

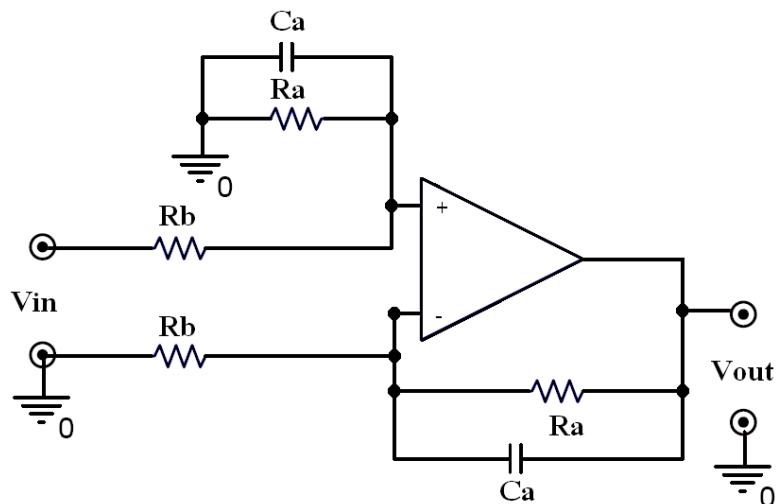
Investigación sobre filtro antialiasing (teoría del muestro)

Cuando usamos aparatos como un celular, una computadora o una tablet, todos ellos trabajan con información digital, o sea, con números. Pero el mundo real no está hecho de números: los sonidos, las imágenes y las señales eléctricas cambian todo el tiempo de manera continua. En el mundo digital, muchas veces se necesita transformar señales que vienen del mundo real como sonidos, imágenes o mediciones de sensores en información que una computadora pueda entender. A este proceso se le llama muestreo, y consiste en tomar pequeñas “muestras” o pedacitos de información muchas veces por segundo, para representar una señal continua con números.

Por ejemplo, cuando grabamos una voz, el micrófono capta una señal analógica (continua) y luego el sistema toma muchas muestras por segundo para convertirla en una señal digital. Pero este proceso si no se hace correctamente, la señal grabada puede salir distorsionada o diferente a la original.

Esto ocurre por un fenómeno llamado aliasing, que aparece cuando se toman pocas muestras por segundo y las partes rápidas o de alta frecuencia de la señal se confunden con partes lentas. Es como si tomáramos fotos muy despacio de un ventilador girando: en algunas fotos parece que gira hacia atrás o más despacio de lo real. En señales eléctricas o de audio pasa algo parecido: las frecuencias altas se “mezclan” con las bajas y cambian la forma original.

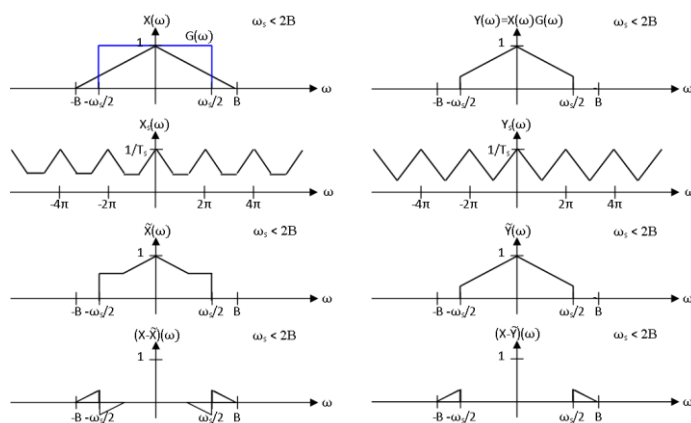
Para evitar este problema, antes de hacer el muestreo se coloca un filtro antialiasing, que se encarga de dejar pasar solo las frecuencias que el sistema puede captar correctamente y eliminar las que causarían errores.



1. Qué es y cómo funciona el filtro antialiasing

El filtro antialiasing es un circuito que se coloca justo antes de convertir una señal analógica en digital. Su función principal es limitar la cantidad de información que pasa, dejando solo las partes útiles de la señal y bloqueando las partes más rápidas (las de alta frecuencia) que podrían causar problemas al muestrear. Solo deja pasar lo que queremos, y detiene lo que no sirve. En

este caso, el “colador” filtra las frecuencias que están por encima del límite que el sistema puede manejar.



Este límite está definido por algo llamado frecuencia de muestreo, que es la cantidad de muestras que tomamos cada segundo. Según la teoría del muestreo de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia más alta que queremos capturar. Por ejemplo, si queremos grabar sonidos hasta 20,000 Hz (que es lo que el oído humano puede escuchar), debemos muestrear al menos a 40,000 veces por segundo.

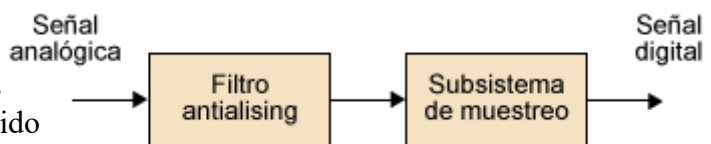
En la práctica, los filtros antialiasing son circuitos hechos con resistencias, capacitores y a veces amplificadores, que suavizan la señal y eliminan los cambios bruscos. De esa forma, cuando el conversor digital toma las muestras, solo recibe la información que se puede representar correctamente, sin confusiones.

Si el sistema graba a 44,100 muestras por segundo (como los CD de música), el filtro antialiasing se encarga de eliminar las frecuencias por encima de 22,050 Hz, porque el sistema no podría representarlas correctamente. Si no existiera ese filtro, aparecerían sonidos falsos o distorsiones al reproducir la grabación.

Existen varios tipos de filtros que pueden usarse como antialiasing, dependiendo de qué tan exigente sea el sistema. Algunos son más suaves, otros eliminan las frecuencias más rápido, y otros se diseñan para conservar mejor la forma original de la señal. Pero en todos los casos su propósito es el mismo: preparar la señal para que el muestreo sea lo más limpio posible. En dispositivos modernos, como teléfonos, cámaras o sensores industriales, estos filtros suelen venir integrados dentro de los chips de procesamiento. Esto asegura que el equipo capte información de buena calidad sin que el usuario tenga que preocuparse por el aliasing.

Este tipo de filtro está presente en muchísimos aparatos que usamos a diario. Algunos ejemplos son:

- **Audio digital:** En micrófonos, reproductores y mezcladoras, el filtro evita que las frecuencias altas o el ruido eléctrico distorsionen el sonido.
- **Sensores industriales:** Cuando un sensor mide temperatura, presión o velocidad, el filtro ayuda a eliminar interferencias de motores o cables cercanos.
- **Cámaras digitales:** Aunque el concepto aquí es un poco diferente, también se usa un tipo de filtro antialiasing para evitar patrones raros o rayas en las fotos (llamados “efecto moiré”).
- **Robótica y automatización:** En sistemas que leen señales analógicas de motores o sensores, el filtro garantiza que las lecturas sean estables y precisas.



- **Equipos médicos:** En aparatos que miden el ritmo cardíaco o señales cerebrales, los filtros eliminan ruidos de alta frecuencia para que los resultados sean más confiables.

2. Importancia del filtro en la teoría del muestreo

La teoría del muestreo explica las condiciones que deben cumplirse para convertir una señal continua en una digital sin perder información. Pero en la vida real, las señales no siempre cumplen con esos requisitos. Casi todas las señales naturales contienen pequeñas partes de alta frecuencia, ruido o interferencias que pueden generar errores en la conversión.

Por eso es que, el filtro antialiasing se vuelve un paso obligatorio antes del muestreo. Actúa como una “protección” que garantiza que la señal cumpla con la teoría del muestreo. Sin él, aunque tengamos un buen conversor digital, la información podría quedar dañada desde el principio.

En resumen, este filtro asegura que los equipos electrónicos capten solo lo necesario y eviten confusiones. Es una manera práctica de aplicar en el mundo real una teoría matemática muy importante en electrónica y procesamiento de señales.

Gracias a estos filtros, podemos disfrutar de grabaciones de audio limpias, imágenes nítidas, mediciones exactas y sistemas de control más confiables. En pocas palabras, el filtro antialiasing es un guardián silencioso que hace posible que la tecnología digital funcione correctamente.

3. Principio de funcionamiento

Cuando una señal analógica se muestrea, el ADC toma muestras a una frecuencia constante (f_s). Según la teoría de muestreo, la frecuencia de Nyquist (f_n) es igual a la mitad de la frecuencia de muestreo ($f_n = f_s/2$). Para evitar aliasing, la señal de entrada debe tener una frecuencia máxima (f_{max}) menor o igual a f_n .

Sin embargo, en la práctica, muchas señales contienen ruido o componentes por encima de f_n , por lo que el filtro antialiasing se encarga de suprimir todas las frecuencias mayores a la frecuencia de corte (f_c), que se elige ligeramente por debajo de f_n .

De esta forma:

- El rango útil (banda de paso) pasa sin alteraciones.
- La banda de transición atenúa progresivamente las frecuencias.
- La banda de rechazo elimina las componentes no deseadas que causarían aliasing.

La respuesta ideal sería un filtro de “pared de ladrillo” (brick-wall), con una caída instantánea en la frecuencia de corte, pero esto no es posible físicamente. Por eso, en la práctica se diseñan filtros con pendientes controladas según el orden del filtro.

4. Tipos y topologías del filtro

En el diseño de un PLC, los filtros antialiasing pueden implementarse de diferentes formas según la precisión y el espacio disponible en la tarjeta electrónica:

a) Filtros pasivos

Son los más simples y están formados por resistencias (R) y capacitores (C). Se usan para frecuencias bajas y en sistemas donde no se requiere una gran precisión. La frecuencia de corte se calcula mediante la fórmula:

$$f_c = 1 / (2\pi RC)$$

Aunque son económicos, su pendiente de atenuación es limitada (20 dB por década por cada orden del filtro).

b) Filtros activos

Utilizan amplificadores operacionales (op-amp) junto con resistencias y capacitores. Estos filtros pueden amplificar la señal, tienen una mejor respuesta en frecuencia y permiten construir filtros de orden superior (más abruptos y precisos).

Entre las topologías más utilizadas en mecatrónica están:

- Sallen-Key: fácil de diseñar, estable y común en entradas analógicas de PLC.
- Múltiple Feedback (MFB): mejor control de ganancia y pendiente más pronunciada.

c) Tipos de respuesta más comunes

- Butterworth: respuesta plana en la banda pasante, ideal para mediciones suaves.
- Chebyshev: mayor atenuación en la banda de rechazo, aunque con pequeñas ondulaciones en la banda pasante.
- Bessel: mantiene una buena linealidad de fase, útil cuando la forma de la señal es importante.

5. Criterios de diseño para un PLC

Cuando diseñas un PLC o módulo de adquisición de datos, el filtro antialiasing debe ajustarse a las características del ADC y del tipo de sensor. Algunos criterios fundamentales son:

1. **Frecuencia de muestreo (f_s):** define la velocidad con que el ADC tomará muestras.
2. **Frecuencia de Nyquist ($f_n = f_s/2$):** marca el límite máximo que puede representarse sin distorsión.

Anti-Aliasing Filter Design

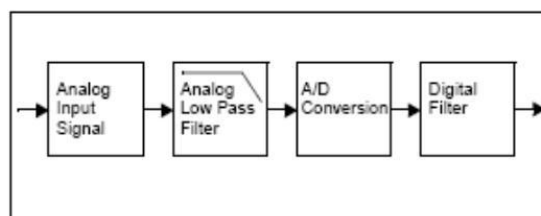


FIGURE 1: The data acquisition system signal chain can utilize analog or digital filtering techniques or a combination of the two.

3. **Frecuencia de corte del filtro (f_c):** se elige un poco menor que f_n (por ejemplo, $f_c = 0.4 f_n$).
4. **Pendiente de atenuación:** depende del orden del filtro. A mayor orden, mayor selectividad.
5. **Componentes electrónicos:** usar resistencias de 1 % y capacitores de buena estabilidad (X7R o NP0).

Ejemplo:

Si el ADC del PLC muestrea a 1 kHz, entonces:

- $f_n = 500 \text{ Hz}$
- $f_c \approx 400 \text{ Hz}$
- Se recomienda un filtro pasa-bajos activo de 2° o 4° orden con op-amp tipo LM358 o MCP6002.

6. Implementación en un PLC

En un **PLC de diseño propio**, cada **canal analógico de entrada** debe incluir su propio filtro antialiasing antes de entrar al ADC.

El flujo de señal típico es:

1. Sensor (0–10 V o 4–20 mA) →
2. Etapa de acondicionamiento (divisor o resistencia de shunt) →
3. Filtro antialiasing (RC o activo) →
4. Amplificador buffer (op-amp) →
5. ADC del microcontrolador o del PLC

En el caso de entradas de 0–10 V, el filtro elimina el ruido eléctrico y suaviza la señal. En las entradas de 4–20 mA, se usa una resistencia de sensado (250 Ω) para convertir la corriente en voltaje (1–5 V) y luego se aplica el filtro antes del ADC. Esto garantiza una lectura precisa, estable y libre de distorsión

7. Beneficios del filtro antialiasing

- **Evita el aliasing:** elimina las frecuencias que causarían errores en la conversión digital.
- **Mejora la estabilidad de lectura:** las señales analógicas se vuelven más limpias y estables.
- **Protege el ADC:** evita sobrecargas y picos de ruido.
- **Aumenta la precisión:** las mediciones son más exactas y confiables.
- **Permite sobremuestreo:** si la frecuencia de muestreo es alta, se pueden aplicar filtros digitales posteriores más suaves y precisos.

8. Aplicaciones en sistemas mecatrónicos

El filtro antialiasing no solo se usa en PLCs, sino también en:

- Sistemas de adquisición de datos (DAQ).
- Controladores de movimiento y encoders.

- Sistemas de visión artificial (evita aliasing espacial o efecto moiré).
- Medición de corriente y voltaje AC mediante CT e ICs como INA219 o ADE7753.

En todos los casos, su función es la misma: preparar la señal analógica para su muestreo correcto y confiable.

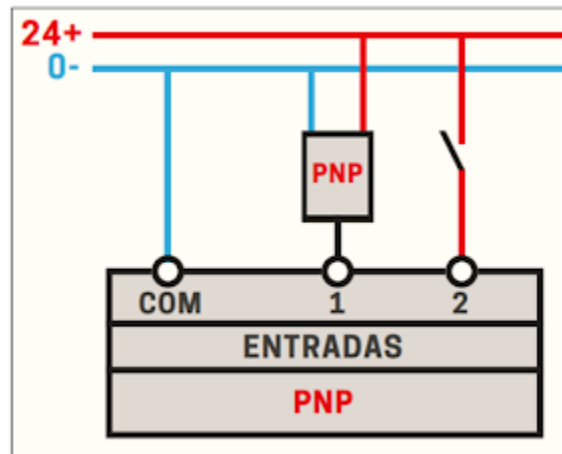
2. Investigación sobre los esquemáticos que necesitamos para el proyecto

1. Entradas PNP

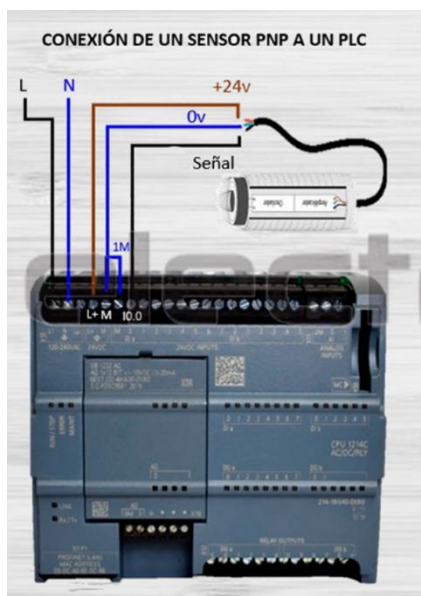
La Entrada PNP (Positivo-Negativo-Positivo) es el método de conexión preferido para recibir señales digitales (ON/OFF) en los controladores lógicos programables (PLCs) en la mayoría de los sistemas industriales occidentales.

Concepto y Función

Una entrada PNP es de tipo Sourcing (suministro). Su función es detectar la presencia de un voltaje positivo (+V) para cambiar su estado lógico de Apagado (OFF/0) a Encendido (ON/1). La entrada está cableada permanentemente a la referencia negativa (0 VDC) en su común y espera recibir el potencial positivo del dispositivo de campo.



Circuito y Cableado



El sensor o dispositivo que se conecta a una entrada PNP debe tener una Salida PNP. Cuando este sensor se activa (detecta un objeto), utiliza un transistor (PNP) para conmutar el voltaje de alimentación (+24 VDC) directamente a su cable de señal, enviando ese pulso positivo a la entrada del PLC. El PLC interpreta este pulso como un estado lógico "Alto".

Fórmulas y Conceptos Eléctricos

Aunque la conmutación es digital (ON/OFF), el funcionamiento se rige por conceptos fundamentales de la electrónica y la Ley de Ohm:

1. Ley de Ohm ($V=I \cdot R$): El voltaje de la señal (V, típicamente 24 VDC) debe ser suficiente para generar la corriente (I) necesaria para excitar la resistencia de entrada (R) del módulo del PLC. Si

la corriente es muy baja (debido a cables largos o dañados), la entrada puede no activarse correctamente.

2. Umbral de Activación (VTH): El PLC no se activa a 0V, sino que requiere un voltaje mínimo (voltaje de umbral, VTH), que suele ser superior a 15-18 VDC para asegurar una detección fiable y rechazar el ruido.
3. Seguridad (Ventaja Clave): La mayor ventaja de las entradas PNP es que, si el cable de señal se rompe y toca el chasis metálico (que está a 0 VDC), no se produce activación. Esto minimiza el riesgo de falsos positivos

2. Salidas PNP

Salida PNP es la capacidad del PLC de suministrar el voltaje positivo para activar un actuador o carga.

Concepto y Función

Una salida PNP es de tipo Sourcing (suministro). Cuando el programa del PLC activa esta salida, el módulo conmuta internamente el potencial positivo (+24 VDC) hacia el terminal de salida. Su función es actuar como un interruptor de lado alto (High Side Switch), proveyendo el polo positivo necesario para la carga.

Circuito y Cableado

Para conectar un actuador a una salida PNP:

1. El terminal de salida del PLC se conecta al polo positivo del actuador (carga).
2. El polo negativo del actuador se conecta directamente a la referencia negativa (0 VDC) de la fuente de alimentación. Esto completa el circuito, permitiendo que la corriente fluya a través del actuador.

Fórmulas y Conceptos Eléctricos

La principal consideración en las salidas no es el voltaje, sino la capacidad de manejo de corriente:

1. Requisito de Corriente (Ley de Ohm): La corriente consumida por la carga (I_{Carga}) se determina por el voltaje de suministro y la resistencia interna del actuador.

Corriente Consumida(I_{Carga})= $\frac{V_{Suministro}}{R_{Carga}}$

2. **Fórmula de Carga Segura:** La corriente consumida por el actuador debe ser inferior a la corriente máxima que la tarjeta de salida del PLC puede manejar por punto (IMax), o el módulo se dañará o activará su protección por sobrecarga:

$$I_{Carga} \leq I_{Max} \text{ por Punto de Salida}$$

3. **Concepto de Estado Sólido:** Las salidas PNP utilizan transistores de estado sólido (sin partes móviles) para conmutar, lo que garantiza una alta velocidad y una larga vida útil en comparación con las salidas de relé mecánicas.

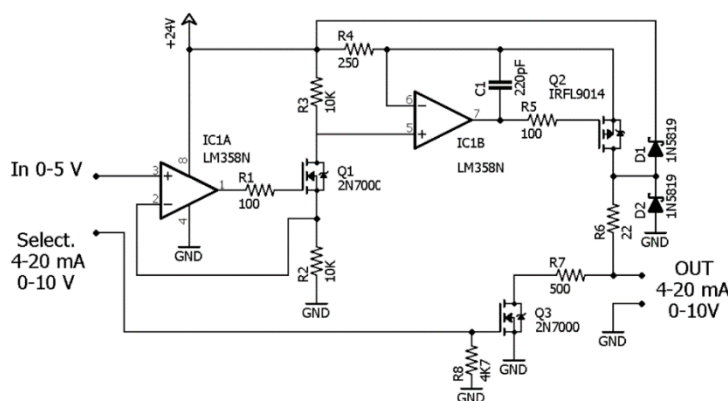
3. Entrada 0-10V

La Entrada Analógica 0-10V es fundamental para que el PLC interactúe con el entorno físico de manera continua y proporcional. Permite medir magnitudes que no se limitan a un simple estado binario.

Concepto y Función

La función primordial de esta entrada es la Adquisición de Datos Proporcionales. Está diseñada para recibir y traducir un voltaje que varía linealmente entre 0 y 10 VDC, donde dicho voltaje representa un rango completo de una variable física.

- **Rango de Ingeniería:** El 0V corresponde al punto mínimo (0%) de la variable (p. ej., un tanque vacío, 0 PSI) y 10V corresponde al punto máximo (100%) (p. ej., un tanque lleno, 500 PSI).
- **Señal de Bajo Nivel:** El 0-10V se considera una señal de "bajo nivel" en comparación con la alimentación de control de 24V o la señal de corriente 4-20mA, lo que la hace sensible a la interferencia.



Proceso de Conversión (A/D)

La información no se puede usar directamente en la CPU del PLC, que solo maneja números binarios. El proceso de una entrada 0-10V se basa en el Convertidor Analógico a Digital (A/D), un componente esencial del módulo de entrada:

1. **Muestreo:** El A/D toma una muestra del voltaje entrante.
2. **Cuantificación:** Transforma ese voltaje en un valor entero discreto. Cuanto mayor sea la resolución en bits del módulo (p. ej., 12, 14, 16 bits), mayor será la precisión y el rango de valores (típicamente de 0 a 27648 en muchos PLCs) que la CPU puede utilizar.

Fórmulas y escalado

La clave de la programación analógica es el Escalado (*Scaling*). Se utiliza una fórmula lineal para mapear el valor digital interno del PLC (VPLC) al valor de ingeniería real (VReal) que es legible para el operador (p. ej., °C, Lts/min, PSI).

La fórmula de escalado más común es una variación de la ecuación de la recta ($y=mx+b$):

$$\left(\frac{\text{Valor PLC} - \text{Mínimo PLC}}{\text{Máximo PLC} - \text{Mínimo PLC}} \right) \times (\text{Máximo Físico} - \text{Mínimo Físico}) + \text{Mínimo Físico}$$

Concepto de Determinación del Mínimo: Es crucial definir si el sensor usa el rango 0-10V o un rango "vivo" como 1-5V o 2-10V. Los rangos vivos permiten detectar un "fallo de cable" o una rotura de hilo; si la entrada lee 0V en un rango 2-10V, significa que la señal se perdió y se puede generar una alarma de fallo.

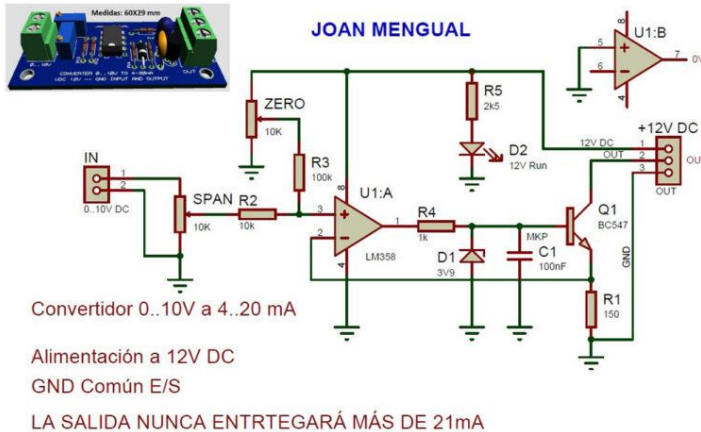
4. Salida 0-10V

La Entrada Analógica 0-10V es fundamental para que el PLC interactúe con el entorno físico de manera continua y proporcional. Permite medir magnitudes que no se limitan a un simple estado binario.

Concepto y Función

La función primordial de esta entrada es la Adquisición de Datos Proporcionales. Está diseñada para recibir y traducir un voltaje que varía linealmente entre 0 y 10 VDC, donde dicho voltaje representa un rango completo de una variable física.

- Rango de Ingeniería: El 0V corresponde al punto mínimo (0%) de la variable (p. ej., un tanque vacío, 0 PSI) y 10V corresponde al punto máximo (100%) (p. ej., un tanque lleno, 500 PSI).
- Señal de Bajo Nivel: El 0-10V se considera una señal de "bajo nivel" en comparación con la alimentación de control de 24V o la señal de corriente 4-20mA, lo que la hace sensible a la interferencia.



Proceso de Conversión (A/D)

La información no se puede usar directamente en la CPU del PLC, que solo maneja números binarios. El proceso de una entrada 0-10V se basa en el Convertidor Analógico a Digital (A/D), un componente esencial del módulo de entrada:

1. Muestreo: El A/D toma una muestra del voltaje entrante.
2. Cuantificación: Transforma

ese voltaje en un valor entero discreto. Cuanto mayor sea la resolución en bits del módulo (p. ej., 12, 14, 16 bits), mayor será la precisión y el rango de valores (típicamente de 0 a 27648 en muchos PLCs) que la CPU puede utilizar.

Fórmulas y Escalado

La clave de la programación analógica es el Escalado (*Scaling*). Se utiliza una fórmula lineal para mapear el valor digital interno del PLC (VPLC) al valor de ingeniería real (VReal) que es legible para el operador (p. ej., °C, Lts/min, PSI).

La fórmula de escalado más común es una variación de la ecuación de la recta ($y=mx+b$):

$$\text{Voltaje de Salida(en V)} = \frac{\text{Valor Deseado Físico} - \text{Mínimo Físico}}{\text{Máximo Físico} - \text{Mínimo Físico}} \times 10 \text{ VDC}$$

Concepto de Determinación del Mínimo: Es crucial definir si el sensor usa el rango 0-10V o un rango "vivo" como 1-5V o 2-10V. Los rangos vivos permiten detectar un "fallo de cable" o una rotura de hilo; si la entrada lee 0V en un rango 2-10V, significa que la señal se perdió y se puede generar una alarma de fallo.

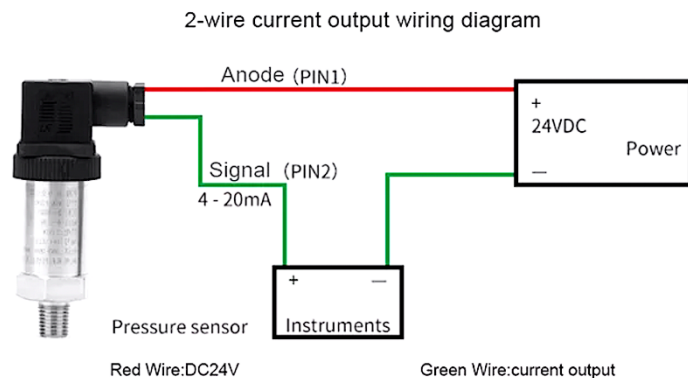
5. Entrada 4-20ma

La Entrada Analógica 4-20mA es el método más fiable para que un PLC lea variables físicas continuas, utilizando la corriente eléctrica en lugar del voltaje.

Concepto y Función: El "Lazo de Corriente"

La función principal es la Adquisición de Datos Proporcionales de Alta Fiabilidad. El estándar se basa en un lazo de corriente (*current loop*), donde un transmisor (sensor) regula la intensidad de la corriente que circula en un circuito cerrado.

- **Rango de Ingeniería:** La corriente varía linealmente entre 4 miliamperios (mA), que representa el punto mínimo (0%) de la variable (p. ej., tanque vacío, 0 PSI), y 20 mA, que representa el punto máximo (100%) (p. ej., tanque lleno, 100 PSI).
- **Diagnóstico de Fallos (Lazo Vivo):** La clave del 4-20mA es que el punto mínimo no es 0 mA, sino 4 mA. Si la entrada del PLC lee 0 mA, significa que hay una interrupción física en el circuito (un cable roto o un fallo de alimentación en el transmisor). Esto permite el autodiagnóstico instantáneo del cableado y del sensor, lo que no es posible con una señal 0-10V.



Circuito y Conversión

La señal de corriente debe convertirse en voltaje para que el módulo de entrada analógica del PLC pueda procesarla:

1. **Conversión I/V (Corriente a Voltaje):** El módulo de entrada del PLC contiene una resistencia de precisión (típicamente de $250\ \Omega$ o $500\ \Omega$) conectada en paralelo al lazo. La corriente (I) que atraviesa esta resistencia (R) genera una caída de voltaje (V).
2. **Fórmula de Conversión (Ley de Ohm):** El voltaje medido internamente por el PLC se determina por la Ley de Ohm:

$$V = I \cdot R$$

- Si $I = 4\ \text{mA}$ y $R = 250\ \Omega \implies V = 0.004\ \text{A} \times 250\ \Omega = 1.0\ \text{VDC}$
- Si $I = 20\ \text{mA}$ y $R = 250\ \Omega \implies V = 0.020\ \text{A} \times 250\ \Omega = 5.0\ \text{VDC}$

Inmunidad al Ruido (Ventaja Crítica)

La corriente es la forma más robusta de transmitir una señal en ambientes industriales. A diferencia del voltaje (0-10V), que es susceptible a la caída de tensión en cables largos y a las interferencias electromagnéticas (EMI):

- **La corriente no se atenúa con la distancia:** La corriente que entra al lazo es la misma que lo abandona, sin importar la longitud del cable (dentro de los límites de la fuente de alimentación).
- **Alta Inmunidad al Ruido:** Las señales de corriente son mucho menos propensas a ser corrompidas por el ruido eléctrico externo que las de voltaje.

6. Salida 4-20ma

La Salida Analógica 4-20mA es el mecanismo preferido para que el PLC controle proporcionalmente actuadores de alta precisión, garantizando que la orden de control llegue inalterada.

Concepto y Función

La función principal es el Control Proporcional Determinista. Al igual que la entrada, la salida trabaja regulando la intensidad de la corriente en un lazo, donde el PLC actúa como el dispositivo controlador de la corriente.

- Control de Actuadores: Se utiliza para enviar la señal de referencia a actuadores críticos, como válvulas de control de flujo, que ajustan su apertura con precisión en función de la corriente recibida.
- Relación Lineal: El PLC genera una corriente de 4 mA para ordenar el punto mínimo de actuación (0%) y 20 mA para el punto máximo (100%). Una señal de 12 mA indica el 50% de la actuación requerida.



Proceso y Fórmulas

El proceso comienza en la CPU del PLC y se culmina con el Convertidor Digital a Analógico (D/A) del módulo de salida:

1. Cálculo Lógico: El programa calcula el valor digital que se necesita para la consigna (p. ej., 65% de apertura de válvula).
2. Conversión D/A: El módulo transforma este valor digital en la corriente eléctrica precisa (p. ej., 15.6 mA para 65% de apertura) y la inyecta en el lazo.

Fórmula de Salida (Escalado Inverso): El PLC usa la siguiente relación para determinar la corriente a generar:

$$\text{Corriente de Salida(en mA)} = \left(\frac{\text{Valor Deseado Físico} - \text{Mínimo Físico}}{\text{Máximo Físico} - \text{Mínimo Físico}} \right) \times 16 \text{ mA} + 4$$

(Nota: Se utiliza 16 mA ya que es el rango total de la señal (20 mA - 4 mA). Se añade 4 mA como offset para asegurar el "lazo vivo").

Concepto de Impedancia: La salida de corriente debe ser capaz de manejar la impedancia (resistencia) total del lazo de carga (cable + actuador) sin que el voltaje de alimentación decaiga demasiado. Los módulos de salida especifican la máxima impedancia de carga que pueden excitar.

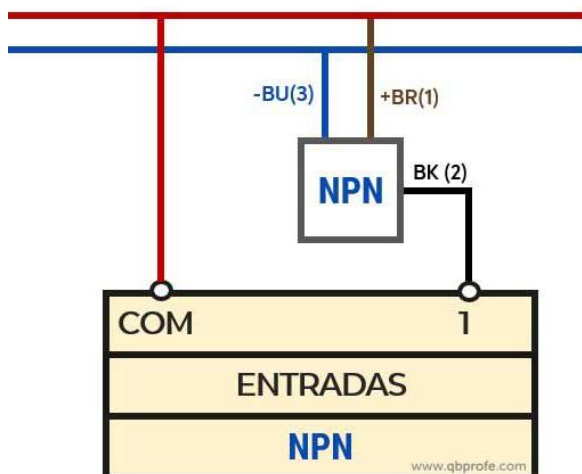
$$\text{Impedancia Máxima de Carga} \leq \frac{V_{\text{Suministro}} - V_{\text{Mínimo}}}{20 \text{ mA}}$$

Donde VMinimo es el voltaje de operaci3n mínimo del actuador. Este concepto asegura que la salida pueda mantener los 20 mA a través de todos los componentes del circuito.

7. Entradas NPN

Concepto y Funci3n

Una entrada NPN es de tipo Sinking (hundimiento o absorci3n). Su funci3n es activarse cuando se le aplica una señal de 0 VDC (conexi3n a tierra), esperando que el dispositivo de campo complete el circuito conectándose al polo negativo. La entrada está cableada permanentemente al polo positivo (+24 VDC) en su común y espera la señal negativa para cambiar su estado l3gico de Apagado (OFF/0) a Encendido (ON/1).



Circuito y Cableado

El sensor que se conecta a una entrada NPN debe tener una Salida NPN. Cuando este sensor se activa, utiliza un transistor (NPN) para conmutar el polo negativo (0 VDC) directamente a su cable de señal, enviando esta referencia a tierra a la entrada del PLC. El PLC interpreta esta caída de potencial como un estado l3gico "Alto".

F3rmulas y Conceptos Eléctricos

El funcionamiento se basa en la Ley de Ohm,

pero la inversi3n de polaridad es clave:

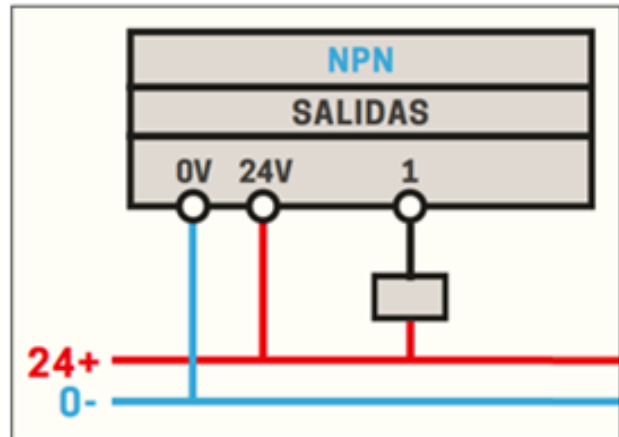
1. L3gica del Sensor NPN (Absorci3n): El sensor actúa como un interruptor que, al activarse, conecta la carga a 0 VDC. La corriente fluye desde el +24V de la entrada del PLC, a través de la resistencia interna, y "se hunde" hacia el terminal de salida del sensor y, finalmente, a la tierra (0 VDC) de la fuente de alimentaci3n.
2. Seguridad (Riesgo de Falso Positivo): La principal desventaja de las entradas NPN es su riesgo de falso positivo por fallo eléctrico. Si el cable de señal se daña y toca accidentalmente el chasis metálico (que está a 0 VDC), la entrada se activará de forma err3nea, ya que 0 VDC es la señal esperada para la activaci3n. Por ello, son menos populares en aplicaciones donde la seguridad del operador depende de una detecci3n fiable (como en paros de emergencia o barreras de seguridad).

8. Salidas NPN

La Salida NPN de un PLC es la capacidad del módulo de control de conectar el actuador al polo negativo (0 VDC) para energizarlo.

Concepto y Función

Una salida NPN es de tipo Sinking (hundimiento). Cuando el programa del PLC activa esta salida, el módulo utiliza un transistor para conectar el terminal de salida al polo negativo (0 VDC) de la fuente de alimentación. Su función es actuar como un interruptor de lado bajo (Low Side Switch), proveyendo el polo negativo necesario para la carga.



Circuito y Cableado

Para conectar un actuador a una salida NPN:

1. El actuador (carga) debe estar conectado permanentemente al polo positivo (+24 VDC) de la fuente de alimentación.
2. El terminal de salida NPN del PLC se conecta al polo negativo de la carga.

Cuando la salida se activa, cierra el circuito al conectar el negativo de la carga al 0 VDC de la fuente, permitiendo el flujo de corriente y la activación del actuador.

Fórmulas y Conceptos Eléctricos

Al igual que las salidas PNP, la Ley de Ohm determina el consumo, pero es crucial asegurar la capacidad de la tarjeta:

1. Fórmula de Carga Segura: La corriente consumida por el actuador (I_{Carga}) debe ser inferior a la corriente máxima (I_{Max}) que la salida NPN puede manejar por punto. El transistor NPN debe ser capaz de "hundir" o conducir a tierra de forma segura esa corriente.

$$I_{\text{Carga}} \leq I_{\text{Max}} \text{ por Punto de Salida}$$

2. Transistor de Lado Bajo: El uso de transistores NPN como interruptores de lado bajo suele ofrecer mayores eficiencias de conmutación y, en ciertos diseños de tarjetas, permite manejar corrientes ligeramente superiores que su contraparte PNP, aunque esto varía mucho entre fabricantes.

En resumen, la elección entre NPN y PNP es una decisión de polaridad (Sourcing vs. Sinking) que afecta el diseño del circuito de seguridad de la planta.

9. Driver Relay

El término Driver Relay (Relé de Conducción o Relé Interfaz) se refiere a un componente o circuito utilizado para acoplar la señal de bajo consumo y bajo voltaje de una salida de PLC (típicamente 24 VDC y $< 0.5\text{ A}$) con una carga de mayor demanda eléctrica. Actúa como un puente de potencia y aislamiento entre el circuito de control sensible y el circuito de campo robusto.

Función y Necesidad

La necesidad de un Driver Relay surge porque las salidas de los PLCs (sean PNP o NPN) tienen límites estrictos de corriente para proteger los transistores internos. Si se intenta conectar una gran carga (como un contactor potente, un motor pequeño o una luz de alta potencia) directamente a la salida del PLC, se superará la capacidad de corriente, dañando permanentemente el módulo.

El Driver Relay soluciona esto: la salida de bajo consumo del PLC activa la pequeña bobina del relé (el *driver*), y los contactos de este relé conmutan de manera segura el alto voltaje y la alta corriente requerida por la carga final.

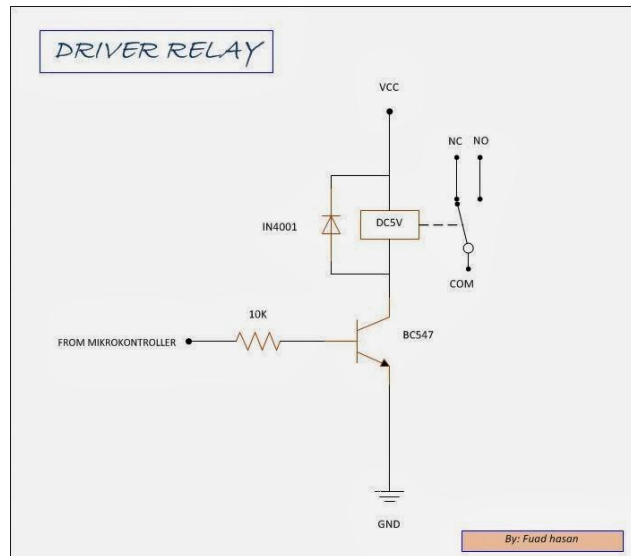
Concepto Involucrado I: Cargas Inductivas y Contrafuerza Electromotriz (CEMF)

La mayoría de los actuadores (contactores, relés, solenoides) utilizan bobinas, lo que los convierte en cargas inductivas. Cuando el PLC desactiva (corta la alimentación a) la bobina:

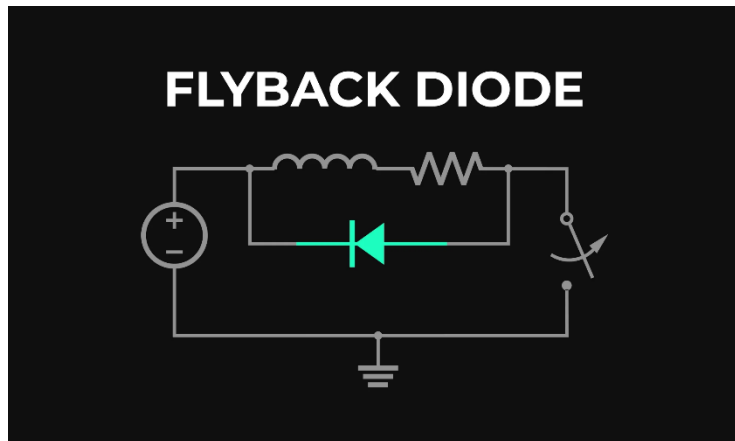
1. El campo magnético colapsa rápidamente.
2. Este colapso induce un pico de voltaje extremadamente alto y de polaridad opuesta (conocido como Contrafuerza Electromotriz - CEMF) que puede ser de varios cientos de voltios.
3. Este pico viaja de regreso hacia la tarjeta de salida del PLC, capaz de destruir el transistor de salida (PNP/NPN).

Concepto Involucrado II: Diodo de Rueda Libre (Flyback Diode)

Para proteger la salida del PLC o el Driver Relay de la CEMF generada por las cargas inductivas, es obligatorio el uso de un Diodo de Rueda Libre (*Flyback Diode* o *Diodo Snubber*).



- **Función del Diodo:** El diodo se conecta en polarización inversa a través de la bobina del Driver Relay. Cuando la bobina se desenergiza, el pico de CEMF intenta viajar hacia atrás, pero el diodo se polariza directamente y proporciona un camino de baja resistencia. El pico de energía es absorbido y disipado por el diodo y la propia bobina, protegiendo así el circuito de control del PLC.



Concepto Involucrado III: Relé de Estado Sólido (SSR)



Como alternativa al relé electromecánico (que tiene desgaste por contacto), el Relé de Estado Sólido (SSR) también actúa como Driver Relay. Un SSR utiliza semiconductores (triacs o transistores) en lugar de contactos físicos para conmutar la carga.

- **Ventajas:** Ofrece una conmutación extremadamente rápida, una vida útil casi ilimitada y opera sin ruido ni chispas. Es ideal para aplicaciones de conmutación frecuente, como el control de temperatura por ciclos de potencia (PWM).

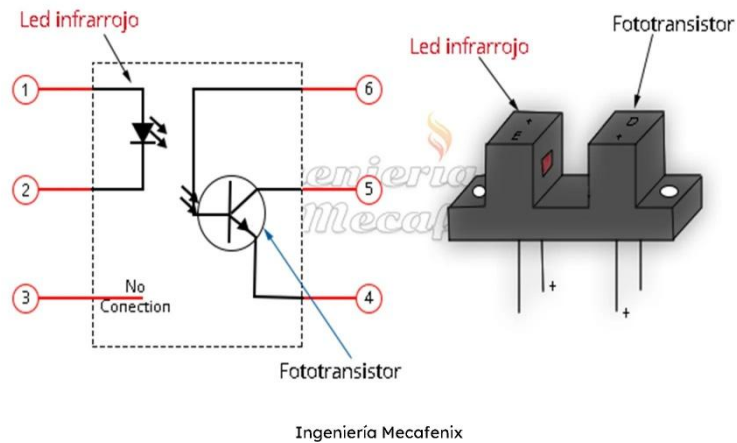
10. Entrada Optoacoplador

El Optoacoplador (u Optoaislador) no es una entrada en sí misma, sino el mecanismo de aislamiento crítico dentro de cada terminal de una tarjeta de entrada digital de un PLC. Es esencial para la robustez de los equipos industriales.

Función: Aislamiento Galvánico

La función principal del optoacoplador es proporcionar Aislamiento Galvánico entre dos circuitos que operan a diferentes niveles de energía y ruido:

1. Circuito de Campo (Externo): La señal ruidosa de 24 VDC proveniente de los sensores en el campo.
2. Circuito de Lógica (Interno): La circuitería sensible de bajo voltaje (típicamente 3.3 VDC o 5 VDC) del procesador (CPU) del PLC.



Circuito y Operación

El optoacoplador logra el aislamiento utilizando luz:

1. Emisor (LED): La señal de entrada de 24 VDC del sensor excita un Diodo Emisor de Luz (LED) dentro del optoacoplador.
2. Medio de Aislamiento: La señal se transmite a través de una pequeña barrera de aire o un material transparente (aislamiento físico).
3. Receptor (Fototransistor): La luz recibida activa un Fototransistor o fotodiodo en el lado de la lógica del PLC, cerrando el circuito interno y señalizando el estado "ON".

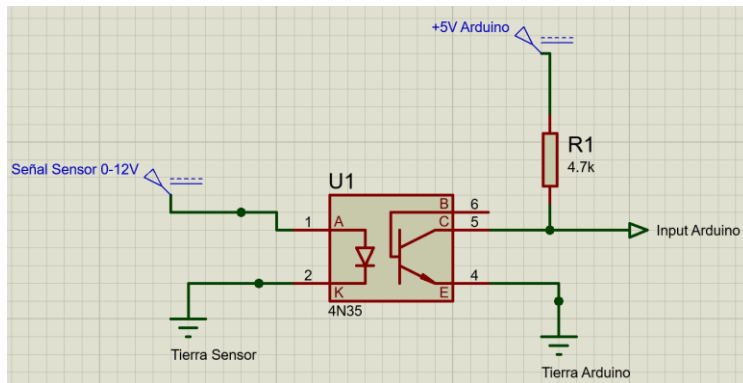
El uso de luz permite que la señal se transmita sin conexión eléctrica directa, aislando eléctricamente las dos partes.

Concepto Involucrado I: Rechazo al Ruido (Noise Rejection)

El aislamiento protege al PLC de dos tipos principales de ruido:

- Ruido de Modo Común: Voltaje indeseado que aparece en los dos cables de la señal (señal y referencia) al mismo tiempo con respecto a tierra. El optoacoplador filtra eficazmente este ruido.
- Transitorios: Picos de voltaje breves y altos causados por la conmutación de grandes cargas o relámpagos. La barrera óptica ayuda a suprimir estos picos antes de que lleguen al CPU.

Concepto Involucrado II: Lazos de Tierra y Aislamiento



En grandes instalaciones, las diferencias de potencial de tierra entre el PLC y los sensores distantes pueden crear Lazos de Tierra (Ground Loops), causando que una corriente indeseada circule por el cable de tierra y corrompa la señal.

- El Aislamiento Galvánico del optoacoplador rompe la

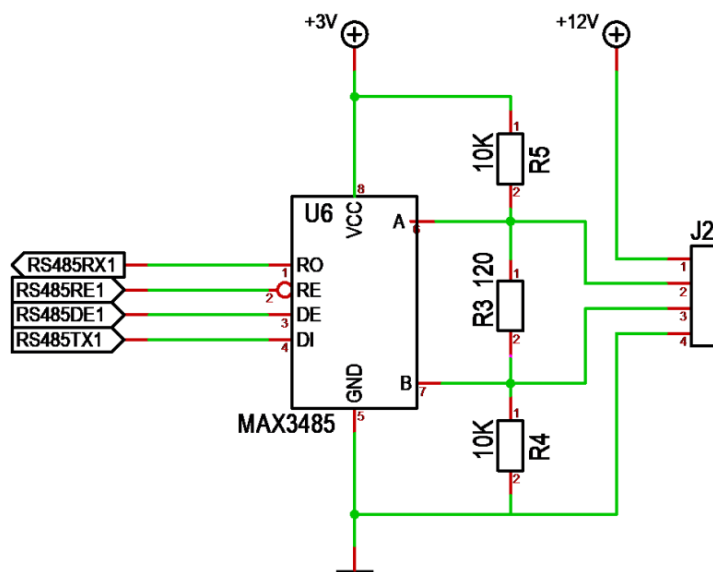
continuidad eléctrica entre las tierras del campo y las tierras de la lógica. Esto previene la formación de lazos de tierra y es vital para la estabilidad a largo plazo del sistema de control.

11. Interface RS-485

La Interfaz RS-485 no es un protocolo, sino un estándar eléctrico (capa física) que define cómo se deben transmitir las señales digitales a través de cables en entornos ruidosos y a largas distancias. Su robustez lo convierte en la elección fundamental para redes de comunicación serial en la automatización industrial (Fieldbus).

Concepto I: Inmunidad al Ruido por Señalización Diferencial

El RS-485 se basa en la Señalización Diferencial, el factor clave de su fiabilidad:



- Principio: Los datos se codifican mediante la diferencia de voltaje entre dos líneas de transmisión trenzadas, denominadas A (invertida) y B (no invertida). Un estado lógico "1" podría ser cuando el voltaje de A es más bajo que el de B, y un "0" viceversa.
- Rechazo al Ruido de Modo Común (CMR): El ruido electromagnético ambiental (EMI), generado por motores, variadores o soldaduras, se acopla por igual a ambas líneas (A y B). El receptor RS-485, al medir solo la *diferencia* entre A y B, ignora la señal de ruido común. Esto le confiere una inmunidad superior a la de los sistemas de tierra simple como RS-232.
- Longitud y Velocidad: Gracias a esta inmunidad, el RS-485 puede operar confiablemente hasta 1,200 metros (4,000 pies). Existe un *trade-off* físico: a mayor

distancia, menor es la velocidad máxima de datos (típicamente 10 Mbps a corta distancia, bajando a 100 kbps a 1,200 m).

Concepto II: Terminación y Polarización del Bus (Biasing)

Para la estabilidad de la red, especialmente en modo *Half-Duplex*, se requieren dos elementos pasivos cruciales:

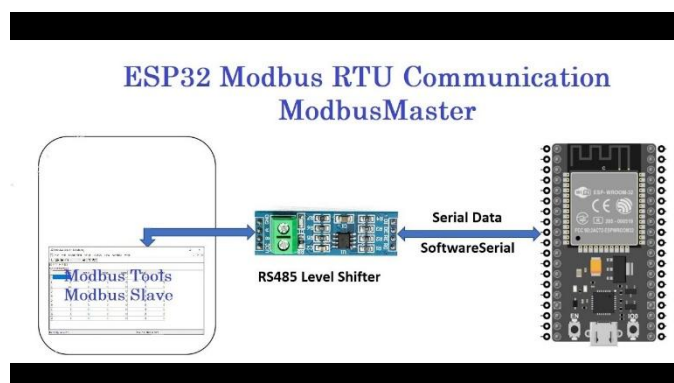
1. Terminación (Resistores de 120Ω): Colocar resistores de 120 ohmios en ambos extremos del bus lineal es vital. La resistencia iguala la impedancia característica del cable, absorbiendo la energía de la señal y evitando que se refleje hacia atrás, lo que corrompería las tramas de datos.
2. Polarización (Biasing): En el modo *Half-Duplex* (la mayoría de las redes Modbus), cuando ningún dispositivo está transmitiendo, el bus queda en un estado flotante (sin un voltaje de referencia claro), lo que puede causar errores. La polarización utiliza un par de resistores (pull-up/pull-down) para forzar un voltaje diferencial de reposo conocido (por ejemplo, +200 mV) en el bus. Esto asegura que los receptores interpreten correctamente el bus silencioso como un estado lógico "1" o "0" constante, evitando tramas basura.

Concepto III: Arquitectura Multipunto (Bus Lineal)

El RS-485 es el estándar de comunicación multipunto por excelencia.

- Topología: Requiere una topología de bus lineal (daisy-chain), donde los cables van de un nodo al siguiente. Las topologías en estrella o anillo no están permitidas sin puentes o repetidores activos.
- Capacidad: El estándar original permitía 32 Cargas Unitarias (Unit Loads). Los transceptores modernos de baja potencia (1/8 UL) han aumentado esta capacidad a 256 nodos en el mismo bus físico.

12. Protocolo Mod-Bus implementado en el ESP32



Modbus es el lenguaje que se utiliza sobre el cableado RS-485 para organizar el intercambio de datos. El Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) es la variante binaria y compacta que se utiliza en estas redes seriales, y su implementación en el ESP32 lo convierte en un nodo de IoT Industrial potente y flexible.

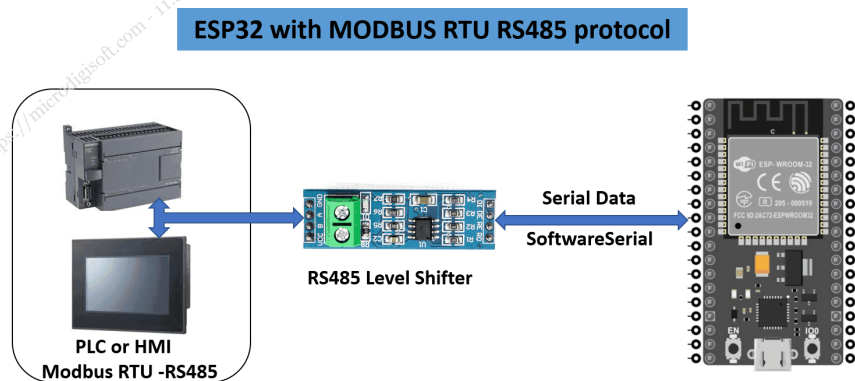
Concepto I: Transición de Capa Física (TTL a RS-485)

El microcontrolador ESP32 utiliza señales de lógica serial TTL (típicamente 3.3V). Para que estas señales puedan viajar por el bus RS-485 (>1,200 m), se requiere un adaptador de hardware: el Transceptor RS-485 (ej. MAX485):

- **Conversión de Nivel:** El transceptor toma las señales 0V/3.3V del pin UART del ESP32 y las transforma en las señales diferenciales de $\pm 5V$ (o similar) que viajan por las líneas A y B.
- **Control del Bus (Pin DE/RE):** Debido a que el bus es *Half-Duplex*, el ESP32 debe gestionar con precisión la dirección del flujo de datos utilizando un pin de Propósito General (GPIO) conectado al pin DE/RE (*Driver Enable / Receiver Enable*) del transceptor:
 - **Transmisión:** El ESP32 pone DE/RE en ALTO (High) e inmediatamente envía la trama.
 - **Recepción:** Una vez que la trama ha salido (detectando el fin de transmisión del UART), el ESP32 debe rápidamente poner DE/RE en BAJO (Low) para que el chip se configure para escuchar el bus y recibir la respuesta del esclavo. La gestión de este *timing* es crítica y es manejada por las librerías de software Modbus.

Concepto II: Modelo de Datos y Direccionamiento Lógico

El ESP32, ya sea como Maestro o Esclavo, interactúa directamente con los cuatro tipos de registros de memoria Modbus:



Registro Modbus	Función Típica	Rol del ESP32
Coils (Bobinas)	Salidas binarias (control ON/OFF de un relé).	El ESP32 (Maestro) las escribe para activar un relé externo; el ESP32 (Esclavo) las expone para ser controlado.
Input Registers	Entradas analógicas de Lectura (lecturas de sensores).	Solo El ESP32 (Esclavo) almacena aquí los datos de su sensor local (temperatura/humedad) para ser consultados por un PLC.

Registro Modbus	Función Típica	Rol del ESP32
Holding Registers	Valores de configuración (velocidad, consigna de temperatura).	El ESP32 (Maestro) los lee y escribe para configurar dispositivos.

Concepto III: El ESP32 como Gateway IIoT (Internet Industrial de las Cosas)

La verdadera potencia de esta implementación es que el ESP32 puede actuar como un Gateway (puerta de enlace) de Protocolo:

1. Conversión de Medios: Lee datos seriales (Modbus RTU/RS-485).
2. Conversión a Red: Utiliza su módulo Wi-Fi o Ethernet para enviar esos datos a una capa de red superior, típicamente utilizando protocolos de mensajería IoT como MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) hacia un servidor en la nube (AWS, Google Cloud) o una plataforma SCADA.

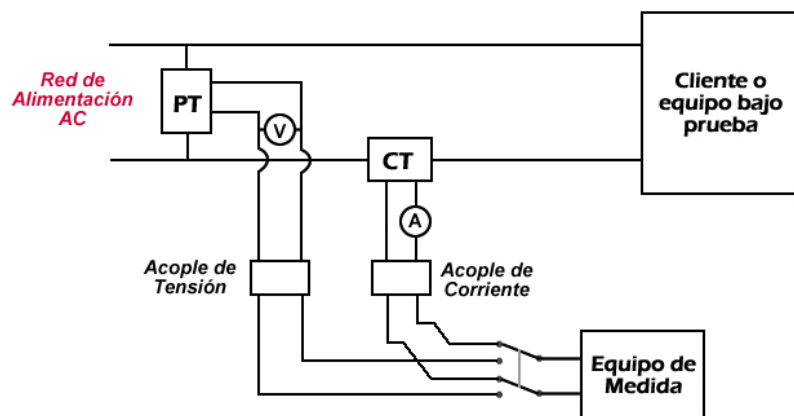
13. Medición de CT y AC (investiguen IC para medición de energía preferiblemente I2C y opcional el SPI)

El Transformador de Corriente (CT) es el dispositivo indispensable para medir altas corrientes AC de manera segura en un sistema electrónico.

Principio de Funcionamiento

Un CT opera bajo el principio de la inducción electromagnética, similar a un transformador de voltaje:

1. Primario (Línea de Potencia): El conductor de alta corriente (la línea viva) pasa a través del núcleo del CT. Esta corriente primaria (I_p) genera un campo magnético.
2. Secundario (Bobina de Medición): Una bobina de muchas vueltas (espiras) capta el campo magnético. La corriente inducida en esta bobina secundaria (I_s) es proporcional a la corriente primaria, pero drásticamente reducida.
3. Relación de Transformación: La relación ($N_p:N_s$) de las espiras define la reducción. Por ejemplo, un CT de 1000:1 convierte 100 Amperios en el primario a 100 miliamperios en el secundario, o 100 A/5 A convierte 100 A a solo 5 A. Esto aísla galvánicamente el circuito de medición (el IC) de la línea de alta tensión.



Concepto Involucrado I: Carga (Burden)

La Carga (*Burden*) es la impedancia total (resistencia) conectada a la bobina secundaria del CT. Es una resistencia de precisión (R_{burden} o R_L) que se utiliza para convertir la pequeña corriente secundaria (I_s) en un voltaje medible (V_{CT}) para el IC:

$$V_{CT} = I_s \cdot R_{burden}$$

El valor de esta resistencia es crítico para que el voltaje no exceda los límites del ADC (Conversor Analógico a Digital) del IC de medición.

Concepto Involucrado II: Peligro de Circuito Abierto

Es la regla de seguridad más importante: Nunca se debe abrir el secundario de un CT (desconectar la Carga) mientras la corriente fluya por el primario.

- Si la carga se desconecta ($R_L \rightarrow \infty$), el transformador intenta mantener la corriente secundaria constante. Esto provoca un aumento explosivo del voltaje en el secundario ($V = I_s \cdot R_L$), generando picos peligrosísimos que pueden destruir la electrónica y poner en riesgo la vida. Siempre se debe cortocircuitar la salida del CT antes de cualquier manipulación si la línea está energizada.

2. Circuitos Integrados para la Medición de Energía (Power Monitoring ICs)

Los ICs especializados en medición de energía son microprocesadores dedicados que realizan la adquisición de datos de voltaje y corriente, y luego utilizan un Procesador de Señal Digital (DSP) interno para realizar complejos cálculos energéticos.

Medición AC: El Valor RMS

Para medir la potencia real en AC, el IC debe calcular el valor RMS (Root Mean Square - Raíz Cuadrática Media) de las señales de voltaje y corriente. El RMS es el valor efectivo de una señal AC que produciría el mismo calor que una señal DC equivalente:

$$\text{Valor RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt}$$

El IC utiliza conversores A/D de muy alta resolución (generalmente 16 a 24 bits) para muestrear miles de veces por segundo las ondas de voltaje y corriente, realizando la integración y el cálculo RMS en tiempo real.

Conceptos Calculados por el IC

Un IC de medición de energía avanzado proporciona todos estos valores esenciales a través de su interfaz digital:

- Potencia Activa (W): Energía real consumida o suministrada (la energía que hace trabajo).
- Potencia Reactiva (VAR): Energía que fluye de un lado a otro (asociada a campos magnéticos/eléctricos).
- Energía (kWh): La integración de la potencia activa en el tiempo.
- Factor de Potencia (PF): La relación entre la potencia activa y la aparente; crucial para la eficiencia.

3. Recomendaciones de ICs para Medición de Energía (I2C y SPI)

Para el monitoreo de energía en un microcontrolador como el ESP32, se recomiendan los ICs de la serie ADE de Analog Devices y alternativas robustas, priorizando las interfaces solicitadas.

Opción Preferida (I2C y SPI)

IC Recomendado	Fabricante	Interfaz	Descripción y Aplicación
ADE7953	Analog Devices	I2C y SPI	Es un IC de alto rendimiento para medición de energía monofásica. Utiliza dos ADCs Sigma-Delta de alta precisión. Es ideal porque su interfaz digital es seleccionable (I2C o SPI), ofreciendo la flexibilidad requerida. Mide simultáneamente voltaje, corriente, potencia activa, reactiva y aparente.
PZEM-017	Peacefair	UART (Modificado)	Aunque usa UART (serial), es extremadamente popular y accesible en la comunidad Maker/IoT. Mide hasta 300 A y a menudo se integra fácilmente en proyectos con ESP32 gracias a librerías dedicadas.

Opción Alternativa (Alto Rendimiento / SPI)

IC Recomendado	Fabricante	Interfaz	Descripción y Aplicación
ADE7758	Analog Devices	SPI	Un medidor de energía trifásico de alto rendimiento. Aunque se centra en SPI, es la opción si el proyecto escala a la medición de sistemas trifásicos y se requiere una precisión de clase de metrología.
MCP39F521	Microchip	SPI	Un chip completo de monitoreo de energía que ofrece un motor de cálculo robusto. Es una excelente alternativa si

IC	Fabricante	Interfaz	Descripción y Aplicación
Recomendado			

se trabaja con el ecosistema de Microchip, proveyendo todos los valores energéticos necesarios a través de la interfaz SPI.

El Papel del Microcontrolador (ESP32)

El ESP32 interactúa con estos ICs (usando I2C o SPI) para leer los registros que contienen los valores de energía y potencia calculados. Luego, el ESP32 utiliza sus capacidades Wi-Fi/Bluetooth para enviar estos datos a una base de datos o a un servicio en la nube (IIoT), completando el ciclo de monitoreo energético