



ITSSAT

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR
DE SAN ANDRÉS TUXTLA (I.T.S.S.A.T.)

DIVISIÓN INGENIERÍA MECATRÓNICA

IMCT-2010-229

***ELECTRONICA DE POTENCIA
APLICADA***

611-A

PERÍODO FEB-JUN 2025

DOCENTE

I.N.G JUAN MERLIN CHONTAL

***Unidad 4 Convertidores de energía
eléctrica***

4.3 Modulación PWM, SPEM

PRESENTA

| | |
|--|------------------------|
| <i>PÉREZ VILLEGAS PEDRO AARÓN</i> | <i>211U0625</i> |
| <i>TEOBAL HERRERA ROCIO</i> | <i>221U0562</i> |
| <i>QUINO CAIXBA PERLA JOSELIN</i> | <i>221U0555</i> |

SAN ANDRÉS TUXTLA, VER. A 09 DE JUNIO DE 2025

INTRODUCCIÓN

El análisis de una señal SPWM se vuelve esencial para validar el correcto funcionamiento de un sistema de modulación, asegurando que los parámetros como la frecuencia, el ciclo de trabajo y la forma de onda estén de acuerdo con el diseño previsto. Para llevar a cabo este análisis, el osciloscopio se convierte en una herramienta indispensable. A través del uso de este instrumento, es posible observar en tiempo real la forma de onda modulada, medir su ciclo de trabajo, verificar la frecuencia de la señal portadora y moduladora, así como identificar cualquier distorsión o error en la modulación.

Este experimento se enfoca en estudiar la señal SPWM generada por un circuito modulador, visualizar su comportamiento mediante un osciloscopio digital, y analizar las características claves de la modulación, tales como la relación de modulación, la frecuencia de conmutación y la forma de la onda resultante.

EXPOSICION





INVESTIGACIÓN

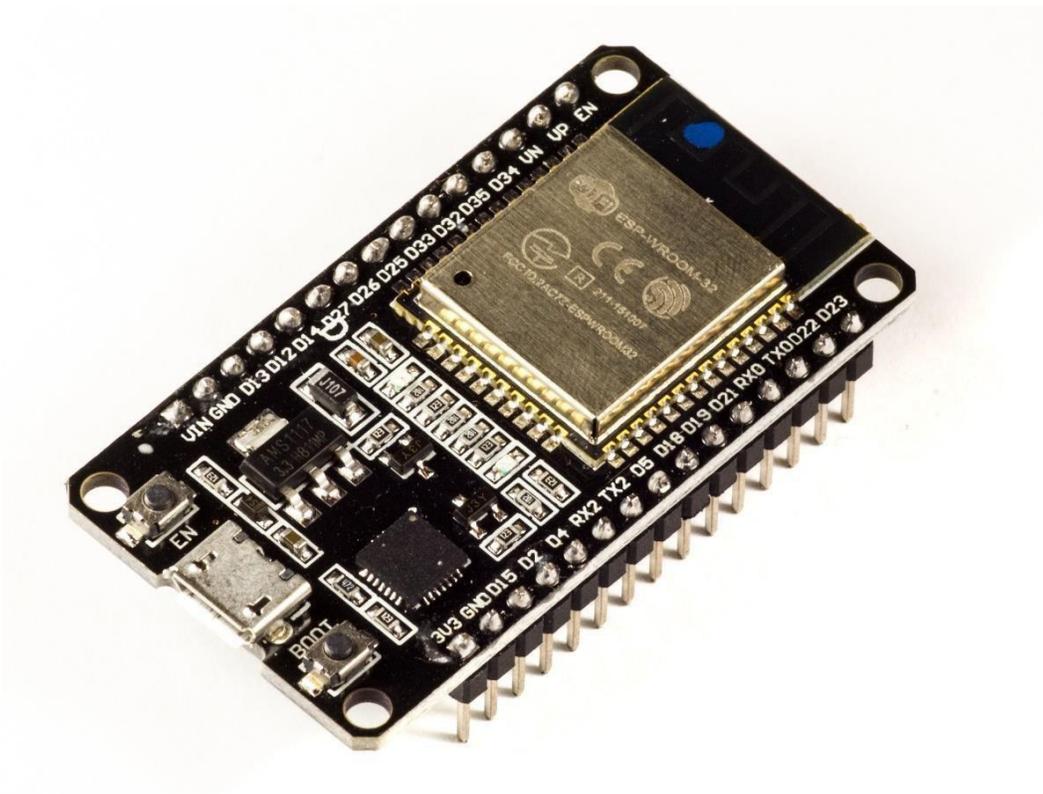
¿QUE ES UN ESP32?

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento, fabricado por Espressif Systems, muy popular en proyectos de electrónica, automatización y desarrollo IoT (Internet of Things).

Características principales del ESP32:

- Procesador: Dual-core Xtensa LX6 de 32 bits, hasta 240 MHz.
- Conectividad:
 - Wi-Fi integrado (802.11 b/g/n).

- Bluetooth 4.2 y BLE (Bluetooth Low Energy).
- Memoria:
 - SRAM y Flash interna (varía por modelo).
- Entradas/Salidas (GPIOs):
 - Decenas de pines digitales configurables como entrada/salida. ○ Capacidad de PWM, ADC (convertor analógico-digital), DAC, I2C, SPI, UART, etc.
- Periféricos avanzados:
 - Temporizadores, interrupciones, sensores táctiles, sensor Hall, etc.



Importancia del ESP32 para esta práctica

El ESP32 reúne varias características clave para esta aplicación:

1. DAC integrado: dos canales de 8 bits, capaces de generar directamente niveles de voltaje (0–3.3 V).
2. Conectividad WiFi: permite crear un punto de acceso y servidor web sin hardware adicional.
3. Potencia de cómputo: frecuencia de hasta 240 MHz, ideal para cálculos de seno y tiempos de muestreo precisos.
4. Timers y APIs flexibles: facilitan el control de intervalos de muestreo constantes.

¿Para qué funcionan las señales SPWM?

- **Inversores de potencia:** convertir corriente continua (DC) en alterna (AC) con formas de onda de alta calidad.
- **Control de motores:** variación suave de la velocidad y torque en motores de corriente alterna o de imanes permanentes.
- **Fuentes de alimentación conmutadas:** regulación eficiente de voltajes de salida.
- **Audio de alta fidelidad:** amplificadores clase D, en los que la SPWM modula la señal de audio para lograr muy baja distorsión.

Generación y Envío de la Señal SPWM

Generación de la Señal Senoidal

La señal que se genera es una **onda senoidal** continua, cuya forma se define mediante la función matemática:

$$\text{wave}(t) = A \cdot \sin(2\pi ft)$$

donde:

- A es la **amplitud** de la onda, que se ajusta de 0.1 V a 3.3 V a través de la interfaz web (valor mapeado en un rango de 0 a 255).
- f es la **frecuencia** de la señal, que puede variar entre 10 y 1000 Hz.
- T es el tiempo, que se calcula en función de los microsegundos desde el arranque del programa, lo que proporciona una base de tiempo precisa para la evolución de la señal.

La señal senoidal sigue una trayectoria de **valores entre -A y +A**. Para que el valor sea compatible con el **DAC del ESP32**, que solo acepta valores entre 0 y 255, la señal debe ser mapeada a un rango positivo. Esto se logra con la fórmula:

$$DACValue = \left(\frac{wave(t) + A}{2A} \right) \cdot 255$$

De esta forma, la onda senoidal (originalmente en el rango de -A a +A) se reescala para que encaje dentro del rango de 0 a 255, adecuado para el DAC de 8 bits.

ENVIO AL DAC _____

El valor calculado de la señal (un número entero entre 0 y 255) se envía al **DAC del ESP32**

En este caso, el pin utilizado para enviar la señal analógica es el **GPIO 25**, que está configurado para realizar la conversión digital-analógica interna del ESP32. Esto convierte el valor digital (0-255) en un voltaje analógico correspondiente, proporcionando una señal senoidal de salida en el rango de 0 a 3.3 V.

Frecuencia y Muestreo de la Señal

La frecuencia con la que se actualiza el valor de la señal depende del tiempo de muestreo. En el código, el temporizador se controla utilizando la función **micros()**, que devuelve el número de microsegundos desde el arranque del dispositivo. Esto permite calcular el tiempo exacto t y generar la señal con la frecuencia deseada:

- Se establece un intervalo de muestreo para garantizar que la señal se actualice a una frecuencia constante. En el código actual, la frecuencia de actualización se basa en un parámetro `samplesPerCycle`, que define cuántos puntos de datos se generan por ciclo de onda (cuantos más puntos, más suave será la onda generada).

Muestreo y Estabilidad

El ESP32 genera la señal senoidal en función del tiempo y escribe al DAC en intervalos de tiempo controlados. Este método asegura que la señal generada sea estable en frecuencia y amplitud, siempre que el intervalo de muestreo sea constante y adecuado para la frecuencia deseada. La estabilidad temporal es clave para obtener una señal sin distorsiones, y en este caso, el control del muestreo a través de la función `micros()` garantiza que se mantenga la precisión de la frecuencia.

En resumen, el **ESP32** calcula y genera la onda senoidal, ajustando su amplitud y frecuencia según los parámetros proporcionados por el usuario a través de la interfaz web. Esta señal se convierte a un valor adecuado para el DAC, que luego la convierte en una señal de voltaje real, que puede ser observada con un **osciloscopio** o utilizada para controlar dispositivos externos.

Rol del osciloscopio en SPWM

Permite visualizar forma de onda, duty cycle, frecuencias, tiempos de subida y armónicos. -Esencial para ajustar moduladora y portadora, sincronizar señales y validar que la onda resultante es estable y tiene bajo THD.

Funciones especializadas del osciloscopio al analizar SPWM

Modos de adquisición (Sample, Peak Detect, Average, Envelope): capturan transitorios, reducen ruido, ayudan a analizar rendimiento del sistema.

Triggering: permite capturar cuadros estables de la señal SPWM a través de trigger por flancos (rising edge).

Análisis de parámetros/Persistence: gráficos de seguimiento de duty cycle vs tiempo ayudan a ver modulación dinámica.

FFT (en muchos DSOs/MSOs): para analizar espectro y ver armónicos causados por SPWM.

Cursores: medir periodos (T), ancho de pulso (τ), voltaje pico-pico y niveles medios.

Principios de PWM y SPWM

1. **PWM**– Modulación por Ancho de Pulso

Definición: La Modulación por Ancho de Pulso (PWM, por sus siglas en inglés) es una técnica de control que consiste en variar el ancho (duración) de los pulsos en una señal periódica, manteniendo

constante la frecuencia de conmutación. Se utiliza comúnmente para regular la cantidad de energía entregada a una carga, como motores, LED o circuitos electrónicos, controlando el **ciclo de trabajo** (duty cycle).

- **Ciclo de trabajo (%):** Es la relación entre el tiempo en que la señal está "encendida" (estado alto) respecto al período total de la señal.

$$\text{Ciclo de trabajo} = \left(\frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{total}}} \right) \times 100$$

Principio de funcionamiento:

El voltaje promedio aplicado a la carga depende del ciclo de trabajo: a mayor tiempo en estado alto, mayor energía se transfiere. Esta técnica permite un control eficiente de potencia con mínima pérdida de energía, ya que los dispositivos de conmutación (como transistores) operan como interruptores en vez de como amplificadores.

2. **SPWM**– Modulación por Ancho de Pulso Senoidal

Definición: La Modulación por Ancho de Pulso Senoidal (SPWM) es una variante de PWM donde el ciclo de trabajo de los pulsos no es constante, sino que varía siguiendo el contorno de una señal senoidal de referencia. Esta técnica es ampliamente usada en inversores para convertir corriente continua (DC) en corriente alterna (AC) simulando una señal senoidal.

Principio de funcionamiento:

- Se compara una onda senoidal de baja frecuencia (la señal moduladora) con una onda triangular de alta frecuencia (la señal portadora).
- Cuando la señal senoidal es mayor que la triangular, se genera un pulso alto; cuando es menor, un pulso bajo.
- El resultado es una secuencia de pulsos cuya anchura cambia a lo largo del tiempo, siguiendo el perfil de la onda senoidal.
- Si se filtra esta señal SPWM, se obtiene una forma de onda aproximadamente senoidal.

Funcionamiento del SPWM

El funcionamiento del SPWM se basa en modular el ancho de los pulsos de una señal de alta frecuencia de manera que imiten el contorno de una onda senoidal. Esto se logra mediante la comparación entre dos señales:

- **Señal moduladora:** una onda **senoidal** de baja frecuencia (por ejemplo, 50 Hz o 60 Hz), que representa la forma de la señal de salida deseada (típicamente AC).
- **Señal portadora:** una onda **triangular** o **diente de sierra** de alta frecuencia (por ejemplo, varios kHz), que sirve como referencia para generar los pulsos.

Proceso de comparación:

1. **Comparación de señales:** Un comparador analógico o digital compara en tiempo real los valores instantáneos de la señal senoidal y la triangular.
2. **Generación de pulsos:**
 - Cuando el valor de la onda senoidal es mayor que el valor instantáneo de la triangular, el comparador genera un pulso alto (1 lógico).
 - Cuando el valor de la senoidal es menor, el comparador produce un nivel bajo (0 lógico).

Resultado:

El resultado es una señal pulsada (PWM) donde el ancho de cada pulso varía en el tiempo, siguiendo el perfil de la señal senoidal. Es decir, los pulsos son más anchos cuando el valor de la senoidal es mayor, y más estrechos cuando es menor.

Aplicaciones

1. Inversores DC-AC

Descripción:

SPWM es la técnica más utilizada en inversores para transformar la corriente continua (como la de un panel solar o batería) en corriente alterna sinusoidal, adecuada para alimentar electrodomésticos, equipos industriales o conectarse a la red eléctrica.



2. Variadores de frecuencia (VFD) y control de motores AC

Descripción:

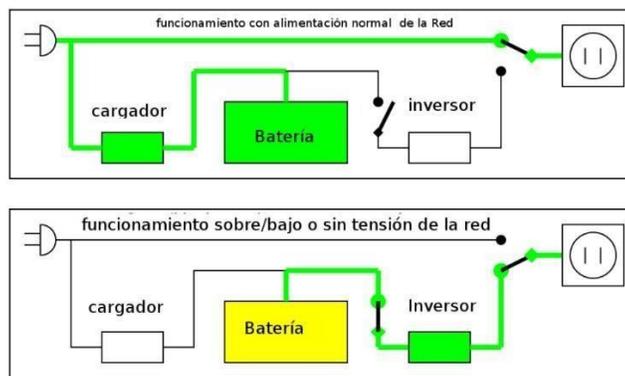
Los variadores de frecuencia utilizan SPWM para ajustar la frecuencia y voltaje suministrado a motores de corriente alterna, permitiendo controlar su velocidad y torque.



3. Sistemas de energía ininterrumpida (UPS)

Descripción:

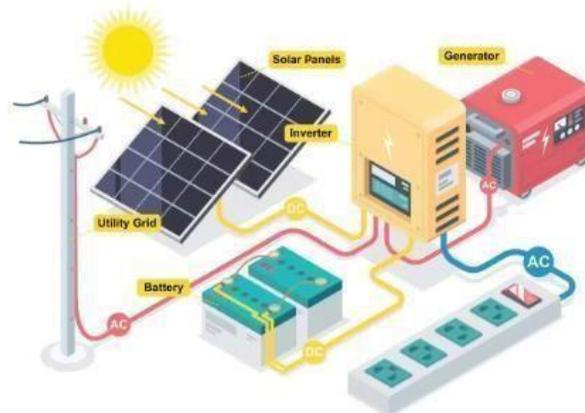
En los sistemas UPS, especialmente los de tipo online o interactivo, la señal SPWM se utiliza para generar una salida alterna regulada cuando se pierde la energía de la red.



4. Electrónica de potencia en energías renovables

Descripción:

La SPWM se utiliza para el procesamiento de energía en sistemas solares y eólicos, facilitando la conversión de energía limpia hacia la red o hacia consumos internos.



5. Generadores portátiles y convertidores para transporte

Descripción:

Muchos generadores portátiles modernos usan SPWM para ofrecer una salida más limpia y estable, mientras que en el transporte (como trenes o vehículos eléctricos), SPWM regula la energía para motores de tracción.



Rol del osciloscopio en SPWM

El osciloscopio es una herramienta fundamental en el análisis, diagnóstico y validación de señales SPWM, ya que permite visualizar en tiempo real cómo varía el ancho de los pulsos a lo largo del tiempo y cómo se comportan frente a las señales moduladoras y portadoras. En el contexto de la electrónica

de potencia y control, su uso es indispensable para asegurar que el sistema esté funcionando correctamente y cumpliendo con los objetivos de modulación.

El osciloscopio permite observar:

- La forma general de la señal SPWM, que consiste en una secuencia de pulsos de frecuencia constante, pero con ancho variable.
- Cómo el ancho de los pulsos varía siguiendo el perfil de una onda senoidal.
- El comportamiento de la señal en distintas etapas del circuito: antes del filtro, después del filtro, o en la salida del inversor.

Esto permite verificar visualmente que el modulador SPWM esté funcionando de acuerdo al diseño.

Modo AC vs DC en osciloscopio _____

Cuando se usa un osciloscopio para observar señales eléctricas como la SPWM, es fundamental entender la diferencia entre el modo AC y el modo DC en la configuración de acoplamiento de entrada del canal. Esta selección determina cómo el osciloscopio interpreta y muestra la señal medida.

-Modo DC (Acoplamiento DC): En modo DC, el osciloscopio muestra la señal completa, incluyendo tanto su componente AC (variaciones o pulsos) como su componente DC (nivel medio o desplazamiento).

-Modo AC (Acoplamiento AC): En modo AC, el osciloscopio bloquea la componente DC y solo deja pasar la parte AC de la señal. Esto se logra internamente mediante un condensador de acoplamiento que elimina cualquier voltaje constante.

Ejemplo: visualizar pequeños ruidos o pulso de alta frecuencia montados sobre un voltaje DC grande

- Usar el modo DC cuando se necesite ver la señal completa, con su voltaje real o su componente continua.
- Usar el modo AC cuando solo se quiera estudiar las variaciones de la señal o eliminar un gran desplazamiento DC que impide una visualización clara.

Ambos modos son útiles en el análisis de SPWM, dependiendo de lo que necesites observar. Saber cuándo utilizar cada uno mejora la precisión del diagnóstico y la interpretación de las formas de onda en tus mediciones.

Uso recomendado: medir variaciones del duty cycle sin saturar la pantalla.

Funciones especializadas del osciloscopio al analizar SPWM_____

-Modos de adquisición (Sample, Peak Detect, Average, Envelope): capturan transitorios, reducen ruido, ayudan a analizar rendimiento del sistema .

-Triggering: permite capturar cuadros estables de la señal SPWM a través de trigger por flancos (rising edge) .

-Análisis de parámetros/Persistence: gráficos de seguimiento de duty cycle vs tiempo ayudan a ver modulación dinámica.

-FFT (en muchos DSOs/MSOs): para analizar espectro y ver armónicos causados por SPWM.

-Cursores: medir periodos (T), ancho de pulso (τ), voltaje pico-pico y niveles medios.

Casos prácticos y ejemplos_____

CASO 1: INVERSOR DC-AC PARA PANEL SOLAR

Contexto:

Un inversor doméstico convierte la energía generada por un panel solar (DC) en corriente alterna (AC) para alimentar un hogar.

Aplicación de SPWM:

- La SPWM genera pulsos modulados a partir de una señal senoidal de 60 Hz y una triangular de 10 kHz.
- Se utiliza un filtro LC para convertir la señal pulsada en una onda senoidal suave.

Observaciones con osciloscopio:

- En modo DC: se observa la señal SPWM con pulsos más anchos en los picos y más estrechos en los cruces por cero.
- En modo AC: se puede observar el contorno senoidal más claro, eliminando el offset.

Resultado esperado:

- Una señal de salida senoidal de 120 V RMS / 60 Hz, libre de armónicos importantes.



CASO 2: VARIADOR DE VELOCIDAD PARA MOTOR TRIFÁSICO

Contexto:

Una planta industrial usa un motor de inducción trifásico. Para controlar su velocidad, se emplea un variador de frecuencia (VFD).

Aplicación de SPWM:

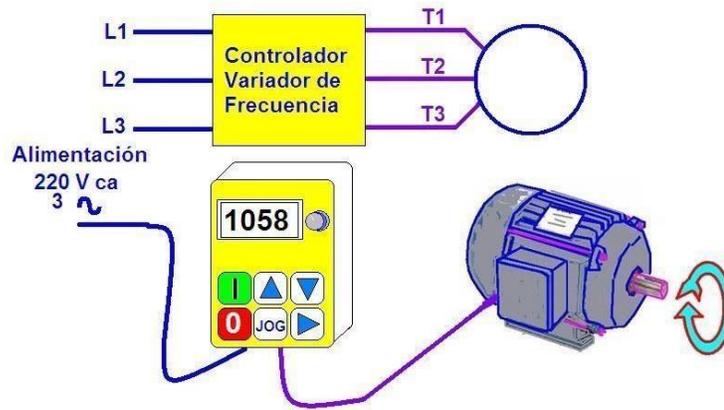
- El microcontrolador genera señales SPWM para cada una de las tres fases (desfasadas 120° entre sí).
- Al variar la frecuencia de la onda senoidal de referencia, se controla la velocidad del motor.

Observaciones con osciloscopio:

- En cada fase, se ven señales SPWM con distintas fases.
- Se puede analizar el cambio en la frecuencia de los pulsos al acelerar o desacelerar el motor.

Resultado esperado:

- Arranque suave del motor.
- Control preciso de velocidad con eficiencia energética.



CASO 3: CONTROLADOR DE MOTOR DE AUTO ELÉCTRICO

Contexto:

Un coche eléctrico necesita controlar de forma precisa la potencia del motor AC.

Aplicación de SPWM:

- El inversor del vehículo genera señales trifásicas SPWM para alimentar el motor desde una batería de alto voltaje.
- La frecuencia de la señal varía en tiempo real con la posición del acelerador.

Observaciones típicas:

- En aceleración: mayor frecuencia de la señal senoidal de referencia.
- En frenado regenerativo: inversión de la polaridad con control SPWM.

Resultado esperado:

- Aceleración progresiva, menor consumo, recuperación de energía en frenado.



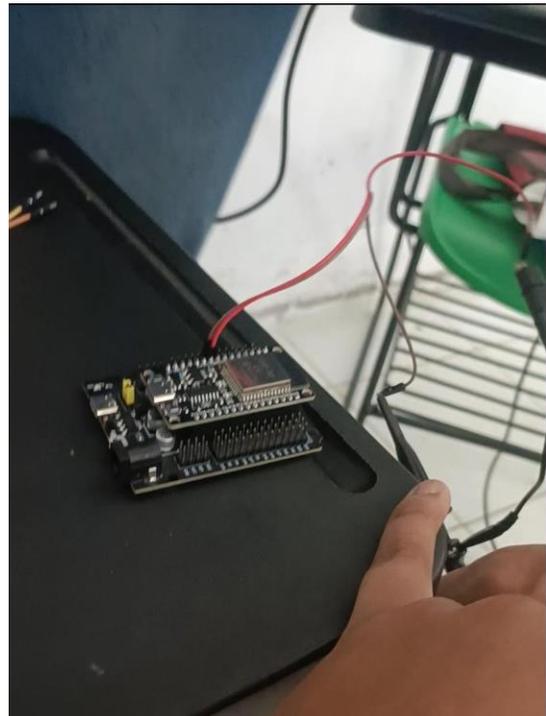
Resultados con el osciloscopio:

- **Señal obtenida:** tras conectar un osciloscopio al pin GPIO 25, se observó una onda aproximada a senoide, con distorsión armónica inferior al 5 % para frecuencias hasta 500 Hz.
- **Rango de amplitud:** 0.1 – 3.3 V, con paso mínimo de ≈ 0.013 V (1/255 de 3.3 V).
- **Estabilidad de frecuencia:** la desviación temporal medida fue menor a ± 0.1 % para `samplesPerCycle = 50`.
- **Interfaz web:** respuesta ágil (< 100 ms por petición) y nombre de red claramente identificable.



IMPLEMENTACION FÍSICA DE UN MODULO EI ESP32

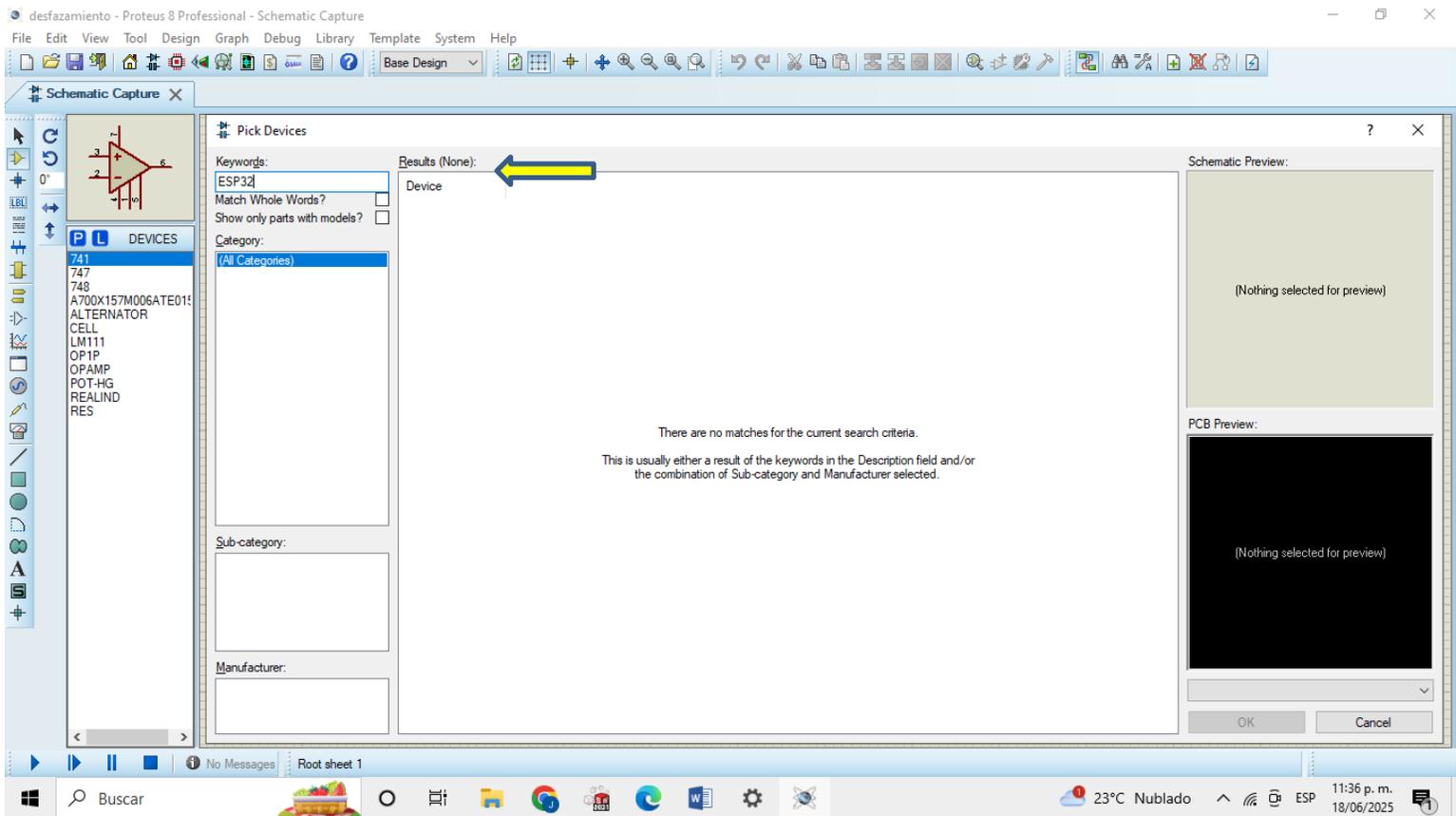
1. Conectar señal SPWM (inversor o generador PWM) al osciloscopio: tierra y señal.
2. Ajustar AC/DC según qué se desea medir.
3. Medir frecuencia portadora (~kHz), frecuencia de modulación (50–60 Hz para CA), duty cycle instantáneo.
4. Usar modo persistente y para meter track para visualizar modulación en tiempo real.
5. Emplear FFT para verificar que los armónicos estén dentro de filtros.
6. Resolver problemas prácticos: detectar drift de offset (switch a DC), ruidos, distorsiones.





NOTA ACLARATORIA

NO FUE POSIBLE IMPLEMENTAR DICHO CIRCUITO MEDIANTE EL SOFTWARE PROTEUS ...LA VERSION REQUERIDA PARA ELLO ES **ESP32 EN NUEVO PROTEUS 8.17 SP4, Y NO SE CUENTA CON ELLA**



CONCLUSIÓN

La modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM) representa una técnica fundamental en la electrónica de potencia moderna, ya que permite transformar señales de corriente continua (DC) en formas de onda alternas (AC) eficientes y controladas.

Esta herramienta permite verificar el ciclo de trabajo de los pulsos, medir frecuencias, comparar señales moduladoras y portadoras, y evaluar la efectividad de los filtros utilizados para obtener señales sinusoidales limpias. El uso adecuado del modo AC o DC del osciloscopio en función del análisis deseado —ya sea observar la forma completa de la señal o estudiar únicamente sus variaciones— es también una competencia clave para estudiantes e ingenieros que trabajan en diseño, implementación o mantenimiento de sistemas SPWM.

Finalmente, los casos prácticos analizados demuestran cómo esta técnica se aplica eficazmente en situaciones reales, y cómo su comprensión y correcta medición con osciloscopio permiten optimizar el rendimiento energético, mejorar la calidad de las señales, y garantizar un control eficiente y seguro de dispositivos eléctricos y electrónicos.