



Luis Andrés González De Peña

Matricula: 2020-10390

Materia: Electiva Mecatrónica

Maestro: Carlos Pichardo

Tarea #3

Investigación sobre filtro antialiasing (teoría del muestreo)

El filtro antialiasing es un filtro pasa-bajos que se coloca antes del proceso de muestreo en un sistema de adquisición de señales (como conversores analógico-digitales, ADC).

Su función principal es eliminar o atenuar las componentes de alta frecuencia que pueden causar aliasing, es decir, una distorsión o solapamiento de frecuencias cuando la señal se digitaliza.

El propósito del filtro antialiasing es eliminar toda presencia, antes de hacer el muestreo, de las frecuencias superiores a $F_e/2$, siendo F_e la frecuencia muestreo.

La explicación teórica de la necesidad de utilizar una frecuencia de muestreo del doble de las frecuencias que se quieren obtener viene dada por teorema de muestreo de Nyquist-Shannon. El uso del filtro antialiasing previo a la discretización de los datos es necesario ya que al discretizar aparece una réplica espectral de la señal muestreada desplazada a la frecuencia de muestreo y a sus múltiplos. Esta réplica espectral puede mezclarse con la señal deseada y por ello la necesidad de dicho filtro.

Teoría del muestreo

Este teorema es la piedra angular del proceso de digitalización y establece la frecuencia mínima a la que una señal analógica debe ser muestreada para poder ser reconstruida perfectamente a partir de sus muestras discretas.

$$\text{Frecuencia de Muestreo}(f_s) \geq 2 \cdot f_{\max}$$

Donde:

- f_s es la frecuencia de muestreo (muestras por segundo).
- f_{\max} es la máxima frecuencia contenida en la señal.

El valor $f_N = f_s/2$ se conoce como la Frecuencia de Nyquist (o tasa de Nyquist). Para evitar el error de aliasing, la señal debe estar limitada en banda, es decir, no contener componentes de frecuencia mayores a f_N .

Función del filtro antialiasing

El Filtro Antialiasing (AAF) es un filtro paso bajo (Low-Pass Filter) analógico que se coloca antes del ADC en el circuito de adquisición de datos.

- Función Principal: Restringir el ancho de banda de la señal de entrada para asegurar que ninguna componente de frecuencia por encima de la frecuencia de Nyquist (f_N) llegue al ADC.
- Implementación en Mecatrónica: Los sensores a menudo producen ruido de alta frecuencia o contienen componentes de frecuencia que están fuera de nuestro rango de interés, pero que podrían causar aliasing. El AAF elimina estas frecuencias no deseadas antes del muestreo.

Otras funciones importantes:

1. Proteger el convertidor A/D de señales de alta frecuencia no deseadas.
2. Reducir el ruido fuera de banda.
3. Mejorar la calidad de reconstrucción de la señal digital.
4. Asegurar el cumplimiento del teorema de Nyquist.

Tipos de filtros antialiasing

- a) Filtros analógicos:

Se colocan **antes** del ADC.

- Generalmente son **pasa-bajos activos o RC pasivos**.
- Su frecuencia de corte se ajusta justo por debajo de $f_s/2$.

Ejemplo:

Si $f_s = 10 \text{ kHz}$, entonces el filtro se diseña con un $f_c \approx 4.5 \text{ kHz}$.

- b) Filtros digitales:

- Se aplican después del muestreo para mejorar aún más la eliminación de componentes fuera de banda.
- Usan algoritmos DSP (Digital Signal Processing).

Aplicaciones

- Conversores A/D en sistemas de audio, instrumentación o control.
- Sensores analógicos conectados a microcontroladores o FPGAs.
- Mediciones de señales en osciloscopios y tarjetas de adquisición.
- Sistemas de comunicaciones (radiofrecuencia, modulación, etc.).

Características del Filtro

Un AAF ideal sería un "filtro de pared de ladrillo" (brick-wall filter), que tendría una ganancia de 1 en la banda de paso (hasta fN) y una ganancia de 0 inmediatamente después. Sin embargo, en la práctica:

- Es un Filtro Analógico: Ya que opera sobre la señal continua antes de la digitalización.
- Banda de Transición: Los filtros reales tienen una banda de transición donde la atenuación cambia de la banda de paso a la banda de rechazo.
- Frecuencia de Corte (fc): Se selecciona una frecuencia de corte fc menor a la frecuencia de Nyquist ($fc < fN$) para dar margen a la pendiente de atenuación del filtro y asegurar que la atenuación sea máxima en fN.
- Topologías Comunes: En mecatrónica se suelen usar filtros activos (con amplificadores operacionales) con topologías como Sallen-Key o Múltiple Feedback, que ofrecen órdenes altos (mayor pendiente, mejor atenuación) sin requerir inductores voluminosos. Filtros como Butterworth (respuesta más plana en la banda de paso) o Chebyshev (mejor atenuación en la banda de rechazo, pero con rizado) son opciones comunes.

Esquemáticos

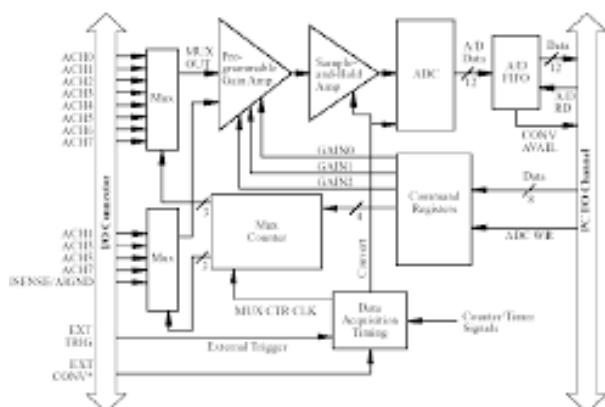
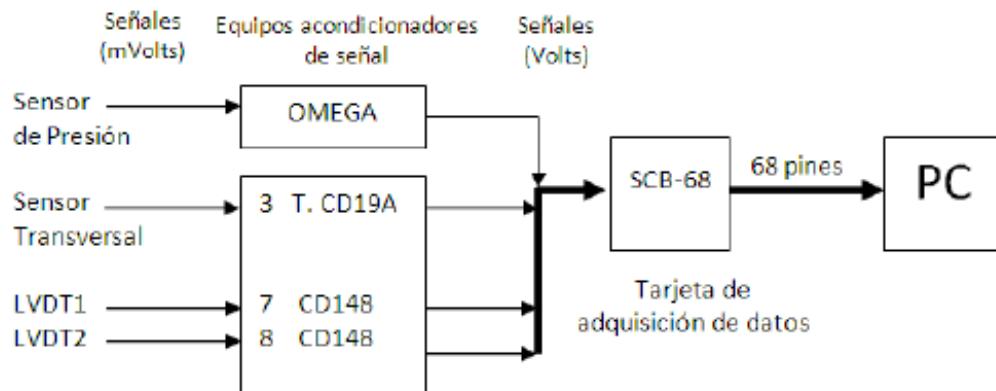
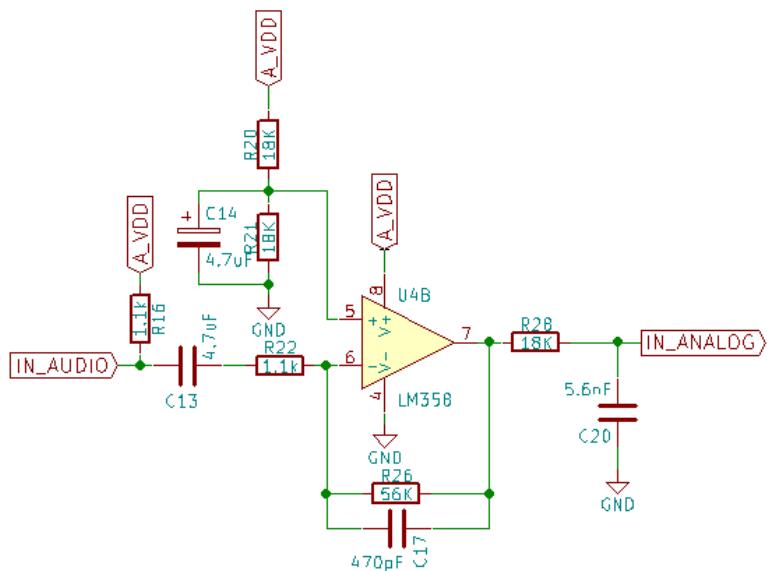


Diagrama de bloques de las entradas analógicas de la tarjeta NI Lab-PC+

III. Implicaciones en Mecatrónica

Como estudiante del Área de mecatrónica, aquí tenemos una comprensión de los AAF se aplica en varios subsistemas:

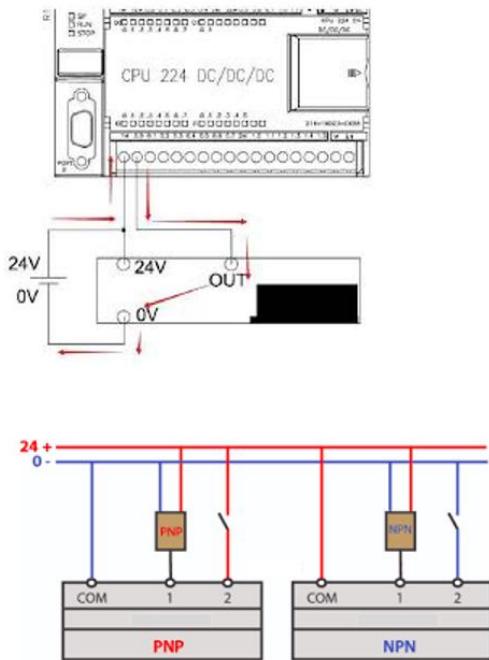
Subsistema Mecatrónica	Aplicación del AAF
Adquisición de Datos (DAQ)	Esenciales en todos los canales de medición (sensores de fuerza, presión, acelerómetros). Un AAF mal diseñado puede llevar a un control erróneo basado en lecturas falsas.
Control de Movimiento	Si se muestrea la señal de un encoder de motor o tacómetro a una frecuencia insuficiente, el aliasing puede hacer que el controlador de movimiento detecte una velocidad incorrecta o una oscilación fantasma, llevando a inestabilidad.
Diseño de Circuitos	Debes saber cómo seleccionar la topología (ej. Sallen-Key), el orden (ej. 4to orden) y los componentes (R,C) para lograr una frecuencia de corte (fc) y una tasa de atenuación adecuadas para tu fs.
Visión Artificial	El concepto de aliasing se extiende al aliasing espacial (ej. patrón de Moiré). El AAF óptico de la cámara actúa como un filtro de paso bajo espacial.
Procesamiento de Señales	El uso del AAF permite el sobremuestreo (oversampling), donde se elige una fs mucho mayor a 2fmax, lo que facilita el diseño de un AAF analógico menos abrupto y permite el uso de filtros digitales posteriores.

3. Investigación sobre los esquemáticos que necesitamos para el proyecto

1. Entradas PNP

Las entradas PNP en un PLC (Controlador Lógico Programable) son aquellas que trabajan con señales de tipo positivo, es decir, que se activan cuando reciben un voltaje positivo, generalmente de +24V. Este tipo de entrada se denomina también “entrada de fuente” o “sourcing input”, ya que el dispositivo o sensor conectado a la entrada es el que suministra la corriente hacia el PLC. En este tipo de conexión, el común (COM) del módulo de entradas del PLC se encuentra conectado al negativo o tierra del sistema.

En la práctica, una entrada PNP detecta un estado lógico alto cuando recibe corriente desde un sensor o dispositivo de campo que, al activarse, conecta su salida al voltaje positivo. De esta manera, el PLC interpreta el valor “1” lógico cuando el sensor envía +24V y el valor “0” cuando la entrada queda a nivel bajo o desconectada. Este comportamiento hace que las entradas PNP sean muy utilizadas en la industria por su compatibilidad con la mayoría de sensores industriales, como los de proximidad, final de carrera, o detectores fotoeléctricos.



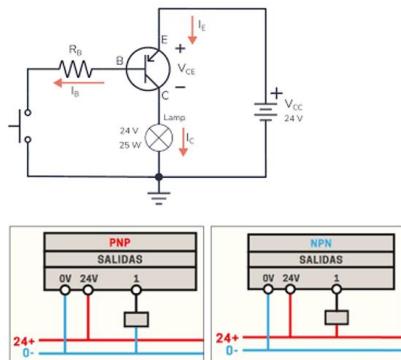
La principal característica de una entrada PNP es que trabaja con sensores o dispositivos de salida PNP, los cuales suministran corriente hacia la entrada del PLC. En este sistema, la corriente fluye desde el positivo de la fuente de alimentación, atraviesa el sensor cuando se activa y llega al terminal de entrada del PLC, completando el circuito hacia el negativo común. Este tipo de conexión resulta más segura frente a fallas eléctricas, ya que una conexión accidental con tierra no genera activaciones falsas ni daños graves.

2. Salidas PNP

Una salida PNP en un PLC se conoce como salida de fuente, porque entrega corriente positiva (+V) al dispositivo que controla, ya sea una lámpara, relé, solenoide o actuador. En este tipo de configuración, el común de salida (COM) se conecta al 0 V (GND) del sistema, mientras que el transistor o etapa de conmutación del PLC suministra el voltaje positivo hacia la carga cuando la salida se activa.

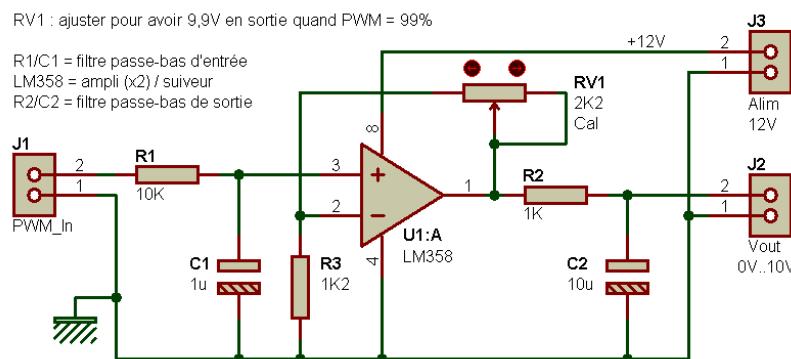
Internamente, cada canal de salida PNP suele implementarse con un transistor NPN en configuración de alta, o bien con un transistor PNP de potencia, dependiendo del diseño. En muchos PLCs industriales o educativos, la salida PNP se implementa mediante un driver de transistor o MOSFET de canal P, acompañado de un diodo de protección

(flyback) cuando la carga es inductiva, como en el caso de un relé o solenoide. Además, se incluyen resistencias limitadoras, diodos de rueda libre, y optocopladores para aislar la lógica del microcontrolador o del microporcesador interno, garantizando que los picos de tensión externos no afecten el circuito digital del PLC.



3. Entrada 0-10V

Corresponde a una salida analógica que entrega una señal de control variable entre 0 y 10V. Se usa para manejar equipos como variadores de frecuencia, válvulas proporcionales o controladores de iluminación. Representa una magnitud continua en función del valor de salida del PLC. Es una forma común de controlar dispositivos analógicos en automatización.



El circuito de entrada analógica incluye varias etapas de acondicionamiento de señal para proteger y adaptar la medición:

1. Divisor resistivo o red atenuadora: ajusta el rango de voltaje de entrada a un nivel seguro (típicamente 0–5 V o 0–3.3 V) compatible con el ADC del microcontrolador.
2. Filtro RC (resistencia + condensador): suaviza variaciones rápidas y elimina ruido de la línea.
3. Diodos de protección (clamp diodes): evitan que picos de tensión superiores al rango dañen el circuito.

4. Amplificador operacional buffer (op-amp): proporciona impedancia alta de entrada y aislamiento entre el sensor y el ADC.

5. Referencia de tierra común (GND): asegura que tanto el sensor como el PLC comparten la misma referencia de potencial.

De esta forma, el sistema garantiza una lectura estable, precisa y segura, incluso en entornos industriales donde las interferencias electromagnéticas pueden ser significativas.

4. Salida 0-10V

Las salidas analógicas de 0–10 V permiten que el PLC controle dispositivos de manera proporcional, enviando una señal de voltaje continuo que varía entre 0 V (mínimo) y 10 V (máximo). Este tipo de salida se utiliza ampliamente para regular variadores de frecuencia, controladores de velocidad, válvulas proporcionales, actuadores lineales, dimmers de luz o servos industriales, ya que permite un control suave y preciso del proceso.

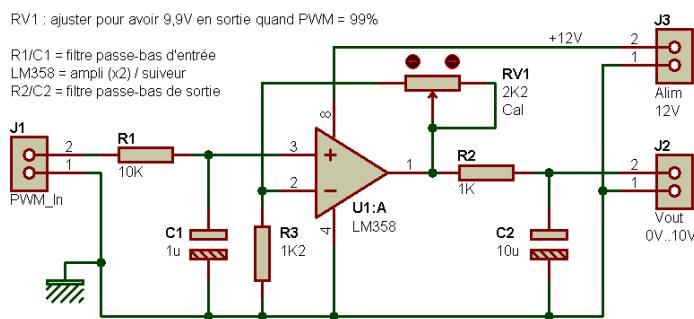
A diferencia de una salida digital (que solo puede estar encendida o apagada), la salida de 0–10 V entrega niveles intermedios que representan porcentajes de acción. Por ejemplo, 5 V equivalen al 50 % de la velocidad o apertura, mientras que 10 V representarían el 100 %.

Funcionamiento general

Cuando el programa del PLC asigna un valor digital (por ejemplo, una consigna del 70 %), el DAC genera un voltaje proporcional (≈ 7 V).

El amplificador operacional estabiliza y amplifica la señal, y el filtro elimina cualquier componente de ruido, entregando una salida analógica limpia entre 0 V y 10 V.

El dispositivo conectado (por ejemplo, un variador) interpreta ese nivel de tensión como una instrucción de control proporcional (70 % de velocidad, apertura, brillo, etc.).



5. Entrada 4–20 mA

Las entradas analógicas de 4–20 mA permiten al PLC leer señales proporcionales a una variable física (como temperatura, nivel, presión, flujo, etc.) representadas por una corriente eléctrica continua dentro de ese rango.

Este tipo de señal es el estándar industrial más usado porque es muy inmune al ruido electromagnético y no sufre pérdidas significativas en largas distancias de cableado.

Un transmisor de 4–20 mA convierte la magnitud física en corriente, de modo que 4 mA representa el valor mínimo (0 %) y 20 mA el valor máximo (100 %). Además, si la corriente baja a 0 mA, el PLC puede interpretar que hay falla o cable roto, lo cual agrega seguridad al sistema.

Internamente, el circuito de entrada incluye una resistencia de shunt o de sensado (normalmente de 250 Ω).

La corriente del transmisor pasa por esta resistencia, generando un voltaje proporcional (1–5 V) que el ADC del PLC puede leer.

También incorpora protección contra picos de corriente o inversión de polaridad mediante diodos y filtros RC.

6. Salida 4–20 mA

Las salidas analógicas de 4–20 mA permiten que el PLC controle dispositivos de campo enviando una corriente proporcional al valor calculado por el programa.

Se usan comúnmente para variadores de frecuencia, válvulas de control, actuadores lineales y controladores PID, ya que la corriente mantiene precisión incluso en cables largos.

La señal se genera mediante un DAC (convertidor digital-analógico) y una etapa de control de corriente.

Esta etapa puede implementarse con un amplificador operacional y un transistor (BJT o MOSFET) configurado como fuente de corriente, de modo que la salida mantenga la intensidad exacta (entre 4 y 20 mA) sin importar la resistencia de carga.

7. Entradas NPN

Son entradas “sink” o de tipo negativo, que se activan cuando el sensor o dispositivo conectado lleva la señal al nivel bajo (0V). El COM del PLC se conecta al positivo (+24V). Los sensores NPN permiten que la corriente fluya desde el PLC hacia el sensor cuando está activo. Son más comunes en equipos de origen asiático.

Las entradas NPN son del tipo “de colector abierto a tierra”.

En esta configuración, el sensor o dispositivo de entrada conecta a 0 V (GND) cuando se activa.

Por eso, el común (COM) de las entradas del PLC se conecta al +24 V, y la entrada individual (I_x) se lleva a nivel bajo cuando el sensor se cierra.

Cuando la entrada NPN está en reposo, permanece en nivel alto (+24 V).

Al activarse el sensor, el transistor interno del sensor NPN “drena” corriente hacia tierra, haciendo que la entrada del PLC detecte un nivel lógico bajo (0), que se interpreta como “1 lógico” interno tras el acondicionamiento.

8. Salidas NPN

Estas salidas actúan como interruptores a tierra, conectando la carga al negativo cuando se activan. No entregan voltaje positivo, sino que permiten que la corriente fluya hacia el GND. Se emplean con dispositivos cuya otra terminal está conectada a +24V. Son útiles cuando se trabaja con sensores o circuitos NPN.

Este tipo de salida es muy común en equipos asiáticos o cuando los dispositivos externos comparten una línea positiva común.

Internamente, cada salida NPN incluye un transistor NPN de potencia, resistencia limitadora, diodo flyback (si la carga es inductiva) y optocoplador de control.

9. Driver Relay

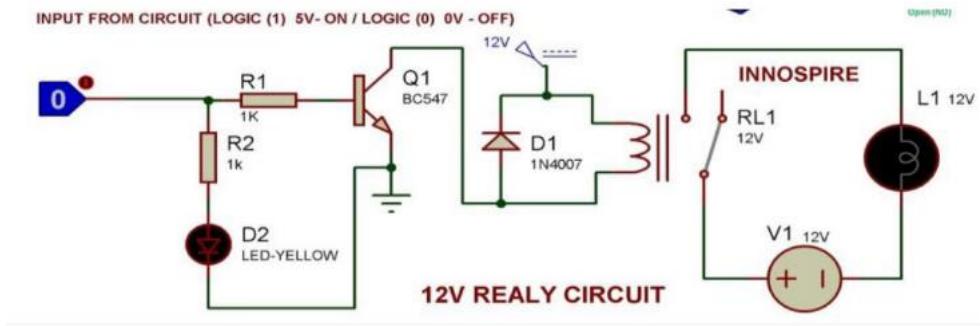
Un Driver Relay es una etapa de potencia intermedia que permite al PLC o microcontrolador activar relés u otros dispositivos que requieren más corriente o voltaje del que las salidas digitales pueden suministrar directamente.

El PLC entrega una señal lógica (por ejemplo, 3.3 V o 5 V), y el driver se encarga de amplificarla y aislarla para energizar la bobina del relé.

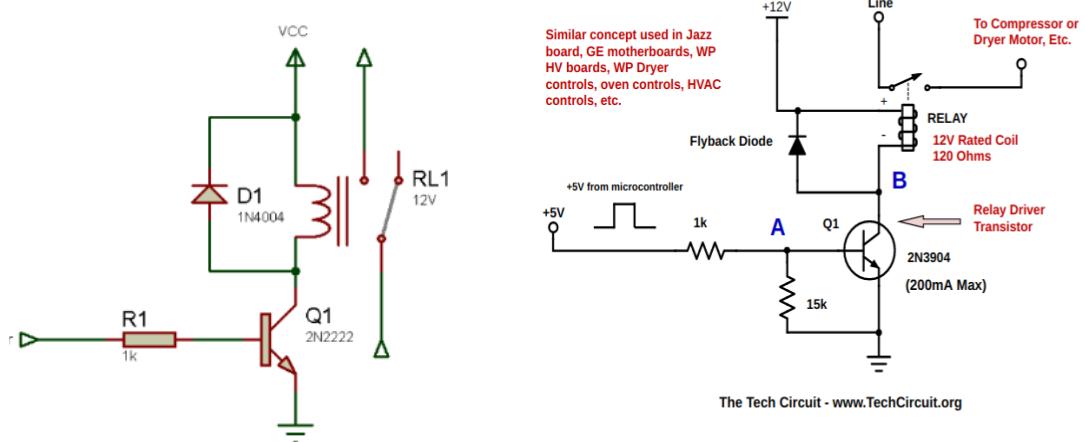
Es un circuito que permite controlar un relé mediante señales de baja potencia provenientes de un microcontrolador o PLC. Amplifica y aísla la señal para activar cargas mayores. Normalmente incluye un transistor, diodo de protección y el relé. Se usa para controlar motores, lámparas o equipos de alta corriente.

Etapas del circuito

- Transistor BJT o MOSFET: actúa como amplificador de corriente, saturándose cuando recibe la señal del PLC.
- Resistencia base o de puerta: limita la corriente que ingresa al transistor.
- Diodo Flyback: conectado en paralelo con la bobina del relé para disipar el pico de voltaje generado al desenergizarse.
- Fuente de 12 V o 24 V: alimenta la bobina del relé.
- Contacto del relé (NO/NC/COM): conmutan la carga externa.
- Optoacoplador (opcional): puede añadirse entre el PLC y el transistor para aislamiento eléctrico.



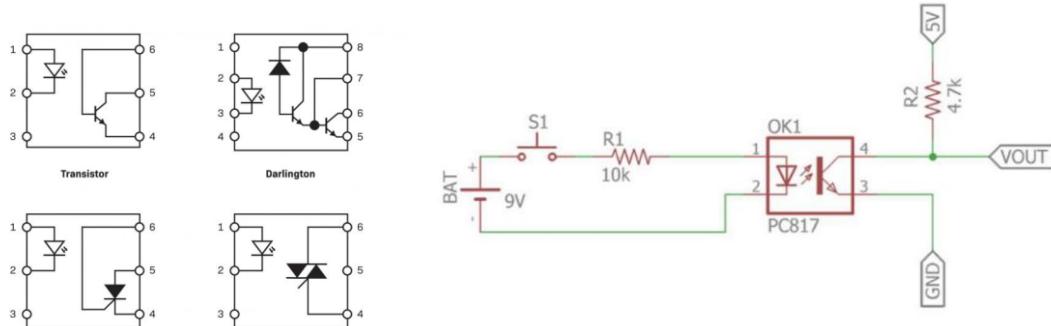
Typical Relay Driver Circuit
(simplified)



The Tech Circuit - www.TechCircuit.org

10. Entrada Digital con Optocoupler

Consiste en una entrada aislada eléctricamente mediante un optoacoplador, que usa un LED interno y un fototransistor. Permite proteger el PLC o microcontrolador de picos de voltaje o ruidos eléctricos. Se emplea para detectar señales de 0/1 lógicas provenientes de sensores, botones o interruptores. Garantiza aislamiento galvánico entre el sistema de control y el campo.



Una entrada digital con optocoupler (optoacoplador) se utiliza para aislar eléctricamente la señal externa (sensor, botón, contacto o dispositivo industrial) del circuito interno del PLC

Este aislamiento protege la lógica del controlador frente a sobretensiones, diferencias de potencial y picos de corriente, garantizando mayor seguridad y durabilidad.

El optoacoplador está compuesto por un LED interno y un fototransistor.

Cuando la señal externa aplica voltaje (por ejemplo, +24 V), el LED se ilumina; su luz activa el fototransistor, que genera una señal lógica dentro del PLC.

Como no existe conexión eléctrica directa entre ambos lados, se evita que una falla externa afecte la electrónica interna.

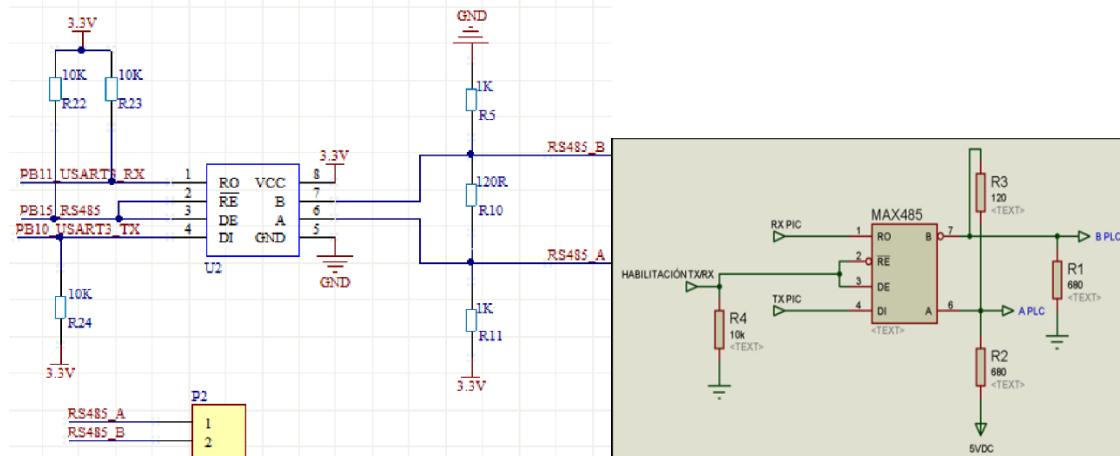
11. Interfaz RS-485

La interfaz RS-485 es un estándar de comunicación serial industrial utilizado para conectar múltiples dispositivos en red a largas distancias (hasta 1200 m).

Se caracteriza por su transmisión diferencial balanceada, lo que la hace resistente al ruido y muy estable incluso en entornos eléctricos adversos

Un PLC con puerto RS-485 puede comunicarse con sensores inteligentes, módulos de expansión, variadores o sistemas SCADA mediante protocolos como Modbus RTU, Profibus, o BACnet.

La conexión utiliza dos líneas: A (-) y B (+), que transportan señales opuestas para que cualquier interferencia sea cancelada en el receptor.

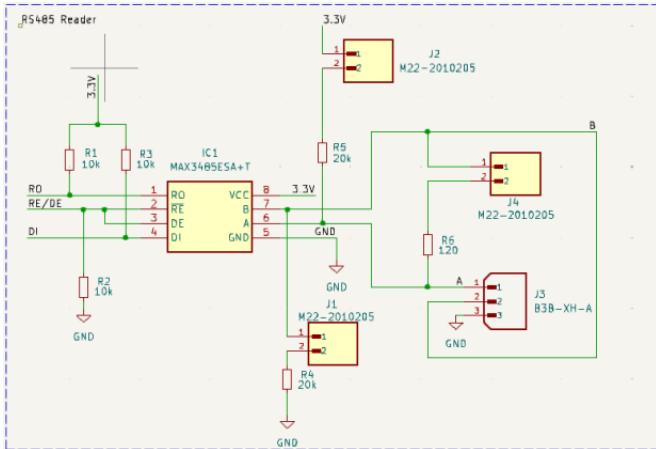


12. Protocolo Modbus implementado en el ESP32

Modbus es un protocolo de comunicación maestro-esclavo utilizado en automatización para intercambio de datos entre dispositivos. En el ESP32 puede implementarse vía RS-485 o TCP/IP, permitiendo comunicarse con PLCs, sensores o sistemas SCADA. Facilita la lectura y escritura de registros analógicos y digitales. Es simple, robusto y ampliamente adoptado en la industria.

El ESP32, gracias a sus capacidades de conectividad dual (UART + Wi-Fi) y su procesamiento en tiempo real, permite desarrollar un PLC educativo o industrial capaz de comunicarse con varios dispositivos simultáneamente.

Mediante la librería Modbus-ESP32 o ModbusMaster, se configura el microcontrolador como maestro (Master) o esclavo (Slave) para intercambiar registros (coils, inputs, holdings y inputs registers).



Tipos de implementación

1. Modbus RTU sobre RS-485

- Utiliza un transceptor diferencial como MAX485 o SN75176.
- Permite conectar hasta 32 dispositivos en un mismo bus físico.
- Comunicación half-duplex a través de las líneas A(–) y B(+).
- Velocidades típicas: 9600 a 115200 bps.

2. Modbus TCP sobre Wi-Fi

- Usa el stack TCP/IP del ESP32.
- Permite comunicación directa con SCADA, Node-RED o interfaces HMI a través de una red local (IP y puerto 502).
- No requiere hardware adicional, solo la configuración de IP estática o DHCP.

1. Medición de CT y AC (IC para energía con I2C o SPI)

La medición de corriente y voltaje alternos (AC) es esencial en sistemas PLC para monitorear el consumo eléctrico, detectar sobrecargas o calcular energía consumida.

En este tipo de medición se emplean dos elementos principales:

2. Transformadores de corriente (CT), y
3. Circuitos integrados especializados (ICs) para análisis de energía.

1. Transformador de Corriente (CT)

El CT (Current Transformer) permite medir corriente alterna sin necesidad de conexión directa al circuito de potencia.

Funciona con el principio del transformador: la corriente que pasa por el conductor primario induce una corriente reducida proporcional en el secundario, segura para el circuito electrónico.

Por ejemplo, un CT con relación 1000:1 entrega 1 A en el secundario cuando en el primario circulan 1000 A.

Esta corriente secundaria se convierte en un voltaje proporcional mediante una resistencia de carga (burden resistor), que luego es filtrado y muestreado por un ADC o un IC de medición de energía.

