentales en sistemas de control y telemetría, reconociendo e interrelacionando los subsistemas físicos y lógicos que los componen.

1.3 Objetivos Específicos por Asignatura

1.3.1 *Sistemas de Control II (ETN-902)*

- Realizar la auditoría estática y el recorrido cable por cable de la planta asignada.
- Mapear y clasificar las variables del sistema en: Variables Manipuladas (MV), Variables Controladas (PV) y Variables de Perturbación (DV).
- Construir los diagramas de bloques fenomenológicos detallando las señales de referencia $r(t)$, error $e(t)$, control $u(t)$ y salida $y(t)$.

1.3.2 *Aplicación de Técnicas de Control (ETN-1034)*

- Inspeccionar el hardware de procesamiento (PLCs Siemens S7-200, módulos de expansión analógica EM231).
- Identificar puntos de ruptura de lazo de control (sensores desconectados o falta de actuadores) que justifican la operación en lazo abierto original.
- Documentar requerimientos de mantenimiento preventivo y fallas de instrumentación en la planta.

1.3.3 *Bases de Datos (ETN-1000)*

- Analizar la arquitectura de comunicación Cliente-Servidor de 3 capas para la telemetría de campo.

- Levantar los requerimientos de persistencia de datos relacionales en el motor PostgreSQL.
- Diseñar el borrador del Modelo Entidad-Relación (E-R) preliminar para el almacenamiento de variables *PV*, *MV*, alarmas y registros temporales.

2 Análisis de Abstracción, Fenomenología y Causalidad de Sistemas

2.1 Auditoría Estática y Recorrido de Campo

El equipo de ETN-902 realizó la inspección estática de la planta de manufactura siguiendo un recorrido físico cable por cable. Durante esta etapa de Ingeniería Inversa y Auditoría Kaizen, se contrastó la instalación real con los diagramas y documentación histórica heredada de semestres anteriores, encontrando múltiples discrepancias y deficiencias de mantenimiento.

A continuación, se detallan los hallazgos más críticos de la auditoría:

- **Aclaración técnica y omisiones en la documentación histórica:** Durante la inspección física se resolvió una ambigüedad respecto al accionamiento de la cinta transportadora en la Unidad de Selección. Se verificó que el actuador es, efectivamente, un **Motor AC Trifásico** asíncrono (comprobado físicamente por sus tres terminales de fase con normativa de color rojo, amarillo y verde). La confusión habitual en torno a este equipo radica en que su Variador de Frecuencia (VFD POWTRAN PT9100A) se alimenta de la red **monofásica (220 VAC)** del laboratorio, rectificando e invirtiendo la señal para entregar la potencia trifásica al motor. Por otro lado, se constató una omisión grave en los informes anteriores: no se documentó la existencia de **sensores capacitivos** en esta misma unidad, los cuales son vitales para la discriminación de la constante dieléctrica de materiales no metálicos.

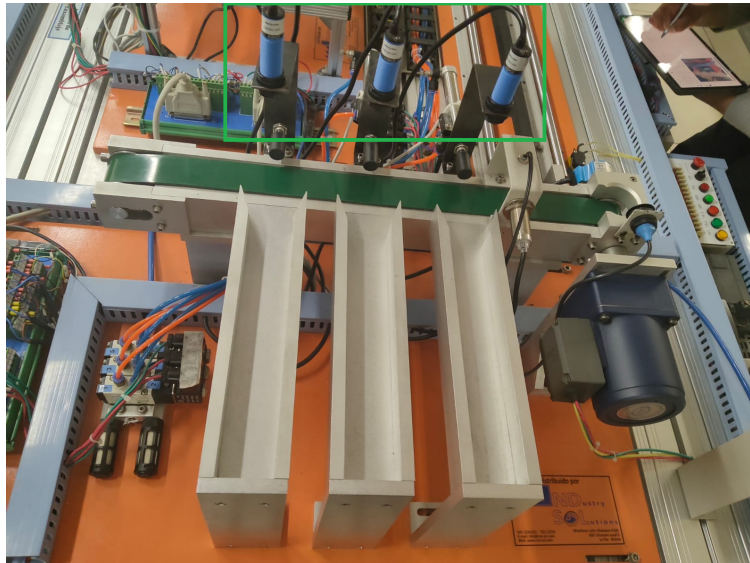


Figura 1: Sensores capacitivos y Motor Trifasico.

- **Estado deficiente de conexiones eléctricas y señalización:** Las conexiones de los sensores presentan un ensamble subóptimo, evidenciando hilos de cobre expuestos en las borneras. Adicionalmente, las etiquetas numeradas para la señalización de cables se encuentran mal adheridas o desprendidas, lo que dificulta el rastreo de señales.

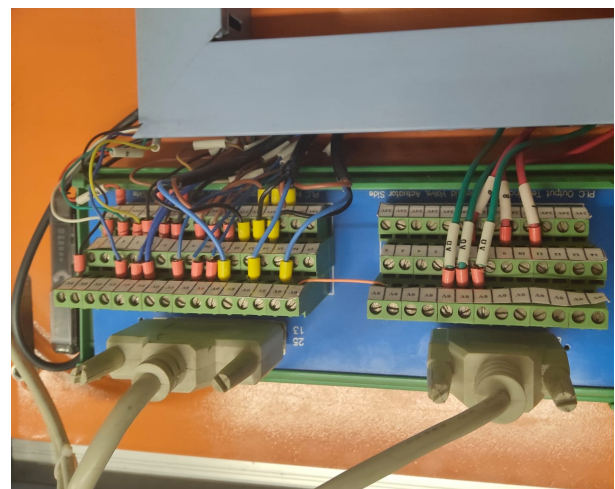
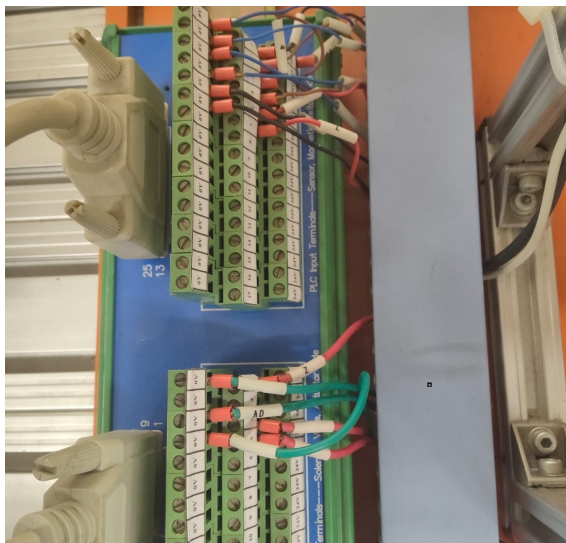


Figura 2: Evidencias del estado de conexion de las unidades de las plantas.

- **Daños estructurales en los Controladores (PLCs):** Se verificó que dos de los módulos PLC que integran la red de la planta tienen las carcasas plásticas rotas, específicamente en la zona de las borneras de entradas y salidas digitales, exponiendo los circuitos a posibles cortocircuitos o acumulación de polvo.

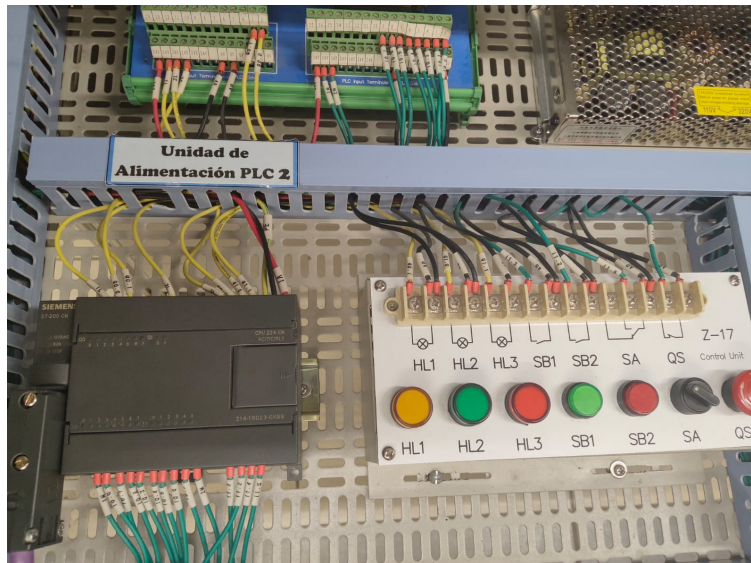


Figura 3: Carcasa fracturada en el módulo de entradas/salidas del PLC.

- **Montaje inadecuado en la Unidad de Procesamiento:** Los sensores de esta unidad carecen de soportes mecánicos adecuados. En lugar de estar fijados con tornillos para garantizar precisión y evitar vibraciones, se encontraron adheridos de forma improvisada utilizando cinta adhesiva (yurex) y silicona caliente, comprometiendo la toma de mediciones.

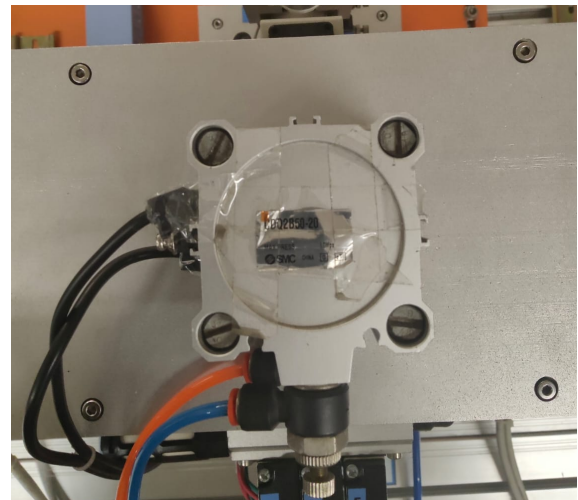
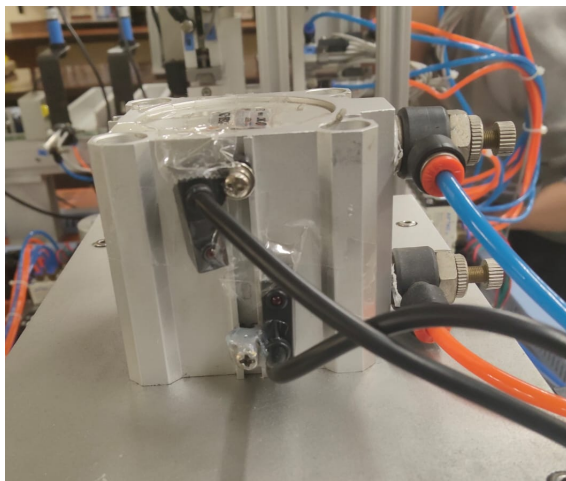


Figura 4: Sensores fijados con cinta adhesiva y silicona en la Unidad de procesamiento

- **Desalineación mecánica en la Unidad de Procesamiento:** Se detectó un defecto de ensamblaje físico crítico entre el pistón delgado y la pinza lateral. Ambos actuadores presentan una desalineación evidente entre sus ejes de trabajo. Esta falta de concentricidad compromete la sujeción correcta de las piezas durante el ciclo de procesamiento y representa un riesgo de desgaste prematuro en los vástagos debido a esfuerzos mecánicos asimétricos.

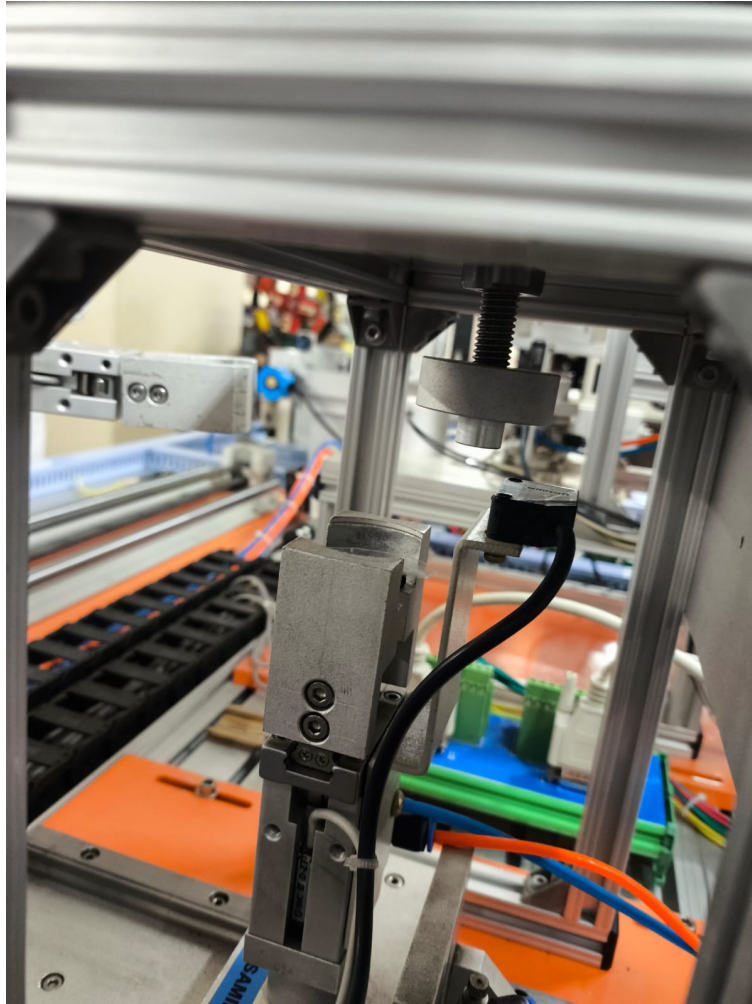


Figura 5: Desalineación de ejes entre el pistón delgado y la pinza lateral en la Unidad de Procesamiento.

- **Omisión de cableado del VFD en la documentación de la Unidad de Selección:** Al auditar los diagramas de la estación de selección frente al cableado real, se descubrió una modificación no registrada en la bibliografía antigua del laboratorio. Se ha añadido una conexión física desde el PLC hacia el Variador de Frecuencia (VFD) destinada específicamente a modificar el sentido de giro de la cinta transportadora, la cual no figuraba en el mapeo de variables heredado.

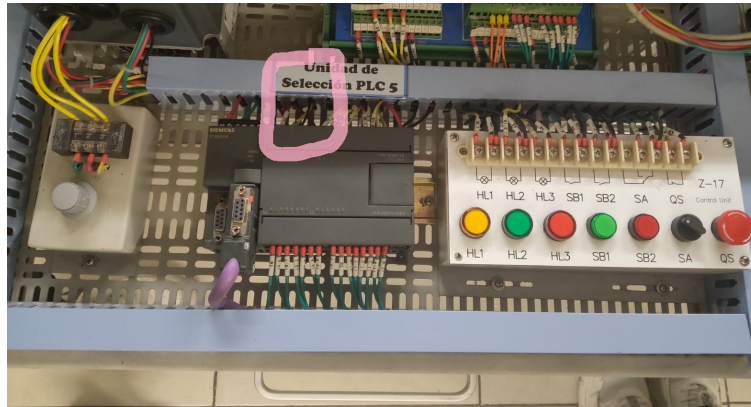


Figura 6: Conexión física no documentada entre el PLC y el VFD para el control de sentido de giro de la cinta.

- **Riesgo eléctrico en la Unidad de Ensamblaje:** Durante el seguimiento de cables en la estación de ensamblaje, se identificó el cable de un sensor con el aislamiento dañado (pelado), lo cual representa un riesgo inminente de cortocircuito o lecturas erróneas por contacto con el chasis de aluminio.

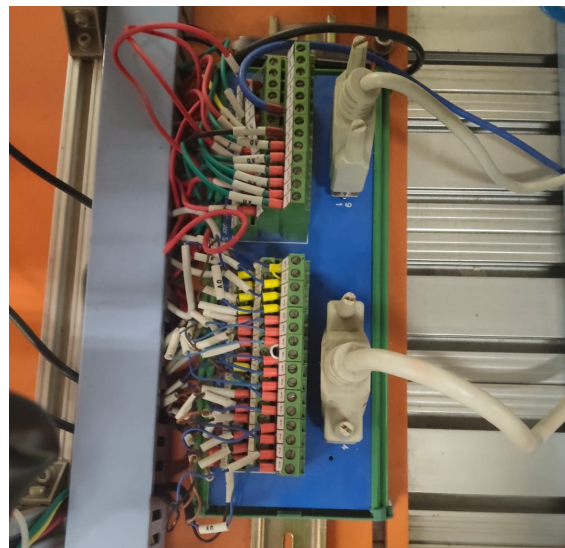


Figura 7: Cable de sensor con aislamiento dañado en la Unidad de Ensamblaje.

Todos estos hallazgos justifican la necesidad de una reestructuración de la bibliografía y verificación de la misma para evitar tener problemas al realizar los siguientes laboratorios.

2.2 Mapeo y Clasificación de Variables

En cumplimiento con los objetivos de la guía, se llevó a cabo la clasificación de las variables del sistema. Sin embargo, debido a restricciones operativas y de seguridad establecidas por los auxiliares de docencia establecidas en sus obligaciones, no fue posible ejecutar las mediciones pasivas con multímetro. Para resolver esta limitante técnica y evitar la activación de

los actuadores de potencia, la determinación de los rangos eléctricos se fundamentó exhaustivamente en la revisión de planos históricos, informes de gestiones anteriores y manuales técnicos de cada componente (Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1: Mapeo de sensores de la planta de Manufactura

Componente / Modelo	Tipo de Señal	Alimentación	Rango/Consumo
Magnético D-C73	Digital (ON/OFF)	24 VDC	5–40 mA
Fotoeléctrico E3Z-LS61	Digital (ON/OFF)	12–24 VDC	30 mA máx.
Inductivo LM18-3008NA	Digital (ON/OFF)	15–30 VDC	Detección: 8 mm
Capacitivo Winston CM18	Digital (ON/OFF)	10–30 VDC	Detección: 8 mm
Fotoeléctrico E3X-NA11	Digital (NPN Abierto)	12–24 VDC	35 mA máx.
Fotoeléctrico MHT-15	Digital	10–30 VDC	30 mA
Magnético AL-36R	Digital	5–240 VDC/VAC	100 mA
Magnético CS-9D	Digital	5–120 VDC/VAC	100 mA
Inductivo TL-08NK	Digital (NPN)	10–30 VDC	200 mA máx.
Encoder Incremental	Tren de pulsos	10–30 VDC	2500 ppr
Final de carrera V156	Digital	250 VDC máx.	0.6 A máx.

Tabla 2: Mapeo de actuadores de la planta de Manufactura (Valores Normalizados)

Componente / Modelo	Acción / Variable	Alimentación	Rango Operativo
Filtro FRL (Generación)	Neumática (Presión Base)	N/A	0.15–0.9 MPa
Cilindro Delgado CDQ2B50	Neumática (Lineal)	N/A	0.06–0.7 MPa
Cilindro Pluma CDJ2KB16	Neumática (Lineal)	N/A	0.1–0.7 MPa
Cilindro Doble Vástago	Neumática (Lineal)	N/A	0.1–1.0 MPa
Pinza Angular/Paralela	Neumática (Radial/Lineal)	N/A	0.1–0.6 MPa
Cilindro Rotatorio	Neumática (Angular)	N/A	0.15–0.7 MPa
Electroválvulas AIRTAC	Eléctrica (Digital)	24 VDC	0–0.8 MPa
Servomotor (Panasonic)	Eléctrica (Analógica/Digital)	220 VAC / 24 VDC	200 W (Potencia)
Motor AC Trifásico	Mecánica (Rotacional)	220 VAC (Trifásica de VFD)	—
Variador VFD (PT9100A)	Eléctrica (PWM)	220 VAC / 0–10 VDC	Frecuencia variable

2.3 Desglose de Hardware por Unidades de la Planta

Para una mejor comprensión de la distribución de los dispositivos, el sistema de manufactura se desglosa en sus cinco estaciones independientes, cuantificando los sensores y actuadores presentes en cada una:

2.3.1 1. Unidad de Alimentación (*Feeding Unit*)

Esta estación almacena y suministra las piezas base mediante control neumático secuencial.

Tabla 3: Inventario de componentes - Unidad de Alimentación.

Componente / Dispositivo	Tipo	Cantidad
Sensor Óptico E3Z-LS61	Sensor (Presencia)	2
Sensor fotoelectrico MHT-15	Sensor (Presencia)	1
Sensor Inductivo LM18-3008NA	Sensor (Material)	1
Sensor Magnético SMC D-C73	Sensor (Posición)	4
Cilindro Doble Efecto (Superior/Inferior)	Actuador (Neumático)	2
Electroválvula AIRTAC 4V120-06	Actuador (Válvula)	2

2.3.2 2. Unidad de Procesamiento (*Processing Unit*)

Simula el maquinado o estampado de la pieza sobre una plataforma deslizante.

Tabla 4: Inventario de componentes - Unidad de Procesamiento.

Componente / Dispositivo	Tipo	Cantidad
Sensor Óptico E3Z-LS61	Sensor (Presencia)	1
Sensor Magnético SMC D-C73 / D-Z73	Sensor (Posición)	5
Cilindro Largo / Corto / Pinza	Actuador (Neumático)	3
Electroválvulas AIRTAC	Actuador (Válvula)	3

2.3.3 3. Unidad de Ensamblaje (*Assembly Unit*)

Realiza el montaje de piezas pequeñas empleando un sistema rotativo y un brazo mecánico.

Tabla 5: Inventario de componentes - Unidad de Ensamblaje.

Componente / Dispositivo	Tipo	Cantidad
Sensor Óptico / Infrarrojo E3Z-LS61	Sensor (Presencia)	4
Sensor de Fibra Óptica E3X-NA11	Sensor (Presencia)	1
Sensor Magnético SMC D-C73/ DZ73	Sensor (Posición)	11
Cilindros Lineales y Rotatorios	Actuador (Neumático)	6
Electroválvulas AIRTAC	Actuador (Válvula)	6

2.3.4 4. Unidad de Transporte (*Transmission Unit*)

Actúa como nexo logístico mediante un brazo robótico de 3 grados de libertad y un eje deslizante.

Tabla 6: Inventario de componentes - Unidad de Transporte.

Componente / Dispositivo	Tipo	Cantidad
Finales de carrera Omron V-156	Sensor (Contacto)	2
Sensor Inductivo TL-08NK	Sensor (Proximidad)	1
Sensor Magnético CS-9D/SMC DZ73	Sensor (Posición)	7
Encoder Incremental (en Servomotor)	Transductor	1
Servomotor Panasonic y Driver	Actuador (Eléctrico)	1
Cilindros y Pinza Neumática	Actuador (Neumático)	4

2.3.5 5. Unidad de seleccion (Sorting Unit)

Fase final que discrimina materiales metálicos y no metálicos a lo largo de una cinta transportadora.

Tabla 7: Inventario de componentes - Unidad de Clasificación.

Componente / Dispositivo	Tipo	Cantidad
Sensor Fotoeléctrico E3Z / MHT	Sensor (Presencia)	2
Sensor Inductivo LM18-3008NA	Sensor (Metal)	1
Sensor Capacitivo Winston CM18	Sensor (No metal)	3
Sensor Magnético SMC D-C73	Sensor (Posición)	3
Encoder Incremental ZSP 3806	Transductor (Velocidad)	1
Motor AC Trifásico con VFD	Actuador (Eléctrico)	1
Cilindros Expulsores y Válvulas	Actuador (Neumático)	3

2.4 Análisis de causalidad

El análisis de causalidad consiste en identificar y ordenar la relación causa-efecto entre las señales de un sistema de control, es decir determinar qué señal provoca qué otra, y en qué orden ocurre esa transformación a través de cada bloque funcional del sistema. En las figuras que veremos a continuación se ven los diagramas de bloques de cada subproceso que compone a la planta de manufactura.

- Unidad de Alimentación:

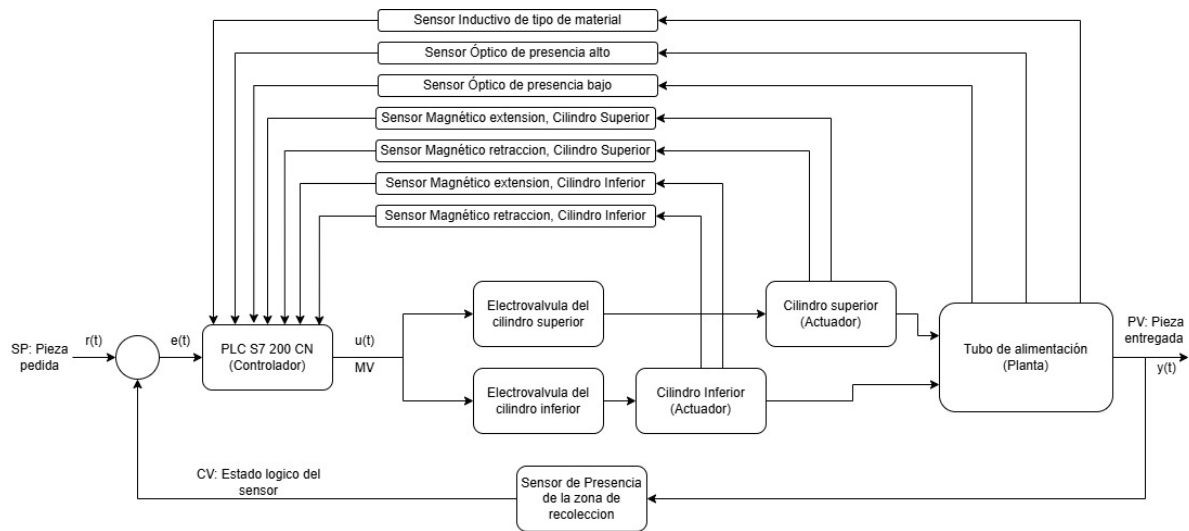


Figura 8: Diagrama de bloques: Unidad de Alimentacion (ETN-902).

■ Unidad de Procesamiento:

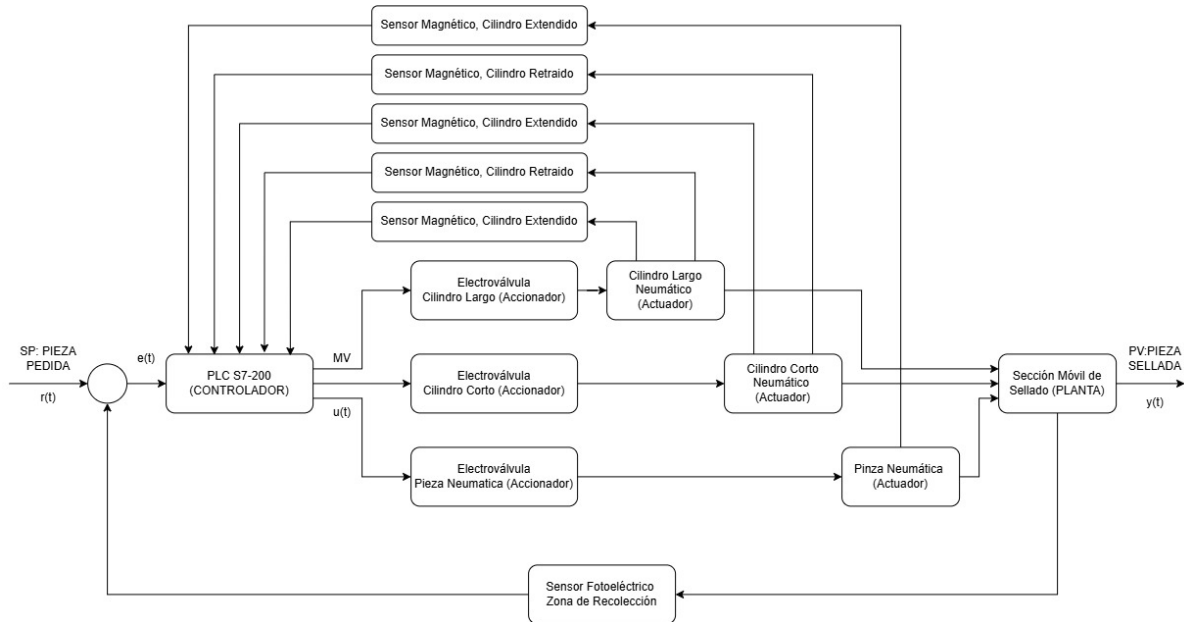


Figura 9: Diagrama de bloques: Unidad de Procesamiento (ETN-902).

■ Unidad de Ensamblaje:

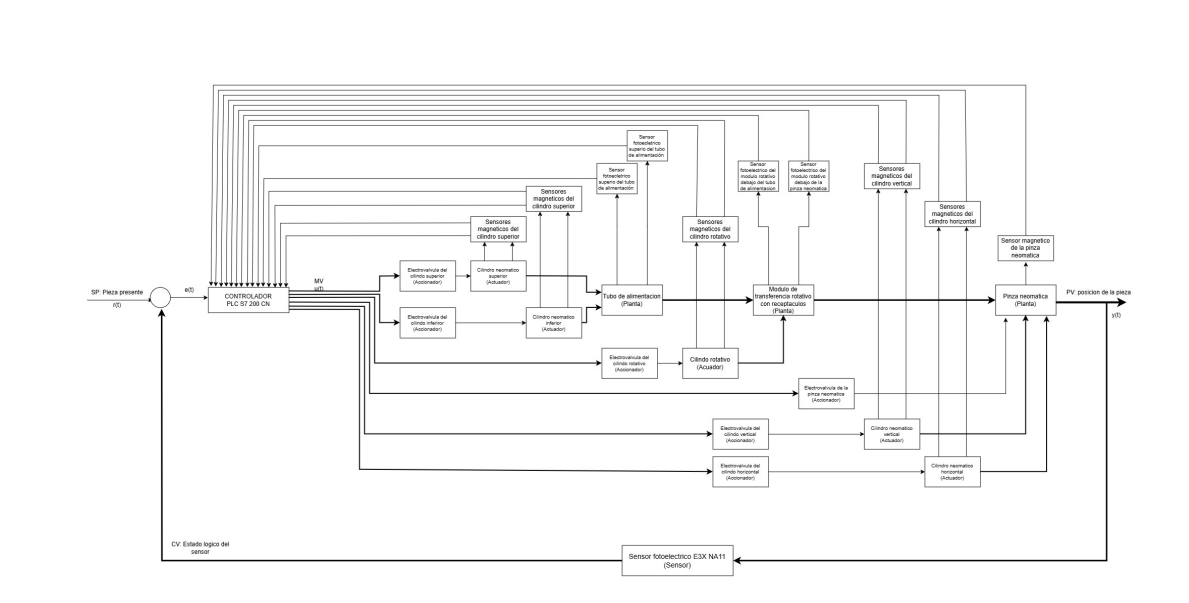
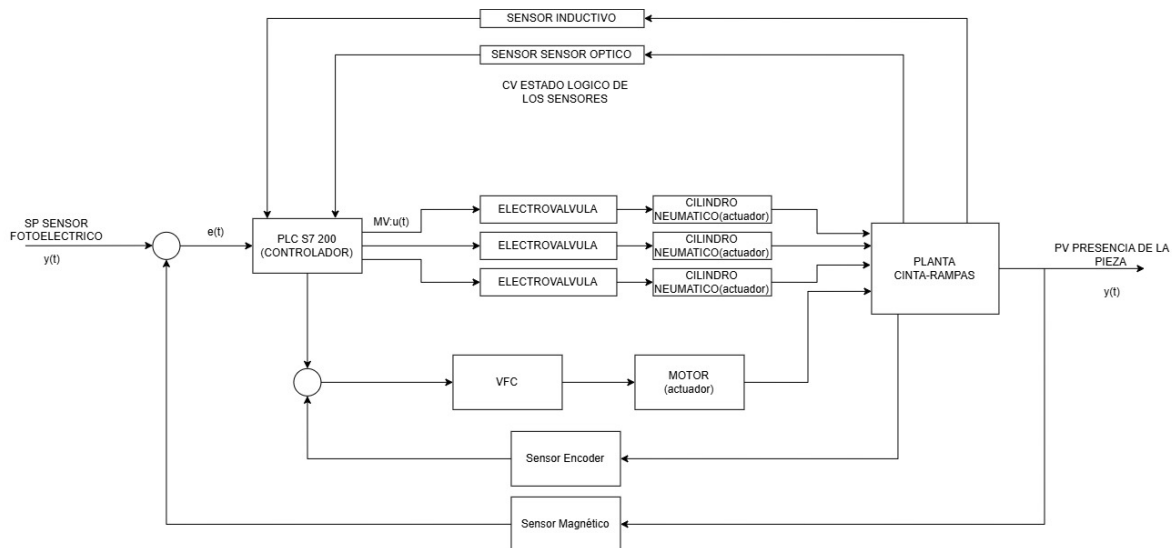


Figura 10: Diagrama de bloques: Unidad de Ensamblaje (ETN-902).

- Unidad de Selección:



- Unidad de Transporte:

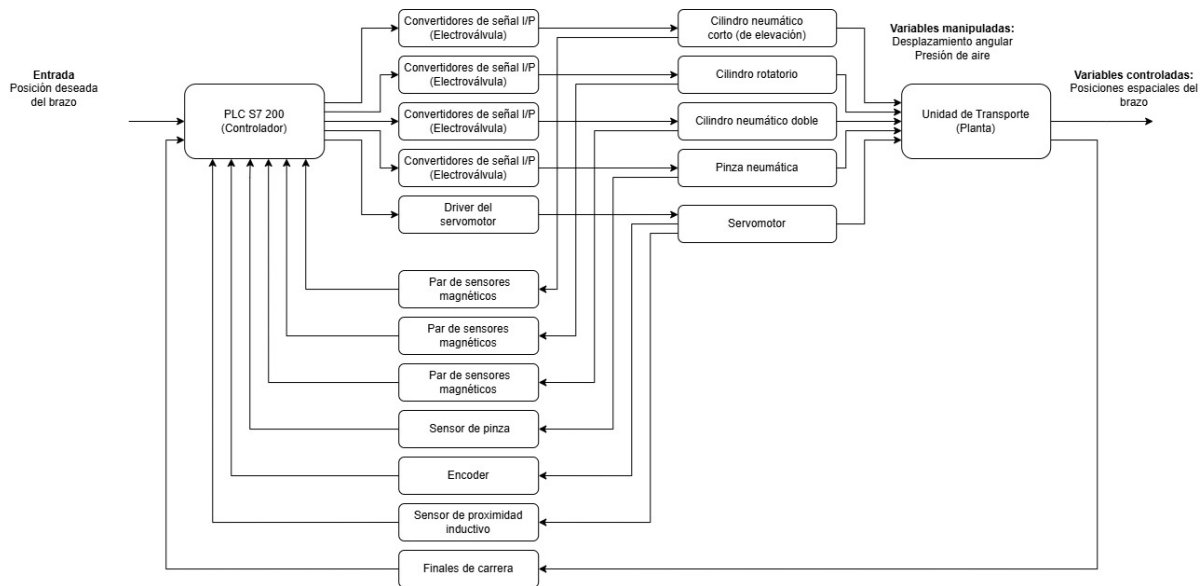


Figura 12: Diagrama de bloques: Unidad de Transporte (ETN-902).

2.5 Mapeo de Direccionamiento de Entradas y Salidas (I/O) de los PLCs

La abstracción del hardware hacia el software requiere un mapeo riguroso de los operandos de memoria en las cinco CPUs Siemens S7-200. A continuación, se detalla la asignación de las direcciones físicas de entradas (I) y salidas (Q) para cada estación de la planta, datos fundamentales para la programación del esquema de control secuencial.

2.5.1 Unidad de Alimentación

Tabla 8: Mapeo de Entradas y Salidas - Unidad de Alimentación.

Dirección	Símbolo	Descripción
Entradas (Inputs)		
I0.0	PISTON_PEQ_ADELANT	Sensor magnético: Cilindro pequeño extendido
I0.1	PISTON_PEQ_ATR	Sensor magnético: Cilindro pequeño retraído
I0.2	GRANDE_ADEL	Sensor magnético: Cilindro largo extendido
I0.3	GRANDE_ATRAS	Sensor magnético: Cilindro largo retraído
I0.4	posicion_pieza_final	Sensor fotoeléctrico: Posición de la pieza
I0.5	presencia_superior	Sensor fotoeléctrico: Presencia superior en tubo
I0.6	presencia_inferior	Sensor fotoeléctrico: Presencia inferior en tubo
I0.7	presencia_metal	Sensor inductivo: Presencia inferior en tubo
I1.2	SB1	Pulsador de marcha (verde)
I1.3	SB2	Pulsador de paro (rojo)
I1.4	QS	Zeta de emergencia (NC)
I1.5	SA	Selector rotatorio
Salidas (Outputs)		
Q0.0	piston_peq	Electroválvula del cilindro pequeño
Q0.1	piston_grande	Electroválvula del cilindro grande
Q0.7	HL1	Lámpara de señalización amarilla
Q1.0	HL2	Lámpara de señalización verde
Q1.1	HL3	Lámpara de señalización roja

2.5.2 Unidad de Procesamiento

Tabla 9: Mapeo de Entradas y Salidas - Unidad de Procesamiento.

Dirección	Símbolo	Descripción
Entradas (Inputs)		
I0.0	SF1	Sensor fotoeléctrico: Presencia de pieza
I0.1	SM3	Sensor magnético: Cilindro de dedo (pinza) cerrado
I0.2	SM2	Sensor magnético: Cilindro largo extendido
I0.3	SM1	Sensor magnético: Cilindro largo retraído
I0.4	SM4	Sensor magnético: Cilindro delgado extendido
I0.5	SM5	Sensor magnético: Cilindro delgado retraído
I1.2	SB1	Pulsador de paro (rojo)
I1.3	SB2	Pulsador de marcha (verde)
I1.4	QS	Zeta de emergencia (NC)
I1.5	SA	Selector rotatorio
Salidas (Outputs)		
Q0.0	KB1	Electroválvula del cilindro de dedo (pinza)
Q0.2	KB2	Electroválvula del cilindro largo
Q0.3	KB3	Electroválvula del cilindro delgado
Q0.7	HL1	Lámpara de señalización amarilla
Q1.0	HL2	Lámpara de señalización verde
Q1.1	HL3	Lámpara de señalización roja

2.5.3 Unidad de Ensamblaje

Tabla 10: Mapeo de Entradas y Salidas - Unidad de Ensamblaje.

Dirección	Símbolo	Descripción
Entradas (Inputs)		
I0.0	ST1	Sensor fotoeléctrico del tubo inferior
I0.1	Sensor Sup.	Sensor fotoeléctrico del tubo superior
I0.2	SST	Sensor fotoeléctrico de salida del tubo
I0.3	SPR	Sensor fotoeléctrico: Presencia para recoger pieza
I0.4	SFO	Sensor de fibra óptica Omron
I0.5	SPLS	Sensor magnético: Cilindro superior extendido
I0.6	SPLE	Sensor magnético: Cilindro superior retraído
I0.7	SPSS	Sensor magnético: Cilindro inferior extendido
I1.0	SPSE	Sensor magnético: Cilindro inferior retraído
I1.1	SGA	Sensor magnético: Giro anti-horario
I1.2	SGH	Sensor magnético: Giro horario
I1.3	SGRA	Sensor magnético: Cierre de la pinza
I1.4	SGRB	Sensor magnético: Cilindro vertical abajo
I1.5	SGRS	Sensor magnético: Cilindro vertical arriba
I1.6	SGRT	Sensor magnético: Cilindro horizontal atrás
I1.7	SGRAD	Sensor magnético: Cilindro horizontal adelante
I2.4	SB2	Pulsador de paro (rojo)
I2.5	SB1	Pulsador de marcha (verde)
I2.6	QS	Zeta de emergencia (NC)
I2.7	SA	Selector rotatorio
Salidas (Outputs)		
Q0.0	PSUJ	Electroválvula del cilindro inferior
Q0.1	PLIB	Electroválvula del cilindro superior
Q0.2	CILROTAH	Electroválvula del cilindro rotatorio (anti-horario)
Q0.3	FINGER	Electroválvula de la garra (pinza)
Q0.4	CILVERTABAJO	Electroválvula del cilindro vertical (abajo)
Q0.5	CILHORADE	Electroválvula del cilindro horizontal (adelante)
Q1.5	HA	Señalización amarilla
Q1.6	HV	Señalización verde
Q1.7	HR	Señalización roja

2.5.4 Unidad de Transporte (Maestro)

Tabla 11: Mapeo de Entradas y Salidas - Unidad de Transporte.

Dirección	Símbolo	Descripción
Entradas (Inputs)		
I0.0	SENSOR_INDUCTIVO	Sensor inductivo: Llegada del brazo neumático
I0.1	FIN_CARR_DER	Final de carrera derecha
I0.2	FIN_CARR_IZQ	Final de carrera izquierda
I0.3	CIL_ABAJO	Sensor magnético: Cilindro delgado (abajo)
I0.4	CIL_ARRIBA	Sensor magnético: Cilindro delgado (arriba)
I0.5	ROT_IZQU	Sensor magnético: Cilindro rotatorio izquierda
I0.6	ROT_DER	Sensor magnético: Cilindro rotatorio derecha
I0.7	CIL_EXT	Sensor magnético: Cilindro doble vástago extendido
I1.0	CIL_RET	Sensor magnético: Cilindro doble vástago retraído
I1.1	PINZA_CERRADA	Sensor magnético: Pinza cerrada
I1.2	DRIVER_STATE	Estado del Servo (Driver)
I2.0	SI1	2 sensor inductivo de la U. selección
I2.1	SI2	1 sensor inductivo de la U. selección
I2.2	SI3	3 sensor inductivo de la U. selección
I2.4	SB2	Pulsador de paro (rojo)
I2.5	SB1	Pulsador de marcha (amarillo)
I2.6	QS	Zeta de emergencia (NC)
I2.7	SA	Selector rotatorio
Salidas (Outputs)		
Q0.0	SERVO_OUT_1	Salida 1 hacia el driver del servomotor (Tren de pulsos)
Q0.1	SERVO_OUT_2	Salida 2 hacia el driver del servomotor
Q0.3	elevacion	Electroválvula del cilindro delgado (eleva brazo)
Q0.4	anti_horario	Electroválvula del cilindro rotatorio (anti-horario)
Q0.5	horario	Electroválvula del cilindro rotatorio (horario)
Q0.6	cil_doble	Electroválvula del cilindro de doble vástago
Q0.7	pinza_abierto	Electroválvula de apertura de pinza
Q1.0	pinza_cerrado	Electroválvula de cierre de pinza
Q1.5	HL1	Lámpara de señalización amarilla
Q1.6	HL2	Lámpara de señalización verde
Q1.7	HL3	Lámpara de señalización roja

2.5.5 Unidad de Selección

Tabla 12: Mapeo de Entradas y Salidas - Unidad de Selección.

Dirección	Símbolo	Descripción
Entradas (Inputs)		
I0.0	Encoder A	Fase A del encoder incremental
I0.1	Encoder B	Fase B del encoder incremental
I0.2	Encoder C	Fase C del encoder incremental
I0.3	SO	Sensor de objetos: Detecta inicio de selección
I0.4	SI	Sensor de fibra óptica Omron
I0.5	SIN	Sensor Inductivo: Clasificación de metales
I0.7	S1	Sensor de cilindro extendido 1
I1.0	S2	Sensor de cilindro extendido 2
I1.1	S3	Sensor de cilindro extendido 3
I1.2	SBB2	Pulsador de paro (rojo)
I1.3	SBB1	Pulsador de marcha (verde)
I1.4	QS	Zeta de emergencia (NC)
I1.5	SA	Selector rotatorio
Salidas (Outputs)		
Q0.0	am	Motor AC Asíncrono (Activación VFD)
Q0.4	C_1	Electroválvula del cilindro expulsor 1
Q0.5	C_2	Electroválvula del cilindro expulsor 2
Q0.6	C_3	Electroválvula del cilindro expulsor 3
Q0.7	HL1	Lámpara de señalización amarilla
Q1.0	HL2	Lámpara de señalización verde
Q1.1	HL3	Lámpara de señalización roja

3 Análisis de Hardware, Redes Industriales y Mantenimiento

3.1 Fundamentación Matemática de la Ruptura de Lazo de Control (Pérdida de Causalidad)

3.1.1 Definición de Variables del Sistema

En el cilindro neumático de la unidad de procesamiento, la dinámica de carrera y realimentación se define mediante las siguientes variables:

- **Señal de Referencia** $r(t) \in \{0, 1\}$: Comando lógico emitido por el autómata programable (PLC) que demanda la extensión completa del actuador ($r(t) = 1$).
- **Acción de Control** $u(t) \in \{0, 1\}$: Salida digital del PLC (ej. borne $Q0.x$) que energiza la solenoide de la electroválvula 5/2.
- **Variable de Estado / Posición** $x(t) \in [0, L]$: Desplazamiento real del vástago neumático, donde L es la carrera máxima.
- **Variable Medida** $y(t) \in \{0, 1\}$: Señal lógica suministrada por el sensor magnético (*reed switch*) de fin de carrera extendido (borne $I0.y$).
- **Perturbación Exógena** $d(t) \in \mathbb{R}$: Fluctuaciones en la presión de aire y fricción mecánica no lineal.

3.1.2 Modelo en Lazo Cerrado (Condición Normal)

La velocidad de desplazamiento del actuador obedece a la función dinámica:

$$\dot{x}(t) = f(u(t), d(t)) \quad (1)$$

El sensor magnético actúa como un cuantizador con histéresis espacial $\epsilon > 0$, modelado mediante la función escalón unitario de Heaviside $H(\cdot)$:

$$y(t) = H(x(t) - (L - \epsilon)) = \begin{cases} 1, & \text{si } x(t) \geq L - \epsilon \\ 0, & \text{si } x(t) < L - \epsilon \end{cases} \quad (2)$$

El error de posición discreta del lazo viene dado por:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3)$$

En operación nominal, la transición de etapa en el autómata (Grafcet/SFC) hacia el maquinado se habilita únicamente cuando el error converge a cero:

$$\lim_{t \rightarrow t_{\text{ext}}} e(t) = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad y(t_{\text{ext}}) = 1 \quad (\text{con } r(t) = 1) \quad (4)$$

3.1.3 Demostración Analítica de la Ruptura de Lazo

Al presentarse un fallo físico en el sensor magnético (circuito abierto permanente), la función de medición colapsa a cero:

$$y(t) \equiv 0, \quad \forall t \geq 0 \quad (5)$$

Sustituyendo en la ecuación de error:

$$e(t) = r(t) - 0 = r(t) \quad (6)$$

Para cualquier instante donde se solicite el avance del cilindro ($r(t) = 1$):

$$e(t) = 1 \neq 0, \quad \forall t \geq 0 \quad (7)$$

Pérdida de Observabilidad del Sistema

Representando el sistema en variables de estado continuas $\mathbf{x} = [x, \dot{x}]^T$ con $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u$ y salida $y = \mathbf{C}\mathbf{x}$, al anularse la realimentación sensorial se tiene $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}$. La matriz de observabilidad $\mathcal{O}$ colapsa de forma irreversible:

$$\text{rango}(\mathcal{O}) = \text{rango} \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A} \end{bmatrix} = 0 < n \quad (n = 2)$$

3.1.4 Consecuencias Operativas en Planta

1. **Bloqueo Lógico (*Deadlock*):** El PLC no recibe la condición de receptividad ($\tau : I0.y = 1$), congelando la secuencia indefinidamente en la etapa de sujeción.
2. **Colisión por Lazo Abierto Ciego:** Si se sustituye la confirmación por un temporizador estimado T_{est} , cualquier perturbación $d(t)$ (baja presión de red) impedirá que el vástago alcance $L - \epsilon$, provocando que el taladro descienda sobre el material desalineado con riesgo de fractura mecánica.

3.2 Arquitectura de Procesamiento y Red de Comunicaciones Industriales

La planta de manufactura flexible opera mediante cinco autómatas programables independientes **Siemens SIMATIC S7-200 CN** distribuidos en cada una de sus estaciones modulares.

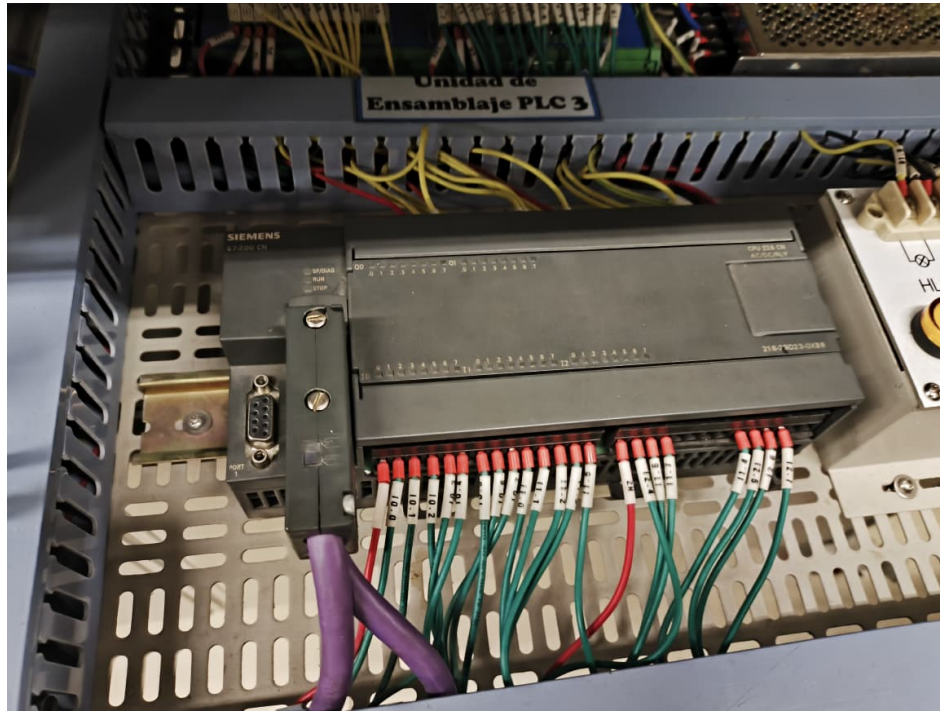


Figura 13: Controlador Siemens S7-200 CN con cable apantallado en los puertos de comunicación RS-485.

3.2.1 Especificaciones Técnicas del Hardware de Procesamiento (Datasheet)

En la Tabla 13 se comparan las especificaciones técnicas de los modelos de CPU Siemens S7-200 presentes en la línea de producción.

Parámetro Técnico	CPU 224 CN	CPU 224XP CN	CPU 226 CN
Alimentación Nominal	24 VDC / 85–264 VAC	24 VDC / 85–264 VAC	24 VDC / 85–264 VAC
Consumo de Corriente	80–450 mA	100–500 mA	85–500 mA
Corriente de Irrupción	10 A máx. (28,8 VDC)	10 A máx. (28,8 VDC)	10 A máx. (28,8 VDC)
Fuente Sensores (Sal.)	280 mA (24 VDC)	280 mA (24 VDC)	400 mA (24 VDC)
E/S Digitales (DI / DO)	14 DI/10 DO	14 DI/10 DO	24 DI/16 DO
E/S Analógicas Integ.	No incluye	2 AI (0–10 V) / 1 AO (0–10 V / 4–20 mA)	No incluye
Contadores Rápidos	6 HSC (30 kHz)	6 HSC (2 a 100 kHz, 4 a 30 kHz)	6 HSC (30 kHz)
Salidas de Pulso (PTO)	2 canales (20 kHz)	2 canales alta veloc. (100 kHz)	2 canales (20 kHz)
Puertos Serie RS-485	1 puerto (<i>Port 0</i>)	2 puertos (<i>Port 0</i> y <i>Port 1</i>)	2 puertos (<i>Port 0</i> y <i>Port 1</i>)
Protocolos Soportados	PPI, Modbus, Freeport	PPI, Modbus, Freeport	PPI, Modbus, Freeport
Velocidades de Bus	9,6, 19,2, 187,5 kbps	9,6, 19,2, 187,5 kbps	9,6, 19,2, 187,5 kbps

Tabla 13: Especificaciones técnicas comparativas de las CPUs Siemens S7-200 CN.

3.2.2 Distribución y Asignación de Hardware por Estación

- **1. Unidad de Selección — CPU 224XP CN (AC/DC/RLY):** Alimentada a 220 VAC con salidas a relé. Es la única unidad que aprovecha el convertor analógico integrado: su salida analógica (**AO**, borne M/V_0) genera la consigna de tensión 0–10 V conectada directamente a la entrada analógica del Variador de Frecuencia (**VFD**) para controlar la velocidad continua de la cinta de clasificación.
- **2. Unidad de Transporte — CPU 226 CN (DC/DC/DC):** Alimentada a 24 VDC con salidas a transistor de estado sólido. Actúa como el **Nodo Maestro** de la red industrial concentrando la mayor densidad de entradas y salidas de la línea para el control secuencial del brazo manipulador y transferencias.
- **3. Unidad de Ensamblaje — CPU 226 CN (AC/DC/RLY):** Alimentada a 220 VAC con salidas a relé. Gestiona la lógica de dispensación de piezas y tapas, incorporando una amplia matriz de entradas digitales para sensores inductivos y ópticos de presencia.
- **4. Unidad de Procesamiento — CPU 224 CN (AC/DC/RLY):** Alimentada a 220 VAC con salidas a relé. Controla la pinza neumática de fijación, el avance vertical

del cilindro de estampado y la habilitación del motor de taladrado.

- **5. Unidad de Alimentación — CPU 224 CN (AC/DC/RLY):** Alimentada a 220 VAC con salidas a relé. Administra la torre de almacenamiento gravitacional y la expulsión inicial de piezas mediante cilindros de retención neumática.

3.2.3 Topología y Protocolos de la Red Industrial

La interconexión de red se realiza mediante cable bifilar apantallado de par trenzado en una topología en cascada (*Daisy-Chain*). Todas las estaciones se encuentran comunicadas a través de su **Puerto 0 (DB9)** nativo, iniciando en la estación de Selección y terminando en la de Alimentación, tal como se ilustra en la Figura 14.

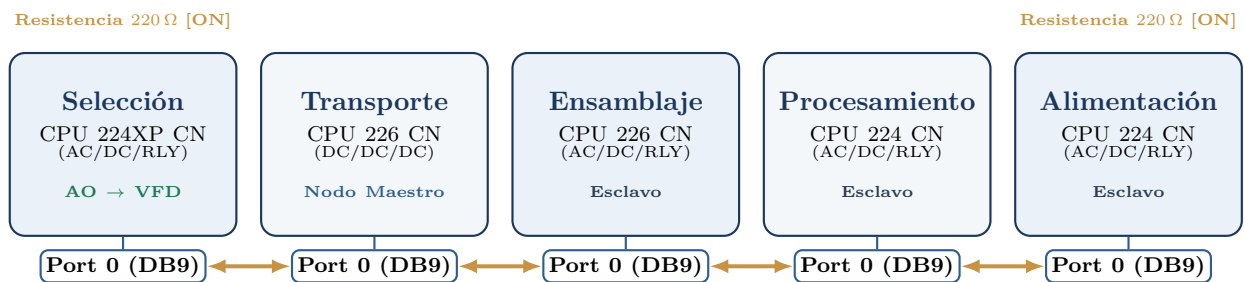


Figura 14: Topología en cascada del bus serie RS-485 enlazando los puertos Port 0 de las cinco estaciones Siemens S7-200.

- **Medio Físico y Cableado:** Se emplea cable bifilar apantallado de par trenzado (color violeta característico) acoplado a conectores sub-D de 9 pines (DB9) con resistencias de terminación de bus activadas (220 Ω) en los dos extremos de la línea física (Unidades de Selección y Alimentación).
- **Protocolo:** Dado que la planta no posee módulos acopladores dedicados EM277, la red no opera bajo el protocolo determinístico Profibus-DP, sino bajo el estándar físico **RS-485** en modo multipunto. Las CPUs ejecutan los protocolos nativos **PPI** (*Point-to-Point Interface*) o **Modbus RTU** en modo maestro-esclavo a velocidades configuradas de 9.6 kbps, 19.2 kbps o 187.5 kbps.
- **Jerarquía del Bus:** La **Unidad de Transporte** (gobernada por la CPU 226 CN) aprovecha su arquitectura para actuar como **Nodo Maestro** del bus RS-485 concentrando el estado de las cuatro estaciones Esclavas (Alimentación, Procesamiento, Ensamblaje y Selección), al tiempo que ofrece su puerto libre (*Port 1*) para la telemetría concurrente hacia el middleware supervisor/SCADA.
- **Interfaz de Programación:** La carga, diagnóstico y monitoreo en línea del código lógico se efectúa mediante adaptador convertidor **USB-PPI / PC Adapter USB** conectado directamente al entorno de ingeniería STEP 7-Micro/WIN.

■ 3.3 Auditoría Física y Diagnóstico de Fallas de Instrumentación

A partir de la inspección estática y dinámica en el panel de control y actuadores, se relevaron los siguientes aspectos técnicos:

3.3.1 Unidad de Alimentación

Descalibración severa en las válvulas estranguladoras de caudal de escape (reguladores de flujo micrométricos), ocasionando lentitud en los cilindros de retención superior e inferior.

3.3.2 Unidad de Ensamblaje

Se identificaron un problemas críticos:

1. **Desajuste de Caudal:** Falta de calibración en los tornillos de estrangulamiento de los reguladores de flujo en los cilindros de dosificación, dilatando el tiempo de ciclo.

3.3.3 Unidad de Procesamiento

Presenta las siguientes discrepancias:

1. **Desalineación Mecánica en Prensa:** Desalineación axial y falta de concentricidad entre el plato de la pinza neumática y el vástago del cilindro vertical de estampado.
2. **Sujeción Precaria en Sensores Magnéticos:** Los sensores *Reed Switch* (SMC D-C73) del cilindro de estampado presentan fijaciones improvisadas no normadas con cinta/silicona ante la rotura de sus guías originales.

3.3.4 Unidad de Transporte

1. **Desajuste en el cilindro rotativo neumático del brazo transportador con desaceleraciones bruscas en los topes (90° y 180°).**
2. **Falla Crítica en Parada de Emergencia (Tag QS):** El pulsador de seguridad con enclavamiento tipo hongo (contacto de seguridad *QS*) presenta una avería mecánica interna: se encuentra bloqueado permanentemente en estado lógico 1 y no desenclava, impidiendo la apertura física del circuito y anulando el sistema de paro de emergencia de la estación.

■ 3.4 Metodología Kaizen y Plan de Mejora Continua de Activos

En concordancia con el marco de auditoría de planta, se implementó el ciclo Kaizen enfocado en la eliminación de fallas mecánicas y eléctricas que comprometen la seguridad y la causalidad del sistema de control.

3.4.1 Matriz Kaizen de Diagnóstico, Causa Raíz e Impacto Dinámico

En la Tabla 14 se estructura la trazabilidad entre las discrepancias encontradas en campo, su causa raíz y la contramedida técnica estandarizada.

Elemento Crítico	Causa Raíz (5 Porqués)	Contramedida Técnica (Kaizen)	Impacto en Control / KPI
Pulsador Paro de Emergencia (Tag QS)	Traba y rotura del mecanismo de retención interno por fatiga mecánica / accionamiento brusco.	Reemplazo inmediato del pulsador tipo hongo con contacto NC de apertura positiva forzada (norma IEC/EN 60947-5-5).	Seguridad crítica. Restablece la función de parada de emergencia inmediata en la Unidad de Transporte.
Sensores Reed Switch (SMC D-C73)	Fijación improvisada con cinta/silicona por fractura de guías plásticas originales.	Mecanizado e instalación de abrazaderas de aluminio anodizado bajo norma DIN/ISO en ranura del actuador.	Elimina falsos disparos por vibración; asegura $\lim e(t) = 0$ sin fluctuaciones.
Cilindro Vertical de Estampado	Desalineación axial acumulada por aflojamiento de pernos en la platina de acople.	Rectificación y centrado micrométrico del eje respecto al plano de sujeción de la pinza neumática.	Suprime esfuerzos cortantes mecánicos; uniformiza la fuerza de prensado (F_{net}).
Reguladores de Flujo Micrométricos	Descalibración de tornillos de estrangulamiento de escape por manipulación sin bloqueo.	Calibración de caudal con manómetro patrón y fijación con contratuerca de seguridad.	Reduce la dispersión del tiempo de ciclo (T_{ciclo}) en un 25 %.

Tabla 14: Matriz Kaizen de análisis causa raíz y contramedidas de control.

3.4.2 Estandarización y Protocolo de Verificación Operativa

Para consolidar la fase de verificación del ciclo Kaizen, se definen los siguientes criterios de inspección obligatorios:

- **Prueba de Seguridad de Paro de Emergencia:** Comprobación funcional del corte de señal en el borne *QS* verificando la transición forzada a 0 lógico antes de autorizar la alimentación neumática.
- **Integridad de Señal de Retorno ($y(t)$):** Comprobación del estado de conmutación en los sensores magnéticos en sus cotas extremas (0 y L).
- **Aislamiento y Blindaje RS-485:** Verificación de apantallamiento continuo del bus y resistencia terminal para asegurar tramas libres de ruido.

4 Diseño conceptual de telemetría y levantamiento de requerimientos de persistencia

4.1 Arquitectura Cliente-Servidor de Telemetría (3 Capas)

En la Figura 15 se ilustra el esquema de tres capas propuesto para la planta. El dato viaja desde el campo hasta la persistencia y de vuelta al cliente:

- **Capa 1 — Captura de campo (Sensores / PLC).** Los sensores de las cinco estaciones (ópticos, magnéticos, inductivos y el encoder de la cinta) entran a su PLC Siemens S7-200 local. Los cinco PLCs se comunican por la red **RS485**, y el PLC de la estación de **Transporte** actúa como **maestro**, concentrando el estado de la línea en sus registros.
- **Capa 2 — Middleware de comunicación (Node-RED / Python Modbus).** Un middleware realiza *polling* al PLC maestro mediante **Modbus RTU sobre RS485**, interpreta los registros y los inserta en el motor relacional. Esta capa desacopla el campo de la base de datos.
- **Capa 3 — Persistencia de datos (Motor PostgreSQL).** PostgreSQL almacena las variables de proceso, las acciones de control, las alarmas, los ciclos de producción y los registros de usuario.

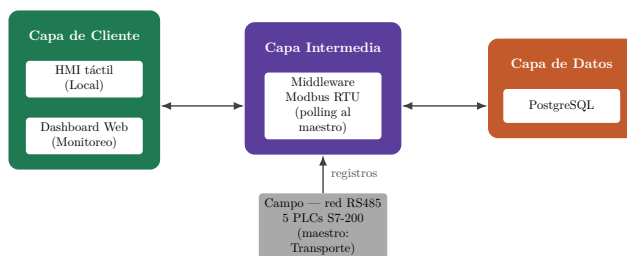


Figura 15: Arquitectura de 3 capas para la telemetría de la planta (ETN-1000).

Tabla 15: Mapeo de registros del PLC (formato I/Q del S7-200).

Variable	Instrumento	Dirección PLC	Descripción
Presencia de pieza	Óptico E3Z-LS61	I0.0	Bit — detección de pieza
Material metálico	Inductivo LM18-3008NA	I0.1	Bit — clasificación de material
Posición de vástago	Magnético SMC D-C73	I0.2	Bit — extensión/retracción
Posición en cinta	Encoder ZSP 3806	HSC0 (contador rápido)	Entero — posición en la cinta
Electroválvula	AIRTAC 4V120-06	Q0.0	Bit — accionamiento neumático
Señal al variador	VFD POWTRAN	AQW0 (salida analógica)	Entero (0–10 V) — velocidad

Las direcciones exactas se verifican en el proyecto STEP 7-Micro/WIN de cada estación.

4.2 Levantamiento de Requerimientos de Persistencia

Se determinó la necesidad de almacenar cuatro grupos de datos fundamentales:

1. Variables de Proceso (*PV*) y Acciones de Control (*MV*).
2. Registro de Alarmas y Excursiones fuera de límites.
3. Tiempos de ciclo y estado operativo de los equipos.
4. Logs de autenticación y roles de usuario.

Tabla 16: Clasificación de variables del proceso de la planta de manufactura.

Variable física	Instrumento	Clase
Presencia de pieza	Fotoeléctrico E3Z-LS61	PV
Estado lógico del sensor	Fotoeléctrico E3Z-LS61	CV
Posición de vástago	Magnético SMC D-C73	PV
Posición/velocidad en cinta	Encoder ZSP 3806	PV
Señal a electroválvula	AIRTAC 4V120-06	MV
Señal DC 0–10 V al VFD	POWTRAN PT9100A	MV
Solicitud de pieza	HMI (operador)	SP
Presión de aire baja	Unidad de mantenimiento	DV

Como requerimientos no funcionales se identificaron: consulta al PLC maestro (evita leer los cinco por separado), muestreo por evento en señales digitales para respetar el ancho de banda del bus RS485 (9600–187500 bps), integridad referencial mediante llaves foráneas, marca de tiempo con resolución de milisegundos y escalabilidad para incorporar nuevas estaciones.

■ 4.3 Modelo Entidad-Relación (E-R) Preliminar

El modelo de la Figura 16 organiza la telemetría en torno a la jerarquía **PLANTA** → **ESTACION** → **INSTRUMENTO** → **VARIABLE**, y desacopla el catálogo de variables de sus lecturas históricas. Las entidades diseñadas son:

- **PLANTA**: la línea de manufactura completa.
- **ESTACION**: las cinco unidades de la línea; el atributo **rol** marca cuál es la maestra.
- **PLC**: el controlador S7-200 de cada estación, con su dirección en el bus RS485.
- **INSTRUMENTO**: sensores y actuadores, con su *tag* ISA 5.1, tipo de señal y modelo.
- **VARIABLE**: catálogo semántico; el atributo **clase** distingue *PV*, *MV*, *DV* y *CV*.
- **MEDICION** (telemetría): un valor por instante, separada del catálogo por ser una tabla de alto volumen.
- **ALARMA**: eventos de excursión fuera de límites.
- **CICLO_PRODUCCION**: los tiempos de operación por estación.
- **USUARIO** y **LOG_ACCESO**: cubren el cuarto grupo de requerimientos (autenticación y roles).

Las relaciones son de tipo 1:N (un registro del lado “uno” se asocia con cero o muchos del lado “muchos”), por ejemplo **VARIABLE** 1:N **MEDICION**.

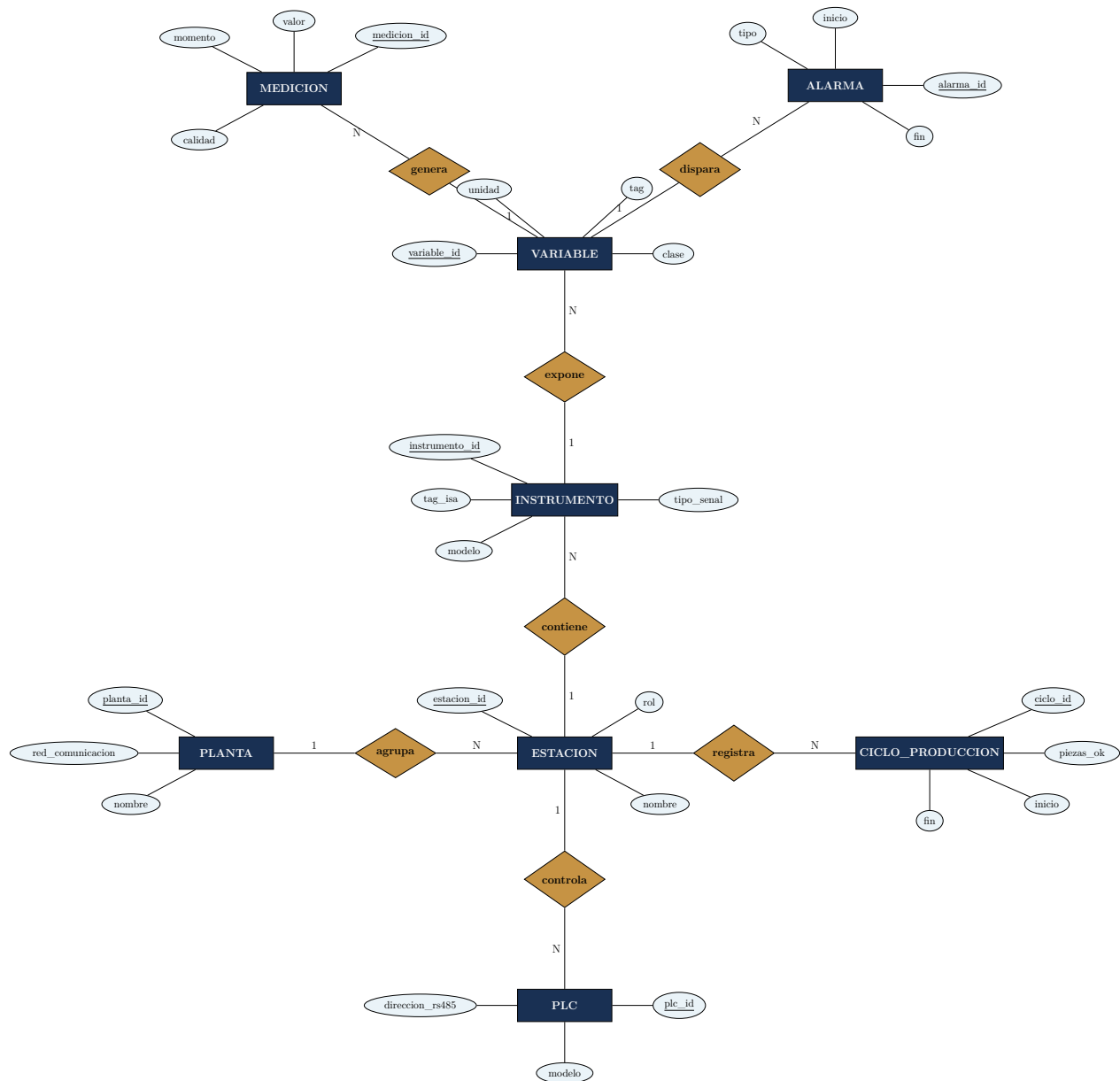


Figura 16: Modelo entidad-relación en notación Chen.

Tabla 17: Diccionario de datos del modelo entidad-relación (planta de manufactura).

Atributo	Tipo (MySQL)	Llave	Descripción
Entidad PLANTA			
planta_id	INT	PK	Identificador de la planta
nombre	VARCHAR(80)	—	Nombre de la planta
red_comunicacion	VARCHAR(40)	—	Red de comunicación (RS485)
Entidad ESTACION			
estacion_id	INT	PK	Identificador de la unidad
planta_id	INT	FK	Planta a la que pertenece
nombre	VARCHAR(60)	—	Alimentación, Transporte, etc.
orden_secuencia	INT	—	Orden en la línea
rol	VARCHAR(20)	—	maestra / esclava
Entidad PLC			
plc_id	INT	PK	Identificador del PLC
estacion_id	INT	FK	Estación a la que pertenece
modelo	VARCHAR(60)	—	S7-200
direccion_rs485	VARCHAR(40)	—	Dirección en el bus RS485
rol	VARCHAR(20)	—	maestro / esclavo
Entidad INSTRUMENTO			
instrumento_id	INT	PK	Identificador del instrumento
estacion_id	INT	FK	Estación a la que pertenece
tag_isa	VARCHAR(30)	—	Tag según ISA 5.1
funcion	VARCHAR(30)	—	SENSOR / ACTUADOR
tipo_senal	VARCHAR(20)	—	AI / DI / AO / DO
modelo	VARCHAR(60)	—	E3Z-LS61, SMC D-C73, etc.
estado	VARCHAR(20)	—	bueno / reparado / falla
Entidad VARIABLE			
variable_id	INT	PK	Identificador de la variable
instrumento_id	INT	FK	Instrumento que la expone
tag	VARCHAR(40)	—	Nombre de la variable
clase	VARCHAR(10)	—	PV / MV / DV / SP / CV
unidad	VARCHAR(20)	—	Unidad de la variable
Entidad MEDICION			
medicion_id	BIGINT	PK	Identificador de la lectura
variable_id	INT	FK	Variable medida
valor	DECIMAL(12,4)	—	Valor de la lectura
momento	DATETIME(3)	—	Marca de tiempo
calidad	VARCHAR(10)	—	GOOD / BAD
Entidad ALARMA			
alarma_id	INT	PK	Identificador de la alarma
variable_id	INT	FK	Variable que la disparó
tipo	VARCHAR(30)	—	DESBORDE / ATASCO
severidad	VARCHAR(20)	—	crítica / advertencia
inicio	DATETIME(3)	—	Momento de inicio
fin	DATETIME(3)	—	Momento de fin
Entidad CICLO_PRODUCCION			
ciclo_id	INT	PK	Identificador del ciclo
estacion_id	INT	FK	Estación que lo ejecutó
inicio	DATETIME(3)	—	Inicio del ciclo
fin	DATETIME(3)	—	Fin del ciclo
piezas_ok	INT	—	Piezas procesadas correctamente
estado	VARCHAR(30)	—	completado / abortado

4.4 Análisis de Latencia e Infraestructura Local

La planta se comunica por **RS485** (bus serie), a diferencia de otras plantas del laboratorio que usan Ethernet. El middleware no consulta los cinco PLCs por separado, sino al maestro de Transporte, que ya agrega el estado de la línea. La tasa del bus (9600–187500 bps) impone un techo al muestreo agregado de las cinco estaciones, por lo que las señales digitales se registran por evento y no en flujo continuo. La Tabla 18 resume la comparación de infraestructura.

Tabla 18: Análisis de latencia e infraestructura local de la planta de manufactura.

Aspecto	Valor / efecto
Enlace de campo	RS485 (Modbus RTU) — bus serie compartido
Velocidad del bus	9600–187500 bps — impone el techo de muestreo agregado
Punto de lectura	PLC maestro (Transporte) — una sola lectura de la línea
Estrategia de muestreo	Por evento en señales digitales — reduce carga en bus y BD
Servidor	PostgreSQL en PC industrial local — latencia de red despreciable

El cuello de botella del sistema es el bus RS485, no el motor de base de datos.

Se concluye que una PC industrial local es viable como servidor de persistencia: la dinámica del proceso es más lenta que la latencia de escritura en PostgreSQL, y el cuello de botella real es el bus RS485, no el motor de base de datos. Las direcciones exactas de los registros del PLC y la velocidad configurada del bus se confirman en la sesión de campo.

5 Reporte de Discrepancias Kaizen

5.1 Reporte de Discrepancias (Auditoría Kaizen)

La Tabla 19 contrasta la documentación histórica heredada del semestre anterior (Informe de Etapa 1: *Instrumentación, Planos P&ID y Comunicaciones Industriales*, gestión previa, Grupo Planta de Manufactura) contra el estado físico real relevado durante la auditoría de campo (Sección 3.3). Las acciones correctivas se consolidan en la matriz operativa Kaizen.

N°	Elemento / Tag	Documentación previa	Hallazgo en campo	Discrepancia e impacto
D-01	Sensor fotoeléctrico (Reed / óptico según estación), montaje sobre riel estructural.	Manual técnico especifica cuerpo plástico íntegro con anclaje roscado para tornillo de sujeción sobre riel.	Sensor atornillado al riel, pero la carcasa plástica en el punto de anclaje está fracturada, comprometiendo la sujeción mecánica.	Falla estructural. Pérdida de firmeza, permitiendo microdesplazamiento angular por vibración y riesgo de caída fuera del rango de detección.
D-02	Cilindro vertical de estampado, Unidad de Procesamiento.	P&ID de Etapa 1 (Lab. 2) especifica alineación axial y concentricidad con la pinza neumática.	Desalineación axial y falta de concentricidad evidente entre plato de pinza y vástago.	Discrepancia mecánica. Esfuerzo cortante anormal sobre guías que impide el prensado uniforme.
D-03	Reguladores de caudal de escape, Unidades de Alimentación y Ensamblaje.	Calibración estándar de fábrica según manual técnico del fabricante.	Válvulas estranguladoras descalibradas; tornillos de estrangulamiento sueltos sin ajuste.	Desviación operativa. Retardo variable entre la acción de control $u(t)$ y la respuesta dinámica de los cilindros.

Tabla 19: Reporte de discrepancias entre documentación histórica y planta real.

Nota de Trazabilidad Histórica

A diferencia de gestiones anteriores donde no se contaba con un plano histórico formal, para la presente auditoría se dispuso del *Informe de Etapa 1* del semestre previo sobre la misma planta de manufactura, empleado como línea base documental estandarizada.

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Se logró la abstracción fenomenológica rigurosa de la planta asignada, estableciendo con precisión la relación causal e interdependencia entre las variables manipuladas (MV), controladas (PV) y de perturbación (DV).
- Se determinó la infraestructura de procesamiento del PLC y se identificaron formalmente los factores de ruptura de lazo de control que justifican el comportamiento original a lazo abierto.

- Se estructuró la arquitectura de 3 capas para la telemetría de instrumentación y se consolidó el esquema preliminar relacional de base de datos para la adquisición en tiempo real.

6.2 Recomendaciones

- Verificar el suministro de presión constante e inspeccionar la purga de condensado en la unidad de mantenimiento FRL (Filtro-Regulador-Lubricador) neumática antes de ejecutar pruebas dinámicas.
- Normalizar y rotular la nomenclatura de cables de campo según el estándar **ANSI/ISA-S5.1** previo al inicio de la Fase 2 de programación y control.

A Anexo A: Cuestionario de levantamiento de requerimientos

Este cuestionario fue aplicado de manera interdisciplinaria al equipo de control de la escuadra (**ETN-902 / ETN-1034**) con el propósito de relevar las variables, eventos y estados críticos de la planta física que requieren persistencia en base de datos. Constituye la evidencia de campo para el diseño de la arquitectura telemétrica.

A.1. Variables y datos críticos

1. ¿Cuáles son las variables controladas (*PV*) de cada estación que deben registrarse?
2. ¿Qué variables manipuladas (*MV*) envía el PLC (electroválvulas, consignas al variador)?
3. ¿Qué variables de perturbación (*DV*) conviene monitorizar y registrar?
4. ¿Debe distinguirse la *PV* medida de ingeniería del estado lógico bruto del sensor (*CV*)?
5. ¿Cuál es la variable o sensor más crítico para asegurar la trazabilidad de una pieza en la línea?

A.2. Frecuencia, volumen y escalado

1. ¿Con qué tasa temporal cambia cada variable y qué frecuencia de muestreo se requiere?
2. ¿Qué señales son estrictamente digitales (discretas/eventos) y cuáles analógicas (continuas)?
3. ¿El encoder de la cinta transportadora entrega conteo crudo de pulsos o velocidad/posición calculada?
4. ¿Cuál es la duración promedio de un ciclo de producción completo por estación?

A.3. Alarmas y eventos del sistema

1. ¿Qué condiciones constituyen alarma crítica (desborde, atasco, caída de presión neumática o falta de material)?
2. ¿Qué nivel de severidad se asigna a cada falla y cuáles provocan la parada de emergencia inmediata de la línea?
3. ¿Debe almacenarse el intervalo completo (inicio y fin) de la condición de alarma o únicamente el evento puntual de disparo?

A.4. Tiempos de operación y rendimiento

1. ¿Qué condición física o lógica marca el inicio y fin exacto de ciclo por estación de trabajo?
2. ¿Se registran unidades conformes y piezas rechazadas discriminadas por ciclo?
3. ¿Se requiere el desglose temporal independiente por cada módulo o únicamente el tiempo de ciclo total?

A.5. Comunicaciones y topología de red

1. ¿El PLC maestro de Transporte centraliza el estado de las cinco estaciones o la adquisición debe realizarse punto a punto por cada PLC?
2. ¿A qué velocidad en baudios se encuentra configurado el bus de comunicación serial RS-485?
3. ¿Qué áreas de memoria interna exponen cada variable de interés (entradas/salidas I/Q , marcas V/M , contadores rápidos HSC)?
4. ¿Se dispone de un servidor intermedio OPC o la lectura se ejecuta mediante protocolo dedicado?

A.6. Mantenimiento y confiabilidad Kaizen

1. ¿Cuáles componentes mecánicos, neumáticos o eléctricos presentan mayor tasa histórica de fallas?
2. ¿Con qué periodicidad se realizan tareas de mantenimiento preventivo y cómo se documentan?
3. ¿Se requiere un registro cronológico de incidencias por instrumento para la auditoría Kaizen?
4. ¿Debe calcularse e indexarse un indicador de salud o desgaste por componente?

A.7. Gestión de usuarios, auditoría y escalabilidad

1. ¿Qué perfiles y roles de usuario operan el sistema y qué acciones deben generar trazas de auditoría (*access logs*)?
2. ¿Qué reportes estadísticos y consultas analíticas se ejecutarán periódicamente sobre el histórico?
3. ¿Se contempla la incorporación futura de nuevas estaciones de trabajo o módulos sensoriales?
4. ¿Se requiere seguimiento y trazabilidad unívoca de cada pieza a lo largo de las estaciones del proceso?