

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**PROYECTO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL EN
LAZO CERRADO DE TEMPERATURA EN HORNOS POR MEDIO DE
CONVERTIDORES ESTÁTICOS**

**COMPONENTE: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL EN
LAZO CERRADO DE TEMPERATURA EN UN HORNO ELÉCTRICO
EMPLEANDO RESISTENCIAS - CONTROL ELECTRÓNICO AL
LADO AC CON CONVERTIDORES AC/AC**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

DAVID SANTIAGO TIRIRA CHULDE

david.tirira@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR.-ING. PAÚL MARCELO POZO PALMA

marcelo.pozo@epn.edu.ec

D.M.Q., febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, DAVID SANTIAGO TIRIRA CHULDE declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

DAVID SANTIAGO TIRIRA CHULDE

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DAVID SANTIAGO TIRIRA CHULDE, bajo mi supervisión.

DR.-ING. PAÚL MARCELO POZO PALMA
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DAVID SANTIAGO TIRIRA CHULDE

Dr.-Ing. PAÚL MARCELO POZO PALMA

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres, Cesar Tirira y Mary Chulde, por su incondicional y completo apoyo durante todos estos años de estudio. Ustedes han sido mi roca cuando todo parecía desmoronarse, mi luz cuando todo parecía oscurecerse y mi guía cuando todo parecía perdido. Sin ustedes nada de esto no sería posible, los amo.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, quienes nunca se rindieron conmigo, quienes me levantaron del suelo las muchas veces que caía. Haría falta más de una vida para poder agradecer todo lo que han hecho por mí, son mis ángeles en la tierra.

A mis hermanos, Dario y Fernanda, quienes constantemente me aconsejaron y animaron durante este largo viaje. Porque sin ustedes este viaje habría sido aburrido e incompleto.

A todos los amigos que hice durante estos años de estudio, ustedes me demostraron la existencia de una amistad sincera y desinteresada. Especialmente a Dario, gracias por hacer esta difícil travesía más llevadera y por siempre escuchar mis problemas.

A mi tutor, el Ing. Marcelo Pozo, por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto y su guía para la realización de este.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.3 ALCANCE	2
1.3.1 FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	2
1.3.2 FASE DE IMPLEMENTACIÓN	2
1.3.3 FASE DE RESULTADOS	3
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1 HORNOS ELÉCTRICOS	3
1.4.2 EFECTO JOULE.....	4
1.4.3 CONVERTORES ESTÁTICOS DE POTENCIA	5
1.4.4 CONTROL POR CICLO INTEGRAL.....	7
1.4.5 BANDA DE HISTÉRESIS	8
1.4.6 LAZO DE SEGUIMIENTO DE FASE (PLL)	9
2 METODOLOGÍA.....	11
2.2 PLANTEAMIENTO DEL CONVERTOR.....	12
2.2.1 NIVELES DE VOLTAJE, POTENCIA Y FRECUENCIA DEL SISTEMA	13
2.3 DIMENSIONAMIENTO COMPONENTES.....	14
2.3.1 MICROCONTROLADOR.....	15
2.3.2 SEMICONDUCTOR DE POTENCIA	16
2.3.3 GATE DRIVE	17
2.3.4 PLL	19
2.3.5 FUENTE DC	20
2.4 DISEÑO HARDWARE.....	22
2.4.1 DISPARO DE SEMICONDUCTORES.....	22
2.4.2 CIRCUITO DE LAZO DE SEGUIMIENTO DE FASE.....	23

2.4.3	SISTEMA EMBEBIDO	26
2.5	DISEÑO SOFTWARE	27
2.5.1	MICROCONTROLADOR.....	27
2.5.2	INTERFAZ GRÁFICA.....	32
2.6	IMPLEMENTACIÓN FÍSICA	32
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	36
3.1.1	SISTEMA IMPLEMENTADO	37
3.1.2	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	39
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
5	ANEXOS.....	54

RESUMEN

En el presente trabajo, se detalla el diseño, implementación y pruebas en lazo cerrado del control de temperatura de un horno eléctrico. Este proceso se realiza mediante un convertidor monofásico de tipo AC/AC con un control por ciclo integral para manejar una carga resistiva de potencia entre 1 kW a 4 kW.

Por otro lado, se presenta una rápida exposición sobre el funcionamiento de los hornos eléctricos, su principio de operación (transferencia de calor por efecto Joule) y sus diversas aplicaciones. Además, se proporciona una explicación del convertidor utilizado en este proyecto, detallando los niveles de potencia, voltaje y frecuencia necesarios para el control efectivo del sistema.

Asimismo, se enfatiza en el disparo de los semiconductores de potencia, la detención de cruces por cero de la red, el control por ciclo integral, una interfaz hombre-máquina y la banda de histéresis. Definiendo de esta manera, los elementos y dispositivos que integran tanto el circuito de control como el circuito de potencia.

Finalmente, para validar el funcionamiento del sistema en lazo cerrado, se presentan diversas evidencias de la implementación física del circuito electrónico y de las formas de onda obtenidas.

PALABRAS CLAVE: convertidores AC/AC monofásico, control por ciclo integral, temperatura, PLL.

ABSTRACT

In this document, the design, implementation, and closed-loop testing of the temperature control system for an electric furnace are presented. This process is carried out through a single-phase AC/AC converter with integral cycle control to manage a resistive load ranging from 1 kW to 4 kW.

In one hand, and on the other hand, a brief exposition is given regarding the operation of electric furnaces, their operating principle (heat transfer by Joule effect), and their applications. Furthermore, an explanation of the converter used in this project is provided, detailing the power, voltage, and frequency levels required for an effective system control.

Additionally, the fire of power semiconductors, zero-crossing detection, integral cycle control, a human-machine interface, and the hysteresis band are emphasized. Defining thus, the elements and devices that comprise both the control and power circuits.

Finally, to validate the closed-loop system's performance, various evidence from the physical implementation of the electronic circuit and the obtained waveforms are presented.

KEYWORDS: AC/AC single-phase converters, integral cycle control, temperature, PLL.

1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la electrónica de potencia, el control preciso de la temperatura en los diferentes procesos industriales desempeña un papel importante, dado su involucramiento en una variedad de aplicaciones de control de procesos. Los hornos eléctricos, un tipo de hornos industriales, son equipos diseñados para cambiar la temperatura de un material determinado en su interior mediante el paso de corriente eléctrica. Sin embargo, gran parte de estos no cuentan con un sistema de control en lazo cerrado, es decir, no cuentan con una etapa de instrumentación que permita la retroalimentación del sistema. Esto se traduce en desafíos para mantener una temperatura constante, precisa y acorde a los valores de referencia deseados [1]. Por esta razón, el presente proyecto se propone llevar a cabo un control de temperatura en lazo cerrado.

Tras comprender la importancia de implementar un control en lazo cerrado, es necesario señalar que se implementa un control por ciclo integral a la topología del convertidor estático de potencia AC/AC, siendo de características monofásicas. Asimismo, luego de la verificación del equipo en lazo abierto, se incorpora una banda de histéresis que facilita la retroalimentación del sistema y que permite el encendido y apagado autónomo con el objetivo de mantener el valor de referencia de temperatura.

Con este contexto, es importante destacar que el accionamiento electrónico en este proyecto son los semiconductores de potencia, en particular, un TRIAC. Dispositivos con la capacidad de transformar la energía de entrada en una energía diferente a la salida, es decir, permiten la modificación del voltaje de entrada hacia un voltaje de salida con características distintas. Además, estos dispositivos se sincronizan con la red para lograr el control por ciclo integral, permitiendo un lazo de seguimiento de fase [1].

Finalmente, cabe mencionar que el control de disparos de encendido y apagado del semiconductor, la gestión del ancho de banda de histéresis y el lazo de seguimiento de fase se llevan a cabo mediante un sistema embebido, específicamente para este proyecto, un microcontrolador de la familia STM32, dispositivo más que apto para esta aplicación de control.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar el control en lazo cerrado de temperatura en un horno eléctrico empleando resistencias – control electrónico al lado AC con convertidores AC/AC

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una investigación del proceso de calentamiento por resistencias eléctricas junto con una revisión bibliográfica de trabajos relacionados al tema
2. Realizar un estudio, análisis, dimensionamiento y selección de los eléctricos, electrónicos, digitales y de sensado para el control en lazo cerrado de temperatura en un horno con resistencias eléctricas por medio de convertidores estáticos
3. Realizar el acondicionamiento de las señales de entrada de los sensores a los niveles que necesita el sistema digital seleccionado, y de las señales de salida para el disparo de los semiconductores de potencia
4. Diseñar e implementar las placas PCBs de control y potencia
5. Implementar en el sistema digital seleccionado las estrategias de regulación para el control de temperatura
6. Implementar el sistema completo y comprobar el funcionamiento para diferentes referencias de temperatura y ante perturbaciones.
7. Diseñar un interfaz gráfica-HMI

1.3 ALCANCE

1.3.1 FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Investigación y análisis detallado de referencias bibliográficas sobre el funcionamiento de los hornos eléctricos, los métodos de control de temperatura, la topología de convertidores estáticos de potencia y la detección de cruce por cero mediante un PLL.

1.3.2 FASE DE IMPLEMENTACIÓN

Desarrollo de un código de programación que incorpore el control por ciclo integral en un convertidor AC/AC, complementado con una banda de histéresis, con el objetivo de lograr un control en lazo cerrado de la temperatura. Además, creación y validación del diseño

tanto del circuito de control como el de potencia, necesarios para la correcta operación del sistema en lazo cerrado.

1.3.3 FASE DE RESULTADOS

Realización de pruebas exhaustivas del sistema en lazo cerrado, con el fin de el correcto funcionamiento del sistema implementado.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 HORNOS ELÉCTRICOS

Un horno eléctrico, específicamente un horno eléctrico de resistencias, es un equipo utilizado en diversos procesos industriales que se encarga de elevar la temperatura de diversos elementos o piezas situadas en su estructura interna a niveles superiores de temperatura ambiente. Este proceso posibilita que dichos elementos o piezas experimenten cambios tales como ablandamiento, fusión, vaporización o recubrimiento, adaptándose así a diversas aplicaciones [2].

En este contexto, es importante destacar algunas aplicaciones de los hornos eléctricos, tales como [2]:

- Sinterizado y calcinación
- Fundición de metales
- Secado o disminución de humedad
- Combustión y eliminación de residuos
- Vulcanización de gomas
- Tratamiento de plásticos
- Procesos químicos

El principio de funcionamiento de un horno eléctrico de resistencias se sustenta en el efecto Joule, donde ciertos materiales conductores transforman la energía eléctrica en energía calórica. Esto debido a que, al ser alimentados por una fuente externa, los hornos generan calor cuando una corriente eléctrica fluye a través de los elementos calefactores, transfiriendo este calor al ambiente interno del horno [3].

Cabe destacar que a este tipo de hornos es posible integrar una unidad de control automatizada, para así regular y mantener la temperatura deseada, lo que se traduce en una ventaja aprovechable. Sin embargo, es importante mencionar que, siendo por naturaleza el cambio de temperatura un proceso lento, el control de temperatura de los hornos eléctricos pueden tardar en alcanzar los valores de temperatura requerida [3].

1.4.2 EFECTO JOULE

El efecto Joule, también conocido como calentamiento resistivo, consiste en un proceso en cual los electrones de una corriente eléctrica chocan contra un material conductor, dando lugar a que la energía cinética de estos electrones se transforma en energía térmica. En otras palabras, el efecto Joule posibilita la conversión de energía eléctrica a energía calórica, resultando en el calentamiento del material conductor [4].

Los factores que inciden en este fenómeno son [4].:

- Resistencia (R): Oposición al paso de corriente, se mide en ohmios.
- Intensidad de corriente (I): Cantidad de electrones que pasan por un material conductor, se mide en amperios.
- Energía disipada (E): Energía térmica disipada por un material conductor, se mide en Joules.
- Potencia eléctrica (P): Energía por unidad de tiempo de la carga resistiva, se mide en watts.
- Tiempo (t): Intervalo de tiempo que toma la intensidad de corriente en fluir por el material conductor, se mide en segundos.

Considerando estos aspectos, es posible calcular matemáticamente el efecto Joule, tal como se expresa en la Ecuación 1.1 [4].:

$$E = P \cdot t \quad (1.1)$$

Teniendo en cuenta que la potencia eléctrica está dada por la Ecuación 1.2.

$$P = R \cdot I^2 \quad (1.2)$$

Se tiene:

$$E = R \cdot I^2 \cdot t \quad (1.3)$$

1.4.3 CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTENCIA

1.4.3.1 Concepto

Un convertor estático de potencia es un dispositivo electrónico diseñado para transformar la energía eléctrica que ingresa a un formato diferente, pero que se caracteriza por no utilizar componentes mecánicos en su funcionamiento principal. La estructura básica de este se encuentra representado en la Figura 1.1 [5].

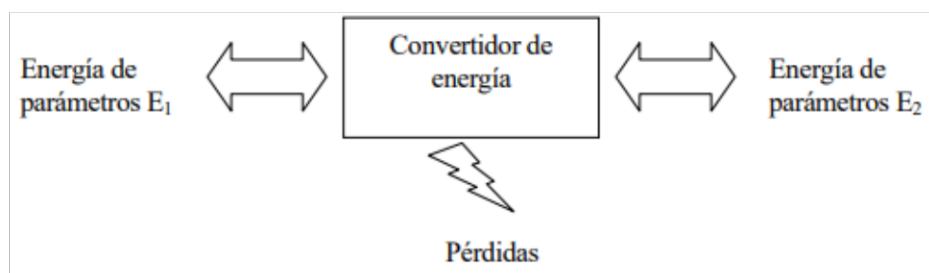


Figura 1.1. Esquema de Convertidor Estático de Potencia [5].

1.4.3.2 Tipos de Convertidores

Considerando el tipo de energía de entrada y energía de salida, los convertidores estáticos de potencia se clasifican como [5].:

- Convertidor de corriente alterna a corriente continua (AC/DC – Rectificador)
- Convertidor de corriente continua a corriente continua (DC/DC – Regulador DC)
- Convertidor de corriente continua a corriente alterna (DC/AC – Inversor)
- Convertidor de corriente alterna a corriente alterna (AC/AC – Regulador AC)

En base a la anterior, se establece que el convertidor más adecuado para implementar en este proyecto es el convertidor estático AC/AC. Este tipo de circuito electrónico permite la modificación de la tensión eléctrica y la frecuencia de salida, aspectos fundamentales para ajustar el valor de intensidad de corriente que circulará a través de la carga resistiva. Aspectos fundamentales para generar variaciones de temperatura en el horno eléctrico.

1.4.3.2.1 Convertidores AC/AC

Los convertidores de corriente alterna a corriente alterna, son equipos que permiten modificar la corriente alterna manteniendo su naturaleza. Es decir, la transformación se basa en disminuir el valor eficaz del voltaje a la entrada, y en ciertos casos, ajustar la frecuencia de entrada a valores específicos. Este tipo de convertidores se usa en la

creación de arrancadores suaves para motores síncronos, reguladores, controladores de temperatura para calderas y calentadores, entre otras aplicaciones [5].

Un esquema circuital básico de un convertidor AC/AC monofásico consiste en dos semiconductores de potencia conectados en antiparalelo, tal como se observa en la Figura 1.2 [5].

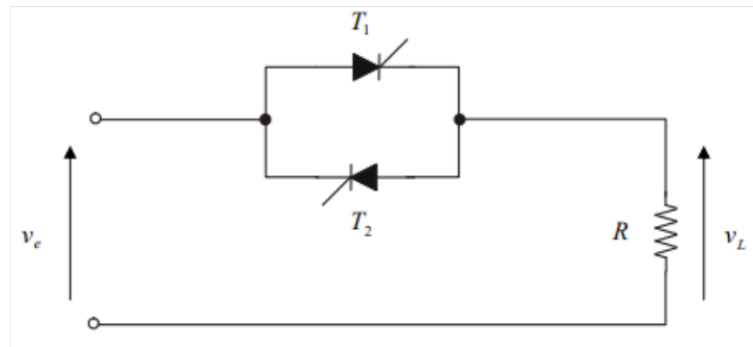


Figura 1.2. Esquema Circuital de un Conversor AC/AC Monofásico [5].

De lo anterior, se afirma que el control del voltaje de salida se efectúa manipulando la activación de los semiconductores T_1 y T_2 . Este tipo de control se puede llevar a cabo de tres maneras [1]:

- Ciclo integral
- Fase directa
- Troceador o regulador DC

1.4.3.2.2 Semiconductores de potencia

La evolución de los convertidores, o también conversores, está vinculada al desarrollo de los dispositivos de estado sólido utilizados en su construcción, los conocidos normalmente como semiconductores de potencia. Aunque en la actualidad existe disponible una amplia gama de estos dispositivos para el diseño de convertidores, todos tienen en común el mismo objetivo; controlar y gestionar la distribución de energía eléctrica en sistemas de alta potencia [5].

Es preciso tener en cuenta que el semiconductor utilizado para este proyecto es un Triac. Aunque dispositivos como tiristores son los comunes en aplicaciones de media y alta potencia, los Triacs suelen asociarse más con baja potencia; existen variantes de Triacs diseñados para manejar niveles altos de potencia y corriente [1].

1.4.4 CONTROL POR CICLO INTEGRAL

El control por ciclo integral, también conocido como control de abrir y cerrar, consiste en la activación y desactivación controlada de los semiconductores de potencia en antiparalelo durante un tiempo específico, para conectar el circuito de carga a la fuente AC. Este periodo de activación y desactivación se determina por un número entero de ciclos, donde “n” representa los ciclos activos y “m” los ciclos inactivos. Es importante destacar que la activación y desactivación de estos dispositivos ocurre en los cruces por cero del voltaje de entrada, tal como se ilustra en la Figura 1.3 [6].

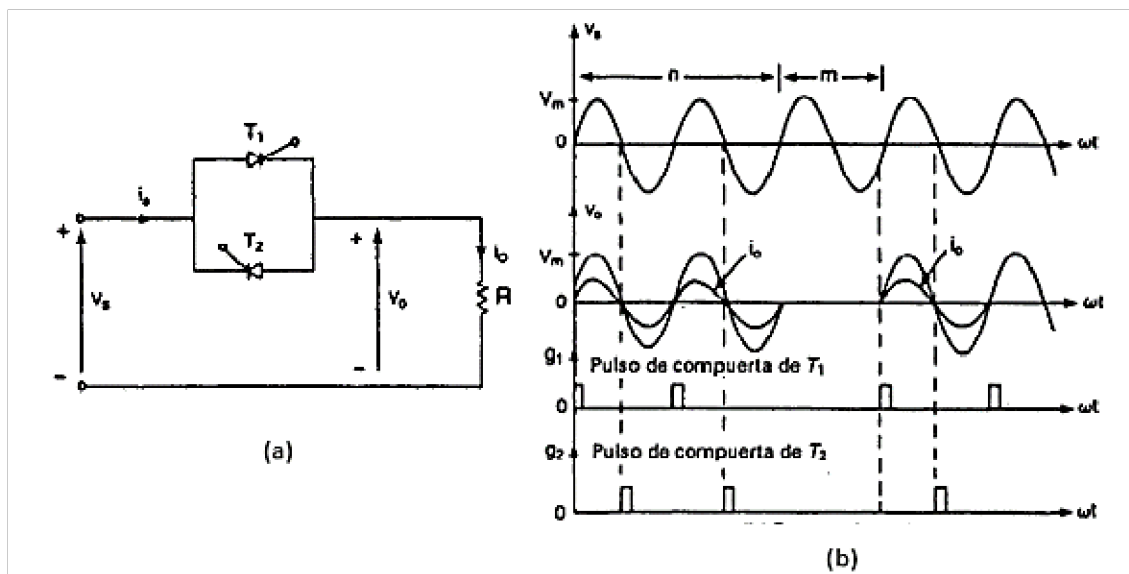


Figura 1.3. Control por Ciclo Integral: a) Esquema Circuitual, b) Señales de Entrada y Salida [6].

De esta manera, en este tipo de control, los semiconductores de potencia actuaran como un contactor de alta velocidad. Se observa que este tipo de control reduce el valor eficaz de la entrada, como se ilustra de mejor manera en la Figura 1.4 [5].

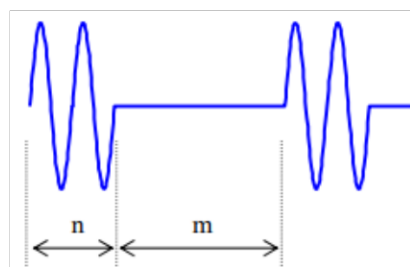


Figura 1.4. Señal de Salida con Control por Ciclo Integral [5].

Para un voltaje de entrada en forma sinusoidal que se conecta por n ciclos y desconecta por m ciclos, el voltaje RMS a la salida se calcula de la siguiente manera [6]:

$$V_{out} = \left[\frac{n}{2\pi(n+m)} \int_0^{2\pi} 2V_{in}^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right] \quad (1.4)$$

Resolviendo la Ecuación 3.1 se obtiene:

$$V_{out} = V_{in} \sqrt{\frac{n}{m+n}} = V_{in} \sqrt{k} \quad (1.5)$$

Donde “k” representa el ciclo de trabajo y es igual a:

$$k = \frac{n}{m+n} \quad (1.6)$$

Este tipo de control es el más idóneo para este proyecto, ya que la técnica por ciclo integral normalmente se suele aplicar en procesos con un alta constante de tiempo, que es el caso de sistemas térmicos, es decir procesos donde la inercia térmica del sistema es mucho mayor a la variación eléctrica (cargas meramente resistivas) [5].

1.4.5 BANDA DE HISTÉRESIS

Para complementar el control por ciclo integral explicado en la sección anterior, se ha establecido el uso de una banda de histéresis, lo que permite un control de encendido y apagado que influye en la variable del proceso cuando la temperatura cruza el punto de referencia. De esa manera, la salida del sistema tiene solamente dos estados: completamente encendido o completamente apagado, estados que inciden cuando la variable a la salida esté por encima del valor deseado o por debajo, respectivamente una banda o error de tolerancia [7].

En la Figura 1.5 se presenta un diagrama de tiempo que se aplica para el control ON/OFF con histéresis, el cual se ha empleado en el proyecto para la regulación de la temperatura.

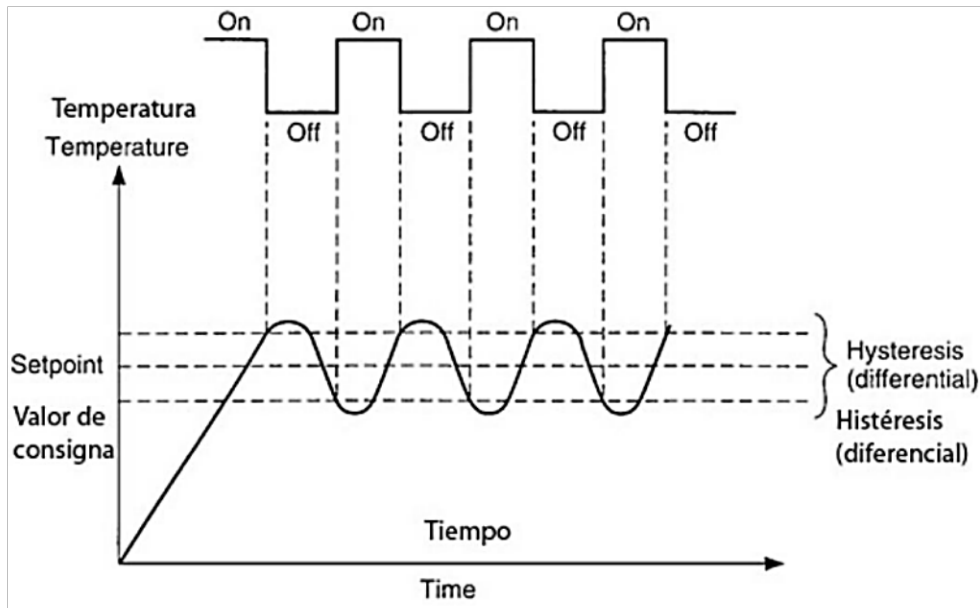


Figura 1.5. Control ON/OFF con Histéresis [7].

1.4.6 LAZO DE SEGUIMIENTO DE FASE (PLL)

Un lazo de seguimiento de fase, también llamado PLL por sus siglas en inglés, es un sistema de control realimentado que se utiliza para la sincronización de una señal de salida con respecto a la magnitud, frecuencia y ángulo de una señal de entrada. El circuito PLL se compone de tres etapas: detección de fase, filtración y oscilador controlado por voltaje (VCO), tal como se puede visualizar en la Figura 1.6 [8].

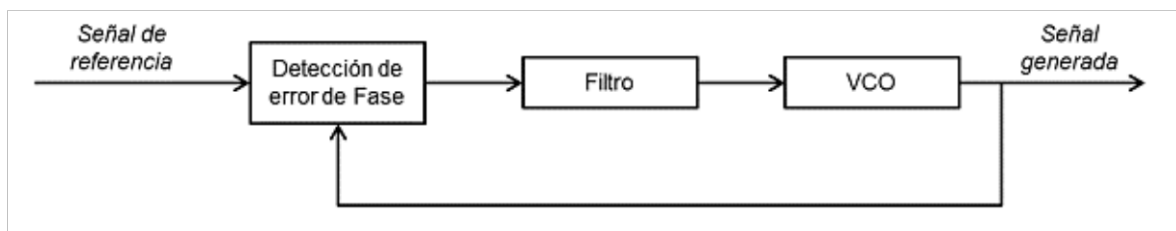


Figura 1.6. Diagrama de Lazo de Seguimiento de Fase [8].

En base a la imagen anterior, se describe detalladamente cada una de las etapas de un circuito PLL [1].:

- **Detección de Fase:** Etapa donde se compara la señal de entrada con la señal de salida y de esa manera producir una salida proporcional a la diferencia de fase entre ambas señales.

- **Filtro:** Tras esta comparación en la etapa anterior, es posible que se presenten ciertas perturbaciones y ruido de alta frecuencia en la señal proporcional, razón por la cual es necesario la implementación de un filtro para eliminar estas distorsiones.
- **VCO:** Finalmente, el oscilador controlado es el encargado de actuar en caso de que exista un aumento en el error entre la señal de entrada y salida.

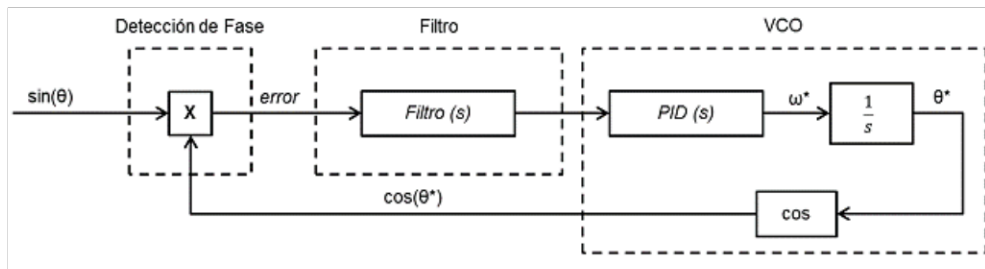


Figura 1.7. Diagrama de Bloque de Lazo de Seguimiento de Fase [8].

Para este proyecto, el circuito de seguimiento de fase permite establecer un funcionamiento preciso del sistema en lazo cerrado, ya que se emplea para llevar a cabo la sincronización de la señal de control de los disparos de los semiconductores con la señal de entrada, que corresponde al voltaje proveniente de la red eléctrica. Esto dado que la señal de entrada puede estar sujeta a niveles significativos de ruido, lo que podría afectar al disparo de los semiconductores. La implementación del PLL posibilita mitigar estos efectos con una sincronización adecuada.

Esta serie de pasos, desde la generación de la señal de fase hasta el control, son fundamentales para el correcto funcionamiento del sistema. En secciones subsiguientes, se detallará y analizará el desempeño de cada etapa, confirmando la eficacia del diseño propuesto.

2.2 PLANTEAMIENTO DEL CONVERTOR

Recapitulando, para el diseño e implementación del control de temperatura para un horno eléctrico, se ha determinado, con base en la revisión bibliográfica, que el convertor AC/AC monofásico es la elección más apropiada para esta aplicación específica. Se ha seleccionado el dispositivo semiconductor Triac para la implementación. A pesar de su uso predominante en aplicaciones de bajas potencias, se han identificado modelos específicos que cumplen de manera adecuada con los requerimientos de este proyecto. El control de un dispositivo Triac es generalmente más simple que el de dos tiristores en antiparalelo, involucrando circuitos más sencillos reduciendo la complejidad del diseño. Un esquema general de este planteamiento se observa en la Figura 2.2.

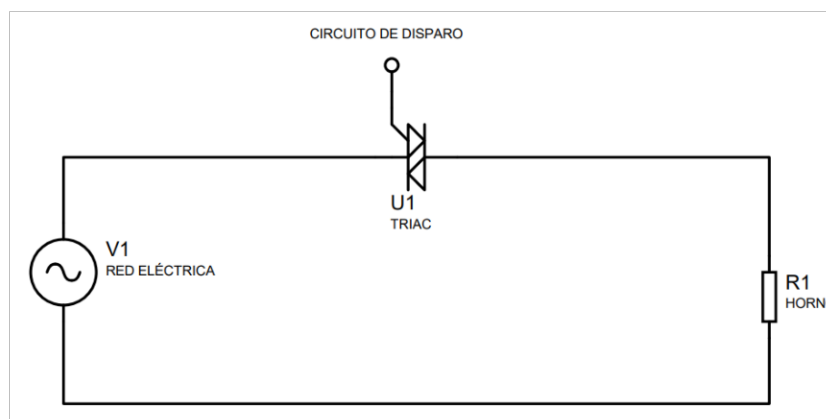


Figura 2.2. Planteamiento Convertor AC-AC

La carga del sistema consiste en resistencias de niquelinas de aproximadamente un 1kW de la compañía ABB, equipo facilitado por el laboratorio de accionamientos electrónicos. Esta se puede observar en la Figura 2.3.



Figura 2.3. Carga Resistiva ABB

2.2.1 NIVELES DE VOLTAJE, POTENCIA Y FRECUENCIA DEL SISTEMA

Considerando la estructura del convertidor AC-AC, presentado en la Figura 2.2, es necesario destacar que el voltaje de entrada corresponde a una onda sinusoidal suministrada por la red eléctrica, una fuente AC de voltaje constante. De esta manera, se espera que el circuito trabaje a 120 Vrms. El voltaje de entrada se expresa como [10].:

$$V_{in} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

En base la Ecuación 2.1, se puede expresar que el voltaje de entrada está en función de la frecuencia, ya que $\omega=2\pi f$. En el contexto de este proyecto, la variable f representa a la frecuencia de la red, con un valor específico de 60 Hz [10].

Tras haber definido los niveles de voltaje y frecuencia en la entrada del sistema, se procederá al cálculo de los valores en la salida. Utilizando la ecuación 2.2, se podrá determinar la corriente RMS de la carga, dado que la corriente de entrada es la misma que la corriente a la salida. Además, se debe tomar en cuenta los objetivos del proyecto que especifica trabajar con una potencia de hasta 4kW, por tanto:

$$P_{in} = V_{in} \cdot I_{in} = V_{in} \cdot I_{out} \quad (2.2)$$

$$I_{out} = \frac{P_{in}}{V_{in}} \quad (2.3)$$

$$I_{out_{rms}} = \frac{4000 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 33.33 \text{ A} \quad (2.4)$$

El valor obtenido representa la corriente máxima que el dispositivo semiconductor deberá soportar. Es importante tener en cuenta este dato al momento de dimensionar los

componentes del sistema, ya que permitirá trabajar con alta potencia, específicamente con valores de hasta 4kW.

En el marco de este proyecto se utilizó una carga resistiva de 22 ohmios, dispositivo facilitado por el laboratorio. Aunque esta carga no permite aprovechar al máximo el convertidor diseñado, los siguientes cálculos teóricos podrán demostrar la correcta implementación del sistema.

Por tanto, utilizando la Ecuación 1.5, se determina el voltaje RMS en la salida. Dado el carácter resistivo de la carga de 22 ohmios y la elección arbitraria de 30 ciclos de trabajo cuando todos estén activos, se tiene que:

$$V_{out_{rms}} = V_{in} \sqrt{\frac{n}{m+n}} = 120 V \sqrt{\frac{30}{0+30}} = 120V_{rms} \quad (2.5)$$

En base a esto, la corriente RMS de la carga es:

$$I_{out_{rms}} = \frac{V_{out}}{R} = \frac{120 V}{22 \Omega} = 5.45A_{rms}. \quad (2.6)$$

La potencia de la carga es:

$$P_{out} = I_{out}^2 \cdot R = (5.45 A)^2 \cdot 22 \Omega = 653.46W. \quad (2.7)$$

Estos resultados teóricos, los cuales describen el comportamiento anticipado del sistema en términos de voltaje RMS, pueden ser confirmados y respaldados mediante evidencia práctica en secciones posteriores.

2.3 DIMENSIONAMIENTO COMPONENTES

El dimensionamiento de los componentes del sistema desempeña un papel fundamental en la eficiencia operativa, la fiabilidad a largo plazo y la seguridad del equipo. Este proceso implica la selección cuidadosa de microcontroladores, semiconductores de potencia, dispositivos de aislamiento óptico, entre otras, para garantizar así un rendimiento óptimo, cumplir con las especificaciones requeridas y mitigar cualquier clase de riesgo asociado con sobrecargas.

2.3.1 MICROCONTROLADOR

Relacionado con la elección del microcontrolador, resulta esencial destacar que el sistema embebido debe ser idóneo para una aplicación de control que exige sincronización con la red y, por siguiente, la precisa adquisición de datos vinculados a los cruces por cero. Por tanto, se decidió la selección hacia una placa de desarrollo perteneciente a la familia de los STM32, equipos de alto rendimiento y gran capacidad.

Es así como la propuesta del proyecto es utilizar el modelo STM32F103, observada en la Figura 2.4, debido a su considerable capacidad de procesamiento, su tamaño compacto y su bajo costo. Este modelo presenta las siguientes características técnicas [11].:

- Alimentación de 3.3-5 VDC
- Procesador ARM 32-BIT
- Memoria Flash de 768 Kbytes
- SRAM de 96 Kbytes
- Frecuencia de 72 MHz con un rendimiento de 1.254 DMIPS/MHz
- Oscilador de Cristal de 4-16 MHz
- Reloj de tiempo real integrado
- 26 Entrada y salidas digitales, todas con interrupciones
- 2 Conversores A/D
- Rango de Conversión de 0 a 3.6 V
- Dimensiones 5.3 cm x 2.2 cm

Analizando estas características, se puede afirmar que este modelo de microcontrolador puede llevar a cabo cálculos precisos y rápidos de manera relativamente sencilla, lo cual es esencialmente crucial para la detección exacta de cruces por cero y la generación de señales del disparo del semiconductor.

Aunque en el mercado existen modelos de la misma familia con una frecuencia superior, un mejor procesamiento y mayor cantidad de pines de entrada y salida, este modelo cumple de manera más que adecuada con los propósitos del proyecto, especialmente al tener en cuenta que la temperatura es una variable lenta que cambia de manera gradual y no abrupta. Además, su tamaño compacto y su más que suficiente cantidad de entradas y

salidas refuerzan la idoneidad y eficiencia de este microcontrolador para las aplicaciones previstas [12].

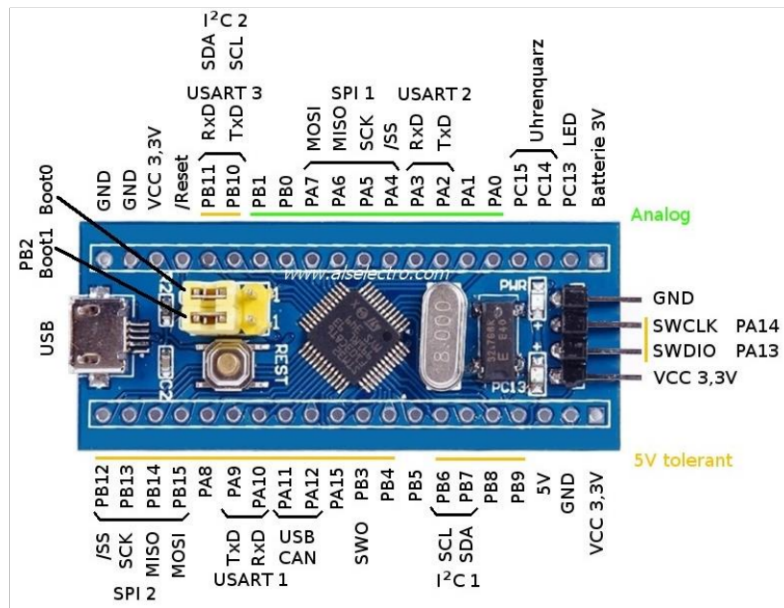


Figura 2.4. Placa de Desarrollo STM32F103 [12].

2.3.2 SEMICONDUCTOR DE POTENCIA

Como se mencionó en secciones anteriores, se optó por utilizar un Triac como semiconductor en el convertor AC-AC, en concreto el modelo BTA440Z-800BT, un Triac tríodo de tres cuadrantes, con alta capacidad de conmutación y diseño pasivo planar. Este modelo se emplean comúnmente en aplicaciones relacionadas con altas temperaturas, voltajes elevados y en controles de alta potencia, como sistemas de calefacción, entre otros. En las Figuras 2.5 y 2.6 se observa este modelo y su distribución de pines [13].



Figura 2.5. Triac BTA440Z-800BT [14].

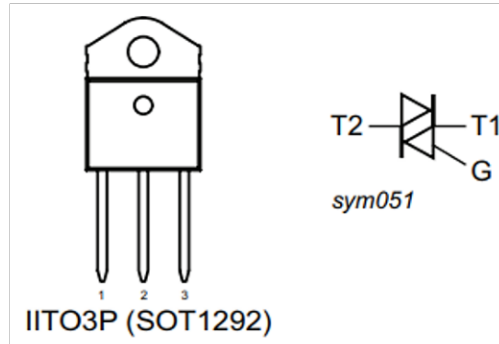


Figura 2.6. Esquema Simplificado y Símbolo del BTA440Z-800BT [13].

Entre las características de este dispositivo que son aplicables a este proyecto están [13]:

- Capacidad de alto voltaje
- Tecnología 3Q para inmunidad al ruido
- Alta capacidad de conmutación
- Alta inmunidad a falsos disparos
- Resistencias a altas temperaturas en la unión de juntura

Al analizar la hoja de datos del Triac BT440Z-800BT, se analizan tres características de este dispositivo: la corriente RMS, el voltaje repetitivo inverso y la corriente pico no repetitiva. La corriente RMS máxima que el Triac puede soportar es de 40 A. Basándose en los valores obtenidos en la Ecuación 2.4, se concluye que este elemento es más que capaz de trabajar con aplicaciones de 4 kW. En cuanto al voltaje repetitivo máximo al que opera, se registra un valor máximo de 800 V; esta característica es de suma importancia para garantizar el funcionamiento seguro del Triac. Por último, la corriente pico no repetitiva alcanza un máximo de 440 A, representado un valor que el dispositivo puede soportar durante eventos anormales, no así de manera continua [15].

2.3.3 GATE DRIVE

En aplicaciones de alta potencia, un semiconductor de potencia no puede ser activado directamente por una señal PWM, dado que esta es una salida lógica de baja corriente que requeriría un tiempo excesivamente prolongado para cargar la capacitancia de la compuerta del semiconductor. Además, la exposición al circuito de potencia podría ocasionar consecuencias perjudiciales, como sobrevoltajes o sobrecorrientes, para el sistema embebido generador de esta señal de control [16].

Para superar estas complicaciones, se emplea el Gate Drive, un circuito diseñado para proporcionar una señal de control amplificada que puede activar y desactivar los semiconductores de potencia. La clave de su funcionalidad está en la amplificación de corriente, para así asegurar que la compuerta del semiconductor de potencia reciba la corriente necesaria para cambiar de estado de manera eficiente. Además, incorpora técnicas de aislamiento que protegen al circuito de control ante posibles situaciones adversas [16].

Para este proyecto, se ha optado por usar un Gate Drive con aislamiento óptico, específicamente un optotriac. Este dispositivo consiste en un circuito integrado conformado por un diodo emisor de luz y un fototriac. Su principio de funcionamiento consiste en que el diodo emisor de luz recibe la señal PWM generada por el sistema embebido para accionar el fototriac, que a su vez activará o desactivará el semiconductor de potencia [16].

El dispositivo seleccionado es el MOC3061, un optoacoplador en formato DIP-6 con salida tipo Triac, que se puede observar en la Figura 2.7 y la distribución de sus pines en la Figura 2.8. Este dispositivo posibilitará en el proyecto el aislamiento entre el circuito de potencia y el de control, así como el control de la carga utilizada [17].



Figura 2.7. MOC3061 [18].

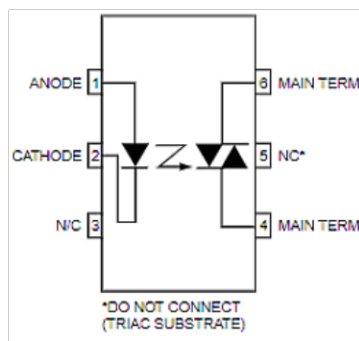


Figura 2.8. Esquemático MOC3061 [17].

Entre las características de este dispositivo que son aplicables a este proyecto están [17].:

- Para control lógico de corriente alterna de 115/240 VAC
- Con detector de cruce por cero
- Corriente de Disparo máximo 15 mA
- Voltaje de ruptura directa 6 V
- Voltaje repetitivo de pico inverso 600 V
- Recomendado en aplicaciones de controles de temperatura

Entre todas estas características, destaca el detector de cruce por cero. Este tipo de optoacopladores con detector de cruce por cero se caracteriza porque la conexión y desconexión se da cuando la tensión está cerca de cero. Por tanto, se emplea en aplicaciones donde el semiconductor está completamente encendido o apagado, es decir, cuando no es necesario disparar el Triac en un momento específico, sino cuando la corriente este próxima a cero [18].

2.3.4 PLL

Como se mencionó en secciones anteriores, un PLL es un dispositivo para generar una señal de referencia en fase con una señal de entrada. En este proyecto, se ha empleado el PLL para detectar el cruce por cero de la red y así poder el disparo de los semiconductores. El PLL genera una señal cuadrada que indica el cruce por cero en cada ciclo, con cruce por cero en 0° al inicio y en 180° al final del ciclo.

Para el diseño de este proyecto, se ha seleccionado el circuito integrado CD4046BE, un PLL de micropotencia compuesto por un oscilador de voltaje controlado, un seguidor de fuente, un diodo Zener y dos comparadores de fase. Este dispositivo puede observarse en la Figura 2.9, junto con la distribución de sus pines en la Figura 2.10 [19].

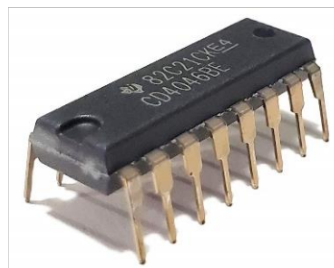


Figura 2.9. CD4046BE [20].

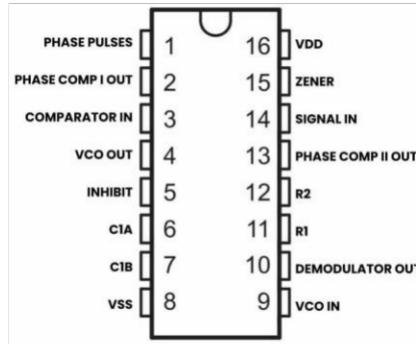


Figura 2.10. Esquemático CD4046BE [20].

Entre las características más importantes de este circuito integrado están [19].:

- Encapsulado DIP-16
- Bajo consumo de energía
- Rango de frecuencia de entrada de 300 KHz a 2.4 MHz
- Voltaje de alimentación 3-18 V
- Dos comparadores de fases (Tipo XOR y memoria controlada por flancos)
- Diodo zener para regulación de fuente

El circuito integrado CD4046BE se emplea comúnmente en aplicaciones vinculadas a la generación de señales de reloj de alta precisión para microcontroladores y otros sistemas embebidos. Además, su versatilidad permite la conexión directa de la entrada para señales de alta voltaje o conexión con un amplificador de autoajuste [20].

El circuito integrado CD4046BE se utiliza normalmente en aplicaciones relacionadas con generación de señales de reloj precisas para microcontroladores y otros circuitos digitales. Además de que la entrada de señal puede conectarse directamente para señales de voltaje elevado o conectarse a un Gate Drive [20].

2.3.5 FUENTE DC

Los dispositivos, como la placa de desarrollo STM32F103 y el circuito integrado CD4046BE, requieren una fuente de alimentación para su funcionamiento, siendo necesario un voltaje DC de 5V. Por esta razón, se ha optado por emplear una fuente de alimentación conmutada, un dispositivo electrónico que transforma la corriente alterna en corriente continua. Esta elección, además de garantizar el adecuado funcionamiento de estos dispositivos, es más eficiente y posibilita la reducción de elementos necesarios,

simplificando el sistema. La fuente conmutada HLK-PM01 se puede observar en la Figura 2.11. y su diagrama de conexión en la Figura 2.12 [21].



Figura 2.11. HLK-PM01 [22].

En la Figura 2.12 se puede observar el modo de conexión de la fuente de alimentación conmutada HLK-PM01, donde a la entrada se conecta la alimentación de la red, y a la salida se tiene un voltaje DC para la alimentación del microcontrolador y los circuitos integrados involucrados en este proyecto. Cabe destacar que este modo de conexión es igual en todas las fuentes de alimentación de la marca Hi-Link.



Figura 2.12 Diagrama de Conexión de Fuentes de Alimentación Conmutada [22].

La especificaciones y características de la fuente HLK-PM01 son [22].:

- Voltaje de entrada 100-240 VAC
- Voltaje de salida 5 VDC
- Corriente de salida 600 mA
- Potencia máxima 3 W

La fuente conmutada HLK-PM01 se destaca como elección idónea como fuente de alimentación DC para el proyecto. Su diseño compacto no solo posibilita una solución sin

necesidad de fuentes externas, simplificando el sistema, sino que también proporciona protección contra sobrepicos de corriente y voltaje.

2.4 DISEÑO HARDWARE

2.4.1 DISPARO DE SEMICONDUCTORES

El conversor AC-AC diseñado para este proyecto consiste en un circuito sencillo, conformado principalmente por el Triac BRT44OZ y el optoacoplador MOC3061. Este diseño permite sin dificultades el control de voltajes de cargas de alta potencia mediante señales de control generadas por la placa de desarrollo STM32F103. En la Figura 2.13 se puede observar el esquema de conexión propuesto por el fabricante para el disparo del Triac BRT44OZ [18].

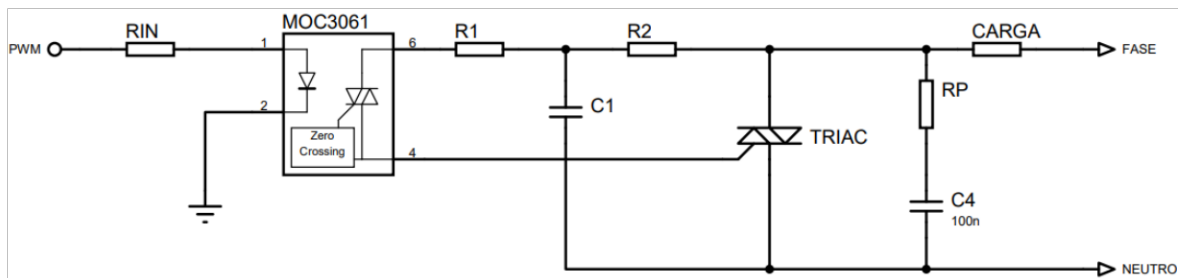


Figura 2.13. Esquema de Conexión del Circuito de Disparo Proporcionado por Fabricante

El principio de funcionamiento de este esquema radica en la aplicación de 5V desde la STM32F103 al optoacoplador MOC3061 en los pines 1 y 2, que incluyen un diodo emisor de luz. Este diodo emite luz infrarroja que activa el fototriac en los pines 6 y 4. Esto permite que la corriente fluya hacia la compuerta de disparo del Triac BTA440Z, el cual finalmente, posibilita la conducción de la corriente entre sus dos terminales principales. Por el contrario, al no aplicar voltaje al optoacoplador en los pines 1 y 2, este diodo actúa como un interruptor abierto, impidiendo el flujo de corriente en el circuito de potencia.

El cálculo de la resistencia Rin, ubicada del lado del circuito de control, se lleva a cabo mediante la ley de Ohm. Utilizando la información suministrada fabricante, se sabe que la corriente de activación del LED del MOC3061 es 15 mA, por tanto:

$$R_{in} = \frac{V}{I} = \frac{5 V}{15 mA} = 333.33\Omega. \quad (2.8)$$

Por tanto, se escoge un valor comercial de resistencia y se tiene que:

$$R_{in} = 330\Omega. \quad (2.9)$$

El cálculo de la resistencia R1, del lado del optotriac, se calcula en función de corriente máxima de sobresalto repetitivo, la cual por datos del fabricante se sabe que es 1 A. Por tanto:

$$R_1 = \frac{V_{in}}{I} = \frac{120 V}{1 A} > 120\Omega. \quad (2.10)$$

Se escoge un valor de resistencia comercial para R1 y se tiene:

$$R_1 = 180\Omega. \quad (2.11)$$

Los valores de R2 y C1 se escogieron en función de recomendaciones de la hoja de datos del fabricante. Los cuales tienen valores de:

$$R_2 = 22[\Omega] \text{ y } C_1 = 100 [nF]. \quad (2.12)$$

Finalmente, la resistencia RP y el capacitor CP corresponden elementos para la supresión de picos del Triac y se pueden obviar según necesidades del Triac. Para este proyecto, no se incluyeron en el sistema. Por lo que el circuito diseñado se observa en la Figura 2.14.

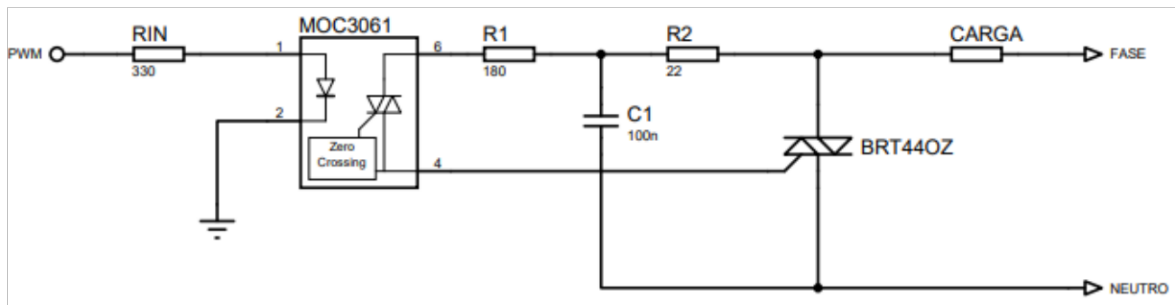


Figura 2.14. Circuito de Disparo Diseñado

2.4.2 CIRCUITO DE LAZO DE SEGUIMIENTO DE FASE

El lazo de seguimiento de fase es uno de los requisitos necesarios del proyecto para sincronizar el sistema y la detección de cruces por cero. El diseño de esta sección del proyecto se divide en dos partes consecutivas. En primer lugar, se incluye un circuito que permita disminuir el voltaje de la señal a la entrada del PLL, de esa manera evitando daños a este dispositivo. En segundo lugar, se aborda la conexión del circuito integrado CD4046BE, una conexión propuesta por el fabricante que fue modificada para cumplir con

los requisitos específicos del proyecto de sincronización con la red y detección de los cruces por cero. Esto se puede visualizar de mejor manera en la Figura 2.15.

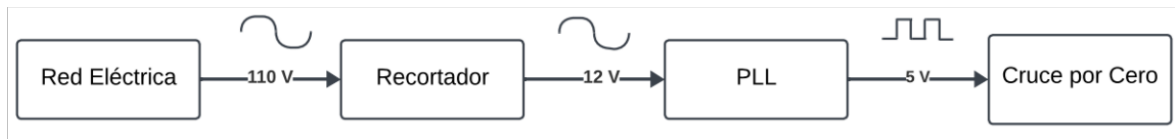


Figura 2.15. Diagrama de Lazo de Seguimiento de Fase

Esta primera parte de recortar la señal que suministra la red eléctrica se logra haciendo uso de un circuito simple de un rectificador de media onda, sencillamente utilizando una resistencia y un diodo en serie. Es importante señalar que para mejores resultados se hace uso de una resistencia de potencia que pueda soportar los altos valores y un diodo de recuperación rápida que permita obtener una mejor señal de respuesta, específicamente el modelo 1N4148. El circuito implementado se puede observar en la Figura 2.16.

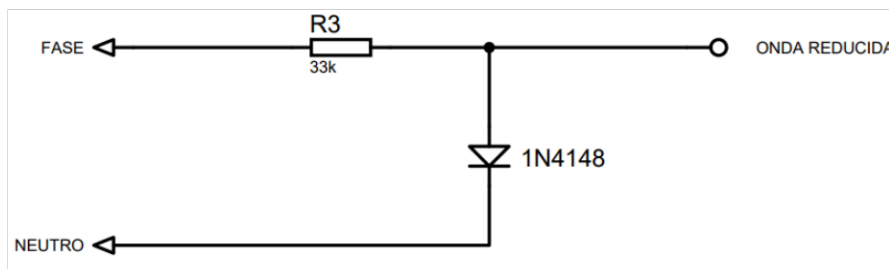


Figura 2.16. Rectificador de Media Onda

Es así como se obtiene una señal rectificadora y reducida con la misma frecuencia con la red eléctrica, la cual a continuación se utiliza como señal de entrada del circuito integrado CD4046 para la generación del cruce por cero, proceso que se detalla en las partes siguientes.

Como se mencionó anteriormente, el circuito integrado CD4046 se compone de un VCO y dos comparadores de fase distintos, Comparador de Fase I y Comparador de Fase 2. Cabe destacar que el Comparador de Fase I consiste simplemente una compuerta lógica XOR. Por esto, se optará por utilizar el Comparador de Fase 2, el cual consiste en una red de memoria digital que evitar cualquier desfase entre la señal de entrada y la entrada del comparador. La configuración de pines del CD4046 se presenta en la Figura 2.17 [25].

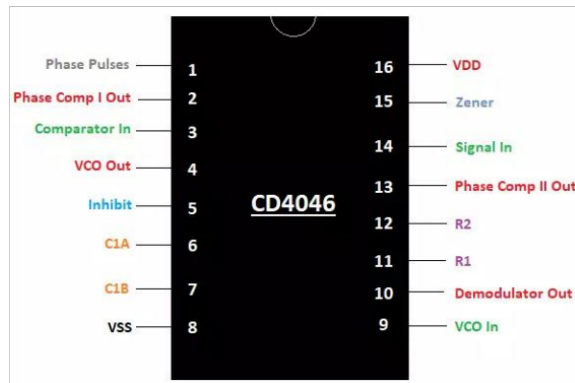


Figura 2.17. Distribución de Pines CD4046BE [25].

En la Figura 2.18, se encuentra un diagrama de conexión del PLL CD4046BE propuesto por el fabricante para la correcta implementación de este circuito integrado.

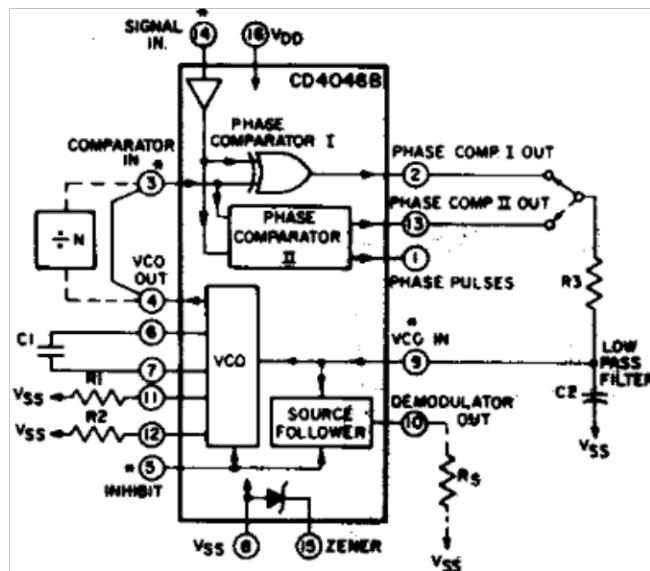


Figura 2.18. Esquema de Conexión del PLL Proporcionado por Fabricante [20].

Basándose en el esquema anterior, se detallan los pines esenciales para garantizar la correcta funcionalidad del lazo de seguimiento de fase. Estos pines permitirán una interconexión de componentes dentro del sistema, asegurando una operación adecuada para la detección de cruces por cero.

- Pin 14: Señal de entrada aplicada a los comparadores de fase
- Pin 9: Señal de entrada de VCO
- Pin 4: Señal de salida de VCO, señal de salida del PLL
- Pin 13: Salida del Comparador de Fase I

- Pin 3: Entrada de comparadores de fase
- Pin 6 y 7: Conexión de un capacitor cerámico externo para el VCO
- Pin 11 y 12: Conexión de resistencias necesarias para VCO (Se puede prescindir de usar la resistencia en el pin 12)
- Pin 16 y 17: Voltaje de alimentación para el circuito integrado y puesta a tierra del circuito respectivamente

A través de la conexión sugerida y bajo el criterio planteado al principio para el diseño, se presenta la siguiente propuesta de circuito que posibilitara un lazo de seguimiento de fase adecuado, es decir la generación de una señal cuadrada en fase con la red, cruce por cero.

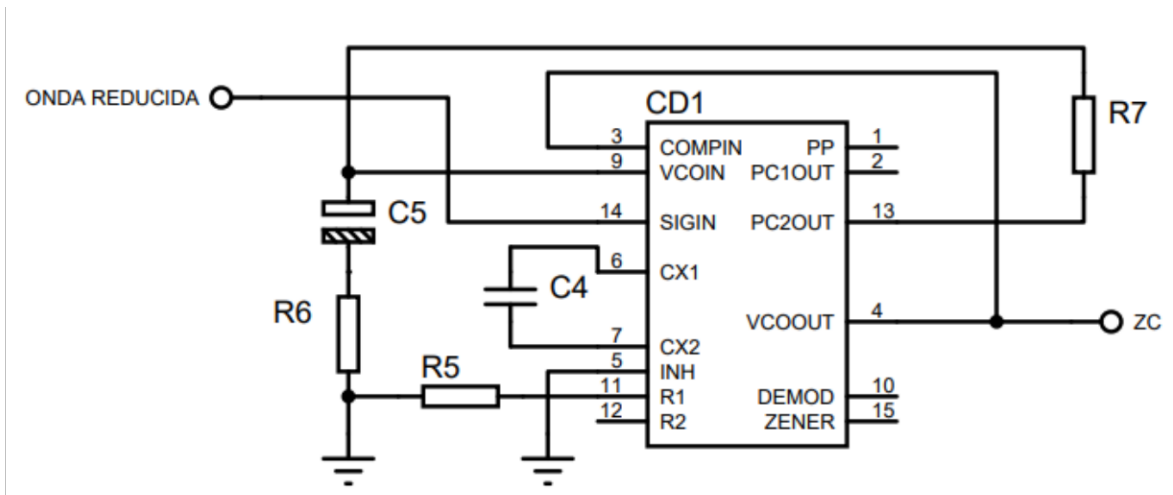


Figura 2.19. Circuito PLL Diseñado

2.4.3 SISTEMA EMBEBIDO

La placa de desarrollo se encuentra conectada físicamente según se muestra en la Figura 2.20, donde se evidencia un reducido número de entradas y salidas, las cuales son las siguientes:

- B11: Señal de salida PWM para el disparo de semiconductores.
- B0: Entrada de la señal de lazo de seguimiento de fase para la detección de cruces por cero.
- A0: Conversor analógico/digital para lectura del Setpoint
- A1: Conversor analógico/digital para lectura del sensor de temperatura

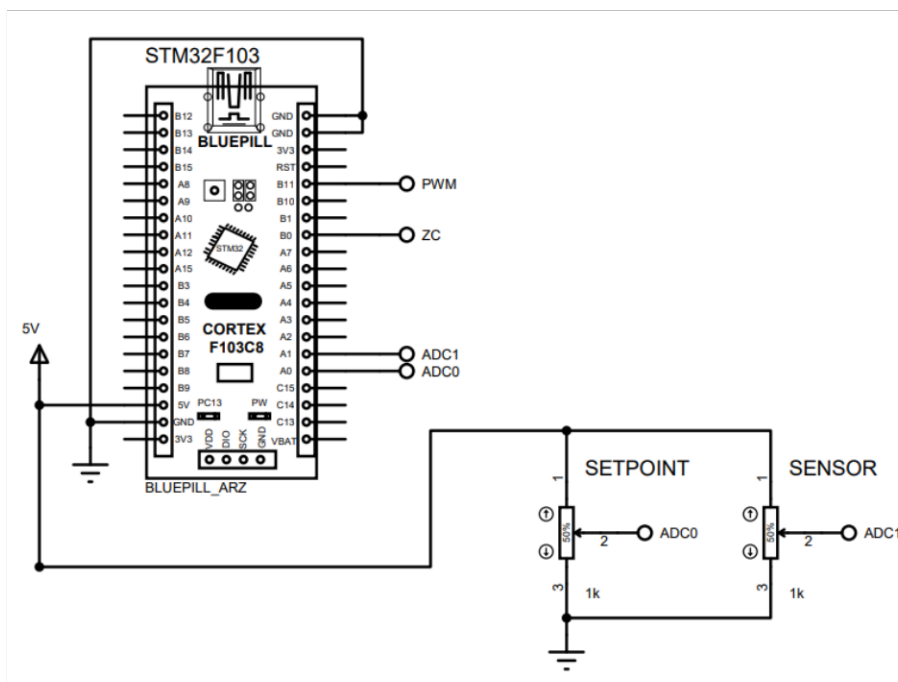


Figura 2.20. Sistema Embebido Implementado Físicamente

La elección de este microcontrolador más compacto se valida a través de esta configuración, ya que se resalta un número reducido de entradas y salidas del sistema embebido. Este enfoque demuestra la eficiencia de optar por componentes de menor tamaño que mantengan la funcionalidad necesaria para el sistema.

Adicionalmente, se destaca la conexión física del Setpoint y el sensor de temperatura, ambos consisten en divisores de voltaje variables implementados a través de potenciómetros, permitiendo un rango ajustable de 0 a 3.6 VDC.

2.5 DISEÑO SOFTWARE

Una vez finalizado el adecuado dimensionamiento de todos los componentes físicos del controlador de temperatura, se procede a la fase de diseño de software del proyecto, la cual consta de dos etapas: la implementación de un código que permita la ejecución de diversas funciones por el microcontrolador STM32F103 y el desarrollo de una interfaz gráfica destinada a la visualización en tiempo real de la información esencial del equipo.

2.5.1 MICROCONTROLADOR

El código por implementar en la placa de desarrollo STM32F103 debe permitir la realización de diversas funciones, las que corresponden a lectura de referencia de temperatura, lectura de temperatura en tiempo real, el control por ciclo integral, el control por histéresis, el

disparo del Triac y la comunicación serial con el HMI; estas funciones se describen en las subsecciones siguientes.

2.5.1.1 Lectura del set point o referencia de temperatura

Para esta función simplemente se realiza la adquisición de datos del pin de entrada ADC0 (correspondiente al valor deseado de temperatura) y la conversión de esta lectura a una variable flotante SP, que se utilizara para procesos posteriores. Esta función se puede visualizar en el diagrama de bloques de la Figura 2.21.

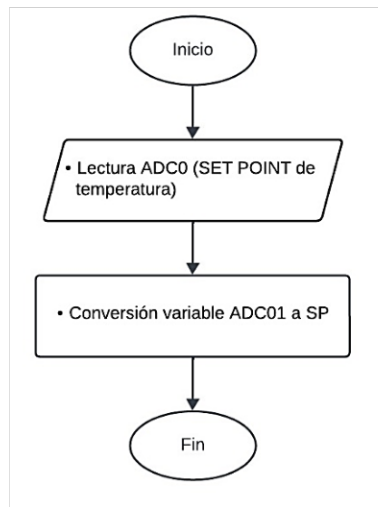


Figura 2.21. Lectura Set Point

2.5.1.2 Lectura del process value

Similar a la subsección anterior, en esta función se realiza la adquisición de datos del pin ADC1 (el valor simulado de temperatura) y de igual manera la conversión de esta a una variable flotante SENSOR para ser utilizada en procesos siguientes, tal como se observa en la Figura 2.22.

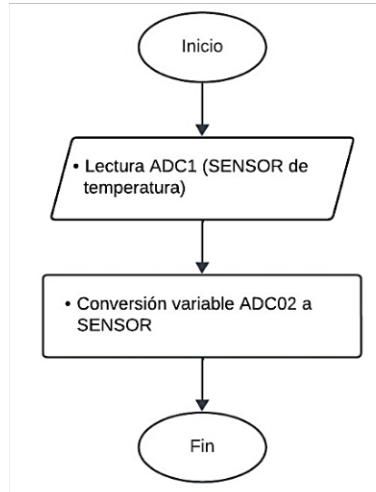


Figura 2.22. Lectura Sensor de Temperatura

2.5.1.3 Detección de cruce por cero

En esta función, se utiliza la señal de cruce por cero generada por el PLL, la cual está conectada al pin B0 del microcontrolador. La subsección de este código se programa para detectar los flancos de subida de la señal, lo que permite generar una señal PWM en el pin B11, que, a su vez, se encarga de activar el disparo del semiconductor de potencia del convertor AC/AC. Este proceso se puede observar en la Figura 2.23.

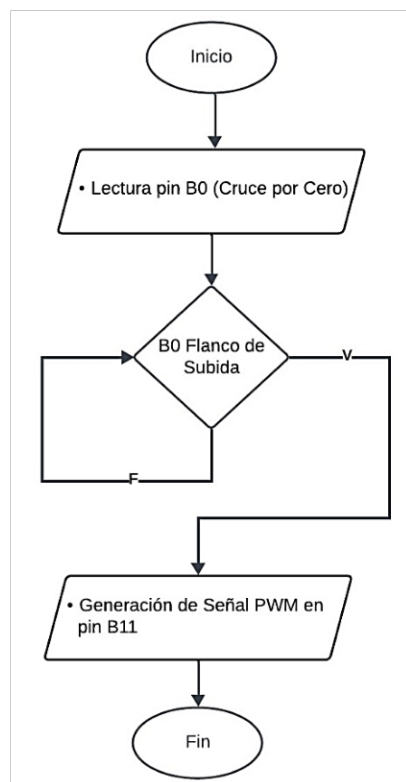


Figura 2.23. Detección de Cruce por Cero

2.5.1.4 Control por ciclo integral

Para esta función, en primer lugar, es importante aclarar que se definió arbitrariamente los ciclos de trabajo del convertidor AC/AC con un valor de 30 ciclos. Posteriormente, con base a las secciones de códigos descritos en secciones anteriores, se desarrollan los siguientes criterios:

- Si el valor de temperatura del sensor es menor a la temperatura de seteo, se inicia entonces con el aumento gradual de los ciclos de encendido hasta alcanzar los 30 ciclos, mientras que los ciclos de apagado se van reduciendo. Esto con el fin de llegar en el menor tiempo posible al valor de referencia deseado, ya que un mayor número de ciclos implica mayor paso de corriente por las resistencias y por tanto aumento de temperatura.
- Si el valor del sensor de temperatura es mayor valor de seteo, los ciclos de encendido se empiezan a reducir, mientras que los ciclos de encendido comienzan a aumentar. Esto para que disminuir el paso de corriente en las resistencias y de esa manera reducir gradualmente la temperatura del horno.

Finalmente se tiene el siguiente diagrama de flujo que describe el código implementado para el proyecto, código que se encuentra en los anexos correspondientes de este documento.

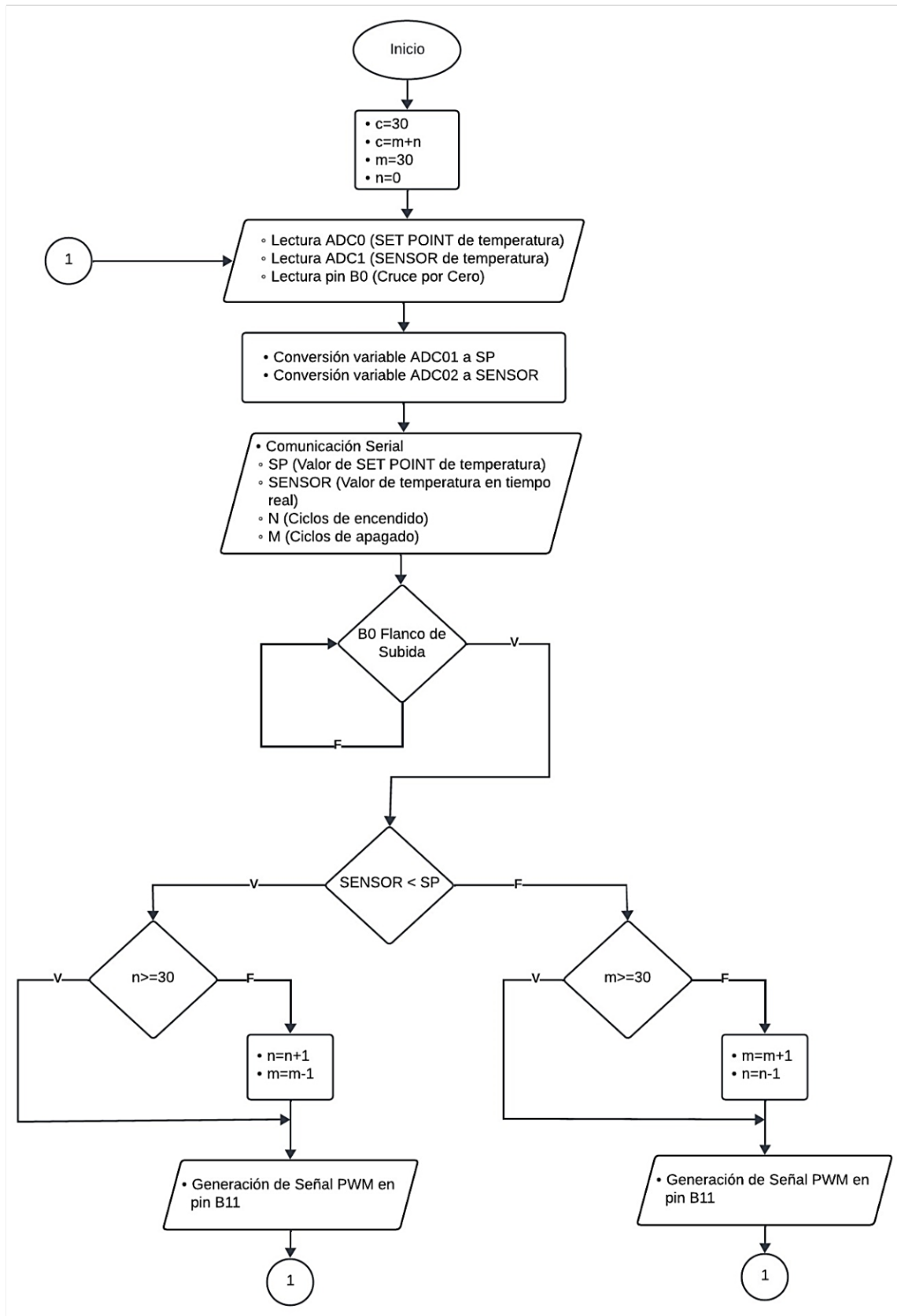


Figura 2.24. Diagrama de Flujo de Código Implementado

2.5.2 INTERFAZ GRÁFICA

Para la presentación de los datos del equipo en una interfaz gráfica, se ha hecho uso del programa Editor Nextion, un programa especializado en el desarrollo de interfaces de usuario para productos de esta misma marca, específicamente diseñada para las pantallas Nextion. La elección de este software se basa en su gratuidad y la capacidad que ofrece para futuras adaptaciones del proyecto, como la integración al equipo de estas pantallas.



Figura 2.25. Interfaz Hombre-Máquina

2.6 IMPLEMENTACIÓN FÍSICA

Los circuitos mencionados en la sección de diseño de hardware, fueron inicialmente implementados en protoboard, tal como se observa en la Figura 2.26. Una vez confirmado el correcto funcionamiento del sistema, se procedió a llevar a cabo la implementación del convertidor en un circuito impreso.

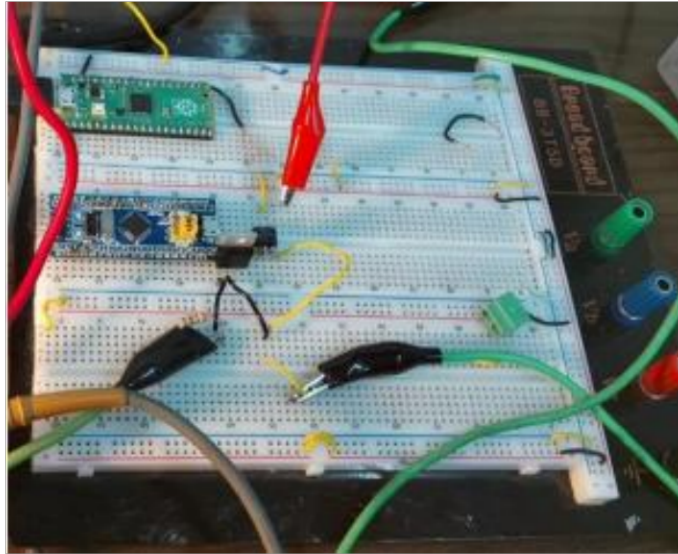


Figura 2.26. Implementación del Sistema en Protoboard

La implementación del circuito en una placa impresa permite la consolidación del sistema en una estructura duradera y de tamaño más compacto. Para esto, se inicia el diseño de la placa en algún software especializado en esto. La distribución de los elementos del equipo en la placa diseñada se observa en la Figura 2.27.

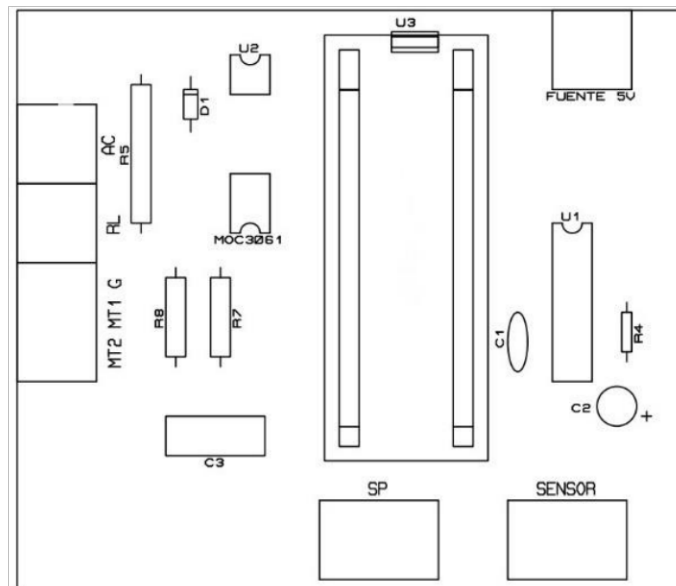


Figura 2.27. Serigrafía de la Placa

Posteriormente, se lleva a cabo a la impresión laser del diseño de PCB, tal como se observa en la Figura 2.28.

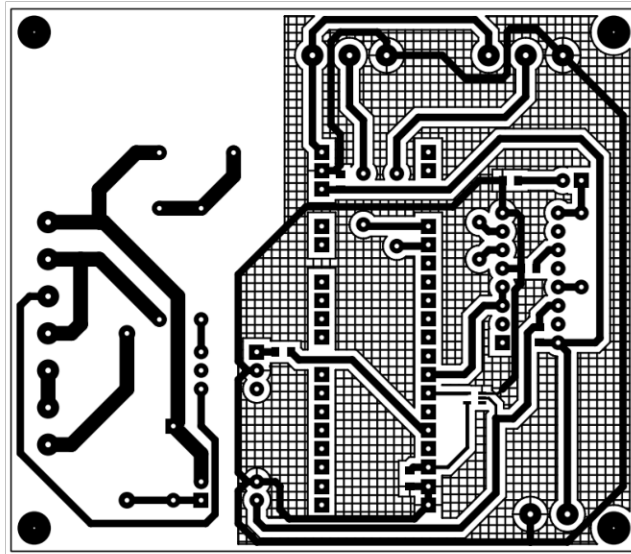


Figura 2.28. Impresión Placa Diseñada

Después de realizar diversos procesos, como recorte, limpieza, planchado, entre otros, la placa a implementar se presenta de la siguiente manera:

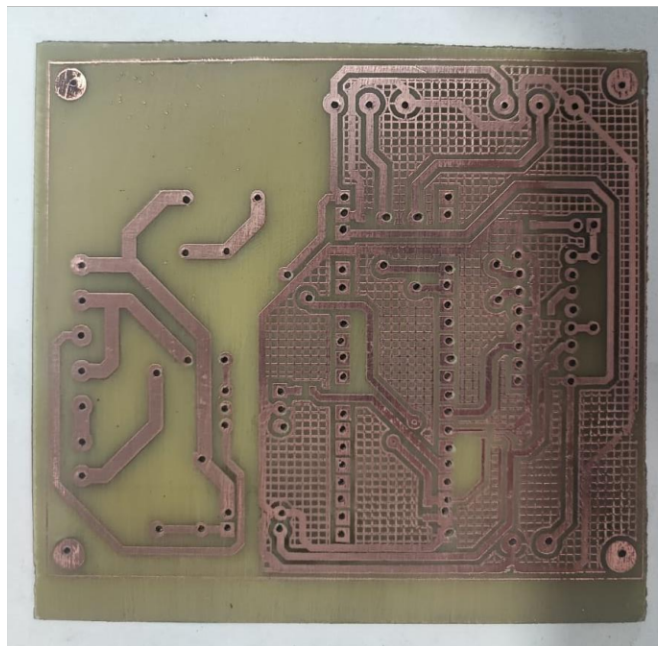


Figura 2.29. Circuito Impreso en la Placa

Finalmente, se realiza la incorporación y soldadura de los elementos dimensionados en el circuito, obteniendo como resultado la placa final del equipo, observada en la Figura 2.30.

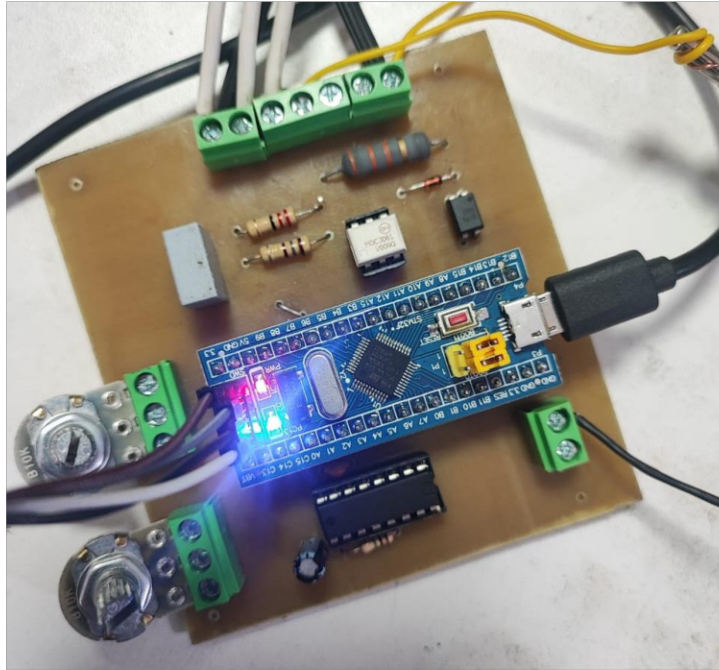


Figura 2.30. Circuito Implementado en PCB

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

Finalmente, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la implementación del control de temperatura mediante un conversor AC-AC en un horno eléctrico. Se destaca principalmente el equipo completamente finalizado y las señales obtenidas, enfocándose especialmente en el control mediante ciclo integral del conversor estático, la detección de cruces por cero en el lazo de seguimiento de fase y la respuesta del sistema en lazo cerrado. Las pruebas se llevaron a cabo por medio de una carga resistiva proporcionada por el laboratorio de accionamientos electrónicos. Es crucial señalar nuevamente que el sistema fue dimensionado y diseñado para soportar valores de potencia significativamente más altos sin necesidad de modificaciones. Las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 muestran una vista frontal, posterior y general del sistema obtenido.



Figura 3.1. Equipo para Control de Temperatura (Vista Frontal)



Figura 3.2. Equipo para Control de Temperatura (Vista posterior)

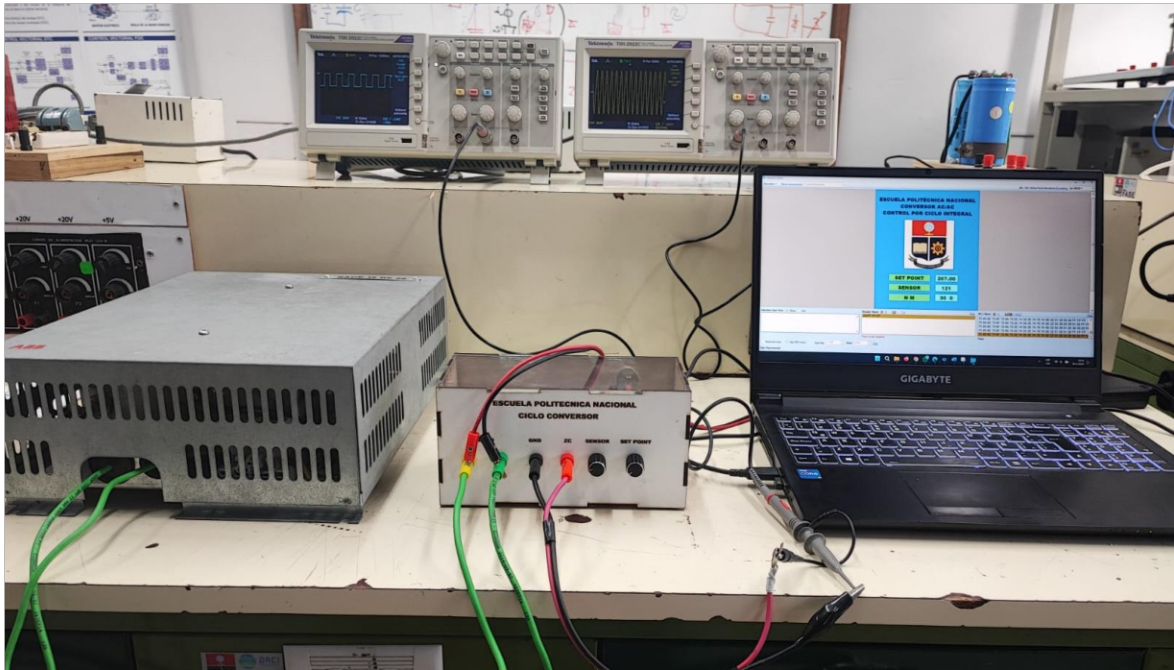


Figura 3.3. Equipo de Control de Temperatura en Pruebas de Funcionamiento

3.1.1 SISTEMA IMPLEMENTADO

El sistema implementado se diseñó en combinación de diferentes circuitos, los cuales fueron diseñados y dimensionados de la manera más adecuada y que se pueden subdividir en algunas secciones, como se evidencia en la Figura 3.4, detalladas a continuación:

- Sección A: Se refiere al convertor AC-AC monofásico con el Triac montado sobre un disipador de calor, diseñado para prevenir el sobrecalentamiento o daños en otros dispositivos, junto con el circuito de disparo correspondiente.
- Sección B: Corresponde al circuito recomendado por el fabricante para el correcto funcionamiento del lazo de seguimiento de fase o PLL.
- Sección C: Se trata del sistema embebido, un microcontrolador utilizado para ejecutar el control por ciclo integral en colaboración con la banda de histéresis.
- Sección D: Es la fuente de alimentación de 5 VDC que se encarga de suministrar energía tanto al sistema embebido como al lazo de seguimiento de fase.
- Sección E: Se trata de los potenciómetros que establecen el valor de referencia de temperatura y que emulan los cambios de temperatura en el sistema.

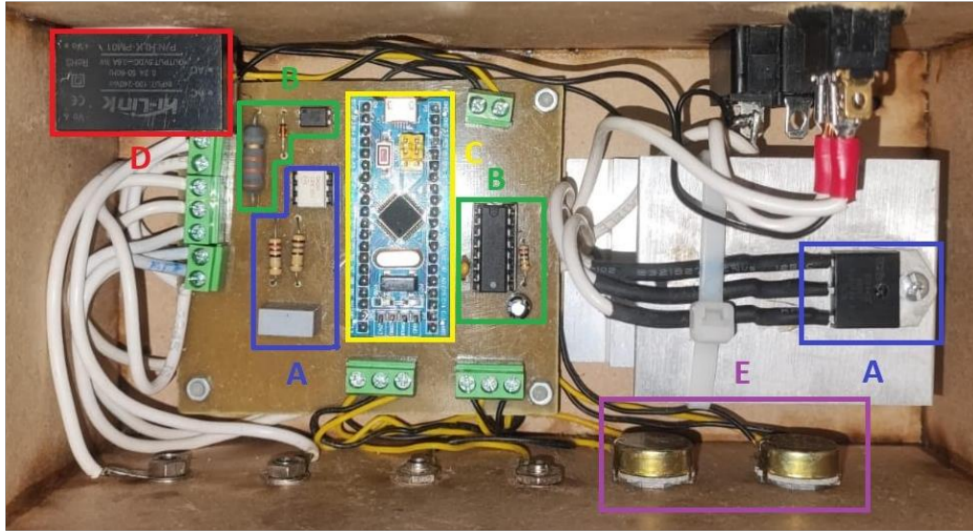


Figura 3.4. Circuito de Control y de Potencia Implementado

El funcionamiento de este equipo desarrollado para el control de temperatura implica varios componentes, cada uno debidamente nombrado y descrito en términos de su modo de operación. La identificación de estos componentes en el equipo se muestra en las Figuras 3.5 y 3.6

1. Pines de Conexión de Carga: Situados en la parte frontal del equipo, estos pines permiten la conexión de la carga resistiva que se desea controlar térmicamente.
2. Pines de Visualización de ZC: Ubicados en la parte frontal del equipo, estos pines están diseñados para conectar un osciloscopio, con pines claramente definidos para positivo y negativo, facilitando la visualización de los cruces por cero.
3. Perilla de Ajuste de Setpoint o de referencia: Posicionada en la parte frontal, esta perilla, al girarse en sentido horario, aumenta la temperatura objetivo, mientras que en sentido antihorario la disminuye.
4. Perilla de Emulación de Sensor: Ubicada en la parte frontal, esta perilla, al girarse en sentido horario, incrementa el valor de la temperatura real, y en sentido antihorario, lo disminuye.
5. Conector de Alimentación Eléctrica: Situado en la parte trasera, este es el lugar donde se conecta el cable de poder que suministra la energía necesaria para el funcionamiento del equipo.
6. Interruptor Encendido/Apagado: Colocado en la parte trasera, este interruptor debe estar en la posición “Apagado” antes de conectar el cable de poder. Después de

conectar adecuadamente la alimentación del equipo, se cambia a la posición “Encendido” para el flujo de corriente.

7. Puerto de Comunicación Serial del Microcontrolador: Posicionado en la parte trasera, este puerto permite la conexión de un cable USB-mini con el microcontrolador a una computadora para la comunicación serial.



Figura 3.5. Modo de Operación Parte Frontal



Figura 3.6. Modo de Operación Parte Trasera

3.1.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Las señales expuestas en esta sección del capítulo han sido adquiridas a través de una variedad de pruebas destinadas a evaluar el rendimiento del sistema ante la carga facilitada por el laboratorio de accionamientos electrónicos. Estas pruebas se llevaron a cabo tanto en lazo abierto, con el propósito de verificar la correcta implementación de los dispositivos individualmente, como en lazo cerrado, donde se verificó la eficiencia del sistema en su conjunto.

3.1.2.1 Conversor AC-AC

En primera instancia, se procedió a verificar la comprobación del funcionamiento del conversor AC-AC, el cual fue diseñado teniendo en cuenta la utilización de un Triac como semiconductor de potencia. Por este motivo, la señal obtenida refleja directamente ambos semiciclos de la forma de onda, como se ilustra en la Figura 3.7. Es relevante señalar que, de haber usado un SCR, habría sido necesario utilizar dos semiconductores en antiparalelo, uno por cada semiciclo.

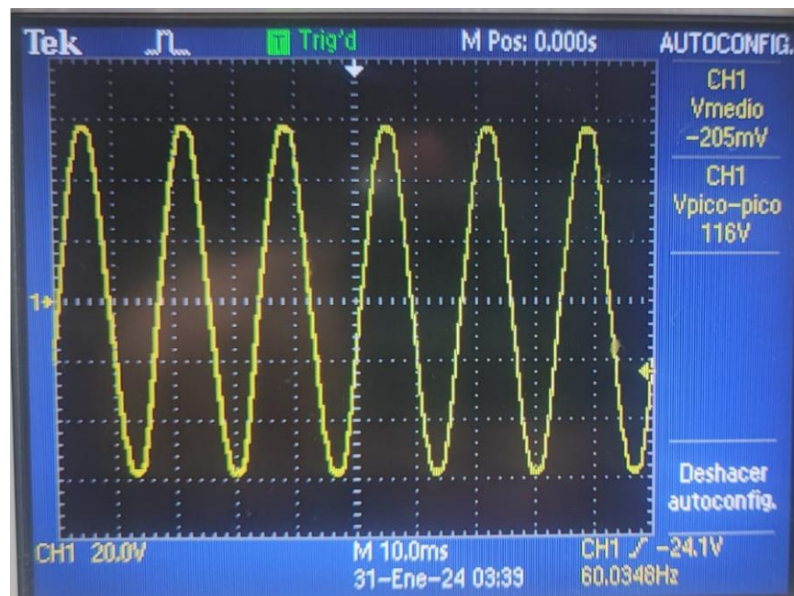


Figura 3.7. Señal de Voltaje de Conversor AC-AC

En base a la figura anterior, se puede deducir que el circuito de disparo opera correctamente para el funcionamiento del semiconductor de potencia. Concluyendo que el diseño e implementación del conversor AC-AC se ha ejecutado de manera correcta para el control de voltaje.

3.1.2.2 Detección de cruce por cero

Tras haber verificado el funcionamiento del conversor estático de potencia, se prosiguió con la verificación del funcionamiento del circuito PLL. Para ello, mediante un osciloscopio, se observó la salida del lazo de seguimiento de fase, donde se pudo comprobar que, efectivamente el PLL genera pulsos por cada cruce por cero real o efectivo de la red.

Este cruce efectivo de la red se refiere al momento exacto cuando la onda sinusoidal de la red eléctrica atraviesa el eje horizontal y su valor se vuelve cero, en una onda sinusoidal

típica existen dos de estos momentos. Este término “efectivo” se utiliza ya que pueden existir falsos cruces por cero, lo cuales son producidos por ruido en la onda de la red.

Posteriormente, en la Figuras 3.8 y 3.9, se compara la señal generada por el circuito PLL con la señal de salida de la placa de desarrollo STM32F103, tanto en el flanco ascendente como en el descendente. Es importante destacar lo crucial de este funcionamiento dado que la señal resultante del microcontrolador es la que activa y desactiva los semiconductores de potencia en sincronización con la red.

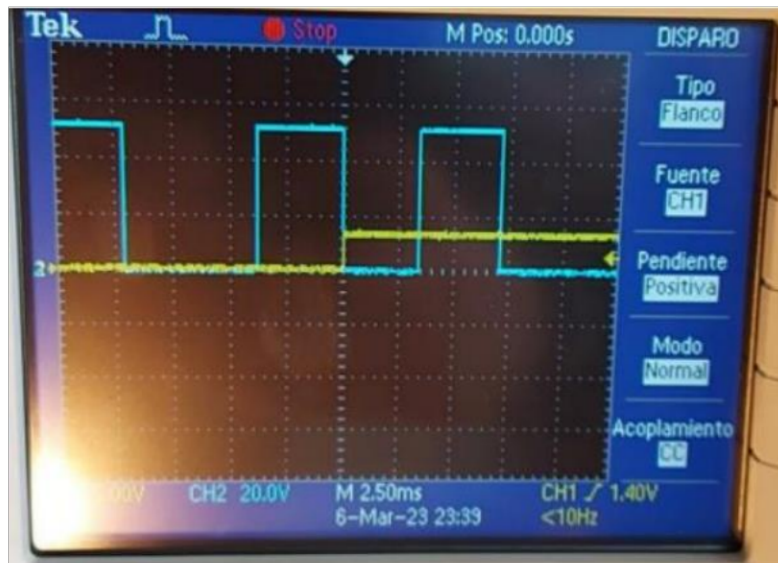


Figura 3.8. Detección de Cruce por Cero en Flanco de Subida

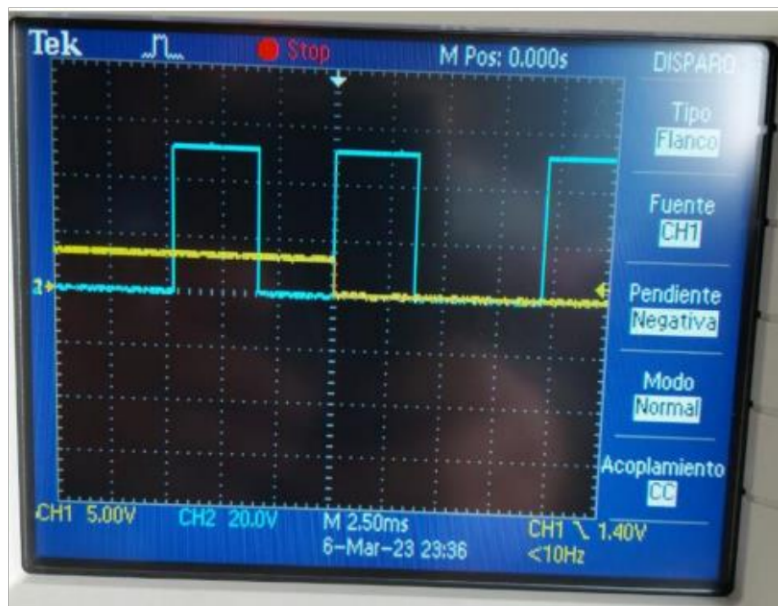


Figura 3.9. Detección de Cruce por Cero en Flanco de Bajada

Al analizar las gráficas anteriores, donde la señal amarilla corresponde al disparo del microcontrolador STM32F103 y la señal azul a la salida del lazo de seguimiento de fase, se llega a la conclusión de que el sistema embebido detecta de manera efectiva el cruce por cero tanto a 0° como a 180° . Este proceso de detección es esencial en este sistema, ya que permite sincronizar la activación y desactivación del Triac con los puntos específicos de la onda de voltaje de la red eléctrica.

Finalmente, después de verificar el correcto funcionamiento del circuito de disparo en secciones anteriores, fue posible analizar las formas de onda en la carga. Para ello, se llevó a cabo la comparación entre los pulsos generados por el lazo de seguimiento de fase y el voltaje de carga, como se observa en la Figura 3.10 (donde la señal celeste corresponde a los pulsos generados por el circuito PLL y la señal amarilla representa el voltaje en la carga).

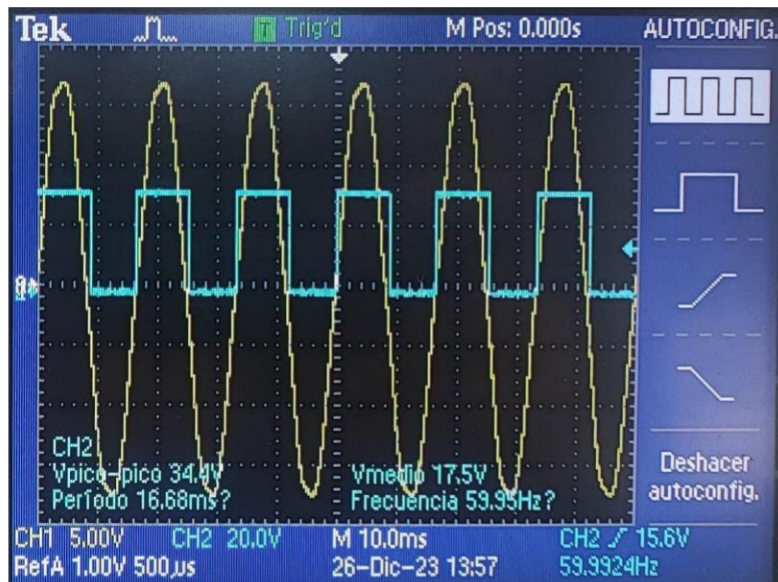


Figura 3.10. Comprobación de Cruces por Cero con la Red Eléctrica

En la figura, se puede observar que tanto el encendido como en el apagado del Triac existe un tiempo de retardo, provocado mismo por el propio lazo de seguimiento de fase. A pesar de esto, no se considera un inconveniente para este proyecto, ya que la temperatura es una variable que experimenta cambios graduales.

3.1.2.3 Control por ciclo integral

Finalmente, se llevaron a cabo las pruebas necesarias para evaluar el desempeño del software implementado en el microcontrolador, específicamente para el control por ciclo integral en conjunto con la banda de histéresis. Estas pruebas están relacionadas con las

anteriores, ya que este control depende de la detección de los cruces por cero que detecta el lazo de seguimiento de fase.

Para este propósito, inicialmente se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento en lazo abierto para validar el funcionamiento del control por ciclo integral de manera independiente. De esta manera, mediante ajustes temporales de software, fue posible determinar arbitrariamente los ciclos de encendido en el Triac, obteniendo así la salida de voltaje observada en la Figura 3.11, donde se puede concluir que existe una correcta implementación del control por ciclo integral.

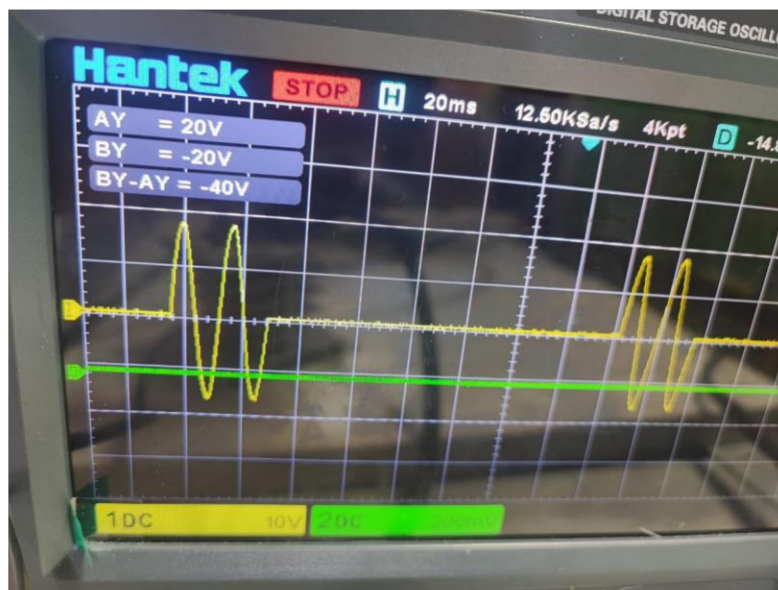


Figura 3.11. Comprobación del Control por Ciclo Integral

Posteriormente, se procede a cerrar el lazo del sistema y llevar a cabo las pruebas de funcionamiento correspondientes. Para esto, se modificó nuevamente el software del microcontrolador con el fin de trabajar el control por ciclo integral en conjunto con la banda de histéresis. De esta manera, se logra una respuesta automática a cambios de en el set point de temperatura, como se observa en las siguientes figuras.

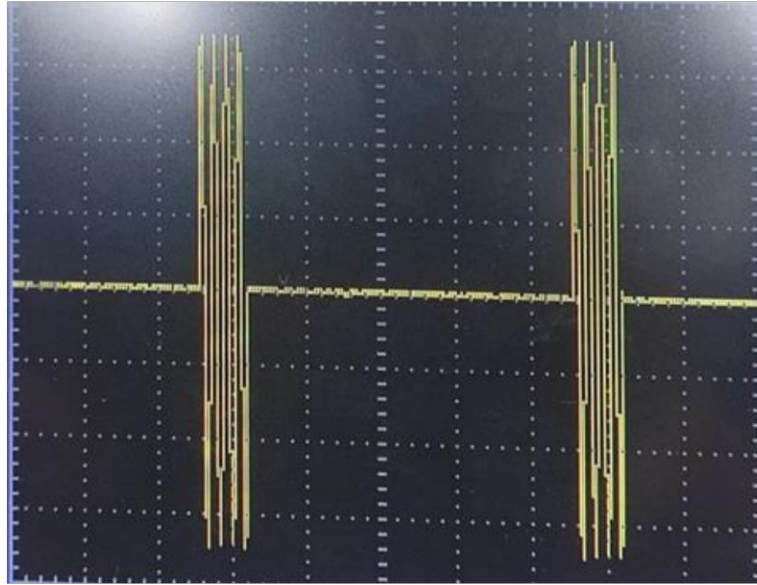


Figura 3.12. Control por Ciclo Integral con Banda de Histéresis ($n=4$ y $m=26$)

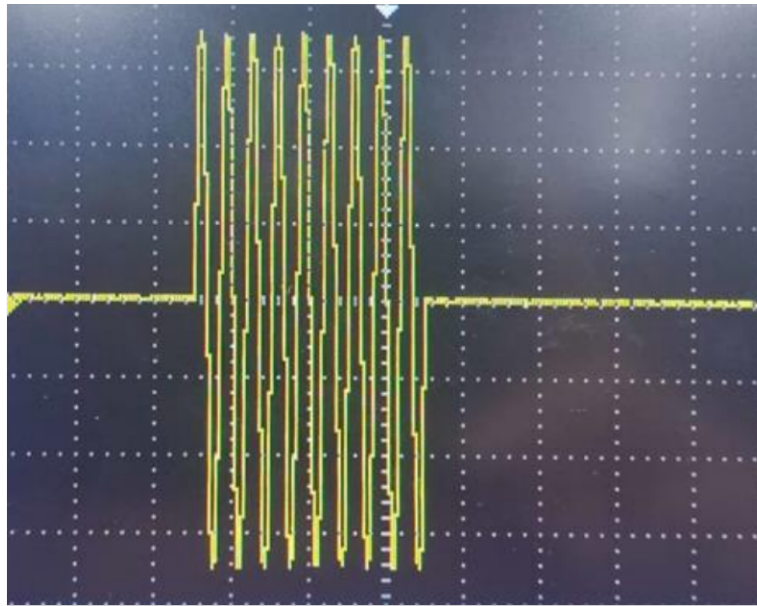


Figura 3.14. Control por Ciclo Integral con Banda de Histéresis ($n=9$ y $m=21$)

Como se observa, al establecer un valor de Setpoint de temperatura, el equipo comienza gradualmente a aumentar los ciclos de encendido y reducir los ciclos de apagado para aumentar la corriente en el horno eléctrico y por tanto aumentar la temperatura. En las siguientes figuras se sigue observando esta tendencia.

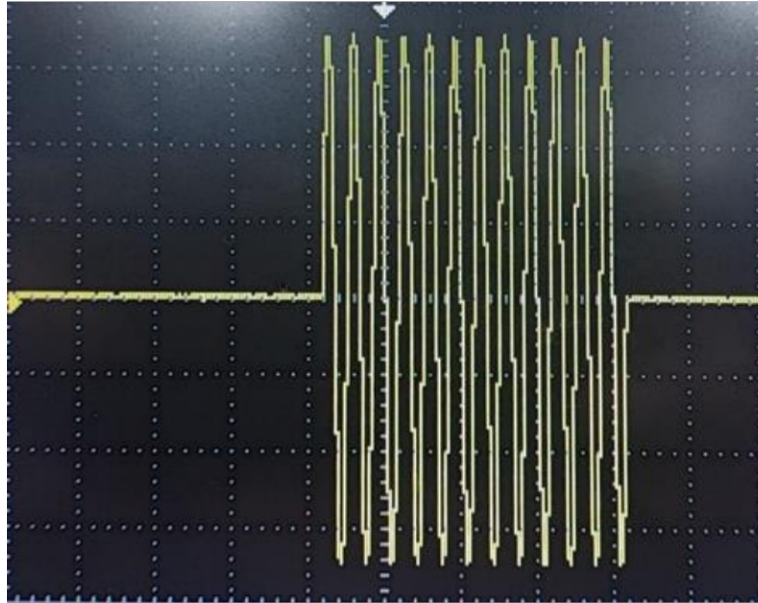


Figura 3.15. Control por Ciclo Integral con Banda de Histéresis ($n=12$ y $m=18$)

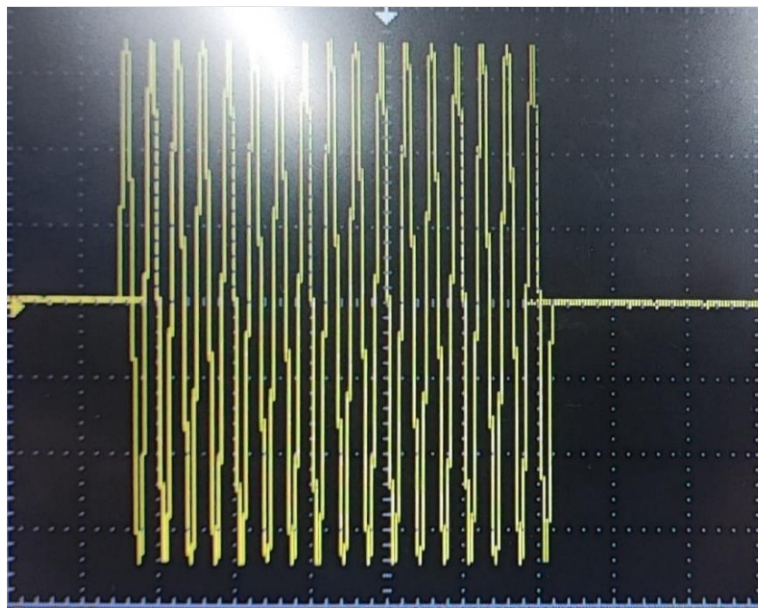


Figura 3.16. Control por Ciclo Integral con Banda de Histéresis ($n=17$ y $m=13$)



Figura 3.17. Control por Ciclo Integral con Banda de Histéresis ($n=23$ y $m=7$)

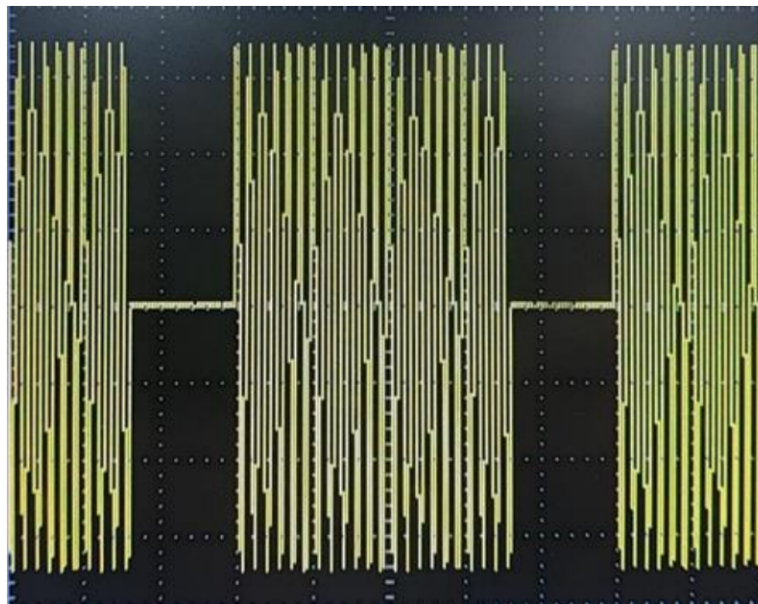


Figura 3.18. Control por Ciclo Integral con Banda de Histéresis ($n=30$ y $m=0$)

De esta manera, se determinó que el software establecido para el control por ciclo integral en conjunto con la banda de histéresis se encontraba correctamente desarrollado, dado que se observa que la salida del convertor AC-AC se encuentra activa durante n ciclos, mientras se apaga por n ciclos.

Finalmente se observa la señal de corriente y voltaje resultante:

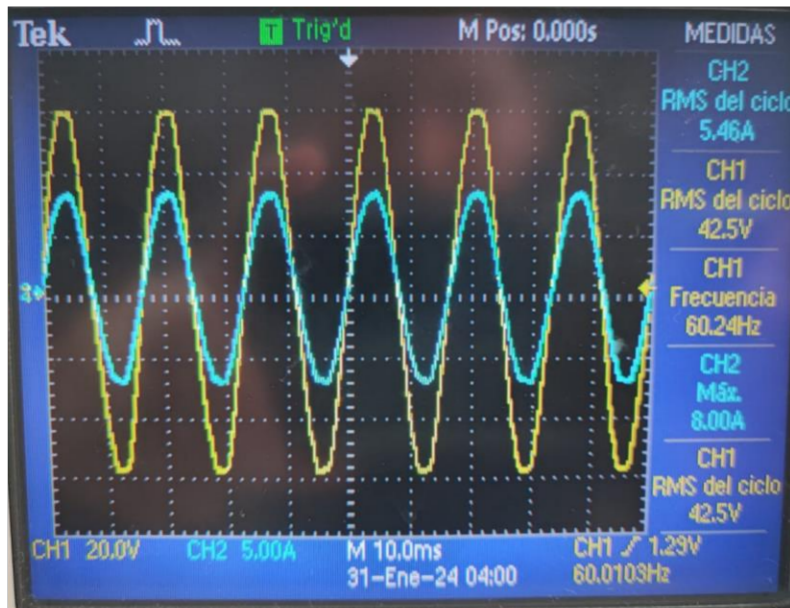


Figura 3.19. Señal de corriente del Conversor AC/AC

De la Figura 3.19 se observa un valor de corriente de 5.46 A, un valor similar al obtenido de manera teórica en secciones anterior. De esta manera corroborando la correcta realización de este proyecto.

En base a todas estas pruebas realizadas, se llega a la conclusión de que el equipo desarrollado e implementado presenta un funcionamiento correcto y que cumple con los requerimientos propuestos para este proyecto, por ende, es plausible su aplicación en otros entornos.

3.2 CONCLUSIONES

- Se llevó a cabo una revisión exhaustiva del estado del arte sobre el control de hornos eléctricos de corriente alterna, explorando las diversas técnicas de control empleadas en esta área. Además, se examinaron los diferentes tipos de convertidores estáticos de potencia comúnmente usado en aplicaciones de control de temperatura. Como una propuesta propia del proyecto, se decidió por la utilización de un convertidor AC-AC mediante control por ciclo integral en lazo cerrado. Dado que la variable crítica a gestionar es la temperatura, una variable lenta, se optó por la implementación de un control basado en histéresis.
- Se logró analizar y comprender el funcionamiento de un lazo de seguimiento de fase, reconociendo la importancia que tiene este tipo de circuito en aplicaciones que requieren una sincronización precisa con la red. Esto resulta especialmente

relevante en el contexto del proyecto descrito en este documento, donde el PLL surge como un componente clave para la implementación exitosa del control en lazo cerrado del sistema.

- La implementación del convertor AC-AC monofásico con Triac se llevó a cabo con éxito. La funcionalidad del circuito fue verificada mediante una carga de aproximadamente 1 kW, y los resultados indicaron que los componentes seleccionados cumplen con su propósito de manera efectiva. Con esta validación, se establece la base para poder emplear el convertor en aplicaciones de más alta potencia.
- Se pudo implementar con éxito el control en lazo cerrado para el convertor AC-C por ciclo integral, específicamente diseñado para cargas resistivas como un horno. Esta implementación se materializó mediante la integración de un lazo de seguimiento de fase, PLL, permitiendo una sincronización precisa de los disparos de los semiconductores de potencia con la red eléctrica. Además, la utilización del microcontrolador de la familia STM32, reconocidos por su capacidad de procesamiento avanzada, aseguró la ausencia de retardos y la precisión de los disparos del semiconductor.
- Se ha constatado que la combinación del control por ciclo integral y control ON/OFF por histéresis puede ser complementario, contribuyendo así a la confiabilidad en la regulación de temperatura. Esta mejora se traduce en la capacidad de mantener el proceso cerca del valor de referencia deseado durante periodos de tiempo prolongados, evitando cambios repentinos al optar por un calentamiento gradual y estable.
- Fue posible comprender la importancia crítica del dimensionamiento preciso de los componentes involucrados en la etapa de potencia del sistema, evidenciando de que de esto depende la aplicabilidad en hornos eléctricos de mayor potencia. Este entendimiento permitió establecer niveles de voltaje adecuados, fundamentales para el correcto funcionamiento de los semiconductores de potencia. Además, el aislamiento óptico entre el circuito de potencia y el circuito de control fortaleció la integridad y seguridad del sistema.

3.3 RECOMENDACIONES

- Para la realización efectiva de un control en lazo cerrado es recomendable el uso de un sistema embebido que cumpla ciertas características, tales como un reloj fijo,

alta capacidad de procesamiento y una amplia capacidad de almacenar información, entre otras características esenciales. Esto ya que existen aplicaciones en las que el microcontrolador debe ser capaz de realizar diversas tareas a la vez, lo que consume una gran cantidad de ciclos de máquina.

- Al diseñar los circuitos de control y potencia, es importante tomar en cuenta las recomendaciones de los fabricantes que se encuentran en la hoja de datos de los componentes. De esta manera, se puede implementar de manera óptima cada elemento del sistema.
- Asegurarse de que las etapas de control y potencia se encuentran correctamente aisladas, para así evitar dañar los elementos de control, dispositivos que normalmente trabajan en rango bajos de voltaje.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Valle, *DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE TEMPERATURA DE UN HORNO ELÉCTRICO EMPLEANDO RESISTENCIAS – CONTROL ELECTRÓNICO AL LADO AC*. Escuela Politécnica Nacional, Quito [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23338/1/CD%2012755.pdf>.
- [2] J. Méndez, *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO PARA EL SECADO DE LOS BOBINADOS DE MOTORES DE HASTA 10 HP*, Escuela Politécnica Nacional, Quito [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4639/1/CD-4270.pdf>.
- [3] E. García, «Hornos de inducción y hornos de resistencia: ¿en qué se diferencian?» *Electro Heat Induction*, 2022. Disponible en: <https://electroheatinduction.com.co/diferencias-entre-los-hornos-de-induccion-y-hornos-de-resistencia/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20horno%20de,la%20energ%C3%ADa%20cin%C3%A9tica%20en%20calor> [Último Acceso: 15-dic-2023].
- [4] M. Iturbe, «¿Qué es el Efecto Joule? Aplicaciones para calefacción», *Caloryfrio.com*, noviembre de 2022. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/que-es-el-efecto-joule-aplicaciones-para-calefaccion.html#:~:text=El%20efecto%20Joule%20es%20un,material%20por%20el%20que%20circulan> [Último Acceso: 16-dic-2023].
- [5] M. Mañana, *Regulación, Control y Protección de Máquinas Eléctricas: Convertidores Estáticos*, Universidad de Cantabria, España [En línea]. Disponible en: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2264/course/section/2183/convertidores.pdf>
- [6] M. H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*, 2.a ed. 1995.
- [7] «What is On/Off Control», Coulton: Fuji Electric Instrumentation & Control, 2017. Disponible en: <https://www.coulton.com/What is On Off Control.html> [Último Acceso: 16-dic-2023].
- [8] A. Medero, *Diseño de un lazo de seguimiento de fase (PLL) usando aproximaciones del retador fraccionario*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Barcelona [En línea]. Disponible en:

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/101070/Memoria_PLL_AMB_vf.pdf.

- [9] S. Barman, «What Is Difference Between SCR and TRIAC?», Electrothinks, 2020. Disponible en: <https://www.electrothinks.com/2020/12/Main-difference-between-scr-triac.html#:~:text=The%20main%20reason%20for%20the,a%20Bi%2DDirectional%20semiconductor%20device.&text=SCR%20stands%20for%20%22Silicon%20Controlled,%22Triode%20for%20Alternating%20Current%22> [Último Acceso: 17-dic-2023].
- [10] M. Bakker, «La frecuencia en el voltaje alterno y su impacto en el funcionamiento», ElectroPreguntas.com. Disponible en: <https://electropreguntas.com/que-es-la-frecuencia-en-el-voltaje-alterno-y-como-afecta-su-funcionamiento/> [Último Acceso: 17-dic-2023].
- [11] STMicroelectronics «STM32F103», STlife.augmented, 2016. Disponible en: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103.html> [Último Acceso: 18-dic-2023].
- [12] L. Llamas, «STM32F103, el competidor ARM de Arduino de bajo coste», LuisLlamas, 2015, Disponible en: <https://www.luisllamas.es/stm32f103-el-competidor-arm-de-arduino-de-bajo-coste/#que-es-el-stm32f103> [Último Acceso: 18-dic-2023].
- [13] WeEN «BTA440Z-800BT», WeEN Products, 2019. Disponible en: <https://www.ween-semi.com/en/product/BTA440Z-800BT> [Último Acceso: 19-dic-2023].
- [14] «Triac BTA440Z-800BTQ, 800V, 40A, TO3P, 50mA, THT», VIKIWAT. Disponible en: <https://vikiwat.com/triac-bta440z-800btq-800v-40a-to3p-50ma-tht> [Último Acceso: 19-dic-2023].
- [15] ISC «BTA440Z-800BT Datasheet Inchange Semiconductor Company Limited», AllDatasheet. Disponible en: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1082519/ISC/BTA440Z-800BT.html> [Último Acceso: 20-dic-2023].
- [16] «Introduction to Gate Drivers for Power Electronics», TalemaGroup. Disponible en: <https://talema.com/es/gate-driver-introduction/> [Último Acceso: 20-dic-2023].
- [17] Farchaild Semiconductor «MOC3061 6-PIN DIP RANDOM-PHASEOPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT (250/400 VOLT PEAK)», AllDatasheet, 2004. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/53872/FAIRCHILD/MOC3061.html> [Último Acceso: 22-dic-2023].

- [18] «MOC3061 AC Input Triac Output Optocoupler IC», Pixel Electric. Disponible en: <https://www.pixelectric.com/more-categories/electroniccomponents/semiconductors-ics/optocoupler-ic/moc3061-ac-input-triac-output-optocoupler-ic/> [Último Acceso: 22-dic-2023].
- [19] Texas Instruments «CD4046B CMOS MICROPOWER PHASE-LOCKED LOOP», AllDatasheet, 2003. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26872/TI/CD4046B.html> [Último Acceso: 24-dic-2023].
- [20] «CD4046BE Circuito PLL Phase-Lock CMOS DIP-16», UNIT ELECTRONICS. Disponible en: <https://uelectronics.com/producto/cd4046be-circuito-pll-phase-lock-cmos-dip-16/> [Último Acceso: 24-dic-2023].
- [21] «Fuente de alimentación conmutada: lo que necesita saber», Electric Artisan. Disponible en: <https://elcb.net/es/fuente-de-alimentacion-conmutada-lo-que-necesita-saber/#:~:text=La%20fuente%20de%20alimentaci%C3%B3n%20conmutada%20es%20adecuada%20para%20aplicaciones%20de,una%20fuente%20de%20alimentaci%C3%B3n%20conmutada> [Último Acceso: 26-dic-2023].
- [22] «HLK-PM Convertidor AC DC 3W Fuente de Alimentación HLK-PM01/HLK-PM03/HLK-PM12», UNIT ELECTRONICS. Disponible en: <https://uelectronics.com/producto/convertidor-ac-dc-fuente-3-3v-tsp-03-reemplazo-hlk-pm03/> [Último Acceso: 26-dic-2023].
- [23] NXP, «1N4148 High-speed diodes», AllDatasheet, 1999. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15021/PHILIPS/1N4148.html> [Último Acceso: 04-ene-2024].
- [24] HotChip, «PC817», AllDatasheet, 2017. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/1132954/HOTCHIP/PC817.html> [Último Acceso: 03-ene-2024].
- [25] D. Watson, «Introduction to CD4046», The Engineering Projects, 2018. Disponible en: <https://www.theengineeringprojects.com/2018/11/introduction-to-cd4046.html> [Último Acceso: 03-ene-2024].
- [26] «Cable de poder», NovaTronic. Disponible en: <https://novatronicec.com/index.php/product/cable-de-poder/> [Último Acceso: 06-ene-2024].

- [27] «Conector de Cable de Poder y Porta Fusible», Bigtronica. Disponible en: <https://www.bigtronica.com/conectores/electricos/2432-conector-de-cable-de-poder-y-porta-fusible-5053212024321.html> [Último Acceso: 06-ene-2024].
- [28] «Mini 10A 125VAC Spdt on off on Kcd1-2 3 Pin Rocker Switch», Made-in-China. Disponible en: <https://fu-chengele.en.made-in-china.com/product/xjGJspDUHNhq/China-Mini-10A-125VAC-Spdt-on-off-on-Kcd1-2-3-Pin-Rocker-Switch.html> [Último Acceso: 06-ene-2024].
- [29] «STM32F103 Bluepill», 2018. Disponible en: <https://alselectro.wordpress.com/2018/11/18/stm32f103-bluepill-getting-started-with-arduino-core/> [Último Acceso: 21-dic-2023].

5 ANEXOS

ANEXO I. Manual Usuario

ANEXO II. Código Implementando

ANEXO III. Hoja de Datos Microcontrolador

ANEXO IV. Hoja de Datos Semiconductor de Potencia

ANEXO V. Hoja de Datos Gate Drive

ANEXO VI. Hoja de Datos PLL

ANEXO I. MANUAL DE USUARIO

El manual de usuario presentado a continuación tiene como finalidad que los interesados en utilizar el equipo desarrollado tengan la información necesaria para poder emplear el dispositivo de manera segura y efectiva. Se incluye instrucciones detalladas para la puesta en marcha del equipo, además de las precauciones pertinentes.

I.1. INFORMACIÓN DE SEGURIDAD

I.1.1. ADVERTENCIAS

- No romper, dañar, doblar ni jalar el cable de poder del equipo; para de esa manera evitar cualquier riesgo eléctrico.
- No retirar ninguna cubierta ni tornillos del equipo durante su funcionamiento para evitar descargas eléctricas.
- Apague el equipo en caso de presentarse las siguientes situaciones:
 - Derrame de cualquier sustancia sobre el dispositivo
 - Detección de olor a quemado
 - Mal funcionamiento del equipo
- Mantener el equipo alejado de sustancias inflamables para evitar potenciales incendios.

I.1.2. PRECAUCIONES

- **Ubicación:** Es fundamental tomar en cuenta la ubicación cuando se haga uso del equipo, ya que se trata de un equipo electrónico que se debe mantener en ubicaciones donde se evite la exposición a diferentes condiciones ambientales. Además de que al ser un equipo que maneja cargas que generan demasiado calor se debe mantener a una distancia prudencial de la gran emanación de calor.
- **Alimentación:** Se debe suministrar una adecuada fuente de alimentación al sistema, ya que el equipo se diseñó para trabajar a 120 V y 60 Hz.

- **Conexiones:** Las conexiones del equipo están correctamente definidas en el equipo, por lo que se debe seguir las directrices del manual de usuario para evitar cualquier clase de inconveniente.

I.2. DESCRIPCIÓN

El siguiente equipo consiste básicamente en un convertor AC/AC que, por medio de un control por ciclo integral, complementado con un control ON/OFF por histéresis, permite el control de temperatura de un horno de resistencias eléctricas.

I.2.1. GUÍA DE COMPONENTES

Este equipo se compone de los siguientes componentes, ilustrados: en las Figuras I.1 y I.2:

1. Pines de Conexión de Carga
2. Pines de Visualización de ZC
3. Perilla de Ajuste de Setpoint o de referencia
4. Perilla de Emulación de Sensor
5. Conector de Alimentación Eléctrica
6. Interruptor Encendido/Apagado
7. Puerto de Comunicación Serial del Microcontrolador



Figura I.1. Modo de Operación Parte Frontal

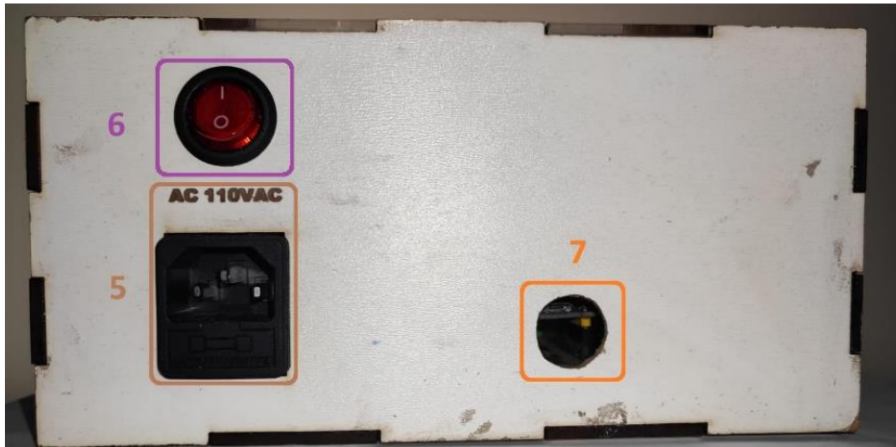


Figura I.2. Modo de Operación Parte Trasera

I.3. ALIMENTACIÓN

El sistema solo consta de un tipo de alimentación, esta es la alimentación AC de la red eléctrica, las características se pueden observar en la Tabla I.1.

Tabla I.1. Alimentación Equipo

Tipo	Valor
Alimentación AC	120 [V], 60 [Hz]

I.4. FUNCIONAMIENTO

Para el garantizar el correcto funcionamiento del equipo, se debe realizar adecuadamente las conexiones de alimentación, de la carga y de la comunicación serial. De esa manera, se puede realizar el control de temperatura en el horno eléctrico.

I.4.1. CONEXIÓN DE ALIMENTACIÓN

La alimentación de corriente alterna del equipo consiste básicamente en un conector con protección incorporada y un interruptor. La protección incorporada a la que se refiere es un portafusibles que prevendrá cortocircuitos, garantizando así la seguridad del sistema. Por otro lado, el interruptor permitirá el encendido y apagado del equipo, permitiendo así una interrupción de corriente en caso de emergencia.

Esta alimentación permitirá el funcionamiento de todos los componentes en las diferentes secciones del equipo, tanto de los equipos energizados con corriente alterna como con corriente continua, ya que se encuentra conectada a la fuente de alimentación conmutada

dentro del sistema. Esta conexión se encuentra en la parte trasera del equipo y se puede observar en la Figura I.1.



Figura I.3. Conexión de Alimentación

I.4.2. CONEXIÓN DE LA CARGA

Otro aspecto importante para el funcionamiento del equipo es la conexión de la carga al sistema. Esta conexión se realiza en dos borneras ubicadas en la parte frontal del equipo, diferenciadas por ser de tono amarilla y verde como se puede observar en la Figura I.2. Cabe resaltar que el tipo de carga a conectar debe ser de tipo resistivo que funcione como un horno de resistencias eléctricas.



Figura I.4. Conexión de la Carga

I.4.3. CONEXIÓN DE CRUCE POR CERO

Esta conexión no constituye una parte esencial del equipo, sino que permite observar la onda cuadrada en fase con la red eléctrica generada por el circuito de lazo de seguimiento

de fase. Mediante el uso de un osciloscopio conectados a los pines señalados en la Figura I.3, es posible visualizar esta señal generada.



Figura I.5. Conexión Cruce por Cero

I.4.4. CONEXIÓN DE COMUNICACIÓN SERIAL

La conexión de comunicación serial no es necesariamente fundamental para el funcionamiento del equipo, ya que más que involucrado con el control de temperatura, permite facilidad al usuario de poder observar, analizar e interpretar la información esencial de las variables del equipo.

Esta implicar la conexión de un cable micro USB desde el microcontrolador del equipo, se observa en le Figura I4, a un computador en donde se encuentra el HMI. De esta manera, se puede observar en pantalla el valor de set point de temperatura, la temperatura en tiempo real y los ciclos de encendido y apagador del convertor AC/AC.



Figura I.6. Conexión de Comunicación Serial

I.4.5. PERILLA SENSOR Y SET POINT

Para establecer una referencia de temperatura utilizando la perilla “SET POINT” del equipo, se gira esta hacia la derecha para aumentar el valor de seteo hacia uno más alto, o a la izquierda para disminuirlo, tal como se observa en la Figura I.5.



Figura I.7. Perilla Set Point

De igual manera, para simular el proceso de sensado de temperatura se utiliza la perilla “SENSOR” del equipo, donde girando hacia la derecha se aumenta la temperatura en tiempo real y hacia la izquierda se disminuye, como se observa en la Figura I.6.



Figura I.8. Perilla Sensor

I.5. HMI

Antes de poder interactuar con la interfaz gráfica del proyecto, es necesario primero iniciar el programa Nextion Editor, como se observa en la Figura I.7. Cabe aclarar que se escogió

este programa con el propósito de que en futuras aplicaciones se emplee alguna pantalla del fabricante Nextion.

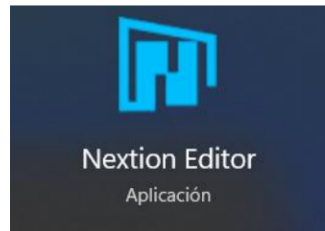


Figura I.9. Software Nextion Editor

Tras esto, se ejecuta el programa correspondiente a la interfaz de usuario diseñada para este proyecto, el cual se identifica como “HMI”. Esto se puede observar en la Figura I.8.

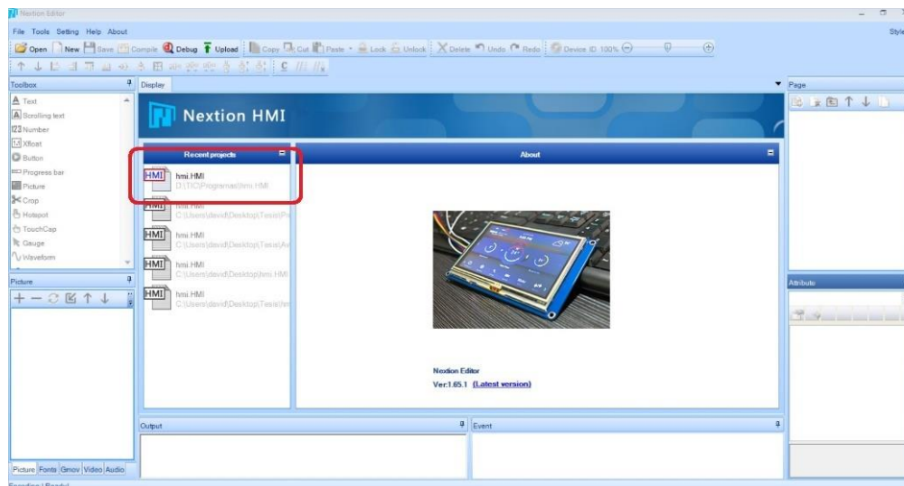


Figura I.10. Iniciar HMI

A continuación, se tendrá la pantalla observada en la Figura I.9, la cual corresponde a la interfaz gráfica diseñada, donde se procede a compilar el programa para observar su funcionamiento en tiempo real.

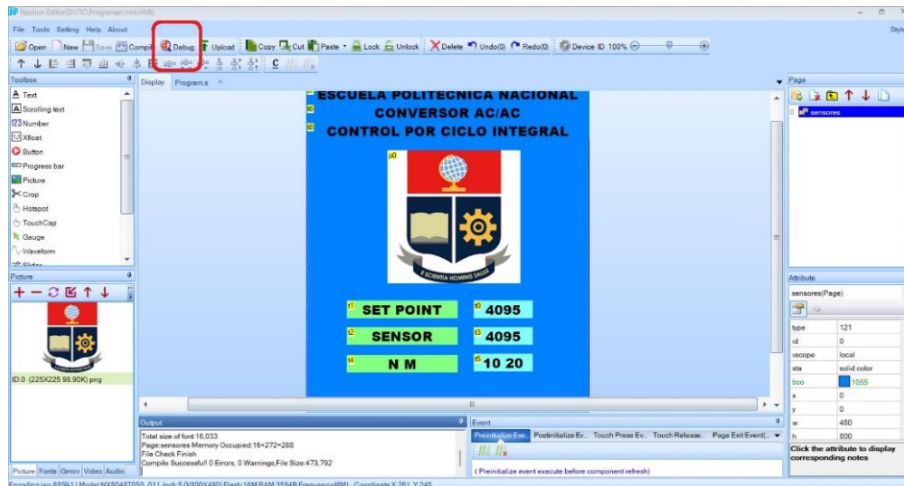


Figura I.11. Compilación Programa

Posteriormente, se mostrará una nueva ventana donde se debe seleccionar el puerto serial que se conecta con el microcontrolador, como se muestra en la Figura I.10. Para posteriormente iniciar la ejecución del programa en tiempo real, acción observada en la Figura I.11.

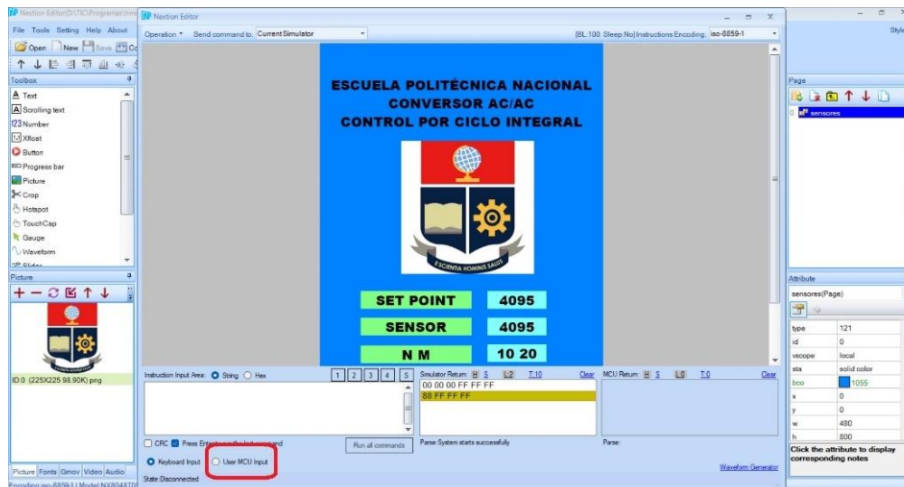


Figura I.12. Selección de Puerto Serial

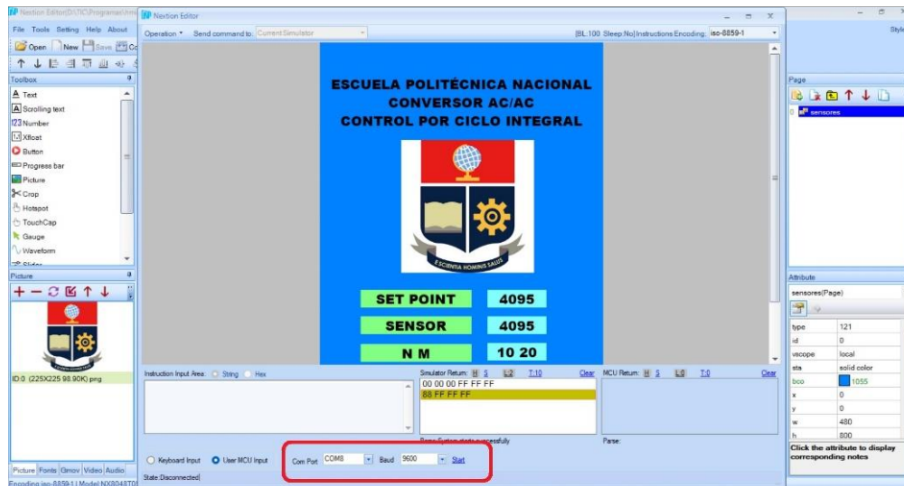


Figura I.13. Inicio de HMI

Finalmente, se tiene la siguiente pantalla de la Figura I.12, donde se muestra la información esencial del proyecto en tiempo real, valor de seteo de temperatura, valor sensado de temperatura y ciclos de encendido y apagado del convertor AC/AC.

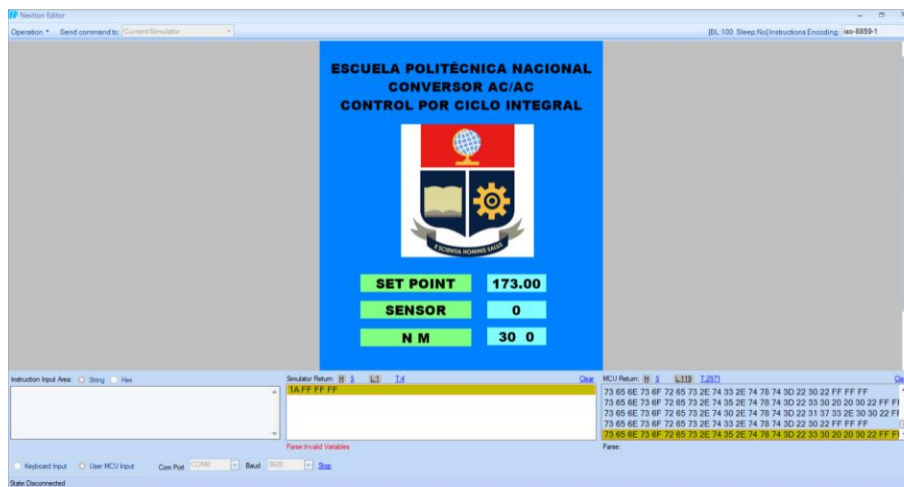


Figura I.14. HMI

I.6. PROTOCOLOS ANTE FALLAS

En la Tabla I.2 se observa las diferentes acciones a realizar ante posibles fallas que se puede presentar empleando este equipo.

Tabla I.2. Protocolo ante Fallas

Falla	Posible Causa	Solución
Sin Alimentación en TODO el sistema	Fusible quemado	Verificar visualmente fusible extrayéndolo del portafusibles, en caso de estar quemado, reemplazar fusible.
	Cable de poder en mal estado	Comprobar conectividad de cable, en caso de no funcionar cambiar de cable de poder en buen estado.
	Interruptor en mal estado o no accionado	Verificar posición del interruptor (posición de encendido), en caso de seguir sin alimentación, cambiar de interruptor.
Sin Alimentación AC solamente	Cables de conexiones en mal estado o sueltas	Verificar estado de los cables y de ser necesario reemplazarlos según lo indicado en los esquemas de conexión.
Sin Alimentación DC solamente	Cables de conexiones en mal estado o sueltas	Verificar estado de los cables y de ser necesario reemplazarlos según lo indicado en los esquemas de conexión.
	Fuente de alimentación conmutada	Medir salida de la fuente y comprobar la entrega de voltaje DC, en caso de no entregar los valores requeridos de voltaje, reemplazar la fuente de alimentación conmutada.
Sin comunicación serial (no se visualizan variables en pantalla)	Cable micro USB en mal estado	Comprobar de funcionamiento de cable micro USB, en caso de estar dañado, reemplazarlo.
	Puerto micro USB dañado (parte microcontrolador)	Sustituir placa de desarrollo STM32, y cargar el programa desarrollado para este equipo.

	Puerto USB dañado (parte computador)	Comprobar con otro puerto USB del computador, o emplear con otro computador.
	No hay alimentación en el microcontrolador	Verificar la correcta alimentación observando el LED indicador de encendido del microcontrolador.
Sin control de Convertor AC/AC	PLL no genera detección de cruce por ceros	Verificar señal generada por medio de un osciloscopio en los pines de cruce por cero y asegurar la sincronización del cruce por cero con la red eléctrica.
	Gate Drive no genera señal de disparo	Comprobar las señales PWM del microcontrolador que se envía al Gate Drive verificando la señal de disparo.
	No hay alimentación al convertor AC/AC	Verificar que el convertor estático de potencia esté correctamente alimentado.
	Triac dañado	Mediante un osciloscopio comprobar si el Triac está siendo disparado correctamente o por medio de un multímetro medir resistencia entre M1 y M2 para conocer si sufrió algún desperfecto.

ANEXO II. CÓDIGO IMPLEMENTADO

```
#define triac    PB11
#define led     PC13
#define set_point PA1

#define sensor  PA0
#define cpc    PB1
#define cpc_pll PB0

int c=30;
int n=c/2; //on
int m=c/2; //off
int contador=0;
int tl=0;

float kp=2, ki=5, kd=1;
float n1,n2, sp;
float error, lastError, cumError, rateError;

void cruce()
{
    contador++;
    if(contador<=n)
    {
        digitalWrite(triac,HIGH);
    }
    else
    {
        digitalWrite(triac,LOW);
    }
    if(contador==c) contador=0;
}

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    pinMode(led,OUTPUT);
    pinMode(triac,OUTPUT);
    pinMode(set_point,INPUT_ANALOG);
    pinMode(sensor,INPUT_ANALOG);
    pinMode(cpc,INPUT);
    pinMode(cpc_pll,INPUT);
}
```

```

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(cpc),cruce,RISING);
}
void loop()
{
  tl++;
  if(tl>999)
  {
    tl=0;
    sp =4095-analogRead(set_point);

    Serial.print("sensores.t0.txt=");
    Serial.write(34);
    Serial.print(sp);
    Serial.write(34);
    Serial.write(255);
    Serial.write(255);
    Serial.write(255);

    error = sp - analogRead(sensor);// determinar el error entre la consigna y la medición

    //Serial.print(" error ");
    //Serial.print(error);
    cumError += error * 1;
    if(cumError>4095) cumError=4095;
    if(cumError<0) cumError=0;
    //Serial.print(" cumError ");
    //Serial.print(cumError);
    rateError = (error - lastError);
    //Serial.print(" rateError ");
    //Serial.print(rateError);
    n1 = kp*error + ki*cumError + kd*rateError;
    if(n1<0) n1=0;
    if(n1>8000) n1=8000;
    lastError = error; // almacenar error anterior
    n2=n1; // escribir la salida del controlador
    n=map(n2,0,8000,0,30);
    //Serial.print(" n");
    //Serial.print(n);
    //Serial.print(" sensor ");
    //Serial.print(analogRead(sensor));
    Serial.print("sensores.t3.txt=");
    Serial.write(34);
    Serial.print(analogRead(sensor));
    Serial.write(34);

```

```
Serial.write(255);  
Serial.write(255);  
Serial.write(255);  
digitalWrite(led,digitalRead(led));
```

```
//Serial.print(" m ");  
//Serial.println(m);
```

```
Serial.print("sensores.t5.txt=");  
Serial.write(34);  
Serial.print(n);  
Serial.print(" ");  
Serial.print(m);  
Serial.write(34);  
Serial.write(255);  
Serial.write(255);  
Serial.write(255);
```

```
}
```

```
delay(1);  
m=c-n;
```

```
}
```

ANEXO III. HOJAS DE DATOS ELEMENTOS



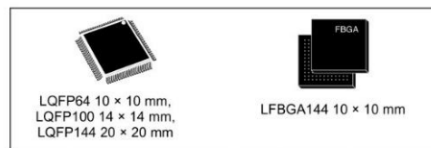
STM32F103xF STM32F103xG

XL-density performance line **ARM®-based 32-bit** MCU with 768 KB to 1 MB Flash, USB, CAN, 17 timers, 3 ADCs, 13 com. interfaces

Datasheet – production data

Features

- Core: ARM® 32-bit Cortex®-M3 CPU with MPU
 - 72 MHz maximum frequency, 1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1) performance at 0 wait state memory access
 - Single-cycle multiplication and hardware division
- Memories
 - 768 Kbytes to 1 Mbyte of Flash memory
 - 96 Kbytes of SRAM
 - Flexible static memory controller with 4 Chip Select. Supports Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR and NAND memories
 - LCD parallel interface, 8080/6800 modes
- Clock, reset and supply management
 - 2.0 to 3.6 V application supply and I/Os
 - POR, PDR, and programmable voltage detector (PVD)
 - 4-to-16 MHz crystal oscillator
 - Internal 8 MHz factory-trimmed RC
 - Internal 40 kHz RC with calibration
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
- Low power
 - Sleep, Stop and Standby modes
 - V_{BAT} supply for RTC and backup registers
- 3 × 12-bit, 1 μs A/D converters (up to 21 channels)
 - Conversion range: 0 to 3.6 V
 - Triple-sample and hold capability
 - Temperature sensor
- 2 × 12-bit D/A converters
- DMA: 12-channel DMA controller
 - Supported peripherals: timers, ADCs, DAC, SDIO, I²Ss, SPIs, I²Cs and USARTs
- Debug mode



- Serial wire debug (SWD) & JTAG interfaces
- Cortex®-M3 Embedded Trace Macrocell™
- Up to 112 fast I/O ports
 - 51/80/112 I/Os, all mappable on 16 external interrupt vectors and almost all 5 V-tolerant
- Up to 17 timers
 - Up to ten 16-bit timers, each with up to 4 IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input
 - 2 × 16-bit motor control PWM timers with dead-time generation and emergency stop
 - 2 × watchdog timers (Independent and Window)
 - SysTick timer: a 24-bit downcounter
 - 2 × 16-bit basic timers to drive the DAC
- Up to 13 communication interfaces
 - Up to 2 × I²C interfaces (SMBus/PMBus)
 - Up to 5 USARTs (ISO 7816 interface, LIN, IrDA capability, modem control)
 - Up to 3 SPIs (18 Mbit/s), 2 with I²S interface multiplexed
 - CAN interface (2.0B Active)
 - USB 2.0 full speed interface
 - SDIO interface
- CRC calculation unit, 96-bit unique ID
- ECOPACK® packages

Table 1. Device summary

Reference	Part number
STM32F103xF	STM32F103RF STM32F103VF STM32F103ZF
STM32F103xG	STM32F103RG STM32F103VG STM32F103ZG

May 2015

DocID16554 Rev 4

1/136

This is information on a product in full production.

www.st.com

ANEXO IV. HOJAS DE DATOS SEMICONDUCTOR DE POTENCIA



INCHANGE Semiconductor

isc Triacs

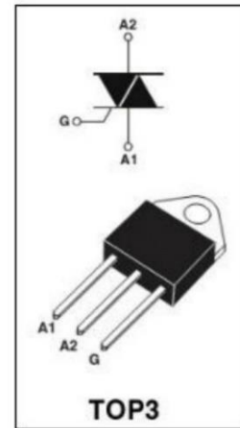
BTA440Z-800BT

FEATURES

- With TOP3 insulated package
- Suitable for general purpose where high surge current capability is required.
Application such as phase control and tatic switching on inductive or resistive load.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS(Ta=25°C)

SYMBOL	PARAMETER	MIN	UNIT
V _{DRM}	Repetitive peak off-state voltage	800	V
V _{RRM}	Repetitive peak reverse voltage	800	V
I _{T(RMS)}	RMS on-state current (full sine wave) T _J =80°C	40	A
I _{TSM}	Non-repetitive peak on-state current t _p =20ms	440	A
T _J	Operating junction temperature	150	°C
T _{stg}	Storage temperature	-40~150	°C
P _{G(AV)}	Average gate power dissipation	1	W
R _{th(j-c)}	Thermal resistance, junction to case	0.9	°C/W
R _{th(j-a)}	Thermal resistance, junction to ambient	50	°C/W



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_c=25°C unless otherwise specified)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MAX	UNIT
I _{RRM}	Repetitive peak reverse current	V _R =V _{RRM}	5	μA
I _{DRM}	Repetitive peak off-state current	V _D =V _{DRM}	5	μA
I _{GT}	Gate trigger current	I	50	mA
		II	50	
		III	50	
I _H	Holding current	I _{GT} = 0.5A, Gate Open	80	mA
V _{GT}	Gate trigger voltage all quadrant	V _D =12V; R _L = 33 Ω	1.3	V
V _{TM}	On-state voltage	I _{TM} = 60A; t _p = 380 μ s	1.55	V

isc website: www.iscsemi.com

isc & Iscsemi is registered trademark

Download from alldatasheet.com

ANEXO V. HOJAS DE DATOS GATE DRIVE



6-PIN DIP ZERO-CROSS PHOTOTRIAC DRIVER OPTOCOUPLER (600V PEAK)

MOC3061-M MOC3062-M MOC3063-M MOC3162-M MOC3163-M

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)				
Parameters	Symbol	Device	Value	Units
TOTAL DEVICE				
Storage Temperature	T_{STG}	All	-40 to +150	$^\circ\text{C}$
Operating Temperature	T_{OPR}	All	-40 to +85	$^\circ\text{C}$
Lead Solder Temperature	T_{SOL}	All	260 for 10 sec	$^\circ\text{C}$
Junction Temperature Range	T_J	All	-40 to +100	$^\circ\text{C}$
Isolation Surge Voltage ⁽⁴⁾ (peak AC voltage, 60Hz, 1 sec duration)	V_{ISO}	All	7500	Vac(pk)
Total Device Power Dissipation @ 25 $^\circ\text{C}$ Derate above 25 $^\circ\text{C}$	P_D	All	250	mW
			2.94	mW/ $^\circ\text{C}$
EMITTER				
Continuous Forward Current	I_F	All	60	mA
Reverse Voltage	V_R	All	6	V
Total Power Dissipation 25 $^\circ\text{C}$ Ambient Derate above 25 $^\circ\text{C}$	P_D	All	120	mW
			1.41	mW/ $^\circ\text{C}$
DETECTOR				
Off-State Output Terminal Voltage	V_{DRM}	All	600	V
Peak Repetitive Surge Current (PW = 100 μs , 120 pps)	I_{TSM}	All	1	A
Total Power Dissipation @ 25 $^\circ\text{C}$ Ambient Derate above 25 $^\circ\text{C}$	P_D	All	150	mW
			1.76	mW/ $^\circ\text{C}$

ANEXO VI. HOJAS DE DATOS PLL



Data sheet acquired from Harris Semiconductor
SCHS043B – Revised July 2003

CMOS Micropower Phase-Locked Loop

■ **CD4046B CMOS Micropower Phase-Locked Loop (PLL)** consists of a low-power, linear voltage-controlled oscillator (VCO) and two different phase comparators having a common signal-input amplifier and a common comparator input. A 5.2-V zener diode is provided for supply regulation if necessary.

The CD4046B types are supplied in 16-lead hermetic dual-in-line ceramic packages (F3A suffix), 16-lead dual-in-line plastic packages (E suffix), 16-lead small-outline packages (NSR suffix), and 16-lead thin shrink small-outline packages (PW and PWR suffixes).

VCO Section

The VCO requires one external capacitor C1 and one or two external resistors (R1 or R1 and R2). Resistor R1 and capacitor C1 determine the frequency range of the VCO and resistor R2 enables the VCO to have a frequency offset if required. The high input impedance ($10^{12}\Omega$) of the VCO simplifies the design of low-pass filters by permitting the designer a wide choice of resistor-to-capacitor ratios. In order not to load the low-pass filter, a source-follower output of the VCO input voltage is provided at terminal 10 (DEMODULATED OUTPUT). If this terminal is used, a load resistor (R_S) of 10 k Ω or more should be connected from this terminal to V_{SS}. If unused this terminal should be left open. The VCO can be connected either directly or through frequency dividers to the comparator input of the phase comparators. A full CMOS logic swing is available at the output of the VCO and allows direct coupling to CMOS frequency dividers such as the RCA-CD4024, CD4018, CD4020, CD4022, CD4029, and CD4059. One or more CD4018 (Presettable Divide-by-N Counter) or CD4029 (Presettable Up/Down Counter), or CD4059A (Programmable Divide-by-“N” Counter), together with the CD4046B (Phase-Locked Loop) can be used to build a micropower low-frequency synthesizer. A logic 0 on the INHIBIT input “enables” the VCO and the source follower, while a logic 1 “turns off” both to minimize stand-by power consumption.

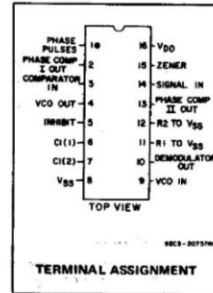
MAXIMUM RATINGS, Absolute-Maximum Values:

DC SUPPLY-VOLTAGE RANGE, (V_{DD})	-0.5V to +20V
Voltages referenced to V _{SS} Terminal)	
INPUT VOLTAGE RANGE, ALL INPUTS	-0.5V to V _{DD} +0.5V
DC INPUT CURRENT, ANY ONE INPUT	±10mA
POWER DISSIPATION PER PACKAGE (P_D):	
For T _A = -55°C to +100°C	500mW
For T _A = +100°C to +125°C	Derate Linearly at 12mW/°C to 200mW
DEVICE DISSIPATION PER OUTPUT TRANSISTOR	
FOR T _A = FULL PACKAGE-TEMPERATURE RANGE (All Package Types)	100mW
OPERATING-TEMPERATURE RANGE (T_A)	-55°C to +125°C
STORAGE TEMPERATURE RANGE (T_{stg})	-65°C to +150°C
LEAD TEMPERATURE (DURING SOLDERING):	
At distance 1/16 ± 1/32 inch (1.59 ± 0.79mm) from case for 10s max	+265°C

CD4046B Types

Features:

- Very low power consumption: 70 μ W (typ.) at VCO $f_0 = 10$ kHz, V_{DD} = 5 V
- Operating frequency range up to 1.4 MHz (typ.) at V_{DD} = 10 V, R_I = 5 k Ω
- Low frequency drift: 0.04%/°C (typ.) at V_{DD} = 10 V
- Choice of two phase comparators: Exclusive-OR network (I) Edge-controlled memory network with phase-pulse output for lock indication (II)
- High VCO linearity: <1% (typ.) at V_{DD} = 10 V
- VCO inhibit control for ON-OFF keying and ultra-low standby power consumption
- Source-follower output of VCO control input (Demod. output)
- Zener diode to assist supply regulation
- Standardized, symmetrical output characteristics
- 100% tested for quiescent current at 20 V
- 5-V, 10-V, and 15-V parametric ratings
- Meets all requirements of JEDEC Tentative Standard No. 13B, “Standard Specifications for Description of ‘B’ Series CMOS Devices”



Applications:

- FM demodulator and modulator
- Frequency synthesis and multiplication
- Frequency discriminator
- Data synchronization
- Voltage-to-frequency conversion
- Tone decoding
- FSK – Modems
- Signal conditioning
- (See ICAN-6101) “RCA COS/MOS Phase-Locked Loop – A Versatile Building Block for Micropower Digital and Analog Applications”

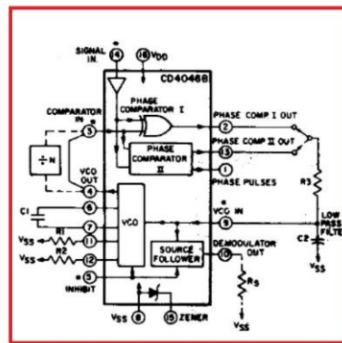
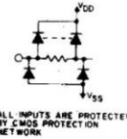


Fig.1 – CMOS phase-locked loop block diagram.



* ALL INPUTS ARE PROTECTED BY CMOS PROTECTION NETWORK

96C9-2HTZ

Phase Comparators

The phase-comparator signal input (terminal 14) can be direct-coupled provided the signal swing is within CMOS logic levels [logic “0” < 30% (V_{DD} - V_{SS})], logic “1” > 70% (V_{DD} - V_{SS})]. For smaller swings the signal must be capacitively coupled to the self-biasing amplifier at the signal input.

Phase comparator I is an exclusive-OR network; it operates analogously to an over-driven balanced mixer. To maximize the lock range, the signal- and comparator-input frequencies must have a 50% duty cycle. With no signal or noise on the signal input, this phase comparator has an average output voltage equal to V_{DD}/2. The low-pass filter connected to the output of phase comparator