



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

203

DISEÑO DE UN HORNO CONTROLADO PARA
CRECIMIENTO DE CRISTALES
(TECNICA CZOCHRALSKI)

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
FISICO
P R E S E N T A
RENE ORTEGA ALVARADO

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

México, D.F.

1993



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

I N D I C E

	pág
Introducción.....	1
Capítulo 1	
Estructura cristalina de la materia	1
El origen del crecimiento de los cristales.....	2
Técnicas de crecimiento por fundente.....	5
Referencias.....	13
Capítulo 2	
Aspectos generales.....	14
Hornos de resistencia.....	15
Hornos de arco.....	17
Hornos de inducción.....	18
Hornos eléctricos de radiación.....	18
Horno de radiación de pared reflectora esférica.....	22
Referencias.....	33

Capítulo 3	
Sistema de control	34
Sistema de elevación	35
Mecanismo de elevación	48
Sistema de rotación	51
Mecanismo de rotación	53
Referencias	56
Capítulo 4	
Controlador de temperatura para el horno	57
Diseño del controlador de temperatura	60
Circuito electrónico	61
Amplificador	62
Comparador	65
Resultados experimentales del controlador de temperatura	68
Calibración y datos experimentales	71
Referencias	77
Conclusiones	78
Apéndice A	80
Apéndice B	92
Apéndice C	99

INTRODUCCION

El objetivo fundamental del presente trabajo es el de contribuir con el diseño y construcción de un horno de crecimiento de cristales, por medio de la técnica Czochralski, destinado al Laboratorio de Física Moderna de esta Facultad. Así, los alumnos que cursan las materias de Laboratorio I y II se familiarizaran con el crecimiento de cristales de cloruro de sodio y de potasio, ya que estos son fáciles de conseguir y además son económicos. Con esto, los alumnos tienen otras opciones en cuanto a los experimentos que se llevan a cabo en dichas materias.

Los circuitos y mecanismos que se exponen aquí, no son los únicos para darle solución a los problemas que se nos presentaron en la realización de este trabajo. Sin embargo, se buscaron los diseños más simples, y algo más importante, fueron los recursos con los que se contaba para su construcción, considerando además que los componentes electrónicos fueran baratos y fáciles de conseguir. Por otro lado, nuestra intención es también hacer notar al alumno la importancia del conocimiento de la electrónica, mecánica, etc., para el diseño de algún experimento y que se den cuenta de la problemática de los mismos. Es necesario aclarar que la esencia de este trabajo, es la de crear el instrumental para que otro u otros se encargen del proceso de crecimiento de los cristales.

En el capítulo I presentamos algunos aspectos de los cristales y de la importancia que tienen en el mundo tecnológico, así como las técnicas más comunes de crecimiento mencionando las características sobresalientes de cada una y clasificándolas por la forma de crecer los cristales.

El horno que diseñamos, como se verá posteriormente, lo presentamos en el capítulo 2. Este, es de aluminio con forma externa cilíndrica, está seccionado en tres partes y cada una cuenta con una cavidad por donde se le inyecta agua para mantenerlo a una temperatura baja, para evitar algún sobrecalentamiento. Otra razón de seccionarlo es con la intención de facilitar la manipulación de la carga y descarga de los materiales a crecer, también esto facilita su limpieza. Además, tiene una válvula que se puede conectar a una bomba mecánica para procesos a baja presión o al vacío. El horno, se caracteriza por tener una pared reflectora casi esférica para calentar crisoles cilíndricos más uniformemente, esto se apoya en la experiencia de otros hornos experimentales como los que se mencionan en este capítulo.

En cuanto al capítulo 3 se refiere, se presenta el diseño de los circuitos que se encargan de rotar la semilla cristal y el de desplazarla fuera del crisol. Estos sistemas electrónico-mecánicos tienen como elementos generadores del movimiento motores paso a paso de 1.8 grados por paso; como estos son de movimiento discreto, es decir se mueven por medio de impulsos eléctricos, fue necesario colocar amortiguadores sobre los ejes para disminuir al máximo las vibraciones mecánicas que pueden alterar el crecimiento. En el sistema de desplazamiento como en el de rotación, la electrónica que se utiliza para mover el motor es idéntica, aunque esto no sucede en la parte mecánica. De acuerdo con los cálculos de diseño, consideramos que con estos sistemas podemos desplazar la semilla desde 7.5×10^{-2} mm/hr hasta 13.1 mm/hr, y rotarla con una rapidez de 0.2 rev/seg hasta 3.3 rev/seg.

La varilla portadora de la semilla, cuenta con una camisa de enfriamiento que no es otra cosa más que un serpiente enrollado en un tubo de cobre al que se le inyecta agua. Por el momento creemos que esto es suficiente para mantener la varilla con una temperatura menor a la del crisol. Con ello se puede establecer un gradiente de temperatura

distinto de cero entre la semilla cristal y el fundente, de acuerdo a lo establecido por la técnica Czochralski.

Por último en el capítulo 4 mostramos el diseño del controlador de temperatura. Este, como veremos, es del tipo on-off (todo-nada), donde el elemento calefactor es una lámpara de proyector de halógeno-tungsteno de 650 watts a 127 volts ac que está localizada en la sección del horno que tiene la pared reflectora esférica. Por otra parte, se utilizó un termopar de cromel-alumel (tipo k) como sensor de temperatura, para que los cambios que se registren en él sean corregidos por el controlador. Colocamos el sensor junto al crisol, con el objetivo de perder el mínimo de tiempo y obtener una respuesta rápida en la transferencia de información entre el sensor y el controlador; encontramos que el tiempo que tarda desde que se prende la lámpara hasta que llega a la temperatura deseada no es mayor de 7 minutos. Se colocó el dispositivo en el horno y se tomaron 6 lecturas, de 6 horas cada una, con otro termopar y un termómetro digital encontrando una diferencia de 2 grados centígrados, todo esto fue realizado a una presión baja. Al final del capítulo damos la curva de calibración que nos permite ajustar el controlador a la temperatura deseada.

CAPITULO 1

ESTRUCTURA CRISTALINA DE LA MATERIA

El 95% de la corteza terrestre consta de material cristalino; ante tal abundancia el hombre a lo largo de su existencia ha utilizado los cristales para fabricar ornamentos, herramientas, botas, medicinas, etc. Actualmente en las sociedades modernas estos son de gran importancia, por ejemplo los relojes contienen rubes sintéticos y las pantallas de otros son de cristal líquido; las radios, las televisiones, los autos (con polarizadores), sistemas telefónicos y desde luego las computadoras, funcionan gracias al desarrollo y fabricación en gran escala de unos pequeños elementos llamados circuitos integrados que se fabrican con monocristales. Así, podríamos enumerar un gran número de ejemplos donde los cristales están involucrados; pero por el momento enfocaremos nuestro interés a discutir un concepto fundamental en esta tema, surge así la pregunta ¿qué es un cristal?

En la naturaleza todos los materiales están compuestos por moléculas y estas a su vez por átomos; por la forma de su arreglo atómico se pueden distinguir los materiales cristalinos de los no cristalinos. Los cristales se caracterizan por tener un arreglo atómico ordenado, es decir, una unidad representativa se repite a intervalos regulares en todas las direcciones del cristal; esto se conoce como ordenamiento de largo alcance. La periodicidad de un cristal se puede considerar de cuatro principales formas: traslación, rotación, reflexión e inversión. Algunos materiales presentan ordenamientos de corto alcance y se

conocen como materiales amorfos. Ejemplos de ellos son la resina, el vidrio, el plástico, etc. cuyo coeficiente de viscosidad es extremadamente alto. Por esta razón se les da el nombre de líquidos sobreenfriados. Como ya se menciona, las sustancias cristalinas se caracterizan por una periodicidad perfecta (o casi perfecta); esta regularidad, presenta un cuadro conceptual muy simple y facilita la tarea de comprender sus propiedades físicas. Por ello los sólidos cristalinos se comprenden mejor que los sólidos y líquidos amorfos.

La presencia de un número pequeño de irregularidades en un cristal, tales como átomos de impurezas, vacancias en la red o dislocaciones, pueden producir cambios notables en su comportamiento físico. Por consiguiente, cuando un material crece, su forma se debe de mantener sin cambios, como si bloques elementales idénticos se sumaran continuamente en el cristal. Estos bloques elementales son los arreglos de átomos o de grupos de átomos más pequeños de un cristal. Esto nos conduce a explicar el origen del crecimiento de un cristal, aunque hay que aclarar que esta explicación es breve y cualitativa, dado que no es uno de los objetivos esenciales de este trabajo.

EL ORIGEN DEL CRECIMIENTO DE CRISTALES

Si sin duda alguna, una de las observaciones más fascinantes donde la naturaleza de la materia se muestra a sí misma, es el crecimiento de cristales. Al inicio del crecimiento y de todos los procesos de cristalización se le da el nombre de nucleación. Esta consiste en la obtención de núcleos o agrupamientos moleculares en una nueva fase. La forma como se obtienen puede ser de manera espontánea, es decir, se forman por fluctuaciones en el tamaño crítico de un agrupamiento molecular y dan como resultado centros de nucleación. A

este tipo de nucleación se la llama homogénea. El primero en establecerla, aunque no como la conocemos actualmente, fue Gibbs, en 1876. El menciona que para que tenga lugar una transformación de fase macroscópica es necesario obtener agrupamientos moleculares de tamaño crítico, cuya energía interna sea mayor que cualquier otro volumen que contenga la misma cantidad de masa. Por ejemplo, en la figura 11 se muestra la relación entre la presión de vapor de gotas y su tamaño, en ésta, observamos que si se aumenta ligeramente el radio de una gota de tamaño crítico, ésta continuara creciendo hasta obtener el equilibrio y así poder existir. En caso contrario, es decir si se disminuye el radio de la misma gota, ésta desaparece. En otras palabras, la menor fluctuación del radio crítico pone en libertad procesos irreversibles que destruyen el estado o fase iniciales. El análisis anterior muestra que las energías de formación de fase se rigen por las energías de los núcleos críticos.

PRESION DE VAPOR

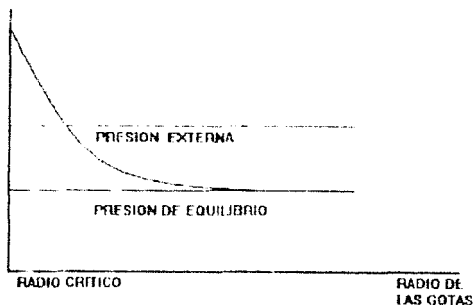


Fig 11 Aquí se muestra una gráfica de la relación entre la presión de vapor de pequeñas gotas en función de su radio.

Otro tipo de nucleación -y la más común- es la heterogénea. En ésta los centros de nucleación son impurezas o partículas catalizadoras que se encuentran en los líquidos o en las paredes del contenedor.

Una vez que se obtiene un núcleo o centro de nucleación, el siguiente proceso es el de aumentar su tamaño. Como antes mencionamos, una sustancia es un cristal cuando su arreglo es de largo alcance, es decir, sus átomos se arreglan de forma periódica y regular. Por lo tanto, el crecimiento de tales cristales debe de involucrar la unión de átomos de manera sistemática y regular, donde cada átomo encuentra su lugar en la estructura. La experiencia indica que el mejor método de crecimiento de un cristal, es por semilla; esta actúa como un sustrato o base al que se le agrega nuevo material. Los átomos viajan a través del medio en donde el cristal está creciendo y se integran a la semilla. Además, la semilla cristal (un sólido) y el medio de crecimiento (generalmente un líquido o vapor) ofrecen para cualquier átomo en particular condiciones ambientales iguales. Por lo tanto, para crecer cristales es necesario de algún modo, forzar a los átomos para que viajen desde el medio de crecimiento hasta la semilla. Este hecho nos sugiere que el medio de crecimiento es manipulable. Ciertos materiales crecen bien con distintos métodos pero muestran propiedades diferentes que dependen de la técnica usada; resultando en algunos casos cristales de formas extrañas o agregados, que se originan en técnicas donde el medio de crecimiento es normalmente bien controladas.

En particular el mejor método de crecimiento, es por medio de una semilla y la técnica que se utiliza más es el crecimiento con fundente. A continuación mostramos las técnicas más comunes para el crecimiento de cristales.

TECNICAS DE CRECIMIENTO POR FUNDENTE

El crecimiento de cristales por fundente es el más usado para crecer monocristales grandes. La tecnología asociada es bastante compleja, al igual que sus teorías. Con este método se crecen monocristales semiconductores de Germanio y de Silicio, con un mínimo de dislocaciones. Estas imperfecciones son generadas por la condensación de impurezas no deseadas en el fundente, durante el proceso de crecimiento.

La rapidez de crecimiento de un cristal desde su propio líquido se determina por la razón de difusión del calor de fusión lejos de la superficie de crecimiento, la cual debe mantenerse abajo del punto de fusión. Además, se requiere que los materiales no se descompongan al fundirse, tener baja presión de vapor y no tener cambios en su estructura cristalina entre la temperatura de fusión y la ambiente. Por medio de las técnicas por fundente se crecen cristales con rapidez, esto es debido, principalmente, a que las distancias de transporte de las moléculas son pequeñas. A pesar de que pueden existir dislocaciones a causa de los esfuerzos térmicos, si estos se mantienen dentro de ciertos niveles se pueden hacer crecer cristales de silicio y germanio, sin dislocaciones.

Existen varias técnicas de crecimiento por fundente y a continuación se van a mencionar las más comunes, dándole mayor énfasis a la técnica CZOCHRALSKI, dado que toda la instrumentación que se presenta en este trabajo está asociada a ella.

Las formas para crecer cristales por fundente son dos; **ZONA DE FUSION** y **ENTFRAMTUNG NORMAL**.

ZONA DE FUNDICION. Consiste en fundir una parte de la muestra que se encuentra en forma de barra larga. El material se funde seccionalmente de extremo a extremo y de esta forma crece el cristal. Las técnicas más comunes por zona de fundición son: zona de fundición horizontal y zona flotante.

A) **ZONA DE FUNDICION HORIZONTAL.** Se caracteriza por utilizar un horno pequeño (por lo regular es una bobina de radio frecuencia) para fundir una zona del material. El horno se mueve a lo largo de la barra lentamente fundiendo parte del material el cual se solidifica después de que pasa por dicha zona. Las ventajas de este proceso son: reducción de contaminantes en el fundente, dado que no existe un depósito o crisol; la potencia de calentamiento es pequeña; se puede utilizar una zona de purificación (refinación zonal) para cristales semiconductores y una zona nivelada para contaminación uniforme.

B) **ZONA FLOTANTE.** Una semilla y la muestra a crecer se colocan verticalmente, manteniendo entre ellas una zona fundida y sosteniéndose solo por la acción de la tensión superficial. La principal ventaja de esta técnica es que no requiere de un crisol pues el fundente está en contacto con el propio sólido. Los mejores materiales para la aplicación de la técnica de zona flotante son los materiales con alta tensión superficial y baja densidad líquida. En la figura 12 se muestra una representación esquemática de dicha técnica.

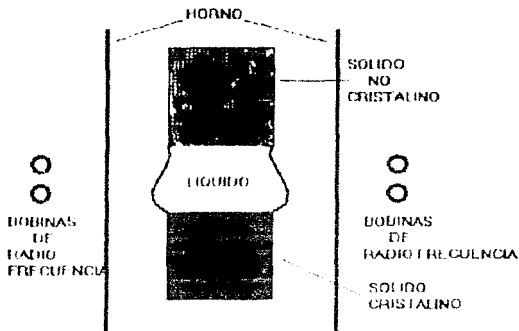


Fig 1 2 Crecimiento de cristales por el método de zona flotante

ENFRIAMIENTO NORMAL. En estas técnicas el material fundido se solidifica en una dirección preestablecida, dada por un núcleo o semilla. Las más comunes son las siguientes: crecimiento por pedestal, Bridgman-Stockbarger vertical, Kyropoulos, Verneuil, enfriamiento normal y Czochralski

A) **CRECIMIENTO POR PIEDRAL.** (sin crisol). Esta técnica evita el problema de la contaminación del cristal con materiales provenientes del crisol. El material fundido, que se forma al calentar el extremo de una barra, se desplaza alejándolo del extremo de la misma y así se da el crecimiento (ver fig.13)

B) **BRIDGMAN STOCKBARGER VERTICAL.** La carga se funde completamente en el crisol que se encuentra dentro de un horno a temperatura T_1 como se

muestra en la fig.1.4. El crisol pasa a otro horno que tiene una temperatura T_2 menor a T_1 . En el momento en que cambia la temperatura, ocurre una cristalización progresiva que se inicia en la parte inferior del crisol.

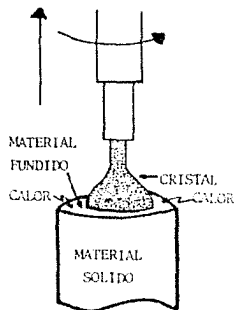


Fig. 1.3 CRECIMIENTO POR FUNDIDO.

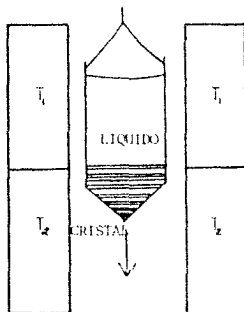
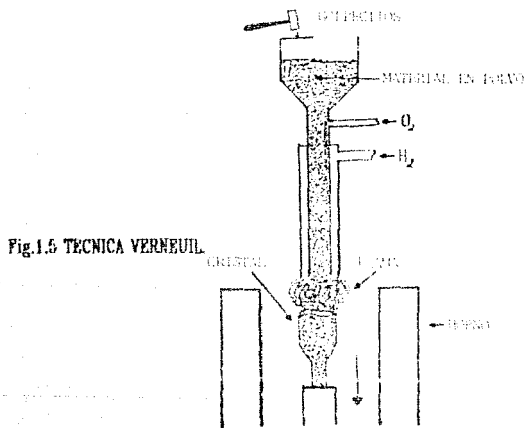


Fig. 1.4 BRIDGMAN-STOCKBARGER VERTICAL.

C) **KYROPOULOS**. Este aparato es semejante al que se usa para cristales desplazados (CZOCHELSKI). El crecimiento se lleva a cabo disminuyendo la temperatura del fundente lentamente, en lugar de desplazar la semilla fuera de la región de fundición.

D) **VERNEUIL**. (flama de fusión) Esta es una técnica que se utiliza para cristales de óxido poco fusibles. Un tubo como el que se muestra en la fig.1.5 suministra material en polvo. La razón de suministro se controla por la frecuencia de golpeo en el tubo en su parte superior. Por tubos

concentricos se suministran oxígeno e hidrógeno y en la parte inferior de los tubos se forma una flama a causa de la combinación de estos elementos. El polvo se funde y cae una lluvia en la parte superior de una semilla formando un charco poco profundo. La semilla se baja a un horno con la misma razón de suministro, dentro del horno la semilla rota para mejorar la homogeneidad del cristal. Esta técnica se ha desarrollado bastante en los últimos años. Métodos alternativos de calentamiento, tales como plasmas de inducción, se usan con semillas de distintas geometrías. La desventaja de este método es el pobre control del ambiente térmico y la limitada fluidez en la selección del gas ambiente; además, el pequeño volumen líquido contribuye a inhomogeneidades en el cristal.



- E) **ENFRIAMIENTO NORMAL.** También conocida como BRIGMAN horizontal o técnica CHALMERS. El material está dentro de un depósito y este, a su vez, dentro de un horno en posición horizontal. En el interior puede haber gas o estar al vacío. El material se funde y el proceso de solidificación se obtiene al sacar lentamente el depósito del horno.
- F) **TÉCNICA CZOCHRALSKI.** Sin duda el procedimiento más importante de crecimiento de cristales grandes con fundente, es el método CZOCHRALSKI. La técnica consiste en colocar una muestra (ver fig. 1.6) de material y calentarlo hasta llegar a una temperatura arriba del punto de fusión. Una semilla del mismo material que el fundido se coloca sobre un portasemillas. La punta de la semilla se funde al colocarla sobre la superficie del fundente, para que forme un pequeño menisco donde pueda ser apoyada, después se eleva lentamente para mantener una pequeña interfase (menisco sólido-líquido) entre el fundente y la semilla. La temperatura de la interfase se controla, ya sea por la rapidez de desplazamiento de la semilla, la existencia de un gradiente de temperatura (es decir, extrayendo calor del cristal ya solidificado) o controlando la temperatura del fundente. Esta técnica, se caracteriza no solo por el movimiento que desplaza la semilla fuera del fundente, sino también por un movimiento rotatorio que puede efectuarse sobre la semilla o al cristal. La finalidad de dicho movimiento es mantener una temperatura uniforme en el fundente y de esta manera el cristal crece simétricamente. Además, todo el sistema se encuentra dentro de una cabina cerrada, la cual contiene una atmósfera inerte o está al vacío para evitar que el fundente se contamine o que exista oxidación dentro del horno. Por ejemplo, es posible crecer cristales de arseniuro de galio (GaAs) por fundente, si la temperatura del sistema se ajusta para producir la

presión de vapor apropiada sobre el material fundido. El método CZOCHRALSKI es el más común para crecer cristales de Germanio y Silicio; el tamaño depende del horno. Los más grandes son de hasta 15 cm de diámetro que se obtienen con velocidades de crecimiento de 3×10^{-4} m/seg.

Las ventajas de este método son:

- a) El cristal en crecimiento solo está en contacto con el fundente en su parte inferior que es precisamente donde se da el crecimiento.
- b) La orientación de un cristal está determinada por la orientación que tiene la semilla. A causa de esto, se pueden obtener cristales con distintas orientaciones.
- c) El fundente se puede contaminar adecuadamente durante el proceso de crecimiento. Por lo tanto, se pueden crecer materiales tipo N o P, dependiendo de la composición química del fundente.
- d) El crecimiento se observa a simple vista.

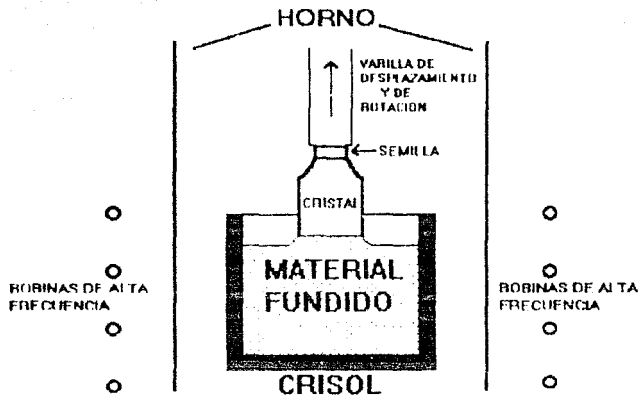


Fig 1.6 En la técnica Czochralski el material solidificado se desplaza y se rota por medio de una varilla portadora de una semilla-cristal. Esta, llega hasta el crisol que se encuentra dentro del horno.

REFERENCIAS

- [1] Gilman, J.J. The Art and Science of growing crystal (1963).
- [2] Hartman, P. ed. Crystal growth: an introduction (1973)
- [3] J. Alvarez and A.R. Cooper, Journal of Crystal Growth, 33 (1976)
- [4] Brophy, James J. and Azaroff, Leonid V., Electronics Processes in Materials, pag. 1-2 y 263-266. Mc Graw-Hill (1963).
- [5] K. Lehovec, J. Soled, R. Koch, A. Mac Donald and C. Stearns, Rev. Sci. Instr., 24, 652 (1953)
- [6] H.G. Ríveros, VIII Simposio Latino-Americano de Física del Estado Sólido, Crecimiento de Cristales (1983).

CAPITULO 2

HORNOS ELECTRICOS

En la actualidad la eficiencia de un horno es fundamental en los procesos de crecimiento de cristales; por esta razón, en este capítulo se presentan, en forma breve, los diferentes tipos de hornos eléctricos y las principales fuentes de calor. También, el objetivo es presentar el diseño de un horno eléctrico de radiación prototipo, para utilizarse en la técnica de crecimiento de cristales llamada Czochralski. Además se mencionan sus características principales, así como sus detalles de construcción.

ASPECTOS GENERALES

Los hornos son de gran utilidad en la vida diaria, en el campo doméstico, tecnológico y desde luego en la investigación. Estos son dispositivos donde la energía eléctrica o energía química de algún combustible se convierte en calor, el cual se usa para desecar, cocer, transformar o fundir materiales, denominados carga, que se colocan en su interior.

Los criterios para agrupar los hornos son variados, ninguno de los cuales es base para un sistema de clasificación coherente y definitivo. Es por ello que estos hornos pueden agruparse según convenga. Por ejemplo, atendiendo al tipo de proceso (fundición, tostación), por el combustible empleado (gas, coque, electricidad), por la forma (de crisol, de tunel) o por el método de carga (continuo, discontinuo, etc.). Las ventajas que ofrece el calor generado por medio de la electricidad comparado al generado por combustible son diversas. Por ejemplo, se le puede controlar más exactamente y con facilidad, no se necesita aire, puede ser instalado donde se necesite y si su fuente de calor es por inducción o resistencia, es mucho más rápido y limpio el calentamiento. Para un calentamiento sin gran precisión, donde existan combustibles de bajo costo y para grandes espacios, resultan más económicos los métodos por combustión.

Normalmente los hornos de laboratorio son eléctricos y de los mismos tipos que se manejan en la industria; difieren de estos solamente por su tamaño y por el grado de control de la temperatura. Con frecuencia se presentan necesidades especiales relacionadas con el control de la atmósfera y la forma de realizar la carga o la descarga. Estas condiciones, sumadas a temperaturas de trabajo elevadas, provocan que el diseño de estos hornos presente verdaderas dificultades. Sin embargo, estas complicaciones conducen a diseñar hornos más eficientes, como los que se presentarán posteriormente, pero antes vamos a exponer los tres tipos más comunes de hornos: eléctricos, considerados hornos de laboratorio.

HORNOS DE RESISTENCIA

En la calefacción por resistencia, una corriente eléctrica al pasar por un conductor genera calor debido a la transformación de energía eléctrica en calorífica por efecto Joule. Los elementos calefactores son de un gran número de materiales, algunos de ellos se

muestran en la tabla 2.1 donde también se menciona su resistividad, punto de fusión, y su resistencia a la oxidación. La mayoría de los alambros metálicos se oxidan a temperaturas elevadas y otros se fragilizan con el uso continuo. La calefacción con resistencia está limitada a temperaturas moderadamente altas, es decir, hasta unas 1200 C, excepto en aplicaciones especiales. Para temperaturas superiores a los 1500 C, el carburo de silicio (carborundo) es el material más conveniente en la fabricación de resistencias, dado que presenta buena rigidez aun a estas temperaturas. La oxidación de este material se retarda porque se forma una película de sílice sobre su superficie, pero si no se mantiene se produce la combustión inmediata del carborundo.

TABLA 2.1

MATERIALES QUE SE PUEDEN USAR COMO CALEFACTORES		
MATERIAL	PUNTO DE FUSIÓN	RESISTENCIA A LA OXIDACION
NICROM	1500	BUENA HASTA LOS 1400 °C
KANTHAL	1800	BUENA HASTA LOS 1800 °C
CARBURO DE SILICIO	2700	BUENA HASTA LOS 1800 °C
SILICIO DE MOLIBDENO	1950	BUENA HASTA LOS 1800 °C
MOLIBDENO	3000	SOLA UTILIZABLE VACIO O ATR. DE H ₂
TUNGSTENO	3400	SOLA UTILIZABLE VACIO O ATR. DE H ₂
TANTALIO	3000	SOLA UTILIZABLE VACIO O ATR. DE H ₂
PLATINO Y SUS ALEACIONES	1775	-----
MEZCLAS DE SALES	DESDE 2000	-----

Otro material que se utiliza como calefactor y que no se encuentra en la tabla 2.1 es el grafito. Este, se utiliza tanto en hornos industriales como en los de investigación en forma

de crisol o contenedor. Por sus propiedades físicas resulta apropiado, por ejemplo, en las técnicas de crecimiento de cristales por fundente, para la obtención de cristales semiconductores, óxidos refractarios y haluros alcalinos.

La mayoría de los hornos de laboratorio se calientan con resistencias, usando las más apropiadas y claro está dependiendo del tipo de trabajo. Los materiales caros (tales como el platino, tungsteno, tantalio y carburo de silicio) se emplean cuando se desean temperaturas de trabajo por arriba de los 1500 grados centígrados. Para temperaturas medianas y bajas se utilizan resistencias de nicrom y de kanthal. Las ventajas de estos calefactores construidos con estos materiales es que en general son de bajo costo, fácil de conseguirse y además porque se pueden encontrar de muy diversas formas geométricas.

HORNOS DE ARCO

Esta es una forma especial de calentamiento, en la cual la resistencia es un plasma (atmósfera ionizada) que se origina en el espacio comprendido entre un par de electrodos. La temperatura que se obtiene por estos métodos es de alrededor de 5000 C. Se usa principalmente en la industria de aceros especiales, en procesos de fusión y también en la preparación de lingotes sin defectos, especialmente de metales refractarios tales como el titanio. Este proceso es semejante a la soldadura eléctrica hecha en cámara de vacío.

HORNOS DE INDUCCION

Estos tienen la característica de utilizar unas bobinas que al hacerles pasar ondas de radio-frecuencia pueden fundir una muestra que este ubicada entre ellas o una seccion de algun material en forma de varilla. Otro metodo es cuando la carga (muestra de material) se situa entre los electrodos en forma de capacitor y estos, al someterlos a voltajes alternos de alta frecuencia, producen friccion molecular en la muestra. De la misma manera que cuando una varilla se dobla y como un resultado de esto, se produce calor.

HORNOS ELECTRICOS DE RADIACION

Sin duda alguna y gracias al continuo avance de la ciencia, se ha encontrado que el calentamiento por radiacion ofrece numerosas caracteristicas atractivas en la preparacion de los procesos de las tecnicas de crecimiento de cristales a altas temperaturas. En los últimos años se han desarrollado hornos de radiacion cuyos elementos calefactores son lámparas de arco de xenón, resistores de grafito y lámparas de proyector de halógeno-tungsteno. La característica común de estos hornos es el uso de superficies reflejantes, con la finalidad de aprovechar al máximo la energía radiante. Dentro de este tipo de hornos existen los de pared reflectora elíptica y los de pared reflectora esférica.

A) HORNO DE PARED REFLECTORA ELIPTICA

En los hornos con espejo elíptico, la fuente de calor se localiza en uno de los focos, mientras que la muestra o material a fundir se encuentra en el otro foco; como sabemos, la propiedad básica de una elipse consiste en que si un rayo

de luz se origina en un foco, este incidirá en el otro foco, es decir, en la muestra a fundir. En la figura 2.1 se muestra un esquema de este espejo

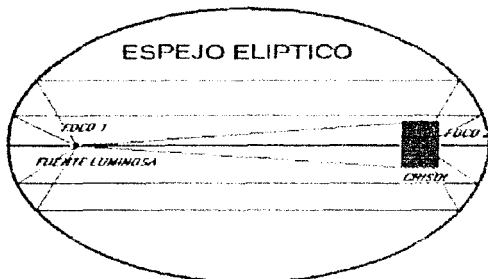


Fig 2.1 En los espejos elípticos la fuente luminosa (calentador) y contenedor (crisol) se encuentran en los focos

Los hornos de este tipo se utilizan sobre todo en técnicas de fusión por zona, por ejemplo en materiales refractarios. Su desventaja es que no calientan uniformemente; sin embargo, esta asimetría la reducen rotando el contenedor de muestras o crisol. Otra manera es utilizando dos o tres elipsoides con un foco común, aunque esta última solución conduce a problemas de construcción muy considerables. H.G Riveros, Cory y Toza hacen patente en su artículo "An Ellipsoidal Mirror Furnace For Czochralski Growth" (ver referencia [2]) las ventajas que tienen este tipo de hornos en el calentamiento de crisoles cilíndricos bajo atmósferas inertes o al vacío. La fuente de calentamiento que usaron es una lámpara de proyector de tungsteno-halógeno de 600 Watts que se alimenta con 120 volts ac. Ellos concluyen que estos hornos son ventajosos para el crecimiento de cristales

pequeños y que su temperatura depende solo de la potencia de la lámpara. Además, establecen que el tiempo de respuesta es corto, la temperatura se puede controlar fácilmente, y son muy limpias.

En un artículo posterior (ver referencia [3] pág. 475), los mismos autores establecen experimentalmente que las pérdidas de energía en crisoles cilíndricos abiertos son considerables, dado que la pérdida de radiación en las orillas del borde son varias veces mayores en comparación con la base del crisol y en algunas ocasiones se varían hasta por un orden de magnitud. Esto - dicen los autores - impone una tarea difícil en el diseño de sistemas ópticos que permitan el calentamiento uniforme de crisoles. Para esto proponen el diseño de un horno con pared reflectora semiesférica como el que a continuación describimos.

B) HORNO DE PARED REFLECTORA SEMIESFÉRICA.

Este horno es el resultado de una serie de experimentos por computadora; la información obtenida se utilizó para el diseño de un horno de fácil construcción y más eficiente. Este está descrito en la figura 2.2. Como vemos, se trata de un espejo semiesférico de aluminio, truncado por arriba para montar el crisol. En la parte inferior se encuentra una placa de cerámica que tiene incrustado el calefactor de Kanthal A-1 de 11 mm de diámetro, el cual calienta la placa. Para reducir pérdidas de energía, fue colocado un espejo con cubierta de oro en la parte inferior del disco cerámico. El diseño fue montado dentro de una cabina, para realizar experimentos al vacío y a presiones de 300 Torr de argón; se crecieron cristales de cloruro de sodio con buenos resultados a una temperatura de 802 grados centígrados.

HORNO DE RADIACION DE PARED REFLECTORA ESFERICA

El diseño del horno que a continuación se presenta, es un prototipo para ser utilizado en el crecimiento de cristales por técnica Czochralski en los laboratorios de docencia. Este es el resultado de la combinación de los hornos mencionados anteriormente. Fue propuesto por el Dr. H.G. Riveros para ser implementado en las materias de lab. I y II en la carrera de Física impartidas en esta Facultad.

El horno tiene un sistema óptico que consiste de una pared pulida de forma esférica, la cual está truncada por la parte superior para que la varilla portaserrillas tenga libre acceso a esta cavidad y llegue hasta donde se encuentra el crisol. Se considera que el horno propuesto es adecuado para calentar crisoles cilíndricos relativamente largos. La función principal de la pared reflectora consiste en mandar la máxima energía radiante y que además esta llegue de manera uniforme al crisol. El horno prototipo es de forma cilíndrica y su fabricación es de aluminio. Consta de tres piezas para facilitar la carga y descarga de los reactivos y su fácil limpieza. Este se muestra en la figura 2.3. Posteriormente mostramos las partes como está dividido así como los detalles principales, iniciando por la parte inferior.

PRIMERA SECCION.

En la figura 2.4 se presentan tres vistas de esta sección del horno para mostrar todos los detalles que externamente no son visibles. Como se puede ver, en la fig. 2.4 a) se muestra una vista lateral donde se dan simplemente las dimensiones exteriores. El diámetro, como se ve, es de 153 mm y tiene una altura de 78 mm, aproximadamente.

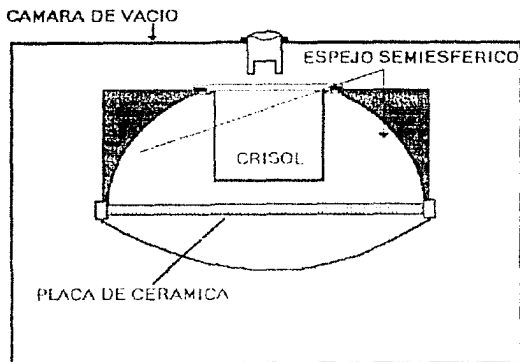


Fig. 2.2 Horno de radiación para crecimiento de cristales que utiliza pared reflejante semiesférica.

Los arreglos experimentales y resultados preliminares de hornos de radiación, como los que se mencionaron, se compararon con experimentos por computadora. Los resultados obtenidos fueron bastante interesantes, dado que llegaron a establecer una selección efectiva para escoger los parámetros apropiados tanto de los crisoles como de las superficies reflejantes.

El horno que diseñamos y construimos no corresponde a ninguno de los dos tipos anteriores. Sin embargo, tiene características sobresalientes originadas por la experiencia adquirida de éstos. Por ejemplo, el uso de una lámpara de proyector de halógeno-tungsteno (de 650 watts a 120 volts) como fuente de calentamiento y una pared reflejante para concentrar la energía radiante uniformemente sobre el crisol. El horno al que nos referimos se presenta a continuación.

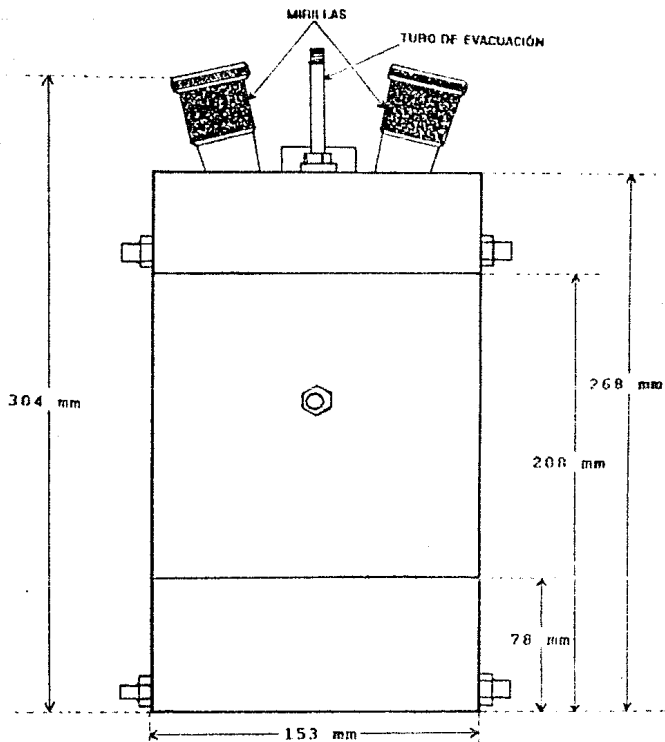


Fig. 2.3 Horno de radiación prototipo con espejo reflejante esférico para técnica de crecimiento Czochralski.

En la figura 2.4 b), se muestra la vista por arriba en donde se notan las tres muescas que se encuentran en el borde y que sirven para que las patas del portacrisol queden fijas, con el fin de mantener siempre la misma distancia entre la lámpara y el crisol. Además, con esto se asegura que el crisol no caiga sobre ella. También se observa como un par de tornillos de latón atraviesan dicha estructura; estos tienen una longitud de 53 mm y un diámetro de 3 y 5 mm, respectivamente. Su función es servir como electrodos y de soporte para la lámpara; a su vez, estos están atornillados dentro de atravesadores de teflón para aislarlos eléctricamente de la estructura metálica, y así evitar contacto eléctrico.

En la figura 2.4 c) se pueden apreciar una parte de la pared reflectora, la cual tiene un diámetro y una profundidad de 132 y 63 mm respectivamente. Cuenta también con una cavidad cuya forma es la de un toroide rectangular (esta forma no se observa en la figura, porque se trata de un corte longitudinal) por donde circula agua, para evitar problemas de sobrecalentamiento. Estas cavidades se hicieron, rebajando 4 centímetros el diámetro respecto del valor original con un ancho de aproximadamente 2 cm, luego con un anillo del diámetro original se cubre este hueco y se suelda; también se hicieron 2 perforaciones para la entrada y salida del refrigerante (en este caso agua). Esto se realizó para cada una de las secciones, dado que todas cuentan con esta cavidad.

Como los procesos de crecimiento que pueden llevarse a cabo, ya sea al vacío o bajo una atmósfera inerte, esta etapa, al igual que las otras, cuenta con arosellos, tanto en los acoplamientos entre las secciones, como en los tornillos de teflón, para impedir entradas o salidas de aire, según sea el caso, manteniendo de esta forma la atmósfera adecuada para el crecimiento.

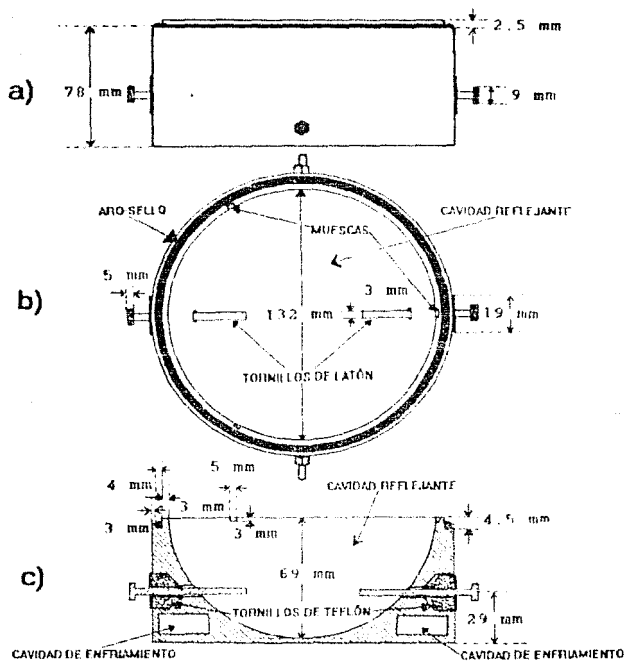


Fig. 2.4 Sección interior del horno a) vista lateral, b) vista por arriba y c) corte longitudinal.

SEGUNDA SECCION

En la figura 2.5 a) y b) se presentan una vista lateral y un corte longitudinal. En b) podemos ver el hemisferio que completa la esfera reflectora, la cual está truncada por arriba con un cilindro que tiene de diámetro 50 mm. La razón es que, de acuerdo con la técnica Czochralski, la semilla debe llegar hasta el material contenido en el crisol. Al igual que la etapa anterior, esta también cuenta con anillo de teflón (aro sello) que se encuentra en un canal que se encuentra en el borde, de esta manera, con el propio peso de la sección superior y considerando que la presión interna siempre va a ser menor que la externa, se sellan las secciones impidiendo entradas de aire. Por otra parte, esta, cuenta con un espacio de aproximadamente 60 mm de altura con el fin de crecer cristales relativamente largos, pero considerando que la distancia entre el portasemillas y el crisol es de más de 60 mm, se pueden obtener muestras de mayor longitud. En la figura 2.6 a) y b) mostramos, simplemente, una vista por abajo y otra por arriba de esta parte del horno.

TERCERA SECCION

La disposición de esta sección se muestra en la figura 2.7. En la figura 2.7a) se observan un par de ventanillas que forman un ángulo de 60 grados respecto a la base de la estructura y son fácilmente desmontables. Estas mirillas tienen dos objetivos: uno, nos permiten colocar la semilla-cristal en forma visual, justamente sobre el fundente y así no tener la necesidad de colocar un sistema de detección que sustituya esta forma de colocación. Hay que recordar que lo que se busca es tener un dispositivo funcional. El otro objetivo de estas mirillas es el de poder ver a simple vista el crecimiento, directamente, en la región más conveniente.

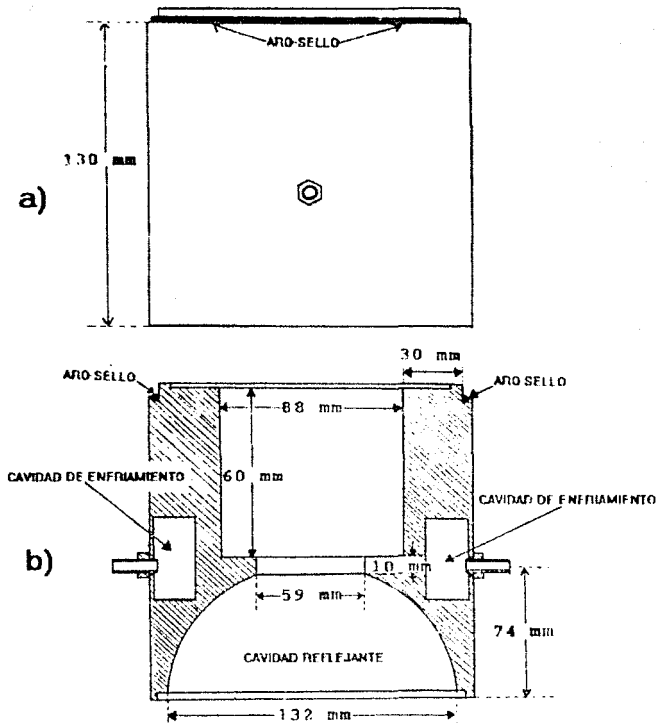


Fig. 2.5 En la parte a) se muestra una vista lateral de la segunda sección del horno y en b) se presenta un corte longitudinal del mismo.

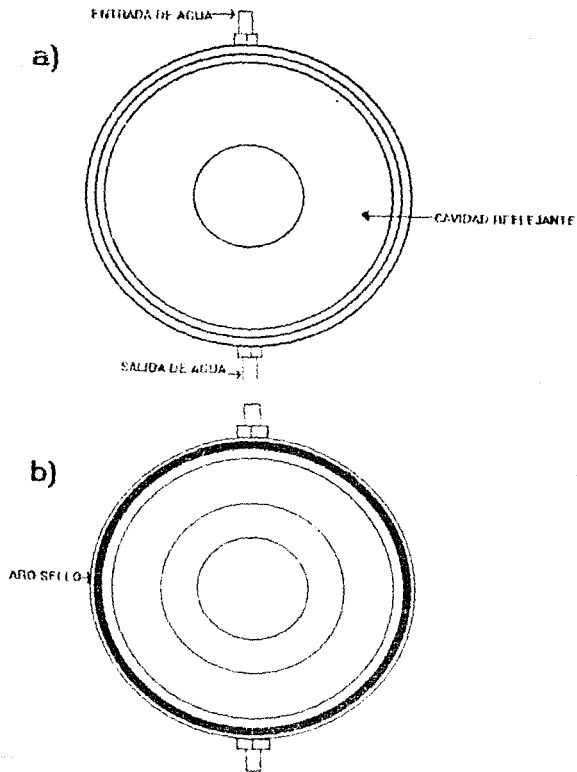


Fig. 2.6 Se presenta una vista por abajo y otra por arriba de la parte intermedia del horno.

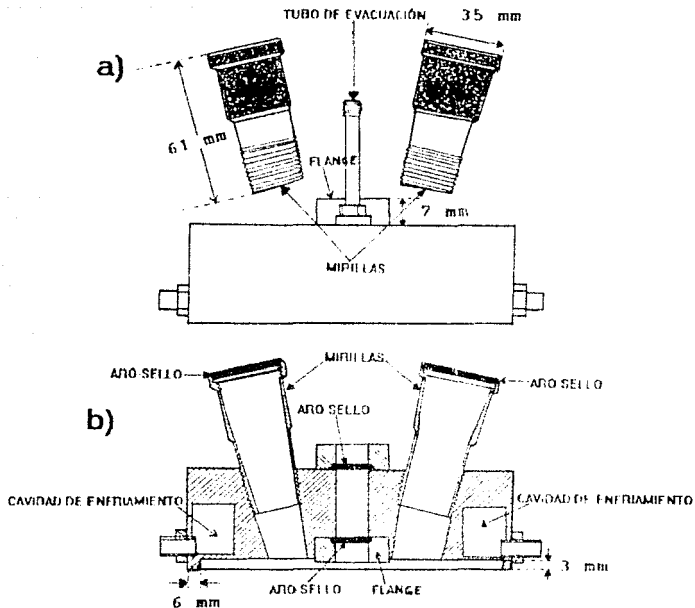


Fig. 2.7 Aquí mostramos una vista lateral y un corte longitudinal de la parte superior del horno. Se dan las dimensiones de las mirillas y se muestran algunos accesorios tales como el tubo de evacuación y las bridas.

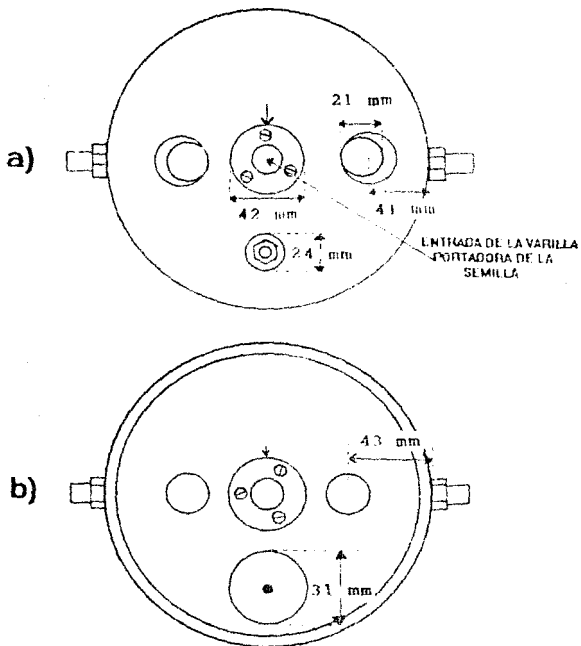


Fig. 2.8 Se muestra una vista por arriba a) y otra por abajo b) de la tercer sección del horno.

En este punto hay que hacer una aclaración: una de las ventanas se utilizó para colocar un termopar y realizar medidas de temperatura en las paredes del crisol, todo a baja presión. Este arreglo no perjudica, pero si en el futuro no existe la forma de maquinar el horno, para montar el termopar en otra parte, seguramente este será el lugar más conveniente para meterlo y, entonces, dejar solo una ventana.

Otros detalles de esta parte del horno se muestran en la figura 2.7b), donde por medio de un corte longitudinal, se ven un par de bridas desmontables. Estas sostienen cada una un aro-sello de teflón que sirven, no solamente para evitar entradas posibles de aire -si el proceso es al vacío- sino también para mantener lo menos holgada posible a la varilla portasemillas. Así, el deslizamiento de esta varilla portasemillas será lo más vertical posible y no tendrá un movimiento precesivo que perjudique el sistema mecánico, del cual hablaremos en el siguiente capítulo.

En la figura 2.7 a) se observa un tubo al que se le dio el nombre de tubo de evacuación. Este está conectado a una llave de paso que está conectada a una bomba mecánica y a un medidor de presión. Finalmente, en la figura 2.8 se muestran una vista por arriba y otra por abajo de esta sección con las dimensiones de sus componentes.

Como es necesario que la semilla se mantenga a una temperatura abajo de la del fundente, se colocó una camisa enfriadora en la parte externa de la sección superior del horno; esta no es propiamente parte de él, sin embargo, es un accesorio importante que debe ser acoplado. En la figura 2.9 se presenta esta camisa de enfriamiento que consiste de un tubo de cobre de 13 mm de diámetro

interno y 95 cm de largo. Este tiene enrollado un serpentín soldado con estaño para que la conducción del calor sea mas eficiente. Este enfriador se acopla a la brida externa con tornillos opresores. Por lo tanto, pensamos que esta es una forma simple y barata de mantener un gradiente de temperatura entre la semilla y el fundente, que es una condición para que se dé el crecimiento.

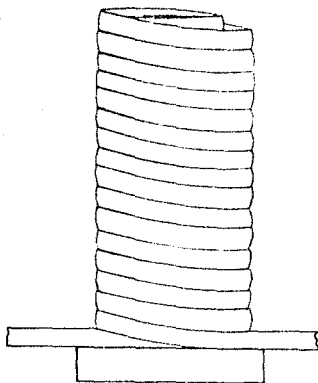


Fig. 2.9 Camisa de enfriamiento para mantener la temperatura de la varilla (de acero inoxidable) portadora de la semilla cristal por abajo de la temperatura del fundente.

REFERENCIAS

- [1] H.G. Riveros, W.K. Cory, R. Toca and E. Cabrera, Rev. Sci.Instr. 51 (4), (1980), pp 520-532.
- [2] H.G. Riveros, W.K. Cory, R. Toca and E. Camarillo, Journal of Crystal Growth, 49 (1980) pp 85-89
- [3] H.G. Riveros, E. Cabrera, A. Gamblea and F. Rosenberger, J. Crystal Growth 53 (1981) pp 475-482
- [4] Holman J.P., Heat Transfer, McGraw-Hill, 2da. ed., 1968, pp 35-38, 293-295, 334-335.
- [5] Hartman, P., Editor, Crystal Growth: an introduction, 1973 pag. 216-219.

CAPITULO 3

SISTEMA DE CONTROL

Exponemos a continuación las partes que constituyen lo que hemos denominado sistema de control. Este está formado por la conjunción de elementos electrónicos y electromecánicos que satisfacen de manera conveniente los requerimientos mecánicos de la técnica Czochralski. Esto es: nos proponemos analizar en este capítulo los dispositivos que producen tanto el movimiento de elevación del cristal como el de rotación del mismo.

El sistema de elevación cumple una finalidad doble. Por un lado, perficiona o establece una referencia de ubicación de la semilla respecto del fundente y por otro, produce el desplazamiento longitudinal o de elevación. El sistema de rotación se encarga de hacer girar la semilla con el fin de mantener una temperatura constante en la interfase del fundente y el cristal. Estos sistemas son independientes desde el punto de vista de control, pero, los efectos de la combinación de ambos determinan o condicionan el tipo de crecimiento y el diámetro del cristal. A continuación presentamos los dos sistemas y para facilitar su exposición, primero desarrollamos el que se encarga del movimiento de elevación y posteriormente el de rotación.

SISTEMA DE ELEVACION

El dispositivo consiste de un circuito electronico que opera un motor del tipo paso a paso, el cual está acoplado a un mecanismo que es el que se encarga de elevar finalmente la semilla. En la figura 3.1 se muestra un diagrama a bloques de este sistema. Según se puede ver, este lo podemos considerar como un dispositivo de lazo abierto donde las variables de entrada son generadas por medio de dos interruptores mecánicos que se encargan del posicionamiento y un circuito electrónico independiente llamado reloj, el cual controla la velocidad de elevación. Ahora vamos a entrar en detalle en cada uno de los bloques mostrados en la figura 3.1.

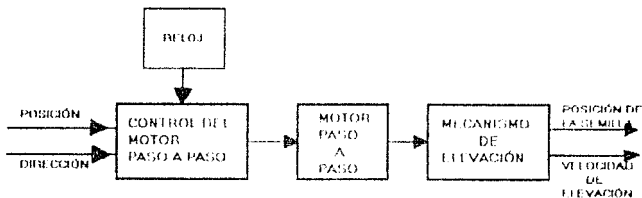


Fig. 3.1 Diagrama a bloques del sistema de elevación.

CONTROL DEL MOTOR PASO A PASO

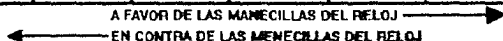
Este circuito se diseña de acuerdo a las necesidades eléctricas que presenta el motor a pasos utilizado para este trabajo. Como se sabe, un motor de estas características requiere, para poder moverse, de pulsos eléctricos que se le envían de manera secuencial. Las condiciones eléctricas de éste se presentan en la Tabla 3.1, donde las fases son las entradas

del motor y los estados E_i son las condiciones eléctricas que se deben cumplir para que el rotor gire adecuadamente. Por ejemplo, para el estado inicial E_1 se requiere que las fases 1 y 2 estén a 7 volts y las 3 y 4 a cero volts. Ahora, para que pase al estado E_2 (después de un tiempo, el cual podemos fijar a nuestro criterio) es necesario que las condiciones eléctricas cambien según la tabla. El efecto de este cambio de estado tiene como respuesta que el rotor dé un giro. Este desplazamiento angular es constante para cada cambio de estado y depende de las características del motor. El que estamos usando tiene un giro de 1.8 grados por paso, lo que quiere decir que el rotor gira 1.8 grados por cada cambio de estado. Además, la dirección de giro depende si el cambio de estado se realiza en forma creciente o decreciente según el subíndice de E .

TABLA 3.1

Tabla de Estados del Circuito de Control del motor

	E_1	E_2	E_3	E_4	E_1
FASE 1	7 V.	0	0	7 V.	7 V.
FASE 2	7 V.	7 V.	0	0	7 V.
FASE 3	0	7 V.	7 V.	0	0
FASE 4	0	0	7 V.	7 V.	0



El circuito secuencial que diseñamos y construimos, es un registro de *corrimiento* bidireccional de cuatro bits con carga en paralelo y salida en paralelo. Las características y fundamentos del circuito son:

- A) Es bidireccional porque es necesario que el rotor gire en ambos sentidos.
- B) Tiene cuatro bits para que concuerde con el número de fases del motor.
- C) Su carga es en paralelo para que arranque de un estado inicial predeterminado y que éste no cambie.
- D) La salida es en paralelo porque se utilizan los cuatro bits al mismo tiempo.

En la figura 3.2 se muestra el diagrama del registro de *corrimiento* y el desarrollo de los cálculos que se hicieron para su obtención, se encuentran en el apéndice A. Como se puede apreciar, el registro de *corrimiento* consta de cuatro flip-flops tipo D. La información secuencial generada en sus salidas Q_i depende de la combinación de los valores de los elementos de decisión o compuertas lógicas. Por otro lado, la posición del interruptor I_1 , controla la variable X ; ésta adopta el valor 1 o 0 y dependiendo de este valor será el sentido de *corrimiento* del registro. La consecuencia mecánica de este hecho es el control del sentido de rotación del motor. El interruptor I_2 tiene la función de parar el *corrimiento*, colocar el registro en su estado inicial y después dejarlo correr libremente. De esta manera

resolvemos el problema por si el circuito llega a caer en algún estado lógico prohibido originado por señales parásitas.

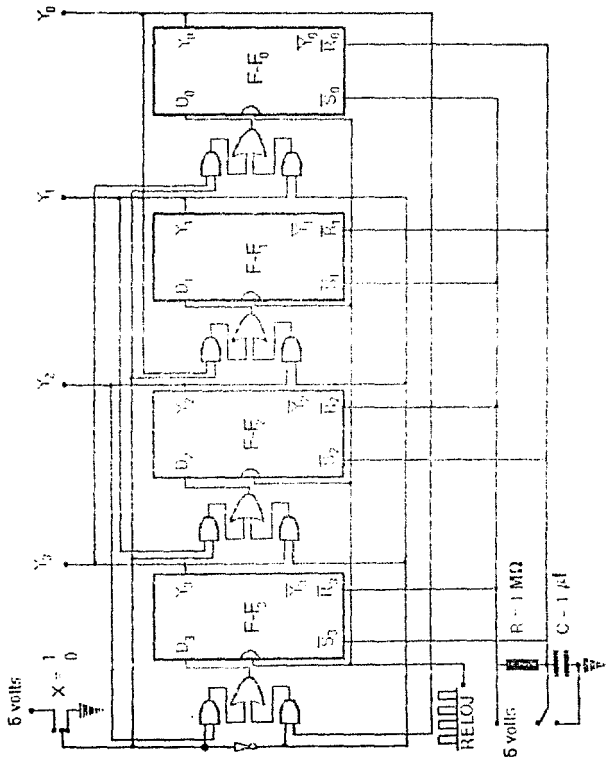


Figura 3.7 Diagrama del registro de corrimiento diseñado.

Otro elemento importante es el reloj, cuya función es la de marcar el ritmo de cambio de estado del registro y como consecuencia, desde el punto de vista mecánico, es el responsable directo de la velocidad de elevación de la semilla.

RELOJ

El término de "reloj" se aplica a un circuito que genera, a intervalos regulares, una señal que sirve como patrón de tiempo dentro de un sistema. En general, se persigue que la frecuencia de la señal generada sea lo más estable posible.

Existen varias formas para construir el reloj. Si se desea tener la máxima precisión, se hará a partir de un cristal oscilador. En nuestro caso, teniendo en cuenta la simplicidad y bajo costo, se llevó a cabo con un circuito integrado que permite tener una frecuencia dada, con el 0.01 % de desviación (error) a temperatura ambiente. La exactitud que se obtiene con él es suficiente para nuestros fines.

El reloj está construido con el circuito integrado LM555 en su modo de operación astable. Con éste, podemos ajustar la frecuencia deseada por medio de dos resistores y un condensador externos; en la figura 3.3 se muestra el diagrama de este circuito. Como se observa, el oscilador consta de un selector para tres rangos de frecuencia posibles; además, el ajuste de la frecuencia para cada uno de los rangos se realiza variando el resistor R_0 . Este resistor tiene en sus extremos un interruptor normalmente abierto (I_1), para que al cerrarse, la frecuencia de oscilación cambie al valor máximo de acuerdo con el rango que se esté trabajando. La finalidad de esto es subir y bajar rápidamente la barra portesemilla y

colocarla en la posición deseada sin importar que se este trabajando con velocidades de elevación pequeñas. Al iniciar el experimento, con este interruptor podemos darle celeridad al posicionamiento de la misma. Las ventajas que se obtienen son: ahorrar tiempo y conservar el valor de frecuencia seleccionada, cuando se requiera de trabajar con la misma condición de rapidez.

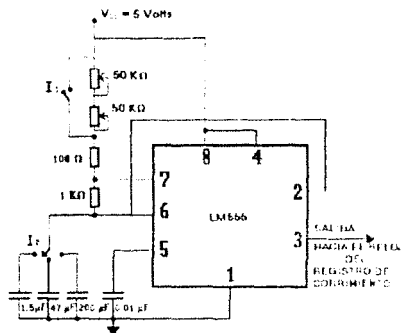


Figura 3.3 El reloj en el modo de operación estable, nos permite controlar el ritmo de cambio del registro de corrimiento. Por lo tanto, con él podemos controlar la velocidad del motor a pasos.

Para determinar los periodos superior e inferior de cada rango, primero se hizo un cálculo teórico con las ecuaciones existentes en la referencia [3], pero dado que los capacitores son de una tolerancia grande, se procedió a medirlos, para así tener un valor más confiable de estas cosas. Los periodos que están por abajo de 10 segundos se midieron con un osciloscopio

HP modelo 1741A, mientras que los periodos por arriba de este valor se midieron con un frecuencímetro Philips Mod. FM 5132.

En la tabla 3.2 se muestran los límites inferior y superior para cada rango. Estos valores son importantes, ya que con ellos se obtienen la mínima y máxima rapidez de elevación de la semilla (ver Apéndice B).

RANGO	PERIODO-FRECUENCIA		PERIODO-FRECUENCIA	
	$T_{\text{mín.}}[\text{seg}]$	$F_{\text{máx.}}[\text{Hz}]$	$T_{\text{máx.}}[\text{seg}]$	$F_{\text{mín.}}[\text{Hz}]$
1 ^o	0.0024	416.0	0.110	9.1
2 ^{do}	0.0960	10.4	4.4	0.2
3 ^o	0.380	2.6	19.0	0.05

Tabla 3.2 Intervalos de frecuencias y períodos para cada uno de los tres rangos del reloj.

ETAPA DE POTENCIA

El registro de corrimiento y el reloj proporcionan la información secuencial con un ritmo de conmutación determinado, sin embargo, esta información no tiene la suficiente energía para mover el motor. En consecuencia, es necesaria una etapa de potencia que suministre la energía para que el motor interactúe con el mecanismo, con la fuerza suficiente para hacerla funcionar.

Diseño de la etapa de potencia.

Condiciones de diseño:

Corriente de fase : 1.3 A

Niveles de voltaje de fase : 0 v y 6.9 v

Corriente de salida TTL : 10 mA a 4.8 v

Se requieren cuatro circuitos iguales, uno para cada fase del motor de pasos.

Tomemos el transistor TIP 110 y hagamos los cálculos necesarios.

El transistor de potencia TIP 110 tiene una ganancia mínima de corriente de 500. Por la bobina de cada fase circula una corriente de 1.3 amperes. Si por el colector del TIP 110 circula 1.3 A, por la base del mismo circulara una corriente 500 veces menor, es decir, 2.6 mA. Para asegurar la saturación ante posibles variaciones de las características del transistor o del motor, daremos un factor de seguridad de dos a la corriente de base calculada. Así pues, sea $I_b = 5.2$ mA.

La salida de un elemento TTL, como el que se usa en el registro de corrimiento, es de 10 mA a 4.8 v, que aunque es suficiente para disparar el transistor de potencia, no lo es para encender el LED indicador. Por considerar importante tener los LEDs como indicación visual

del funcionamiento del registro de corriente, se optó por agregar un transistor que satisficiera estos dos requerimientos: encender el LED y al mismo tiempo disparar el transistor de potencia

Características del transistor TIP 110:

$$V_{ce\ sat} = 2.5\text{ v (máx)}$$

$$V_{be\ sat} = 2.8\text{ v (máx)}$$

$$h_{fe\ min} = 500$$

$$I_c\ max = 10\text{ A}$$

El voltaje de la fuente de alimentación debe ser de:

$$V_{cc} = V_{ce\ sat} + V_{motor} \quad (3.1)$$

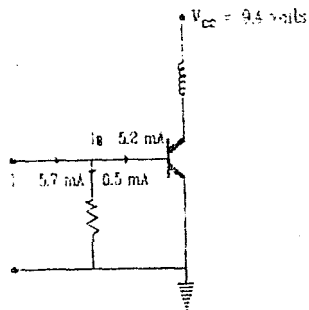
tenemos que:

$$V_{motor} = 6.9\text{ v}$$

por lo tanto: $V_{cc} = 9.4\text{ v}$

El circuito para este transistor es como sigue:

Fig. 3.4 Arreglo para el transistor de potencia TIP 110.



Para satisfacer esta condición y el encendido del LED, colocamos antes, otro transistor NPN de baja potencia; usamos el BC248A ($\beta = 50$, $V_{ce\ sat} = 0.1\text{ v}$ y $V_{be\ sat} = 0.7\text{ v}$).

Dado que por la configuración del circuito, la impedancia que ve la base de T_1 es alta en estado de no conducción, es conveniente anclar a tierra dicha base. La resistencia de base de T_1 (en conducción) es de:

$$R_{be} = V_{be\ sat} / I_b\ sat \quad (3.2)$$

$$\text{Esto es, } R_{be} = 2.8\text{ v} / 5.2\text{ mA} = 538\ \Omega$$

Así es que si colocamos una resistencia de base a tierra, se asegura la base para evitar disparos espurios del transistor. Cuando se encuentre en conducción, la corriente que viene de T_2 se bifurcará; una parte hacia la base de T_1 y otra hacia la citada resistencia (R_b).

Sea, $R_b = 10 R_{be}$, es decir, $R_b = 5700\ \Omega$ (valor comercial).

De esta manera, 5.2 mA circularán por la base T_1 y

$$I_R = 2.8\text{ v} / 5700 = 0.5\text{ mA} \quad (3.3)$$

circularán por R_b .

El circuito para T_2 es el de la figura 3.5.

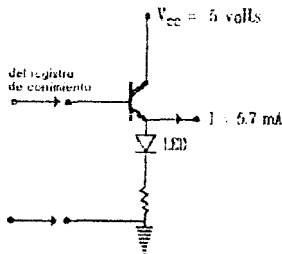


Fig. 3.5 Circuito para el transistor T_2 .

Este es un circuito de colector común. En él vemos que la corriente del LED es de 20 mA y la corriente hacia T₁ es de

$$5.2 \text{ mA} + 0.5 \text{ mA} = 5.7 \text{ mA}$$

La corriente de emisor de T₂ es:

$$I_e = I_{led} + I \quad (3.4)$$

$$I_e = 25.7 \text{ mA}$$

El voltaje de emisor es :

$$V_e = V_b - V_{be} \quad (3.5)$$

$$V_e = 4.8 - 0.7 = 4.1 \text{ v}$$

El voltaje de conducción del LED es de 2v, luego entonces:

$$R_e = (V_{cc} - V_{ce \text{ sat}} - V_{led}) / I_{led} \quad (3.6)$$

$$\text{esto es, } R_e = (5 - 0.1 - 2) \text{ v} / 20 \text{ mA} = 145 \Omega \quad 150 \Omega$$

La resistencia de polarización de T₂ a T₁ es de:

$$R_{b1} = (V_{e2} - V_{be1}) / I \quad (3.7)$$

luego,

$$R_{b1} = (4.3 - 2.8) \text{ v} / 5.7 \text{ mA} = 263 \Omega \quad 270 \Omega$$

Finalmente, calculemos cuál será la corriente que circulará de la salida TTL al transistor T₂:

$$I_{b2} = I_{e2} / (\beta + 1) \quad (3.8)$$

Si $\beta = 50$ e $I_{e2} = 25.7 \text{ mA}$

$$I_{b2} = 0.51 \text{ mA}$$

La salida TTL típica, como se ha mencionado, suministra una corriente de 10 mA (máximo) al voltaje nominal, por lo que satisface ampliamente la requerida por T₂.

El circuito de potencia se puede ver en la siguiente figura (fig. 3.6). Hemos agregado un diodo en paralelo con la bobina de la fase del motor, para evitar que las interrupciones generen sobre el transistor T₁ una FEM que pudiera dañarlo.

El circuito de potencia completo queda como se ve en la figura 3.6. En la figura 3.7 se muestra un diagrama a bloques de cómo quedan acoplados el registro de corrimiento, el reloj, etapa de potencia y motor a pasos.

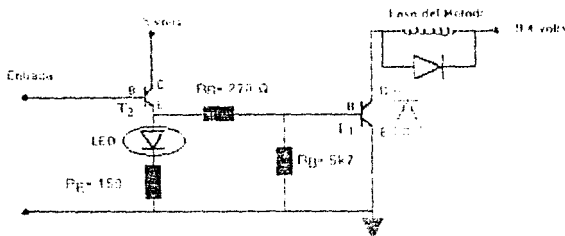


Fig. 3.6 Etapa de potencia para cada una de las fases del motor.

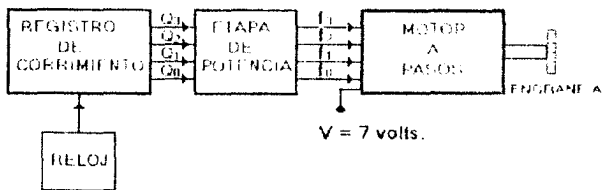


Figura 3.7 Diagrama a bloques de la forma como están acoplados el motor a pasos y su sistema de control.

MOTOR PASO A PASO

El motor que se utiliza para ejecutar el movimiento de elevación, está clasificado como del tipo híbrido de imán permanente. Este motor se caracteriza por tener un embobinado bifilar, el cual permite una alta rapidez de respuesta. Su funcionamiento se realiza por el envío de niveles eléctricos de manera secuencial, razón por la cual se le considera como un elemento digital. Puede la habilidad de rotar tanto en un sentido como en el otro, así como parar y seguir su marcha. El eje (rotor) se mueve en incrementos de ángulos precisos por cada pulso eléctrico lo que también permite controlar la velocidad, posición, distancia y dirección de una carga. El error es una de las características atractivas de este tipo de motores, dado que es menor del 5 %, no se acumula de un paso al siguiente y no depende del número de veces que pasa por la misma posición.

A continuación damos las características eléctricas particulares del motor usado para el mecanismo de elevación:

- A) Cuatro fases y un común (5 hilos).
- B) 200 pasos por revolución (paso completo).
- C) Angulo de paso: 1.8 grados.
- D) Error de paso: menos del 3 %.
- E) Resistencia por fase: 4.9 Ω .
- F) Corriente por fase: 1.3 Amp.
- G) Voltaje nominal d.c.: 6.9 Volts.

MECANISMO DE ELEVACION

En la técnica Czochralski la velocidad de retiro de la semilla es fundamental para el crecimiento; la rapidez debe ser constante y se pueden ajustar, en algunos hornos, desde 0 hasta 4×10^{-3} cm/seg. Sin duda alguna, existen mecanismos complejos que proporcionan velocidades relativamente pequeñas, pero son muy costosas. Sin embargo, aquí se presenta el

diseño de un mecanismo simple capaz de proveer desplazamientos muy pequeños, que junto con la combinación de un motor a pasos como elemento motriz, se convierte en un dispositivo con alto grado de precisión, el cual no solo puede servir para este trabajo, sino también puede ser usado en aquellos experimentos donde se requiera de posicionar una carga o bien desplazarla con velocidades muy pequeñas y con un alto grado de precisión.

Este mecanismo está integrado por las siguientes partes:

- A) Tren de engranes formado por tres engranes de 135 dientes cada uno.
- B) Dos platinas y cuatro postes para sostenerlas.
- C) Un par de barras gutas con cuerda de 1 mm por vuelta.
- D) Una plataforma de elevación.

En la figura 3.8 se presenta la disposición de dicho arreglo. Aquí se puede ver que las barras gutas son las flechas de los engranes A y C, mientras que el engrane B es un elemento de transmisión que permite que los engranes giren en el mismo sentido y a la misma velocidad angular. Otro engrane, mucho más pequeño, que está en el eje del motor a pasos, es el elemento motriz que mueve el mecanismo. Por su tamaño, en relación al engrane A, contribuye a reducir la velocidad de elevación.

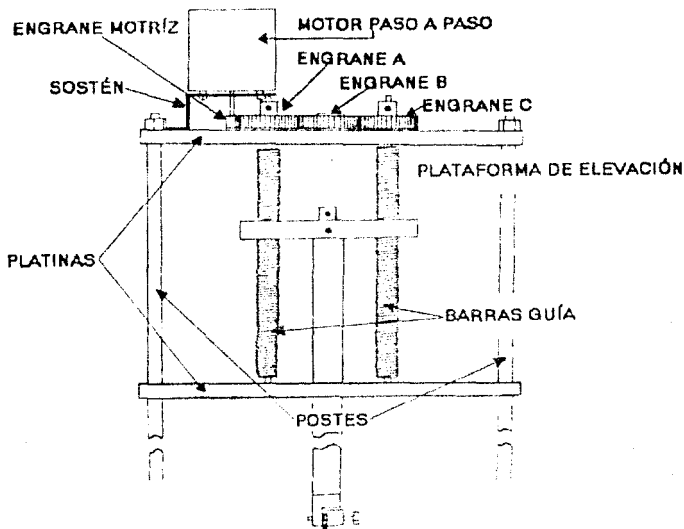


Fig. 3.B Sistema mecánico que se encarga de desplazar la semilla fuera del fundente.

La plataforma tiene un par de orificios con cuerda, para que las barras guía se acoplen a ésta. Por lo tanto, si la cuerda es de un milímetro por hilo, entonces, para una vuelta completa de los engranes A y C, la plataforma se desplaza 1 mm hacia arriba o hacia abajo y la velocidad para efectuar este desplazamiento está directamente relacionada con los radios de los engranes y adicionalmente con el periodo de pulsación del reloj.

Las velocidades mínima y máxima (sin carga) que se pueden lograr con este dispositivo son de 75×10^{-2} mm/hr y 13.1 mm/hr respectivamente (en el apéndice B se calcularon estas velocidades). La razón de que estos valores no tengan asociada su incertidumbre, es porque se careció de información sobre la precisión de los engranes y las barras guía. Finalmente, el eje primario, que contiene la semilla en su extremo inferior, está acoplado a la plataforma de elevación de tal manera que sube o baja con la misma rapidez que la plataforma.

SISTEMA DE ROTACION

Los hornos tipo Czochralski, rotan el crisol con el fin de evitar diferencias de temperatura en el fundente y tener control sobre el diámetro del cristal. A diferencia de estos hornos, el que proponemos evita la rotación del crisol y esta función la sustituimos rotando la semilla. Este movimiento y la geometría de la superficie reflejante del horno (ver capítulo 2) permiten mantener una temperatura casi constante, en la interface generada entre el material solidificado y el fundente. Además, otro interés de que esté presente el mecanismo de rotación en el horno es para producir muestras cilíndricas de diferentes diámetros, donde el tamaño dependerá de la velocidad angular del cristal en crecimiento.

Antes de empezar a describir el sistema de rotación, diremos que el dispositivo electrónico del motor a pasos utilizado para el movimiento de rotación, es exactamente igual al que se utiliza para el movimiento de elevación. Por lo tanto, sólo nos enfocaremos a mencionar las características del motor a pasos y del sistema mecánico encargado del movimiento rotatorio, aunque de todos modos en la figura 3.9 mostramos un diagrama a bloques del sistema completo.

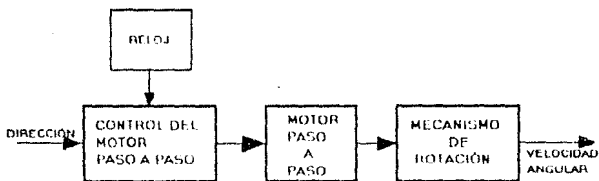


Fig. 3.9 Diagrama a bloques del sistema de rotación.

MOTOR PASO A PASO

Este motor es más pequeño en cuanto a paso, tamaño y potencia que el utilizado en el movimiento de elevación, pero también es de los llamados híbridos de imán permanente. Sus características eléctricas son:

- A) Cuatro fases y un común (5 hilos).
- B) 100 pasos por revolución (paso completo).
- C) Angulo de paso: 3.6 grados.
- D) Error de paso: menor del 5 %.

- E) Resistencia por fase: 75Ω .
- F) Corriente por fase: 0.15 Amp.
- G) Voltaje nominal d.c.: 12 Volts.

MECANISMO DE ROTACION

Este mecanismo, al igual que el de elevación, también se caracteriza por ser sencillo y de bajo costo; las velocidades angulares mínima y máxima que se pueden obtener son de 0.2 rev/seg hasta 3.3 rev/seg respectivamente (ver apéndice b). Las partes que integran este pequeño dispositivo son:

- A) Un engrane matriz de 11 dientes acoplado al eje del motor a pasos y otro engrane (llamado B) de 135 dientes que está acoplado al eje secundario de rotación.
- B) Eje de rotación primario, eje de rotación secundario, balero y un cople.

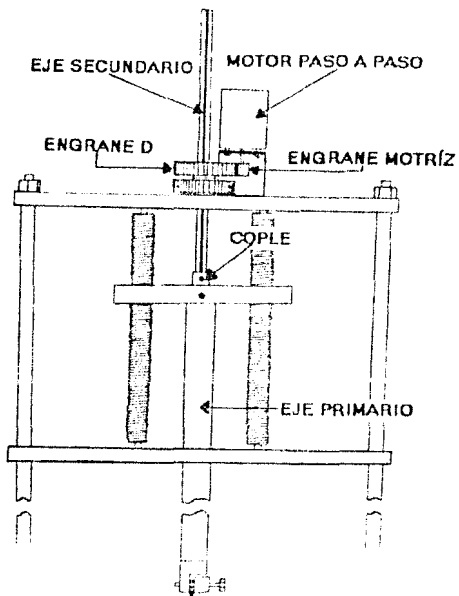


Figura 3.10 Sistema mecánico que tiene la función de rotar la semilla.

En la figura 3.10 se presenta el arreglo de este mecanismo, en donde se observa que el eje de rotación primario y el secundario están unidos por medio del cople, de esta manera parece como si estos ejes fueran una sola pieza. El cople está empotrado al balero y este, a

su vez, está empotrado rigidamente a la plataforma de elevación para que ambos suban o bajen junto con la plataforma. El balero en este caso, permite que el eje gire libremente.

Por otro lado, como se requiere que estos movimientos no interfieran entre sí, fue necesario que el eje secundario sea de sección transversal cuadrada, de esta forma el movimiento se transmite al eje por medio del engrane U y además puede deslizarse con libertad a través del mismo. El eje primario es de mayor longitud porque en el extremo inferior tiene una pieza portasemillas, la cual debe estar dentro del horno para llegar hasta donde se encuentra el crisol. Finalmente, en la figura 3.11 presentamos el arreglo completo para mostrar la forma como quedaron acoplados los dos mecanismos.

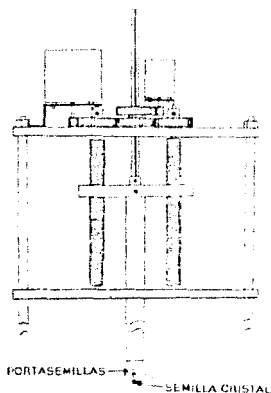


Figura 3.11 Aquí se presenta el sistema mecánico completo que produce el desplazamiento hacia arriba y que rota la semilla.

REFERENCIAS

- [1] Texas Instruments. Manual de Semiconductores de Silicio, 2a. ed.
(1978) pág. 128-129.
- [2] Signetics Logic-TTL. Data Manual (1978).
- [3] National Semiconductor Corporation. Linear Databook (1982)
pág. 933-938.
- [4] Byte Publications Inc., A Stepping Motor Primer, Febrero (1979).
- [5] Byte Publications Inc., Taking the First Step, Febrero (1978).
- [6] Hill, Fredrick J. and Peterson, Gerald R., Introduction to switching
Theory and Logical Design, (1974).
- [7] Taylor L.Booth, Digital Networks and Computer Systems, (1971).
- [8] Gille, Decaulne y Peligrin, Servo Sistemas Teorta y Cálculo, (1970).
- [9] Thomas P. Sifferlen, Digital Electronics with Engineering
Applications, (1970).

CAPITULO 4

CONTROLADOR DE TEMPERATURA PARA EL HORNO.

Los tratamientos termicos a los que se someten los cristales, sea para recocido, difusión de impurezas o, como en nuestro caso, el crecimiento de cristales, son especialmente delicados ya que es la temperatura la variable determinante para conseguir el objetivo del tratamiento.

Para lograr el crecimiento de un cristal hace falta que la temperatura sea lo más estable posible, es decir, no debe de cambiar a pesar de las inevitables variaciones de otras variables. El grado de estabilidad en la temperatura depende del proceso particular, tendrá que tomarse en cuenta si este tiene duración corta o larga. (se puede crecer un cristal en unas pocas horas o tal vez requiera de semanas).

Las variaciones principales que pueden afectar la temperatura dentro del horno son: la temperatura del medio ambiente, la temperatura del agua de enfriamiento, el gasto de agua, la cantidad del fundente que se sublima, el voltaje de alimentación del calefactor, etc. Por lo antes dicho resulta indispensable controlar la temperatura del crisol y por consiguiente la del fundente.

El punto siguiente por definir son los límites dentro de los cuales funcionara el horno. Los valores límites de aplicación del horno y consecuentemente los del controlador, son $T_{\min} = 100\text{ C}$ y $T_{\max} = 900\text{ C}$ La fluctuación máxima aceptable para el crecimiento de cristales para una temperatura definida dentro de los límites establecidos es de $\pm 1\text{ C}$. A partir de los requerimientos mencionados se hizo la elección del tipo de circuito que reuniera las características de estabilidad, factibilidad técnica y costo.

Antes de analizar el controlador que empleamos, hagamos un análisis del comportamiento del horno sin ningún medio de control. Esto es, coloquemos el material a crecer en el crisol, cerremos el horno, instalemos el termopar y conectemos a la línea el foco calefactor. Después de un tiempo t desconectemos la lámpara y esperemos hasta un tiempo t' . Si graficamos la temperatura en función del tiempo la respuesta como podemos ver es logarítmica creciente cuando la lámpara está conectada y logarítmica decreciente cuando se desconecta (ver figura 4.1) lo cual concuerda con la bien conocida ley de enfriamiento de Newton. Conociendo el comportamiento del horno como sistema térmico sin control podemos ahora desarrollar un mecanismo de regulación, es decir un controlador de temperatura.

Existen dos grandes clases de controladores: A) de control continuo o proporcional y B) de control discreto o discontinuo.

Los de control proporcional esencialmente modifican su salida (energía) de acuerdo con una cierta ley de proporcionalidad, aplicada a la diferencia de la temperatura que debemos obtener y la temperatura que efectivamente tenemos dentro del horno. En función de la ley de proporcionalidad que afecta la respuesta del sistema se puede hacer una lista de los distintos tipos de control de esta clase.

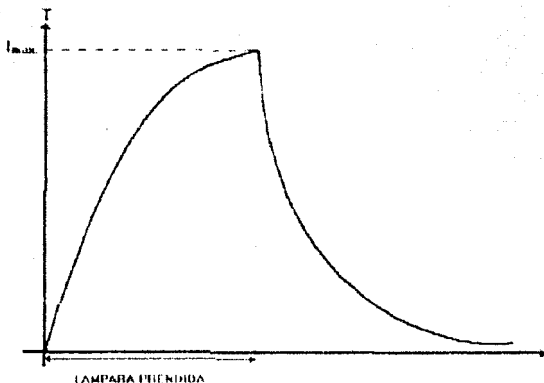


Fig. 4.1 Variación de la temperatura contra tiempo para un sistema (crisol) que intercambia calor con su medio ambiente.

Los de control discontinuo llevan acabo una comparación de la temperatura que deseamos y la temperatura medida, y actúan solo de dos maneras, a saber:

Si la temperatura es menor que la debida, se aplica energía al sistema térmico, si la temperatura medida es igual o mayor que la debida se interrumpe la energía. Esto quiere decir que no hay graduación en la cantidad de calor que se suministra, es todo o nada. De estas dos formas de mantener la temperatura en un valor constante, la más simple es la segunda y dependiendo de las necesidades, puede ser la más adecuada.

DISEÑO DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA.

Una vez más tenemos que efectuar una confrontación entre lo deseable y lo posible; existen sistemas controladores de temperatura capaces de mantener temperaturas de 1000 °C con una variación de ± 1 °C. Es claro que la complejidad y costo de los materiales para construirlo lo harían inalcanzable en este momento, por lo que consideramos perder algo de exactitud en aras de estar en la posibilidad de construirlo.

El controlador de temperatura que construimos es el ON-OFF (todo-nada) simple. El plan es construirlo con un circuito de cruce por cero para evitar los inconvenientes de la conmutación a voltajes elevados, se construyó este controlador y se observa que la respuesta es altamente satisfactoria, por lo que no se creyó necesario modificarlo.

Analizando el sistema térmico nos damos cuenta que la eficiencia de la lámpara es alta y dada la alta reflectividad de la pared esférica, las pérdidas son bastante pequeñas. Por otro lado, al efectuar el experimento a baja presión, favorece la estabilidad de la temperatura ya que las pérdidas por convección son muy pequeñas. El circuito del controlador de temperatura se presenta en la figura 4.2.

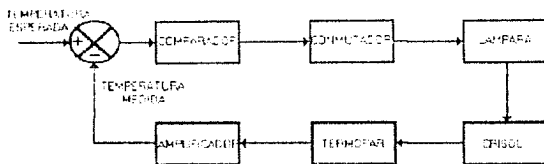


Fig. 4.2 Diagrama de bloques del controlador.

Tenemos una variable que controlamos a nuestra voluntad entre 100 y 900 grados centígrados, esta es la temperatura esperada T_e . Ajustamos esta T_e variando un resistor y una vez ajustada y encendido el controlador se obtiene la diferencia de T_e y la temperatura del crisol T_m . Al inicio del proceso $T_e > T_m$ por lo que el comparador envía una señal de cerrar el conmutador, se enciende la lámpara y calienta el crisol, el termopar hace llegar al inicio el incremento de temperatura. La lámpara continuara encendida mientras se conserve la condición mencionada ($T_e > T_m$). Al llegar T_m a igualar o superar a T_e , es decir $T_e < T_m$, el comparador envía una señal de abrir el conmutador, la lámpara se apaga, el crisol aumenta todavía un poco más su temperatura, debido a la inercia térmica del sistema, y empieza a disminuir, el comparador supervisa continuamente la temperatura. Al bajar nuevamente de T_e , el comparador vuelve a cerrar el conmutador y el ciclo se repite.

CIRCUITO ELECTRONICO.

Nuestro circuito consta de varias partes, como se puede ver en la figura 4.2 donde se puede muestra el diagrama de bloques:

El termopar que se utilizo, como sensor de temperatura, es del tipo K (vea apéndice C). Tiene un coeficiente Seebeck de aproximadamente $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ lo cual hace necesaria una primera amplificación de voltaje.

AMPLIFICADOR

Las temperaturas de trabajo están entre 100 °C y 1000 °C por lo tanto los voltajes del sensor estarán entre 4 mV y 40 mV. Amplificamos 100 veces este voltaje del termopar y así tendremos voltajes de 0.4 a 4 volts que comparados con las variaciones de los componentes activos es 100 veces mayor. También, de esta forma contamos con una mayor resolución y menor error por variación de la deriva termica y del offset de voltaje y de corriente.

Este amplificador emplea la configuración diferencial para eliminar los ruidos que afectan al termopar. Como sabemos, la configuración diferencial tiene un alto rechazo a señales comunes, así que solo se manifiestan en sus terminales las debidas a la temperatura (ver figura 4.3).

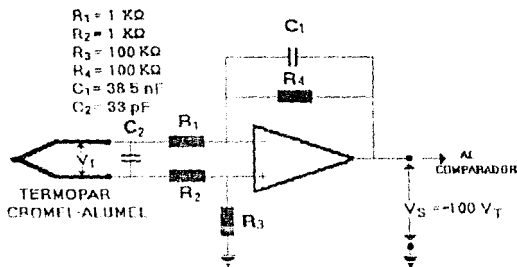


Figura 4.3 Amplificador para el termopar.

El capacitor C_1 tiene por objeto disminuir el ancho de banda de paso. Es un filtro pasa bajo que elimina las altas frecuencias que pudiera captar el termopar.

No debe de extrañarnos que en pruebas de laboratorio con ruido simulado (artificial o buscándose los peores casos) se observen en las extremas del termopar señales hasta de 60 volts pico pico; estos parasitos son mas de 1000 veces mayores que las señales utiles las cuales llegan a valer, según la temperatura, unos cuantos milivolts. Para reducir las señales parasitas de nuestro circuito se colocaron dos capacitores; el primero denotado como C_1 es para eliminar las señales parasitas generadas en el termopar; el capacitor C_2 reduce el ancho de banda del amplificador operacional y disminuye el efecto de las señales no deseadas cuyas frecuencias estén por arriba de la frecuencia de corte. En la figura 4.4 mostramos la gráfica del ancho de banda contra la frecuencia; en este caso f_1 y f_2 son las frecuencias de corte y de ganancia unitaria respectivamente. Estas se calculan por medio de la impedancia capacitiva que se expresa de la siguiente manera

$$f = \frac{1}{2 \pi X_C C} \quad (4.1)$$

por lo tanto, las frecuencias de corte y de ganancia unitaria se obtienen cuando la impedancia capacitiva X_C se sustituye por los valores R_4 y R_1 en la ecuación 4.1. Por consiguiente, como $R_4 = 100 \times 10^3$ ohms, entonces la frecuencia de corte f_1 tiene el valor de

$$f_1 = \frac{1}{2 \pi \times 100 \times 10^3 \times 385 \times 10^{-9}}$$

$$= 41.3 \text{ Hz}$$

y si X_C es igual a $R_1 = 1 \times 10^3$ entonces f_2 es,

$$f_2 = \frac{1}{2 \pi \times 10^3 \times 38.5 \times 10^{-9}}$$

$$= 4134 \text{ Hz}$$

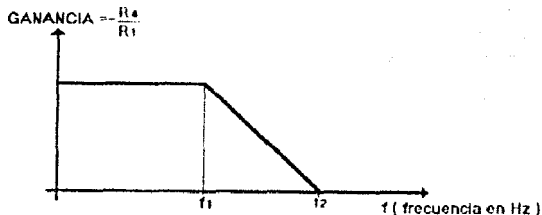


Figura 4.4 Gráfica del ancho de banda del primer amplificador operacional: f_1 y f_2 son las frecuencias de corte y de ganancia unitaria respectivamente.

A partir de esta frecuencia la ganancia de cualquier señal es menor que la ganancia unitaria, lo cual es bastante favorable dado que la señal útil es de muy baja frecuencia respecto a las frecuencias de las señales parasitas. Por lo tanto, el efecto de éstas se considera casi nulo. Uno de los detalles que hay que señalar, es que los extremos del termopar están colocados en el amplificador de tal manera que el voltaje diferencial visto en sus entradas sea positivo; esto trae como consecuencia que el voltaje en la salida de éste sea negativo.

COMPARADOR

Con la señal del termopar ya amplificada, estamos en la posibilidad de procesarla en el paso siguiente, este es el comparador (en el diagrama de bloques es el círculo donde llegan las señales de temperatura)

El comparador efectúa una simple diferencia entre el voltaje de referencia V_R (temperatura esperada) y el voltaje del termopar V_T (temperatura medida en el crisol). Tiene esta condición para su salida:

$$V_S = 0 \text{ volts} \quad \text{si} \quad V_R < V_T$$

$$V_S = +15 \text{ volts} \quad \text{si} \quad V_R > V_T$$

El circuito comparador se ve en la figura 4.5.

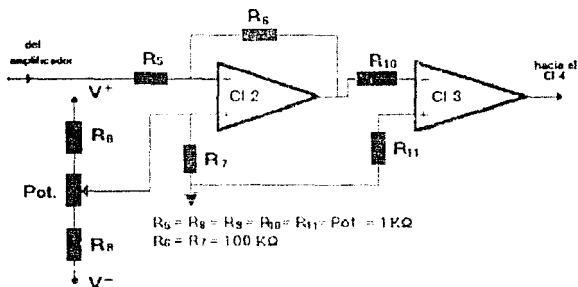


Figura 4.5 Comparador de voltaje; la temperatura de estabilización se selecciona por medio del potenciómetro.

La comparación se realiza al cotejar los voltajes entre las entradas del amplificador CI2, como sabemos, mientras la temperatura no alcanza el valor prefijado, el voltaje en la entrada inversora es menor respecto al de la no inversora, por consiguiente, el amplificador operacional ve un voltaje diferencial negativo entre sus entradas y por lo tanto el voltaje de salida es positivo alcanzando rápidamente la saturación. Para el caso contrario, cuando el voltaje en la entrada inversora rebasa el valor del voltaje prefijado de la entrada no inversora, la diferencia de potencial en las entradas del amplificador será ahora positivo, por consiguiente, el voltaje en la salida de este es negativo y se satura rápidamente.

Este diseño por sí solo tienen algunos inconvenientes. Primero, puede ser sensible a señales parásitas de baja energía cuando la temperatura está próxima al valor seleccionado; efecto de ello, es que se transmiten ordenes de conexión y desconexión en un corto periodo de tiempo, provocando inestabilidades en la temperatura. El otro inconveniente es cuando los voltajes en las entradas del CI2 son muy parecidas, en este caso puede suceder que el amplificador no actúe en conmutación pero sí en amplificación provocando también inestabilidad. Dado que la tarea que nos propusimos fue diseñar el circuito más simple que se pudiera, la solución que le dimos a estos problemas, fue la de darle mayor rapidez a la conmutación del comparador. Ésto lo logramos, colocando otro amplificador (CI3) en cascada a lazo abierto para tener la máxima ganancia. Con esta doble amplificación, el tiempo de tránsito en zona de amplificación será mucho más pequeño y por lo tanto se saturará más rápidamente; con esto se logra una mejor respuesta en la conmutación. A la salida del comparador, por razones de acoplamiento de impedancias, fue necesario colocar un seguidor de voltaje (CI4) entre el comparador y el circuito que sirve de interruptor electrónico para accionar la lámpara.

Después del seguidor, como se ve en la figura 4.6, tenemos otro circuito de conmutación que está compuesto por un transistor y un fotoacoplador en integrado, conocido

comercialmente como MOC3020. El transistor funciona en corte y saturación y controla el fotoacoplador, que a su vez controla la compuerta del TRIAC que se encarga finalmente de alimentar la lámpara. También el fotoacoplador es un elemento que nos permite mantener aislada la parte del circuito que requiere de poca energía (amplificadores operacionales) de la que consume bastante, como es el caso de la lámpara, la cual requiere del voltaje de línea; de esta manera, al tocar el circuito, se evita una descarga eléctrica.

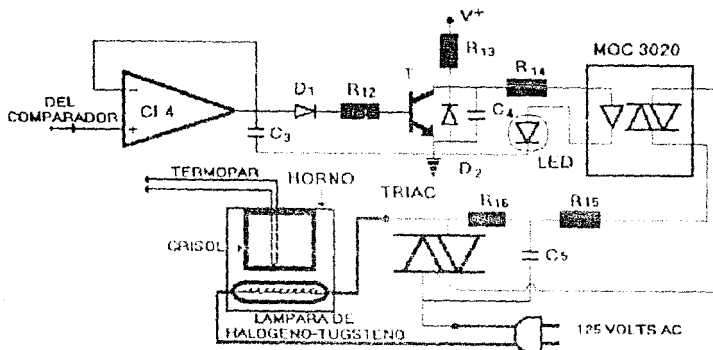


Figura 4.6 Circuito de conmutación que se encarga de accionar la lámpara con el fin de regular la temperatura, este lo consideramos como un interruptor electrónico.

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL CONTROL DE TEMPERATURA

DISPOSITIVO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Para probar el controlador de temperatura primero montamos dos termopares de Cromel-Alumel para sensar la temperatura del crisol tal como se presentará en la figura 4.7. El termopar 1 pertenece al sistema de control y es el encargado de enviar la información a este para que regule la temperatura por medio de interrupciones en la lámpara; el segundo está conectado directamente a una graficadora X-Y marca PHILIPS mod. PM8043 con motor de gráfica PM9022 y su función es la de registrar los cambios de voltaje al transcurrir el tiempo. Los termopares se contruyeron por el método descrito en el apéndice C y se montaron en las ventanillas del horno, procurando aislarlos de la parte metálica con plastilina epoxica. Además, dado que las mediciones que se realizaron fueron aproximadamente a una presión de 10^{-3} Torr, que es el vacío que produce una bomba mecánica común, la plastilina sirve como sellador y aislante.

Una vez montadas las termopares se conectó la bomba y nos esperamos 15 minutos; revisamos si no había entradas de aire para mantener una presión baja y constante. La graficadora se ajustó a 5 mV por cada centímetro en el eje vertical y 0.5 cm por cada minuto, para el eje horizontal; conectamos la lámpara de proyector y la graficadora al mismo tiempo para registrar el comportamiento del sistema. Esto se realizó para 9 voltajes de comparación seleccionados con el potenciómetro del comparador, y lo que se obtuvo se presenta en la figura 4.8.

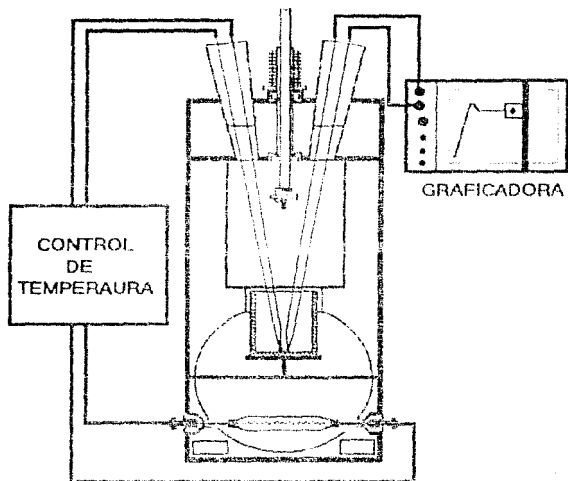


Figura 4.7 Corte transversal del dispositivo utilizado para probar el control de temperatura. El termopar 1 se utiliza como sensor y el 2 se utilizo para registrar las fluctuaciones de temperatura.

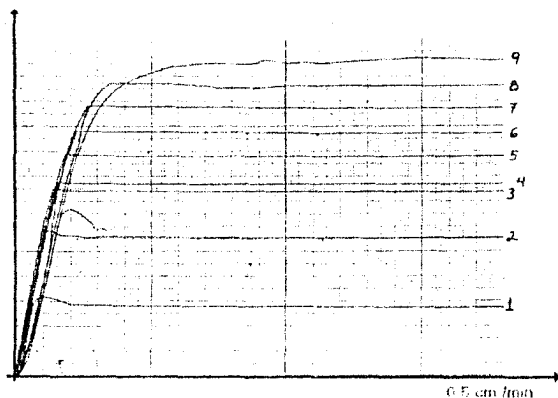


Figura 4.B En la gráfica se muestran 9 curvas de arranque estas nos presentan el tiempo que tarda el horno desde que se conecta el calefactor hasta que llega a la temperatura de estabilización.

La gráfica que se muestra en esta figura corresponde a 9 curvas de voltaje contra tiempo, las cuales consisten en la forma como varía el voltaje del transformador al transcurrir el tiempo. En la gráfica notamos que una vez que se alcanza la temperatura prealeccionada, ésta se sigue incrementando hasta llegar a un máximo y luego baja hasta amortiguarse completamente en la temperatura previamente fija, pero también vemos que este pico es de menor tamaño conforme el voltaje es más grande, lo cual quiere decir que entre mayor sea la temperatura se reduce la inercia térmica del crisol, dado que este efecto es térmico.

Otro detalle ventajoso que hay que hacer notar, es la rapidez de respuesta del sistema; el tiempo que tarda en prender la lámpara hasta que se estabiliza la temperatura, es de 4 minutos para las primeras 5 curvas y no más de 7 minutos para las siguientes 3 curvas. En cuanto a la última curva se refiere, vemos que no alcanza la temperatura seleccionada. Esto es, porque el límite de potencia de la lámpara está por abajo del que se le estaba pidiendo. Por esta razón se observan fluctuaciones generadas por falta de regulación.

CALIBRACION Y DATOS EXPERIMENTALES

Algo que es de primordial importancia en cualquier instrumento, es que esté calibrado. Por consiguiente, para calibrar los termopares utilizamos el método de comparación con otro termopar previamente calibrado y que es el sensor de un termómetro digital marca KETBLEY mod. 871, de esta manera podemos finalmente obtener los datos experimentales para evaluar las temperaturas logradas y las incertidumbres asociadas.

Sin cambiar el dispositivo experimental antes descrito, el tercer termopar se coloca dentro de un tubo de cobre de media pulgada de diámetro. El extremo del tubo, que se introduce dentro del horno y que llega hasta el cruce, está sellado con una lamina delgada del mismo material, la finalidad de esto es proteger el recubrimiento del termopar y evitar entradas de aire a causa de la introducción de este tercer elemento.

Una vez que el dispositivo está listo, nuevamente se prende la bomba y se selecciona un voltaje arbitrario por medio del potenciómetro del comparador, se toma la lectura del termómetro digital (temperatura ambiente para compensar la unión de punta

fria), que es de 21 grados centigrados. Antes de conectar la lampara, ajustamos nuevamente las escalas de la graficadora, quedando ahora en la escala vertical en 2 mV sobre centimetro y la horizontal en 3 cm sobre hora. Prendemos la lampara y esperamos 30 minutos para que el sistema se estabilice, conectamos la graficadora y empezamos nuevamente a registrar el voltaje del termopar 2 en funcion del tiempo. Observamos la lectura del termometro digital y ésta casi no vario en 6 horas de registro.

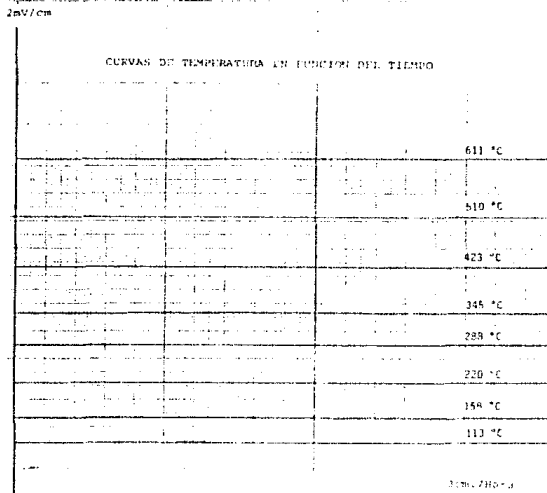


Fig. 4.9 Aquí se muestran 8 registros distintos de la variación de temperatura en función del tiempo. El tiempo empleado para cada uno de los registros es de aproximadamente 6 horas.

En la figura 4.3 se presentan 8 curvas distintas que corresponden a ocho temperaturas, cuyo valor fue tomado del termómetro digital. El siguiente paso es comparar el voltaje de cada línea, medido en la graficadora, y encontrar su equivalente en grados para compararlos con los obtenidos con el termómetro.

En la tabla 4.1, columna izquierda, se muestran los valores tomados en milivoltios con su corrección de unión fría que es de 0.0581 mV y que corresponde a los 23 grados centígrados. En la parte intermedia está su equivalente en grados (tomados del catálogo OMEGA ENGINEERING, INC TEMPERATURE vol. 26 1968 para termopares tipo K) y en el extremo derecho de la tabla se encuentran las lecturas registradas por el termómetro digital.

T A B L A 4.1

VOLTAJE (mv)	EQUIVALENTE EN GRADOS CENTIGRADOS	TEMPERATURA DEL TERMOMETRO DIGITAL
4.638	113	113
6.436	155	158
8.036	197	220
11.766	286	288
14.068	345	345
17.438	433	423
21.936	522	510
25.338	610	611

De la tabla, vemos que para los primeros 5 valores, excepto el tercero, los valores registrados por el termómetro y la graficadora coinciden, mientras que para los 3 últimos existe una desviación de un grado. En cuanto al tercer dato, no encontramos una razón experimental del por que se desvió más que los otros, sin embargo es necesario aclarar todavía cual es el error en las temperaturas de acuerdo con el método utilizado.

El hecho de haber cotejado los valores obtenidos con el termómetro digital y los que se obtuvieron por medio de las tablas del catálogo, nos puede dar una medida del error asociado a la temperatura y por lo tanto, saber si nuestro método de calibración es el adecuado. En primer lugar, sabemos que la escala del eje Y de la graficadora era de 2 mV por cm. Si el papel utilizado es milimétrico, esto quiere decir que se pueden registrar fluctuaciones notorias del orden de 0.2 mV ya que la resolución de la graficadora es de 1 mm. Ahora, si el coeficiente de variación de voltaje-temperatura de un termopar tipo K es de 40 microvolts por cada grado centígrado, entonces la región de variación de temperatura correspondiente a estas fluctuaciones es de 5 grados, aproximadamente. Pero si observamos con detenimiento la gráfica de la figura 4.9, vemos que las fluctuaciones no están por arriba de medio milímetro en ninguna de las líneas. En el peor de los casos, una variación de temperatura de 5 grados es fácilmente registrada por el termómetro, sin embargo, éste no cambió su lectura una vez que el sistema llegaba al equilibrio. Aún considerando una variación de medio mm correspondiente a 2.5 grados o mejor dicho de 1.3 grados de incertidumbre (ya redondeado), el termómetro lo pudo también haber registrado, dado que su mínima lectura es de un grado, sin embargo tampoco lo registró. Por otro lado, si la resolución del termómetro es de un grado y las lecturas tomadas no cambiaron, entonces las fluctuaciones están por abajo de un grado, sin embargo de acuerdo con D.C. BARD en su libro Experimentación (segunda edición pag. 10), un instrumento digital presenta inexactitudes inherentes al proceso de redondear. Por ejemplo, para el primer dato, la lectura del termómetro, es de 113 grados, pero esta lectura es porque el valor real se

acercas mas a 113 que a 114 o 112, debido al redondeo. Por lo tanto, si le asignamos una incertidumbre de 1 grado centigrado al termómetro, nos dan una lectura más confiable en cuanto a la temperatura real del sistema. Por consiguiente, esto nos permite decir que se diseñó un sistema que no presenta variaciones de temperatura que rebasen los dos grados, lográndose de esta forma el objetivo inicialmente planteado.

Con la finalidad de poder ajustar el controlador a la temperatura que debemos trabajar, es necesario tener la curva de calibración. Esta, se obtiene midiendo el voltaje de referencia (voltaje de comparación) y su respectiva temperatura. En la tabla 4.2 presentamos los datos del voltaje de comparación, medidos con un multímetro digital marca PHILIPS mod. PM2507 y su respectiva temperatura tomada con el termómetro digital. Estos datos son los mismos de la tabla 4.1 y otros 6 datos más que no aparecen en ella y que fueron medidos de la misma forma.

T A B L A 4.2

No. de medidas	Temperatura (C)	Voltaje (volts)
1	113	0.4777
2	153	0.6456
3	158	0.6728
4	181	0.8011
5	220	0.9449
6	288	1.2170
7	325	1.3901
8	345	1.4705
9	406	1.7187
10	423	1.7935
11	492	2.072
12	510	2.192
13	611	2.626

La figura 4.10 presenta la grafica de la curva de calibracion y con ella podemos seleccionar, con un resistor variable (potenciometro), el voltaje de referencia para una temperatura de trabajo determinada. La expresion matematica de esta curva esta dada por la ecuacion 4.2, la cual fue obtenida por medio de los llamados minimos cuadrados. Con ello podemos calcular el voltaje de comparacion y asi seleccionar la temperatura a la cual necesitamos trabajar.

$$V = (0.0043 - 0.0001) T + (0.001 - 0.0005) \dots \dots \dots \quad (ec. 4.2)$$

CURVA DE CALIBRACION VOLTAJE vs TEMPERATURA

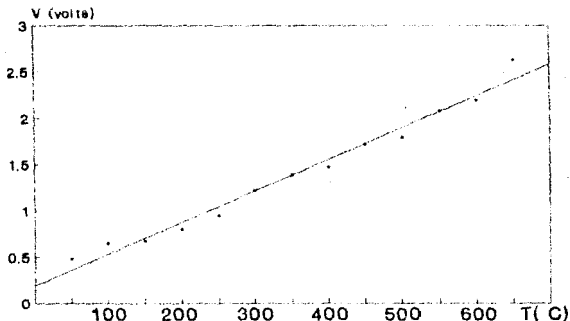


Fig. 4.10 Curva de calibración del controlador de temperatura diseñado.

REFERENCIAS

- [1] Graeme, Jerald G. Designing with Operational Amplifiers. Mc Graw Hill, 1977
- [2] Graeme, Jerald G. Applications of Operational Amplifiers. Mc Graw Hill, 1973
- [3] Wong, Yu Jen and Ott, William E. Function Circuits. Mc Graw Hill, 1976.
- [4] L. Godfrey and Jacob Philip. A temperature controller for crystal growth experiments of long duration. J Phys E: Sci. Instrum. 22 (1989), 518-521
- [5] Malvino, Albert Paul. Principios de electronica. 2da. ed., Mc Graw Hill 1982.
- [6] Baird, D. C. Experimentación Una introducción a la teoría de las mediciones y al diseño de experimentos; 2da ed. Prentice hall, 1991.
- [7] Texas Instruments. The linear control circuits Data Book, 2da. ed 1980
- [8] E. Cabrera, R Espejel y R Toca. Sistema controlador de temperatura. Revista de la sociedad mexicana de física. No. 3. Vol. 26, 1980.
- [9] J. Renedo y J. M. David. Control de temperatura. Serie Mundo Electrónico, Marcombo, SA

CONCLUSIONES

Con las experiencias adquiridas, pensamos que el horno que diseñamos y construimos es de más fácil construcción, que el de espejo elíptico y que puede superar la eficiencia de uno semiesférico.

Como ya se menciona en este trabajo, el horno diseñado presenta características atractivas para el crecimiento de un cristal; se considera que su pared reflectora esférica concentra más eficiente y uniformemente la energía radiante sobre el contenedor. La forma como se diseñó, permite que la limpieza en su interior sea más fácil; también el seccionamiento ayuda a que la carga y descarga de los reactivos a fundir sea fácil y accesible. El horno presenta cavidades que se interconectan con mangueras para que el agua corriente, de una llave común, mantenga al horno a temperatura ambiente. Además, la varilla portadora de la semilla cristal pasa a través de una camisa de enfriamiento, formada por un tubo de cobre con un serpentín enrollado y soldado con estaño; esta, también se conecta a una llave de agua común y consideramos que este arreglo, es suficiente, al menos por el momento, para mantener una diferencia de temperatura entre semilla y el fundente, fundamental para el crecimiento.

Por otro lado, el controlador de temperatura tipo on-off, contribuye a mantener la temperatura en el crisol y no permite inestabilidades mayores de 1 grado centígrado bajo una atmósfera del orden de 10^{-2} torr. El tiempo que se tarda en alcanzar la temperatura seleccionada para el crisol es aproximadamente 7 minutos. Los sensores que se utilizan son termopares tipo k (cromel-alumel) y su función fue tanto de regulación como de registro de temperatura. Además, de

acuerdo con las mediciones que se obtuvieron, las variaciones de temperatura no dependen de la temperatura de operacion seleccionada

Los sistemas de elevacion y rotacion de la semilla se disenaron y se contruyeron de tal forma que su funcion este dentro de los ordenes establecidos por las referencias consultadas; para el de elevacion es de 75×10^{-2} hasta 131 mm/hr y para el de rotacion, es de 0.2 hasta 33 rev/seg. Aunque estos sistemas fueron desarrollados inicialmente para manejar un horno de crecimiento de cristales por el método de Czochralski, se considera que por su facil construccion y precision, pueden resultar apropiadas para incorporarse, juntas o individualmente, a otros arreglos experimentales

Finalmente, se muestra que el equipo para crecer cristales por el método de Czochralski, es sin duda alguna costoso, por lo tanto un laboratorio de docencia no tendria los recursos suficientes para comprarlo. Sin embargo, el dispositivo que se presento en este trabajo nunca perdio la idea de que su diseño y construccion fuera facil y de bajo costo; este ofrece una alternativa atractiva para los laboratorios de docencia. Otra de las cosas que nos motivo en la realizacion de este trabajo fue la idea de despertar el interes de los estudiantes, por el diseño de instrumentos que les permitan desarrollar nuevos experimentos en fisica

Apéndice A

En la mayoría de las aplicaciones de los circuitos secuenciales se requiere almacenar más de un bit de información donde la capacidad de almacenamiento de éstos, en general, se refleja por el número de flip-flop's del circuito. Existen muchos circuitos secuenciales, sin embargo, aquí solo mostramos el diseño que utilizamos para controlar los motores paso a paso.

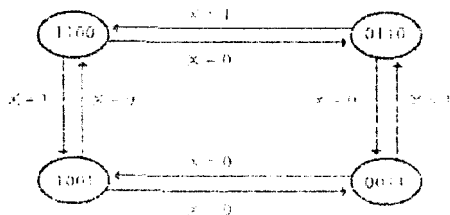


Fig. A.1 Representación de las condiciones eléctricas del motor paso a paso por medio de un diagrama de estados.

El circuito propuesto, que es muy común debido a las múltiples aplicaciones en la transferencia de información secuencial. Es un registro de corrimiento bidireccional de 4 bits con entrada y salida en paralelo. Empezaremos a describirlo. Las condiciones eléctricas del motor a pasos (ver tabla 3.1) se pueden representar por medio de un diagrama de estados como el que se muestra en la figura A.1. De

acuerdo a este diagrama, los cuatro estados cuentan con cuatro bits de información, así que por cuestiones de diseño se requiere de cuatro flip-flop's para que concuerde con el número de fases del motor. Estos, pueden ser de cualquier tipo, pero por la sencillez de su ecuación de transferencia se seleccionó el tipo D.

Los flip-flop's tipo D operan básicamente trasladando la información presente en la entrada D, a las salidas Q y \bar{Q} cuando el reloj realiza una transición positiva, es decir, cuando pasa de bajo a alto. En particular, el circuito integrado que utilizamos es el SN7474 (TTL) que se caracteriza por tener dos flip-flop's tipo D con set S y reset R asincrónicos y que pueden operar independientemente de la entrada del reloj. La forma como opera este circuito integrado se encuentra en la Tabla A.1, la cual será útil posteriormente, para explicar las condiciones de carga (estado inicial) y de la forma como opera el corrimiento del registro.

T A B L A A.1

MODO DE OPERACION	ENTRADAS			SAIDAS		
	S	R	C_p	D	Q	\bar{Q}
SET ASINCRONO	0	1	x	x	1	0
RESET ASINCRONO	1	0	x	x	0	1
CARGA EN (1) SET	1	1	↑	1	1	0
CARGA EN (0) RESET	1	1	↑	0	0	1

X	t_n				t_{n-1}				t_n			
	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	D_3	D_2	D_1	D_0
0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1

Figura A.2 Tabla de transiciones para un registro de corrimiento bidireccional de 4 bits con flip-flop's tipo D. La variable x establece la dirección de corrimiento.

La información del diagrama de estados la trasladamos a una tabla de transiciones (ver figura A.2). En esta, se muestra el proceso conveniente para que el registro sólo permita la información de los cuatro estados que se necesitan y eliminamos los no convenientes. También existe una variable extra que se denotó por la letra X y que sirve para el cambio del sentido de corrimiento del registro.

Por otro lado, el valor de las entradas D_j se calcula por medio de la ecuación de transferencia, la cual para un flip-flop tipo D es:

$$Q^{n+1} = D^n \quad (A.1)$$

Notese que el valor que tiene cada entrada para un tiempo t_n , es conocido dado que se conoce el valor de cada una de las salidas para un tiempo t_{n+1} . Esto es, porque estas están relacionadas con las condiciones electricas del motor paso a paso.

Una vez determinada la tabla de transiciones, lo siguiente es encontrar las funciones booleanas para las entradas D_0 , D_1 , D_2 y D_3 . Existen varias tecnicas de manipulacion algebraica para llegar a ellas, sin embargo, utilizamos una herramienta matematica muy util del diseno logico llamada mapas de Karnaugh. La ventaja de este método consiste en la obtencion de funciones ya simplificadas o minimizadas por medio del agrupamiento de la funciones puestas en los mapas; esto definitivamente es mejor que estar manipulando expresiones booleanas y utilizando sus teoremas. La forma como se obtiene la funcion D_0 la desarrollaremos a continuacion, y para evitar repeticiones solo daremos el resultado de las funciones D_1 , D_2 y D_3 , dado que éstas se obtienen exactamente de la misma forma que D_0 .

FUNCION D_0 POR MAPAS DE KARNAUGHT

El arreglo del mapa de Karnaugh para D_0 se ilustra en la figura A.3 y la forma como se obtiene es como sigue; primero todos los valores correspondientes a D_0 de la tabla de transiciones, se acomodan en el mapa de tal manera que concuerden en la celda que les corresponde. Por ejemplo, el primer valor de D_0 es cero y corresponde al estado 01100 al tiempo t_n (ver figura A.2), por lo tanto, este debe de colocarse en la interseccion de la primer columna y el tercer renglon del mapa, ya que, en esta celda $X = 0$, $Q_3 = 1$, $Q_2 = 1$, $Q_1 = 0$ y $Q_0 = 0$. Haciendo lo mismo para sus demás valores, el mapa queda como el de la figura A.3. Las celdas

restantes pertenecen a estados prohibidos y que no son de interés para el diseño de este registro. Sin embargo, por conveniencia se les utiliza para darles el valor más adecuado (en este caso es uno lógico por conveniencias de diseño), para obtener máxiterminos con el mayor número de celdas posibles y así determinar la expresión más simple de D_0 .

		$Q_1 Q_0$			
		0 0	0 1	1 1	1 0
$Q_3 Q_2$	0 0			1	x
	0 1			x	x
	1 1	0		x	x
	1 0		0	x	x
	0 0	x	x	x	x
	0 1	1	1	x	x
	1 0				0
	1 1			0	

Figura A.3 Arreglo por medio de mapas de Karnaugh para determinar la función D_0 .

Según las reglas de Karnaugh el número de celdas para los máxiterminos debe ser consistente con la potencia 2^n , donde $n = 1, 2, 3, 4, \dots$. Ahora si se colocan 1's como lo muestra la figura A.3, vemos que existen dos máxiterminos denotados por M_1 y M_2 , los cuales constan de ocho celdas cada uno y que son consistentes con la potencia, dado que

$$\text{si } n = 3, \text{ entonces } 2^n = 8.$$

Para saber el valor de M_1 , siguiendo el método, se tiene que las variables Q_2 , Q_2 y Q_3 se eliminan por ocupar celdas adyacentes quedando solamente las variables X y Q_1 con valores de cero y uno respectivamente. Por lo tanto esto queda expresado como sigue

$$M_1 = XQ_1 \quad (A.2)$$

De la misma manera, en el segundo maxtérmino, solo quedan las variables X y Q_3 , ambos con valor 1 y la expresión resultante es

$$M_2 = XQ_3 \quad (A.3)$$

Finalmente, la expresión para D_0 se determina sumando los dos maxtérminos dando como resultado

$$D_0 = M_1 + M_2 = XQ_1 + XQ_3 \quad (A.4)$$

Siguiendo los mismos pasos se obtienen las ecuaciones para D_1 , D_2 y D_3 las cuales son

$$D_1 = XQ_2 + XQ_0 \quad (A.5)$$

$$D_2 = XQ_3 + XQ_1 \quad (A.6)$$

$$D_3 = XQ_0 + XQ_2 \quad (A.7)$$

Las representaciones por medio de elementos de decisión o compuertas lógicas de las ecuaciones (A.4), (A.5), (A.6) y (A.7) se ilustran en la figura A.4. Se puede observar la gran similitud existente entre ellas dado que tienen el mismo tipo y número de compuertas; este hecho permite que su construcción sea más fácil en cuanto a la selección de los elementos de decisión que deben de llevar las entradas de los flip-flop's.

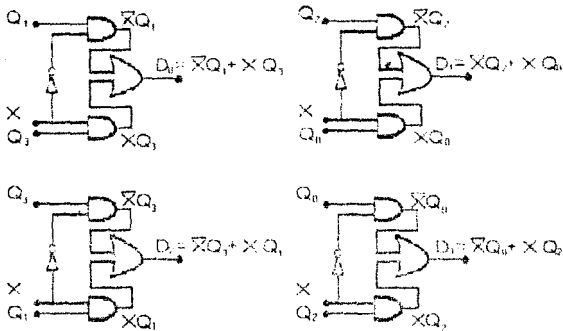


Figura A.4 Representación de las funciones D_0 , D_1 , D_2 y D_3 por medio de elementos de decisión.

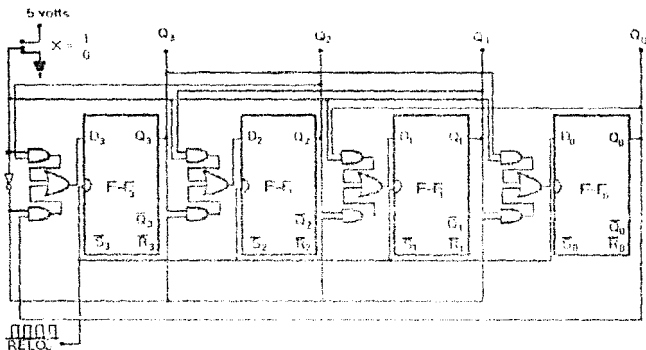


Figura A.5 Diseño del registro de corrimiento, sin condición de carga inicial.

Una vez que se determinaron estas funciones, el registro de conteo diseñado se muestra en la figura A.5. En esta se presenta la forma como quedan interconectados los flip-flop's con sus respectivos elementos de decodificación. Este arreglo, está todavía incompleto porque le falta la condición inicial, esta, la cual seleccionamos de los cuatro estados posibles y no debe de cambiar bajo circunstancia alguna cada vez que inicie su funcionamiento el registro.

Condición inicial para el registro de conteo

a)

\bar{S}_3	\bar{R}_3	\bar{S}_2	\bar{R}_2	\bar{S}_1	\bar{R}_1	\bar{S}_0	\bar{R}_0
0	1	0	1	1	0	1	0
$Q_3 = 1$		$Q_2 = 1$		$Q_1 = 0$		$Q_0 = 0$	

PARA
 $t = t_0$

b)

	\bar{S}_3	\bar{R}_3	\bar{S}_2	\bar{R}_2	\bar{S}_1	\bar{R}_1	\bar{S}_0	\bar{R}_0
	1	1	1	1	1	1	1	1
	Q_3		Q_2		Q_1		Q_0	
t_1	1		1		0		0	
t_2	1		0		0		1	
t_3	0		0		1		1	
t_4	0		1		1		0	
t_5	1		1		0		0	

PARA
 $t_1 > t_0$

Figura A.6 a) Condiciones de las variables S_i y R_i para el estado inicial. b) Condiciones para el conteo una vez establecido el estado inicial.

El estado inicial seleccionado es

$$Q_3 Q_2 Q_1 Q_0 = 1100$$

Para que el registro inicie siempre en este estado, se necesitan dar las condiciones convenientes que se muestran en la tabla A1. En esta, se ve que la salida Q de un flip-flop tipo D, es 1 cuando este se coloca en set asincrónico; en caso contrario la salida es 0 cuando está en reset asincrónico. Por lo tanto, para tener el estado inicial, los flip-flop's 3 y 2 se colocan en set asincrónico y los flip-flop's 1 y 0 en reset asincrónico. Hasta aquí, se ha resuelto el problema de la condición inicial ahora queremos que el registro inicie su corrimiento una vez que carga su estado inicial (ver figura A6 a))

De la misma tabla A1 se muestra que para que cambie de estado el registro de corrimiento, es necesario que las entradas S y R de cada flip-flop tengan 1 lógico antes de que se presente una transición positiva del reloj. Sabemos que inicialmente algunas de ellas se encuentran en cero para establecer el estado inicial, por lo tanto, es necesario colocar un circuito que durante un tiempo corto (menor al tiempo entre cada transición positiva de reloj), cambie las condiciones de las entradas S y R de carga (estado inicial) el de corrimiento (ver figura A6 b)). Este problema se resuelve de dos maneras, una es utilizando compuertas lógicas y la otra, (que es por la que obtenemos) aprovechando la carga de un capacitor en un circuito RC en serie como se muestra en la figura A7.

Primero vamos a encontrar la ecuación de carga del capacitor en estado transiente, para que quede clara la manera como se uso este circuito. Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff en un circuito RC en serie, nos da

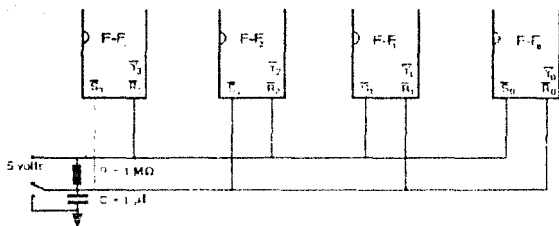


Figura A 7 Condiciones de carga y corriente para el registro dadas por un circuito RC.

$$\begin{aligned}
 V_0 &= V_R + V_c \\
 &= iR + 1/C \int i dt
 \end{aligned}
 \tag{A.8}$$

derivando respecto al tiempo queda

$$0 = di/dt R + 1/C i
 \tag{A.9}$$

Esta es una ecuación diferencial de primer orden homogénea cuya solución es

$$i = K e^{-1/RC t}
 \tag{A.10}$$

Para determinar la constante K es necesario definir las condiciones iniciales. Para ello, hay que considerar que la corriente que pasa por el circuito, es máxima en el

momento en que se conecta la fuente, si el capacitor en ese instante esta descargado, entonces la corriente es

$$i_{\max} = V_0/R \quad \text{para} \quad t_0 = 0$$

sustituyendo estos valores en A.10, entonces

$$K = V_0/R$$

por lo tanto, la corriente como una funcion del tiempo queda expresada en la ecuacion A.11

$$i(t) = V_0/R e^{-t/RC} \quad (A.11)$$

Por otra parte sabemos que la variacion de voltaje respecto al tiempo para un capacitor esta dada como

$$V_c(t) = 1/C \int i dt \quad (A.12)$$

sustituyendo A.11 en A.12 y resolviendo la integral queda

$$V_c(t) = V_0 (1 - e^{-t/RC}) \quad (A.13)$$

Esta ecuacion representa la forma como varia el voltaje en funcion del tiempo, cuando se carga un capacitor. Si esta curva la superponemos en la grafica de las regiones de tolerancia permitidas, tipicas de las circuitos TTL, (ver figura A.6), y determinamos por medio de esta ecuacion el tiempo que tarda en cargarse el capacitor para la cota maxima del 0 logico, encontraremos que este es

si $V_c = 0.5$ volts entonces, $t = 0.1$ seg.

por otro lado, para la cota minima del 1 logico el tiempo que tarda en cargarse es

si $V_c = 2.4$ volts entonces, $t = 0.6$ seg.

Ahora bien, si colocamos la entradas S_1 y R_1 como se muestra en la figura A.7, tenemos que al iniciar el funcionamiento el registro, este cargara el estado inicial aproximadamente en 0.1 segundo y despues, cuando el voltaje del capacitor rebasa los 2.4 volts, se iniciara el corrimiento debido a que las entradas, para este tiempo, estaran en la region de uno logico

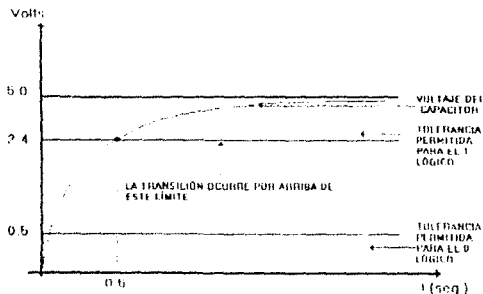


Figura A.8 Superposición de la curva de carga de un capacitor y las regiones de tolerancia de un circuito TTL.

Apéndice B

VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO

La velocidad media de ascenso o descenso de la plataforma de elevación esta dada por la siguiente ecuación:

$$V = X / t \quad (C.1)$$

donde X es simplemente la distancia efectiva recorrida y t el tiempo transcurrido durante esa distancia. Utilizamos la velocidad media porque el desplazamiento es discreto, ya que estamos usando un motor a pasos. Al menos para nuestros fines no nos interesa la velocidad necesaria para pasar de un paso al otro, sino la distancia que recorre y el tiempo transcurrido entre paso y paso.

Para calcular la velocidad media lo primero que necesitamos es determinar de que parametros dependen las variables X y t ; para esto, sabemos que la ecuación que relaciona las velocidades angulares de un tren de engranes y su número de dientes, se expresa de la siguiente manera:

$$\omega_M / \omega_A = N_A / N_M \quad (C.2)$$

En este caso, los subíndices se refieren particularmente a los engranes matriz (M) y al engrane A (ver capítulo 3, figura 3.6). Como sabemos que el número de dientes de estos son 135 y 11 sustituyendo en C.2 y despejando ω_M tenemos:

$$\begin{aligned}\omega_M &= 135 / 11 \omega_A \\ &= 12.27 \omega_A\end{aligned}\quad (C.3)$$

De esta ecuación se deduce que cuando el engrane A realiza una revolución, el engrane M realiza 12.27 revoluciones, independientemente del tiempo. Si consideramos que el motor utilizado es de 300 pulsos por revolución, entonces el número de pulsos necesarios para que el engrane A complete una vuelta es:

$$300 \times 12.27 = 2454 \text{ pulsos o pasos}$$

Por otro lado, se sabe que las barras guía tienen una cuerda de 1 mm/hilo. Con este dato y el resultado anterior calculamos el desplazamiento entre dos pasos consecutivos que lo denotaremos como d_{pp} y es:

$$\begin{aligned}d_{pp} &= 1 \text{ mm} / 2454 \text{ pasos} \\ &= 0.0004 \text{ mm / paso}\end{aligned}\quad (C.4)$$

Este resultado, nos conduce a conocer la distancia que puede realizar la plataforma de elevación cada vez que se tenga una transición positiva del reloj. Esta es constante, a menos que la relación entre los dientes de los engranes cambie o que la cuerda de las barras guía también se cambie. La distancia recorrida entre dos posiciones arbitrarias se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{X} = d_{pp} \times n \quad (C.5)$$

donde n , en este caso, es el número de pasos necesarios entre las dos posiciones. Ya que se determinó una expresión para la distancia X , corresponde ahora determinar la del tiempo. Si recordamos el funcionamiento del reloj (tenemos que para cada transición positiva de este el registro de movimiento cambia de estado. Esta información obliga, desde el punto de vista mecánico, a girar el rotor del motor un ángulo (18 grados, para nuestro caso) la plataforma, a causa de este efecto, sube o baja una distancia igual a una d_{pp} , y no se mueve hasta que el reloj pade otra transición positiva. Por consiguiente, si el tiempo entre dos transiciones positivas es igual al periodo del reloj, entonces, el tiempo que tarda en ir la plataforma entre dos posiciones cualesquiera es:

$$t = T_0 \times n \quad (C.6)$$

donde nuevamente n es el número de pasos. Sustituyendo C.5 y C.6 en la ecuación C.1, tenemos

$$v = \frac{d_{pp} \times n}{T_0 \times n} \\ = d_{pp} / T_0 \quad (C.7)$$

lo cual indica que la velocidad media depende exclusivamente del desplazamiento entre paso y paso y el periodo del reloj. Pero si el d_{pp} es constante, entonces la velocidad solo dependerá del periodo T_0 como lo mencionamos en el capítulo 3 en la parte de control del motor a pasos. Solamente nos queda determinar las velocidades mínima y máxima, las cuales corresponden a los periodos máximo y mínimo respectivamente. A continuación calculamos las velocidades:

VELOCIDAD MINIMA

Si de la tabla 3.2 obtenemos el máximo periodo T_0 y lo sustituimos en la ecuación C.7, tenemos

$$\begin{aligned}V_{\min} &= \frac{0.0004 \text{ mm}}{19 \text{ seg}} \\&= 2.1 \times 10^{-5} \text{ mm / seg} \\&= 7.5 \times 10^{-2} \text{ mm / hr} \quad (C.8)\end{aligned}$$

VELOCIDAD MAXIMA

Si damos el valor para el mínimo periodo la velocidad máxima es

$$\begin{aligned}V_{\max} &= \frac{0.0004 \text{ mm}}{0.0024 \text{ seg}} \\&= 1.6 \times 10^{-1} \text{ mm / seg} \\&= 600 \text{ mm / hr} \quad (C.9)\end{aligned}$$

por consiguiente, el intervalo de velocidades que se puede obtener con este sistema de elevación es desde $7.5 \times 10^{-2} \text{ mm / hr}$ hasta 600 mm / hr .

Hasta aquí solamente se ha tratado la forma como interactúan los engranes motriz y A y del efecto que produce esta interacción sobre la plataforma. Para no tener desequilibrio en el sistema se optó por colocar otra barra que del mismo tamaño y de la misma cuerda, por lo que se hubo la necesidad de colocar otro par de engranes que son el B y C (ver figura 3.6). El primero solo tiene la función de transmitir el movimiento; el segundo gira a la misma velocidad angular y en el mismo sentido que el A, con el fin de que la plataforma suba o baje paralelamente respecto a las patinas y por lo tanto a la misma velocidad.

VELOCIDAD DE ROTACIÓN.

El tren de engranes del sistema de rotación consiste de dos engranes y tienen la particularidad de tener las mismas dimensiones de los engranes motriz y A referidos anteriormente. Para determinar los valores de la velocidad de rotación mínima y máxima, se hace uso de la ecuación C.2, salvo, que hay que cambiar los subíndices; esta queda de la siguiente manera

$$\omega_D = 11 / 135 \omega_M . \quad (C.10)$$

Para conocer la velocidad angular del engrane D por medio de la ecuación C.10 es necesario determinar ω_M . Para encontrarla nos apoyaremos en el hecho de que el motor es de 100 pasos por revolución. Por otra parte, el tiempo que se requiere para una vuelta completa lo podemos conocer a través de la ecuación C.6. Por lo tanto, si el tiempo requerido para una revolución es

$$t = T_0 \times 100 \text{ pasos}$$

entonces, la velocidad angular de ω_M expresada en pasos por segundo es:

$$\begin{aligned} \omega_M &= \frac{100 \text{ pasos}}{T_0 \cdot 100 \text{ pasos}} \\ &= 1 / T_0 \end{aligned} \quad (C.11)$$

Ahora, si sustituimos C.11 en C.10 se tiene

$$\omega_D = \frac{11}{135 T_0} \quad (C.12)$$

Por otro lado, el número de revoluciones por minuto se da mediante la ecuación

$$\text{RPM} = \omega \frac{60}{N} \quad (C.13)$$

donde N es el número de pasos por revolución del motor. Si sustituimos C.12 en C.13 obtenemos

$$\text{RPM} = \frac{11}{135} \cdot \frac{1}{T_0} \cdot \frac{60}{N} \quad (C.14)$$

Por lo tanto, si sustituimos los periodos máximo y mínimo (que también son los mismos que para el caso del movimiento de elevación) obtenemos 1222 y 0.15 revoluciones / minuto respectivamente.

Concluyendo, por medio de las ecuaciones C.7 y C.14 determinamos cualquier valor de velocidad de elevación o de rotación comprendidos entre los rangos calculados. Además, este cálculo solo depende del periodo del reloj, por esta razón decimos que el encargado de controlar las velocidades de desplazamiento y de rotación de la semilla es el reloj.

APENDICE C

CONSTRUCCION DE TERMOPARES TIPO J, K O T

Los termopares son transductores usados como sensores de temperatura que tienen multiples aplicaciones. Con ellos, se pueden medir temperaturas desde unos cuantos grados Kelvin hasta 2500 grados centígrados aproximadamente. Un termopar, consiste básicamente en la union de dos metales distintos que al calentarse se genera una diferencia de potencial (voltaje Seebeck) en la union. A este efecto se le dá el nombre de efecto Peltier.

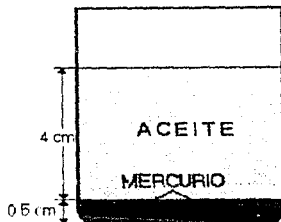
Los termopares se construyen cortando longitudes adecuadas de los dos alambres; los extremos se retuercen o se unen y se sueldan para formar una cabeza redonda y uniforme. Aquí mostraremos una técnica común y sencilla para construir un termopar tipo J, K o T, los cuales son Hierro-Constantán, Cromo-Alumel y Cobre-Constantán.

El material que se requiere para construir un termopar es el siguiente:

- a) Variac de 120 volts ac a 5 Amp.
- b) Vaso de precipitados de medio litro.

- c) Cable de línea con caimanes en los extremos .
- d) 40 mililitros de mercurio
- e) Aceite para carro (entre más denso sea el aceite es mejor)
- f) Alambre para termopar (Cromel-Alumel, Hierro-Constantán o Cobre-Constantán)
- g) Protectores de cerámica para termopares.
- h) Pinzas aisladas para sujetarlos tubos de cerámica.
- i) Alambre de cobre del No. 14

Fig. C 1 Trampa de aceite para vapores de mercurio



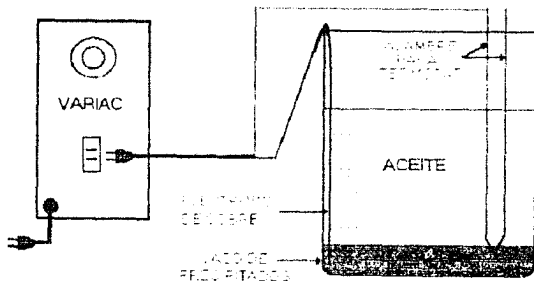


Figura C.2. Dispositivo para soldar los termopares.

Como se muestra en la figura C.1, se pone mercurio en el vaso de precipitados, de tal forma que tenga una altura de 0.5 cm aproximadamente. Después se pone el aceite de carro hasta una altura de 4.5 cm (si la altura es mayor no importa). El aceite sirve como una trampa, para que los vapores de mercurio que se forman en el momento del corto circuito no salgan al medio ambiente.

Los extremos de los alambres para termopar, se retuercen una o dos vueltas para que en el momento de soldar no se separen. En la figura C.2 se presenta el dispositivo que se usó para unir los alambres; como vemos, el cable de línea se conecta al variac. Posteriormente uno de los extremos de este cable se coloca en un electrodo hecho con alambre del No. 14, el otro extremo se conecta a los alambres para termopar. El electrodo se coloca en el vaso de precipitados hasta tener contacto eléctrico con el mercurio y se deja ahí durante todo el proceso. Después, se pone en funcionamiento el variac y se gira la perilla de tal manera que en su salida tenga 20

o 25 volts para termopares de cromo-alumel o 30 o 35 volts para los de cromo-constantán y cobre-constantán. Con las pinzas se sujeta el alambre para termopar (teniendo mucho cuidado de no tocarlo directamente con las manos) se introduce en el vaso de precipitados hasta hacer contacto eléctrico con el mercurio. En el momento del contacto, el circuito se cierra y se produce un chispazo; la temperatura es tan elevada que los alambres juntos se funden formando una cabeza más o menos redonda, el tiempo de contacto con el mercurio es de aproximadamente 1 segundo o menos de ser posible.

La forma de comprobar si el termopar se construye adecuadamente es comparando con otros termopares. Esto se consigue haciendo pruebas de medición de voltaje con el termopar construido y con uno o dos termopares más.

RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD

- 1) Cuidar que el cable de línea tenga en sus extremos carmines con sus protectores de plástico. Esto protege al variac de un posible corto circuito.
- 2) Es necesario utilizar mascarilla de seguridad para no inhalar los vapores de mercurio dado que la trampa de aceite no los consigue atrapar completamente. Hay que recordar que la inhalación del mercurio provoca daños al sistema nervioso y los riñones.
- 3) La volatilización del mercurio que se tira en los pisos agrietados se puede impedir colocando polvo de zinc en las grietas para formar una amalgama. En pisos con superficie lisa se coloca polvo de zinc y aserrín en iguales cantidades, se barren y se entierran en algún lugar.

aislado procurando poner una etiqueta mencionando el contenido e
indicando que es venenoso.