

1. Filtro antialiasing

El filtro antialiasing es un bloque de acondicionamiento de señal que se coloca justo antes del convertidor analógico-digital (ADC). Su misión es recortar el contenido de altas frecuencias de la señal de entrada para que el muestreo cumpla con el criterio de Nyquist, es decir, que la frecuencia de muestreo sea como mínimo el doble de la componente de frecuencia más elevada que se desea medir.

Cuando se intenta digitalizar una señal que contiene componentes por encima de ese límite, dichas componentes se pliegan hacia el espectro útil y aparecen como información falsa en la señal digital, fenómeno conocido como aliasing. Para minimizar este problema se utiliza normalmente un filtro pasa bajos, cuya frecuencia de corte se fija un poco por debajo de la mitad de la frecuencia de muestreo.

En equipos didácticos o de bajo costo, como un PLC educativo, el filtro puede implementarse con una red RC sencilla o con un amplificador operacional configurado como filtro activo. Por ejemplo, si se muestrea a 1 kHz, una frecuencia de corte alrededor de 400 Hz ayuda a reducir el ruido y las interferencias de alta frecuencia que el sistema no puede reconstruir correctamente.

Incluir un filtro antialiasing en la etapa de entrada mejora de forma notable la calidad de las mediciones analógicas, evita errores de conversión y permite que el estudiante observe en la práctica la relación entre ancho de banda, muestreo y procesamiento digital de señales.

2. Entradas y salidas PNP y NPN

En automatización industrial se utilizan dos configuraciones muy extendidas para conectar sensores y actuadores a un PLC: PNP y NPN. Ambas se diferencian en cómo circula la corriente y en el punto al que se hace referencia la señal (común positivo o común negativo).

En una entrada PNP, el dispositivo de campo entrega un nivel lógico activo aplicando un voltaje positivo a la entrada del PLC. El común del sistema se conecta al potencial de referencia de 0 V, por lo que suele hablarse de sistema con negativo común. Este tipo de entrada es apreciado porque, ante un cable roto o desconexión, la entrada queda en nivel bajo y se reduce el riesgo de activaciones indeseadas.

En una entrada NPN, el comportamiento se invierte: el sensor cierra el circuito hacia tierra cuando se activa. En este caso el común está al potencial positivo, por lo que se le conoce como sistema de positivo común. La entrada se interpreta como activa cuando el sensor conecta la línea a 0 V. Este esquema es frecuente en equipos asiáticos y en aplicaciones con salidas a colector abierto.

Las salidas PNP del PLC funcionan como fuentes de corriente: cuando se activan entregan tensión positiva hacia la carga (lámpara, relé, solenoide), que retorna al negativo común. Por el contrario, las salidas NPN actúan como drenajes o sumideros, conectando la carga al

0 V cuando se activan y permitiendo que la corriente fluya desde la alimentación positiva a través de la carga y de la salida del PLC.

En resumen: en configuración PNP la etapa de salida "proporciona" corriente al circuito externo, mientras que en configuración NPN la salida "absorbe" corriente. Conocer estas diferencias es clave para cablear correctamente sensores y actuadores y evitar errores de conexión.

3. Entradas y salidas analógicas (0–10 V y 4–20 mA)

Las señales analógicas permiten que el PLC trabaje con variables de proceso que no solo están encendidas o apagadas, sino que pueden tomar muchos valores intermedios, como temperatura, nivel, presión, caudal o velocidad. Los rangos más utilizados en la industria son 0–10 V en tensión y 4–20 mA en corriente.

En una entrada de 0–10 V, un transmisor o sensor genera un voltaje proporcional a la magnitud física que se está midiendo. Por ejemplo, 0 V puede corresponder al 0 % de la escala y 10 V al 100 %. El módulo analógico del PLC convierte este voltaje en un número digital que luego se puede utilizar en cálculos, alarmas o lazos de control.

En el caso del estándar 4–20 mA, la información viaja como corriente en lugar de tensión. El valor de 4 mA representa el inicio de la escala y 20 mA el final. Al no comenzar en 0 mA, es posible distinguir entre una condición de proceso mínima y un fallo de transmisión (por ejemplo, un cable cortado que da 0 mA). Además, la transmisión en corriente es menos sensible a caídas de tensión en trayectos largos y al ruido electromagnético.

Las salidas analógicas permiten que el PLC actúe sobre el proceso de forma gradual. Una salida 0–10 V puede manejar, por ejemplo, la velocidad de un variador de frecuencia o la posición de una válvula motorizada. De forma similar, una salida de 4–20 mA puede gobernar equipos que acepten este estándar industrial. En ambos casos, el valor generado por el PLC representa el grado de actuación deseado en el proceso.

4. Etapa de manejo de relés (Driver Relay)

Las salidas lógicas de un PLC o microcontrolador no suelen ser capaces de suministrar la corriente necesaria para activar directamente la bobina de un relé. Por ello se utiliza una etapa intermedia conocida como driver de relé, diseñada para adaptar niveles de tensión y corriente entre la electrónica de control y la carga.

Un driver típico incluye un transistor de potencia (BJT o MOSFET) que funciona como interruptor electrónico, una resistencia que limita la corriente de entrada al transistor y un diodo de rueda libre (flyback) conectado en paralelo con la bobina del relé. Este diodo protege al transistor de los picos de tensión generados cuando el campo magnético de la bobina se colapsa al desenergizarse.

En funcionamiento, el PLC aplica una señal de control al transistor; cuando este satura, permite que circule corriente desde la fuente de alimentación externa a través de la bobina,

activando el relé. Al retirar la señal, el transistor se bloquea y la bobina deja de estar alimentada, liberando el contacto del relé.

Dentro de un PLC educativo, las etapas driver resultan esenciales para proteger las salidas lógicas, accionar cargas de mayor potencia y proporcionar aislamiento parcial entre la electrónica de bajo nivel y el entorno industrial donde se conectan motores, válvulas y otros actuadores.

5. Entrada digital con optoacoplador

Una entrada digital con optoacoplador utiliza un dispositivo optoelectrónico para separar eléctricamente el circuito externo del circuito interno del PLC. Este tipo de entrada mejora la inmunidad frente a sobretensiones, ruidos y diferencias de potencial entre diferentes puntos de la instalación.

El optoacoplador está formado por un LED y un fototransistor situados dentro del mismo encapsulado, enfrentados ópticamente pero sin contacto eléctrico. Cuando la señal externa aplica tensión a la entrada, la corriente circula por el LED (generalmente a través de una resistencia limitadora), este emite luz y la luz hace que el fototransistor conduzca en el lado del PLC, interpretándose como nivel lógico alto.

Si la señal de campo desaparece, el LED se apaga, el fototransistor entra en corte y la entrada pasa a nivel bajo. De esta forma se consigue aislamiento galvánico: aunque el lado de potencia sufra picos de tensión o errores de cableado, el circuito lógico interno permanece protegido.

Además del aislamiento, estas entradas permiten aceptar un rango más amplio de tensiones industriales y ayudan a reducir el ruido eléctrico procedente de contactores, motores o líneas largas de cableado.

6. Interfaz RS-485

La RS-485 es un estándar de comunicación serie pensado para entornos industriales donde se requieren grandes distancias, buena inmunidad al ruido y la posibilidad de conectar varios dispositivos en el mismo bus. Mejora muchas de las limitaciones de la antigua RS-232 al emplear transmisión diferencial y líneas balanceadas.

En RS-485 los datos se envían como diferencia de potencial entre dos conductores denominados A y B. Cuando la tensión en A es mayor que en B se interpreta un estado lógico, y cuando ocurre lo contrario se interpreta el estado opuesto. Este modo diferencial hace que los ruidos comunes que afectan a ambos conductores se cancelen, aumentando la robustez de la comunicación.

El estándar permite distancias de hasta aproximadamente 1200 metros a velocidades moderadas y admite topologías multipunto, donde varios equipos comparten el mismo par trenzado. Para garantizar la integridad de la señal, es habitual colocar resistencias de terminación en los extremos de la línea y, en algunos casos, resistencias de polarización.

En un PLC educativo, la incorporación de un transceptor RS-485 (como el MAX485 o el SN75176) conectado a un puerto UART del microcontrolador permite implementar redes industriales sencillas, comunicarse con módulos de E/S remotas, variadores o sistemas de supervisión que utilicen protocolos como Modbus RTU.

7. Protocolo Modbus implementado en el ESP32

Modbus es un protocolo de comunicación industrial de tipo maestro–esclavo que se ha convertido en un estándar de facto para el intercambio de datos entre PLC, sensores, equipos de medición y sistemas SCADA. Su estructura es simple, abierta y ampliamente soportada por fabricantes y software de supervisión.

En el modelo clásico, un único maestro inicia las tramas de comunicación y uno o varios esclavos responden cuando se les interroga. Cada dispositivo se identifica mediante una dirección y el protocolo define códigos de función para leer y escribir distintos tipos de registros (bobinas, entradas discretas, registros de entrada o de retención).

Modbus puede transportar sus tramas a través de diferentes medios físicos. En la variante Modbus RTU se usa transmisión serie, normalmente sobre RS-485, con un formato binario compacto. En la variante Modbus TCP las tramas viajan encapsuladas en TCP/IP sobre Ethernet o Wi-Fi, utilizando por convención el puerto 502.

El ESP32 es especialmente adecuado para implementar Modbus, ya que dispone de múltiples UART, conectividad Wi-Fi integrada y suficiente capacidad de proceso. Mediante bibliotecas disponibles para Arduino o ESP-IDF, el ESP32 puede configurarse como maestro o como esclavo tanto en Modbus RTU (a través de un transceptor RS-485) como en Modbus TCP, facilitando la conexión con HMIs, software SCADA o con otros controladores industriales.

En un PLC educativo basado en ESP32, Modbus permite expandir el sistema con módulos externos, compartir datos con aplicaciones de monitoreo energético o de proceso y reproducir escenarios reales de automatización industrial.

8. Medición de corriente alterna y transformadores de corriente (CT)

En aplicaciones industriales resulta fundamental medir corrientes y tensiones alternas para conocer el consumo, detectar sobrecargas y evaluar el rendimiento de las instalaciones eléctricas. Para ello se utilizan transformadores de corriente (CT) y, en muchos casos, circuitos integrados especializados en medición de energía.

Un transformador de corriente se conecta en serie con el conductor cuyo flujo de corriente se desea medir. El conductor actúa como devanado primario y, en el secundario del CT, aparece una corriente reducida y proporcional que puede manejarse de forma segura. Esta corriente se hace pasar por una resistencia de carga, generando una tensión que luego se acondiciona para ser medida por el ADC de un microcontrolador o por un circuito dedicado.

Para la medición de tensión alterna suele emplearse un divisor resistivo o un pequeño transformador de tensión que reduzca la tensión de red a un nivel compatible con la electrónica. La señal se filtra y se adapta antes de enviarla al sistema de adquisición, manteniendo siempre el aislamiento y la seguridad del usuario.

Existen numerosos circuitos integrados orientados a la medición de energía eléctrica, capaces de calcular valores RMS de corriente y tensión, potencia activa y reactiva, factor de potencia y energía acumulada. Ejemplos de estos integrados son el ADE7753, el ATM90E26/ATM90E32, el INA219 o el ADE9153A, que se comunican con el microcontrolador a través de buses digitales como SPI o I²C.

Al integrar uno de estos dispositivos en un PLC educativo basado en ESP32, es posible mostrar en tiempo real el consumo de diferentes cargas, registrar energía, enviar los datos por Modbus y desarrollar prácticas relacionadas con eficiencia energética y monitoreo industrial.

La combinación de CTs, medición de tensión y CIs de energía convierte al PLC educativo en una herramienta completa para comprender tanto la automatización de procesos como el comportamiento eléctrico de las instalaciones.