

DRIVER DE HORNO DESHIDRATADOR PARA LA PLANTA PILOTO FICA

Joaquín Alejandro Banffi Echegaray [†]

Emanuel Maximiliano Lopez ^{††}

[†] Universidad Nacional de San Luis, Villa Mercedes, San Luis, Argentina.

banffijoquin@gmail.com

^{††} Universidad Nacional de San Luis, Villa Mercedes, San Luis, Argentina.

loezemanuel@gmail.com

Resumen— El presente informe detalla el diseño e implementación de un driver de control para un horno deshidratador de la Planta Piloto FICA. El sistema desarrollado integra una etapa de potencia basada en un TRIAC BTA41-800B comandado mediante un optotriac MOC3063 con disparo en cruce por cero, garantizando aislamiento galvánico y conmutación segura sobre la red de 220 VAC. Se incorpora además un circuito de detección de cruce por cero utilizando un H11AA1, adaptado debido a la pérdida de uno de sus diodos internos.

El control y supervisión del proceso se realizan mediante un ESP32, que gestiona la lectura del sensor digital SHT31, la interfaz local tipo mini-SCADA implementada en una pantalla TFT de 3,5" y la interfaz web vía WiFi. Se incluyen los cálculos de disparo, protección y análisis térmico del TRIAC, verificando un funcionamiento robusto y estable para cargas resistivas de alta potencia. El sistema constituye una solución precisa, económica y apta para entornos educativos e industriales.

Palabras Clave — Control de potencia, Cruce por cero, ESP32, Horno deshidratador, Etapa de potencia AC, SCADA local, IoT, Control de temperatura, Conmutación de CA.

1. INTRODUCCIÓN

El control preciso de la temperatura es un requisito fundamental en los procesos de secado y deshidratación que se llevan a cabo en la Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA). Estos procesos requieren una regulación estable, segura y confiable de la potencia aplicada a la resistencia calefactora del horno, a fin de garantizar uniformidad térmica, repetitividad en los ciclos de secado y eficiencia energética.

Para lograrlo, se emplean dispositivos de conmutación electrónica capaces de manejar corrientes

elevadas de manera controlada. Entre las alternativas disponibles, los sistemas basados en TRIACs y optoacopladores con detección de cruce por cero se destacan por su robustez, aislamiento galvánico y desempeño adecuado en cargas resistivas típicas de hornos eléctricos.

El sistema desarrollado en este proyecto incorpora un TRIAC BTA41-800B como elemento principal de potencia, disparado mediante un optotriac MOC3063. Se integra además un circuito de detección de cruce por cero basado en un optoacoplador H11AA1, cuya etapa fue adaptada debido a la falla de uno de sus diodos internos. La unidad de procesamiento está conformada por un ESP32, encargado tanto del control de la potencia como de la adquisición de datos mediante el sensor digital SHT31 y de la supervisión local a través de una pantalla TFT tipo mini-SCADA. Adicionalmente, el sistema ofrece conectividad WiFi que permite configurar y monitorear el horno desde una interfaz web embebida.

El presente informe describe la arquitectura general del conjunto, los fundamentos eléctricos de la etapa de potencia, el dimensionamiento de los componentes críticos y la caracterización del sistema resultante, demostrando su adecuación para aplicaciones de control térmico en entornos educativos e industriales.

2. DESARROLLO

2.1 Funcionamiento general del sistema

El funcionamiento general del sistema se resume en el diagrama presentado en la Figura 1, donde se ilustran los flujos de información entre la detección de cruce por cero, la unidad de procesamiento y la etapa de potencia encargada de energizar la resistencia calefactora del horno.

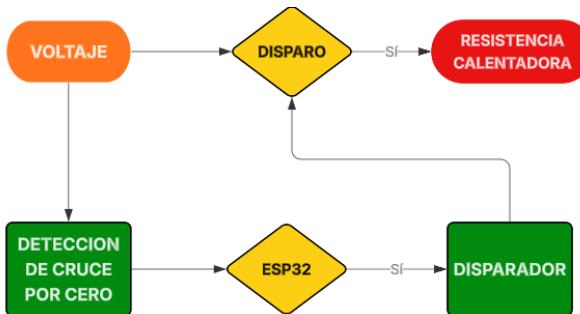


Fig. 1: Esquema general de funcionamiento.

El circuito detector de cruce por cero monitorea permanentemente la tensión de red y genera un pulso digital cada vez que la señal alterna atraviesa el valor cero. Esta información es esencial para sincronizar el disparo del TRIAC, minimizando perturbaciones electromagnéticas y garantizando que la conmutación se realice en las condiciones eléctricas más favorables.

El ESP32 recibe estos pulsos y, en función de la consigna térmica, la temperatura medida por el sensor SHT31 y la estrategia de control implementada, decide si corresponde permitir o inhibir la activación de la etapa de potencia. Cuando el sistema requiere calefacción, el microcontrolador habilita el disparador mediante una señal lógica dirigida al optotriac MOC3063, encargado de proporcionar aislamiento galvánico entre el control y la red de 220 VAC.

Una vez activado el optotriac, el TRIAC BTA41-800B ingresa en conducción durante el semiciclo correspondiente, alimentando la resistencia calefactora. Este proceso se repite de forma sincronizada en cada cruce por cero, modulando la potencia entregada al horno según las necesidades del proceso de deshidratación.

Este esquema integrado permite un control seguro, eficiente y estable de la potencia térmica, garantizando una respuesta predecible del sistema y una operación adecuada dentro del entorno industrial de la Planta Piloto FICA.

2.2. Componentes y justificación

2.2.1 Unidad de procesamiento: ESP32

Se seleccionó una placa de desarrollo ESP32 DevKit de 30 pines (Fig. 2) como unidad central de procesamiento del sistema. Esta placa integra el SoC ESP 32 junto con el convertidor USB–UART y el regulador de tensión, lo que simplifica la programación y la alimentación, y proporciona una plataforma compacta para implementar tanto la lógica de control como la interfaz gráfica local como la interfaz web del proyecto.

El ESP32 es un Sistema en Chip (SoC) de bajo costo y baja potencia con Wi-Fi y Bluetooth integrados,

especialmente orientado a aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). En este proyecto se aprovecha especialmente la conectividad Wi-Fi para montar una página web local (servidor web embebido) desde la cual el usuario puede configurar la temperatura deseada del horno, visualizar variables de proceso y realizar ajustes de forma remota desde cualquier dispositivo conectado a la misma red.

Algunas de sus características clave, relevantes para este diseño, son:

Procesador dual-core hasta 240 MHz: permite ejecutar simultáneamente la lógica de control del horno, la actualización de la pantalla TFT (mini-SCADA local) y el servidor web que atiende las solicitudes del usuario.

Convertidores Analógico–Digitales (ADC) de 12 bits: ofrecen una resolución de 0–4095 cuentas, lo que permite, en caso de ser necesario, incorporar mediciones analógicas adicionales con buena resolución para diagnóstico o futuras ampliaciones.

Múltiples GPIO en el encapsulado de 30 pines: se emplean para la pantalla TFT (bus de datos y señales de control), el sensor SHT31 (bus I²C), el disparo del optotriac MOC3063 y otras señales de entrada/salida.

Conectividad Wi-Fi integrada: utilizada activamente para implementar la interfaz web local de configuración y supervisión, sin necesidad de módulos externos.

En conjunto, la placa ESP32 DevKit de 30 pines actúa como el “cerebro” del sistema, integrando adquisición de datos, procesamiento, visualización en la pantalla TFT y una interfaz web basada en Wi-Fi que permite al usuario fijar consignas y supervisar el horno de manera cómoda y flexible.

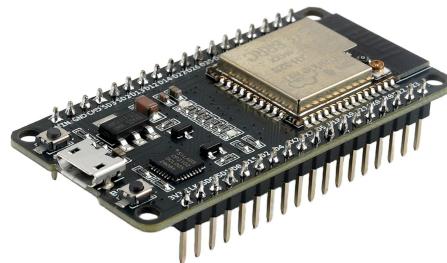


Fig. 2: Microcontrolador ESP32

2.2.2 Sensor de temperatura: SHT31

El SHT31 (Fig. 3) es un sensor digital integrado de temperatura y humedad relativa. Dentro del mismo encapsulado tiene el elemento sensor, la electrónica de acondicionamiento y el conversor A/D, por lo que entrega directamente al microcontrolador los valores de temperatura y %HR ya calibrados y linealizados, sin necesidad de circuitos analógicos externos. Para este proyecto se usa como “sensor de proceso” del horno,

midiendo el ambiente interno donde se está controlando la temperatura.

Se lo eligió porque ofrece buena exactitud (del orden de $\pm 0,3$ °C en temperatura y ± 2 %HR en humedad), rango amplio de trabajo y una interfaz muy simple. Se comunica con el ESP32 mediante bus I²C, enviando los datos como palabras de 16 bits para cada magnitud. Eso permite tener una resolución fina en las mediciones y actualizar en tiempo casi real la información que se muestra en la pantalla tipo mini-SCADA.



Fig. 3. Sensor SHT 31

2.2.3 TRIAC BTA41 800 V

El elemento de commutación principal es un TRIAC, un tiristor bidireccional capaz de conducir corriente alterna en ambos sentidos entre sus terminales principales (A1 y A2). Se dispara aplicando una corriente de compuerta (gate) y, una vez encendido, se mantiene conduciendo mientras la corriente de carga no caiga por debajo de una corriente mínima de mantenimiento. En la curva I-V de la Fig. 4 (ejes tensión vs corriente) se ven justamente los cuadrantes de conducción: en el primer cuadrante (+V, +I) y en el tercero (-V, -I) el dispositivo permanece prácticamente bloqueado hasta alcanzar una tensión de disparo, a partir de la cual entra en conducción y la corriente aumenta bruscamente con una caída de tensión relativamente baja.

En este proyecto se seleccionó el modelo BTA41-800B (Fig. 5), de la familia BTA40/41 de ST. Según hoja de datos, esta serie admiten 40 A RMS de corriente en conducción y tensiones de bloqueo repetitivas VDRM/VRRM de 600 o 800 V, aplicándose aquí la versión de 800 V para commutar la red de 220 VAC con un margen muy holgado. Como la potencia real de la resistencia del horno no se conoce con precisión, se decidió sobredimensionar el TRIAC: así se garantiza que trabajará muy por debajo de sus límites térmicos y eléctricos, soportando sin problemas picos de corriente, transitorios de red y posibles futuras modificaciones de la carga, lo que aumenta la robustez y la vida útil del sistema de control de temperatura.

De la hoja de datos se toman también los parámetros necesarios para dimensionar el disparo: la corriente de compuerta IGT máxima es de 50 mA en los cuadrantes

I, II y III (100 mA en el IV), con una tensión de compuerta VGT máxima de 1,3 V. Una vez disparado, el TRIAC necesita una corriente de enclavamiento IL del orden de 70 mA (160 mA en el cuadrante II) para quedar firmemente encendido y se apaga cuando la corriente baja por debajo de la corriente de mantenimiento IH, especificada en 80 mA máx. En conducción la caída de tensión típica entre sus terminales principales es del orden de 1,55 V, lo que se tiene en cuenta en el cálculo de pérdidas. Como el BTA41-800B puede dispararse en los cuatro cuadrantes de operación (distintas combinaciones de polaridad entre A2, A1 y la compuerta), se asegura que el dispositivo puede ser activado correctamente en ambos semiciclos de la red, coherente con el comportamiento simétrico que se ilustra en la curva de cuadrantes incluida en el informe.

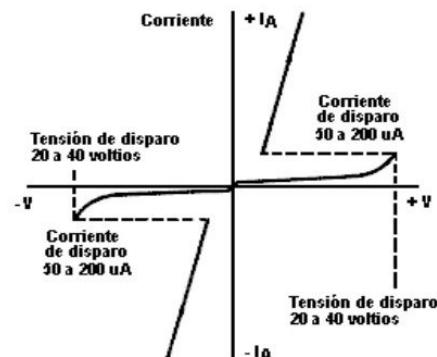


Fig. 4. Curva de comportamiento del TRIAC

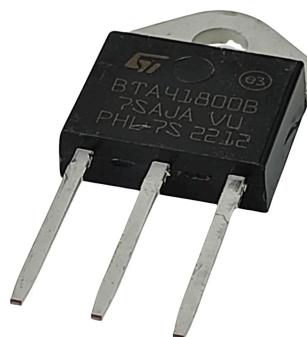


Fig. 5. BTA41

2.2.4 MOC3063

El MOC3063 (Fig. 6) es un optotriac, es decir, un optoacoplador específico para manejar triacs en CA. Internamente tiene un LED infrarrojo en el lado de entrada y un pequeño triac detector en el lado de salida, aislados galvánicamente entre sí. Cuando el LED conduce, la luz incide sobre el detector y éste pasa a conducción entre sus terminales principales, entregando corriente de gate al triac de potencia pero sin conexión

eléctrica directa entre la parte de baja tensión (ESP32) y la red de 220 VAC. La familia MOC3061/62/63 incluye además un circuito de “zero crossing”, que hace que el triac interno sólo dispare cerca del cruce por cero de la tensión de línea, reduciendo ruido e interferencias.

Se eligió específicamente el MOC3063 porque es la versión más sensible de la serie: está pensada para controlar triacs desde circuitos lógicos en aplicaciones de 115/240 VAC como relés de estado sólido, controles de temperatura y motores. Para nosotros eso significa que puede ser excitado directamente desde un pin del ESP32 con una única resistencia serie, y al mismo tiempo ofrece un nivel de aislamiento alto (tensión de aislamiento de ensayo de 7500 Vac pico entre entrada y salida), apropiado para trabajar con la red sin comprometer la seguridad de la etapa de control.

Según el datasheet, el LED de entrada presenta una tensión directa $V_F = 1,3\text{--}1,5$ V a $I_F = 30$ mA, con una corriente máxima continua I_F de 60 mA. El triac de salida soporta una tensión de bloqueo V_{DRM} de 600 V y requiere una corriente de disparo I_{FT} máxima de 5 mA para el MOC3063. La corriente de mantenimiento I_H es del orden de 250 μ A, suficiente para que el triac interno se apague limpiamente al pasar por cero la corriente. Además, para el dimensionamiento de la resistencia de compuerta del triac de potencia se adoptó una tensión instantánea mínima de red $V_{INH}=20$ V (peor caso cercano al cruce por cero). El propio fabricante recomienda trabajar con una corriente de LED entre ese I_{FT} máximo (5 mA en nuestro caso) y el máximo absoluto de 60 mA.



Fig. 6. MOC3063.

2.2.5 Pantalla TFT LCD 3.5” 8 BITS

Para la interfaz de usuario se utiliza una pantalla TFT LCD de 3,5" (Fig. 7), que cumple el rol de “mini SCADA” local del sistema. Sobre esta pantalla se visualizan en tiempo real las variables de proceso (humedad y temperatura del horno), junto con estados, menús e indicadores, de modo que el operador puede supervisar y comandar el equipo sin necesidad de una PC externa, reproduciendo a pequeña escala el concepto de supervisión típica de los sistemas SCADA industriales.

La pantalla se controla mediante un bus de datos paralelo de 8 bits conectado al ESP32 (líneas D0-D7, más las señales de control). En cada ciclo de escritura el

microcontrolador envía un byte (8 bits) que puede corresponder a un comando del controlador gráfico o a datos de imagen. Aunque el bus físico es de 8 bits, cada píxel se representa internamente con 16 bits de color, usando el formato RGB565:

- 5 bits para el componente rojo (R)
- 6 bits para el componente verde (G)
- 5 bits para el componente azul (B)

Para escribir un píxel, el ESP32 envía dos bytes consecutivos (byte alto y byte bajo), completando así los 16 bits de información de color. Esto permite representar hasta $2^{16} = 65536$ colores diferentes, suficiente para mostrar fondos, textos y gráficos de proceso con buena definición. En la práctica, las magnitudes físicas medidas se convierten en datos digitales y luego en píxeles codificados en 16 bits, construyendo una visualización tipo SCADA en una pantalla compacta, que actúa como interfaz hombre-máquina del sistema.



Fig. 7. Pantalla LCD TFT 3,5”.

2.2.6 Optoacoplador H11AA1

El H11AA1 (Fig. 8) es un optoacoplador especialmente diseñado para la detección de cruces por cero en señales de corriente alterna. A diferencia de los optoacopladores convencionales, incorpora dos diodos LED internos conectados en antiparalelo y un fototransistor de salida. Esta configuración permite que el dispositivo conduzca durante ambos semiciclos de la señal sinusoidal, generando un pulso lógico cada vez que la tensión aplicada se aproxima al valor cero.

La función principal del H11AA1 dentro del sistema es proporcionar una referencia temporal precisa al microcontrolador ESP32. Los pulsos generados por el optoacoplador se utilizan como base de sincronización para determinar en qué instante del semiciclo debe dispararse el optotriac MOC3063. Esta sincronización reduce el ruido electromagnético producido por la conmutación de la etapa de potencia y asegura que el TRIAC opere bajo condiciones eléctricas óptimas.

El uso de un detector de cruce por cero resulta especialmente importante en sistemas donde se controla potencia sobre cargas resistivas de alta magnitud, como la resistencia calefactora del horno deshidratador. La conmutación sincronizada minimiza las perturbaciones en la red, evita corrientes transitorias innecesarias y prolonga la vida útil del TRIAC.

En este proyecto, el H11AA1 presentó una anomalía funcional debido a la avería de uno de sus diodos internos. No obstante, el circuito se adaptó para operar utilizando el diodo restante, permitiendo la detección del cruce por cero en un solo semiciclo. Aunque esta condición reduce la simetría de los pulsos generados, la información resultante sigue siendo suficiente para el ESP32, que utiliza únicamente el instante del cruce como referencia de temporalización. La elección del H11AA1 se mantiene válida debido a su robustez, su aislamiento galvánico de 5 kV y su comportamiento predecible aún bajo condiciones no ideales.

Su bajo consumo, su capacidad para operar directamente con tensiones de red a través de una resistencia limitadora adecuada y su salida digital limpia lo convierten en una solución confiable y ampliamente utilizada en controladores de potencia basados en TRIACs.



Fig. 8. H11AA1.

2.3 Diseño del sistema

Aquí se presenta el diseño elaborado en Fusion 360 (Fig. 9 y 10) en donde se visualiza el posicionamiento de los componentes antes mencionados.

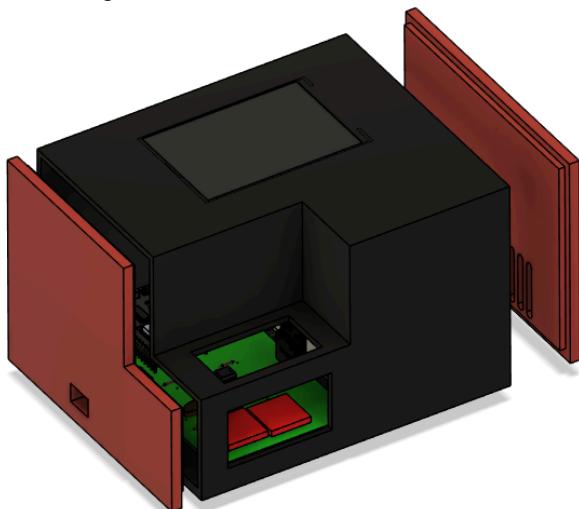


Fig. 9. Diseño en Fusion 360.

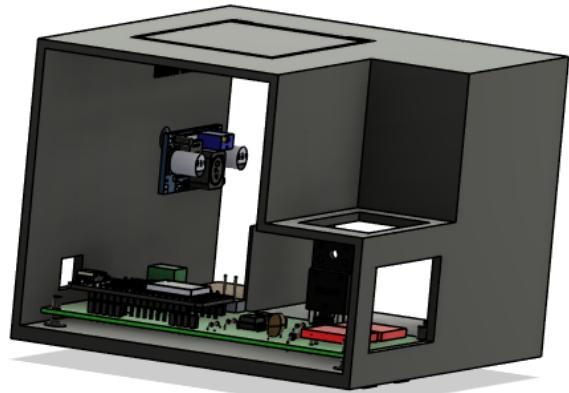


Fig. 10. Diseño sin tapas

2.3.1 Circuito Disparador y Conmutador de Potencia con Triac.

Explicación del circuito.

El circuito de potencia tiene como objetivo permitir que el ESP32 controle una carga conectada directamente a la red de 220 VAC (por ejemplo, la resistencia del horno), manteniendo aislamiento eléctrico y protección frente a sobretensiones.

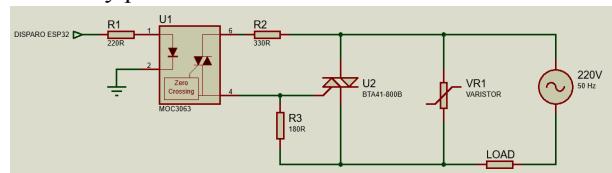


Figura 11. Circuito de potencia

2.3.1.1 Etapa de aislamiento y disparo (U1 – MOC3063)

La señal lógica de disparo proveniente del ESP32 ingresa por la izquierda y, a través de la resistencia R1, alimenta el LED interno del optotriac MOC3063 (U1).

Cuando el ESP32 pone esta salida en nivel alto, el LED se enciende y activa el triac interno del MOC3063 en el lado de potencia. Este componente proporciona aislamiento galvánico entre la electrónica de baja tensión y la red de 220 V, de modo que cualquier problema en la parte de potencia no se transmite al microcontrolador.

Además, al ser un modelo “zero crossing”, el MOC3063 solo dispara cuando la tensión de red pasa por cero, reduciendo interferencias electromagnéticas y esfuerzos eléctricos sobre el triac de potencia.

Para dimensionar la resistencia R1 se parte de la tensión de salida del ESP32 (3.3 V) y de la caída típica en el LED del MOC3063 (1.3 V), fijando como objetivo una corriente de LED del orden de 10 mA, suficiente para superar la corriente de disparo IFT=5mA con margen. Aplicando la ley de Ohm:

$$R_1 = \frac{3.3V - 1.3V}{10mA} = 200\Omega \quad (1)$$

Con ese valor teórico calculado se optó por una resistencia de valor comercial de 220, que dejaría una

corriente de 9,1mA suficiente para un correcto funcionamiento del led y consumirá una potencia de:

$$P_{R4} = (9.1mA)^2 * 220\Omega = 18.21mW \quad (2)$$

A lo que una resistencia de 1/4w será suficiente para disipar dicha potencia por efecto Joule.

2.3.1.2 Etapa de conmutación de potencia (U2 – BTA41)

El triac de potencia BTA41 (U2) está conectado en serie con la carga y la red de 220 V. Es el elemento que efectivamente abre y cierra el circuito de la carga (Actúa como llave controlada).

El triac de potencia se dispara cuando recibe corriente de puerta desde el optotriac. Esta corriente se establece mediante la red formada por R2 y R3, que limita y distribuye la corriente de disparo entre la puerta (gate) y el terminal de referencia del triac.

- Cuando el MOC3063 conduce, la corriente de puerta hace que el BTA41 entre en conducción y la carga queda conectada a la red durante cada semiciclo.
- Cuando el MOC3063 está apagado (salida del ESP32 en bajo), no hay corriente de puerta y el triac de potencia permanece bloqueado, por lo que la carga queda desconectada.

Para dimensionar la resistencia R3 (entre el MOC3063 y la compuerta del BTA41) se partió de los parámetros de hoja de datos de ambos dispositivos:

Triac de potencia BTA41-800B

- Corriente de disparo de compuerta: IGT=50 mA (máx en cuadrantes I y III).
- Tensión compuerta-terminal de referencia en conducción: VGT=1,3 V.
- Caída en conducción entre MT2-MT1: VTM=1,55 V (dato usado luego para evaluar pérdidas en el triac).

Optotriac MOC3063

- Caída típica en conducción entre sus terminales de salida: VMOC=3 V.

Además, se fijó una tensión mínima instantánea de línea para análisis, VINH=20V. Es decir, se dimensionó R3 de modo que, aun cuando el semiciclo de red está cerca del cruce por cero y sólo haya unos 20 V entre MT2 y MT1, la corriente de compuerta siga siendo suficiente para garantizar el disparo.

Primero se calculó la corriente auxiliar que aporta la rama con la resistencia R2=180.

$$I_b = \frac{VGT}{R_2} = \frac{1,3V}{180\Omega} = 7.2mA \quad (3)$$

Donde VGT es la caída aproximada en la compuerta del triac vista desde esa rama. Para asegurar el encendido aún en el peor caso de hoja de datos se impuso que la corriente por R3 fuese:

$$I_{R3} = I_{GT} + I_b = 50mA + 7.2mA = 57.2mA \quad (4)$$

Luego se determinó la tensión que debe quedar sobre R3 en la condición más desfavorable (tensión de línea baja, cerca del cruce por cero):

$$V_{R3} = V_{MT2-MT1} - V_{MOC} - V_{GT} = 20V - 3V - 1.3V = 15.7V \quad (5)$$

De aquí resulta el valor teórico de la resistencia:

$$R_3 = \frac{V_{R3}}{I_{R3}} = \frac{15.7V}{57.2mA} = 274\Omega \quad (6)$$

Por disponibilidad comercial se seleccionó R3=330, lo que mantiene la corriente de compuerta levemente por encima del valor calculado. La potencia disipada en esta resistencia es del orden de:

$$P_{R3} = V_{R3} * I_{R3} = 15.7V * 57.2mA = 898mW \quad (7)$$

Por lo que se especifica una resistencia de al menos 1 W, erigiéndose un modelo de 2 W para trabajar con margen térmico. De esta manera se garantiza que, considerando IGT, VGT, la caída en el MOC3063 y la tensión mínima efectiva de línea VINH, el triac BTA41-800B se dispare de forma confiable en todo el rango de operación.

2.3.1.3 Protección contra sobretensiones (VR1 – Varistor)

El varistor VR1 se conecta entre las dos líneas de la red, en paralelo con el conjunto triac + carga. Su función es absorber picos de tensión que puedan aparecer en la línea (por ejemplo, transitorios al conectar y desconectar cargas inductivas o perturbaciones externas).

Cuando aparece una sobretensión, el varistor reduce temporalmente su impedancia, limitando el valor de la tensión y protegiendo tanto al BTA41 como a la carga.

En conjunto, este circuito de potencia convierte una simple señal digital del ESP32 en el control seguro y aislado de una carga de red de 220 VAC, con disparo en cruce por cero y protección frente a transitorios, adecuado para aplicaciones de control de temperatura y conmutación de cargas resitivas.

2.3.1.4 Cálculo térmico

Para verificar que el TRIAC BTA41-800B trabaje dentro de sus límites térmicos se estimó primero la potencia que disipa en conducción. Como la potencia real de la resistencia del horno no se conoce con exactitud, se adoptó una condición de diseño conservadora de IRMS=12A lo que equivale a una carga cercana a 2,6 kW sobre 220 VAC, claramente por encima de lo que se espera en uso normal.

Del datasheet del BTA41 se toma la caída de tensión en conducción entre MT2 y MT1, del orden de $V_T=1.55V$ para corrientes de varios amperes. Con estos valores, la potencia disipada en el TRIAC es:

$$P_{triac} = V_T * I_{RMS} = 1.55V * 12A = 18.6W \quad (8)$$

Para el cálculo térmico se considera una temperatura máxima de juntura $T_{j,max} = 125^\circ C$ y una temperatura ambiente interna en el gabinete de $T_a = 50^\circ C$. Por ende:

$$\Delta T_{max} = T_{j,max} - T_a = 125^\circ C - 50^\circ C = 75^\circ C \quad (9)$$

A lo que se plantea el correspondiente circuito térmico con una resistencia térmica de juntura carcasa $RHT_{J-C} = 0.6^\circ C/W$ sacado del datasheet, con la resistencia térmica cápsula del triac disipador (tornillería, mica, etc) $RHT_{C-S} = 0.5^\circ C/W$ estimada.

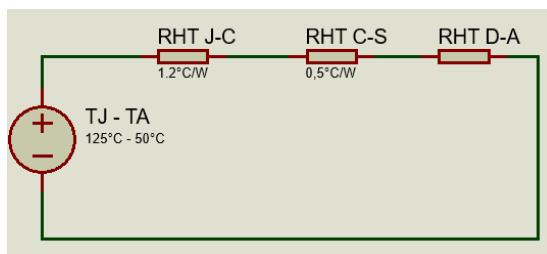


Fig. 12. Modelado térmico

Planteando el correspondiente cálculo:

$$T_{j,max} - T_a = P_{triac} * (RHT_{J-C} + RHT_{C-S} + RHT_{D-A}) \quad (10)$$

Despejando la resistencia térmica disipador ambiente RHT_{D-A}

$$RHT_{D-A} = \frac{T_{j,max} - T_a}{P_{triac}} - RHT_{J-C} - RHT_{C-S} = 3.07^\circ C/W \quad (11)$$

Se obtuvo una resistencia térmica necesaria de $3.07^\circ C/W$. En base al cálculo térmico realizado y a las dimensiones del perfil de aluminio utilizado, se eligió uno con una resistencia térmica disipador-ambiente estimada del orden de $4^\circ C/W$ (Fig 13). Se verifica que, incluso para la corriente máxima de diseño considerada, la temperatura de juntura del TRIAC se mantiene por debajo de los $125^\circ C$ especificados por el fabricante. Por lo tanto, el disipador seleccionado queda sobredimensionado, garantizando un funcionamiento seguro y una buena vida útil del dispositivo.



Fig. 13. Disipador del BTA41

2.3.2 Detector de cruce por cero.

El detector de cruce por cero tiene por función generar una señal lógica aislada que indique al microcontrolador el instante en que la tensión de línea atraviesa el valor cero. Esta información es esencial para sincronizar el disparo del optotriac MOC3063 y, por lo tanto, para garantizar una comutación estable del TRIAC de potencia. Para esta tarea se utiliza un optoacoplador H11AA1, originalmente dotado de dos diodos LED internos en antiparalelo. Debido a la avería de uno de ellos, el circuito fue adaptado para operar con el diodo remanente sin comprometer el objetivo de sincronización.

El LED interno del H11AA1 requiere una corriente del orden de 4.5 mA para asegurar la activación correcta del fototransistor. Se utiliza una resistencia serie de $47\text{ k}\Omega$, seleccionada a partir del cálculo:

$$R = \frac{V_{AC} - V_D}{I_{LED}} \quad (12)$$

$$R = \frac{220V - 1.2V}{4.5 \cdot 10^{-3} A} = 48622 \Omega \quad (13)$$

Se selecciona una R de $47\text{ k}\Omega$, por ende la corriente será de 4.65 mA

La potencia en la resistencia es de:

$$P = I^2 * R = (4.65 \cdot 10^{-3})^2 * 47000 = 1.015W \quad (14)$$

En la salida del fototransistor del H11AA1 se incorpora:

- Una resistencia pull-up de $10\text{ k}\Omega$, que define el nivel alto lógico,
- Una resistencia serie de $4.7\text{ k}\Omega$ para limitar la corriente del transistor y suavizar los flancos
- Se evaluó un capacitor de 100 nF para filtrado de la señal; sin embargo, en pruebas prácticas se observó que dicho capacitor distorsionaba la detección, generando retardos y pérdidas de borde. Por lo tanto, no fue viable incorporarlo.

Debido a que el H11AA1 está funcionando con un único diodo LED interno, la señal obtenida en la salida no consiste en un pulso estrecho en torno al cruce por cero, sino en una señal cuadrada que conmuta su estado en cada cambio de semiciclo. Es decir, el fototransistor conduce durante la mayor parte del semiciclo útil, y su

transición al estado contrario ocurre precisamente en el cruce por cero. Esta característica es suficiente para generar una interrupción en el ESP32 cada 10 ms (50 Hz), permitiendo establecer un punto de referencia temporal confiable.

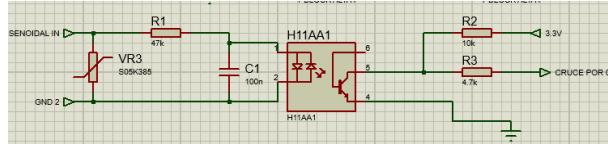


Fig. 14. Circuito cruce por 0

2.3.3 Estrategia de control.

El horno eléctrico se controla mediante un lazo cerrado de temperatura implementado en el ESP32, donde el sensor SHT31 actúa como elemento de realimentación midiendo en forma periódica la temperatura interna de la cámara. La referencia o *setpoint* se define desde la interfaz Blynk y se compara con la temperatura medida para obtener el error:

$$e(t) = T_{Set} - T_{Act} \quad (15)$$

Sobre este error se aplica un controlador PID discreto (proporcional-integral-derivativo), cuya estructura se resume en el diagrama de bloques de la Figura 15:

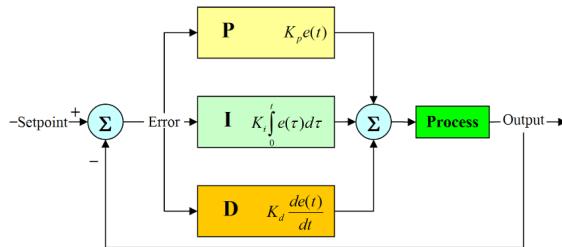


Fig. 15. Diagrama de bloques sistema de control PID

El término proporcional corrige en función del error instantáneo, el integral elimina el error estacionario acumulando la diferencia a lo largo del tiempo (con anti-windup para evitar la saturación) y el derivativo suaviza la respuesta ante cambios bruscos. La salida normalizada del PID es una señal de mando de 0–100 % de potencia, que no actúa directamente sobre la tensión de red sino que se traduce en un control por ráfagas de semiperíodos (burst-firing) sobre el triac de potencia: en cada ventana de tiempo se permite el paso de un número determinado de semiperíodos completos de la red de 50 Hz, sincronizando el disparo con el cruce por cero detectado mediante el optoacoplador de cruce por cero. De este modo, para demandas bajas sólo algunos semiperíodos son conducidos y para demandas cercanas al 100 % se conduce prácticamente de forma continua, tal como se ilustra en la Figura 16:

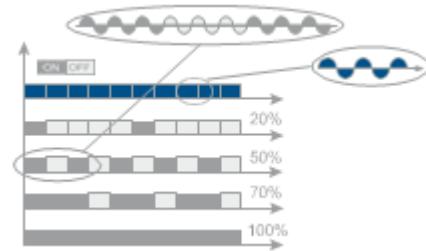


Fig. 16. Control por burst de ciclos

reduciendo interferencias electromagnéticas respecto al control por ángulo de fase y garantizando una regulación suave y eficiente de la potencia entregada a la resistencia calefactora.

2.3.4 Sistema de supervisión local e IoT.

Para el monitoreo del proceso se implementó un sistema de supervisión híbrido local-IoT basado en un ESP32. A nivel local, el microcontrolador adquiere en forma continua la temperatura y la humedad mediante el sensor SHT31 y las presenta en una pantalla TFT táctil, donde se muestran en tiempo real los valores instantáneos, el setpoint y las curvas de tendencia mediante indicadores tipo dial y gráficos de evolución (Figura 17). En paralelo, el ESP32 se conecta por Wi-Fi a la plataforma Blynk IoT, desde donde se publica periódicamente la temperatura y la humedad medidas, y se recibe el setpoint de temperatura definido por el usuario en la aplicación móvil, que también ofrece visualización remota y registro histórico de la variable de proceso (Figura 18). De este modo, el operador puede supervisar el horno tanto desde el panel frontal como desde un dispositivo móvil, manteniendo en todo momento control y trazabilidad del comportamiento térmico del sistema.



Fig. 17. Panel de control



Fig. 18. Plataforma Blynk IoT

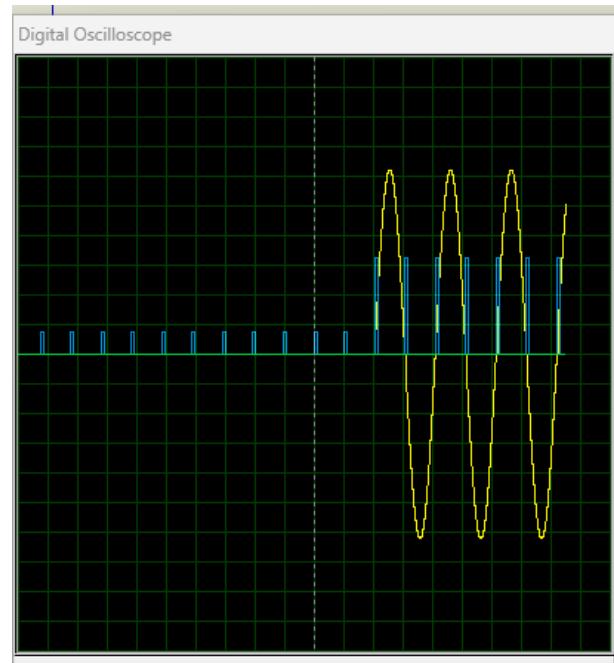


Fig. 20. Simulación disparo, Osciloscopio Digital

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Simulación.

Para validar el funcionamiento del sistema de potencia antes del montaje se realizaron simulaciones en Proteus. En primer lugar, se modeló el circuito de disparo del triac, verificando la correcta conmutación del BTA41-800 a partir de los pulsos generados por el optotriac y comprobando que la forma de onda sobre la carga respondiera adecuadamente a las órdenes de control (Figura 19 y 20). En segundo lugar, se simuló el circuito de cruce por cero basado en el optoacoplador, observando una señal cuadrada estable de 50 Hz en la salida, adecuada para ser utilizada como referencia temporal por el ESP32 (Figura 21 y 22). En ambos casos, los resultados de simulación fueron consistentes con el comportamiento esperado, lo que permitió avanzar con confianza al diseño y prueba del prototipo físico.

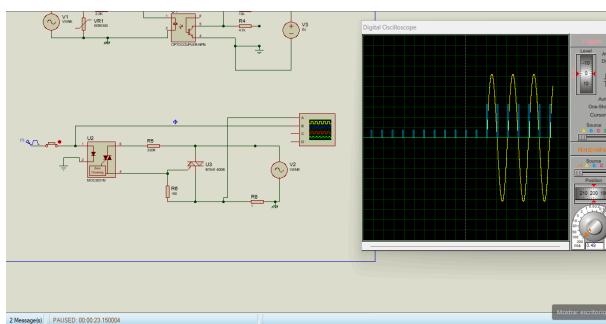


Fig. 19. Simulación disparo

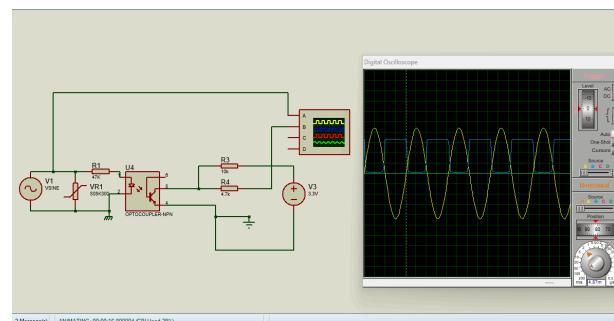


Fig. 21. Simulación cruce por 0

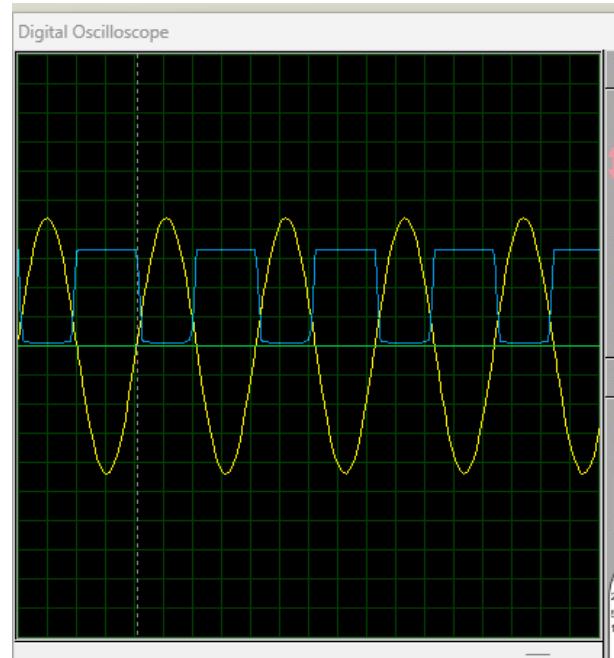


Fig. 22. Simulación cruce por 0, Osciloscopio digital

3.2 Implementación en protoboard.

Una vez validados los circuitos mediante simulación, se procedió al armado del prototipo sobre una placa de pruebas tipo protoboard, donde se implementaron la etapa de disparo con el MOC3063, el TRIAC BTA41-800 y el detector de cruce por cero basado en el H11AA1, junto con la electrónica de acondicionamiento necesaria. El conjunto se ensayó con una carga resistiva y se monitorizó con un osciloscopio digital de dos canales, observando simultáneamente la señal senoidal de referencia y la señal cuadrada generada por el detector de cruce por cero, así como los pulsos de disparo aplicados a la compuerta del TRIAC. En las fotografías de la implementación en protoboard se aprecia el montaje completo y las formas de onda obtenidas, donde se verifica que el disparo del BTA41-800 se produce de manera reproducible en torno al cruce por cero y que la conmutación sobre la carga es estable, con niveles de tensión y corriente acordes a los cálculos de diseño. Estas pruebas experimentales sobre protoboard permitieron confirmar el correcto funcionamiento de la etapa de potencia y de sincronización antes de avanzar al diseño definitivo de la PCB. (Fig. 23)(Fig. 24)(Fig. 25)

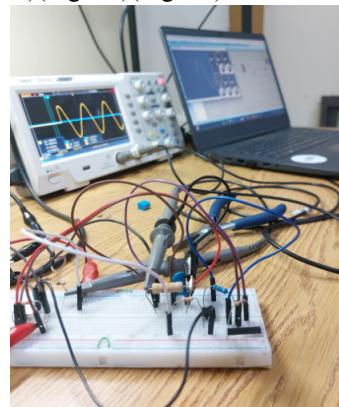


Fig. 23. Protoboard y señal de salida

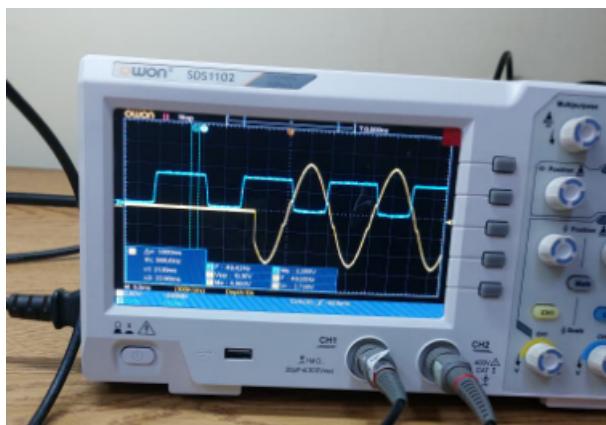


Fig. 24. Disparo (amarillo) y cruce por 0 (azul)

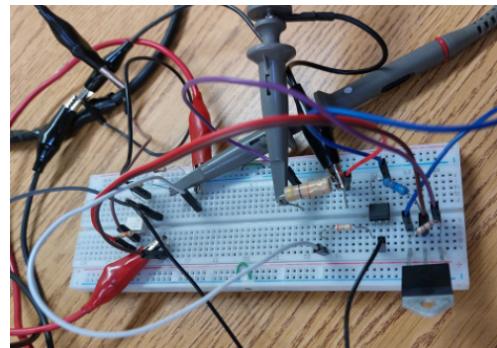


Fig. 25. Protoboard

3.3 Diseño de PCB.

El diseño de la placa de circuito impreso (PCB) se realizó en el entorno ARES de Proteus, priorizando la separación física entre la etapa de potencia (triac, optotriac y alimentación de red) y la etapa de control y muestreo, donde se ubican el ESP32, el SHT31 y el conector de la pantalla TFT. Esta sectorización reduce el acoplamiento de ruido entre la red de 220 V y la electrónica de baja tensión, y facilita el ruteo de pistas anchas para la corriente de carga, manteniendo trazos finos y limpios para las señales de control. En la Figura 26 se muestra el ruteo completo del PCB en ARES; en las Figuras 27 y 28 se presentan las vistas 3D del diseño (cara superior e inferior), mientras que la Figura 29 y Figura 30 ilustra la implementación física final de la placa, ya fabricada y ensamblada con todos los componentes.

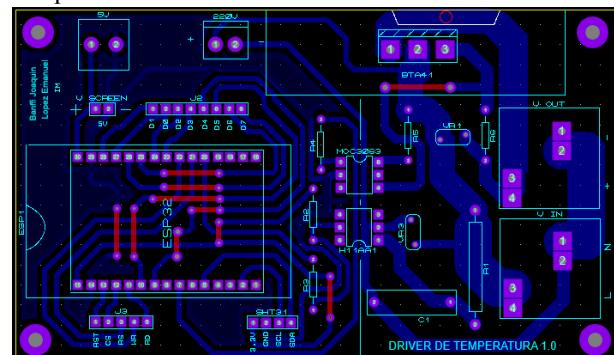


Fig. 26. Ruteo completo

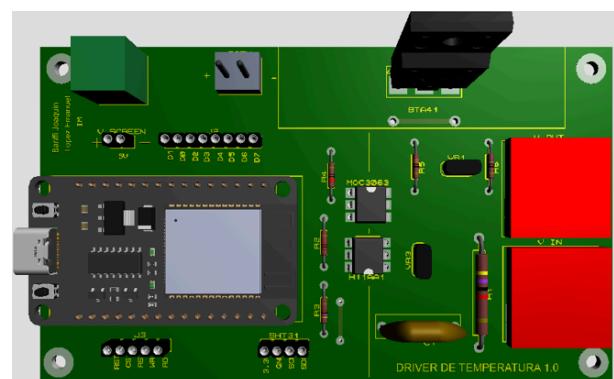


Fig. 27. Cara superior diseño 3D

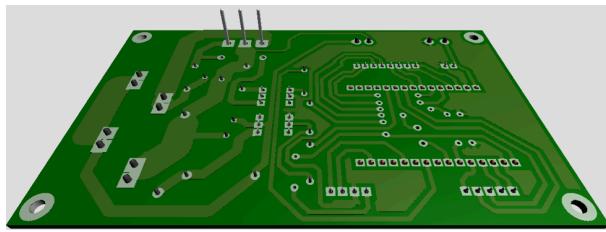


Fig. 28. Cara inferior diseño 3D



Fig. 29. Placa real

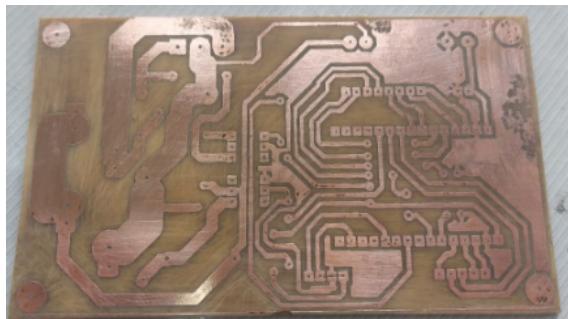


Fig. 30. Placa real antes de soldaduras

3.4 Montaje y funcionamiento final.

El montaje final integra la etapa de potencia (placa con TRIAC BTA41, optotriac MOC3063 y detección de cruce por cero) con la placa de control basada en ESP32, el sensor SHT31 y la pantalla TFT táctil. El driver se instaló en un gabinete plástico, separando físicamente la zona de alta tensión de la electrónica de baja tensión para mejorar la seguridad y reducir interferencias. (Figuras 31 y 32).



Fig. 31. Montaje



Fig. 32. Lectura de valores

CONCLUSIONES

El trabajo presentó el diseño, implementación y validación en banco de un sistema de control y supervisión para el horno deshidratador de la Planta Piloto FICA, combinando una etapa de potencia basada en TRIAC BTA41-800B con disparo en cruce por cero, una placa de control con ESP32 y un lazo de realimentación de temperatura y humedad mediante un sensor digital SHT31. Las simulaciones en Proteus del circuito de disparo y del detector de cruce por cero coincidieron con las formas de onda medidas experimentalmente en osciloscopio (Figura 33), lo que respalda la corrección del modelo adoptado y de las decisiones de diseño en la etapa de potencia. La separación física entre potencia y control en el PCB, el sobredimensionamiento del disipador y la modulación por ráfagas de semiperíodos sincronizadas con la red permitieron obtener un accionamiento estable, con bajo nivel de interferencias y adecuado para operación continua.

A pesar de estos resultados favorables, el sistema se encuentra aún en etapa de prototipo de laboratorio: no se ha realizado la instalación definitiva en el horno real, el lazo de control utiliza un único sensor SHT31 (sin redundancia ni medición de gradientes de temperatura en distintos puntos de la cámara) y la humedad solo se registra pero no se controla de forma activa. Además, el ajuste de los parámetros PID se realizó de manera empírica y podrían optimizarse mediante identificación del proceso y métodos de sintonía más rigurosos.

En síntesis, el driver desarrollado constituye una base sólida y funcional para el control de temperatura en hornos eléctricos de laboratorio, integrando de forma coherente electrónica de potencia, instrumentación, control automático, IoT y diseño de PCB. Al mismo tiempo, abre una serie de líneas claras de mejora: incorporación de más sensores de temperatura y humedad, desarrollo de un lazo específico de control de humedad, aumento de las funciones de seguridad y registro de datos, y eventual integración con sistemas SCADA de mayor escala. Estas extensiones permitirían

evolucionar el prototipo actual hacia un sistema de control industrial más completo y robusto.

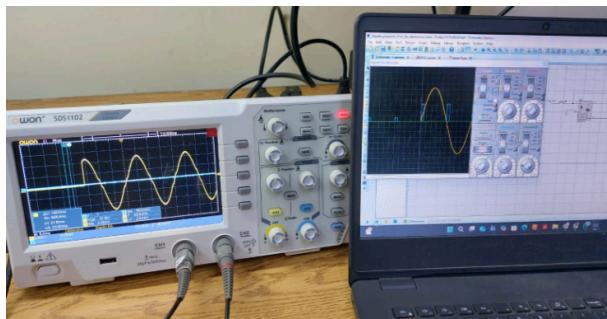


Fig. 33. Simulación vs Protoboard

REFERENCIAS

- [1] Espressif Systems. "ESP32 Series Datasheet". 2021. Disponible en: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [2] Vishay. "H11AA1 Optocoupler, AC Input" (Datasheet). Disponible en: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/253063/VISHAY/H11AA1.html>
- [3] STMicroelectronics. "BTA41 Series, 40 A Triacs" (Datasheet). Disponible en: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22033/STMICROELECTRONICS/BTA41.html>
- [4] Motorola / ON Semiconductor. "MOC3063, Zero-Crossing Triac Driver Output Optocoupler" (Datasheet). Disponible en: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5043/MOTOROLA/MOC3063.html>
- [5] YouTube. "Video de referencia de la pantalla utilizada en el proyecto". Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=EiC2gSOasJw>
- [6] Blynk Inc. "Blynk IoT Platform Documentation". Disponible en: <https://docs.blynk.io>