

# 1. Filtro antialiasing / teoría del muestreo

## Teoría del muestreo y aliasing

- El **teorema de Nyquist-Shannon** dice que para poder reconstruir una señal analógica sin ambigüedad a partir de muestras digitales, la tasa de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia más alta presente en la señal, es decir (donde  $B$  es el ancho de banda de la señal).
- Si existen componentes de frecuencia superiores a  $f_s/2$  y no se filtran antes del muestreo, ocurrirá **aliasing**: esas frecuencias “se pliegan” y se mezclan con el contenido de frecuencia más bajo, creando artefactos y errores en la señal reconstruida.

## Filtro antialiasing (anti-aliasing filter)

- Para prevenir aliasing, se coloca un **filtro analógico pasa-bajo** justo antes del convertidor analógico-digital (ADC), de modo que las componentes de frecuencia por encima de  $f_s/2$  sean atenuadas bastante. Ese filtro es el filtro antialiasing (AAF).
- En la práctica, un filtro ideal (“brick-wall”) no es realizable, porque requeriría orden y latencia infinitos. Por eso los diseños reales adoptan ciertos compromisos (pendiente de atenuación, “roll-off” lento).
- A menudo se recurre a **oversampling** (muestrear a una frecuencia bastante mayor que la mínima teórica) precisamente para relajar los requisitos del filtro analógico: así el filtro puede tener una transición más suave y menos exigente.

## Diseño práctico

- Se elige una frecuencia de muestreo  $f_s$  con margen (por ejemplo 2.5 o 3 veces el ancho de banda de interés) para dar “holgura” al filtro.
  - Definir la frecuencia de corte  $f_c$  del filtro analógico para que quede algo por debajo de  $f_s/2$ .
  - Elegir el orden del filtro (por ejemplo 2.º, 4.º orden) y el tipo (Butterworth, Chebyshev, Bessel, etc.) según lo que se quiera optimizar (respuesta plana, fase lineal, rapidez).
  - Después del muestreo, frecuentemente se aplica un filtro digital para eliminar remanentes o ajustar la respuesta.
  - En aplicaciones rápidas (alta frecuencia), el filtro analógico es especialmente importante para eliminar ruido de alta frecuencia antes del ADC.
- [ww1.microchip.com+1](http://ww1.microchip.com+1)

## 2. Esquemáticos que necesitamos para el proyecto — conceptos generales

Para tu proyecto, que involucra muchas entradas/salidas analógicas, digitales, protocolos, etc., es importante que diseñes **bloques funcionales modulares** y luego los conectes. Algunos bloques clave:

- **Bloque de entradas:** acondicionamiento (amplificación, filtrado, limitación) para señales tipo 0–10 V, 4–20 mA, digital, PNP, NPN, etc.
- **Bloque de salidas:** drivers para actuar sobre actuadores, relés, salidas analógicas o digitales.
- **Aislamiento / protección:** optoacopladores, aislamiento de tierra, supresión de sobretensiones.
- **Conversión y configuración:** módulo RS-485, convertidores analógicos-digitales (ADCs), interfaz digital.
- **Controlador central:** un microcontrolador (ej. ESP32) que lee las entradas, ejecuta lógica, comunica (Modbus), genera salidas.
- **Bloque de medición de energía:** para medir corriente alterna (AC), transformadores de corriente (CT), tensión de línea, cálculo energía.
- **Fuente de alimentación y gestión de tierra:** alimentación del sistema, protección, referencias de voltaje.

Cada bloque debe tener un esquema claro: componentes clave, rangos de señal, aislamiento, interfaz con los demás bloques.

## 3. Entradas PNP / Salidas PNP / Entradas NPN / Salidas NPN

Estos son conceptos comunes en sensores industriales:

### NPN y PNP — definición básica

- Un sensor **NPN** “saca al terreno” (a GND) cuando se activa. Es comúnmente llamado “open collector” o “open emitter” según la implementación.
- Un sensor **PNP** “suministra positivo” (a la tensión de alimentación) al activar.
- En términos de señales lógicas: con NPN, al activar se conecta la carga al GND; con PNP, al activar la carga se conecta al V+.

## Entrada PNP / NPN (para el controlador)

- Si el controlador va a leer señales de sensores PNP o NPN, necesitas adaptadores que interpreten correctamente la polaridad y niveles.
- Por ejemplo, para una entrada PNP, cuando el sensor entrega tensión, podría energizar una entrada digital del microcontrolador (o interfaz).
- Con NPN, cuando el sensor conecta a tierra, el circuito de lectura debe reconocer esa condición.
- En un circuito de interfaz típico, se usan resistencia de pull-up / pull-down y transistores u optoacopladores para acomodar ambos tipos de señal.

## Salidas PNP / NPN

- Una salida PNP: el controlador entrega una tensión positiva para activar una carga.
- Salida NPN: el controlador conecta la carga a tierra (o la “jala al negativo”) para activarla.
- Estas salidas se usan para controlar relés, bobinas, actuadores, etc.
- En muchas tarjetas industriales de interfaz, se permite elegir entre NPN o PNP mediante jumpers, o tienen circuitos que aceptan ambos tipos.

## 4. Entrada 0–10 V / Salida 0–10 V

Estos rangos son comunes en señales analógicas industriales (control, actuadores, sensores):

- Una **entrada de 0 a 10 V** al controlador (o módulo de adquisición) implica que tu circuito debe lidiar con señales analógicas en ese rango, usualmente con un divisor de voltaje, amplificador/atenuador, protección contra sobretensiones, filtrado, y luego conectarlo a un ADC.
- Una **salida de 0 a 10 V** significa que el controlador o módulo debe generar esa señal para gobernar un actuador, variable de control, válvula, etc. Para eso se necesita un DAC (convertidor digital-analógico) o un circuito de salida analógica diseñado para ese rango, con capacidad de carga suficiente.
- En ambos casos, debes cuidar que la impedancia del circuito, precisión, tolerancias, ruido, offset, linealidad y aislamiento sean adecuados.

## 5. Entrada 4–20 mA / Salida 4–20 mA

- La señal **4–20 mA** es estándar en instrumentación industrial porque es menos susceptible al ruido en largas distancias y permite detección de circuitos abiertos (si cae a 0 mA, se reconoce como falla).
- Una **entrada de 4–20 mA** al sistema implica convertir esa corriente en un voltaje medible (por ejemplo con una resistencia de shunt de 250  $\Omega$  produciendo 1–5 V), luego acondicionarla y digitalizarla con ADC.
- Una **salida de 4–20 mA** desde el controlador requiere un circuito que controle la corriente de salida (por ejemplo mediante un amplificador de corriente o un convertidor voltaje→corriente) con la precisión adecuada.
- Estas salidas suelen tener compliance voltage (la tensión máxima permitida para mantener la corriente estable) y requieren diseño cuidadoso del circuito de control de corriente.

## 6. Driver Relay / Optocoupler / Interfaces digitales

### Driver de relé

- Un relé es una carga inductiva y puede requerir decenas o cientos de milivatios o más para activarse. Usualmente no deseas que el microcontrolador lo maneje directamente.
- Se usa un **controlador de relé**: un transistor (NPN o PNP) o un circuito integrado especializado, junto con diodo de protección (flyback) para absorber la tensión inversa generada cuando la bobina se desenergiza.
- También se puede usar un **optoacoplador + transistor externo** para aislamiento.

### Optocoupler para entrada digital

- Un **optocoupler** (o aislador óptico) permite aislar eléctricamente dos partes del circuito (por ejemplo la parte de potencia y la parte de control) mientras transmite una señal digital.
- En tu proyecto, una entrada digital optoaislada puede recibir señales de sensores o interruptores sin que las diferencias de potencial o ruido eléctrico dañen el microcontrolador.
- Para manejar sensores PNP y NPN con optoacoplador, se pueden diseñar circuitos que detecten si la señal está jalada hacia positivo o hacia tierra, y activar el LED interno del optoacoplador según la condición. [Arduino Forum](#)

## 7. Interfaz RS-485 / Protocolo Modbus con ESP32

### RS-485

- RS-485 es un estándar de comunicación diferencial para entornos industriales, robusto frente al ruido y capaz de comunicarse a largas distancias.
- Usa líneas diferenciales A/B para señal, lo que mejora la inmunidad al ruido.
- Para usarlo con un microcontrolador como el ESP32, necesitas un **transceiver RS-485 (driver/recibidor diferencial)** (por ejemplo un chip MAX-485, SN75176, etc.).
- También es común tener control de la dirección (DE/RE) para habilitar la transmisión o recepción en modo half-duplex.

### Protocolo Modbus

- Modbus es un protocolo de comunicación común en la automatización industrial. En RS-485 suele usarse **Modbus RTU**.
- Para usar Modbus con ESP32, existen bibliotecas como ModbusMaster para implementar maestro o esclavo.
- En la configuración física típica:
  - El maestro controla la línea DE/RE para habilitar la transmisión cuando envía datos.
  - Todos los nodos comparten la línea A/B, pero solo uno transmite a la vez.
- En el software, tienes que definir direcciones de esclavo, códigos de función (lectura de registros, escritura, etc.), manejo de tiempos de silencio, CRC, y buffers de comunicación.

## 8. Medición de corriente alterna (AC), transformador de corriente (CT) y chips IC para medición de energía

### Principio de CT

- Un **transformador de corriente (CT)** es un sensor pasivo que “abrazo” un conductor de fase y produce una corriente proporcional en su devanado secundario, ideal para medir corrientes sin cortar el circuito.
- Esa corriente secundaria se convierte en voltaje a través de una resistencia de carga (shunt) y se acondiciona para digitalizarla.
- Es importante que el CT esté bien dimensionado (relación de transformación, corriente nominal, carga máxima).

## Chips integrados de medición de energía

Aquí algunos ejemplos de ICs que integran funciones de medición de energía, y que se pueden conectar mediante interfaces digitales (I<sup>2</sup>C o SPI):

- **ADE7953**: un IC de medición de energía de una fase con interfaz I<sup>2</sup>C. Permite medir corriente RMS, voltaje RMS, energía activa/reactiva, etc.
- **ADE7816**: permite múltiples canales de corriente y un canal de voltaje, con interfaces SPI e I<sup>2</sup>C, ideal para medidores multipunto.
- **MAXQ314**: IC de energía de una fase con interfaz I<sup>2</sup>C, que mide corriente, voltaje, potencia activa, reactiva, factor de potencia.
- **MCP39F521** de Microchip: IC de monitoreo de potencia AC/DC con interfaz I<sup>2</sup>C, utilizado para medición de energía, potencia, tensión y corriente en fuentes, medidores, et

## Cómo integrarlos con ESP32

- Conectas el IC de medición a una interfaz IC o SPI del ESP32.
- El chip internamente tiene ADCs sigma-delta o integradores que hacen muestreo y procesamiento del voltaje y corriente.
- En el ESP32 lees los registros del IC (corriente RMS, voltaje RMS, energía acumulada, factor de potencia, etc.).
- En muchos proyectos de monitoreo energético con ESP32 se usa un CT (por ejemplo SCT-013) junto con una biblioteca (como Emonlib) para hacer cálculos de energía.

Un ejemplo de proyecto realiza lectura de corriente con ESP32 + sensor SCT-013 y calcula energía con Emonlib.

También existen diseños de medidores de energía expandibles para ESP32 con múltiples canales que usan chips SPI/I<sup>2</sup>C internamente.