

## SISTEMA CONTROLADOR DE TEMPERATURA

E. Cabrera, R. Espejel y R. Toca

Instituto de Física

Universidad Nacional Autónoma de México

(recibido 20 de abril, 1977)

### RESUMEN

Dada la creciente necesidad de mejorar el control de los tratamientos térmicos a que se someten las muestras cristalinas, se diseñó un sistema controlador de temperatura eficiente para tratamientos de recocido y de difusión de impurezas. Empleando microcircuitos de uso común se mantuvo su costo por debajo de los 60.00 US. Dlls.

Utilizando un termopar de Cr-Al se obtuvo una variación en la temperatura de  $\pm 0.07^{\circ}\text{C}$  en un horno cuya característica básica es la de tener el termopar de control muy próximo al elemento calefactor, minimizando así el retardo de la información de la temperatura del mismo. Se describe en el artículo el circuito empleado y sus características, el horno y la forma de medición que se utilizó.

### ABSTRACT

Because of the growing need of having better control for thermal treatments of crystalline samples, an efficient temperature control was designed, for use in annealing and for impurity diffusion. With the use of common microcircuits, the cost was held bellow 60 USCy.

Using a Cr-Al thermocouple, a temperature variation of  $\pm 0.07^{\circ}\text{C}$  was obtained, in an oven whose basic characteristic is that of having the control thermocouple very close to the heating element. The article discribes the circuit, the oven and the meand of measurement employed.

### I. INTRODUCCION

La creciente investigación de las propiedades de los materiales de estructura cristalina, hacen que cada día los procesos térmicos de las muestras sean realizados con un mayor control. Los tratamientos térmicos más usuales para este tipo de muestras son: el recocido, la difusión de impurezas y el crecimiento mismo de los cristales; los cuales se realizan generalmente en un intervalo de temperatura entre los

100 y 1000°C y requieren de una estabilidad térmica a largo plazo del orden de 1, 0.1 y 0.01% valor pico<sup>(1)</sup>, respectivamente. Dicha estabilidad implica que el mecanismo de control más apropiado deberá ser electrónico, que conjuntamente con el intervalo de temperatura a que deberá funcionar, hacen del termopar el transductor (de temperatura a señal eléctrica) más apropiado.

Paralelamente con el número de los diferentes tratamientos térmicos que se desee emplear, crece el número de sistemas que requieren de un controlador de temperatura. El costo de los sistemas controladores de temperatura comerciales con características apropiadas para los tratamientos térmicos antes mencionados, es del orden de 400.00 US Dlls, lo que limita el número de tales sistemas en un laboratorio (tabla I). Por ésto, es conveniente que el sistema sea de fácil y económica reproducción, así como flexible en su adaptación a diferentes hornos. Conjugando el empleo de microcircuitos de uso común<sup>(2)</sup> con una configuración especial, es posible obtener una estabilidad térmica a largo plazo aceptable en dichos tratamientos térmicos.

| MARCA                        | COLE - PARMER <sup>(3)</sup> |         |         |         | SCIENTIFIC PROD. <sup>(4)</sup> |        | RESEARCH INC. <sup>(5)</sup> | SISTEMA PROPUESTO |
|------------------------------|------------------------------|---------|---------|---------|---------------------------------|--------|------------------------------|-------------------|
| MODELO                       | 2155-40                      | 2156-40 | 2157-40 | 2158-40 | F-8450                          | F-8452 | 624A                         |                   |
| T (max.)                     | 650°C                        | 820°C   | 650°C   | 650°C   | 1200°C                          | 1200°C | 1200°C                       | 1200°C            |
| DIAL CALIBRADO               | *                            |         | *       |         | *                               | *      | *                            | *                 |
| INDICADOR TEMP.              | *                            |         | *       |         |                                 |        | *                            | *                 |
| CONTROL PROPORCIONAL         | *                            | *       |         |         |                                 |        | *                            | *                 |
| CONTROL ANCHO DE BANDA PROP/ | *                            | *       |         |         |                                 |        | *                            | *                 |
| POTENCIA (max)               | 5 A                          | 5 A     | 8 A     | 8 A     | 30 A                            | 60 A   | 25 A                         | 25 A              |
| SENSIBILIDAD                 | .65°C                        | .05°C   | .65°C   | .03°C   |                                 |        | 5 µv                         | 5 µv              |
| COSTO US.DLLS.               | \$275                        | \$140   | \$235   | \$140   | \$570                           | \$750  | \$1000                       | \$60              |

TABLA I. Comparación de las características de sistemas controladores de temperatura comerciales, respecto al sistema propuesto en este trabajo.

Por otro lado, los hornos utilizados son muy variados, de ahí que el sistema controlador deberá incorporar un ajuste que permita acoplarlo a la inercia térmica del horno en cuestión, evitando de esta forma la oscilación del sistema. En lo que a la sección de potencia se refiere, ésta deberá controlar con corrientes máximas de 25 amperios, a voltajes hasta de 220 voltios rms.

## II. CRITERIOS DE DISEÑO

La estabilidad térmica a largo plazo es la característica más afectada por el uso de componentes comerciales, los cuales tienen un gran corrimiento con la temperatura. Es por ésto que fué necesario utilizar una configuración diferencial (tipo instrumentación) en el frente de entrada (bloque I, figura 1). Esta configuración tiene una gran es-

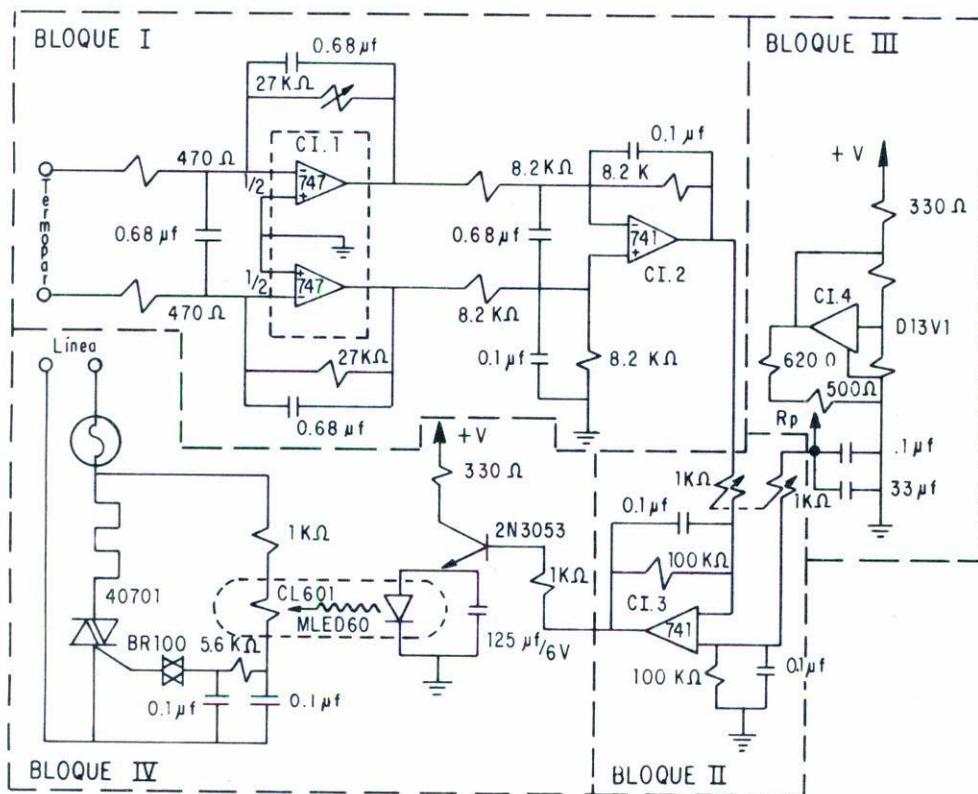


Fig. 1. Diagrama esquemático del circuito controlador de temperatura.

tabilidad térmica y conviene que proporcione toda la ganancia (que en este caso es de 100) a la señal proveniente del termopar de control. El frente de entrada está formado por dos amplificadores operacionales (CI.1a y CI.1b) empaquetados en una sola cápsula. Para rechazar el ruido de alta frecuencia y el de la línea, se limitó el ancho de banda del frente de entrada mediante una fuerte retroalimentación negativa para señales con frecuencia mayor que 10 hertz. La señal diferencial, proveniente de estos dos amplificadores, necesita ser referida a tierra; ésto se logra mediante el amplificador operacional CI.2, en configuración de amplificador diferencial. El potencial en el punto N, a la salida de CI.2, es cien veces el del termopar de control, por lo que se utiliza como punto de medida de la temperatura del calefactor.

El bloque II de la figura 1, llamado comparador, está formado por el amplificador operacional CI.3, el cual también está en configuración de entrada diferencial. En la entrada no-inversora se aplica un voltaje prefijado en un intervalo de 0 a 5v, por medio de un potenciómetro de precisión de diez vueltas (Rp). La señal proveniente del CI.2 se aplica a la entrada inversora de CI.3 y por consiguiente, a su salida se tendrá un voltaje igual a la diferencia entre el voltaje de referencia y el voltaje de salida del CI.2. El voltaje de salida de CI.3 controla, mediante el sistema de acoplamiento fotoemisor-fotorresistencia, el ángulo de conducción del triac o sea, el suministro de energía al horno. La amplificación que proporciona el CI.3 a la diferencia de voltajes puede variarse en función de la inercia térmica del horno bajo control. Para modificar la ganancia en CI.3, es necesario variar dos resistencias del circuito, las cuales deben siempre ser iguales entre sí; la solución utilizada es un selector dual con resistencias de valor seleccionado. Otra solución a lo anterior sería el uso de un potenciómetro dual con gran capacidad de rastreo, lo que elevaría considerablemente el costo. La ganancia mencionada debe ser la máxima posible, sin que el sistema horno-controlador oscile, para maximizar la estabilidad en temperatura y mantener el sistema en la región de control proporcional.

El voltaje prefijado, antes mencionado, determina la temperatura a la cual se deberá estabilizar el horno, por lo tanto, cualquier variación de este voltaje será interpretada como una variación a corregir en

la temperatura del horno. Para minimizar esta fuente de error se usó como referencia de voltaje un zener programable CI.4 (bloque III, fig. 1). Las pequeñas inestabilidades intrínsecas de este zener se traducen en una variación  $\Delta T/T = 0.02\%$ .

La potencia suministrada al calefactor del horno está en función del ángulo de conducción del triac, (bloque IV, fig. 1). La variación de este ángulo se debe a la variación en el valor óhmico de la fotoreistencia (Rf), el cual depende de la luminosidad del fotoemisor (F) acoplado a ella. La señal proveniente de CI.3 regula la luminosidad de dicho fotoemisor y de esta forma se cierra el lazo de control. El acoplador fotoemisor-fotoreistencia, así formado, aísla al circuito de control del ruido generado por las transiciones bruscas del triac y permite mantener "flotando" al control con respecto a la línea.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### III.1 Características del horno

El control de temperatura descrito anteriormente se probó con un horno (fig. 2) que consta de un cilindro de acero de 22 cm. de largo y un diámetro interno de 3.5 cm. El elemento calefactor está constituido, por 2.17 m. de alambre de Kanthal A-1 de  $\emptyset = 1$  mm. enrollado sobre dicho tubo, el cual fue previamente aislado con fibra de vidrio. El conjunto luego se encapsuló con cemento refractario y para evitar mayores pérdidas de calor hacia el exterior, se introdujo en tabiques refractarios. En el interior del horno se colocó un tubo de cuarzo y los extremos se taparon con tabique refractario.

El termopar de control está colocado en la parte media del horno, lo más cercano que fue posible a una espira. Dicha posición obedece a que el retraso en la información de la temperatura del calefactor debe minimizarse. El segundo termopar, el de medición, está colocado donde eventualmente se colocarían las muestras para su tratamiento térmico. Las puntas de referencia de ambos termopares se mantuvieron en un termo a  $0^{\circ}\text{C}$  para evitar variaciones de la lectura con la temperatura ambiente.

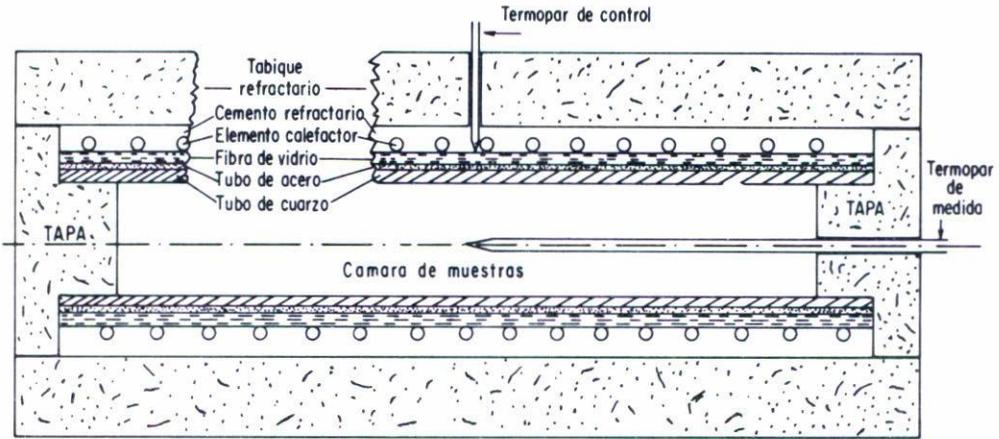


Fig. 2. Sección longitudinal del horno empleado en este trabajo.

### III.2 Medición experimental

Las pruebas de estabilidad se realizaron a diferentes temperaturas (247, 367, 485, 603 y 721°C) que corresponden respectivamente a 10, 15, 20, 25 y 30 mV. en el termopar de Ni-Cr vs. Ni-Al, durante períodos de 6 horas.

Para la medición de la temperatura se utilizó un multímetro digital Keathley mod. 171-1712 como pre-amplificador lineal cuya salida alimenta a otro multímetro digital Hewlett Packard modelo 34702A. La función de éste último es la de proporcionar en forma analógica el valor de 3 dígitos cualesquiera consecutivos de la lectura en el indicador numérico. En este trabajo se utilizaron los 3 últimos dígitos (equivalentes a: décimas, unidades y decenas de microvoltio) para graficar la variación de la temperatura detectada por el termopar de medición. La graficadora utilizada para este fin es la Goerz Multiscript 1 con una velocidad del papel de 10 divisiones por hora.

### III.3 Resultados experimentales

Debido a que en realidad, para controlar la temperatura del horno, se está obligando a que el termopar de control proporcione un voltaje a la salida de CI.4 igual al de referencia, (independientemente de cual sea éste), las variaciones que se obtienen en voltaje son independientes de la temperatura a la cual se desea trabajar. Esto es, que si para la temperatura  $T_1$  el termopar de control tiene el voltaje  $V_1 \pm \Delta V$ , entonces, a la temperatura  $T_2$  el voltaje sera  $V_2 \pm \Delta V$ , donde las  $\Delta V$  son iguales. Por lo tanto, las gráficas para las diferentes temperaturas asociadas son similares, ya que solamente se graficaron las variaciones en el voltaje. Empero, las variaciones de temperatura sí dependerán de los voltajes  $V_1$  y  $V_2$ , debido a las alinealidades inherentes al termopar.

En la figura 3 se muestran las viariaciones  $\Delta V$  del termopar, y debido a que se conoce el valor de  $V$ , es que a esta  $\Delta V$  se le asocia un valor  $\Delta T = \pm 0.077^\circ\text{C}$  (que vienen siendo la inestabilidad obtenida en dicho intervalo). Los resultados expuestos anteriormente son váli-

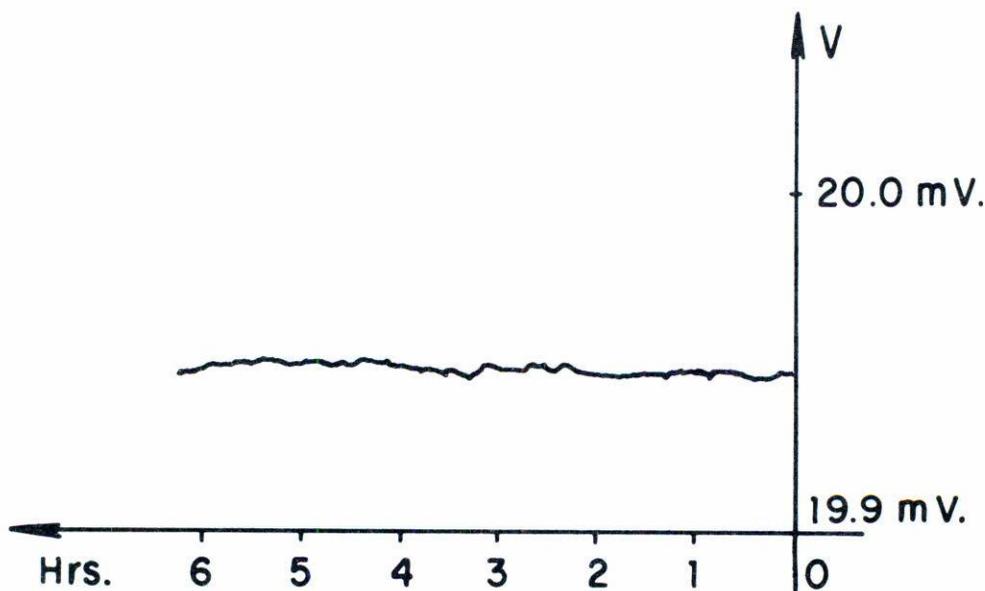


Fig. 3. Gráfica de la variación  $\Delta V$  del termopar (Cr-Al) de medición, en el tiempo.

dos únicamente para temperaturas tales que la potencia requerida para mantenerlas quede comprendida entre 10% y 90% del valor máximo de la potencia que se puede suministrar al horno. En general es conveniente trabajar al 50% de la potencia, para lo cual puede recurrirse al empleo de transformadores.

#### REFERENCIAS

1. Cory, W., comunicación personal
2. Linear Integrated Circuits, Fairchilde, 1976.
3. Catálogo "Cole-Parmer", 1975-976.
4. Catálogo "Scientific Products", 1974.
5. Instruction manual model 624A, Research Inc.