



## **Controlador de temperatura temporizado para estufa de laboratorio**

Juan E. Quel <sup>a</sup>\*, Nicolás E. Bernal <sup>a</sup>, Matías G. Krujoski <sup>a</sup>, Guillermo A. Fernández <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> IMAM -GIDE UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina

juanq99@live.com, bernal.e.nicolas@gmail.com, matias.krujoski@fio.unam.edu.ar,  
guillermo.fernandez@fio.unam.edu.ar

---

### **Resumen**

Este trabajo trata el diseño y construcción de un controlador de temperatura temporizado, aplicado a una estufa eléctrica que suele utilizarse para secar muestras, entre otras operaciones, en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería. El trabajo tiene por objetivos integrar los saberes relacionados con el diseño e implementación de sistemas embebidos, desarrollando un controlador de temperatura que reemplace al actual sistema de control de la estufa por otro con mejores prestaciones. Inicialmente en el desarrollo del trabajo se ha relevado las características constructivas y de operación de la estufa, permitiendo esto seleccionar los componentes del nuevo sistema de control de temperatura diseñado. Para el procesamiento de la temperatura medida se utiliza el microcontrolador Atmega328P, cuyo programa es diseñado para medir esta variable con una termocupla y proporcionar las acciones de control correspondientes mediante un relé de estado sólido, que permite conectar/desconectar la resistencia calefactora de la estufa. Los resultados alcanzados durante el funcionamiento del controlador obtenido fueron sobresalientes. Con un instrumento patrón se observa que los valores de temperatura controlados permanecen en el rango establecido por el usuario y las temporizaciones cumplen con lo programado por el mismo. También se destaca la correcta operación del menú desarrollado para programar los valores de *setpoint* y la temporización del tiempo de operación. Esto permite concluir que los objetivos propuestos se alcanzaron satisfactoriamente.

**Palabras Clave** – Arduino, Estufa, Interrupción, Control ON-OFF, Relé, Temporizador, Termocupla, TRIAC.

### **1. Introducción**

El presente trabajo es propuesto en la asignatura Técnicas Digitales 2 de la carrera Ingeniería Electrónica, donde se estudia el diseño y construcción de sistemas embebidos que operan en base a microcontroladores. Los saberes adquiridos están relacionados con la estructura del circuito y la programación de estos sistemas.

Este trabajo propone el diseño y construcción de un sistema embebido que constituye el controlador de temperatura temporizado de una estufa para el Laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería de la UNaM.

La técnica de control implementada en el controlador de temperatura desarrollado, posee una acción de control de dos posiciones, también conocida como acción de control ON-OFF [1]. En esta ley de control hay dos posiciones fijas para la acción de control. Una de encendido y otra de apagado del actuador, que en este caso es la resistencia calefactora de la estufa. El control de dos posiciones brinda la ventaja de ser sencillo de implementar y fácil de ajustar para el usuario, es por esto último que es seleccionado en el presente proyecto.

El sistema de control de temperatura aquí propuesto, es implementado mediante un Arduino NANO, el cual se trata de una placa electrónica de *hardware* libre basado en el microcontrolador Atmega328P. Este dispositivo comanda un relé de estado sólido para energizar la resistencia de la estufa. Para medir la temperatura se usa una termocupla tipo K conectada a un conversor analógico-digital MAX6675, que posee un sistema de transmisión de datos con interfaz SPI (*Serial Peripheral Interface*) [3] al microcontrolador. Para la interfaz del usuario, se utiliza un teclado matricial de membrana 4x4 y un display LCD de 4 filas y 20 caracteres que, a través de los cuales el usuario puede configurar la temperatura (*setpoint*) y programar el temporizado del proceso.

En primera instancia el artículo presenta las características de operación de la estufa. Luego se muestran las etapas del circuito electrónico diseñado para el controlador de temperatura, describiendo el funcionamiento y la operación del mismo. Seguidamente están expresados los cálculos relacionados a la selección de componentes de la etapa de potencia del circuito. A continuación, se describe la lógica programada en el microcontrolador para efectuar el control de temperatura temporizado y manejar su interfaz de usuario. Por último, se presentan los resultados obtenidos con la implementación del sistema de control en la estufa y las correspondientes conclusiones.

## 2. Relevamiento del sistema existente

La Fig. 1a presenta el esquema del sistema de control de temperatura que poseía la estufa, antes de instalar el sistema embebido desarrollado en este trabajo.

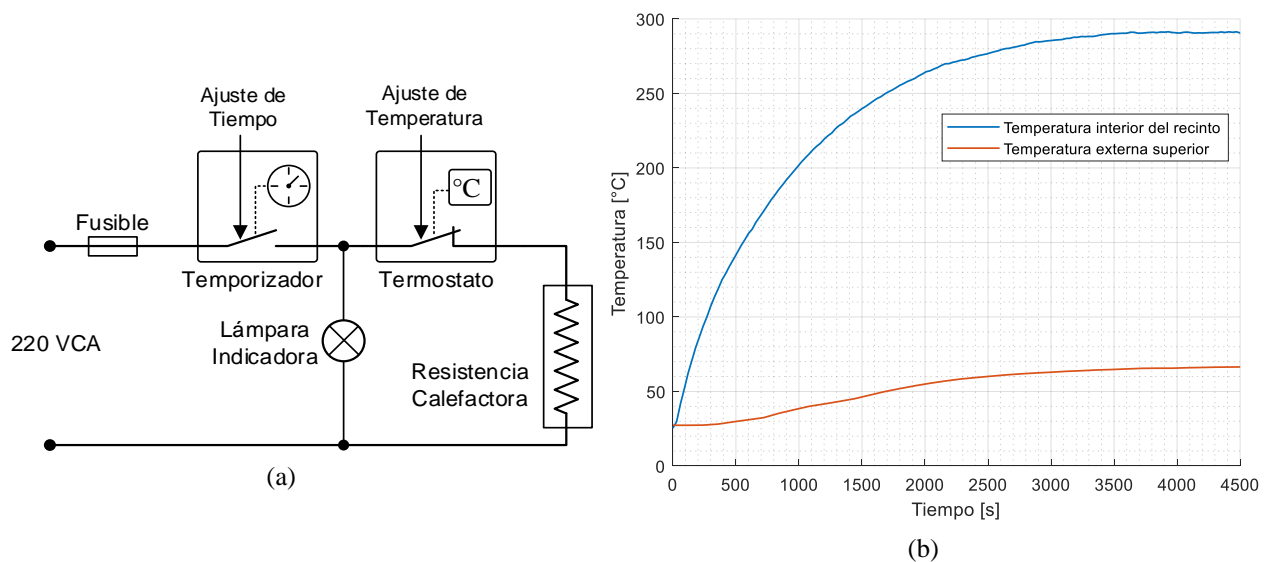


Fig. 1. (a) Sistema de control de temperatura original de la estufa; (b) Curvas de calentamiento de la estufa.

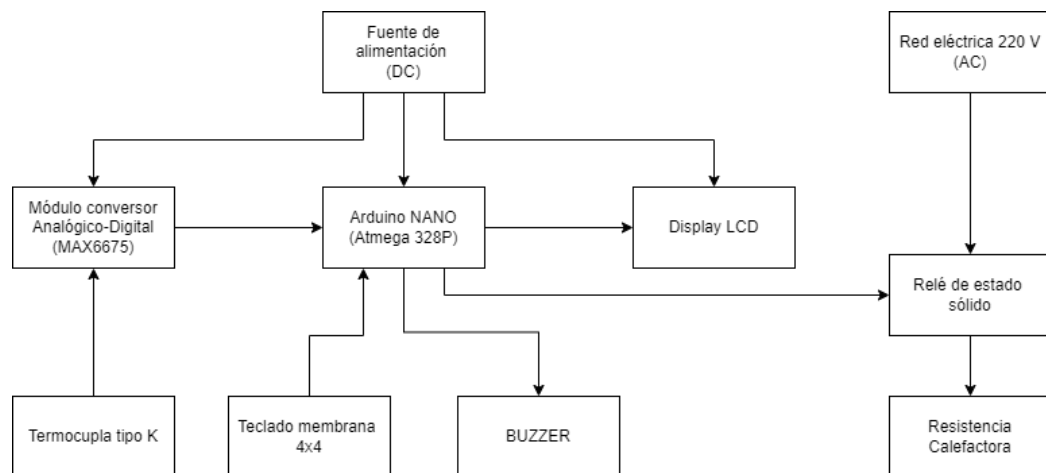
Como puede apreciarse en la Fig. 1a, el sistema original controlaba la temperatura a través de un termostato bimetalico, quien interrumpe el paso de la corriente eléctrica hacia la resistencia calefactora cuando la temperatura en el recinto de la estufa excede el valor deseado por el usuario (*setpoint*). Esto siempre que se encuentre corriendo la temporización ajustada en el sistema. El transcurso de dicha temporización, puede ser observada mediante la lámpara de indicación mostrada en la Fig. 1a.

Eliminando el sistema de control original, por encontrarse irreparablemente dañado, y energizando directamente a la resistencia desde la red eléctrica, la Fig. 1b muestra las curvas de calentamiento obtenidas en estas condiciones. En las mismas puede apreciarse que el recinto alcanza como máximo alrededor de 300°C, mientras que la parte externa superior de la estufa llega a 65 °C.

Considerando el valor máximo de la temperatura en interior de la estufa, se selecciona una termocupla tipo K ( $T_{\text{máx}} = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) como dispositivo sensor para el control de temperatura desarrollado. Mientras que la temperatura máxima alcanzada en la parte externa superior de la estufa, indica que no es conveniente montar en esa parte el gabinete que contiene a los circuitos electrónicos del sistema de control. Atendiendo a esto último, se decide montar el gabinete en la parte lateral de la estufa, donde la temperatura máxima alcanzada es de 50 °C. Reducir al mínimo posible la temperatura ambiente de trabajo de los componentes electrónicos utilizados, minimiza el perjuicio de su vida útil por estrés térmico y además permite disminuir el tamaño del disipador de calor que requiere el relé de estado sólido utilizado como actuador del sistema de control construido.

### 3. Circuito propuesto

La Fig. 2 presenta un diagrama de bloques del circuito electrónico propuesto como solución al diseño del controlador de temperatura. El diagrama expresa la idea principal en cómo se realiza el monitoreo de la temperatura interna de la estufa, el empleo de la acción del control para actuar sobre su resistencia calefactora y periféricos de entrada y salida a disposición del usuario para efectuar las configuraciones deseadas.



**Fig. 2. Diagrama de bloques del circuito electrónico propuesto para el controlador de temperatura.**

En la Fig. 2 se puede diferenciar dos secciones del circuito. Por un lado, se tiene un circuito lógico que integra el microcontrolador y las entradas/salidas correspondientes a las conexiones del módulo

conversor analógico-digital, display LCD, teclado de membra y el *buzzer*. Por otro parte, el diagrama presenta una etapa de potencia, donde se encuentra el circuito referido al relé de estado sólido, que proporciona la conexión/desconexión de la resistencia calefactora. Seguidamente se explican la operación del circuito lógico y de la etapa de potencia.

### 3.1. Circuito lógico

La temperatura interior de la estufa es medida con una termocupla del tipo K. Este tipo de sensor mide temperaturas de hasta 1250 °C, siendo adecuado para su uso en relación a las prestaciones de la estufa y los rangos de temperatura que se deben alcanzar para distintas prácticas. La termocupla es conectada al módulo MAX6675 [2], el cual acondiciona y digitaliza su señal de salida. De la misma, se obtiene un valor binario de 12 bits en formato Q10.2 (resolución de 0,25 °C) que puede transmitirlo a demanda del microcontrolador mediante una interfaz de comunicación serie SPI (*Serial Peripheral Interface*) [3]. Para esta comunicación de datos, las líneas SCK, CS y SO del MAX6675 son conectadas a los pines digitales 14 (PB2), 15 (PB3) y 16 (PB4) del Atmega 328P.

El display LCD es conectado al microcontrolador mediante un módulo de comunicación serie I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*), el cual opera con el chip PCF8574. Este dispositivo convierte los datos serie I<sup>2</sup>C [4] enviados por el microcontrolador, en palabras de 8 bits (en paralelo) para el display LCD. Esta adaptación permite el control del display mediante la conexión de solamente dos hilos, SCL para los pulsos de reloj que sincronizan la comunicación y SDA por el que se transmiten los datos entre los dispositivos. La ventaja que provee el módulo mencionado, motivo principal de su uso, es la reducción en la cantidad de puertos de entrada/salida del microcontrolador usados para manejar el display.

El ingreso de datos para configurar la operación del control de la estufa, es efectuado con un teclado matricial de membrana [5]. Los pulsadores de este teclado están dispuestos en una matriz de 4 filas por 4 columnas. Esto reduce a 8 la cantidad de puertos del microcontrolador, necesarios para leer el estado que poseen los 16 pulsadores del teclado. La lectura del teclado es realizada mediante una técnica de barrido, donde se envían pulsos en altos de manera secuencial en las filas y se leen los estados mediante los pines correspondientes a las columnas. Este tipo de teclados no integran resistores *pull-up*, por lo cual en este trabajo se activan los resistores de *pull-up* internos que posee el microcontrolador Atmega328P.

El controlador desarrollado posee dos LEDs y un *buzzer* para indicación. Uno de los LEDs muestra que el sistema de control de temperatura está en marcha, manteniéndose encendido durante todo el periodo de operación y hasta que finalice la temporización configurada o bien cuando el usuario realice una parada a través del teclado. El otro LED indica la conexión/desconexión de la resistencia calefactora durante el proceso de control. El *buzzer* indica el inicio del proceso y cuando la estufa alcanza la temperatura de *setpoint*, estos eventos son diferenciados con distintos sonidos del *buzzer*. Cabe mencionar los LEDs y el *buzzer* mencionados, junto al display LCD y el teclado matricial, forman parte de la interfaz que permite al usuario interactuar con el controlador de temperatura desarrollado.

### 3.2. Circuito de potencia

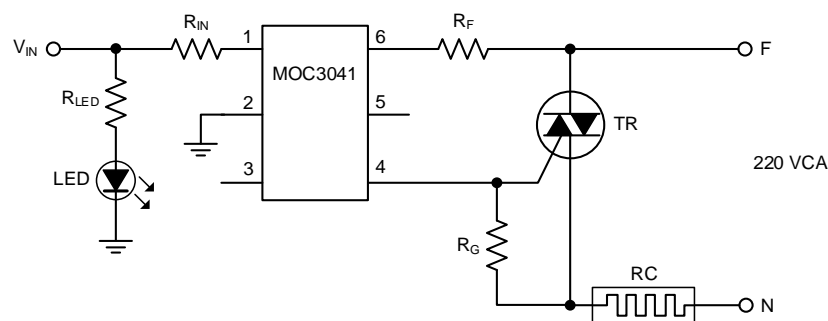
Este circuito se basa esencialmente en un relé de estado sólido conformado por un optoacoplador con detección de cruce por cero de voltaje (MOC3041) y un tiristor del tipo TRIAC. Una salida del microcontrolador es conectada a la entrada del optoacoplador, quien controla el terminal de compuerta del TRIAC, como será mostrado más adelante. A través de estos componentes, se aplica una señal que conecta/desconecta a la resistencia calefactora de la red eléctrica, con el fin de mantener la temperatura de la estufa dentro del rango deseado. El microcontrolador es el encargado de generar la señal mencionada, como resultado de la acción de control ON-OFF, obtenida a partir del procesamiento de la temperatura que mide.

El uso del relé de estado sólido evita los desgastes que se producirían al utilizar un relé electromecánico convencional, cuando la acción de control conmuta a una frecuencia elevada en caso de acercarse la temperatura medida al *setpoint* configurado por el usuario. El optoacoplador utilizado proporciona aislamiento eléctrico entre el circuito digital y la etapa de potencia conformada por el TRIAC, la resistencia calefactora y la red eléctrica. Este aislamiento brinda protección al circuito digital, ante posibles sobretensiones y cortocircuitos en la etapa de potencia mencionada.

## 4. Diseño de los circuitos del relé de estado sólido y de indicación

El circuito del relé de estado sólido implementado, es el indicado en la Fig. 3. El mismo consta de una etapa de salida o de potencia, cuya función es activar y desactivar la resistencia de la estufa. El relé de estado sólido se encuentra construido a partir de un optoacoplador (MOC3041) [6] y un TRIAC (TR). En la entrada del relé hay un LED para indicar el estado de la señal que activa al mismo.

Para la selección de TR se midió la corriente eficaz demandada por la resistencia de la estufa conectada directamente a la red eléctrica. Como resultado se obtuvo 3,1 A. El TRIAC disponible y utilizado es el BT139-600F [7], que puede conmutar una corriente eficaz máxima de 16 A y operar apagado con un voltaje de pico repetitivo de 600 V.



**Fig. 3. Circuito del relé de estado sólido que acciona a la resistencia calefactora (RC).**

El dispositivo disponible y utilizado como optoacoplador es el MOC3041. El mismo es un optotriac que posee detección de cruce por cero en la tensión de corriente alterna aplicada a su circuito de salida. Este dispositivo opera con una corriente de encendido  $I_F = 15$  mA a la entrada y una tensión alterna con pico máximo de 400 V en su salida. La entrada  $V_{IN}$  mostrada en el circuito de la Fig. 3, es conectada a la salida del microcontrolador Atmega328P que produce la acción de control ON-OFF.

De esta forma, con un estado lógico alto para dicha señal (ON), el relé de estado sólido habilita el paso de energía a la resistencia calefactora y el interior de la estufa es calentado; mientras que con un estado lógico bajo para la señal (OFF), la resistencia no es energizada y el interior de la estufa tiende a enfriarse.

A partir de la hoja de datos que provee el fabricante del MOC3041, se tiene  $R_G = 330 \Omega$  y  $R_F = 360 \Omega$ , ambas de 1/4 W. La resistencia limitadora de corriente  $R_{IN}$  para la entrada de este dispositivo puede obtenerse mediante la ecuación (1).

$$R_{IN} = \frac{V_{IN} - V_F}{I_F}; P_{R_{IN}} = I_F^2 R_{IN} \quad (1)$$

De la hoja de datos del optoacoplador se obtiene que la caída de tensión en el LED que posee la entrada del dispositivo es  $V_F = 1,3 \text{ V}$  y la corriente de encendido  $I_F = 13,5 \text{ mA}$  a una temperatura ambiente de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Entonces para una salida con estado lógico alto  $V_{OHmin} = V_{IN} = 4,1 \text{ V}$  en el microcontrolador, con las ecuaciones (1) se obtiene un resistor comercial  $R_{IN} = 220 \Omega$  de 1/4 W.

El circuito de la Fig. 3 muestra el LED indicador en paralelo con la entrada del MOC3041. Su resistencia limitadora  $R_{LED}$  puede obtenerse mediante la ecuación (2).

$$R_{LED} = \frac{V_{IN} - V_{LED}}{I_{LED}}; P_{R_{LED}} = I_{LED}^2 R_{LED} \quad (2)$$

Considerando que el circuito de entrada del relé de estado sólido de la Fig. 3 posee un LED rojo de alta luminosidad con una caída de tensión  $V_{LED} = 2 \text{ V}$ , para una corriente  $I_{LED} = 10 \text{ mA}$  resulta una resistencia limitadora  $R_{LED} = 220 \Omega$  de 1/4 W.

A partir de la hoja de datos del microcontrolador Atmega328P [8], cada pin de entrada/salida puede manejar como máximo una corriente de 40 mA. Observando el circuito de la Fig. 3, para el encendido de la resistencia calefactora RC con el relé de estado sólido, en la entrada del mismo debe suministrarse una corriente  $I_{IN} = 23 \text{ mA}$ . Por lo cual, se comprueba que la corriente que debe entregar la salida del microcontrolador, no excede el valor máximo indicado.

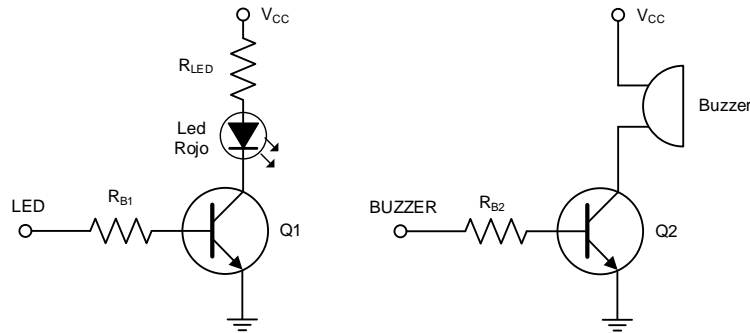
Para realizar el cálculo del disipador usado por el TRIAC (con encapsulado es TO220), debe conocerse la temperatura ambiente de operación del mismo. Para esto se supone que el mismo estará montado en un gabinete estanco, sujeto a la cubierta externa de la estufa. El relevamiento de la temperatura externa mostrado en la Fig. 1b, indica que la temperatura ambiente en la parte superior de la cubierta resulta ser de aproximadamente de  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este valor de temperatura tiene la influencia de la convección de calor que hay en esta zona de la cubierta. Por tal motivo, para reducir la temperatura ambiente de operación de todos los componentes del controlador diseñado, se decide montar el gabinete estanco con los circuitos electrónicos a un costado de la estufa, ya que en esta ubicación la temperatura máxima alcanzada en el ensayo de la Fig. 1 fue de  $52 \text{ }^\circ\text{C}$ . A partir de esto, para el TRIAC se considera la máxima temperatura ambiente que puede alcanzarse en su operación es  $T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A continuación, la potencia de operación del TRIAC y la resistencia térmica de su disipador,  $P_{triac}$  y  $R_{th(d)}$  respectivamente, pueden obtenerse mediante las ecuaciones (3).

$$P_{triac} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} V_T I_T + \frac{V_T}{I_T} I_T^2 ; R_{th(d)} = \frac{T_j - T_a}{P_{triac}} - R_{th(jc)} - R_{th(cd)} \quad (3)$$

Mediante la hoja de datos del TRIAC se obtiene que la caída de tensión en su circuito principal es  $V_T = 1,2 \text{ V}$  para una corriente eficaz de operación  $I_T = 3,1 \text{ A}$  (corriente absorbida por la resistencia calefactora) y que la resistencia térmica juntura-carcasa es  $R_{th(jc)} = 1,2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ . Considerando que este dispositivo alcanza una temperatura de juntura  $T_j = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  a una temperatura ambiente de operación  $T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  y que el disipador es montado con una mica aislante y pasta térmica con  $R_{th(cd)} = 1,7 \text{ }^\circ\text{C/W}$ , a través de las ecuaciones (3) se obtiene  $P_{triac} = 7,1 \text{ W}$  y  $R_{th(d)} = 4,17 \text{ }^\circ\text{C/W}$ . Por lo cual, para el TRIAC en estas condiciones de operación, debe utilizarse un disipador con igual o menor resistencia térmica a la indicada. Se utiliza el disipador ZD1X5, cuya resistencia térmica es de  $3,5 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .

La placa donde está montado el Arduino NANO incorpora un *buzzer* y un LED indicador como parte de la interfaz de usuario que permite observar la operación del controlador desarrollado. Ambos dispositivos están controlados por el Atmega328P a través de transistores NPN del tipo BC337 con las señales BUZZER y LED respectivamente, como lo muestra la Fig. 4.



**Fig. 4. Circuitos de indicación, parte de la interfaz de usuario del controlador de temperatura.**

Las resistencias limitadoras indicadas en los circuitos de la Fig. 4, pueden obtenerse a través de las ecuaciones (4) y (5)

$$R_{LED} = \frac{V_{IN} - V_{LED} - V_{CEsat}}{I_{LED}} ; P_{R_{LED}} = I_{LED}^2 R_{LED} \quad (4)$$

$$R_B = \frac{V_{OH} - V_{BE(on)}}{I_B} ; P_{R_B} = I_B^2 R_B \quad (5)$$

A partir de la hoja de datos del BC337 [9], la caída de tensión colector-emisor de saturación es  $V_{CEsat} = 0,7 \text{ V}$ , la caída de tensión base-emisor de encendido  $V_{BE(on)} = 1,2 \text{ V}$  y la ganancia de corriente  $\beta = 100$ . Considerando que la relación entre las corrientes de colector y de base es  $I_B = 5 \cdot (I_C/\beta)$ , para  $V_{CC} = 5 \text{ V}$ ,  $I_{C1} = 15 \text{ mA}$ ,  $I_{C2} = 30 \text{ mA}$  y una salida en estado lógico alto del microcontrolador  $V_{OH} = 4,1 \text{ V}$ , los valores comerciales para las resistencias limitadoras obtenidas con las ecuaciones (4) y (5) son  $R_{LED} = 150 \text{ } \Omega$ ,  $R_{B1} = 2,7 \text{ k}\Omega$  y  $R_{B2} = 1,5 \text{ k}\Omega$ , todas de  $1/4 \text{ W}$ .

## 5. Programa desarrollado para el microcontrolador

A continuación, se describen algunas etapas del programa realizado en el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino mediante lenguaje C++ [10] para ejecutar el control ON-OFF.

### 5.1. Operación de los Temporizadores

Para implementar las temporizaciones requeridas en el funcionamiento del sistema de control desarrollado, son utilizados dos de los tres módulos temporizadores/contadores que posee el Atmega328P. Para cronometrar el apagado de la estufa una vez alcanzada el *setpoint* de temperatura, es usado el TIMER1 (de 16 bits) configurado para interrumpir a la rutina principal del programa cada un segundo. Mientras que el TIMER2 (de 8 bits) es utilizado para ejecutar la estrategia de control ON-OFF implementada [11], realizando el muestreo de la temperatura cada 250 ms (con interrupciones iterativas cada 10 ms).

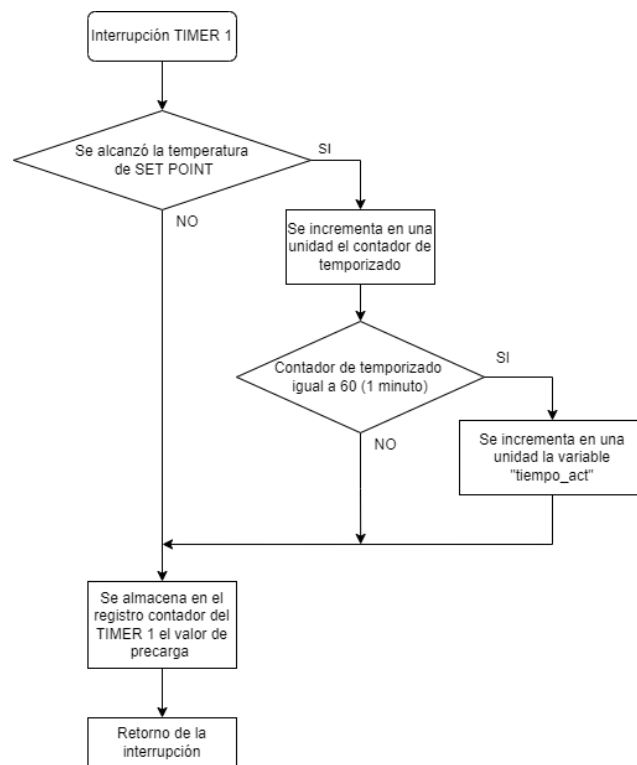


Fig. 5. Diagrama de flujo de la rutina de servicio a la interrupción del TIMER 1.

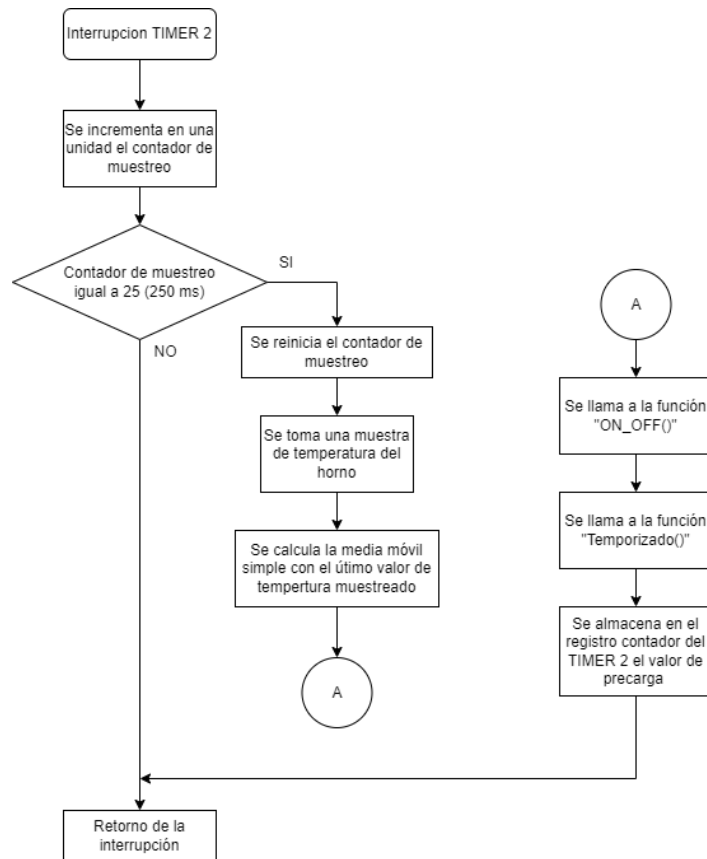
A continuación, se explican en detalle las rutinas de servicio a las interrupciones que efectúan los temporizadores mencionados [12].

#### 5.1.1. Temporizador/contador 1 (TIMER1)

La Fig. 5 presenta el diagrama de flujo de la rutina de servicio a la interrupción (RSI) por parte del TIMER1. Este temporizador es configurado para operar en modo normal con un valor de precarga en el registro contador TCNT1 que, mediante la aplicación de un valor de *prescaler* (cada 256 pulsos del *clock*), genera interrupciones por desbordamiento del contador cada 1 segundo.



Durante el ciclo de operación de la estufa, una vez que la temperatura interior de la estufa alcanza el valor de *setpoint* por primera vez desde que el usuario inicia el proceso, comienza a contabilizarse el tiempo de operación configurado en el sistema. Para contabilizar el tiempo, el TIMER1 genera interrupciones cada segundo y en cada una de ellas se incrementa en una unidad su contador TCNT1. Este incremento sucede hasta que el contado alcanza 60 unidades, significando que transcurrió un minuto desde el inicio del conteo de tiempo.



**Fig. 6. Diagrama de flujo de la rutina de servicio a la interrupción del TIMER 2.**

Cada minuto de la contabilización de tiempo mencionada, TCNT1 es reiniciado y la variable encargada de almacenar la cantidad de minutos transcurridos se aumenta en una unidad. En otra parte del programa, el valor de la variable mencionada es comparado permanentemente con el tiempo definido por el usuario (en minutos) para efectuar el apagado de la estufa, concretándose esta acción cuando la variable iguala a dicho tiempo.

### 5.1.2. Temporizador/contador 2 (TIMER2)

La Fig. 6 muestra el diagrama de flujo del servicio a la interrupción (RSI) del TIMER2 utilizado para realizar todos los procedimientos relacionados con la estrategia de control ON-OFF que aplica el sistema desarrollado para controlar la temperatura. El TIMER2 es configurado para operar en el modo normal con un valor de precarga en su registro contador TCNT2 que, con el valor de *prescaler* más alto disponible (cada 1024 pulsos de *clock*), permite que las interrupciones por desbordamiento ocurran cada 10 ms. Dado que el periodo de muestreo de la temperatura interna de la estufa es

250 ms, con la configuración indicada, el TIMER2 debe interrumpir 25 veces para tomar una muestra de temperatura.

A modo de reducir los errores por efecto del ruido sobre la medición de temperatura, según puede apreciarse en la Fig. 6, las muestras de temperatura  $T_i$  son procesadas calculando la media móvil simple, el cual es realizado aplicando la ecuación (6) con las últimas 10 muestras almacenadas.

$$T_m = \frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^{10} T_i \quad (6)$$

El resultado  $T_m$  obtenido con la ecuación (6) es usado para implementar la ley de control a través de la función “ON\_OFF()”, cuyo diagrama de flujo está ilustrado en la Fig. 7.

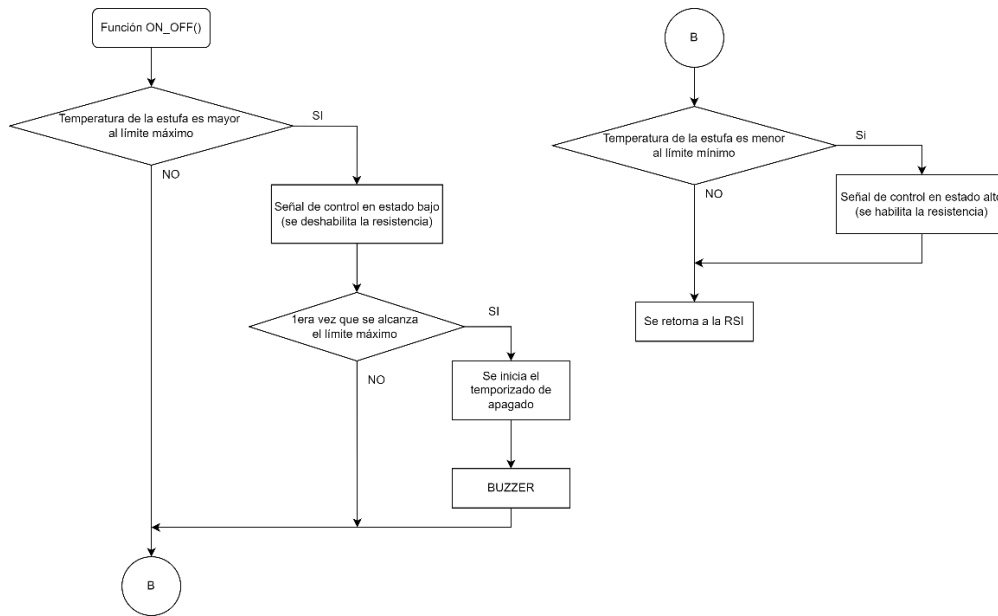


Fig. 7. Diagrama de flujo de la función ON\_OFF().

La función “ON\_OFF()” compara el valor de temperatura  $T_m$  con los límites de temperatura definidos por el *setpoint* y una ventana de histéresis simétrica a este valor. De esta forma, cuando la temperatura  $T_m$  supera el límite máximo de temperatura, la acción de control es definida en estado bajo haciendo que el relé de estado sólido desconecte a la resistencia calefactora de la red eléctrica. En cambio, cuando la temperatura  $T_m$  está por debajo del límite inferior de temperatura, la acción de control es definida en estado alto para volver a conectar la resistencia calefactora a la red eléctrica. Si la temperatura  $T_m$  está dentro del rango de operación, se mantiene la acción de control anterior. La función “ON\_OFF()” también habilita el inicio de la temporización cuando es superada por primera vez el límite superior de temperatura, luego de iniciar el proceso.

Finalizada la función “ON\_OFF()”, la RSI del TIMER2 ejecuta la función “Temporizado()” mostrada en la Fig. 6. La misma compara el tiempo transcurrido con el tiempo definido, ya sea configurado por el usuario o bien el tiempo límite en el modo “LIBRE” (4 horas por defecto). Al cumplirse alguna de las dos condiciones mencionadas, en la RSI del TIMER2 se llama a la función “EJECUCION()” que deshabilita las interrupciones por desbordamiento del TIMER1 y además

reinicia todas las variables de la RSI mencionada. Posteriormente, en la RSI es ejecutada la acción BUZZER, la cual enciende temporalmente el *buzzer* del sistema para indicar la finalización del proceso de operación. En caso de no cumplirse alguna de las condiciones de temporizado mencionadas, desde la función “Temporizado()” se retorna nuevamente a la RSI del TIMER2 para almacenar en el registro contador TCNT2, el valor de precarga y retornar a la rutina principal “loop()”. Esta última ejecuta todas las instrucciones y operaciones relacionadas con el display LCD, el teclado matricial, la configuración del *setpoint*, el temporizado para el tiempo de operación y la histéresis para la acción de control.

## 5.2. Información mostrada en el display LCD del sistema

La disposición de la información mostrada en el display, ha sido diseñada para guiar de manera fácil al usuario en las configuraciones relativas al valor del *setpoint* de temperatura, el temporizado del tiempo de operación y el valor de histéresis de la acción de control.

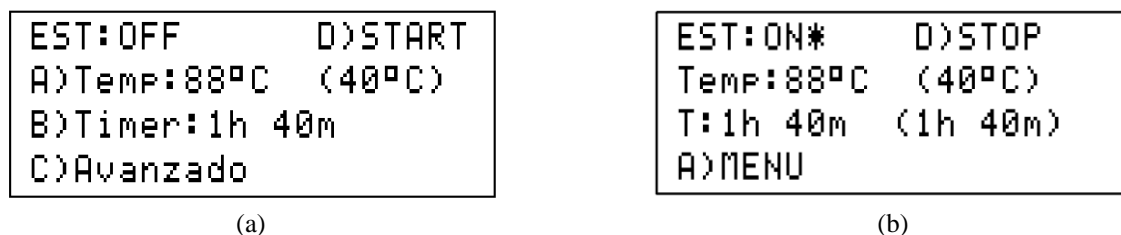


Fig. 8. Pantalla Principal: (a) En *stand-by*; (b) en proceso de operación.

La Fig. 8 muestra la disposición de la información durante el estado de reposo (*stand-by*) y en el proceso de operación. Seguidamente se describe en detalle la información presentada en ambas pantallas.

### 5.2.1. Pantalla principal en *stand-by*

La pantalla de la Fig. 8a es la primera en visualizarse cuando es energizada la estufa. Esta indica que el proceso no está en desarrollo con la etiqueta “EST:OFF”. Las opciones A, B, C y D de la pantalla pueden ser accedidas por el usuario presionando el botón correspondiente en el teclado del sistema, cumpliendo con las siguientes funciones: **A) Temp**, muestra dos temperaturas, la primera indica el valor actual en el interior de la estufa (actualizada cada periodo de muestreo) y la segunda corresponde a la temperatura (*setpoint*) definido por el usuario (por defecto 40 °C); pulsando el botón A del teclado, el usuario puede acceder a modificar el *setpoint*. **B Timer**, muestra el tiempo definido por el usuario para el proceso (por defecto definido en modo “LIBRE”, 4 h), esta temporización es iniciada cuando la temperatura en el interior de la estufa por primera vez alcanza el *setpoint* ; pulsando el botón B, el usuario puede modificar la temporización mencionada. **C) Avanzado**, pulsando el botón C, se puede modificar el valor de la histéresis del control ON-OFF. **D) START**, pulsando el botón D del teclado, puede iniciarse al proceso de operación.

### 5.2.2. Pantalla principal en proceso de operación

La pantalla presentada en la Fig. 8b es mostrada una vez que inicia el proceso y es posible diferenciarla de la anterior por la etiqueta “EST:ON\*”. Seguido a esta, la pantalla muestra la etiqueta “Temp:” junto a dos temperaturas, el primer valor representa la temperatura actual en el interior de la estufa y el segundo valor el *setpoint* definido por el usuario. A continuación, la pantalla muestra la etiqueta “T:” junto a dos valores de tiempo, el primero representa el tiempo restante de la temporización y el segundo representa el tiempo de operación definido por el usuario. La pantalla de la Fig. 8b también indica las opciones A y D, que permiten realizar las siguientes funciones: **A) MENU**, pulsando el botón A del teclado, el usuario puede acceder a una nueva pantalla con las mismas opciones de la Fig. 8a, a través de las cuales puede configurar los parámetros de las estufas durante el proceso. **D) STOP**, pulsando el botón D, es detenido el proceso.

## 6. Resultados

### 6.1. Hardware del sistema de control

La Fig. 9 presenta el esquema del circuito correspondiente al controlador de temperatura construido, indicándose los componentes utilizados y los valores adoptados. La Fig. 10 muestra el diseño del circuito impreso (PCB) desarrollado según el esquema mencionado.

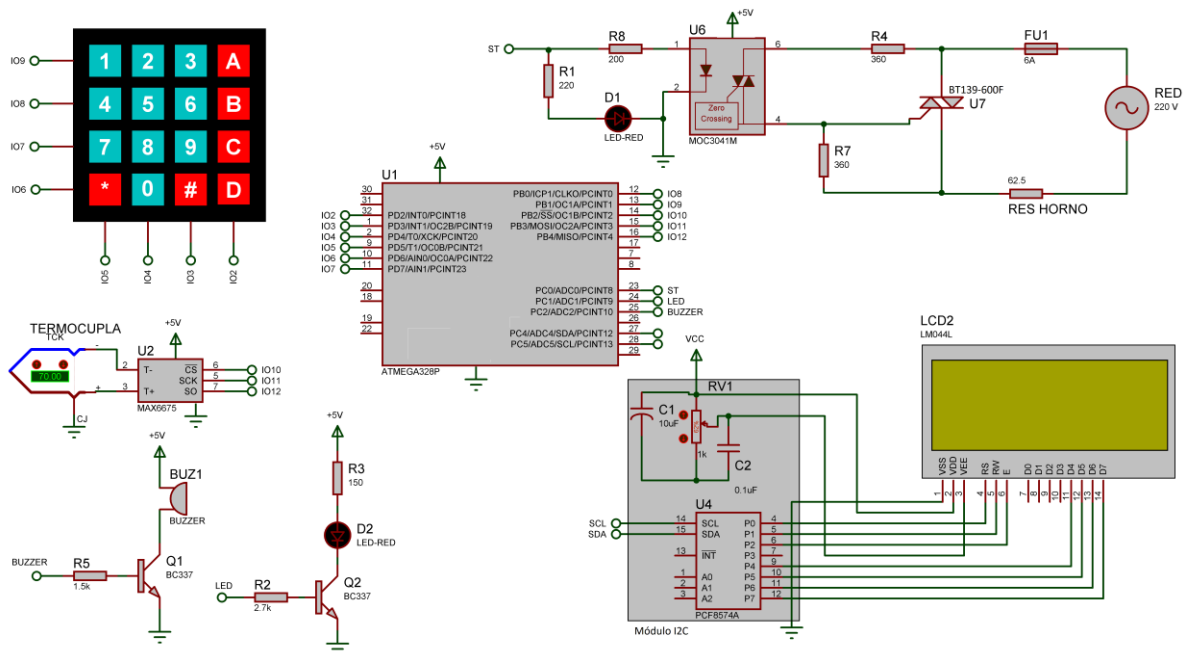
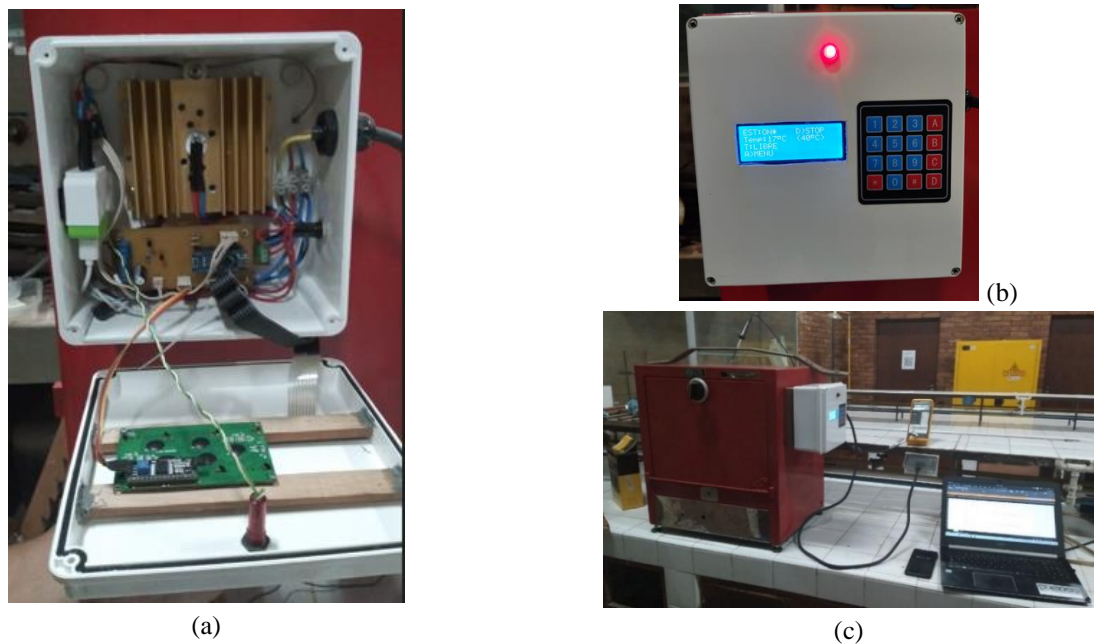
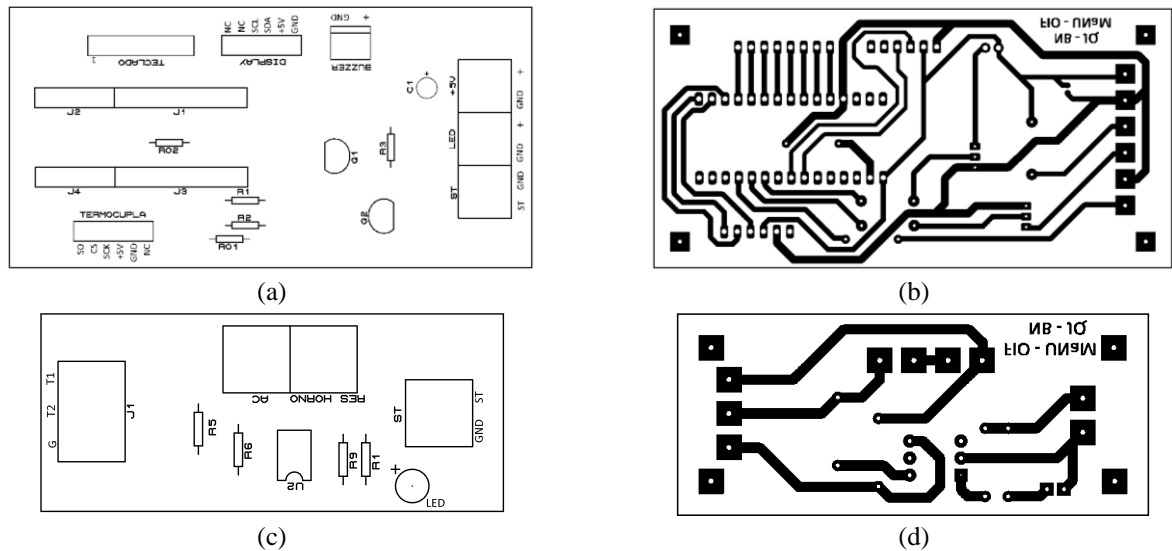


Fig. 9. Esquema del circuito del controlador de temperatura.

El circuito impreso indicado en las Fig. 10a y b contiene la placa Arduino NANO que posee el microcontrolador Atmega328P. En este circuito impreso J1, J2, J3 y J4 corresponden a las tiras de pines hembra usadas como conectores para montar la placa Arduino NANO, la cual debe ubicarse con su ficha Mini-B USB orientada hacia afuera de la placa. Las Fig. 10c y d muestran el diseño del circuito impreso correspondiente al relé de estado sólido de la Fig. 3. La bornera J1 de este circuito

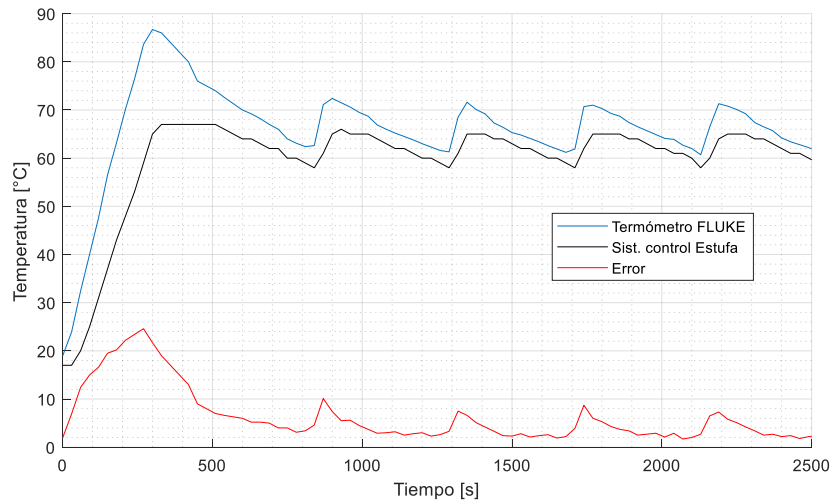
impreso permite conectar el TRIAC con el optoacoplador del circuito. Las dimensiones de los circuitos impresos obtenidos son 50 mm por 110 mm y 30 mm por 70 mm respectivamente.



La Fig. 11 muestra el interior del gabinete donde están montados los circuitos impresos mencionados y demás elementos del controlador de temperatura. Esta figura también muestra una vista frontal del gabinete donde puede apreciarse el display LCD y el teclado matricial. En la figura también puede observarse el gabinete montado en la estufa.

## 6.2. Ensayo de control de temperatura

A modo de comprobar la operación del sistema desarrollado, se realiza un ensayo de control de temperatura con el *setpoint* ajustado a 60 °C y la histéresis a  $\pm 1$  °C. Durante el ensayo se registraron las temperaturas visualizadas en el display del controlador y también la medida con un termómetro digital Fluke 50S con termocupla tipo K, usado como instrumento patrón.



**Fig. 12. Ensayo de control de temperatura de la estufa (*setpoint*: 60 °C, histéresis  $\pm 1$  °C).**

La Fig. 12 muestra los resultados del ensayo mencionado. Con los mismos puede observarse que durante el calentamiento inicial de la estufa, la diferencia alcanzada entre los valores del termómetro digital y los medidos con el sistema desarrollado alcanza una diferencia máxima de 24,6 °C aproximadamente. Luego, en régimen de operación, el error se reduce y permanece con una variación casi constante, siendo mayor el valor medido con el termómetro digital que el obtenido con el controlador construido. Esta diferencia está relacionada con el hecho de que la termocupla del termómetro fue introducida en el acceso superior de la estufa, donde había una corriente de aire por convección de calor, mientras que la termocupla del controlador estaba ubicada fuera de dicha corriente, donde no se podía acceder con la sonda del instrumento patrón. La Fig. 12 también muestra que, en régimen permanente, el promedio de la temperatura medida con el termómetro digital es de 66 °C, mientras que para el controlador es de 62 °C. Siendo 60 °C el *setpoint* configurado para el ensayo, las mediciones anteriores indican que aún debe realizarse un ajuste en sistema desarrollado.

En cuanto a los extremos de temperatura alcanzados en régimen permanente, para la medición realizada con el controlador puede notarse que el valor máximo es de 65 °C y el mínimo de 58 °C, lo cual indica una histéresis aproximada de  $\pm 3,5$  °C siendo esta superior a los  $\pm 1$  °C configurados en el sistema. Esta leve diferencia se debe a la inercia térmica del sistema.

En base a los resultados obtenidos, puede decirse que el sistema opera en forma correcta, pero requiere de ajustes para alcanzar el *setpoint* configurado por el usuario. Quedan pendiente realizar otros ensayos a una temperatura inferior (por ej. 40 °C) y otra superior (por ej. 90 °C) para corroborar si la diferencia persiste y luego realizar los ajustes correspondientes en la medición de temperatura.

## 6. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que se logró cumplir con las especificaciones del trabajo propuesto como actividad. En el mismo se combinaron los saberes adquiridos en asignaturas como Electrónica Analógica, para el cálculo del disipador; Sistemas de Control 1, para la correcta implementación del controlador ON-OFF; Computación, para el desarrollo del programa en lenguaje C++; Técnicas Digitales 1, para la utilización de circuitos integrados; y Técnicas Digitales 2, para el diseño del sistema embebido utilizando microcontroladores.

En comparación al sistema de control original (el cual no estaba operativo por daños), el sistema desarrollado para la estufa presenta ventajas relacionadas a la visualización de las variables, ya que el display utilizado hace posible seguir en tiempo real el valor de temperatura y de la temporización. A esto se agrega la flexibilidad en la configuración de la histéresis para el control ON-OFF, el cual permitiría un proceso con diferentes ciclos de calentamiento-enfriamiento. Por otra parte, al ser desarrollado el controlador con un dispositivo programable, el mismo tiene la posibilidad de mejorar, optimizar o cambiar la lógica del código utilizado según el objetivo que se busque.

Atendiendo a lo mencionado, puede afirmarse que los resultados obtenidos con este trabajo cumplen con los objetivos propuestos. Se integraron distintos saberes que resultaron en un controlador de temperatura con prestaciones superadoras al que tenía el sistema original de la estufa.

Si bien el controlador de temperatura desarrollado será utilizado en la estufa que posee el Laboratorio de Química de la Facultad, el mismo puede servir para el control de temperatura de otros hornos eléctricos similares, pudiéndose agregar al mismo nuevas funcionalidades o mejorar las existentes, respecto a la temperatura y temporización del proceso.

## Referencias

- [1] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, PEARSON EDUCACIÓN, 2010.
- [2] maxim integrated, «Datasheet MAX6675,» 2021. [En línea]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>.
- [3] Arduino, «Librería MAX6675,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/max6675-library/>.
- [4] NXP Semiconductors, «Datasheet Módulo I2C,» 2013. [En línea]. Available: [http://www.nxp.com/docs/en/datasheet/PCF8574\\_PCF8574A.pdf](http://www.nxp.com/docs/en/datasheet/PCF8574_PCF8574A.pdf).
- [5] Arduino, «Librería Keypad,» 2015. [En línea]. Available: <https://playground.arduino.cc/Code/Keypad/>.
- [6] FAIRCHILD, «Datasheet MOC3041,» 2001. [En línea]. Available: <https://www.futurlec.com/LED/MOC3041.shtml>.
- [7] P. [ . Semiconductors], «BT139-600F Datasheet,» 1997.
- [8] Microchip, «Atmega328P,» 2015. [En línea]. Available: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf).
- [9] ON Semiconductor, «Datasheet BC337,» [En línea]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bc337-d.pdf>.
- [10] L. O. y. S. C. Richard Barnett, Embedded C Programming and the Atmel AVR, 2e, DELMAR, 2007.
- [11] K. Ogata, Sistemas de control en tiempo discreto, PRENTICE HALL, 1996.
- [12] Mgter. Ing. Guillermo A. Fernandez, «ET446 - Técnicas Digitales 2- Microcontroladores - ATmega2560: Uso de temporizadores y PWM,» Dpto. Ingeniería Electrónica- Fac. de Ingeniería - UNaM, 2021.